

COMMUNAUTE FRANÇAISE DE BELGIQUE

UNIVERSITE DE LIEGE – GEMBLoux AGRO-BIO TECH

**Performance de l'indicateur *Azote*  
*Potentiellement Lessivable* pour l'évaluation de  
la gestion du nitrate en agriculture et du risque  
pour la qualité de l'eau**

Ir Christophe VANDENBERGHE

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en  
sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs : Professeurs G. Colinet & J.M. Marcoen

Année 2016

Vandenberghé Christophe. 2016. Performance de l'indicateur *Azote Potentiellement Lessivable* pour l'évaluation de la gestion du nitrate en agriculture et du risque pour la qualité de l'eau (thèse de doctorat). Gembloux, Belgique. Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, 222 p., 62 tabl., 84 fig.

### Résumé

Depuis la fin du siècle dernier, la concentration en nitrate dans les eaux souterraines a régulièrement augmenté en Wallonie comme dans d'autres régions d'Europe et singulièrement dans des régions où l'agriculture est pratiquée de manière intensive.

En réponse à ce constat, l'Europe a élaboré en 1991 une directive 'Nitrates' que chaque état membre a transcrite dans sa législation. En région wallonne, cette transcription a pris la forme d'un Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA). Ce programme prévoit entre autres un contrôle des exploitations agricoles par l'analyse du reliquat azoté dans des parcelles, en automne, début de la période de lixiviation du nitrate. Cette mesure est communément dénommée APL pour Azote Potentiellement Lessivable.

L'évaluation du résultat se fait par comparaison à des références établies annuellement sur base d'observations réalisées dans des parcelles où le PGDA est appliqué et qui font l'objet d'un conseil de fertilisation sur base du bilan prévisionnel. En cas de résultats non conformes, l'agriculteur concerné est contraint à un programme d'observation, voire à une sanction financière.

L'objectif de la thèse est d'évaluer la performance de l'APL en tant qu'indicateur agronomique (reflet de la gestion de l'azote pratiquée par l'agriculteur) et environnemental (risque 'nitrate' pour la qualité des eaux souterraines).

Sur le volet agronomique, au travers d'expérimentations ou du traitement de résultats de contrôles APL, il a été démontré que l'indicateur était bien corrélé aux pratiques de fertilisation ainsi qu'à la gestion de l'interculture. La performance de l'indicateur en tant que tel a donc pu être validée. Quelques facteurs d'incertitudes (variabilité intraparcellaire, variabilité temporelle, densité apparente, charge caillouteuse) ont été quantifiés. Enfin, l'influence de propriétés physico-chimique du sol sur l'APL a été étudiée et discutée.

La performance du contrôle APL a également été examinée et des améliorations ont été proposées.

Sur le volet environnemental, grâce à des observations réalisées pendant une dizaine d'années dans des parcelles équipées d'un lysimètre ou à l'échelle d'un petit bassin versant, la dépendance de la concentration en nitrate dans l'eau (base de la zone racinaire ou aquifère) à l'APL a pu être montrée.

Il apparaît donc que l'APL peut être utilisé pour d'une part évaluer la réalité de la mise en œuvre d'une gestion durable de l'azote dans les exploitations contrôlées et d'autre part valider ou le cas échéant compléter le PGDA afin de le rendre plus efficace pour la préservation/restauration de la qualité de l'eau.

---

Vandenberghe Christophe. 2016. Performance of the *Potentially Leachable Nitrogen* indicator for assessing the management of nitrate in agriculture and the risk to water quality (thèse de doctorat in French). Gembloux, Belgium. University of Liege – Gembloux Agro-Bio Tech, 201 p., 73 tabl., 85 fig.

### Summary

Since the end of last century, the nitrate concentration in groundwater has steadily increased in Wallonia as in other parts of Europe, particularly in regions where agriculture is intensively practised.

In response to this, Europe developed a ' Nitrates ' directive in 1991 that each member state had to transcribe in its legislation. In the Walloon region, the transcription took the form of a Sustainable Nitrogen Management Program (PGDA). This program provides among others control of farms through the analysis of nitrate nitrogen soil residue, in autumn, the beginning of the leaching period of nitrate. This measure is commonly referred to as APL for 'Potentially Leachable Nitrogen'.

The results are assessed by comparison to references established annually based on observations in plots where PGDA is applied and where fertilization recommendations are based on nitrogen balance. In case of non-compliance, the farmer has to follow an observation program, or even to pay a fine.

The aim of the thesis is to evaluate the performance of the APL as agronomic (nitrogen management) and environmental indicator (risk to groundwater quality).

On the agronomic side, through experimentations or treatment of field APL controls, it has been demonstrated that the indicator was well correlated with fertilization practices and intercrop management. The performance of the indicator has been validated. Some uncertainty factors (intra-plot variability, temporal variability, bulk density, stone content) were quantified. Finally, the influence of soil physicochemical properties on the APL was studied and discussed.

The performance of the APL control was also discussed and improvements to regulation have been proposed.

On the environmental side, through observations made during a decade in plots equipped with a lysimeter or in a small watershed, the dependence of the nitrate concentration in water (at the base of the root zone or in aquifer) to the APL has been demonstrated.

It therefore appears that the APL can be used to firstly assess the reality of the sustainable nitrogen management in controlled farms and also to validate or, if necessary, complete the PGDA to make it more efficient for water quality preservation / restoration.

### COPYRIGHT

Aux termes de la loi belge du 30 juin 1994, sur le droit d'auteur et les droits voisins, seul l'auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelque façon et forme que ce soit ou d'en autoriser la reproduction partielle ou complète de quelque manière et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation de la dite loi et de ses modifications ultérieures.

## Avant-propos et remerciements

Passer sa thèse à 48 ans, ce n'est pas commun. De jeunes collègues diraient que c'est 20 ans trop tard. Je me demande cependant si ce n'est pas 20 ans trop tôt, tant en rédigeant les perspectives, j'ai eu l'impression d'un travail inachevé. Ce n'était néanmoins guère envisageable d'y consacrer autant d'années, certains de pairs avec qui je tenais à partager ce chemin auraient atteint un âge plus que canonique.

Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour m'avoir permis de m'enrichir au travers de discussions, de partage d'expériences ou lors de voyages.

Merci à Mady, Sylvianne et Nicolas qui, chacun, chacune leur manière, m'ont permis de développer un esprit humaniste.

Pour ses encouragements à initier ma thèse, merci à Jean Marie Marcoen dont la rigueur dans l'écriture et le tempérament frondeur n'ont d'égal que son climat changeant. Merci à Anne-Cécile qui m'a aidé à tenir le bateau à flot lors des tempêtes.

Merci à Gilles pour sa bienveillance, l'intérêt qu'il a témoigné aux ETN<sup>1</sup>, son apport en géostatistique et la confiance qu'il sait témoigner à ses collaborateurs.

Merci à Billo, ses conseils avisés en statistique et sa bonne humeur en font un collègue appréciable au quotidien.

Merci à Florent et Jérémie pour leur efficacité et leur abnégation au travail ainsi que pour l'attention qu'il m'ont toujours porté ... même un soir de repas de Noël !

Au cours de ces seize années passées à Gembloux Agro-Bio Tech, j'ai eu l'occasion de partager des réflexions et de collaborer avec des collègues (ingénieurs et techniciens) de la 'Faculté', de l'UCL, de la Structure d'encadrement Nitrawal, du CRAW, de l'INRA, ... Ces échanges ont certainement contribué à mes travaux et je les en remercie également.

J'ai aussi une pensée pour mes collègues adeptes de la pinte du vendredi à l'AG, lieu où beaucoup de nos projets (scientifiques, démonstratifs ou simplement festifs) ont pris corps. Ces GT (groupe de travail) « Cropcircle », « Bonne Esse », « Arquennes », « Peyresq » ont entretenu mon envie de travailler ensemble. Ne comptant plus nos heures, ils ont cependant parfois basculé en GT « (un peu) bourré » ...

Merci à Joseph qui m'a fait prendre conscience que la terre ne se résume pas à des chiffres sur une feuille, elle est d'abord un substrat aux cultures très concret, très hétérogène, qui vit différemment chaque jour, au gré de la météo et que nous, scientifiques, tentons de décrire par des chiffres, des symboles et des équations.

Merci à mes parents qui m'ont incité et permis de faire ces études d'ingénieur agronome. Leur confiance et soutien dans les moments difficiles ont certainement contribué à ma réussite et mon épanouissement.

Merci à Guillaume, Camille et Antoine, mes trois enfants qui, même s'ils ont parfois l'art de m'énerver, ont donné un sens à ma vie et une certaine motivation à mon travail.

Enfin, *last but not least*, à celle qui a eu le plus à souffrir de cette thèse, Marleen, mon épouse, merci pour son amour et son soutien dans mes nombreuses activités.

---

<sup>1</sup> Eléments Traces Nitriques

---

## Table des matières

<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS .....</b>	<b>17</b>
<b>1 Cycle de l'eau .....</b>	<b>23</b>
<b>2 L'azote .....</b>	<b>25</b>
2.1 Lixiviation de l'azote dans le sol .....	29
2.2 Fertilisation .....	31
<b>3 Objectifs de la thèse .....</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE 2 DÉFINITION DE L'APL, ANALYSE DES ATOUTS ET LIMITES....</b>	<b>35</b>
<b>1 Le reliquat azoté en début de période de lixiviation : APL .....</b>	<b>35</b>
1.1 Définition .....	35
1.2 Echantillonnage .....	35
1.3 Analyse .....	36
1.4 Transformation du résultat analytique en $\text{kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ .....	37
1.5 Contrôle APL .....	37
<b>2 Atouts de l'indicateur APL .....</b>	<b>43</b>
2.1 En liaison avec le risque .....	43
2.2 Transférable .....	45
2.3 Transparent .....	47
2.4 Mesurable .....	48
2.5 Validité analytique .....	48
2.6 Discriminant .....	48
2.7 Pertinence politique .....	49
<b>3 Limites de l'indicateur APL .....</b>	<b>51</b>
3.1 Introduction .....	51
3.2 Variabilité spatiale intraparcellaire .....	52
3.3 Variabilité temporelle de la forme du profil azoté .....	71
3.4 Effet de la teneur en carbone .....	77
3.5 Effet du pH de la parcelle .....	81
3.6 Estimation de la charge caillouteuse .....	82
3.7 Estimation de la densité apparente .....	93
<b>4 Elaboration des références APL annuelles .....</b>	<b>103</b>
4.1 Introduction .....	103
4.2 Matériel et méthode .....	104
4.3 Résultats .....	105
4.4 Conclusion .....	109
4.5 Bibliographie .....	109
<b>5 Evaluation de la méthodologie de contrôle APL .....</b>	<b>111</b>
5.1 Introduction .....	111
5.2 Matériel et méthode .....	111
5.3 Résultats .....	115
5.4 Discussion .....	119
5.5 Conclusion .....	121
5.6 Bibliographie .....	121
<b>CHAPITRE 3 L'APL, INDICATEUR AGRONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL ...</b>	<b>123</b>
<b>1 L'APL, indicateur agronomique de gestion de l'azote .....</b>	<b>123</b>
1.1 Introduction .....	123
1.2 Matériel et Méthode .....	123

1.3	Résultats et discussion .....	127
1.4	Conclusions .....	132
<b>2</b>	<b>L'APL, indicateur environnemental à l'échelle de la parcelle .....</b>	<b>133</b>
2.1	Introduction .....	133
2.2	Matériel et méthodes .....	134
2.3	Résultats et discussion .....	138
2.4	Conclusions et perspectives .....	146
2.5	Bibliographie .....	147
<b>3</b>	<b>L'APL, indicateur environnemental à l'échelle du bassin versant .....</b>	<b>149</b>
3.1	Introduction .....	150
3.2	Matériel et méthodes .....	151
3.3	Résultats et discussion .....	156
3.4	Conclusions .....	164
3.5	Bibliographie .....	166
<b>4</b>	<b>Effet de la teneur en carbone du sol sur l'APL.....</b>	<b>167</b>
4.1	Introduction .....	169
4.2	Matériel et méthode .....	170
4.3	Résultats .....	172
4.4	Discussion et conclusions .....	173
4.5	Bibliographie .....	174
<b>CHAPITRE 4 VALORISATIONS ADDITIONNELLES DE L'APL .....</b>		<b>177</b>
<b>1</b>	<b>Utilisation de l'APL pour un conseil de fertilisation idoine.....</b>	<b>177</b>
1.1	Introduction .....	177
1.2	Méthodologie.....	177
1.3	Résultats à partir de moyennes APL régionales .....	178
1.4	Résultats à partir de données APL à la parcelle.....	179
1.5	Estimation à partir d'observations réalisées au printemps.....	181
1.6	Conclusion.....	182
<b>2</b>	<b>Utilisation de l'APL pour l'évaluation du risque de lixiviation lié à certaines pratiques agricoles ..</b>	<b>183</b>
2.1	Introduction .....	184
2.2	Matériel et méthodes .....	185
2.3	Méthodes .....	186
2.4	Résultats .....	187
2.5	Discussion.....	190
2.6	Conclusions .....	192
2.7	Bibliographie .....	193
<b>3</b>	<b>Extrapolation spatiale et historique de l'APL.....</b>	<b>197</b>
3.1	Introduction .....	197
3.2	Estimation de l'APL moyen autour des années 2010 .....	197
3.3	Estimation de l'APL moyen dans les années nonante .....	202
3.4	Estimation au cours des décennies précédentes .....	205
3.5	Discussion.....	205
<b>CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>		<b>207</b>
<b>1</b>	<b>Acquis de la thèse .....</b>	<b>207</b>
1.1	L'APL, indicateur agronomique et environnemental .....	209
1.2	Extension de l'usage de l'APL .....	212
<b>2</b>	<b>Perspectives.....</b>	<b>213</b>
<b>CHAPITRE 6 BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>215</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1-1. Typologie des indicateurs azotés.....	20
Tableau 1-2. Répartition de l'azote dans les compartiments de la biosphère. ....	26
Tableau 2-1. Classes de cultures et prairie. ....	39
Tableau 2-2. Contrôle APL 2007. Conformité des parcelles en fonction du type de sol. ....	46
Tableau 2-3. Contrôle APL 2008. Conformité des parcelles en fonction du type de sol. ....	46
Tableau 2-4. Contrôle APL 2009. Conformité des parcelles en fonction du type de sol. ....	47
Tableau 2-5. Teneur en azote minéral en kg.ha <sup>-1</sup> dans un profil de 150 cm de sol (Tychon et al., 1990). .....	52
Tableau 2-6. Niveaux de qualité d'un échantillonnage de sol (Fergusson et al., 1991). ....	53
Tableau 2-7. Niveaux Relation densité d'échantillonnage – précision relative de la mesure de concentration en azote (Schimdhalter et al., 1992). ....	54
Tableau 2-8. Relation densité d'échantillonnage – précision absolue de la mesure (Schimdhalter et al., 1992).....	54
Tableau 2-9. Description des résultats N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Poucet).....	59
Tableau 2-10. Relation nombre de mesures/précision par couche de sol pour le paramètre N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Poucet). ....	60
Tableau 2-11. Description des résultats N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Biesmerée).....	64
Tableau 2-12. Relation entre le nombre de mesures et la précision pour le paramètre N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Biesmerée). ....	64
Tableau 2-13. Observations (moyenne et écart type) en fonction du type de sol (Biesmerée) dans la couche 0-60 cm. ....	65
Tableau 2-14. Nombre de points de mesure par couche de sol pour obtenir une précision de 5 kg N- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .ha <sup>-1</sup> (Biesmerée & Poucet).....	69
Tableau 2-15. Signification des codes de profil. ....	71
Tableau 2-16. Observations (novembre) pluviométriques (mm) et de températures (°C) (Source : IRM). ....	72
Tableau 2-17. Répartition de l'azote nitrique dans le profil. Paramètres statistiques. ....	72
Tableau 2-18. Description des résultats d'analyses de teneur en carbone organique et de pH.....	77
Tableau 2-19. Intervalle de confiance de la teneur en carbone organique total en fonction de la classe d'occupation de sol.....	79
Tableau 2-20. Intervalle de confiance de la teneur en carbone organique total en fonction de la qualification du résultat APL. ....	79
Tableau 2-21. Classes texturales des sols minéraux à teneur en EG inférieure à 5 % dans la CNSW. 85	
Tableau 2-22. Classes texturales des sols minéraux à teneur en EG supérieure à 5 % dans la CNSW.85	
Tableau 2-23. Détermination des 4 classes de charge à partir de la table d'attributs de la couche « sol » de la CNSW. ....	86
Tableau 2-24. Proportion des sols agricoles de chaque classe de pierrosité. ....	87
Tableau 2-25. Densités apparentes légales par couche de sol et affectation de parcelle.....	93
Tableau 2-26. Synthèse des mesures de densité dans le Survey Surfaces Agricoles. ....	95
Tableau 2-27. Description des mesures de densité réalisées en prairie.....	98

Tableau 2-28. Synthèse des mesures de densité sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech. ....	99
Tableau 2-29. Comparaison des valeurs ‘légalés’ et des moyennes de densité observées à l’aide d’une gouge. ....	101
Tableau 2-30. Classes de cultures et prairie. ....	104
Tableau 2-31. Synthèse des mesures d’azote potentiellement lessivable (APL - kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles de betterave du Survey Surfaces Agricoles. ....	106
Tableau 2-32. Scénarios possibles. ....	112
Tableau 2-33. Probabilité d’un contrôle initial négatif <i>P</i> <sub>0</sub> , probabilité de sortie du contrôle <i>P</i> (sortie), probabilité de sanction <i>P</i> (sanction) et durée moyenne (année) du contrôle <i>D</i> <sub>moy</sub> , en fonction de la proportion <i>p</i> de parcelles non conformes. ....	118
Tableau 3-1. Paramètres retenus pour la réglette azote colza des régions Champagne, Nord-Picardie. ....	125
Tableau 3-2. Protocole de fumure de l’essai COH2006-05bis. ....	126
Tableau 3-3. Itinéraire phytotechnique de l’essai COH2007-04bis. ....	126
Tableau 3-4. Pesées de végétation du colza, en vue de la détermination d’un conseil de fumure. ....	127
Tableau 3-5. Traitement statistique de la variable rendement de l’essai COH2007-04. ....	129
Tableau 3-6. Rendements de l’essai COH2007-04bis. ....	129
Tableau 3-7. Reliquats d’azote nitrique post-récolte de l’essai COH2007-04bis. ....	130
Tableau 3-8. Traitement statistique de la variable reliquat azoté post-récolte de l’essai COH2007-04bis. ....	130
Tableau 3-9. Traitement statistique de la variable APL de l’essai COH2007-04bis. ....	131
Tableau 3-10. APL de l’essai COH2007-04bis. ....	131
Tableau 3-11. Itinéraires culturaux dans les parcelles équipées d’un lysimètre. ....	136
Tableau 3-12. Bilans hydriques des lysimètres par saison de drainage. ....	138
Tableau 3-13. Résultats des essais d’implantation de CIPAN en interculture courte. ....	145
Tableau 3-14. Quantité d’azote lixivié (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) et concentration moyenne en nitrate dans l’eau de percolation (mg NO <sub>3</sub> -l <sup>-1</sup> ) calculées par SWAT sur les bassins versants d’Arquennes – Amount of leached nitrogen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) and mean nitrate concentration in percolation (mg NO <sub>3</sub> -l <sup>-1</sup> ) predicted by SWAT on Arquennes watersheds. ....	161
Tableau 3-15. Intervalle de confiance de la teneur en carbone organique total en fonction de la qualification du résultat APL. ....	172
Tableau 4-1. Evaluation (médiane, 1 <sup>er</sup> et 3 <sup>ème</sup> quartile) de l’erreur (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) de prédiction du RSH. ....	180
Tableau 4-2. Synthèse des résultats (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> , 0-90 cm) APL dans le Survey Surfaces Agricoles entre 2008 et 2013. ....	187
Tableau 4-3. Synthèse des résultats (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> , 0-90 cm) APL lors du contrôle SPW entre 2008 et 2013. ....	189
Tableau 4-4. Synthèse des mesures de reliquat azoté dans le sol en début de période de lixiviation (APL) pour les scénarios 1 (céréale suivie d’un sol nu en automne) et 2 (céréale suivie d’un semis d’une CIPAN sans apport d’engrais de ferme). ....	190
Tableau 4-5. Superficie des cultures et prairie par région agricole en 2012. ....	198
Tableau 4-6. Proportion de CIPAN par région agricole lors du contrôle 2012. ....	199

Tableau 4-7. APL moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles contrôlées en 2012.....	199
Tableau 4-8. APL moyen total par région agricole. ....	201
Tableau 4-9. Comparaison et moyenne des APL moyens (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) de 2008 à 2012.....	202
Tableau 4-10. Superficie des cultures et prairie par région agricole en 1990. ....	204
Tableau 4-11. APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) moyen par région agricole en 1990 (observations céréales non modifiées).....	204
Tableau 4-12. APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) moyen par région agricole en 1990 (hypothèses en céréales)..	204



## Liste des figures

Figure 1-1. Evolution de la concentration en nitrate dans trois prises d'eau en Hesbaye (Source : SWDE). .....	18
Figure 1-2. Evolution de la concentration en nitrate dans les eaux souterraines (Source : SPW).....	18
Figure 1-3. Diagramme de fréquence des classes d'eaux souterraines (concentrations de nitrate moyennes annuelles) (Source : Commission européenne).....	19
Figure 1-4. Cycle de l'eau adapté de Manning (1997).....	23
Figure 1-5. Bilan hydrique (millions de m <sup>3</sup> ) de la région wallonne d'après Delloye et al. (2011). ....	24
Figure 1-6. Flux d'azote entre les différents compartiments. ....	26
Figure 1-7. Processus de transformation de l'azote dans le sol (Thamdrup, 2012).....	28
Figure 1-8. Evolution au cours du temps de l'azote de l'engrais ( <sup>15</sup> N) apporté sur une culture de colza sous forme minérale, organique dans le sol ou absorbé par la plante.....	29
Figure 1-9. Quantité d'azote lixiviée (simulée et observée). Graphe de gauche : limon sableux peu épais. Graphe de droite : limon épais. (WW = froment d'hiver, WB = orge d'hiver, S = betterave sucrière, P = pois de printemps) (trait pointillé : simulations réinitialisées chaque année, trait plein : simulations continues, triangle : mesures).....	30
Figure 2-1. Carte du Survey Surfaces Agricoles.....	37
Figure 2-2. Graphe de référence APL et interprétation du résultat. ....	40
Figure 2-3. Schéma d'un lysimètre. ....	43
Figure 2-4. Lysimètre P1. Illustration des observations APL – concentration en nitrate de l'eau (Fonder et al., 2010). ....	44
Figure 2-5. Facteurs influençant l'APL d'une parcelle et son estimation. ....	51
Figure 2-6. Lixiviation de l'azote dans une couche de sol de 80 cm d'épaisseur en fonction du type de sol (Vetter H. et al, 1990). ....	53
Figure 2-7. Localisation des sites de Poucet et Biesmerée.....	56
Figure 2-8. Site de Poucet – extrait de la carte IGN 41/2 (1/10.000).....	56
Figure 2-9. Site de Biesmerée - extrait de la carte IGN 53 ½ (1/25.000).....	57
Figure 2-10. Cartes du reliquat et surfaces variographiques pour les couches 0-30; 30-60 et 60-90 cm (site de Poucet). ....	60
Figure 2-11. Variogrammes Est-Ouest (haut), N-S (milieu) et omni-directionnel (bas) de l'APL 0-90cm (site de Poucet). ....	62
Figure 2-12. Cartes de l'APL 0-90cm obtenues par interpolation (distance inverse à gauche et krigage à droite) et surface variographique. ....	63
Figure 2-13. Variogrammes Nord-Sud (haut), Est-Ouest (milieu) et omni-directionnel (bas) de l'APL 0-60cm (site de Biesmerée). ....	66
Figure 2-14. Surface variographique de l'APL 0-60cm (site de Biesmerée). ....	67
Figure 2-15. Carte de l'APL 0-60cm kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .ha <sup>-1</sup> obtenue par krigage (site de Biesmerée).....	67
Figure 2-16. Cartographie de la variance de krigage (gauche) et application d'un cache sur les zones de la carte krigée pour lesquelles la prédiction n'est pas fiable (droite). ....	68
Figure 2-17. Nombre d'échantillons en fonction du reliquat pour une même précision (10 kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .ha <sup>-1</sup> ). ....	70
Figure 2-18. Date moyenne d'échantillonnage et intervalle de confiance. Code 50 - année 2008. ....	74

Figure 2-19. Dates moyennes d'échantillonnage et intervalles de confiance. Code 40 - Années 2008 à 2011.....	75
Figure 2-20. Dates moyennes d'échantillonnage et intervalles de confiance. Code 5030 - Années 2008 à 2011.....	76
Figure 2-21. Proportion de non-conformité par classe d'occupation de sol en 2012.....	80
Figure 2-22. Relation APL - pH KCl. ....	81
Figure 2-23. Définition des symboles des sigles des unités cartographiques.....	84
Figure 2-24. Proportion des sols agricoles de chaque classe de pierrosité.....	87
Figure 2-25. Exemple de rapport établi à l'aide de l'application RequaCarto (Requasud). ....	89
Figure 2-26. Limite des dimensions des EG au sens de la CNSW et selon la mise en œuvre analytique. ....	90
Figure 2-27. Box plot des mesures de densité dans le Survey Surfaces Agricoles .....	95
Figure 2-28. Intervalle de confiance des densités moyennes observées en parcelles de culture. ....	96
Figure 2-29. Comparaison des mesures de densité effectuées dans les parcelles échantillonnées en octobre et décembre.....	97
Figure 2-30. Intervalle de confiance de la moyenne des mesures de densité en prairie.....	98
Figure 2-31. Mesures de densité en prairie en fonction du type de sol. ....	99
Figure 2-32. Box plot des mesures de densité sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech (Gbx) et dans le Survey Surfaces Agricoles (SSA). ....	100
Figure 2-33. Profil moyen du reliquat azoté dans le sol des parcelles de betteraves. ....	106
Figure 2-34. APL de référence pour la classe de culture betterave (A1) en 2011.....	107
Figure 2-35. Médianes des huit classes de cultures/prairies (échantillonnage 0-90cm pour les cultures et 0-30 cm pour les prairies).....	107
Figure 2-36. Evolution de la référence APL pour le maïs entre 2007 et 2011. ....	108
Figure 2-37. Proportions de parcelles non conformes aux différentes dates, en fonction de la proportion moyenne (p) de parcelles non conformes de chaque exploitation agricole. ....	115
Figure 2-38. Probabilité d'un contrôle initial négatif, en fonction de la proportion moyenne (p) de parcelles non conformes de chaque exploitation agricole. ....	116
Figure 2-39. Probabilité de sortie du programme d'observation après les deux années, en fonction de la proportion moyenne (p) de parcelles non conformes dans chaque exploitation agricole.....	116
Figure 2-40. Probabilité de non-sortie du programme d'observation après les deux années en fonction de la proportion moyenne de parcelles non conformes. ....	117
Figure 2-41. Probabilité d'un contrôle initial négatif $P_0$ , probabilité de sortie du programme d'observation $P(\text{sortie})$ et probabilité de sanction $P(\text{sanction})$ en fonction de la proportion $p$ de parcelles non conformes. ....	117
Figure 2-42. Durée moyenne (années) du programme d'observation $D_{moy}$ en fonction de la proportion $p$ de parcelles non conformes. ....	118
Figure 2-43. Probabilité d'un contrôle initial négatif ( $P_0$ ) en fonction de la proportion de parcelles non conformes ( $p$ ) et du nombre ( $n$ ) de parcelles contrôlées. ....	121
Figure 3-1. Précipitations mensuelles, comparaison par rapport aux valeurs normales (période 1950-1989) (Source : CRA-W, 2007).....	124
Figure 3-2. Températures moyennes mensuelles, comparaison par rapport aux valeurs normales (période 1950-1989) (Source : CRA-W, 2007(b)). ....	124

Figure 3-3. Exemple de conseil fourni par la réglette azote colza. ....	124
Figure 3-4. Rendement de l'essai COH2007-04bis.....	128
Figure 3-5. Localisation des lysimètres en Wallonie. ....	135
Figure 3-6. Schéma du lysimètre.....	137
Figure 3-7. Relation entre l'APL mesuré en automne et la teneur moyenne en nitrate dans l'eau de percolation lors de la saison de drainage suivante.....	140
Figure 3-8. Synthèse des mesures et observations, parcelle P1.....	142
Figure 3-9. Impact sur la qualité de l'eau de percolation d'un apport excessif d'azote organique sous forme de compost (parcelle P2).....	144
Figure 3-10. Emplacement des sites de prise d'eau de la SWDE et des bassins pilotes à Arquennes et contexte hydrographique – Water catchments and pilot watersheds localization in Arquennes and hydrographic context.....	151
Figure 3-11. Coupe géologique et hydrogéologique au droit du bassin versant ouest à Arquennes – Geological and hydrogeological section through western watershed in Arquennes. ....	152
Figure 3-12. Diagramme ombrothermique (réalisé à partir des données du 01/01/2000 au 31/12/2008) de la région de Arquennes – Ombrothermic diagram (built from datas from 01/01/2000 to 31/12/2008) of Arquennes area.....	153
Figure 3-13. Carte de localisation des piézomètres dans les bassins versants d'Arquennes – Piezometers localization in Arquennes watersheds.....	154
Figure 3-14. Couverture de sol sur les bassins d'Arquennes – Soil cover on Arquennes watersheds. ....	157
Figure 3-15. Evolution de l'APL moyen mesuré sur les bassins pilotes d'Arquennes entre 2005 et 2009 – Average APL evolution on the pilot watersheds of Arquennes between 2005 and 2009. ....	157
Figure 3-16. Evolution des concentrations en nitrate dans les prises d'eau d'Arquennes (période 2004 – 2012) – Evolution of nitrate concentrations in Arquennes water catchments (from 2004 to 2012). ....	159
Figure 3-17. Courbes de restitution de naphthionate mesurée et simulée à la galerie G6 (essai de traçage en milieu saturé) – Measured and simulated naphthionate restitution curves at G6 catchment (tracing test in saturated area).....	161
Figure 3-18. Lignes de flux contribuant à l'alimentation des galeries G3 (en bleu) et G6 (en vert) – Contributing pathlines of G3 (in blue) and G6 (in green) catchments. ....	162
Figure 3-19. Comparaison entre les concentrations en nitrate simulées et observées à la galerie G3 – Comparison between simulated and measured nitrate concentrations in G3 catchment.....	163
Figure 3-20. Résultats des simulations prédictives réalisées à l'aide de FEFLOW – Results of the FEFLOW predictive simulations.....	164
Figure 3-21. Spatialisation et qualification des résultats de contrôle APL en 2012.....	170
Figure 3-22. Distribution des cultures contrôlées lors de l'échantillonnage APL 2012.....	171
Figure 3-23. Intervalle de confiance du pourcentage moyen de l'APL par rapport à la limite de non-conformité, par texture (A = limoneux, L = sablo limoneux, E = argile légère, G = limono-caillouteux) et %COT (1 = < 0.998%, 2 = < 1.150% , 3 = < 1.400%, 4 = > 1.400%). ....	173
Figure 4-1. Comparaison entrée et sortie hiver pour quelques associations culture/région agricole au cours des hivers 2008-2009 et 2009-2010.....	179
Figure 4-2. Distribution de fréquence des observations réalisées en céréale avec précédent pauvre. ....	181
Figure 4-3. Détermination de la nature (action rapide – action lente) d'un engrais de ferme (Source : J-P. Destain et M. Thirion, 2004). ....	184

Figure 4-4. Scénarios de pratiques agricoles .....	186
Figure 4-5. Distribution des résultats pour trois catégories de parcelles (scénarios) du Survey Surfaces Agricoles. ....	188
Figure 4-6. Moyennes et intervalles de confiance (95%), par catégorie de parcelles (scénarios), des résultats enregistrés dans les parcelles du Survey Surfaces Agricoles entre 2008 et 2013. ....	189
Figure 4-7. Distribution des résultats pour deux catégories de parcelles (scénarios). Contrôle SPW 2008-2013.....	190
Figure 4-8. APL moyens en culture (sur 90 cm) et prairie (sur 30 cm) par région agricole. ....	200
Figure 4-9. Distribution des mesures APL observées entre 1993 et 1997.....	203

## Liste des abréviations

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (France)
APL	Azote Potentiellement Lessivable
CETIOM	Centre technique des oléagineux et du chanvre industriel (France)
CNSW	Carte Numérique des Sols de Wallonie
CRAW	Centre Wallon de Recherches Agronomiques
DGARNE	Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement
EG	Éléments grossiers
FEDER	Fond Européen de Développement Economique et Régional
GRENeRA	Groupe de Recherches Environnement et Ressources Azotées
GxABT	Gembloux Agro-Bio Tech
INRA	Institut National de Recherche Agronomique (France)
IRM	Institut Royal Météorologique
PGDA	Programme de Gestion Durable de l'Azote en Agriculture
RSH	Reliquat azoté dans le sol en Sortie d'Hiver
RSHP	Reliquat azoté dans le sol en Sortie d'Hiver Prédit
SAU	Superficie Agricole Utile
SPGE	Société Publique de Gestion de l'Eau
SPW	Service Public de Wallonie
UCL	Université catholique de Louvain
ULg	Université de Liège

### Préambule/avertissement

La thèse est composée d'articles scientifiques publiés et de recherches (bibliographie et expérimentations) non publiées.

La bibliographie concernant les articles publiés figure à la fin de chaque article alors que les références bibliographiques pour les parties non publiées sont reprises en fin de document.

La plupart des travaux repris dans ce document, publiés ou non dans des revues scientifiques, ont été menés dans le contexte d'une convention-cadre passée avec le SPW depuis 2000, soutien scientifique aux conseillers de Nitrawal asbl, au SPW et aux Ministres ayant l'eau et l'environnement dans leurs attributions.

D'autres travaux ont été réalisés dans des conventions annexes, financées par la SPW, la SPGE et ou le FEDER.

## Chapitre 1 Introduction et objectifs

Disposer d'une eau de qualité et en quantité est une richesse qu'il est bon d'apprécier et de préserver. Elle est indispensable à la vie (alimentation, hygiène). A l'inverse, sa rareté et/ou sa piètre qualité sont souvent synonymes de famine et de problèmes sanitaires.

En région wallonne, l'eau distribuée provient essentiellement des aquifères (cf. § 1 Cycle de l'eau). La recharge de ceux-ci est assurée par les précipitations qui percolent à travers le sol pour atteindre ces réservoirs, poreux ou fissurés et contribuer au débit de base de nos cours d'eau.

Lors de la percolation, l'eau s'enrichit de substances solubles présentes dans le sol.

Les sols utilisés pour l'agriculture représentent une part importante du territoire wallon. Grâce à leur perméabilité, ils permettent la recharge en eau des aquifères. Cependant, puisqu'ils supportent une activité de production recourant à l'usage d'intrants (engrais, produits phytopharmaceutiques), ils ne sont chimiquement pas 'neutres'; ce qui provoque un enrichissement de l'eau de percolation en ces substances (§2.1).

Le paysage agricole et les pratiques mises en œuvre aujourd'hui ont fortement évolué au cours des dernières décennies (Annexe 1); la mécanisation croissante, la disponibilité en intrants (§2.2), la sélection de variétés plus productives, l'augmentation de la demande liée à la croissance démographique et aux changements d'habitudes alimentaires en sont les principaux facteurs.

Cette modification a inévitablement eu un impact sur la qualité de l'eau qui recharge les aquifères.

*Extraits de (Vandenberghe, 2010) et (Vandenberghe et al., 2013)*

Chaque année, de l'ordre de 550 millions de m<sup>3</sup> d'eau apportée par la pluie rechargent les masses d'eau souterraine en Wallonie (Marcoen et al., 2002).

Depuis les années septante, l'Europe s'est montrée de plus en plus préoccupée par la qualité de l'eau. Elle a ainsi pris une série de directives fixant des objectifs de qualité pour les rivières et les lacs destinés à la production d'eau potable et à la baignade (1976) ainsi que des normes pour l'eau potable (1980). En 1991, deux nouvelles directives voient le jour, l'une concerne le traitement des eaux urbaines résiduaires, l'autre, le nitrate d'origine agricole (Directive 91-676).

Au milieu des années nonante, l'Europe a constaté que, bien que des progrès aient été réalisés, la politique de l'eau était encore trop fragmentée, à la fois en terme d'objectifs et de moyens. Il convenait dès lors :

- d'incorporer dans un texte unique toutes les obligations sur la gestion de l'eau ;
- de lier les différents objectifs de protection de l'eau et de combler toute lacune ;
- de coordonner toutes les mesures à prendre afin d'atteindre les objectifs fixés et
- d'accroître la participation du public à la politique de l'eau

Ces principes ont été traduits de la manière suivante dans la Directive-cadre Eau (DCE) :

- un plan de gestion de l'eau par bassin hydrographique,
- un lien entre les objectifs et le bon état de l'eau
- une approche combinée et une coordination des mesures
- l'instauration du coût vérité de l'eau

L'objectif principal de la DCE est d'atteindre un 'bon état' de l'eau. Pour les eaux souterraines, il convient de prévenir ou limiter le rejet de polluants et de protéger, d'améliorer ou de restaurer la qualité de toutes les masses d'eau.

Le suivi de la qualité de l'eau potabilisée est rendu obligatoire en région wallonne depuis 1984 (Arrêté royal du 27 avril 1984 relatif à la qualité de l'eau distribuée par réseau, transposition de la Directive CEE 80/778 du 15 juillet 1980 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine). Les informations antérieures sont par conséquent plus lacunaires.

Néanmoins, certains producteurs d'eau avaient intégré ce suivi (même partiel) bien avant 1984. Ainsi, la Société Wallonne des Eaux contrôle la qualité de l'eau dans l'aquifère du Crétacé de Hesbaye depuis 1960. Elle a pu y observer une augmentation constante de la concentration en nitrate dans trois captages depuis 1976 (figure 1-1).

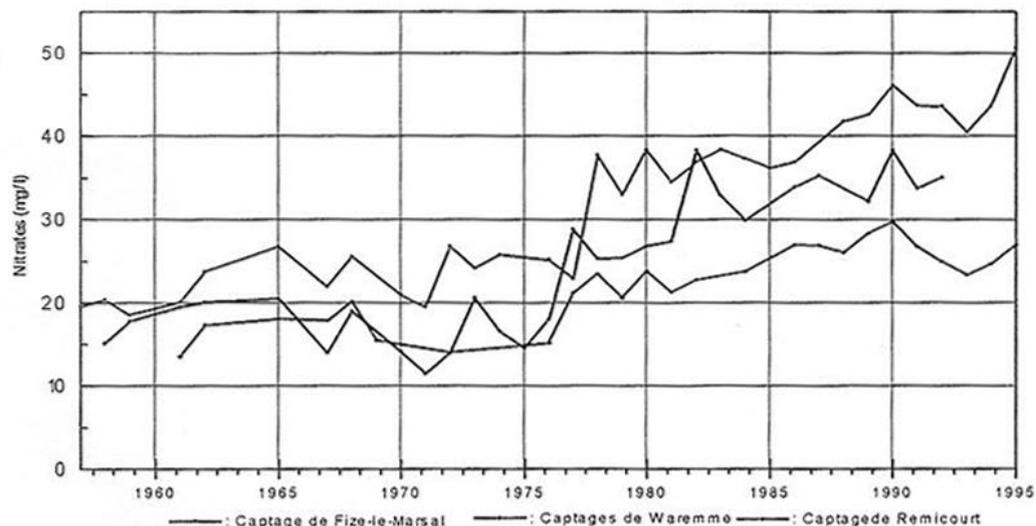


Figure 1-1. Evolution de la concentration en nitrate dans trois prises d'eau en Hesbaye (Source : SWDE).

Les niveaux de concentration enregistrés depuis 1976 dans l'aquifère du Crétacé de Hesbaye se sont maintenus jusqu'à nos jours, tant dans cet aquifère que dans les principaux autres exploités pour l'eau potable (figure 1-2) (de Thysebaert et al., 2015).

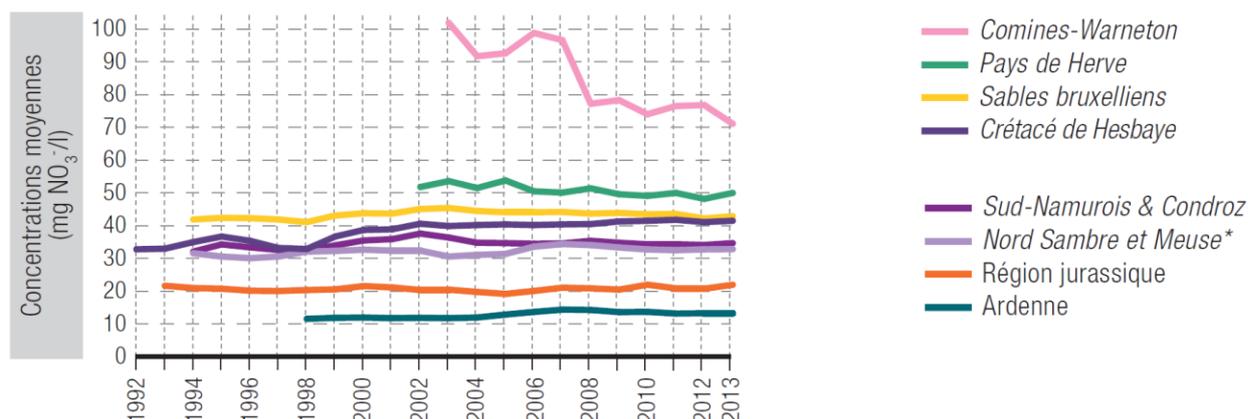
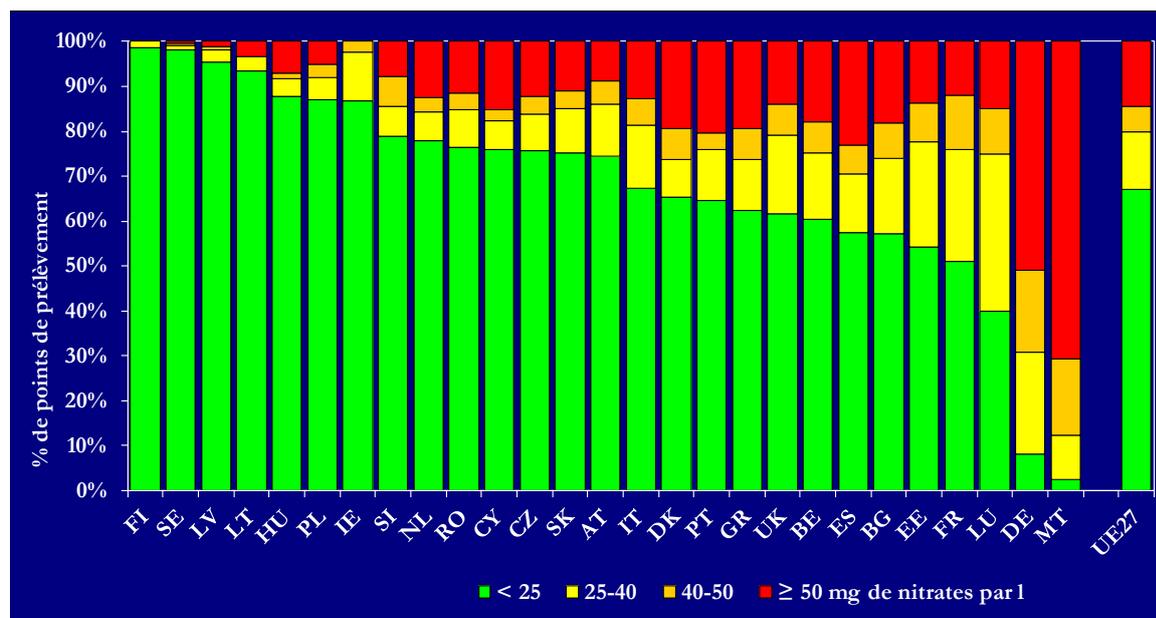


Figure 1-2. Evolution de la concentration en nitrate dans les eaux souterraines (Source : SPW).

A titre de comparaison, au cours de la période 2008-2011, 7% et 17% des sites wallons de contrôle de la qualité de l'eau souterraine présentaient une concentration supérieure respectivement à 50 et 40 mg NO<sub>3</sub>.l<sup>-1</sup> (de Thysebaert et al., 2015) alors qu'au cours de la même période, 14% et 20% des stations de surveillance de l'eau souterraine des pays constituant l'UE-27 dépassaient ces seuils (Commission européenne, 2013). La région wallonne se situe donc dans le haut du classement européen (figure 1-3).



**Figure 1-3. Diagramme de fréquence des classes d'eaux souterraines (concentrations de nitrate moyennes annuelles) (Source : Commission européenne).**

La qualité de l'eau souterraine à un moment donné est une image différée dans le temps de l'activité anthropique (agriculture, domestique, industrie) en surface. Le temps de réponse 'pression anthropique/impact sur l'eau' dépend, entre autres, de facteurs tels que le type et l'épaisseur de sol non saturé ainsi que de l'inertie de la masse d'eau. Ainsi, pour l'aquifère du Crétacé de Hesbaye, l'impact de l'agriculture sur la qualité de l'eau souterraine se marque avec plus d'une dizaine d'années de retard (Dautrebande and Dewez, 1996). Une étude similaire a également été menée pour l'aquifère des sables du Bruxellien dans le cadre du projet MONICA (Pineros Garcet et al., 2000).

Pour mettre en évidence les facteurs qui ont contribué à l'augmentation de la concentration en nitrate à partir de 1975, il faut dès lors retourner à 1960 et observer les modifications de l'agriculture au cours de cette décennie. L'Annexe 1 illustre les changements qui ont eu lieu au cours de la seconde moitié du siècle dernier et qui ont certainement contribué à la dégradation de la qualité des eaux souterraines. Citons, entre autres, la transformation de prairies en terres cultivées (Kheyrodin and Autoun, 2011; Sebillotte and Meynard, 1990), l'accroissement du cheptel (Cann, 1998; Leip et al., 2015) et l'augmentation de l'usage d'engrais azotés (Canter, 1997; De Leon, 1990).

Vu la disponibilité d'un historique de la qualité de l'eau dans la nappe du Crétacé de Hesbaye, l'évolution de l'agriculture sera souvent observée spécifiquement dans la région limoneuse qui surplombe cet aquifère.

La directive nitrate adoptée en 1991 pour préserver et, le cas échéant, restaurer la qualité des eaux de surface et souterraine prévoit :

- la désignation de zones vulnérables là où la qualité de l'eau (concentration et tendance) l'impose ;
- la mise en place d'un programme d'actions comprenant entre autres des règles relatives à la gestion de l'azote (capacité de stockage des engrais de fermes, ...) et à son utilisation (quantité, période, condition) ;
- une évaluation quadriennale de l'état des eaux et de la performance du programme d'actions ;
- suite à cette évaluation, une éventuelle révision de l'étendue des zones vulnérables et du programme d'actions.

L'évaluation d'un programme d'actions se fait à deux niveaux :

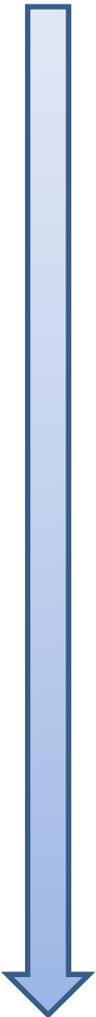
- est-il adapté/efficace pour rencontrer la problématique visée ?
- est-il effectivement mis en œuvre par les acteurs (agriculteurs) ?

Pour répondre à ces questions, divers indicateurs sont régulièrement utilisés par les Etats Membres. Ils permettent entre autres de quantifier dans quelle mesure les objectifs que l'on s'était assignés sont rencontrés.

Ces indicateurs peuvent être classés en deux catégories : les indicateurs de moyens et les indicateurs de résultats. Selon van der Werf and Petit (2002), les indicateurs de résultats sont préférables car ils sont plus souvent liés à l'objectif. Les indicateurs de moyens sont néanmoins souvent utilisés pour leur facilité de mise en œuvre. Cependant, ils ne permettent pas toujours une réelle évaluation de l'impact environnemental des pratiques mises en œuvre.

Bockstaller et al. (2015) proposent un regroupement d'indicateurs en quatorze catégories (tableau 1-1).

**Tableau 1-1. Typologie des indicateurs azotés.**

Gestion	Catégorie	Echelle spatiale	Echelle temporelle	Exemple
	Gestion du stock	Exploitation	Année	Capacité de stockage
	Bonne gestion	Exploitation Parcelle	Année	Nombre de fertilisations
	Superficie fertilisée	Exploitation Bassin versant	Année	Pourcentage de la superficie fertilisée avec de l'engrais de ferme
	Quantité d'azote	Exploitation Parcelle	Année	
	Balance azotée	Exploitation Parcelle	Année Pluriannuel	
	Ecart par rapport aux recommandations	Exploitation Parcelle	Année	
	Productivité / Efficience	Exploitation Parcelle	Année	Efficacité de l'utilisation de l'azote
	Gestion de la couverture du sol	Parcelle	Année	Superficie non couverte pendant la période de percolation
	Sensibilité au transfert	Parcelle Bassin versant	Année	Modèles informatiques
	Balance azotée x coefficient	Parcelle Système de culture	Pluriannuel	
	Modèle qualitatif	Parcelle Système de culture	Année Pluriannuel	
	Modèle quantitatif	Parcelle Système de culture	Année Pluriannuel	
	Mesure de l'azote dans le sol	Parcelle	Année Pluriannuel	
	Mesure de la qualité de l'eau	Parcelle Bassin versant	Pluriannuel	Concentration en nitrate

Selon ces auteurs, les indicateurs construits sur des balances azotées sont les plus usités. Ils permettent entre autres de pouvoir comparer différents modes d'agriculture (Godinot et al., 2016). Cependant, ils sont souvent faiblement corrélés aux quantités d'azote effectivement perdues (Buczko and Kuchenbuch, 2010). Dans ce même ordre d'idée, Makowski et al. (2009) estiment que les indicateurs basés sur les pratiques agricoles sont moins précis que ceux s'appuyant sur des mesures.

En ce qui concerne la mesure du reliquat azoté dans le sol en début de période de lixiviation (APL – Azote Potentiellement Lessivable), Bockstaller et al. (2009), s'appuyant entre autres sur une étude du Corpen (2006), estiment que cet indicateur est un des plus pertinents d'un point de vue agronomique mais souffre d'une difficulté de mise en œuvre.

Dans la plupart des Etats membres limitrophes, seuls des obligations et indicateurs de moyens sont mis œuvre (Gault et al., 2015). Ils portent essentiellement sur :

- la capacité de stockage des engrais de ferme,
- les périodes et conditions d'utilisation des engrais ainsi que les quantités permises,
- la gestion de l'interculture.

Outre la Wallonie, seule la Flandre recourt à l'APL pour évaluer la gestion de l'azote pratiquée par les agriculteurs (Anonyme, 2015).

Pour comprendre l'impact de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines, il convient préalablement de bien appréhender le cycle de l'eau ainsi que les stocks, flux (apports en surface, lixiviation dans le sol) et transformations des diverses formes d'azote.



## 1 Cycle de l'eau

Sur notre planète, l'eau circule dans un cycle permanent grâce aux phénomènes de précipitation et d'évaporation, alimentés en énergie par le soleil (figure 1-4).

Les précipitations vont soit :

1. s'évaporer,
2. rejoindre, via ruissellement, les eaux de surfaces (lacs, rivières, océans) ou
3. s'infiltrer dans le sol.

Une partie de l'eau qui s'infiltrer dans le sol va être consommée par la végétation pour être ensuite évapotranspirée. Le reste va dans un premier temps (re)constituer le stock en eau du sol jusqu'à sa capacité au champ et, dans un second temps, lorsque celle-ci est atteinte, percoler pour alimenter les aquifères.

Ces mêmes aquifères génèrent le débit de base des rivières et fleuves qui s'écoulent vers les mers et océans, siège de l'essentiel (les océans couvrent environ deux tiers de la surface de la planète) de l'évaporation qui alimente notre atmosphère en eau, source des précipitations.

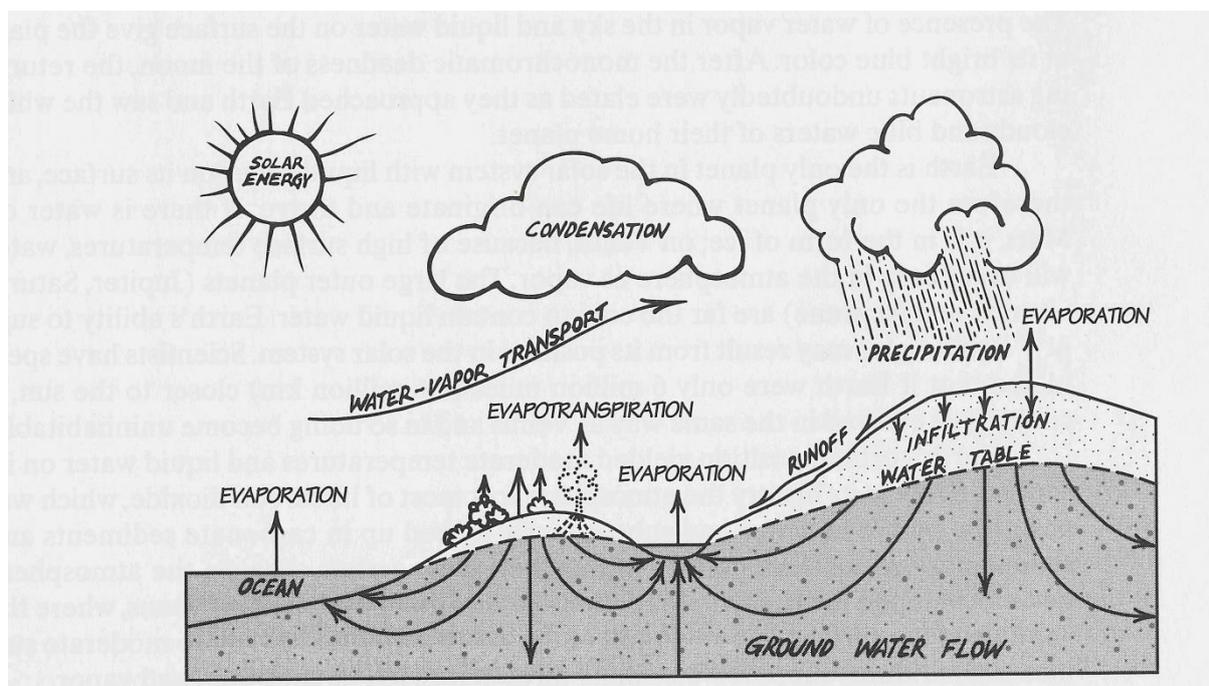


Figure 1-4. Cycle de l'eau adapté de Manning (1997).

En Wallonie, les précipitations apportent selon les auteurs, de quinze (Anonyme, 2000; Delloye et al., 2011) à dix-huit (Brouyère et al., 2006) milliards de m<sup>3</sup> d'eau par an ; les hauteurs d'eau sont croissantes avec l'altitude : en moyenne, 800 mm par an en moyenne Belgique à 1200 mm par en haute Belgique (Source : IRM <http://www.meteo.be/meteo/view/fr/360361-Parametres.html> consulté le 3 janvier 2012).

En moyenne Belgique, le maximum des précipitations est observé en juillet-août alors qu'en haute Belgique, il y a deux maximums observés : le premier en juillet-août et le second en décembre-janvier.

Environ 40 à 45% de ces quantités sont directement évaporées ou évapotranspirées (Anonyme, 2000; Delloye et al., 2011) ; le solde va ruisseler vers les cours d'eau ou s'infiltrer dans le sol (figure 1-5).

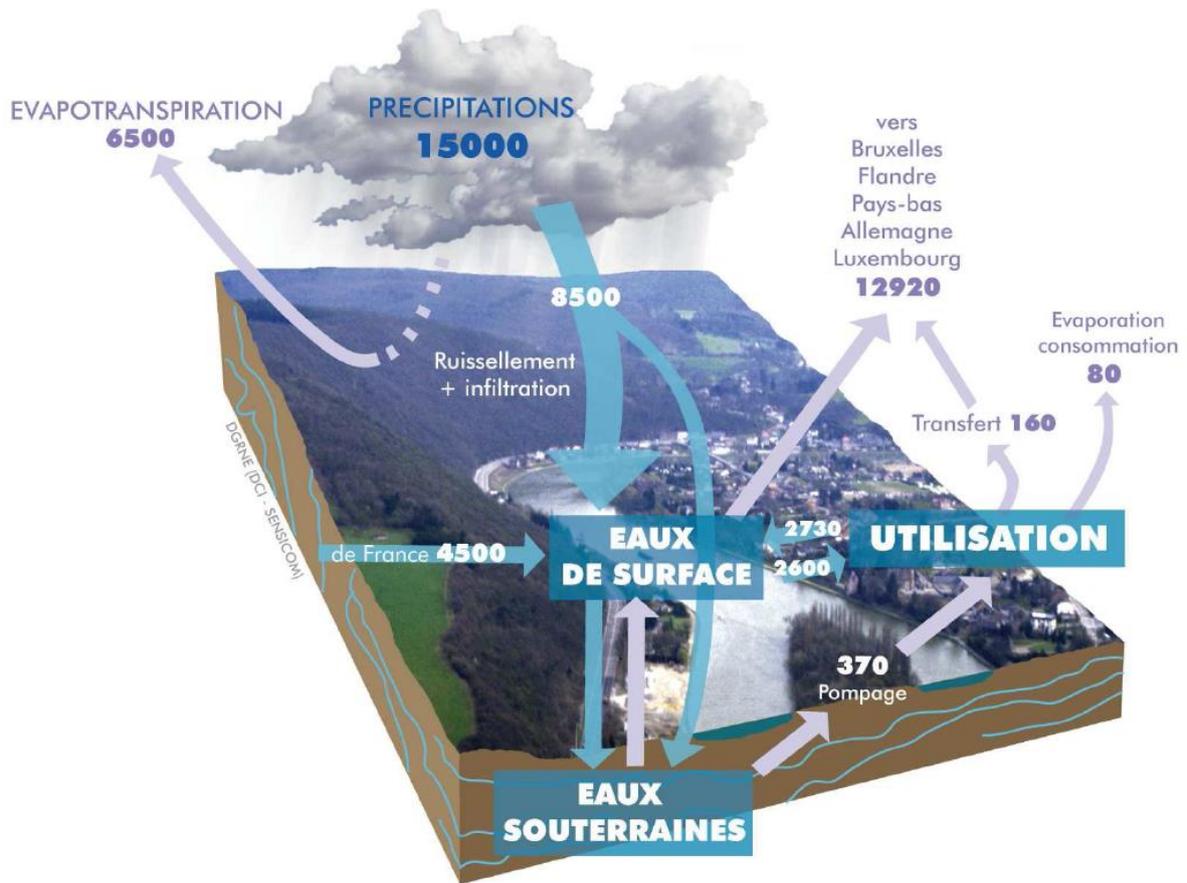


Figure 1-5. Bilan hydrique (millions de m³) de la région wallonne d'après Delloye et al. (2011).

En s'infiltrant dans le sol, l'eau va se charger en éléments solubles (nitrate, pesticides, ...); la concentration de l'eau en ces éléments étant fonction du niveau de contamination du sol et de l'épaisseur de la lame d'eau drainante.

## 2 L'azote

L'azote a un rôle majeur dans la synthèse de la matière vivante à partir de la matière minérale.

Cette liaison de l'azote au vivant n'a été perçue que bien après la découverte de cet élément. En effet, à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, lorsque Lavoisier le découvre, il le nomme azote, composé du préfixe 'a' (privatif) et du radical grec ζωτ-, « vivant » pour indiquer que contrairement à l'oxygène, il ne permet pas la vie des animaux.

Cependant, la chlorophylle, molécule caractéristique des plantes autotrophes contient de l'ordre de 6% d'azote. Les protéines que l'on retrouve dans le gluten du blé, dans les légumineuses ou dans les graines d'oléagineuses contiennent environ 16% d'azote. Elle constitue un des piliers de notre alimentation.

Les plantes fabriquent également des substances plus simples à base de carbone, d'oxygène et d'hydrogène telle que le sucre, l'amidon et la cellulose ou plus complexes telles que la lignine qui nécessitent d'autres éléments telles que le phosphore, le potassium, le magnésium, le fer, le manganèse, ... (Gros, 1957).

Le terme 'nitrate' trouve son origine dans le 'nitre' qui est un synonyme du salpêtre composé de nitrate de potassium dont l'action fertilisante a été mise en évidence par J.R. Gauber au XVII<sup>ème</sup> siècle (Boulaine, 1992).

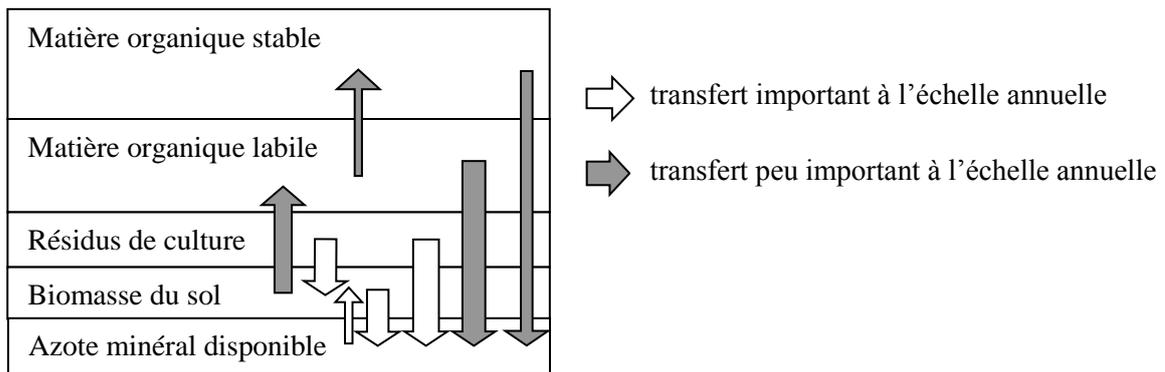
L'azote peut prendre de multiples formes dans le sol : du diazote (N<sub>2</sub>) contenu dans l'air présent dans les pores jusqu'à des formes très complexes et souvent beaucoup plus stables.

On peut ainsi distinguer cinq compartiments dans le sol (Corpen, 1992) :

1. **le compartiment d'azote minéral.** Il représente la seule source d'azote disponible pour la plante. Sa taille est généralement de l'ordre de 40 kg N.ha<sup>-1</sup> mais les fluctuations peuvent être importantes (cinétique et amplitude) puisqu'un sol peut contenir/générer plusieurs centaines de kilos par hectare en quelques jours ;
2. **le compartiment de l'azote contenu dans les résidus de culture** tels que les feuilles et collets de betterave, la fane de pomme de terre, les racines et couverts non récoltés, ... Ce compartiment contient entre 20 et 100 kg N.ha<sup>-1</sup>.
3. **le compartiment d'azote contenu dans la biomasse microbienne.** Celle-ci est le moteur des transformations de l'azote dans le sol. La taille de ce compartiment est comprise entre 100 et 400 kg N.ha<sup>-1</sup>.
4. **le compartiment de l'azote de la matière organique labile.** Comme son nom l'indique, il représente un stock d'azote peu stable et par conséquent exploitable par une culture après transformation par la biomasse microbienne en azote minéral. Ce compartiment pèse entre 1000 et 2000 kg N.ha<sup>-1</sup>.
5. **le compartiment de l'azote de matière organique stable.** Les matières organiques labiles et stables constituent l'humus d'un sol. ; la frontière entre les deux types étant assez mal définie. Contrairement au compartiment précédent, l'azote contenu dans la matière organique stable ne peut être disponible pour une culture annuelle. Le stock de ce compartiment est de l'ordre de 2000 à 3000 kg N.ha<sup>-1</sup>.

Vu la taille respective de chacun de ces compartiments, l'azote sous forme minérale ne représente donc qu'environ un cinquantième du stock d'azote présent dans le sol (Corpen, 1992), (Guiot, 1971), (Nicolardot et al., 1997).

La figure suivante (figure 1-6) illustre l'importance des flux entre ces différents compartiments.



**Figure 1-6. Flux d'azote entre les différents compartiments.**

A l'échelle de la biosphère, l'azote contenu dans le sol ne représente que 0,004% de la quantité présente sur notre planète (Schvartz et al., 2005) (tableau 1-2).

**Tableau 1-2. Répartition de l'azote dans les compartiments de la biosphère.**

Compartiment	Contenu (en giga tonnes)
atmosphère	3.900.000
océans	24.000
sol	150
végétaux	15
animaux	0,2

Les **entrées** d'azote (minéral ou organique) dans le sol se font principalement par :

- les apports d'engrais minéraux (0 à 200 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) ;
- les apports d'effluents d'élevage (0 à 400 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) ;
- la fixation symbiotique ;
- les apports atmosphériques (de l'ordre de 3 à 6 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Barroin et al., 1997), jusqu'à 50 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> dans certains contextes (Sicard, 2006)) ;
- la fixation libre

La fixation est la transformation du diazote atmosphérique en azote organique. On distingue deux types de fixation en fonction des micro-organismes présents (Nicolardot et al., 1997) :

- la fixation symbiotique qui, comme son nom l'indique, résulte de la symbiose entre des plantes légumineuses et les bactéries du genre *Rhizobium*. Les quantités d'azote fixé par cette voie peuvent atteindre plusieurs centaines de kg par hectare (Deprez et al., 2007; Guiot, 1971). Dans le cas d'un couvert placé en interculture Thorup-Kristensen et al. (2003) mentionnent une fixation d'azote de 30 à 150 kg.ha<sup>-1</sup>.
- la fixation libre est effectuée par des bactéries aérobies (*Azotobacter* sp., ...), ou anaérobies (*Clostridium* sp.) ou photosynthétiques (*Rhodospirillum* sp.). Les quantités d'azote ainsi fixées sont négligeables pour une terre de culture mais peuvent atteindre plusieurs dizaines de kg par hectare dans les sols inondés et rizières.

Les engrais minéraux sont constitués d'urée, de nitrate et/ou d'ammonium souvent associés à d'autres éléments. Les formulations sont donc multiples (§ 2.2 Fertilisation).

Les effluents d'élevage sont principalement constitués d'azote organique à l'exception du lisier pour lequel la part d'ammonium est relativement importante.

Les **sorties** d'azote se font principalement par :

- l'exportation des produits de la récolte. Comme évoqué précédemment, la chlorophylle contenue dans les parties « vertes » des plantes ainsi que les protéines présentes dans les graines contiennent de l'azote. Lors de la récolte, de 100 à 300 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> peuvent ainsi être exportés (Lemaire et al., 1997), (Boniface, 1996);
- la lixiviation de l'azote minéral (essentiellement le nitrate). Ces pertes sont de l'ordre de quelques dizaines de kg par hectare et par an et peuvent, dans certaines situations, atteindre plusieurs centaines de kilo d'azote par hectare et par an (Scokart et al., 1990); (Fonder et al., 2010); (Demyttenaere et al., 1990); (Chapot et al., 1996); (Boniface, 1996) ; (Ladha et al., 2005) ;
- les pertes par volatilisation (ammoniac). Ces pertes sont liées aux conditions de sol (pH, humidité, capacité d'échange, porosité) et aux conditions climatiques (température, pluviométrie, humidité de l'air) (Cellier et al., 1997), (Bolan et al., 2004). Elles peuvent représenter jusqu'à 90% de l'azote ammoniacal apporté (lisier) (Sommer et al., 1991); (Moal et al., 1995) et près de la moitié peut être perdue dans les premières heures qui suivent l'épandage (Monaco et al., 2011). Dans les prairies, une revue bibliographique réalisée par Bolan et al. (2004) renseigne des pertes par volatilisation de l'ordre de 20 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>
- la production d'azote gazeux (oxyde et protoxyde d'azote, diazote) par dénitrification. Selon Cellier et al. (1997), Bolan et al. (2004), les émissions de protoxyde d'azote répondent aux fluctuations d'humidité dans le sol et de disponibilité du nitrate. Ces émissions sont de l'ordre de 2 à 3 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Pelster et al. (2011) évaluent l'émission de protoxyde d'azote à de l'ordre de 1% de l'azote apporté par la fertilisation. O'Geen et al. (2010) estiment, sur base d'une revue bibliographique, que la dénitrification dans des zones humides peut produire de l'ordre de 2 mg N.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>, soit plusieurs dizaines de kilos d'azote par hectare et par an. Cet ordre de grandeur est également observé en prairie dans la revue bibliographique réalisée par Bolan et al. (2004). Le ratio N<sub>2</sub>O (gaz à effet de serre)/N<sub>2</sub> est, selon Vermoesen et al. (1993), dépendant de la disponibilité en nitrate, nitrite, carbone et oxygène, de la température, du pH et de l'humidité.

Il est par ailleurs généralement admis que la nitrification peut entraîner une émission de N<sub>2</sub>O dans certaines circonstances et notamment lors de l'alternance de conditions anaérobiques et aérobiques (Bothe et al., 2007).

Les processus de transformation de l'azote dans le sol sont multiples et principalement liés à l'activité microbienne, elle-même dépendante des conditions d'humidité du sol (figure 1-7).

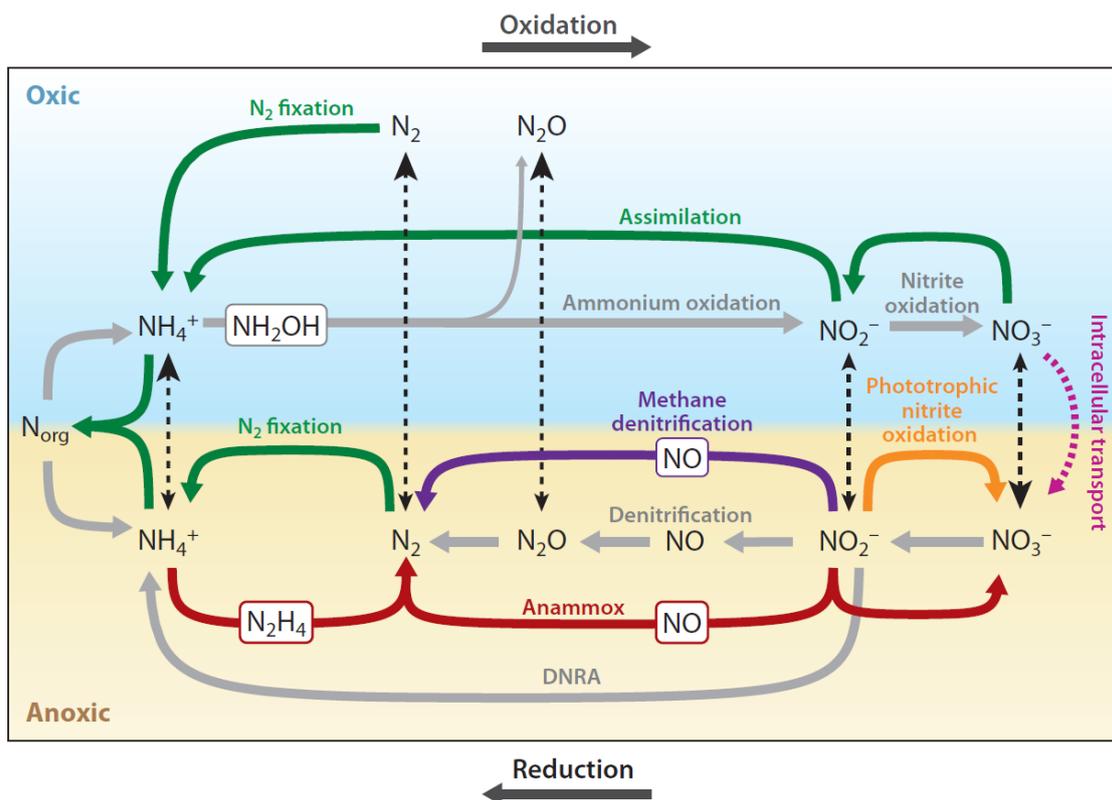


Figure 1-7. Processus de transformation de l'azote dans le sol (Thamdrup, 2012).

De façon simplifiée, deux processus antagonistes se déroulent de manière concomitante dans le sol. Le premier a pour conséquence de transformer l'azote organique en azote minéral assimilable par les plantes et le second est tout son contraire : former de l'humus à partir de l'azote minéral.

La dégradation de l'azote organique se produit en plusieurs étapes (figure 1-7), chacune étant pilotée par des bactéries spécifiques :

- la **minéralisation** consiste à transformer l'azote organique en ammonium. Cette transformation se fait en deux étapes : l'aminization (dégradation de la matière organique en acides aminés) et l'ammonification (dégradation de ces acides aminés en ammonium). Des facteurs édaphiques (pH, granulométrie), climatiques (pluviométrie, température) et anthropiques (système de culture, travail du sol) influencent la cinétique de ces processus (Guiot, 1971; Kumar and Goh, 2000) ; (Brye and Gbur, 2010; Watts et al., 2010). Il est à noter que les acides aminés, comme l'ammonium, sont susceptibles, dans certaines conditions (dépendant entre autres du type d'argile) de subir une rétrogradation, c'est-à-dire être fixés de façon quasi irréversible entre les lamelles de l'argile, principalement les montmorillonites et vermiculites (Juang et al., 2001).
- la **nitrification** consiste à transformer l'ammonium en nitrate. Deux types de bactéries interviennent dans cette oxydation : *Nitrosomas* oxyde l'ammonium en nitrite et *Nitrobacter* oxyde le nitrite en nitrate. La cinétique de nitrification est optimale dans des conditions de pH compris entre 6,9 et 9, en aérobose et avec une température supérieure à 20°C (Nicolardot et al., 1997). A une température de 10°C, la nitrification peut déjà produire de 2 à 3 kg N.ha<sup>-1</sup>.jour<sup>-1</sup> (Recous et al., 1997).

Les plantes contiennent de 15 à 60 % de cellulose, de 10 à 30 % d'hémicellulose, de 5 à 30 % de lignine et de 2 à 15 % de protéines et de substances solubles telles que les sucres et acides aminés. La vitesse de minéralisation dépend de la proportion de ces éléments dans la matière organique. Ainsi, Kumar and Goh (2000) estiment que la demi-vie des sucres, cellulose, hémicellulose et lignine est respectivement de 0,6, 6,7, 14 et 365 jours.

La dégradation de l'azote organique peut ainsi produire de l'ordre de 500 à 700 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Murphy et al., 2003).

L'organisation (ou réorganisation selon Guiot) produit, par l'activité de micro-organismes hétérotrophes, de l'humus ou de la matière organique à partir de l'azote minéral présent naturellement dans le sol ou apporté par l'homme sous forme d'engrais.

Faisant référence à une étude menée par l'INRA, l'ADEME et le CETIOM en 1995, Recous et al. (1997) indiquent que l'azote minéral apporté sous forme d'engrais est, en quelques semaines, prélevé par la culture ou organisé dans la matière organique du sol ; la forme minérale initiale n'est quasiment plus présente (figure 1-8).

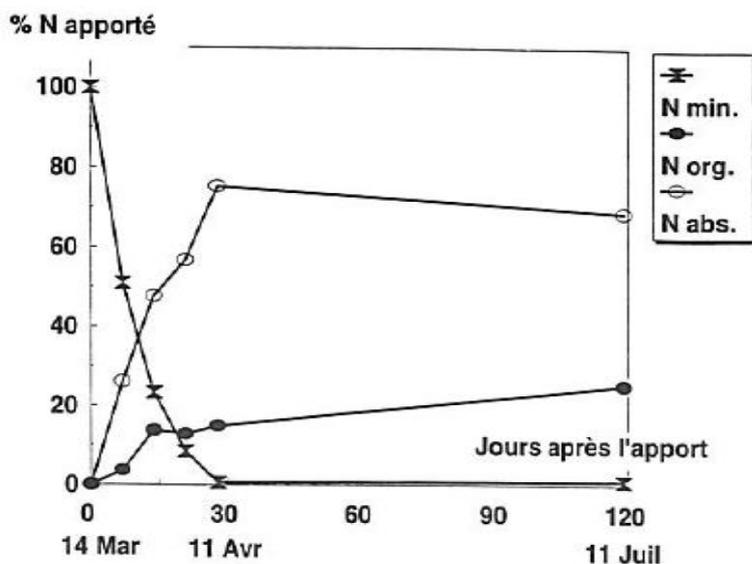


Figure 1-8. Evolution au cours du temps de l'azote de l'engrais (<sup>15</sup>N) apporté sur une culture de colza sous forme minérale, organique dans le sol ou absorbé par la plante.

La consommation de l'azote minéral par les micro-organismes se déroule lors de la décomposition de chaînes carbonées par ces mêmes organismes. Dans les sols cultivés, les sources de carbone sont soit racinaires (exsudats, décomposition) ou conséquentes à l'enfouissement de résidus de récolte (paille). Mary and Recous (1994) estiment que plus d'une centaine de kilos d'azote par hectare peut ainsi être organisé au cours d'une culture de céréales. D'autres études réalisées dans des contextes similaires (céréales) ou différents (maïs, ray-grass) indiquent des quantités organisées de l'ordre de plusieurs dizaines de kilos d'azote par hectare et par an (Recous et al., 1997). Selon Murphy et al. (2003), les quantités d'azote immobilisées peuvent même atteindre plusieurs centaines de kilos d'azote par hectare et par an.

De ces deux processus antagonistes, la minéralisation est la plus active. Schimel (1986) estime que le rapport minéralisation brute : organisation brute est de 2 : 1 pour les cultures annuelles et 5 : 4 pour les prairies. La production net d'azote minéral peut ainsi, dans des terres cultivées, se chiffrer à 150 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Nicolardot et al., 1997), (Murphy et al., 2003).

## 2.1 Lixiviation de l'azote dans le sol

Parmi les nombreuses formes d'azote présentes dans le sol (figure 1-7), le nitrate est celle qui est la plus sensible à la lixiviation car elle est très soluble et, contrairement à l'ammoniac, le nitrate est chargé négativement ; ce qui limite son adsorption sur par les argiles.

On parle communément du lessivage des nitrates. Dans ce texte, le terme 'lixiviation' sera préféré au terme 'lessivage'. En effet, la lixiviation est le processus d'entraînement par le mouvement descendant de la solution du sol de sels solubles tandis que le lessivage est l'entraînement de particules solides qui donne lieu, par exemple, à une redistribution des argiles dans le profil et la création d'un horizon Bt, c'est-à-dire enrichi en argile (Lozet and Mathieu, 1990), (Duchaufour, 1995).

Par ailleurs, étant donné qu'il n'existe qu'une seule forme (valence) d'ion nitrate (contrairement à l'atome de fer), le nitrate sera orthographié au singulier.

Ainsi, la 'lixiviation du nitrate' sera préférée au 'lessivage des nitrates'.

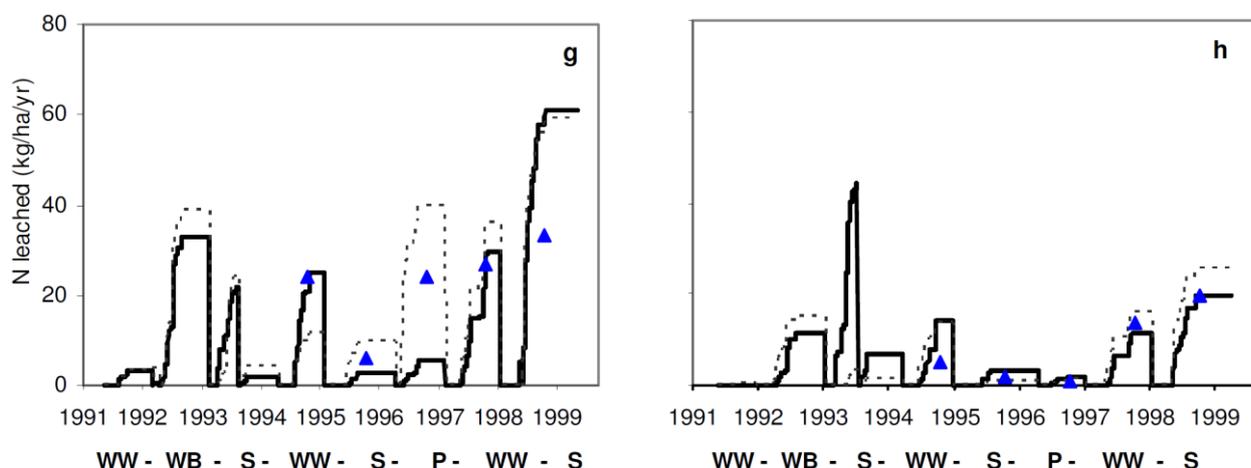
A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, dans le cadre d'essais agronomique menés à Rothamsted (Royaume Uni), première station agronomique (Dumas, 1965) dirigée par Sir John Bennet Lawes (1814-1900), Muntz and Girard (1889) relatent des pertes d'azote de l'ordre de 3 g/m<sup>3</sup> d'eau dans un sol non fumé et de l'ordre de 6 g N/m<sup>3</sup> d'eau dans un sol fumé. La forme nitrique de l'azote est déjà connue pour être sensible à la lixiviation.

En 1957, certains perçoivent déjà les pertes possibles par lixiviation sans mesurer le risque pour l'environnement. Ainsi, en France, André Gros (1957) écrivait « Les nitrates sont très solubles. Ils sont sujets au lessivage et peuvent donc être facilement entraînés dans les profondeurs du sol, hors de portée des racines. Ils font alors retour aux ruisseaux, puis aux fleuves et en définitive aux océans, dans lesquels l'azote contribue à nourrir la flore sous-marine. ». Ces derniers mots indiquent clairement que le phénomène d'eutrophisation n'est pas connu de l'auteur très certainement parce que ce problème n'était pas encore apparu à l'époque. Selon lui, les pertes d'azote étaient de l'ordre de 30 à 50 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> mais pouvaient, dans certaines situations être beaucoup plus élevées.

En Belgique, le caractère soluble et lixiviable du nitrate était également bien connu mais diversement apprécié : Laloux et al. (1969) estime que la vitesse de lixiviation est de 1 cm par 3 mm de pluie infiltrée. Ainsi, une lame de 250 mm occasionnerait une descente de la couche de nitrate d'environ 80 cm.

Joseph Guiot (1971), (1973) semble restreindre l'importance du processus puisqu'il estime que la lixiviation se produit dans des sols légers à très faible capacité d'échange.

Dans le cadre du suivi pluriannuel d'un bassin versant intégrant une modélisation des flux d'azote, Beaudoin (2006) a mis en évidence les variations saisonnières de la lixiviation du nitrate (figure 1-9) ainsi que divers facteurs impactant ce flux, tels que (liste non exhaustive) la culture, la gestion de l'interculture et le type de sol.



**Figure 1-9. Quantité d'azote lixiviée (simulée et observée). Graphe de gauche : limon sableux peu épais. Graphe de droite : limon épais. (WW = froment d'hiver, WB = orge d'hiver, S = betterave sucrière, P = pois de printemps) (trait pointillé : simulations réinitialisées chaque année, trait plein : simulations continues, triangle : mesures).**

## 2.2 Fertilisation

André Gros (1957) définit la fertilisation comme étant le moyen d'entretenir et même d'améliorer la fertilité naturelle des sols afin que les végétaux cultivés y trouvent tout ce dont ils ont besoin pour assurer leur plein développement.

Schwartz et al. (2005) définissent la fertilisation comme étant l'ensemble des pratiques agricoles qui permettent la mise en œuvre de matières fertilisantes.

Depuis l'antiquité, le fumier est considéré comme l'élément majeur de la fertilité d'un sol. Deux siècles avant J.C., Columelle, agronome latin, affirmait que le fumier produit par les troupeaux contribuait à multiplier les fruits de la terre (Nisard, 1844). Caton, également agronome latin, recommandait à l'agriculteur « d'amasser un bon tas de fumier et de le conserver avec soin » (Nisard, 1844). Il conseillait d'enfouir la moitié pour les plantes fourragères et de réserver un quart pour les oliviers et un quart pour les prairies.

Au XVII<sup>ème</sup> siècle, l'agronome français De Serres (1651) écrivait « le fumier réjouit, réchauffe, dompte et rend aisées les terres ». Dans le même ordre d'idée, le chimiste et agronome français J-B Boussingault (1802-1887) disait « On peut à première vue juger de l'industrie et du degré d'intelligence d'un cultivateur, par les soins qu'il donne à son tas de fumier » (Boussingault, 1860).

Les avis ne sont cependant pas aussi unanimes à cette époque. Ainsi, au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, pour l'anglais Tull, les cultures se nourrissent des molécules de terre. Il préconisait par conséquent un travail du sol répété et estimait les apports d'engrais inutiles (Papy, 2008).

<p>La terre ne vieillit point, ne s'épuise pas tant que nous la cultivons, non suivant nos loix, nos coutumes ou préjugés, mais conformément à ses loix &amp; à ses principes.</p>	<p>Si chaque année, ou tous les deux ans, nous dépouillons la terre de la récolte qu'elle produit, &amp; que nous ne lui rendions pas, d'une manière ou d'autre, les principes qui ont servi à la formation de cette récolte, il est constant que nous l'appauvrissons, &amp; que nous diminuons ses ressources.</p>
--	--

Texte de Rozier (1785).

Il faudra cependant attendre le début du XIX<sup>ème</sup> siècle pour qu'il soit démontré par l'allemand Liebig (1823) que les plantes ne se nourrissent pas uniquement de fumier mais bien d'éléments minéraux issus de la décomposition de la matière organique au sens large du terme. Cependant, celui-ci attribuait un rôle beaucoup plus important au potassium et phosphore qu'à l'azote, élément dont il considérait la concentration toujours suffisante dans les sols (Muntz and Girard, 1888). Selon Dumas (1965), Liebig supposait que les plantes étaient capables d'absorber l'azote de l'atmosphère.

Sur base des résultats de ses expérimentations menées à Rothamsted, Lawes définit deux principes (Dumas, 1965) :

- parmi tous les principes des engrais, l'azote combiné chimiquement fait mieux que tous les autres éléments prospérer les plantes. Les engrais riches en azote exercent sur tous les sols et sous tous les climats une action bienfaisante ;
- après l'azote, le principe dont le sol ressent le plus vivement la perte est l'acide phosphorique.

Ainsi, dans la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, apparaissent les premiers fertilisants, essentiellement produits à base de déchets organiques ou organo-minéraux (poudrettes<sup>2</sup>, noirs de raffineries, composts,

<sup>2</sup> matières fécales desséchées et mises en poudre

guanos du Pérou, ...) (de Scorraille, 1986) et ensuite les engrais phosphatés et azotés (nitrate de soude et sulfate d'ammoniaque) (Lecrenier, 1969).

La poudre d'os se révèle également être un bon engrais. Ainsi, Liebig (1823), cité par Dumas (1965), relate que l'Angleterre (qu'il qualifie de vampire suspendu à la gorge de l'Europe) a, au cours de cette période, importé pas moins de quatre millions de tonnes d'os extraits de champs de bataille (Leipzig, Waterloo, Crimée) ou de catacombes (Sicile).

Pour la « petite histoire », fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, le Comité des producteurs de nitrate de soude en Amérique du Sud ouvre un concours sur les propriétés fertilisantes de cet engrais ; le jury international compta parmi ses membres, A. Petermann, directeur de la Station Agronomique de Gembloux. Ce jury couronna les travaux d'Adolphe Damseaux, professeur à l'Institut agricole de Gembloux (Lecrenier, 1969).

de Scorraille (1986) retrace la chronologie de l'apparition des engrais minéraux en Europe :

- 1830 : importation du nitrate de soude du Chili en Angleterre
- 1840 : importation du guano du Pérou en Angleterre
- 1843 : construction (Lawes) de la première usine de superphosphate en Angleterre
- 1860 : exploitation de mines de potasse en Allemagne
- 1879 : fabrication des scories Thomas (sous-produit de la fabrication de l'acier) en Angleterre et France
- 1890 : récupération du sulfate d'ammoniaque dans les cokeries
- 1907 : fabrication du nitrate de chaux en Norvège
- 1913 : synthèse de l'ammoniac par le procédé Haber-Bosch
- 1921 : fabrication de l'urée
- 1927 : fabrication des engrais NPK par solubilisation nitrique des phosphates.

### **3 Objectifs de la thèse**

---

L'impact de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines et de surface résulte d'une part, des pratiques agricoles en matière de gestion de l'azote (fertilisation organique et minérale, gestion de l'interculture) pour chaque culture et d'autre part, de la place de chaque culture dans le paysage wallon. L'objet de la thèse est de vérifier si cet impact peut être estimé via l'« APL » (Azote Potentiellement Lessivable – mesure de la concentration en azote nitrique dans le sol en début de période de lixiviation).

Après un liminaire descriptif (définition, échantillonnage, analyse, expression et interprétation du résultat), la première partie de la thèse s'attachera à décrire les qualités que doit remplir l'indicateur APL (Van Cauwenbergh et al., 2007) :

- mesurable,
- discriminant,
- transférable,
- transparent,
- en liaison avec le risque.

Dans un deuxième temps, quelques limites de l'indicateur seront développées et des solutions/adaptations seront proposées :

- variabilité spatiale et temporelle,
- impact de paramètres physico-chimiques.

La troisième partie de la thèse s'attachera à démontrer que l'APL est un indicateur pertinent de la gestion de l'azote et du risque environnemental (relation entre l'APL et la qualité de l'eau à l'échelle parcellaire ou d'un bassin versant).

Enfin, les résultats APL enregistrés depuis plusieurs années seront valorisés pour

- évaluer le risque environnemental lié à certaines pratiques agricoles et
- élaborer un conseil de fertilisation idoine pour la culture suivante (sans mesure du reliquat azoté dans le sol en sortie d'hiver) ;
- tenter une extrapolation spatiale et historique de l'APL.

Concrètement, la démonstration s'appuie des travaux menés depuis 2001 et plus précisément :

- six articles scientifiques (chapitres 2.4, 2.5, 3.2, 3.3, 3.4 et 4.2) ;
- trois études publiées dans des rapports d'activités de conventions de recherche (chapitres 2.3.2, 2.3.4, 3.1) ;
- quatre études 'originales' menées dans le cadre de la thèse (chapitres 2.3.6, 2.3.7, 4.1, 4.3).

En annexe de cette thèse, entre autres, une revue bibliographique illustrera l'évolution des pratiques en matière de fertilisation des principales cultures au cours des 50 dernières années.



## **Chapitre 2 Définition de l'APL, analyse des atouts et limites**

### ***1 Le reliquat azoté en début de période de lixiviation : APL***

---

#### **1.1 Définition**

L'arrêté du Gouvernement wallon modifiant le Livre II du Code de l'Environnement contenant le Code de l'Eau en ce qui concerne la gestion durable de l'azote en agriculture (MB : 26/04/2011) définit l'APL comme la quantité d'azote nitrique contenue dans le sol à l'automne et susceptible d'être entraînée hors de la zone racinaire pendant l'hiver.

#### **1.2 Echantillonnage**

Chaque parcelle de terre arable dans laquelle des échantillons de sol sont prélevés en vue d'un dosage d'azote potentiellement lessivable, est échantillonnée à raison de 15 prélèvements au moins. Chaque parcelle de prairie dans laquelle des échantillons de sol sont prélevés en vue d'un dosage d'azote potentiellement lessivable, est échantillonnée à raison de 30 prélèvements au moins.

La justification de la densité d'échantillonnage et l'estimation du biais lors de cette opération sont développés au paragraphe intitulé « Variabilité spatiale intraparcélaire ».

L'échantillonnage d'une parcelle couvre de manière homogène l'entièreté de celle-ci, à l'exception des abords immédiats de son pourtour, des zones d'abreuvement, des zones d'affouragement, des sites de stockage ou de toute autre portion de surface traitée de manière significativement différente du reste de la parcelle.

Chaque prélèvement dans une parcelle de terre arable est subdivisé en trois couches, une première couche de 0 à 30 cm de profondeur, une deuxième de 30 à 60 cm de profondeur et une troisième de 60 à 90 cm de profondeur pour autant que la profondeur de sol le permette.

Ces prélèvements se font à l'aide d'une sonde dont le diamètre est tel que la masse totale de terre prélevée soit au moins de 300 grammes par couche et par parcelle échantillonnée.

En cas d'impossibilité technique de sonder une couche de manière représentative (prélèvement d'au moins 2/3 de la quantité de terre prévue pour la couche) sur une parcelle donnée, cette couche n'est pas prise en compte dans l'interprétation des résultats.

Chaque prélèvement dans une parcelle de prairie s'effectue sur une couche unique de 30 cm de profondeur ou d'une profondeur moindre correspondant à l'épaisseur de sol meuble, si la profondeur de 30 cm ne peut pas être atteinte.

Pour chaque prélèvement, la sonde doit être uniformément garnie de terre. Au moment du prélèvement, le degré de ressuyage du sol doit être suffisant pour palier au risque de souillure d'une couche par une autre (« coulage ») et pour permettre aux traitements ultérieurs de se réaliser dans de bonnes conditions (tamisage, homogénéisation de l'échantillon).

Les prélèvements d'échantillons de sol sont exécutés entre le 15 octobre et le 30 novembre en tenant compte de la gestion des cultures.

Le matériel de prélèvement présente des caractéristiques telles qu'il ne risque ni de perturber les couches de sol, ni d'enrichir les échantillons en azote minéral. Il s'agit soit d'une sonde tubulaire de type gouge fermée ou en demi-lune, soit d'une tarière hélicoïdale de type vrille.

Pour chaque parcelle échantillonnée, la terre prélevée est conditionnée dans autant de sachets distincts qu'il y a de couches. Ils sont ensuite immédiatement placés dans un contenant thermiquement isolé et hermétiquement fermé.

Les échantillons sont acheminés, dans leur contenant thermiquement isolé et hermétiquement fermé, le jour même de l'échantillonnage, vers le laboratoire agréé chargé de l'analyse.

### **1.3 Analyse**

Les échantillons sont analysés par un laboratoire agréé immédiatement après réception ou, à défaut, stockés en chambre froide à une température comprise entre 1 °C et 4 °C pendant une durée maximale de cinq jours avant analyse. Ces conditions (durée et température) de stockage s'appuient entre autres sur des analyses (avec répétitions) d'échantillons de sol conservés pendant des durées croissantes ou congelés (Mohimont et al., 2003).

Avant analyse, l'intégralité du contenu de chaque sachet est soigneusement homogénéisé par tamisage au travers d'un tamis de mailles de 8 mm. Si après tamisage, il subsiste un refus sur le tamis, ce refus est pesé et la charge caillouteuse en est déduite.

La charge caillouteuse, estimée à partir de la carte numérique des sols de Wallonie, est déduite du volume de terre pour l'expression du résultat analytique. L'imprécision liée à l'estimation de la charge caillouteuse est développée au paragraphe intitulé « Estimation de la charge caillouteuse » (page 82).

Immédiatement après tamisage, l'extraction de l'ion nitrate se réalise sur la matière brute non séchée d'une partie aliquote de minimum 30 grammes d'échantillon par solution KCl 0,1N. Le rapport d'extraction (poids de terre/volume de solution d'extraction) est de 1/5.

Les flacons servant à l'extraction sont bouchés et soumis à l'action d'un agitateur rotatif pendant 30 minutes. La solution est ensuite laissée au repos pendant 30 minutes pour décantation.

Le dosage de l'ion nitrate est effectué sur le surnageant qui, selon la méthode de dosage, est préalablement filtré ou centrifugé.

Si le dosage n'est pas effectué endéans les trois heures qui suivent l'extraction, les extraits sont stockés en chambre froide, à une température maximale de 4 °C, à l'abri de la lumière pendant une durée maximale de 48 heures ou sont congelés. Ces conditions (durée et température) de stockage s'appuient entre autres sur des analyses (avec répétitions) d'extraits de sol conservés pendant des durées croissantes ou congelés (Mohimont et al., 2003).

Le dosage du nitrate est effectué par le laboratoire agréé selon une des méthodes standardisées suivantes :

- la méthode colorimétrique de dosage direct du nitrate par l'acide chromotropique (West and Lyles, 1960) ;
- la méthode colorimétrique de dosage direct du nitrate par la brucine (Baker, 1967);
- la méthode titrimétrique de réduction du nitrate en ammonium par l'alliage de Devarda, après distillation et entraînement à la vapeur;
- la méthode colorimétrique de réduction du nitrate en nitrite (à l'aide notamment de cadmium ou d'hydrazine) avec dosage de l'ion nitrite par la réaction de Griess-Ilosvay modifiée (Bremner, 1965); (Guiot, 1975).

## 1.4 Transformation du résultat analytique en $\text{kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$

Le résultat obtenu est exprimé en  $\text{kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ . Cette unité est dérivée d'une concentration en  $\text{mg N-NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  réellement dosée en application du § 1.3.

Le passage d'une unité à l'autre se fait en intégrant des paramètres tels que l'épaisseur de la couche de sol, le pourcentage de matière sèche, le rapport cailloux/terre et la densité apparente à l'état sec. Pour ce faire, les valeurs standard suivantes sont utilisées :  $1,35 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  pour la couche supérieure (0-30 cm),  $1,5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  pour les autres couches (30-60 cm et 60-90 cm) en terre arable et  $1,3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  en prairie.

## 1.5 Contrôle APL

### 1.5.1 Etablissement des références

Dans le cadre de la mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA), GRENeRA et l'UCL, partenaires scientifiques de Nitrawal asbl, ont mis en place un réseau de points représentatifs appelé Survey Surfaces Agricoles (SSA).

Ce réseau constitué en 2002 comprenait 25 exploitations agricoles. Par après, en vue de satisfaire un nombre minimum (20) d'observations par classes, des mesures de reliquats azotés ont été effectuées dans d'autres exploitations agricoles renseignées pour la qualité de leur gestion de l'azote et inscrites dans le SSA. En 2015, le Survey Surfaces Agricoles était constitué de 41 exploitations (figure 2-1).

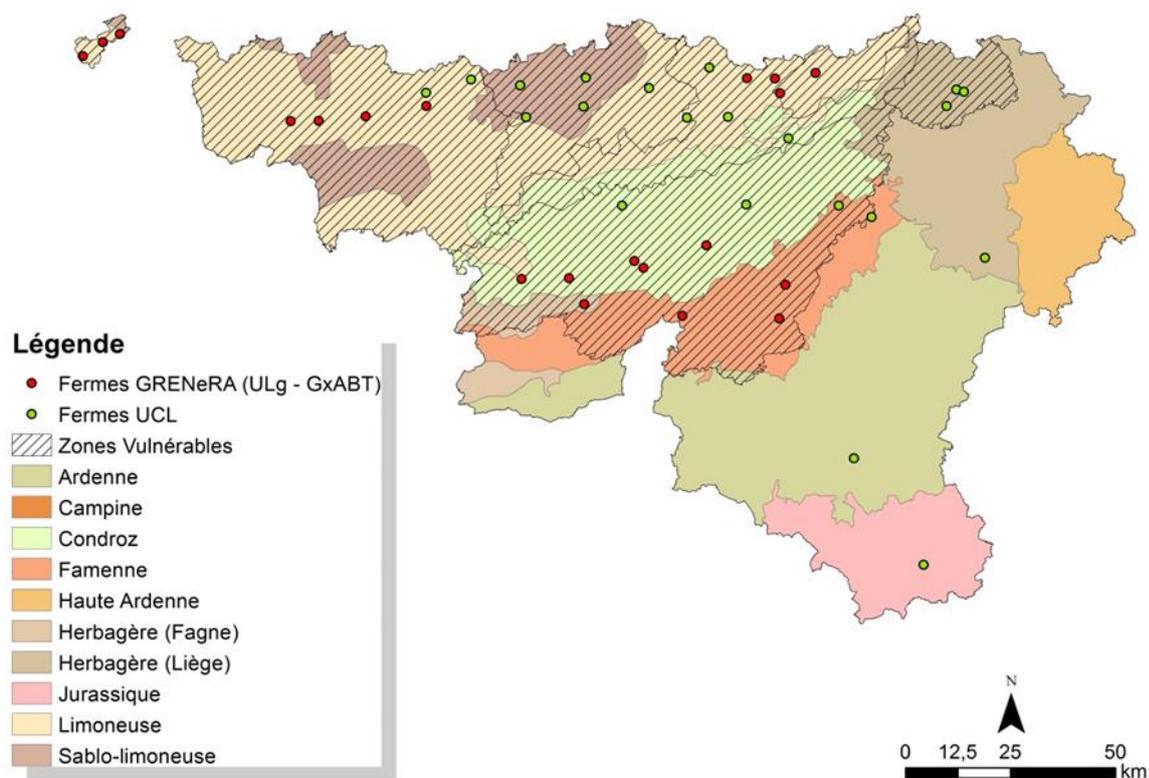


Figure 2-1. Carte du Survey Surfaces Agricoles.

Des profils de concentration en azote nitrique du sol sont établis au printemps (pour conseil de fumure des cultures), en été (après la récolte des céréales) et en automne (octobre et décembre).

Ce réseau constitue l'outil d'acquisition de données en vue de proposer des valeurs d'APL de référence telles que définies dans l'Arrêté du Gouvernement wallon relatif au Livre II du Code de

l'environnement contenant le Code de l'eau (Art R232) et dans l'Arrêté ministériel portant certaines dispositions d'exécution relatives aux techniques de mesure de l'azote potentiellement lessivable et au "survey surfaces agricoles" en application du chapitre IV de la partie réglementaire du Code de l'Eau.

*Art. R.232. Chaque année, les Ministres qui ont la politique de l'eau et l'agriculture dans leurs attributions établissent des valeurs de référence d'azote potentiellement lessivable (APL) permettant d'évaluer les incidences des actions entreprises et d'orienter les mesures mises en œuvre en vue de lutter contre la pollution des eaux par le nitrate. Ces valeurs sont établies en se basant notamment sur les éléments suivants :*

*1° les conditions météorologiques ayant prévalu dans l'année;*

*2° les résultats de profils azotés distribués en un réseau de points représentatifs appelé "survey surfaces agricoles";*

*3° le type de culture;*

*4° la localisation géographique et les conditions pédologiques.*

**Extrait de l'Arrêté du Gouvernement wallon relatif au Livre II du Code de l'environnement contenant le Code de l'eau (Art R232).**

*§ 2. La structure d'encadrement met en œuvre le "survey surfaces agricoles" conformément au § 1er. Cette mise en œuvre permet notamment la détermination annuelle des valeurs d'APL de référence indispensables à l'évaluation de la conformité aux bonnes pratiques agricoles nécessaires à la protection des eaux contre les nitrates à partir de sources agricoles.*

*Chaque année, les valeurs des APL de référence, exprimées en kg N-NO<sub>3</sub>/ha, sont établies par la structure d'encadrement et transmises au ministre pour approbation au plus tard le 31 janvier sur base du "survey surfaces agricoles" du dernier automne.*

*Les valeurs d'APL de référence ne sont valablement applicables que si elles sont approuvées par le ministre.*

*Les valeurs d'APL de référence sont établies de manière à refléter une gestion optimale de l'azote en vue de la protection des eaux pour l'année considérée et pour chaque classe de l'annexe Ier.*

**Extrait de l'Arrêté ministériel portant certaines dispositions d'exécution relatives aux techniques de mesure de l'azote potentiellement lessivable et au "survey surfaces agricoles" en application du chapitre IV de la partie réglementaire du Code de l'Eau (M.B. 28.03.2008).**

Les APL de référence ont vu le jour dans le cadre du 1<sup>er</sup> PGDA et plus particulièrement dans le contexte de la Démarche Qualité (DQ), engagements volontaires d'environ 400 agriculteurs. A cette époque (2004-2007), l'APL de référence représentait la médiane des observations réalisées dans les parcelles du SSA. L'APL mesuré en DQ était alors coté en fonction de l'écart (intervalle de 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) par rapport à l'APL de référence.

A partir du 2<sup>ème</sup> PGDA (2007) et suite à la révision à la hausse des plafonds d'apport d'engrais de ferme en culture et en prairie, le contrôle APL a été étendu potentiellement à toutes les parcelles situées en zone vulnérable. L'évaluation d'un résultat a été modifiée pour tenir compte de la dispersion (centile 75) des observations réalisées dans le SSA.

Depuis 2013, en vue d'abaisser le seuil de non-conformité, ce dernier n'est plus établi à partir du centile 75 mais bien à partir du centile 66.

Ainsi, depuis lors, la référence APL reste la médiane des observations et l'objectif à atteindre en termes de gestion de l'azote. Le seuil d'intervention (référence au Décret Sol) ou de non-conformité représente la valeur à partir de laquelle un résultat conduit à un classement de non-conformité pour une parcelle contrôlée.

Les cultures sont réparties en 7 classes selon l'itinéraire cultural (tableau 2-1). Les prairies pâturées, mixtes et de fauche sont regroupées dans une huitième classe.

**Tableau 2-1. Classes de cultures et prairie.**

Classe	Itinéraires culturaux
A1	Betterave (sucrière et fourragère)
A2	Céréales non suivies d'une culture implantée en automne
A3	Céréales suivies d'une culture implantée en automne; chicorée
A4	Maïs
A5	Pomme de terre
A6	Colza
A7	Légumes cultivés pour leurs feuilles, tiges ou fruits
A8	Prairies

En 2015, 257 parcelles ont été suivies en octobre et en décembre pour l'établissement des références APL. Six parcelles ont été « rejetées » soit parce que les pratiques de gestion de l'azote ne respectaient pas le PGDA (fertilisation organique ou minérale excessive), soit parce qu'elles présentaient des résultats aberrants (au sens du test statistique de Grubbs).

Un nombre minimum de parcelles nécessaires est fixé pour l'établissement des APL : 10 pour les classes A1 et A2, 20 pour les classes A3 à A7, 30 pour la classe A8.

Les observations sont réalisées à deux reprises dans le Survey Surfaces Agricoles : entre le 20 et le 30 octobre et entre le 1<sup>er</sup> et le 10 décembre.

Le test de Grubbs (Dagnelie, 1998a) est basé sur la comparaison d'un écart réduit à une valeur théorique. Le calcul de l'écart réduit se fait par différence entre la valeur moyenne de l'effectif de la classe et la valeur observée, qui est divisée par l'écart-type de la classe. Chaque écart réduit est comparé à la valeur théorique.

Les résultats conservés permettent de construire un graphe de référence APL pour chaque classe (figure 2-2). Ce graphe comporte trois droites :

- la médiane des références,
- le centile 66 des références
- un seuil d'intervention qui ajoute au centile 66 une tolérance représentant l'imprécision de la mesure

Cette tolérance est fixée à 19,8% de la médiane avec un plancher de 15 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> pour les cultures et à 23.8 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> pour les prairies.

Lorsque le résultat d'une parcelle contrôlée est (figure 2-2) :

- inférieur la médiane : il est qualifié de bon,
- entre la médiane et le centile 66 : il est qualifié de satisfaisant,
- entre le centile 66 et le seuil d'intervention : il est qualifié de « limite » ; l'agriculteur bénéficie du doute lié à l'imprécision de la mesure. Son attention doit être attirée.
- au-delà du seuil d'intervention : il est qualifié de mauvais.

Dans les trois premiers cas de figure, l'APL est considéré conforme. Dans le quatrième cas, il est non conforme.

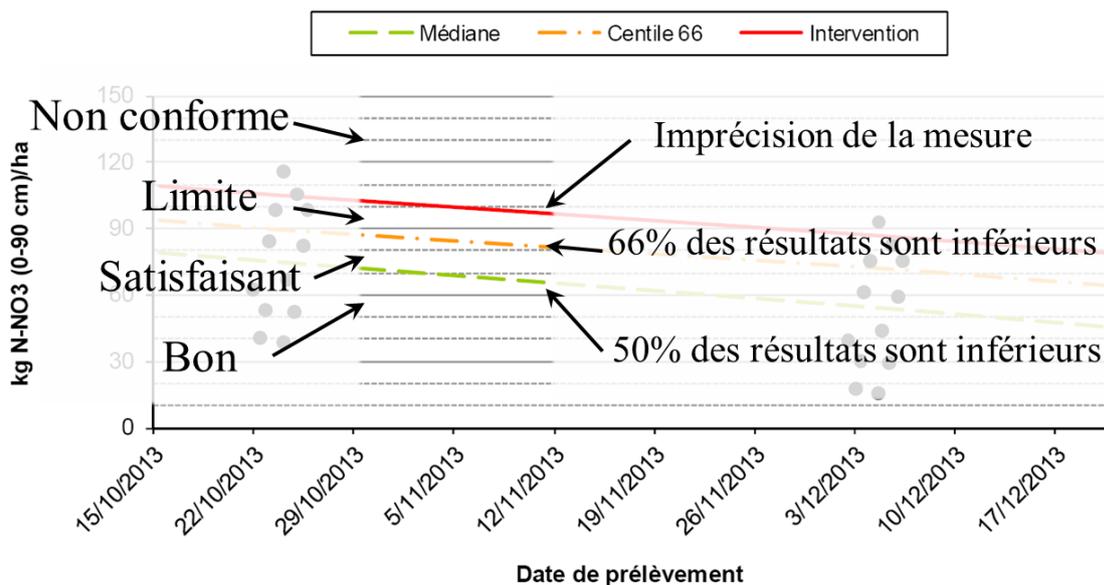


Figure 2-2. Graphe de référence APL et interprétation du résultat.

### 1.5.2 Contrôle et évaluation des résultats

Conformément à l'Arrêté ministériel du 18 février 2008<sup>3</sup>, l'administration (Service Public de Wallonie) procède chaque année au contrôle d'exploitations agricoles parmi celles ayant une partie ou la totalité de leur superficie agricole en zone vulnérable.

Au sein des exploitations agricoles sélectionnées, l'administration identifie 3 parcelles dans lesquelles des échantillons de sol sont prélevés, entre le 15 octobre et le 30 novembre inclus, en vue d'y doser l'azote potentiellement lessivable, ainsi qu'une parcelle de remplacement.

Le Ministre fixe les conditions de prélèvement et de conditionnement des échantillons, ainsi que de leur analyse par un laboratoire agréé.

L'administration communique au laboratoire agréé chargé de l'analyse les coordonnées des exploitations agricoles sélectionnées ainsi que l'emplacement des parcelles à échantillonner avant le 1er octobre de chaque année. Si l'administration se charge du prélèvement des échantillons de sol, elle en avertit le laboratoire chargé de l'analyse.

L'agriculteur dont l'exploitation agricole a été sélectionnée est averti au minimum sept jours ouvrables avant la date d'échantillonnage.

Les résultats des analyses sont transmis par le laboratoire agréé à l'agriculteur et à l'administration dans les dix jours ouvrables suivant le prélèvement.

Dans les dix jours ouvrables suivant la réception des résultats d'analyse, et au plus tard le 20 décembre de l'année de prélèvement, l'agriculteur peut faire échantillonner à ses frais, par un laboratoire agréé de son choix, une ou plusieurs parcelles précédemment échantillonnées, en vue d'une analyse contradictoire. Les résultats des analyses les plus favorables à l'agriculteur sont pris en compte par l'administration.

Sur base des résultats du Survey Surfaces Agricoles, l'administration vérifie, pour chaque parcelle échantillonnée, si l'APL mesuré est conforme aux bonnes pratiques agricoles nécessaires à la protection des eaux contre la pollution par le nitrate à partir de sources agricoles. L'APL mesuré est considéré conforme à ces bonnes pratiques s'il est situé dans la fourchette de tolérance par rapport à la valeur de référence annuelle.

Pour une année donnée, une exploitation agricole est déclarée conforme lorsqu'au moins deux des trois parcelles échantillonnées au sein de celle-ci présentent un résultat conforme. Dans le cas contraire, l'exploitation agricole considérée est déclarée non conforme.

Une exploitation agricole déclarée non conforme pour une année donnée est soumise à un programme d'observation des APL.

Une exploitation agricole soumise au programme d'observation des APL est tenue de prendre toutes les mesures nécessaires pour respecter les bonnes pratiques agricoles nécessaires à la protection des eaux contre la pollution par le nitrate d'origine agricole. Pour ce faire, elle peut bénéficier de l'aide et des conseils de la structure d'encadrement.

L'agriculteur dont l'exploitation agricole est soumise au programme d'observation des APL doit, de sa propre initiative et à ses frais, faire effectuer annuellement des mesures d'APL par un laboratoire agréé de son choix sur au moins trois parcelles de son exploitation agricole désignées par l'administration.

Dans le cas où l'agriculteur omet de choisir un laboratoire agréé ou s'abstient de faire réaliser les mesures d'APL, les APL de son exploitation agricole sont déclarés non conformes pour l'année considérée.

---

<sup>3</sup> Arrêté ministériel portant certaines dispositions d'exécution relatives aux techniques de mesure de l'azote potentiellement lessivable et au « survey surfaces agricoles » en application du chapitre IV de la partie réglementaire du Code de l'Eau (M.B. 28.03.2008)

Un programme d'observation des APL d'une exploitation agricole est clôturé lorsque l'exploitation agricole est déclarée conforme par l'administration pour deux périodes annuelles de prélèvement successives.

L'agriculteur dont l'exploitation agricole est déclarée non conforme pendant trois années au moins, consécutives ou non, au cours d'un même programme d'observation des APL, est passible d'une amende administrative. Le montant de cette amende administrative s'élève à 120 euros par hectare de superficie agricole déclarée de l'exploitation agricole considérée.

L'amende fixée est réduite à 40 euros par hectare de superficie agricole déclarée de l'exploitation agricole considérée, aux conditions cumulatives suivantes :

- l'agriculteur a fait appel aux conseils de la structure d'encadrement dès la première année du programme de suivi des APL ;
- les APL de l'exploitation agricole concernée ont été en amélioration progressive par rapport aux résultats de l'année qui a motivé l'entrée dans le programme de suivi des APL.

L'amende fixée est réduite à 20 euros par hectare de superficie agricole déclarée de l'exploitation agricole considérée, si, en plus des conditions précédentes, l'APL d'une parcelle échantillonnée cultivée avec une culture à risque (maïs, pomme de terre, légumes et colza) la dernière année d'échantillonnage précédant la sanction est déclarée conforme.

Pour chaque année supplémentaire du même programme, consécutive ou non, au cours de laquelle l'exploitation agricole est à nouveau déclarée non conforme les amendes fixées sont multipliées par un facteur 2 par rapport au montant de l'amende précédente.

Le montant total de l'amende fixée pour une exploitation agricole ne peut être inférieur à 50 € ni supérieur à 50.000 € par an.

## 2 Atouts de l'indicateur APL

La méthodologie utilisée pour évaluer l'indicateur APL est calquée sur celle mise en œuvre dans le cadre du projet *Framework for assessing sustainability levels in Belgian agricultural systems* (SAFE) (Peeters et al., 2005; Sauvenier et al., 2005; Van Cauwenbergh et al., 2007) ; projet auquel nous avons contribué (Vandenbergh et al., 2005). Cette méthodologie d'analyse est également proposée par le Corpen (2006) et Turbé et al. (2010) pour l'étude de l'utilité d'un indicateur.

L'analyse porte sur les réponses données à sept questions.

### 2.1 En liaison avec le risque

**L'indicateur est-il bien en relation avec le risque de contamination des eaux souterraines par le nitrate ?**

Depuis 2003, six lysimètres sont installés en plein champ, dans six parcelles sur sols limoneux typiques situées en Hesbaye liégeoise. Ceux-ci sont constitués d'un tonneau de 1,5 mètre de hauteur et un mètre carré de section, ouvert à son sommet et fermé à la base (figure 2-3). Ils sont placés à deux mètres de profondeur de manière à ne pas entraver les travaux du sol. Chaque lysimètre est raccordé, par un tuyau en polyéthylène, à une chambre de visite placée en bordure de parcelle de façon à collecter gravitairement l'eau récoltée à la base des lysimètres (Fonder et al., 2005).

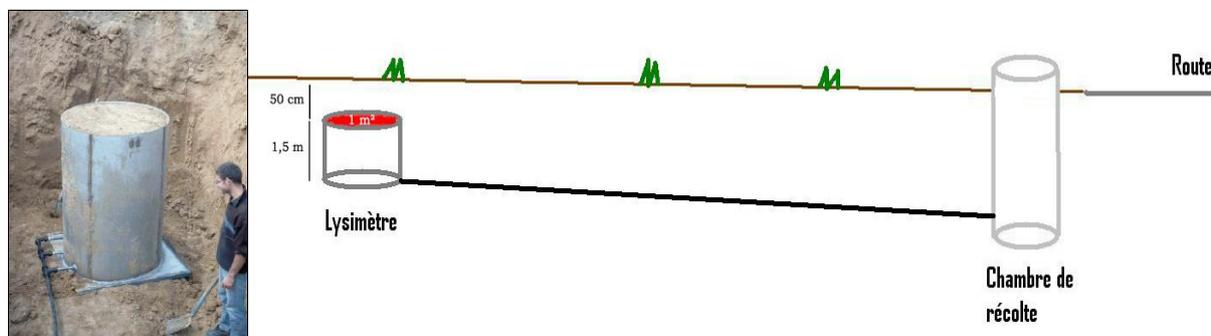


Figure 2-3. Schéma d'un lysimètre.

Des sites lysimétriques comparables installés en France, Allemagne ou Angleterre ont mis en évidence l'impact de facteurs anthropiques (succession culturale, fertilisation, gestion de l'interculture, intensité du pâturage) et pédoclimatiques (pluviométrie, propriétés du sol) sur la lixiviation du nitrate (Boniface, 1996; Chapot et al., 1996; Knappe et al., 2002; Shepherd and Webb, 1999).

L'étude en cours depuis 2003 dans les parcelles équipées de lysimètres en Hesbaye liégeoise a permis de confirmer l'impact des facteurs évoqués précédemment (Deneufbourg et al., 2009; Deneufbourg et al., 2010; Deneufbourg et al., 2011; Fonder et al., 2007; Fonder et al., 2005).

La spécificité de cette étude est également de rechercher une relation entre l'APL et la concentration en nitrate des percolats. Après huit années de suivi, il apparaît (figure 2-4) que l'ordre de grandeur de l'APL (exprimé en  $\text{kg N-NO}_3\cdot\text{ha}^{-1}$ ) est équivalent à la concentration moyenne en nitrate (exprimée en  $\text{mg NO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ ) de l'eau récoltée à la base du lysimètre au cours de la période de drainage qui suit la mesure de l'APL (Fonder et al., 2010; Vandenbergh and Marcoen, 2010; Vandenbergh et al., 2009).

La qualité de cette relation a également été observée par De Ruijter et al. (2007) lors du suivi de 34 exploitations agricoles aux Pays-Bas au cours de trois années successives durant lesquelles plusieurs milliers de mesures APL et d'observation dans l'aquifère (1 à 3 m de profondeur) ont été réalisées.

En Allemagne, Schweigert and Zimmerman (2003), Pamperin et al. (2003) ont également mis en évidence la qualité de l'APL en tant qu'indicateur environnemental.

Cette relation APL – qualité de l'eau à l'échelle parcellaire a fait l'objet d'un article publié dans la revue BASE et repris au Chapitre 3.2.

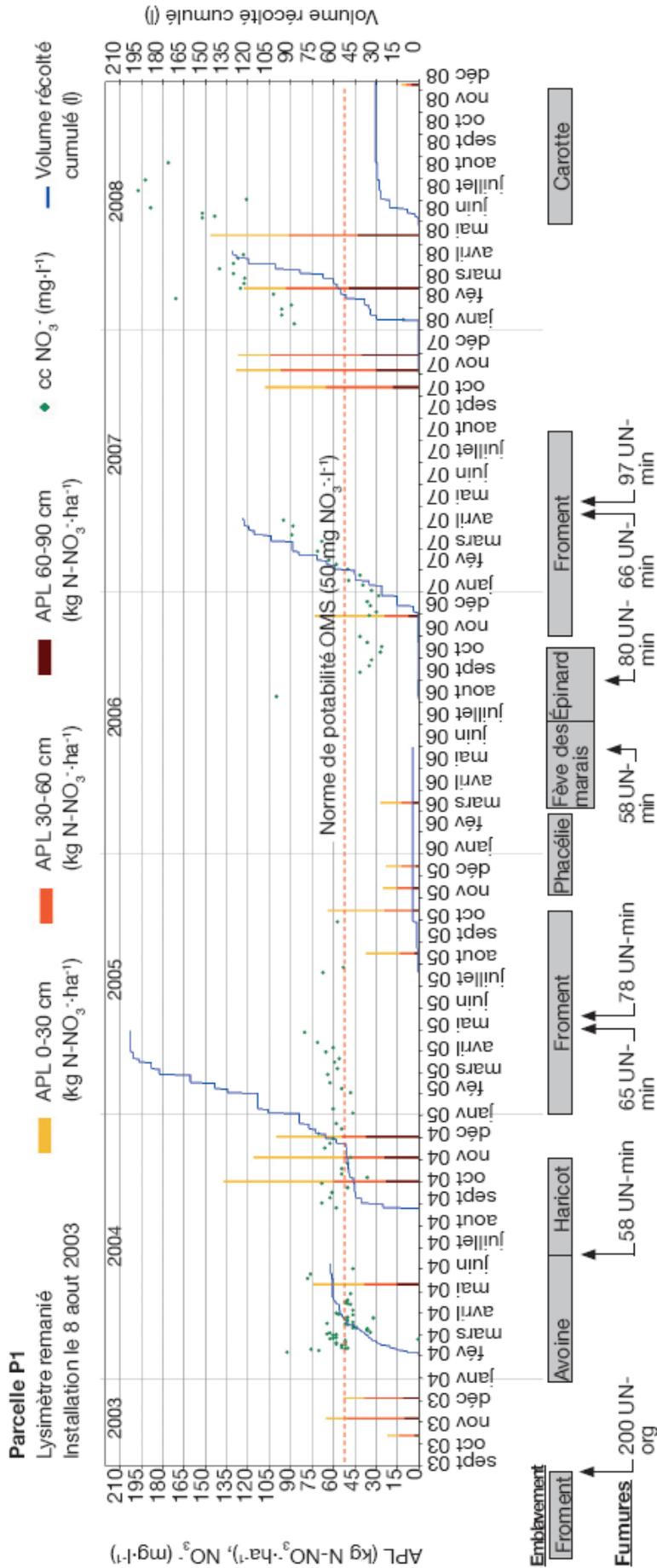


Figure 2-4. Lysimètre P1. Illustration des observations APL – concentration en nitrate de l'eau (Fonder et al., 2010).

Cette même relation est également étudiée à l'échelle d'un petit bassin versant agricole (~ 100 hectares) depuis 2004 et a également fait l'objet d'une publication. Cet article est repris au Chapitre 3.3.

En conséquence, nous pouvons considérer que l'indicateur APL est bien en relation avec le risque de contamination des eaux souterraines par le nitrate d'origine agricole.

## **2.2 Transférable**

### **L'indicateur peut-il être applicable dans la majorité des exploitations agricoles belges ?**

La première condition liée à la transférabilité est d'ordre opérationnel : pour utiliser l'indicateur APL dans une exploitation, il faut que cette dernière possède des parcelles qui puissent être échantillonnées. C'est le cas de la majorité des exploitations agricoles situées en région wallonne. A titre d'exemple, dans la province du Hainaut, 99% des exploitations agricoles possèdent au moins une parcelle.

Ensuite, il est important de vérifier que l'indicateur ne soit pas trop influencé par les conditions édaphiques. La réponse à cette question est fournie par l'analyse des résultats du contrôle APL mis en place par le SPW depuis 2007. Dans ce cadre, de l'ordre de 900 parcelles sont choisies chaque année afin d'être échantillonnées en vue d'une mesure de l'APL. Les résultats sont comparés à des valeurs de référence et des valeurs limites établies dans un réseau constitué d'une trentaine de fermes où le raisonnement de la fertilisation est encadré par GxABT (GRENeRA) et l'UCL (Vandenberghé and Marcoen, 2004).

Les parcelles échantillonnées sont jugées conformes ou non selon que le résultat de la mesure d'APL est inférieur ou pas à la valeur limite correspondante de l'APL.

Un test  $\chi^2$  d'indépendance (Dagnelie, 1998a) est réalisé pour analyser si la conformité des résultats est indépendante du type de sol ; seules les parcelles choisies de manière aléatoire par le SPW sont prises en considération dans ce test.

En 2007, 786 parcelles ont été sélectionnées de manière aléatoire par le SPW. Les résultats (conformité) ont été classés en fonction de la texture (Bah et al., 2005) de la partie supérieure du profil de sol.

Les résultats du contrôle APL réalisé par le SPW en 2007 indiquent (tableau 2-2) que 75% des parcelles contrôlées ont une texture limoneuse. La texture qui permet d'obtenir le pourcentage de conformité le plus élevé est le limon sableux (71% de conformité) tandis qu'avec 45% de conformité, les parcelles à texture argile légère présentent le pourcentage le plus faible.

**Tableau 2-2. Contrôle APL 2007. Conformité des parcelles en fonction du type de sol.**

Sol	Nb parcelles conformes	Nb total parcelles	Proportion conformité
<b>U : argile lourde</b>	1	1	100%
<b>E : argile légère</b>	9	20	45%
<b>A : limon</b>	416	591	70%
<b>G : limon (peu) caillouteux</b>	70	106	66%
<b>L : limon sableux</b>	29	41	71%
<b>P : limon sableux léger</b>	1	1	100%
<b>S : sable limoneux</b>	6	10	60%
<b>Total</b>	<b>532</b>	<b>770</b>	<b>69%</b>

Dans le cas du test d'indépendance de la conformité de la parcelle relativement au type de sol,  $\chi^2_{\text{obs}} = 6,6$ . Cette valeur est inférieure à la valeur  $\chi^2 = 16,8$  trouvée dans les tables (Dagnelie, 1998a) pour 6 degrés de liberté et un degré de signification  $\alpha = 1\%$  et on conclut donc que le caractère conforme ou non de la parcelle est indépendant du type de sol.

Les résultats du contrôle APL réalisé par le SPW en 2008 indiquent (tableau 2-3) que 71% des parcelles contrôlées ont une texture limoneuse. La texture qui permet d'obtenir le pourcentage de conformité le plus élevé est un sable limoneux (80% de conformité) tandis qu'avec dix parcelles conformes sur 18 contrôlées (56% de conformité), les parcelles à texture argile légère présentent le pourcentage le plus faible.

**Tableau 2-3. Contrôle APL 2008. Conformité des parcelles en fonction du type de sol.**

Sol	Nb parcelles conformes	Nb total de parcelles	Proportion conformité
<b>E : argile légère</b>	10	18	56%
<b>A : limon</b>	364	529	69%
<b>G : limon (peu) caillouteux</b>	49	85	58%
<b>L : limon sableux</b>	66	89	74%
<b>S : sable limoneux</b>	8	10	80%
<b>Total</b>	<b>497</b>	<b>731</b>	<b>68%</b>

Dans le cas du test d'indépendance de la conformité de la parcelle vis-à-vis du type de sol,  $\chi^2_{\text{obs}}$  égale 11,4. Cette valeur est inférieure à la valeur  $\chi^2 = 15,1$  trouvée dans les tables (Dagnelie, 1998a) pour 5 degrés de liberté et un degré de signification  $\alpha = 1\%$ . On conclut, comme pour les résultats de 2007, que le caractère conforme ou non de la parcelle lors du contrôle 2008 est indépendant du type de sol.

Les résultats du contrôle APL réalisé par le SPW en 2009 indiquent (tableau 2-4) que 70% des parcelles contrôlées sont classées selon la CNSW en limon (A). La texture qui permet d'obtenir le pourcentage de conformité le plus élevé est le limon caillouteux (92% de conformité) tandis que l'argile lourde présente le pourcentage le plus faible (60% de conformité).

**Tableau 2-4. Contrôle APL 2009. Conformité des parcelles en fonction du type de sol.**

Sol	Nb parcelles conformes	Nb total de parcelles	Proportion conformité
<b>U : argile lourde</b>	3	5	60%
<b>E : argile légère</b>	12	15	80%
<b>A : limon</b>	323	408	79%
<b>L : limon sableux</b>	36	42	86%
<b>P : limon sableux léger</b>	4	6	67%
<b>S : sable limoneux</b>	6	8	75%
<b>Z : sable</b>	2	3	67%
<b>G : limon (peu) caillouteux</b>	67	73	92%
<b>Total</b>	<b>453</b>	<b>560</b>	<b>81%</b>

Dans le cadre du test d'indépendance de la conformité de la parcelle vis-à-vis du type de sol, certains regroupements ont dû être opérés (classes U et E, classes L et P, classes S et Z – cf. tableau 2-4) afin de disposer d'un nombre suffisant d'observations par classe.  $\chi^2_{\text{obs}}$  égale alors 10. Cette valeur est inférieure à la valeur  $\chi^2 = 11,1$  trouvée dans les tables (Dagnelie, 1998a) pour 5 degrés de liberté et un degré de signification  $\alpha = 5\%$ .

On conclut, tout comme en 2007 et 2008, que le caractère conforme ou non de la parcelle lors du contrôle 2009 est indépendant du type de sol.

## **2.3 Transparent**

### **L'indicateur est-il facilement compréhensible et facile à interpréter ?**

Le résultat exprimé en kilo d'azote (nitrique) par hectare, dérivé d'une concentration en nitrate dans un extrait de sol, est plus facilement compréhensible que cette dernière par les agriculteurs puisqu'ils utilisent cette unité pour exprimer la fertilisation appliquée aux cultures.

Il leur est donc aisé d'interpréter un APL de  $87 \text{ kg N-NO}_3 \cdot \text{ha}^{-1}$  lorsqu'ils ont, par exemple, appliqué une fertilisation de  $160 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ . L'expérience des conseillers de Nitrawal asbl, régulièrement en contact avec les agriculteurs, confirme la bonne compréhension de cet indicateur.

## **2.4 Mesurable**

### **Cet indicateur est-il facilement mesurable ?**

On peut considérer qu'il est facilement mesurable parce que :

- les laboratoires provinciaux et institutions de recherches réalisent ce type d'analyse depuis plus de trente ans soit dans le cadre de conseils de fertilisation pour les agriculteurs, soit dans le cadre d'expérimentations ;
- son cout reste encore assez accessible (quelques dizaines d'euros).

Néanmoins, la mesure revêt deux contraintes :

- l'échantillonnage se déroule en fin d'automne, période pas toujours humainement propice (froid, pluie) à ces travaux ;
- le résultat final résulte d'une série de manipulations (§ 1.2 et §1.3, page 35) dont il convient de s'assurer de la qualité de l'exécution au risque d'établir un résultat très différent de la valeur 'vraie' de la parcelle.

## **2.5 Validité analytique**

### **La mesure de l'indicateur est-elle scientifiquement validée ?**

La mesure de l'APL ne peut être réalisée que par des laboratoires agréés pour ce type d'analyse. L'agrément s'obtient/se conserve par la participation régulière (trois fois par an) à des essais interlaboratoires organisés par le CRAW, laboratoire de référence de la Chaîne Nitrate-Sol de Requasud.

Ces essais consistent en l'analyse de dix échantillons (cinq échantillons en double aveugle) dont les résultats permettent d'évaluer la répétabilité et la justesse de l'analyse.

Compte tenu des résultats de ces essais interlaboratoires (précision de l'ordre de quelques pourcents), on peut considérer que l'analyse en laboratoire est valide.

## **2.6 Discriminant**

### **L'APL permet-il de faire la distinction entre des changements dus à des facteurs externes, à des modes de gestions différenciés ?**

Le caractère discriminant relatif à des modes de gestion est illustré par les résultats enregistrés sur une plateforme expérimentale relative à la réponse du rendement à une fertilisation croissante. Cette expérimentation a ainsi pu montrer que lorsque la fertilisation est supérieure à l'optimum de rendement, l'APL est significativement plus élevé qu'à fertilisation optimale.

Le protocole et les résultats de cette expérimentation figurent au Chapitre 3.1 (page 123).

Ce caractère discriminant est également illustré au travers du mode de gestion d'une parcelle après la récolte de céréale : un sol laissé nu, une culture d'hiver (telle que du colza, de l'escourgeon ou du froment) semée ou une CIPAN semée (avec ou sans apport de matière organique) sont autant d'alternatives agronomiques qui présentent une « signature » APL distincte. Cet aspect a fait l'objet d'un article publié dans la revue BASE et repris au Chapitre 4.2 (page 183).

Le caractère 'discriminant dans le temps' est développé au paragraphe 4. Ce chapitre illustre la variabilité intra et interannuelle de l'APL au cours du temps, pour une même occupation de sol. Par ailleurs, il illustre également un second angle de vue du caractère discriminant relatif au mode de

gestion : la nature de la culture précédant la mesure de l'APL. Chaque culture présente en effet une allure d'APL (niveau, tendance au cours de l'automne) qui lui est propre.

Le caractère 'discriminant dans l'espace' est développé sous deux angles : un 'chimique' et un 'physique' (les deux étant bien souvent liés).

L'angle 'chimique' est illustré par la dépendance de l'APL à la teneur en carbone d'une parcelle. En 2012, lors du contrôle APL mené par le SPW, outre la teneur en nitrate, les laboratoires ont également dosé le carbone dans le sol. L'analyse de ces résultats a révélé que l'appréciation de la conformité d'un résultat (*non conforme, limite, satisfaisant* ou *bon*) est dépendante de la teneur en carbone du sol. En d'autres mots, les résultats qualifiés *non conformes* présentent un taux de carbone significativement plus élevé que les autres résultats.

Cette étude a fait l'objet d'un article soumis à publication dans la revue BASE et est reprise au Chapitre 3.4 (page 167).

L'angle 'physique' est illustré par une étude 'intraparcellaire'. Afin de déterminer la relation entre le niveau de précision de la mesure et le nombre de carotte à prélever, environ 140 carottes ont été prélevées et analysées dans deux parcelles. L'une de ces deux parcelles présente une toposéquence typique d'un plateau-versant-fond de vallée condruzien. Le traitement statistique des résultats a mis en évidence une relation (différence faible mais significative) entre le résultat et le type de sol.

Le détail de cette étude est développé au paragraphe 3.2 (page 52).

## **2.7 Pertinence politique**

Cet indicateur peut-il aider au contrôle des effets des décisions politiques et à l'identification des régions ou des systèmes où une action politique est nécessaire ?

L'expérience pilote menée sur le bassin versant agricole d'Arquennes depuis 2004 permet d'illustrer le contrôle des effets des décisions politique, à savoir la mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA). Ainsi, avant la mise en œuvre effective du PGDA, l'APL moyen (à l'échelle du bassin versant) était compris entre 60 et 70 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et deux-trois ans après sa mise en œuvre (encadrée par les conseillers de Nitrawal asbl), l'APL moyen avait quasiment diminué de moitié. Trois-quatre années après cette diminution 'en surface', la concentration en nitrate dans l'eau souterraine a affiché la même tendance.

Cet aspect a fait l'objet de la publication d'un article dans la revue BASE, article qui est repris au Chapitre 3.3 (page 149).

Un constat similaire a été réalisé à l'échelle parcellaire au moyen de lysimètres installés en plein champ depuis 2003. Ces outils permettent la collecte d'eau de percolation à deux mètres de profondeur. L'examen des résultats d'analyses de sol (APL) et d'eau illustre la dépendance des stocks et flux de nitrate aux pratiques agricoles (gestion des cultures et intercultures). Ces résultats ont permis d'orienter/justifier le contenu du PGDA.

Cet aspect a également fait l'objet d'une publication d'un article dans la revue BASE, article repris au Chapitre 3.2 (page 133).

En matière d'identification des régions ou des systèmes où une action est nécessaire, le contrôle APL mis en œuvre par le SPW permet chaque année de pointer en zone vulnérable quelques dizaines d'exploitations agricoles où des changements de pratiques agricoles doivent être mis en œuvre par les

agriculteurs concernés et confirmés les années suivantes par des contrôles APL toujours diligentés par le SPW.

La performance de ce contrôle a fait l'objet d'une publication d'un article dans la revue BASE, article qui est repris au Chapitre 2.5 (page 111).

### 3 Limites de l'indicateur APL

#### 3.1 Introduction

L'expression « mesurer l'APL d'une parcelle » est certainement un abus de langage ; il serait plus approprié d' « estimer l'APL d'une parcelle » au vu du nombre d'étapes à mener pour pouvoir exprimer un résultat.

Rappelons ainsi :

- que tout le sol de la parcelle (~ 4000 tonnes par hectare) n'est pas analysé ; seulement quelques centaines de grammes sont échantillonnés pour l'analyse (§1.2 Echantillonnage) ;
- que cet échantillon est « vivant » et que s'il n'est pas conservé correctement, l'azote peut continuer à se transformer (figure 1-7) ;
- que la transformation du résultat analytique en  $\text{kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  se fait en y intégrant la densité du sol et sa charge caillouteuse, deux paramètres qui ne sont pas « mesurés » lors de l'échantillonnage ;

Par ailleurs, le sol étant soumis aux aléas du climat, sa concentration en nitrate est donc, outre la gestion pratiquée par l'agriculteur, sensible à ce facteur.

Les paragraphes qui suivent vont s'attacher à étudier ces facteurs d'incertitudes/sources de variation (synthétisés à la figure 2-5) et le cas échéant, à apporter les solutions pour que l'estimation de l'APL soit la plus proche possible de la valeur vraie.

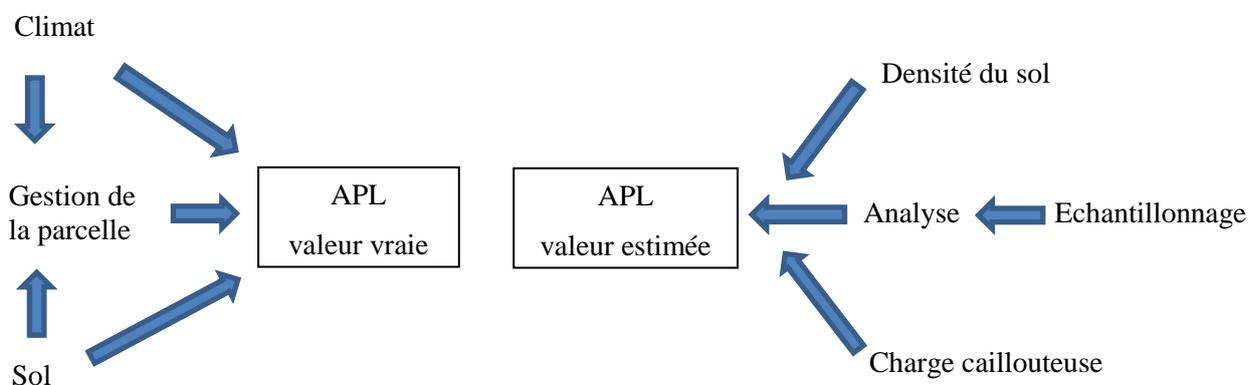


Figure 2-5. Facteurs influençant l'APL d'une parcelle et son estimation.

## 3.2 Variabilité spatiale intraparcellaire

### 3.2.1 Introduction - Etat des connaissances

La difficulté d'un échantillonnage pour la mesure d'un reliquat azoté est mise en évidence, dans le cadre de nombreuses expérimentations (Marchetti et al., 2001; Silverthooth et al., 1992; Tychon et al., 1990), par des valeurs élevées du coefficient de variation du profil des concentrations en azote d'un sol agricole (tableau 2-5).

**Tableau 2-5. Teneur en azote minéral en kg.ha<sup>-1</sup> dans un profil de 150 cm de sol (Tychon et al., 1990).**

	Prairie		EP.L		EP.S		CE.uL		PDT.P		MA.uL	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Moyenne	24	26	71	78	42	62	69	75	136	66	159	68
Écart-type	5	16	15	21	14	17	20	14	13	12	41	9
Coef Variation	0.19	0.61	0.21	0.27	0.32	0.27	0.30	0.18	0.10	0.18	0.26	0.13

**a : 12 octobre 1988 b : 21 mars 1989**

**EP.L : épeautre sur sol limono-sableux**

**EP.S : épeautre sur sol sablo-limoneux**

**CE.uL : diverses céréales sur sol limono-sableux avec argile à faible profondeur**

**PDT.P : pomme de terre sur sol sablo-limoneux léger**

**MA.uL : maïs sur sol limono-sableux avec argile à faible profondeur**

**Nombre de profils prélevés pour chacune des situations : de 6 à 10**

Cette variabilité a également été mise en évidence par l'utilisation de bougies poreuses comme technique de mesure (Geypens et al., 2001).

Ce niveau de précision interdit une analyse fine des données observées ; celles-ci ne peuvent dès lors servir qu'à la détection de valeurs réellement anormales.

Cependant, il semble que la distribution spatiale des concentrations observées n'évolue guère, de manière relative, à l'échelle de quelques mois (Bruckler et al., 1996).

Quels sont les facteurs qui peuvent conduire à de tels écarts ?

Dans le cas de parcelles présentant plusieurs contextes pédologiques, la variabilité spatiale peut, en partie, être expliquée par les différences de propriétés des sols. Plusieurs études ont en effet montré l'existence d'une relation

- entre la granulométrie d'un sol et la lixiviation (Beaudoin et al., 2008; Catin, 2001; Spychaj-Fabisiak and Gonet, 2001; Vetter and Steffens, 1990) (figure 2-6) et
- entre la conductivité électrique d'un sol et le reliquat azoté (Tabor et al., 1985).

La variabilité spatiale d'un reliquat peut également être, en partie, expliquée par une variabilité spatiale de la teneur en eau d'un sol (dépendante de la topographie, du type de sol, ...). La nature du sol dont sa teneur en matière organique influence également la dénitrification (Christensen et al., 1990).

Enfin, la variabilité spatiale peut également être causée par un mode de gestion différencié dans la parcelle (hétérogénéité des apports d'engrais) ou par une croissance (et un prélèvement d'azote) hétérogène de la culture, conséquence d'un problème phytosanitaire non maîtrisé ou d'un contexte pédologique irrégulier. Pour illustrer ce propos, des observations (rendement, reliquat azoté dans le sol en post récolte) ont été réalisées en 2016 sur une parcelle expérimentale (4 répétitions par objet) de colza dont l'objectif était d'évaluer la réponse du rendement de la culture à une dose croissante

d'azote. Pour ce type d'expérimentation, le précédent cultural est identique sur toute la plateforme et celle-ci est placée dans une zone où le sol est réputé très homogène. Les coefficients de variation (pour un même objet 'fertilisation azotée') variaient de 23 à 38% en ce qui concerne le reliquat azoté post-récolte (0-90 cm / moyenne des 20 mesures : 40,8 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>) et de 4 à 11% en ce qui concerne le rendement (moyenne des 20 mesures : 5.118 kg.ha<sup>-1</sup>).

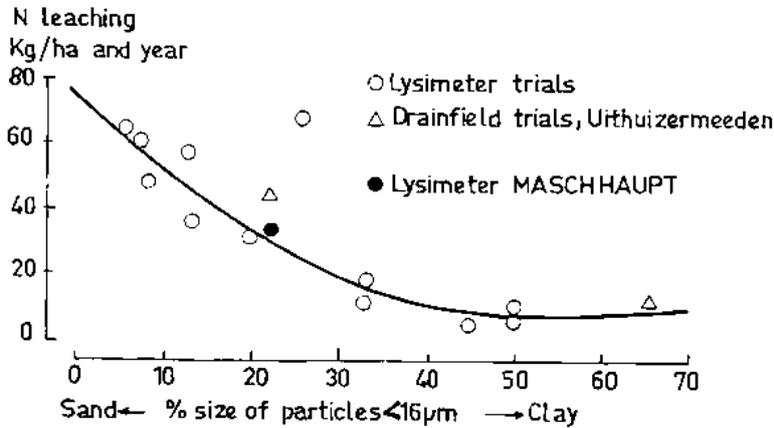


Figure 2-6. Lixiviation de l'azote dans une couche de sol de 80 cm d'épaisseur en fonction du type de sol (Vetter H. et al, 1990).

En référence au guide de l'échantillonnage des sols (Fergusson et al., 1991) proposé par l'Institute of Agriculture and Natural Resources (Université of Nebraska, Lincoln), il est suggéré que l'échantillonnage soit réalisé de manière systématique (et non aléatoire). C'est la seule façon de s'assurer que le résultat des analyses de sol soit représentatif de l'entièreté de la parcelle.

Dans les conditions parcelaires propres aux Etats-Unis, les auteurs de ce guide proposent trois niveaux de précision (idéal, acceptable et inacceptable) en matière de densité et de profondeur d'échantillonnage (tableau 2-6).

Tableau 2-6. Niveaux de qualité d'un échantillonnage de sol (Fergusson et al., 1991).

	Idéal	Acceptable	Inacceptable
Unité de surface pour présentation d'un résultat moyen	8 ha	16 ha	> 16 ha
Nombre d'échantillons par unité de surface	0-20 cm : 15 à 20 20-120 cm : 6 à 8	0-20 cm : 10 à 15 20-90 cm : 6 à 8	0-20 cm : < 10 20-90 cm : < 4
Nombre et épaisseur des couches	0-20 cm 20-60 cm 60-120 cm 120-180 cm (betterave)	0-20 cm 20-90 cm 90-180 cm (betterave)	< 60 cm

Ils signalent également la difficulté d'homogénéiser volume important résultant d'un nombre élevé de prélèvements. Le résultat d'analyse de cet échantillon composite pourrait en effet ne pas être représentatif.

Dans une expérience menée en Suisse (Schimdhalter et al., 1992), cent échantillons ont été prélevés dans un bloc d'un hectare. Les coefficients de variation de l'azote minéral étaient compris entre 30% (couche 0-30 cm) et 47% (couche 60-100 cm).

Les concentrations moyennes observées pour les 3 couches sondées étaient de 31,1 – 23,3 et 15,1 kg N.ha<sup>-1</sup> respectivement pour les couches 0-30 cm, 30-60 cm et 60-100 cm.

Pour les trois profondeurs étudiées, les valeurs de concentration en azote minéral peuvent être considérées comme indépendantes les unes des autres dès que la distance entre les lieux de prélèvement des échantillons dépasse dix mètres.

Les auteurs ont calculé la précision relative d'une mesure en fonction du nombre d'échantillons prélevés (tableau 2-7).

**Tableau 2-7. Niveaux Relation densité d'échantillonnage – précision relative de la mesure de concentration en azote (Schimdhalter et al., 1992).**

Couche	0-30 cm	30-60 cm	60-100 cm
Nombre d'échantillons			
5	26%	37%	42%
10	19%	27%	29%
15	15%	22%	24%
20	13%	19%	21%

A la lecture de ce tableau et vu l'accroissement du coefficient de variation en fonction de la profondeur, l'échantillonnage ne doit pas être réduit en profondeur sous peine de réduire la précision relative du résultat.

Cependant, à valeur absolue de précision égale, respectivement 15, 15 et 10 échantillons sont nécessaires dans les couches 0-30, 30-60 et 60-100 cm pour atteindre, dans ce cas d'étude, un niveau de précision, par couche, de l'ordre de 5 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-8)

**Tableau 2-8. Relation densité d'échantillonnage – précision absolue de la mesure (Schimdhalter et al., 1992).**

Couche	0-30 cm	30-60 cm	60-100 cm
Nombre d'échantillons			
5	8.2 kg N.ha <sup>-1</sup>	8.7	6.3
10	5.6	6.1	4.4
15	4.7	4.4	3.3
20	4.1	4.1	3.1

Dans le cadre d'une étude similaire menée en Allemagne (Stenger et al., 2002), basée sur l'analyse de 144 échantillons de sol prélevés dans 2 parcelles (50 x 50 m.), les auteurs ont montré que pour obtenir une précision de l'ordre de 10%, une cinquantaine d'échantillons est nécessaire. Si une précision plus faible (20%) est satisfaisante, le prélèvement d'une douzaine d'échantillons est alors suffisant.

Par ailleurs, sur base des données recueillies lors de cette étude allemande, une distance minimale de 30 mètres entre deux points de prélèvement est nécessaire afin de garantir l'indépendance des valeurs mesurées.

### 3.2.2 Matériel et méthode

#### a) Introduction

La variabilité intraparcellaire de l'azote potentiellement lessivable (APL) est étudiée dans deux parcelles agricoles, sélectionnées au sein de "sites de références" mis en place par Gembloux Agro-Bio Tech dans le cadre de caractérisations régionales des sols agricoles. Ces sites de références sont, à l'instar des *secteurs de référence* (Favrot et al., 1994) et des *Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux* (Lageat et al., 1996) définis comme des aires-échantillons représentatives de régions naturelles. Les moyens attribués à la caractérisation des sols sont concentrés dans les sites choisis et les références acquises localement sont extrapolables aux régions représentées (Gervasoni, 1996). La représentativité des sites de références est évaluée essentiellement sur base de la reconnaissance de relations géologie-relief-sols et d'un zonage physiographique comme c'est le cas dans les approches de type morphopédologique (Bertrand et al., 1985; Bock, 1994), *Land system* (Dent and Young, 1981) ou pédopaysager (Favrot et al., 1994).

Les questions relatives aux stratégies à adopter pour l'évaluation de la valeur moyenne d'une variable à l'échelle parcellaire ont déjà fait l'objet de nombreux travaux, mais les points suivants méritent d'être rappelés:

- ❑ L'estimation de la valeur moyenne d'une variable sur une surface considérée est entachée d'une erreur. Celle-ci dépend d'une manière générale des coefficients de variation, du nombre d'échantillons et de la structure spatiale de la variable sur la surface étudiée (Arrouays et al., 1997).
- ❑ Dans le cas de variables non-structurées spatialement à l'échelle étudiée et distribuées normalement, la qualité de l'estimation ne dépend que des deux premiers facteurs. Il en résulte que l'estimation de la valeur moyenne, avec un intervalle de confiance donné, peut reposer sur n'importe quelle stratégie spatiale d'échantillonnage ; pourvu que les échantillons soient distants les uns des autres d'une longueur supérieure au plus petit intervalle étudié et que le nombre d'échantillons soit supérieur ou égal à n dans la formule (1):

$$n = t^2 (CV^2)/e^2 \quad (1)$$

avec t = valeur du t de Student, CV = coefficient de variation et e = erreur relative d'estimation de la moyenne (Arrouays et al., 1997; Dagnelie, 1998b).

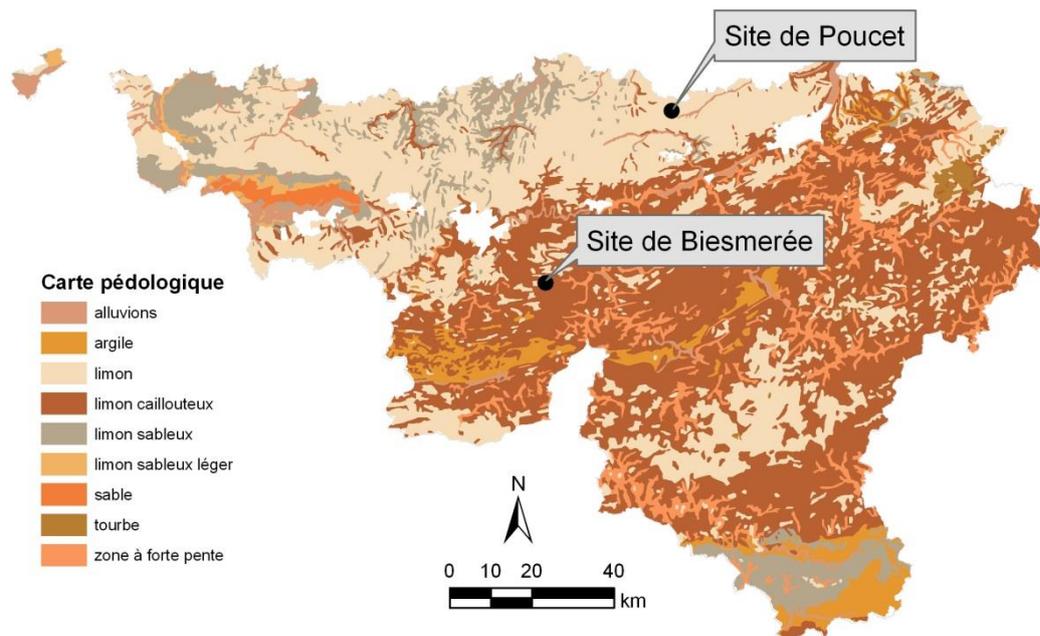
- ❑ Dans le cas de variables structurées spatialement, la structure spatiale peut être appréhendée par un variogramme ou une surface variographique représentant un indice de dissimilitude entre les échantillons (semi-variance) en fonction des distances qui les séparent. L'estimation de la moyenne parcellaire sur base de la moyenne arithmétique des échantillons implique leur non-autocorrélation c.à.d. que la distance entre ces échantillons soit supérieure ou égale à la portée du variogramme. Dans le cas de points autocorrélés, une moyenne locale peut toutefois être estimée par la technique de krigeage de la moyenne (Jolivet, 2000). Dans ce cas, la structure spatiale de l'échantillonnage conditionne le poids à donner à chacune des observations dans l'évaluation de la moyenne.
- ❑ La réalisation d'un suivi temporel nécessite la mise en place d'un dispositif permettant la séparation des variabilités spatiales et temporelles. Ceci peut être réalisé selon une approche de type "monitoring" de plus ou moins longue durée sur un ou plusieurs sites, ou sur base d'une approche de type chronoséquentielle où plusieurs sites représentant des stades d'avancement différents d'un même processus sont étudiés en même temps (Jolivet, 2000).

b) Le site de Poucet

Cadre physique de la parcelle

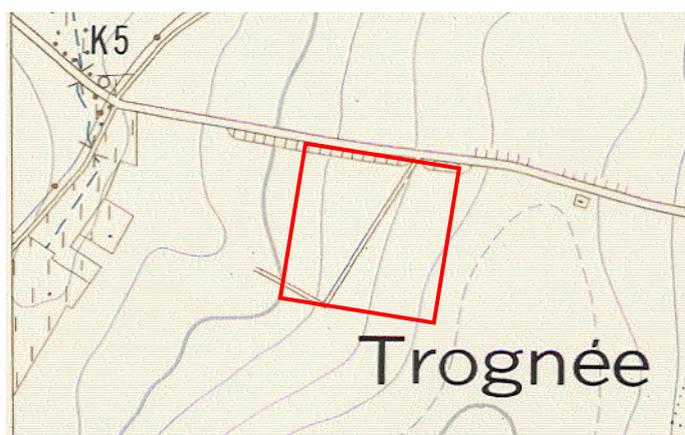
Cette parcelle de 8 hectares se trouve sur le territoire communal de Hannut (30 km au nord-est de Namur).

Elle est située entre la zone vulnérable des sables bruxelliens et la zone vulnérable de Hesbaye (figure 2-7). Ces deux zones, distantes d'une vingtaine de kilomètres, sont pédologiquement caractérisées par des sols limoneux à bon drainage.



**Figure 2-7. Localisation des sites de Poucet et Biesmerée.**

La topographie de la parcelle indique une légère pente transversale. Le chemin qui semble couper la parcelle en deux sur la figure 2-8 n'existe plus depuis de nombreuses années.



**Figure 2-8. Site de Poucet – extrait de la carte IGN 41/2 (1/10.000).**

La parcelle est située sur des limons quaternaires. Les sols appartiennent aux séries Aba et Abp (Carte des Sols de la Belgique à 1/20.000 n°119E). De ce point de vue, ce site de référence est représentatif

de la Hesbaye puisque cette région est constituée quasi exclusivement de ces deux séries de sols (Tavernier and Marechal, 1958).

### Plan d'échantillonnage

L'étude de la variabilité spatiale a été réalisée à partir de la prise et l'analyse individuelle de 135 échantillons de sol. La disposition des points de sondage (sur une surface de 270 x 180 mètres) respecte un maillage principal de 30 mètres. Un maillage secondaire a également été mis en place de manière à évaluer la variabilité à courte distance, c'est-à-dire 2, 5 et 15 mètres.

Le maillage principal permet de couvrir l'entièreté de la zone prospectée. Le maillage secondaire permet de préciser la dissemblance entre des points situés à des distances plus courtes. La couverture d'une surface relativement large garantit une meilleure représentativité spatiale et, notamment dans le cas du site de Biesmerée (détailé ci-après), assure un nombre minimal de prélèvements dans les différents types de sols.

L'échantillonnage a été réalisé au moyen d'un tracteur équipé d'une sonde en demi-lune de section 36 mm.

L'analyse des échantillons de sol a porté sur :

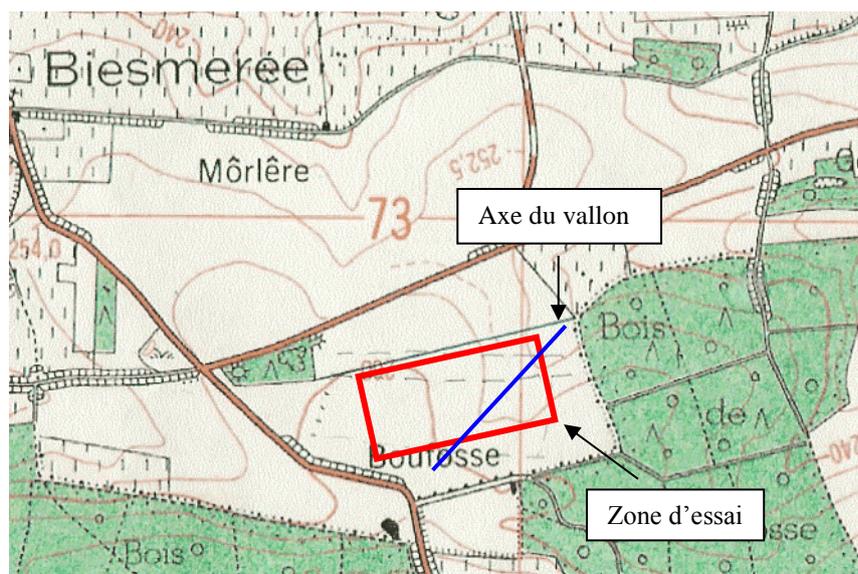
- l'humidité,
- la densité apparente sèche,
- le taux de matière organique
- la concentration en azote nitrique
- la concentration en azote ammoniacal

Le dosage de l'azote nitrique et ammoniacal est réalisé selon la méthode proposée par Guiot et al. (1992).

### c) Le site de Biesmerée

#### Cadre physique de la parcelle

Cette parcelle d'une douzaine d'hectares se situe sur le territoire communal de Mettet (30 km au sud-ouest de Namur), à proximité de Biesmerée (figure 2-9).



**Figure 2-9. Site de Biesmerée - extrait de la carte IGN 53 1/2 (1/25.000).**

La zone vulnérable du Sud Namurois est à cheval sur deux régions agricoles: le Condroz au Nord et la Famenne au Sud. Un site de référence a été choisi dans la partie condruzienne (Gervasoni, 1996). Celle-ci est caractérisée par une géostructure primaire plissée. Anticlinaux et synclinaux se succèdent selon une direction Est-Ouest. Les plis sont constitués de roches détritiques terrigènes (grès, schistes, psammites) et de roches carbonatées (calcaires). Des limons éoliens, des dépôts de pente et des alluvions d'âge quaternaire recouvrent le substratum plissé.

Le relief actuel en crêtes (tiges) et en dépressions (chavées) est largement subordonné à la structure géologique. Les tiges correspondent en général aux anticlinaux de psammites famenniens, les chavées aux synclinaux de calcaire dinantien.

Les sols s'organisent également selon le modèle géostructural: sols limono-caillouteux à charge psammitique sur les tiges, sols limoneux et limono-caillouteux à charge calcaire dans les chavées. Le site de référence est représentatif de l'organisation de sols caractéristique d'une chavée. La parcelle étudiée dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote présente selon la carte des sols de Belgique (extrait de la planchette 165E - Mettet) des sols limoneux et limono-caillouteux. Des observations à la tarière de cartographe ont permis d'affiner la connaissance de la distribution spatiale des différents types de sols dans la parcelle.

#### Plan d'échantillonnage

L'étude de la variabilité spatiale a été réalisée par le prélèvement et l'analyse individuelle de 143 échantillons de sol. La disposition des points de sondage respecte un maillage principal de 30 mètres sur une surface de 300 x 120 mètres. Un maillage secondaire a également été mis en place de manière à évaluer la variabilité à courte distance, c'est-à-dire 1, 2, 4, 5, 6, 10 et 15 mètres.

L'échantillonnage a été réalisé au moyen d'un tracteur équipé d'une sonde en demi-lune d'une section 36 mm.

L'analyse des échantillons de sol a porté sur :

- la teneur en matière sèche,
- la densité apparente sèche,
- le rapport poids de cailloux/poids de terre
- la concentration en azote nitrique
- la concentration en azote ammoniacal

### 3.2.3 Résultats

#### a) Site de Poucet

A la lecture du tableau 2-9, plusieurs observations peuvent être faites :

- bien que les minima et maxima soient éloignés de la valeur moyenne, l'intervalle de confiance de cette dernière est relativement faible (de l'ordre de 5%) ;
- la couche 30-60 cm présente une plus grande dispersion des résultats. Cette couche présente également la moyenne des concentrations la plus élevée ;
- compte tenu de la faible valeur des coefficients de détermination, il n'apparaît aucune relation claire entre les concentrations mesurées dans les quatre couches .

**Tableau 2-9. Description des résultats N-NO<sub>3</sub> (Poucet).**

kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup>	Coefficient de détermination r <sup>2</sup>					
	0-30	30-60	60-90	90-120	0-120	30-120
Couche						
0-30	1	-	-	-	-	-
30-60	0.405	1	-	-	-	-
60-90	0.131	0.201	1	-	-	-
90-120	0.108	0.136	0.373	1	-	-
0-120					1	
30-120	0.382					1
minimum	11.0	4.9	2.8	6.7	59.9	34
maximum	79.2	168.4	82.6	41.4	320.6	241.4
moyenne	28.3	40.2	26.2	20.6	115.4	87.1
intervalle de confiance de la moyenne (95%)	1.6	3.5	1.7	1.1	6.3	5.2
écart-type	9.6	20.7	10.3	6.4	37.4	30.7
C.V.	34%	51%	39%	31%	32%	35%

Si l'on s'intéresse au nombre de mesures nécessaires pour atteindre un niveau de précision donné, l'équation suivante (Dagnelie 1973) permet de fournir un élément de réponse.

$$n = 3.84 \times \sigma^2 / d^2$$

$$\alpha = 0.05$$

Dans cette équation,  $n$  correspond au nombre de mesures et  $d$  à l'erreur absolue maximale admissible.

On constate que le nombre de mesures est directement dépendant de l'erreur maximum que l'on tolère, de la probabilité  $\alpha$  de dépassement de cette erreur et de la variabilité des mesures.

Cette relation ne peut rigoureusement être appliquée que si la distribution de la population est normale. Dans le cas qui nous préoccupe, cette hypothèse n'est pas rencontrée. Néanmoins, le biais introduit par ce fait peut être considéré comme négligeable compte tenu de l'échelle de précision des mesures (Communication orale R. Palm).

Le tableau 2-10 synthétise, par couche, le nombre d'échantillons à prélever en fonction de la précision souhaitée.

**Tableau 2-10. Relation nombre de mesures/précision par couche de sol pour le paramètre N-NO<sub>3</sub> (Poucet).**

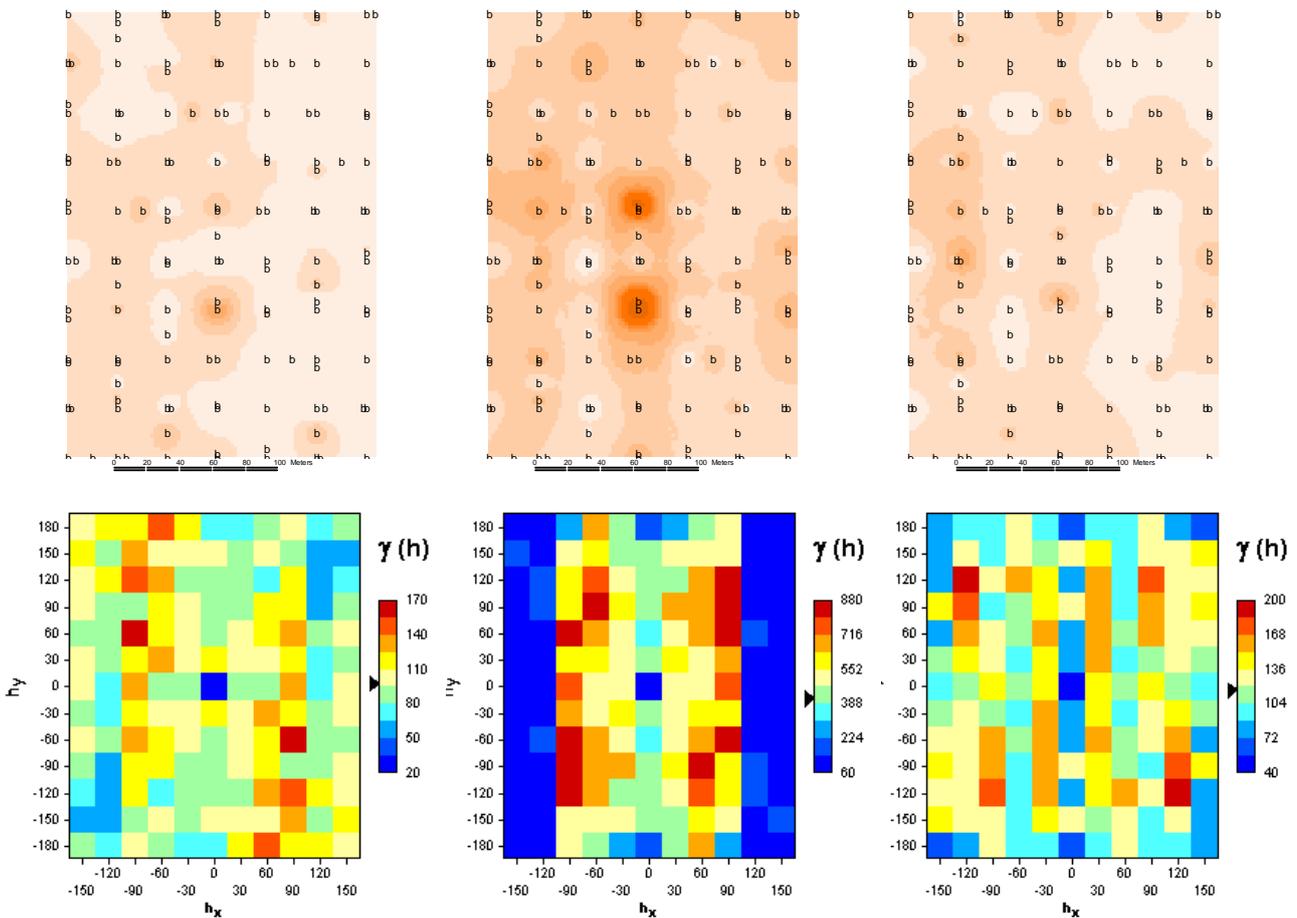
Couche Marge d'erreur	0-30	30-60	60-90	90-120
10%	44	102	59	37
25%	7	16	9	6
50%	2	4	2	1
100%	1	1	1	1

Ce tableau confirme que le prélèvement d'une dizaine d'échantillons tel qu'opéré actuellement par les laboratoires conduit à une précision de la mesure de l'ordre de 25% par rapport à la concentration réelle dans la couche sondée.

Analyse géostatistique

*a. Variogrammes et surfaces variographiques*

La répartition spatiale des résultats pour les tranches 0-30, 30-60 et 60-90cm est présentée à la figure 2-10.



**Figure 2-10. Cartes du reliquat et surfaces variographiques pour les couches 0-30; 30-60 et 60-90 cm (site de Poucet).**

Les résultats consistent en cartes obtenues par interpolation de type "distance inverse" sur un voisinage de 12 points. Ces cartes ont simplement pour objectif une représentation standardisée des valeurs mesurées ( $b$  = point de sondage). Les valeurs interpolées ne sont qu'indicatives.

Les cartes du bas de la figure 2-10, ou surfaces variographiques, représentent la répartition spatiale de l'indice de dissimilitude entre deux points de mesure. Le point central de la carte est l'élément de référence. Les axes  $h_x$  et  $h_y$  correspondent à des distances de déplacement dans ces deux directions. En cas de structure spatiale bien marquée, la semi-variance doit augmenter avec la distance, et les couleurs des pixels, en partant du point central vers les bordures, doivent respecter le gradient de l'échelle à droite de la surface variographique. L'absence d'organisation claire des couleurs traduit l'absence de structure spatiale à l'échelle considérée, ici de 30 à 150m.

On notera toutefois l'aspect particulier de la surface variographique de la couche 30-60cm. L'évolution de la semi-variance avec la distance est différente selon l'axe X ou Y. Il existe donc une anisotropie entre ces deux directions. Cette anisotropie est peut être causée par la présence dans la couche 30-60 cm de quelques valeurs très élevées observables dans le tableau 2-9 et sur la carte d'interpolation de cette couche reprise en figure 2-10.

Les variogrammes de la figure 2-11 ont été réalisés afin d'étudier la semi-variance à des pas de distance inférieurs à ceux représentés sur les surfaces variographiques.

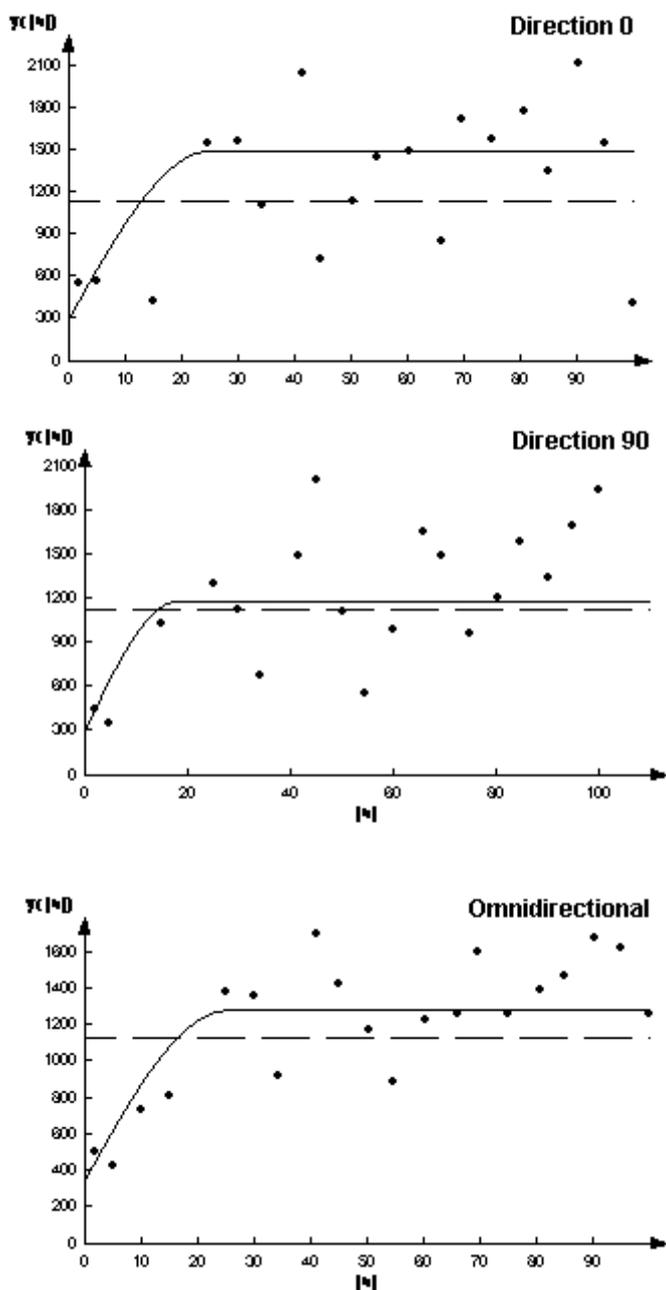


Figure 2-11. Variogrammes Est-Ouest (haut), N-S (milieu) et omni-directionnel (bas) de l'APL 0-90cm (site de Poucet).

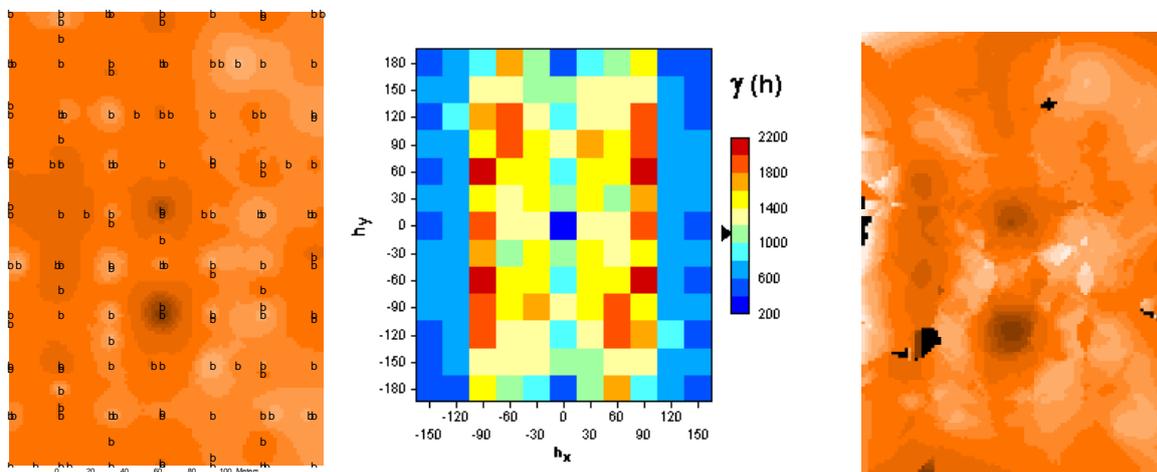
On constate que les valeurs du seuil (semi-variance maximale) sont différentes selon les directions ( $1500 \text{ (kg.ha}^{-1}\text{)}^2$  selon X et  $1200 \text{ (kg.ha}^{-1}\text{)}^2$  selon Y). La structure spatiale est donc anisotrope.

Il en va de même pour les valeurs de la portée (distance à partir de laquelle la semi-variance ne dépend plus de la distance): 25 mètres selon X, 18 mètres selon Y. La structure spatiale est donc limitée à des distances inférieures à 30m (maillage principal).

### b. Interpolation

Les variogrammes peuvent chacun être modélisés par une équation de type sphérique. Toutefois, l'interpolation par krigeage n'a pas plus de sens que la « distance inverse » en raison de la portée inférieure au maillage principal d'une part ainsi que de l'anisotropie.

Les cartes présentées à la figure 2-12 illustrent néanmoins de manière claire le caractère ponctuel de l'APL.



**Figure 2-12. Cartes de l'APL 0-90cm obtenues par interpolation (distance inverse à gauche et krigage à droite) et surface variographique.**

D'autre part, il semble qu'il y ait, sur cette parcelle, un effet "ligne". Les valeurs semblent en effet se grouper par lignes parallèles à l'axe Y, surtout pour la couche 30-60 cm mais également pour l'APL 0-90 cm. Ce résultat mériterait de vérifier si la cause peut être liée aux pratiques d'entretien de la culture (sens du passage du tracteur).

### c. Estimation de la moyenne

La portée du variogramme, c'est-à-dire 25 mètres, signifie que les sondages du maillage principal peuvent être considérés comme indépendants. Les méthodes statistiques classiques sont dès lors d'application.

#### b) Site de Biesmerée

A la lecture du tableau 2-11, plusieurs observations peuvent être faites :

- environ 70% (10,5/15,4 x 100) de l'azote nitrique est localisé dans la couche 0-30 cm ;
  - par rapport aux mesures effectuées sur le site de Poucet, il existe une relation plus claire entre la concentration en azote nitrique dans une couche donnée et la concentration dans la couche sous-jacente ;
  - en regroupant les données par couche de 30 cm, on observe des coefficients de détermination proches de l'unité. On pourrait dès lors prédire ponctuellement, avec une faible marge d'erreur, la concentration sur une couche de 90 cm sur base de la concentration dans la couche 0-30 cm.
- Cette observation n'a pas de valeur de prédiction pour d'autres parcelles.

**Tableau 2-11. Description des résultats N-NO<sub>3</sub> (Biesmerée).**

kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup>	Coefficient de détermination r <sup>2</sup>										
	Couche	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-90	0-30	30-60	60-90	0-90
0-15	1										
15-30	0.57	1									
30-45	0.36	0.54	1								
45-60	0.29	0.47	0.66	1							
60-75	0.25	0.40	0.50	0.57	1						
75-90	0.00	0.01	0.02	0.05	0.26	1					
0-30	0.92	0.82	0.48	0.4	0.32	0.00	1				
0-60	0.83	0.84	0.69	0.59	0.42	0.01	0.95				
0-90	0.80	0.87	0.81	0.76	0.55	0.06	0.92				
minimum	1.4	1.1	0.2	0.0	0.3	0.1	2.6	0.2	0.4	4.7	
maximum	18.4	11.5	8.5	4.9	4.2	5.4	29.3	12.6	6.7	44.3	
moyenne	5.9	4.5	2.0	1.1	0.8	1.2	10.5	3.1	2.3	15.4	
intervalle de confiance de la moyenne (95%)	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.9	0.4	0.4	2.1	
écart-type	3.5	2.3	1.5	0.9	0.8	1.0	5.4	2.3	1.6	9.1	
CV	59%	51%	75%	81%	100%	83%	51%	74%	69%	59%	

Tout comme précédemment, il est possible de déterminer le nombre de mesures à effectuer compte tenu de la précision souhaitée.

Le tableau 2-12 synthétise, par couche, cette relation.

**Tableau 2-12. Relation entre le nombre de mesures et la précision pour le paramètre N-NO<sub>3</sub> (Biesmerée).**

Couche	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-90	0-30	30-60	60-90
Marge d'erreur									
10%	135	100	216	257	384	267	102	211	186
25%	22	16	35	41	61	43	16	34	30
50%	5	4	9	10	15	11	4	8	7
100%	1	1	2	3	4	3	1	2	2

Le prélèvement d'une trentaine d'échantillons conduit à une précision de la mesure de l'ordre de 25% par rapport à la concentration réelle dans la couche sondée.

A précision relative égale, le nombre d'échantillons nécessaires double dès que l'on se situe sous la couche 0-30 cm.

### **Impact du type de sol sur le reliquat**

Différentes séries de sols ont été identifiées le long de trois transects effectués dans la zone de prélèvement. Les séries ont été regroupées en quatre types :

1. sol limono-caillouteux (G\_ \_ \_) ayant une couverture limoneuse généralement assez mince (le plus souvent moins de 80 cm) composée en partie d'éléments loessiques et en partie d'éléments remaniés à partir du substrat (argile, fragments rocailloux). Ils se distinguent des sols limoneux par leur profondeur plus réduite, par leur texture beaucoup plus variable et par une charge caillouteuse notablement plus élevée (supérieure à 15%) quoique fortement variable ;
2. sol limoneux lessivé à profil ABC (A\_a) constitué d'un horizon A de terre arable qui a pris naissance à la suite des façons culturales, d'un horizon B illuvial de couleur brune avec accumulation d'argile et de la roche mère (horizon C) ;
3. sol limoneux sans développement de profil (A\_p). Les matériaux enlevés par érosion se sont déposés dans les dépressions sous forme de colluvions. Sur ces matériaux de mise en place récente, aucun profil pédologique ne s'est développé, la couche arable repose directement sur la roche mère (type AC) ;
4. sol limoneux avec substrat débutant à profondeur moyenne ((x)A\_ \_).

Le tableau 2-13 synthétise les observations relatives au reliquat azoté.

**Tableau 2-13. Observations (moyenne et écart type) en fonction du type de sol (Biesmerée) dans la couche 0-60 cm.**

	G_ _ _	A_ a	A_ p	(x)A_ _
nombre d'observations	24	4	25	34
moyenne (kg N.ha <sup>-1</sup> )	16.36	14.55	16.75	11.10
écart type (kg N.ha <sup>-1</sup> )	6.73	6.51	8.40	6.36

Un test d'égalité de moyennes a été effectué entre les trois types de sol suffisamment représentés ; le type A\_ a étant abandonné puisqu'il ne compte que 4 observations.

Pour pouvoir réaliser ce test, il y a lieu de vérifier si les 3 conditions suivantes sont rencontrées :

- a) égalité de variance entre les types de sols
- b) échantillonnage aléatoire
- c) échantillonnage indépendant

La première condition est rencontrée pour la comparaison (x)A\_ \_ / G\_ \_ \_ et (x)A\_ \_ / A\_ p.

La deuxième condition n'est stricto sensu pas rencontrée puisque l'échantillonnage est réalisé de manière systématique. Le test d'égalité de moyennes peut toutefois être exécuté (Palm R., communication orale).

La troisième condition est rencontrée puisque les valeurs mesurées dans un type de sol sont indépendantes des valeurs mesurées dans un autre type de sol ; les observations participant à cette étude statistique sont distantes de plus de 20 mètres (cfr Analyse géostatistique – Estimation de la moyenne).

Le résultat de ces tests indique que la moyenne observée dans la série de sol (x)A\_ \_ est significativement différente de celles observées dans les séries de sol G\_ \_ \_ et A\_ p.

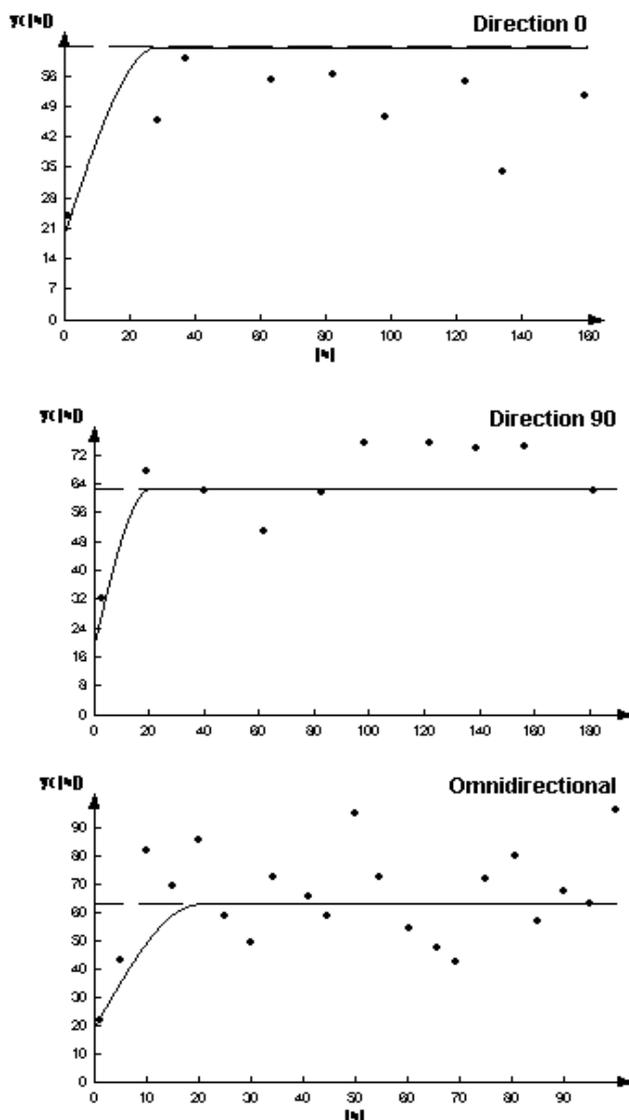
La profondeur d'un sol pourrait donc influencer le reliquat azoté de celui-ci.

Par contre, les moyennes des séries de sol G\_ \_ \_ et A\_ p ne sont pas significativement différentes. Bien que ces deux sols diffèrent en particulier par leur texture et par leur charge caillouteuse.

## Analyse géostatistique

### a. Variogrammes et surface variographique

Ne sont considérés ici que les résultats de l'APL intégré sur la tranche de 0 à 60cm. Trois variogrammes sont présentés à la figure 2-13.



**Figure 2-13.** Variogrammes Nord-Sud (haut), Est-Ouest (milieu) et omni-directionnel (bas) de l'APL 0-60cm (site de Biesmerée).

En raison d'une structure spatiale inférieure à 30 mètres et de l'absence des sondages à courte distance selon l'axe N-S, le variogramme correspondant est d'utilité réduite, tandis que les deux autres sont fort ressemblants. Il faudra donc supposer que la variabilité spatiale ne présente pas d'anisotropie à des distances inférieures à 30.

La surface variographique (figure 2-14) laisse quant à elle supposer qu'à des distances de l'ordre de 90 à 120m, les variations seraient moins fortes dans le sens N-S que dans le sens E-O. Il pourrait s'agir ici d'un effet lié à la répartition des unités de sols dans la parcelle selon l'axe E-O.

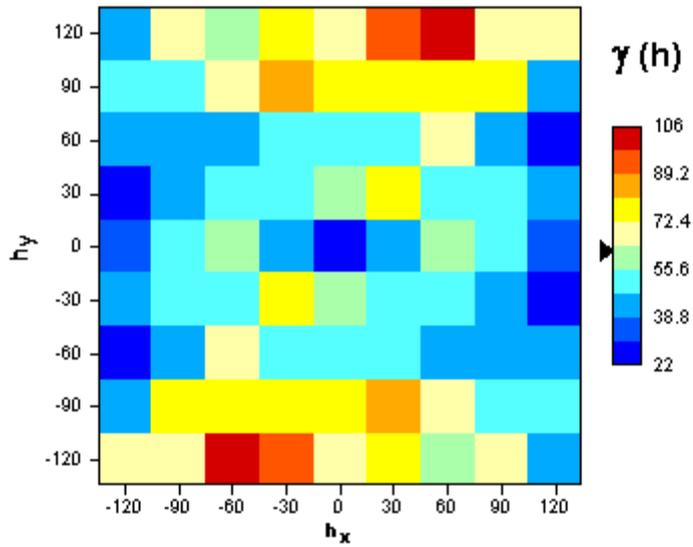


Figure 2-14. Surface variographique de l'APL 0-60cm (site de Biesmerée).

*b. Interpolation*

Le variogramme omnidirectionnel peut être représenté par un modèle de type sphérique. La figure 2-15 obtenue par krigeage ordinaire avec le modèle calculé. Elle illustre clairement le caractère très ponctuel de l'APL.

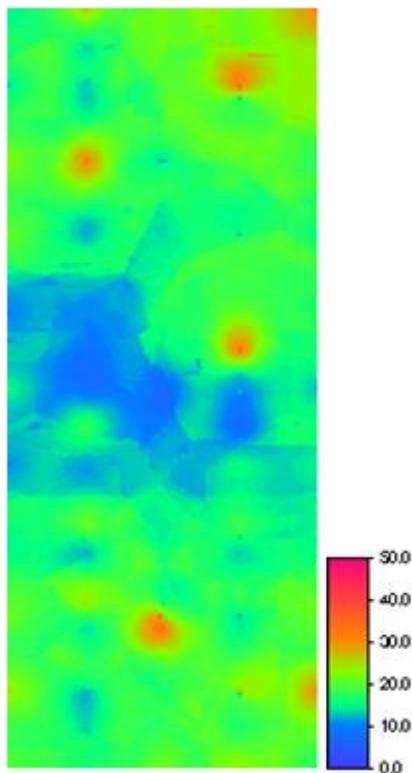
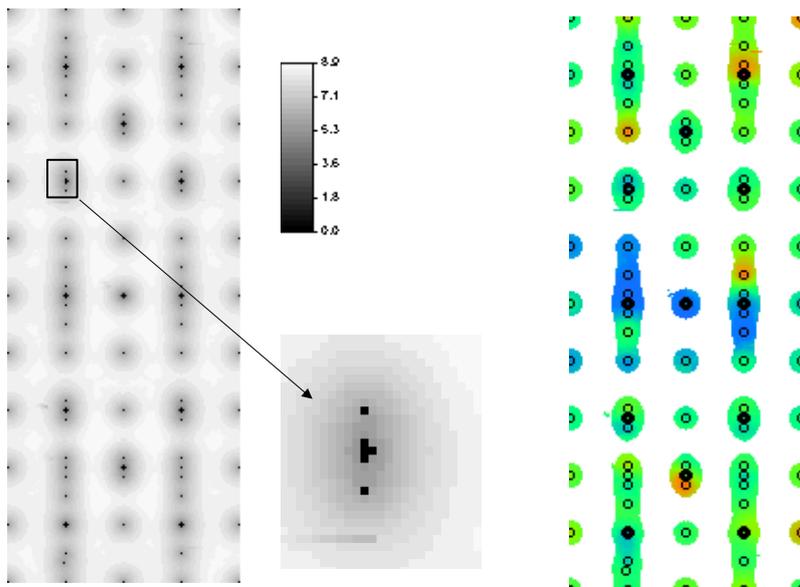


Figure 2-15. Carte de l'APL 0-60cm  $\text{kg N-NO}_3 \cdot \text{ha}^{-1}$  obtenue par krigeage (site de Biesmerée).

La figure 2-16 représente la distribution spatiale de la variance de krigeage ou erreur d'estimation. Celle-ci ne dépend que de la structure de l'échantillonnage. Lorsque la variance de krigeage est supérieure à celle des échantillons, la prédiction n'est pas fiable. Un cache a donc été posé sur la figure 2-15 pour ne laisser apparaître que les zones où la prédiction est fiable. On constate que le plan d'échantillonnage n'est pas adapté pour réaliser une cartographie de la parcelle, ce qui n'était pas le but premier de l'exercice rappelons-le. La cartographie de l'APL à Biesmerée aurait nécessité une grille systématique avec une maille de l'ordre de 15 mètres, ce qui traduit bien les moyens importants à mettre en œuvre pour effectuer un suivi spatial d'un paramètre à forte variabilité métrique comme la plupart de ceux liés à la matière organique.



**Figure 2-16. Cartographie de la variance de krigeage (gauche) et application d'un cache sur les zones de la carte krigée pour lesquelles la prédiction n'est pas fiable (droite).**

### c. Estimation de la moyenne

La seconde implication importante des résultats est fournie par la portée du variogramme, c'est-à-dire 20 mètres. Elle signifie qu'au-delà de cette distance les sondages peuvent être considérés comme indépendants. Ces résultats confirment partiellement ceux obtenus à Poucet. Idéalement, l'estimation de la moyenne parcellaire devrait donc être obtenue à partir d'échantillons distants d'au moins 25 mètres.

### 3.2.4 Synthèse comparative des deux sites (Poucet et Biesmerée)

Le site de Poucet est caractérisé par une concentration moyenne en azote nitrique de  $115 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  dans la couche 0-120 cm.

Le site de Biesmerée est caractérisé par une concentration moyenne en azote nitrique de  $15 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  dans la couche 0-90 cm

Les coefficients de variation de la concentration en nitrate par couche de 30 cm observés à Poucet varient entre 30 et 50% alors que ceux observés à Biesmerée varient entre 50 et 75%. Ceci indique que la variabilité relative est plus importante sur des parcelles à faible concentration en nitrate.

A même précision relative (25%), il faudrait prélever 16 échantillons à Poucet alors que 34 échantillons seraient nécessaires à Biesmerée pour quantifier la concentration en nitrate.

A même précision absolue ( $5 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ ), il faudrait prélever 66 échantillons à Poucet alors que 4 échantillons seraient suffisants à Biesmerée pour quantifier la concentration en nitrate.

Cependant le nombre d'échantillons nécessaires est très variable selon les couches. Le tableau 2-14 permet d'illustrer ces différences.

**Tableau 2-14. Nombre de points de mesure par couche de sol pour obtenir une précision de  $5 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$  (Biesmerée & Poucet).**

Site	Couche	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm
Biesmerée		4	1	1	-
Poucet		14	66	16	6

Tant sur le site de Biesmerée que sur le site de Poucet, l'analyse géostatistique donne un résultat de l'ordre de 20 à 25 mètres comme distance minimum entre deux prélèvements pour leur assurer une indépendance spatiale.

### 3.2.5 Conclusion

L'erreur relative en matière d'analyse de reliquat azoté (du tamisage de l'échantillon jusqu'à la mesure de la concentration en nitrate dans l'extrait de sol) est de l'ordre de 10% (Destain J.P., communication orale).

Pour que le résultat de l'analyse soit converti en kilogramme d'azote par hectare, il est nécessaire d'estimer la densité apparente et la charge caillouteuse du sol afin d'évaluer le tonnage de terre fine à l'hectare.

Les erreurs commises dans l'estimation de ces deux paramètres peuvent biaiser le résultat jusqu'à 20% (Schimdhalter et al., 1992).

En conséquence, il n'est sans doute pas opportun de rechercher une précision supérieure à 20% liée à la densité d'échantillonnage si l'expression du résultat se fait en kilogramme d'azote nitrique par hectare.

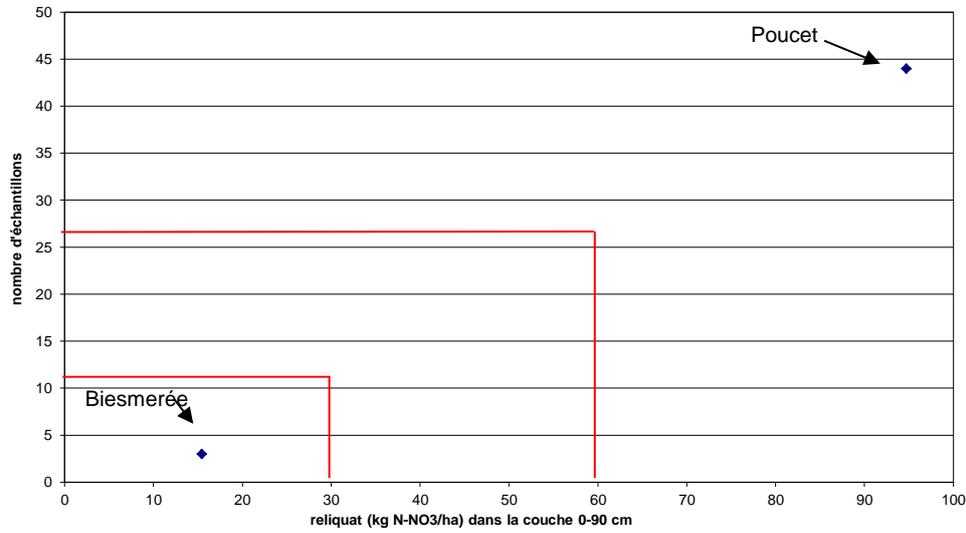
La concentration dans les sols est dans la plupart des cas comprise entre 30 et  $100 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ .

En valeur absolue, une précision de l'ordre de  $10 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$  est suffisante.

Sur base des éléments qui précèdent et en regard de la figure 2-17, il est cohérent de proposer une densité de prélèvement de l'ordre de 10 carottes/parcelle lorsque le reliquat attendu est faible (moins de  $30 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ ) et de 30 carottes par parcelle lorsque le reliquat attendu est élevé (plus de  $60 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ ). De cette manière, l'ordre de grandeur de la précision de la mesure sera de  $10 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Si 20 carottes sont prélevées au lieu de 30, la précision de la mesure, dans une parcelle à reliquat élevé, sera alors de l'ordre de  $15 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Si 10 carottes sont prélevées, la précision de la mesure, dans une parcelle à reliquat élevé, sera de l'ordre de  $20 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ .



**Figure 2-17. Nombre d'échantillons en fonction du reliquat pour une même précision (10 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).**

Pour assurer une bonne représentativité de la mesure, il y a également lieu de s'assurer que les échantillons prélevés soient indépendants les uns des autres. Cette étude a montré qu'une distance de 25 mètres entre deux prélèvements est suffisante pour rencontrer cet objectif. Cet analyse confirme donc l'ordre de grandeur avancé par Stenger et al. (2002).

### 3.3 Variabilité temporelle de la forme du profil azoté

#### 3.3.1 Méthode

Pour mener la réflexion relative à la forme du profil, les données du contrôle APL des années 2008 à 2011 ont été utilisées ; soit 10.449 valeurs observées dans 3483 parcelles (3 observations par parcelles puisque trois couches sondées).

Ces observations ont été réalisées dans des parcelles de cultures ; les observations faites en prairie ne sont pas prises en considération puisque ces parcelles ne sont échantillonnées que sur la couche 0-30 cm.

Chaque parcelle s'est vue attribuée une valeur en fonction de la répartition de l'azote nitrique dans le profil et du critère (code) de répartition choisi de manière empirique. Le tableau 2-15 détaille la signification des différents codes.

**Tableau 2-15. Signification des codes de profil.**

	valeur 1	valeur 2	valeur 3
<b>code 40</b>	plus de 40% de l'azote nitrique est dans la couche de surface	les autres cas	plus de 40% de l'azote nitrique est dans la couche profonde
<b>code 50</b>	plus de 50% de l'azote nitrique est dans la couche de surface	les autres cas	plus de 50% de l'azote nitrique est dans la couche profonde
<b>code 5030</b>	plus de 50% de l'azote nitrique est dans la couche de surface	les autres cas	plus de 30% de l'azote nitrique est dans la couche profonde
<b>code 60</b>	plus de 60% de l'azote nitrique est dans la couche de surface	les autres cas	plus de 60% de l'azote nitrique est dans la couche profonde

L'analyse menée vise à déterminer si la date d'échantillonnage influence la répartition de l'azote nitrique dans le profil ; l'hypothèse étant que plus la 'saison' avance, plus l'azote nitrique est lixivié vers la couche profonde (60-90 cm), avec des nuances interannuelles en fonction de la pluviométrie observée au cours de la période d'échantillonnage (15 octobre – 10 décembre).

Pour chaque code et pour chaque année, la date moyenne d'échantillonnage des parcelles classées « 1 » est calculée ainsi que l'intervalle de confiance de cette moyenne. Ces valeurs sont comparées à celles établies pour les parcelles classées « 2 » et « 3 » afin de voir s'il existe une différence significative entre ces moyennes. Dans l'affirmative, on conclura que la date d'échantillonnage impacte la répartition de l'azote nitrique dans le profil en fonction du code choisi.

#### 3.3.2 Pluviométrie

Le tableau 2-16 illustre la pluviométrie du mois de novembre observée par l'IRM dans 6 stations météorologiques situées en ou à proximité de la zone vulnérable. En matière de pluviométrie, il apparaît que les années 2010 et 2011 sont 'anormales' ; l'année 2011 étant même inférieure au précédent record enregistré en 1853.

**Tableau 2-16. Observations (novembre) pluviométriques (mm) et de températures (°C) (Source : IRM).**

Année ↓	Station →	Gosselies	Florennes	Beauvechain	Bierset	Spa	Uccle
2011	Pluviométrie	10,7	8,0	9,7	1,9	7,4	8,5
	Température	8,3	7,7	8,5	8,5	7,3	8,6
2010	Pluviométrie	99,8	120,8	110,8	145,2	231,4	124,0
	Température	5,4	4,9	5,8	5,6	3,9	6,1
2009	Pluviométrie	104,2	139,4	92,2	126,1	204,3	98,0
	Température	8,9	8,2	9,4	9,0	7,0	9,7
2008	Pluviométrie	67,5	66,8	44,0	55,7	82,6	67,6
	Température	6,1	5,6	6,7	6,3	4,6	6,9
Normale	Pluviométrie						76,4
	Température						6,8

### 3.3.3 Résultats

Le tableau 2-17 illustre entre autres la distribution des effectifs en fonction des critères de classement (code) et des années. Les valeurs 'Minimum', 'Maximum' et 'Mean' correspondent aux numéros des jours de prélèvement. A titre d'exemple (année 2008 – code 40 – valeur 1) : 39764 correspond au 12 novembre 2008, 39751 correspond au 30 octobre 2008 et 39791 correspond au 9 décembre 2008.

**Tableau 2-17. Répartition de l'azote nitrique dans le profil. Paramètres statistiques.**
**Results for ann\_éch = 2008**

Variable	code40	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	297	39764 (12 nov.)	8,00	39751	39791
	2	342	39768 (16 nov.)	8,22	39751	39794
	3	32	39769 (17 nov.)	10,1	39755	39794

**Results for ann\_éch = 2009**

Variable	code40	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	298	40125 (08 nov.)	10,6	40105	40150
	2	233	40131 (14 nov.)	10,2	40105	40156
	3	10	40136 (19 nov.)	15,4	40108	40157

**Results for ann\_éch = 2010**

Variable	code40	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	318	40487 (05 nov.)	12,7	40469	40529
	2	489	40491 (09 nov.)	12,8	40469	40525
	3	97	40497 (15 nov.)	11,4	40469	40519

**Results for ann\_éch = 2011**

Variable	code40	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	1075	40858 (11 nov.)	13,9	40833	40898
	2	275	40860 (13 nov.)	13,9	40833	40892
	3	17	40861 (14 nov.)	14,9	40841	40889

**Results for ann\_éch = 2008**

Variable	code50	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	108	39762 (10 nov.)	7,38	39751	39779
	2	549	39767 (15 nov.)	8,33	39751	39794
	3	14	39769 (17 nov.)	12,4	39755	39794

**Results for ann\_éch = 2009**

Variable	code50	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	138	40124 (07 nov.)	10,3	40105	40147
	2	398	40129 (12 nov.)	10,8	40105	40156
	3	5	40137 (20 nov.)	21,0	40108	40157

**Results for ann\_éch = 2010**

Variable	code50	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	125	40485 (03 nov.)	11,7	40469	40529
	2	765	40491 (09 nov.)	13,0	40469	40529
	3	14	40495 (13 nov.)	10,3	40473	40507

**Results for ann\_éch = 2011**

Variable	code50	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	662	40857 (10 nov.)	14,1	40833	40898
	2	701	40859 (12 nov.)	13,9	40833	40892
	3	4	40849 (02 nov.)	6,13	40842	40857

**Results for ann\_éch = 2008**

Variable	code5030	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	108	39762 (10 nov.)	7,38	39751	39779
	2	421	39766 (14 nov.)	8,19	39751	39791
	3	142	39770 (18 nov.)	8,61	39751	39794

**Results for ann\_éch = 2009**

Variable	code5030	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	138	40124 (07 nov.)	10,3	40105	40147
	2	355	40128 (11 nov.)	10,8	40105	40150
	3	48	40135 (18 nov.)	10,5	40108	40157

**Results for ann\_éch = 2010**

Variable	code5030	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	125	40485 (03 nov.)	11,7	40469	40529
	2	471	40488 (06 nov.)	13,0	40469	40529
	3	308	40496 (14 nov.)	11,7	40469	40519

**Results for ann\_éch = 2011**

Variable	code5030	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	662	40857 (10 nov.)	14,1	40833	40898
	2	628	40859 (12 nov.)	13,7	40833	40892
	3	77	40861 (14 nov.)	14,9	40833	40889

**Results for ann\_éch = 2008**

Variable	code60	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	21	39760 (08 nov.)	6,32	39752	39772
	2	647	39767 (15 nov.)	8,47	39751	39794
	3	3	39756 (04 nov.)	0,577	39755	39756

**Results for ann\_éch = 2009**

Variable	code60	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	34	40123 (06 nov.)	11,3	40105	40144
	2	503	40128 (11 nov.)	10,9	40105	40157
	3	4	40132 (15 nov.)	20,4	40108	40157

**Results for ann\_éch = 2010**

Variable	code60	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	36	40483 (05 nov.)	11,5	40469	40508
	2	865	40491 (09 nov.)	13,0	40469	40529
	3	3	40490 (08 nov.)	14,4	40473	40498

**Results for ann\_éch = 2011**

Variable	code60	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
date	1	240	40855 (08 nov.)	13,1	40833	40889
	2	1127	40859 (12 nov.)	14,1	40833	40898

L'observation de ce tableau montre que certains codes présentent des distributions d'effectifs fort peu équilibrées. Ainsi, et toujours à titre d'exemple, le code '40' est peu discriminant puisque la valeur '3' correspondant à la présence de plus de 40 % de l'azote nitrique dans la couche 60-90 cm n'est observée en 2008 que dans 32 parcelles sur les 671 parcelles échantillonnées cette année-là.

A fortiori, les codes '50' et '60' le seront encore moins.

L'intervalle de confiance (IC) de la moyenne se calcule comme suit :

$$IC = 1,96 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Cet intervalle de confiance est donc proportionnel à l'écart type et inversement proportionnel à la taille de l'effectif. Avec un faible effectif, l'IC devient relativement élevé et il n'est plus possible de mettre en évidence des différences entre les dates 'moyennes', à l'exemple de la figure 2-18 où l'on observe que les échantillons présentant plus de 50% du reliquat dans la couche 60-90 cm (code '50' – valeur '3') ont été en moyenne échantillonnés sept jours après ceux qui présentent plus de 50% du reliquat dans la couche 0-30 cm (code '50' – valeur '1'). Cependant, vu la taille de l'effectif en valeur '3' (14 – voir tableau 2-17), l'IC de cette moyenne est tel qu'il ne permet pas de mettre en évidence de différence significative entre les valeurs '1' et '3'.

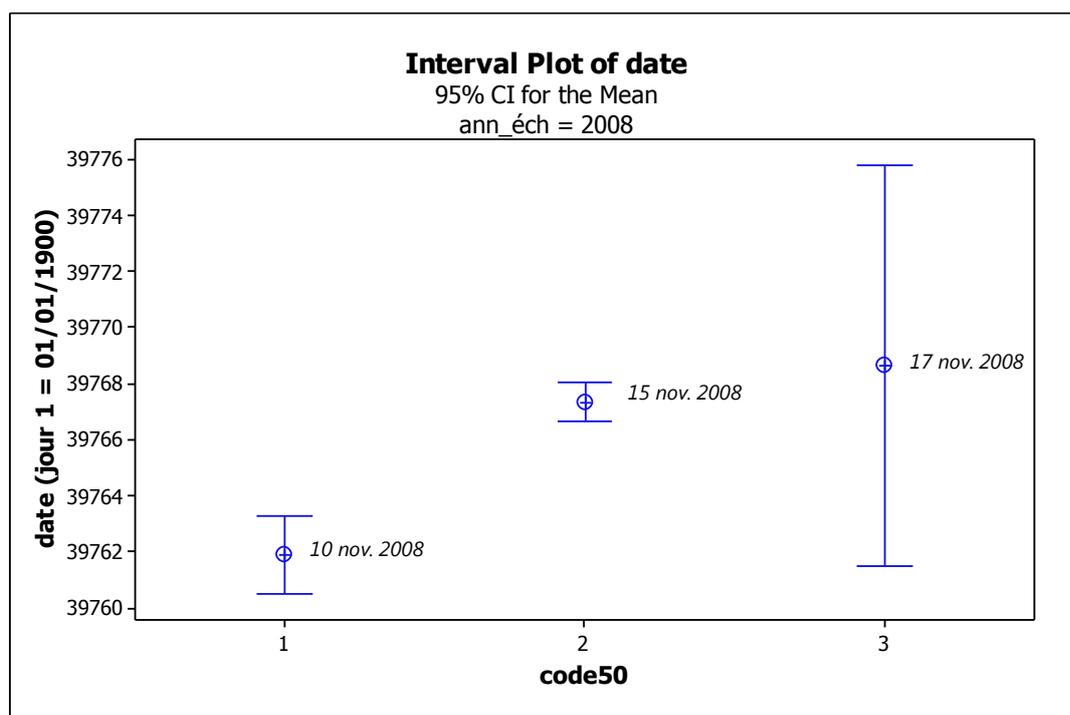
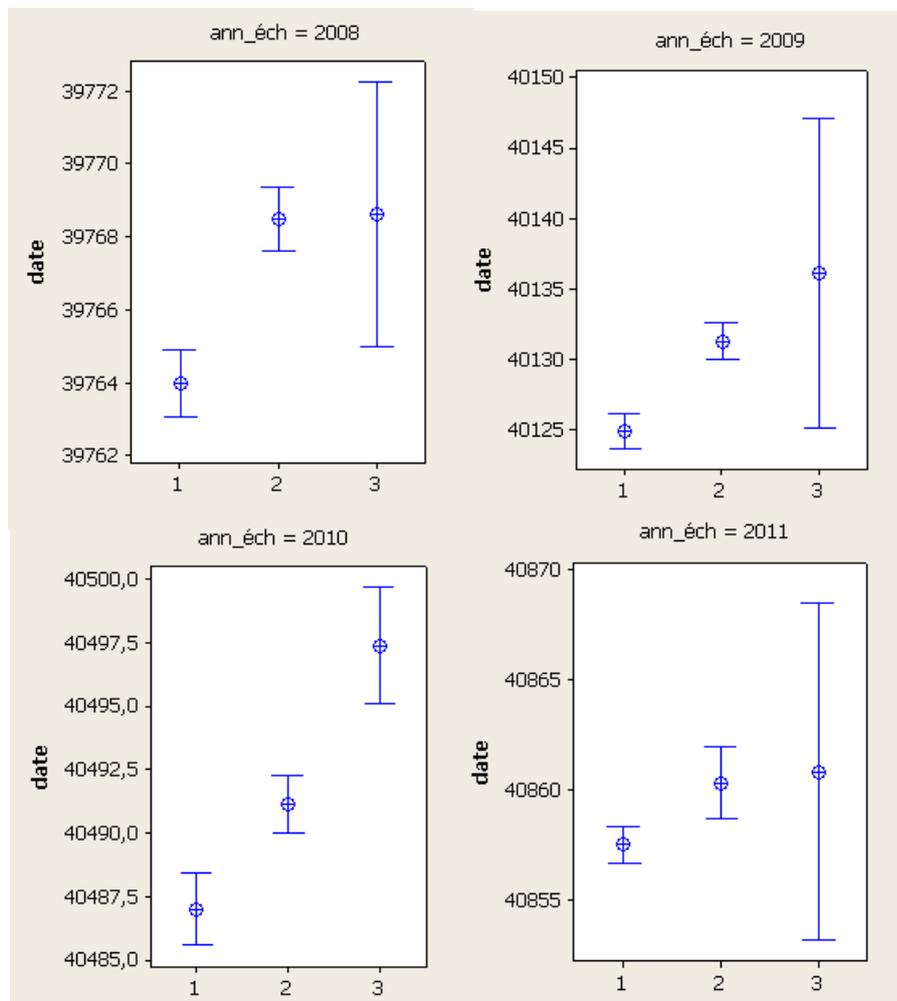


Figure 2-18. Date moyenne d'échantillonnage et intervalle de confiance. Code 50 - année 2008.

La figure 2-19 illustre les résultats pour le code '40' entre 2008 et 2011. On observe qu'en année très pluvieuse (2010), la date d'échantillonnage a un impact significatif sur la forme du profil : les profils présentant plus de 40% du reliquat en surface ou en profondeur sont observés respectivement en moyenne les 5 et 15 novembre. Par ailleurs, les valeurs '3' représentent près de 11% de l'effectif.

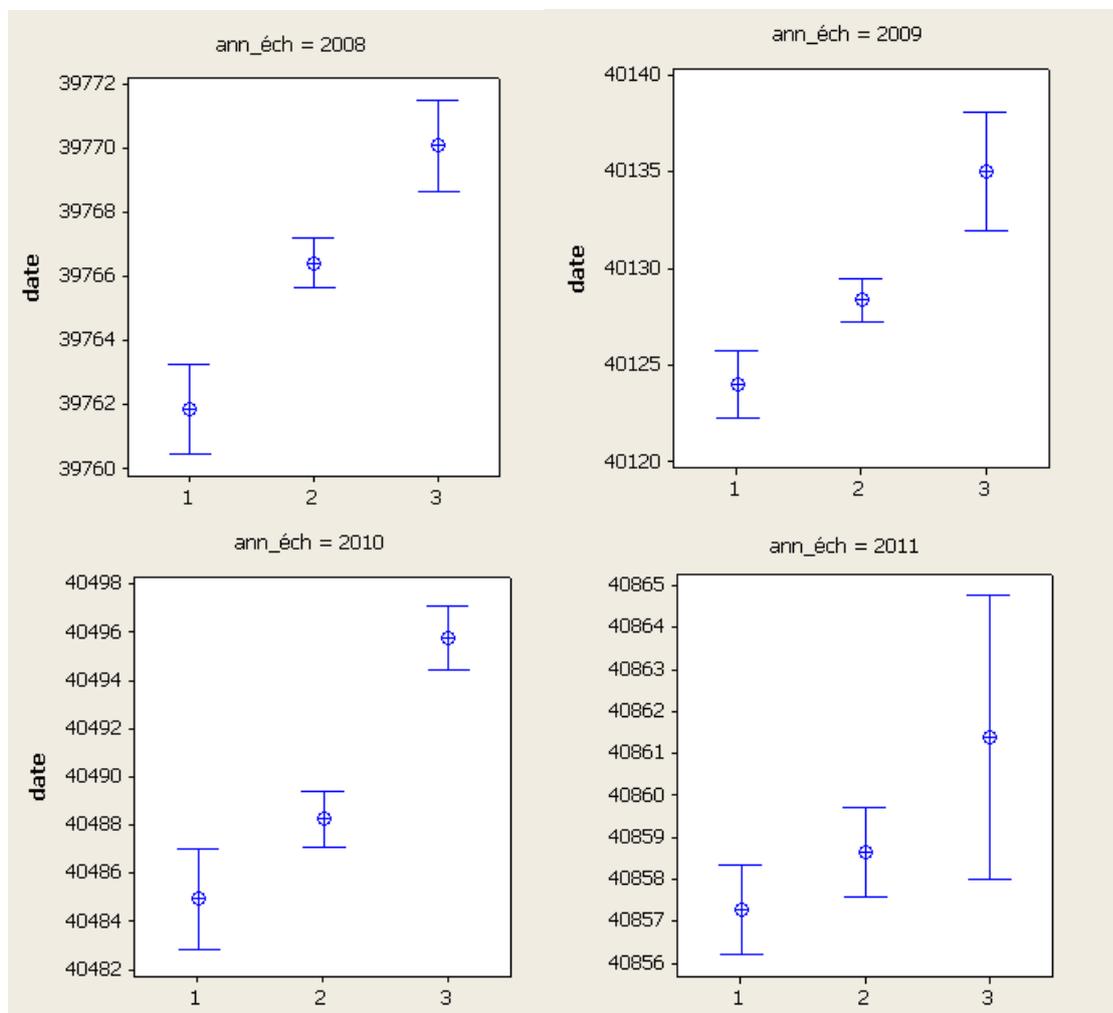
Par contre, en année sèche (2011), les dates moyennes d'échantillonnage sont assez proches ; la différence est faible (3 jours) et non significative. De plus, les valeurs '3' ne représentent que 1% de l'effectif.



**Figure 2-19. Dates moyennes d'échantillonnage et intervalles de confiance. Code 40 - Années 2008 à 2011.**

(date : nombre de jours depuis le 1/1/1900 - signification du code date : voir tableau 2-17)

Des quatre codes envisagés, celui qui est le plus discriminant est le code 5030<sup>4</sup>. En année normale (2008 et 2009) ou humide (2010), les dates moyennes d'échantillonnage correspondant aux valeurs 1, 2 ou 3 sont significativement différentes. Par contre, en année sèche (2011), on n'observe pas de différence significative entre ces trois objets (figure 2-20).



**Figure 2-20. Dates moyennes d'échantillonnage et intervalles de confiance. Code 5030 - Années 2008 à 2011.**

(date : nombre de jours depuis le 1/1/1900 - signification du code date : voir tableau 2-17)

### 3.3.4 Conclusions

L'analyse de quelques 3483 résultats APL réalisée au cours de quatre années (2008 à 2011) relativement contrastées en termes de pluviométrie indique que ce dernier facteur a un impact significatif sur la répartition de l'azote nitrique dans les trois couches sondées. Cet impact de l'année climatique sur l'APL a également été observé par Beaudoin et al. (2005).

L'agriculteur n'étant maître ni de la pluviométrie ni de la date d'échantillonnage, l'usage de la répartition de l'azote dans le profil en vue d'une éventuelle sanction ne devrait pas être envisagé.

<sup>4</sup> valeur 1 = + de 50% du reliquat dans la couche 0-30 cm, valeur 3 = + de 30% du reliquat dans la couche 60-90 cm, valeur 2 = autres cas.

Cependant, en présence d'une CIPAN faiblement développée au moment de l'échantillonnage de la parcelle, si la couche 60-90 cm est particulièrement enrichie en azote nitrique, il est vraisemblable que la gestion de l'azote pratiquée par l'agriculteur pour la culture précédente n'ait pas été optimale.

### **3.4 Effet de la teneur en carbone**

Lors du contrôle APL réalisé en 2012, le SPW a commandé, outre la mesure du reliquat azoté, la détermination du contenu en carbone organique des parcelles contrôlées. Le laboratoire (CARAH) de la province du Hainaut a complété cette information par des analyses de pH.

La base de données contient 1500 résultats de teneur en carbone organique et 786 données de pH. Le tableau 2-18 illustre quelques paramètres statistiques liés à ces deux variables.

**Tableau 2-18. Description des résultats d'analyses de teneur en carbone organique et de pH.**

Variable	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
%COT	1500	1,4221	0,7833	0,1400	1,0000	1,1800	1,5000	13,2000
pH KCl	786	6,2952	0,6309	3,9100	5,9200	6,3400	6,7600	7,6400

Etant donné l'impact de la classe d'occupation de sol sur le résultat APL (figure 2-35, page 107), cette analyse statistique est menée distinctement pour chaque classe.

#### **3.4.1 Betterave (classe 1)**

En 2012, 94 parcelles de betterave ont fait l'objet d'un contrôle au cours duquel une mesure de carbone organique a été réalisée.

L'analyse de la variance n'indique aucune relation significative entre le résultat APL et le %COT ( $P=0.063$ ).

#### **3.4.2 Céréales suivies de CIPAN (classe 2)**

En 2012, 324 parcelles de céréales suivies d'une CIPAN ont fait l'objet d'un contrôle au cours duquel une mesure de carbone organique a été réalisée.

L'analyse de la variance indique une relation hautement significative entre le résultat APL et le %COT ( $P=0.007$ ). Néanmoins, le %COT ne permet d'expliquer que 2.3 % de la variance du résultat APL.

#### **3.4.3 Céréales non suivies de CIPAN (classe 3)**

En 2012, 335 parcelles de céréales non suivies de CIPAN ou de chicorée ont fait l'objet d'un contrôle au cours duquel une mesure de carbone organique a été réalisée.

L'analyse de la variance n'indique aucune relation significative entre le résultat APL et le %COT ( $P=0.628$ ).

#### **3.4.4 Maïs (classe 4)**

En 2012, 466 parcelles de maïs ont fait l'objet d'un contrôle au cours duquel une mesure de carbone organique a été réalisée.

L'analyse de la variance indique une relation très hautement significative entre le résultat APL et le %COT ( $P=0.000$ ). Néanmoins, le %COT ne permet d'expliquer que 9 % de la variance du résultat APL.

### **3.4.5 Pomme de terre (classe 5)**

En 2012, 136 parcelles de pomme de terre ont fait l'objet d'un contrôle au cours duquel une mesure de carbone organique a été réalisée.

L'analyse de la variance n'indique aucune relation significative entre le résultat APL et le %COT (P = 0.193).

### **3.4.6 Colza (classe 6)**

En 2012, 23 parcelles de colza ont fait l'objet d'un contrôle au cours duquel une mesure de carbone organique a été réalisée.

L'analyse de la variance n'indique aucune relation significative entre le résultat APL et le %COT (P = 0.674).

### **3.4.7 Légumes (classe 7)**

En 2012, il n'y a eu que neuf parcelles échantillonnées dans cette classe. Cet effectif est insuffisant pour pouvoir mener des tests statistiques et en tirer des conclusions.

### **3.4.8 Prairies (classe 8)**

En 2012, 113 prairies ont fait l'objet d'un contrôle au cours duquel une mesure de carbone organique a été réalisée.

L'analyse de la variance indique une relation très hautement significative entre le résultat APL et le %COT (P = 0.000). Néanmoins, le %COT ne permet d'expliquer que 12 % de la variance du résultat APL.

Une façon de s'affranchir de l'effet 'occupation du sol' (afin de disposer d'un effectif plus important) est de tester l'impact du carbone organique non plus sur le résultat (kg N-NO<sub>3</sub>/ha) mais sur la qualification du résultat (bon – satisfaisant – limite – non conforme).

Pour mener à bien cette analyse, les résultats des prairies n'ont pas été considérés puisque dans ces situations, la différence de contenu en carbone organique est significative (P=0.000) par rapport aux observations réalisées en terre cultivée (tableau 2-19). On observe également que les parcelles des classes 4 (maïs) et 6 (colza présentent) une teneur en matière organique plus élevée que pour les autres classes de culture. Il n'y a rien d'étonnant dans ce constat puisque les parcelles de maïs et de colza sont plus fréquentes en Condroz et Famenne, deux régions agricoles qui présentent une teneur moyenne en carbone organique plus élevée (respectivement 1,4 et 2,0) qu'en région limoneuse (1,2) (Genot et al., 2012).



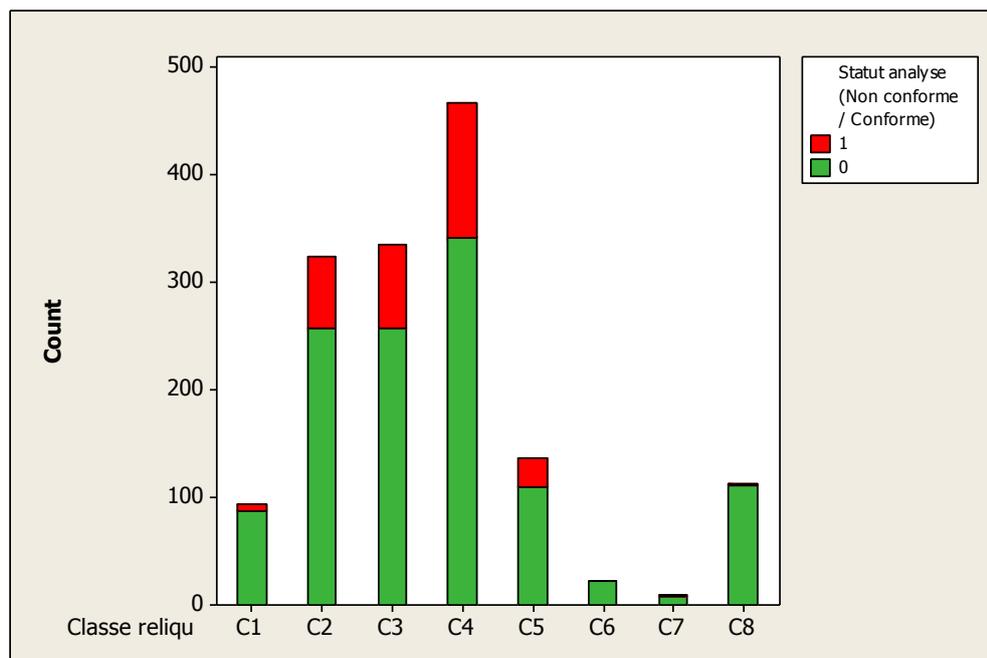


Figure 2-21. Proportion de non-conformité par classe d'occupation de sol en 2012.

### 3.4.9 Conclusions

L'analyse statistique des résultats APL et teneur en carbone organique a été menée selon deux approches distinctes :

1. relation résultat APL - teneur en carbone organique (par classe d'occupation de sol)
2. relation qualification du résultat APL – teneur en carbone organique (toutes classes confondues).

La première a mis en évidence l'existence de relation entre ces deux variables pour les classes de céréales suivies de CIPAN, de maïs et de prairie. Néanmoins, la teneur en carbone organique en permet que d'expliquer, dans ces trois classes, qu'au mieux 12% de la valeur APL.

La seconde approche a mis en évidence l'existence d'une différence très hautement significative entre les teneurs en carbone organique des parcelles qualifiées 'conformes' et les parcelles 'non conformes' ; ces dernières présentant une teneur moyenne en carbone organique plus élevée. Dans ces situations (teneur en carbone organique plus élevée), il est probable que ce paramètre ne soit pas suffisamment pris en compte par les agriculteurs concernés lors du raisonnement de la fertilisation de ces parcelles ; bien que son importance ait été soulevée par G. Manil à la fin des années soixante (L. Bock, communication personnelle).

Un développement complémentaire (intégration de la texture comme autre variable explicative dans l'analyse) a fait l'objet d'un article soumis à publication dans la revue BASE. Ce document est repris au paragraphe « Effet de la teneur en carbone du sol sur l'APL », page 167.

### 3.5 Effet du pH de la parcelle

L'existence d'un éventuel impact du pH sur l'APL a été évaluée avec le même jeu de donnée que celui utilisé pour l'étude de l'impact de la teneur en carbone sur le résultat APL (§ 3.4 Effet de la teneur en carbone, page 77).

La figure 2-22 illustre la distribution des pH en fonction de la classe de reliquat et de l'APL. Les analyses de variance réalisées confirment ce qui peut être observé graphiquement, à savoir, l'absence de relation entre le pH et l'APL.

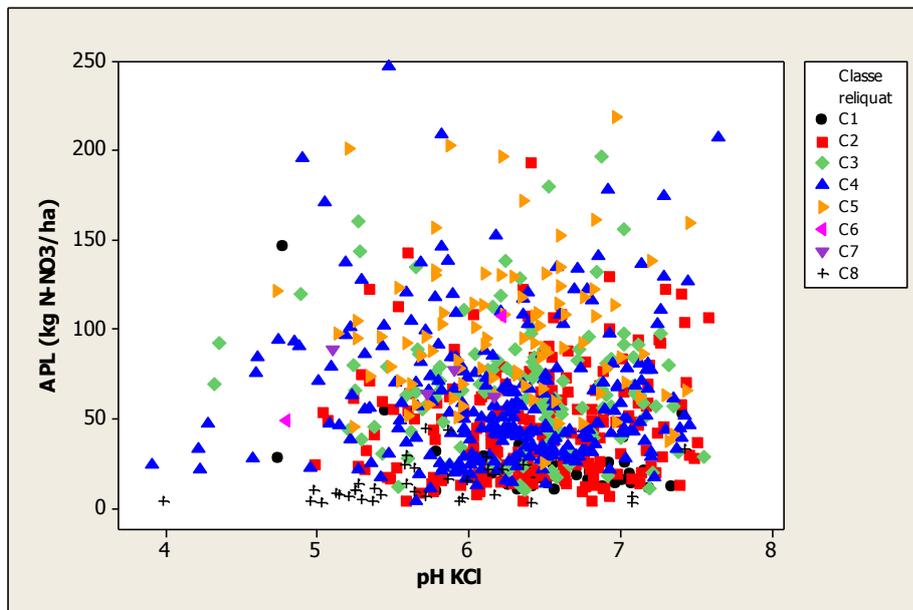


Figure 2-22. Relation APL - pH KCl.

### 3.6 **Estimation de la charge caillouteuse**

#### 3.6.1 Introduction

L'APL est exprimé en termes de stock d'azote nitrique, soit en  $\text{kg N-NO}_3^-\cdot\text{ha}^{-1}$ . Cette unité est dérivée d'une concentration, ou teneur, réellement dosée sur les échantillons en laboratoire et exprimée en  $\text{mg N-NO}_3^-$  par 100 g de terre. Le passage d'une unité à l'autre se fait en intégrant différents paramètres :

- *l'épaisseur de la couche de sol* : en terre de culture, la profondeur d'échantillonnage est de 90 cm, scindée en trois couches de 30 cm, tandis qu'en prairie pâturée elle est de 30 cm ; ceci pour autant que la profondeur de sol le permette ;
- *la proportion, en volume, d'éléments grossiers* : avant analyse, chaque échantillon est soigneusement homogénéisé par tamisage au travers d'un tamis de maille 8 mm. Si après tamisage il subsiste un refus sur le tamis, la charge caillouteuse de l'échantillon est fixée arbitrairement à 10% en volume. En l'absence de refus, la charge caillouteuse est fixée à 0%. La présence d'éléments grossiers (EG) réduit la quantité de terre qui existe dans l'unité de volume de sol en place, la terre étant en quelque sorte diluée (Gras, 1994). Si on ne tient pas compte de cette charge, la détermination du stock d'azote sera biaisée : le stock sera surévalué car la masse de sol est considérée comme constituée uniquement de terre fine ;
- *la densité apparente* : les valeurs standard suivantes de poids spécifique apparent sur sol sec par couche sont appliquées :  $1,35 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$  pour la couche supérieure (0-30 cm),  $1,5 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$  pour les autres couches (30-60 cm et 60-90 cm) en terre arable et  $1,3 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$  en prairie. Ces valeurs ont été proposées par RéQuasud (Destain et al., 2002).

Classiquement, les stocks d'azote nitrique par hectare sont estimés par couche en effectuant le produit de la concentration moyenne en azote nitrique, de la densité apparente et de l'épaisseur de l'horizon. Si le sol présente une charge en éléments grossiers (EG), il faut multiplier ce résultat par un coefficient correcteur  $x$  qui tient compte de la dilution de la terre fine :  $x = (100 - \% \text{ EG})/100$ .

Mohimont et al. (2003) estiment que l'erreur relative en matière d'analyse du reliquat azoté (tamisage de l'échantillon, extraction, mesure de la concentration dans l'extrait de sol) est de l'ordre de 10 %.

L'abondance de la charge et la densité apparente ne sont pas directement mesurées lors de l'échantillonnage. En conséquence, Schimdhalter et al. (1992) affirment que le biais engendré par cette méconnaissance peut atteindre 20 % pour l'évaluation du reliquat azoté. La technique de prélèvement sous-estime systématiquement la valeur de la charge caillouteuse puisque les éléments grossiers de gros calibre (supérieur au diamètre de la sonde) ne sont jamais prélevés.

L'objectif de ce paragraphe est d'évaluer l'amplitude de l'erreur sur le résultat final liée à l'estimation de la charge caillouteuse.

Ci-après, dans un premier temps, la légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW) est détaillée. Les sigles des différentes plages cartographiques sont constitués par l'assemblage de symboles, chacun donnant une information sur une caractéristique observée du sol ; indirectement, il s'agit notamment de l'abondance de la charge.

Une carte thématique de l'abondance en EG est ensuite réalisée à titre d'exemple pour 2 régions agropédologiques wallonnes (Condroz et Famenne). Des parcelles géoréférencées du SSA y sont replacées, et des calculs de stock d'azote nitrique sont réalisés en prenant en compte l'information relative à l'abondance de la charge renseignée par cette carte.

Pour finir, différentes remarques quant à la possibilité d'utilisation de la CNSW pour l'estimation de la pierrosité des sols échantillonnés sont formulées.

### 3.6.2 Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW)

La Carte des Sols de la Belgique, réalisée entre 1947 et 1991, est une carte de nature géomorphopédologique, c'est-à-dire une carte qui exprime étroitement les relations existant entre la roche, le relief et le sol. Dans le cadre du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW), les planchettes de la partie wallonne de ce document ont été entièrement numérisées. Cette couche spatiale est reliée à une base de données sémantiques qui traduit la légende. Cet ensemble constitue la Carte Numérique des Sols de Wallonie.

L'unité cartographique de base de la carte est la série principale. Une série regroupe des profils pédologiques ayant en commun un ensemble de caractéristiques morphologiques importantes, comme la nature et la succession des horizons (ou simplement la présence ou l'absence d'un horizon diagnostique), la texture, la couleur, la présence, nature et importance d'une charge caillouteuse, etc.

Une série principale est identifiée par un sigle comprenant 3 à 5 lettres, chacune d'elles traduisant une caractéristique observée du sol. Ce sigle se présente de la manière suivante :

- la première lettre, **une majuscule**, indique la nature de la roche-mère pédologique, ou plus précisément la texture de la partie supérieure du profil, qui correspond conventionnellement aux 50 premiers centimètres pour les sols développés dans des formations meubles ;
- la deuxième lettre, **une minuscule**, définit l'état de drainage naturel, ou plutôt les conditions d'hydromorphie du milieu ;
- la troisième lettre, **une minuscule**, caractérise le type de développement de profil, sur base de la présence ou absence d'un ou plusieurs horizons diagnostiques.

Ce sigle minimal peut être complété, pour apporter des précisions supplémentaires :

- une minuscule avec ou sans parenthèse, ou deux minuscules, ou une majuscule en suffixe indique(nt) des variations secondaires au sein d'une même série principale. Ces variantes ou phases concernent le développement de profil, le matériau parental ou, pour les sols à charge en éléments grossiers de plus de 15% en volume, la nature de celle-ci ;
- un chiffre en suffixe indique généralement une profondeur ou une épaisseur.

Outre la série principale, on peut identifier des séries dites dérivées : un substrat, ou roche située sous le sol et pour laquelle aucune relation pédogénétique n'a pu être établie avec lui<sup>5</sup>, est identifié à moins de 125 centimètres de profondeur, limite théorique de profondeur du sol. Ce substrat est indiqué dans la légende de la carte des sols par une minuscule précédant la majuscule de texture.

Lorsque la variabilité spatiale des caractéristiques de base du sol (texture, drainage, développement de profil) est trop importante que pour être visualisée à l'échelle 1/20.000, des groupements ont été opérés pour simplifier la lecture des sigles pédologiques. La série est alors dite complexe. Dans ce cas, les majuscules relatives aux types de texture sont reliées par des tirets, et les minuscules exprimant les classes de drainage naturel ou les types de développement de profil sont remplacées par une majuscule, traduisant le groupement de symboles simples.

Les sigles des unités cartographiques de la CNSW se présentent donc de la façon suivante (figure 2-23).

<sup>5</sup> Le matériau parental ou roche-mère est à distinguer du substrat. Il s'agit d'une roche dure ou meuble dont dérive le sol, directement ou indirectement par l'intermédiaire d'une altérite.

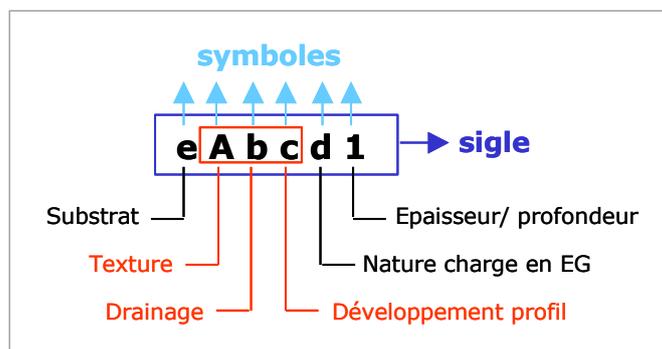


Figure 2-23. Définition des symboles des sigles des unités cartographiques.

Plus de 6000 sigles différents sont identifiés sur base de ces symboles.

La phase solide du sol est constituée de terre fine et d'éléments grossiers. Par éléments grossiers, la CNSW considère tous les constituants minéraux individualisés (fragments élémentaires de roches, poly- ou mono-minéraux) de dimensions supérieures à 2 mm (Baize and Jabiol, 1995); la terre fine est donc constituée de particules de dimensions inférieures à 2 mm. Même si les EG ont perdu, partiellement ou totalement, leur structure lithique originelle par altération, ils n'ont pas acquis de structure pédologique. Par conséquent, ces éléments ne doivent pas être confondus avec les agrégats tels que définis par Lozet and Mathieu (2002)<sup>6</sup>.

Selon leurs dimensions, les EG sont appelés graviers (0,2 à 2 cm), cailloux (2 à 7,5 cm), pierres (7,5 à 20 cm) ou blocs (> 20 cm).

Pour rappel, si on se réfère au protocole d'analyse du nitrate, les laboratoires considèrent les EG comme étant les constituants minéraux de dimensions supérieures à 8 mm. La notion d'EG au sens de la CNSW n'est donc pas la même que celle des laboratoires d'analyse du nitrate. Pour simplifier la compréhension de la suite du texte, on écrira charge-CNSW ou charge-labo selon qu'il s'agit de l'un ou l'autre type.

Grâce aux symboles des sigles identifiant les différentes unités cartographiques, la carte des sols donne des informations relatives au volume et à la nature lithologique de la charge en EG, à leur altération éventuelle et à la profondeur d'apparition d'un substrat.

#### a) Volume de la charge

Dans la CNSW, la nature du matériau parental est représentée, rappelons-le, par une lettre majuscule placée en première position du sigle de la série principale. Selon la nature du matériau parental, on distingue les sols organiques (ou sols sur matériaux tourbeux) et minéraux.

La subdivision des sols minéraux est basée sur leur texture, déterminée par les résultats de l'analyse granulométrique. Différentes classes texturales ont été définies pour la Carte des sols de Belgique. Une classe texturale peut recouvrir une ou plusieurs textures.

Une première distinction est faite entre les sols minéraux à teneur en éléments grossiers inférieure à 5% en volume, et ceux à teneur supérieure à 5%.

Pour les sols minéraux à teneur en éléments grossiers inférieure à 5%, sept classes texturales sont définies (tableau 2-21).

<sup>6</sup> Agrégats : dans le sol, unité naturelle tridimensionnelle d'assemblage de matériaux, consistant mais non induré, constituant un ensemble meuble ou moins ferme que chacune des unités ou particules élémentaires.

**Tableau 2-21. Classes texturales des sols minéraux à teneur en EG inférieure à 5 % dans la CNSW.**

Symbole	Texture	Classe texturale
Z	Sable	Sols sableux
S	Sable limoneux, sable argileux	Sols limono-sableux
P	Limon sableux léger	Sols sablo-limoneux légers
L	Limon sableux, limon sableux lourd	Sols sablo-limoneux
A	Limon léger, limon, limon lourd	Sols limoneux
E	Argile légère, argile sableuse, argile limoneuse	Sols argileux légers
U	Argile lourde, argile lourde sableuse, argile très lourde	Sols argileux lourds

Pour les sols à teneur en éléments grossiers supérieure à 5%, deux cas sont identifiés. Pour les textures Z, S, P et U, la nature de la charge en EG est indiquée par une lettre en quatrième position du sigle de la série principale ; pour les textures L, A et E, la lettre G (limon caillouteux) est utilisée.

Dans ce dernier cas, trois classes de teneurs en EG sont identifiées :

- teneur comprise entre 5 et 15 % : sols limoneux peu caillouteux ;
- teneur comprise entre 15 et 50 % : sols limoneux caillouteux ;
- teneur supérieure à 50 % : sols limoneux très caillouteux.

Dans le cas des limons caillouteux, la distinction est faite entre sols des plateaux et des pentes, et sols des vallées et dépressions. Dans ce dernier cas, la troisième lettre du sigle de la série principale, qui représente le développement de profil, est un « p ».

Le tableau 2-22 présente le symbole des classes texturales des sols minéraux à teneur en EG supérieure à 5%.

**Tableau 2-22. Classes texturales des sols minéraux à teneur en EG supérieure à 5 % dans la CNSW.**

	Charge 3	<i>Sols plateaux et pentes</i>	<i>Sols vallées et dépressions</i>
<b>Z, S, P, U</b>	> 5	<b>Z,S,P</b> ou <b>U</b> + nature de la charge en 4ème position	
<b>L, A, E</b>	5 – 15	<b>G</b>	<b>(G) . p</b>
	15 – 50	<b>G</b> + nature de la charge + phase de profondeur 0, 1, 2, 4 ou 7	<b>G . p</b>
	> 50	<b>G</b> + nature de la charge + phase de profondeur 3, 5 ou 6	

#### b) Nature lithologique de la charge

Pour les sols caillouteux (G) à teneur en EG supérieure à 15 %, et dans de rares cas pour les sols sableux (Z), limono-sableux (S) ou sablo-limoneux légers (P) à teneur en EG supérieure à 5 %, la nature lithologique de la charge est renseignée par une lettre minuscule en quatrième position du sigle de la série principale.

#### c) Altération de la charge

Une lettre minuscule peut également se retrouver à droite de la lettre représentant la nature de la charge, en 5ème position du sigle de la série principale. Deux symboles sont employés : a → charge altérée, et b → charge rougeâtre.

## d) Phases de profondeur

Les phases de profondeur sont indiquées par des chiffres en suffixe du sigle pédologique. Ces chiffres donnent des informations quant à la profondeur d'apparition du substrat, et donc sur la profondeur du sol. Pour les sols limono-caillouteux (texture G), les phases donnent aussi la fraction estimée de la charge en EG (tableau 2-22).

### 3.6.3 Création d'une carte thématique à partir de la CNSW

La CNSW peut fournir une aide pour définir la charge en éléments grossiers, la symbolique de la carte procurant en effet une information à ce sujet. En traitant la couche d'information correspondant à la symbolique, il est dès lors possible de générer une carte thématique de l'abondance de la charge caillouteuse.

Il est ainsi possible de traiter l'information avec un système d'information géographique pour déterminer 4 classes de sol en fonction de la charge (tableau 2-23).

**Tableau 2-23. Détermination des 4 classes de charge à partir de la table d'attributs de la couche « sol » de la CNSW.**

<p><b>CLASSE 0 – 5 % :</b>  <b>Mat_Text</b> = A ou AE ou AL ou AS ou ASU ou AU ou E ou ELS ou EZ ou L ou LE ou SU ou SZ ou UL ou ULS ou V ou VE ou W  ou (<b>Mat_Text</b> = P ou S ou U ou Z) et (<b>Charge</b> = rien)</p> <p><b>CLASSE 5 – 15 % :</b>  (<b>Mat_Text</b> = P ou S ou U ou Z) et (<b>Charge</b> &lt;&lt; rien)  ou <b>Mat_Text</b> = (G) ou AG ou AGS ou GZ ou GL  ou (<b>Mat_Text</b> = G) et (<b>Dev_Profil</b> &gt;&gt; p) et (<b>Charge</b> = rien)</p> <p><b>CLASSE 15 – 50 % :</b>  (<b>Mat_Text</b> = G) et (<b>Dev_Profil</b> = p) et (<b>Charge</b> = rien)  ou (<b>Mat_Text</b> = G) et (<b>Charge</b> &lt;&lt; rien) et (<b>Phase_1</b> &lt;&lt; 6 et &gt;&gt;rien)</p> <p><b>CLASSE &gt; 50 % :</b>  (<b>Mat_Text</b> = G) et (<b>Charge</b> &lt;&lt; rien) et (<b>Phase_2</b> &lt;&lt; rien ou <b>Phase_1</b>=6)</p>
---

En réalisant ces sélections pour l'ensemble de la Région wallonne, on peut voir que sur environ 9.685 km<sup>2</sup> de terres agricoles (source : plan d'occupation du sol Walphot-Cicade, 1989), environ 54,4 % sont des sols non caillouteux (classe 0-5 %), tandis que seuls 1,1 % sont des sols à charge en éléments grossiers supérieure à 50 %. 7,1% appartiennent à des séries spéciales (sols de carrières, de remblais, etc.) ou sont des plages non cartographiées (NC).

On peut également signaler que 34,3 % des sols agricoles non caillouteux sont des zones de pâture, contre 84,8 % des sols à charge supérieure à 50 %.

Ces informations sont résumées dans le graphique ci-dessous (figure 2-24), ainsi que dans le tableau 2-24 qui l'accompagne.

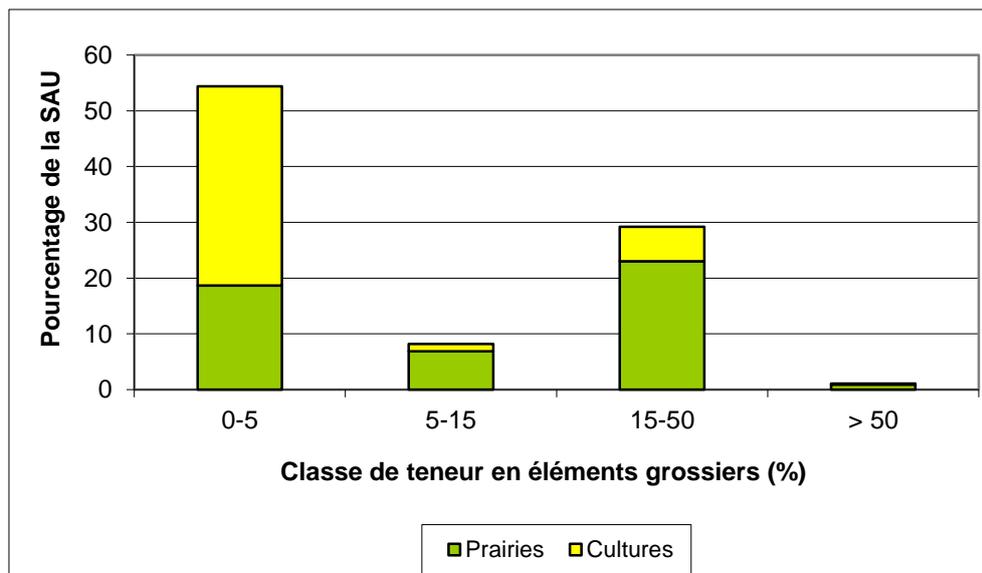


Figure 2-24. Proportion des sols agricoles de chaque classe de pierrosité.

Tableau 2-24. Proportion des sols agricoles de chaque classe de pierrosité.

Classe de charge	% de la SAU	Prairies (% pour chaque classe)	Cultures (% pour chaque classe)
0 – 5 %	54,4	34,3	65,7
5 – 15 %	8,2	83,8	16,2
15 – 50 %	29,2	78,8	21,2
> 50 %	1,1	84,3	15,2

La majeure partie des sols à vocation agricole (terres de cultures mais aussi prairies) est donc à charge comprise entre 0 et 50 %. La superficie des terres emblavées est nettement supérieure à celle des prairies pour les sols non caillouteux, tandis que c'est l'inverse pour les sols caillouteux, même à faible charge.

### 3.6.4 Utilisation de la carte thématique à l'échelle des parcelles

L'intérêt de la Carte Numérique des Sols de Wallonie pour l'évaluation de la concentration en azote nitrique dans un sol caillouteux a été étudié et mis en évidence par

Dans le cadre des travaux réalisés par Gembloux Agro-Bio Tech, sous l'égide de Réquasud, une application informatique cartographique dénommée *Réquacarto* a été créée en vue de fournir à des utilisateurs (laboratoire provinciaux, ...), une estimation de la charge caillouteuse dans une parcelle sélectionnée par l'utilisateur (figure 2-25). Cette application est utilisée en routine pour intégrer la charge caillouteuse dans le calcul et l'expression de la concentration en azote nitrique d'un sol ( $\text{kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ ).



## FICHE POUR L'ECHANTILLONNAGE



Wallonie

Référence : 9872807  
 Laboratoire : GRENERA (j.benoit)  
 Date : 2/1/2011 2:57:25 PM

### 1. DONNEES RELATIVES À LA PARCELLE

Géo-Identifiant parcelle : 9872807  
 Province : Province de Namur  
 Année de référence du parcellaire : 2007  
 Superficie de la parcelle : 4.46 ha  
 Coordonnées du centroïde de la parcelle : X = 175 032 m  
 (projection Lambert Belge 72) Y = 108 970 m

### 2. OCCUPATION DU SOL DE LA PARCELLE



Occupation en 2007 : Orge d'hiver  
 Occupation en 2006 : Froment d'hiver  
 Occupation en 2005 : Colza non alimentaire d'hiver

### 3. INFORMATION PEDOLOGIQUE DE LA PARCELLE



Série	Occupation (%)	Texture		Charge		Substrat		Drainage	
		Nature		Nature	(%)	Nature	Prof.	Nature	Prof. oxyd. red.
GbBK2	38.2	soils limono-caillouteux		argilo-calcaire	15 - 50%	-	40-80	soils non gleyifiés	> 125 -
Gbbk4	37.8	soils limono-caillouteux		calcaire	15 - 50%	-	20-40	soils non gleyifiés	> 125 -
A-Gbpc	11.8	complexe de soils limoneux et limono-caillouteux		-	15 - 50%	-	-	soils non gleyifiés	> 125 -
Aba1	2.8	soils limoneux		-	< 5%	-	-	soils non gleyifiés	> 125 -
Gbax4	0.3	soils limono-caillouteux		silixite	15 - 50%	-	20-40	soils non gleyifiés	> 125 -

#### 4. ZONES DE PRELEVEMENTS AU SEIN DE LA PARCELLE



Label	Geo-ID	Occupation (%)	Texture	Drainage	Charge		Substrat		Divers	Coord. Centroïde	
					Nature	Abondance	Nature	Prof. sol		X (m)	Y (m)
A	9872807-A	100	-	-	-	-	-	-	Parcelle	175032	108970
B	9872807-B	38.2	-	Excessif à imparfait	Argile calcaire	15 - 50%	-	> 40 cm	-	175034	108917
C	9872807-C	37.8	-	Excessif à imparfait	Calcaire, grès calcaire ou schiste calcaire	15 - 50%	-	< 40 cm	-	175016	108966
D	9872807-D	11.8	-	Excessif à imparfait	-	5 - 15%	-	> 40 cm	Alluvion ou colluvion	174951	108896

##### Sources des données et crédits

- ASBL REQUASUD, mission d'intérêt public définie dans une convention-cadre avec la Région wallonne (<http://www.requasud.be>).
- Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW), Service Public de Wallonie, Direction Générale Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (DGO3).
- PCNSW, Projet du Gouvernement wallon (GW VIII / 2007 / Doc.58.12 / 12.07 / B.L & GW VII / 2000 / Doc.1331 / 07.12 / JH.).
- Orthophotos, Service Public de Wallonie, Direction Générale Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (DGO3).
- Parcellaire agricole, Service Public de Wallonie, Direction Générale Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (DGO3), Département des Aides.
- Portail cartographique REQUACARTO, Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) Département Agriculture et Milieu Naturel, Unité Systèmes agraires, territoires et technologies de l'information & l'Université de Liège Gembloux Agro-BioTech (GxABT), Unité Sol ECOTER, laboratoire de Géopédologie.

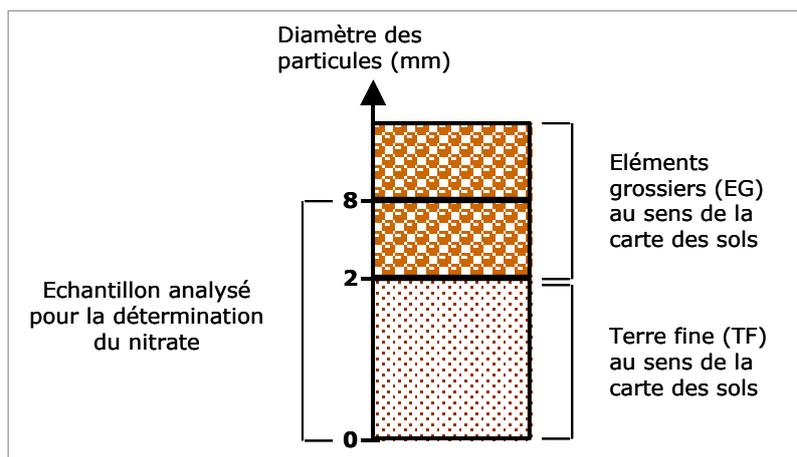
Figure 2-25. Exemple de rapport établi à l'aide de l'application RequaCarto (Requasud).

### 3.6.5 Remarques

De prime abord, l'utilisation des informations de la CNSW pour la détermination du volume en EG est intéressante, car cette dernière donne différentes indications concernant la charge, notamment son abondance. Les parcelles échantillonnées étant à présent systématiquement géoréférencées, il semble donc aisé de se référer à la CSNW pour déterminer plus finement (0, 10, 30 ou 50 % plutôt que 0 ou 10 % uniquement), mais toujours de façon arbitraire, leur charge en EG, ce qui permet ensuite de recalculer le stock d'azote de façon plus précise. Cependant, cinq remarques importantes sont à mentionner.

#### a) Limite des dimensions des EG

Si on utilise la CNSW pour déterminer plus finement le volume occupé par les EG, on introduit un nouveau biais dans l'expression du résultat car les limites proposées pour les EG diffèrent selon la CNSW et la mise en œuvre au laboratoire (2mm et 8 mm respectivement). Dans l'expression des résultats d'analyse, une certaine proportion d'EG au sens de la carte des sols est déjà prise en considération ; il s'agit des EG de dimensions comprises entre 2 et 8 mm (figure 2-26).



**Figure 2-26.** Limite des dimensions des EG au sens de la CNSW et selon la mise en œuvre analytique.

Prenons comme exemple le cas d'un sol constitué de 70% de TF, 15% d'EG de dimensions comprises entre 2 et 8 mm et 15% d'EG de dimensions supérieures à 8 mm, et dont les résultats d'analyse sont les suivants :

- 0,50 mg N-NO<sub>3</sub>/100 g pour la couche 0-30 cm,
- 0,25 mg N-NO<sub>3</sub>/100 g pour la couche 30-60 cm,
- 0,20 mg N-NO<sub>3</sub>/100g pour la couche 60-90 cm.

Dans ce cas, comme il subsiste un refus sur le tamis de maille 8 mm, le laboratoire considère une charge de 10 % en volume.

Les stocks d'azote sont alors estimés à :

- 36,5 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> si on prend en compte 10 % de charge en volume ;
- 28,4 kg.ha<sup>-1</sup> si l'on prend en compte l'information apportée par la CNSW, soit une charge de 30% en volume, sans se soucier de la proportion d'éléments de dimensions comprises entre 2 et 8 mm qui a influencé le résultat d'analyse. Ce résultat est en effet exprimé en mg N-NO<sub>3</sub>/100 g de terre fine à 8 mm et on le multiplie par un coefficient correcteur qui tient compte du pourcentage volumique de la terre fine à 2 mm. La proportion d'éléments de dimensions comprises entre 2 et 8 mm, soit dans ce cas 17,6 % (ou 15/85) de l'échantillon analysé, sera donc en quelque sorte prise deux fois en considération (une fois dans la charge caillouteuse et une fois dans les résultats d'analyse) ;
- 34,6 kg.ha<sup>-1</sup> si on effectue sur le résultat d'analyse une correction préliminaire relative aux 15 % d'EG de dimensions comprises entre 2 et 8 mm. Dans ce cas, on obtient premièrement la concentration de nitrate dans la terre fine au sens de la CSNW (terre fine à 2 mm), avant de la multiplier par un coefficient correcteur 0,7 qui tient compte des 30 % de charge en volume dans l'ensemble de la parcelle.

Pour les simplifier, les calculs sont opérés en considérant que la terre fine (TF) et les EG ont la même densité apparente.

Dans le cas d'un sol qui présenterait les mêmes résultats d'analyse, mais qui serait constitué de 70% de TF et de 30 % d'EG de dimensions comprise entre 2 et 8 mm, les stocks d'azote seraient alors respectivement de 40,5 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>, 28,4 kg.ha<sup>-1</sup> et 19,8 kg.ha<sup>-1</sup>. Dans ce cas, le laboratoire considère une charge de 0 % car il ne subsiste aucun refus sur le tamis de maille 8 mm.

Il faut donc connaître la proportion d'EG de dimensions comprises entre 2 et 8 mm. Cette proportion dépend de la nature lithologique de la charge et de son état d'altération. Pour chaque combinaison (classe de pierrosité x nature de la charge), des échantillons pourraient être récoltés pour déterminer une proportion moyenne.

Le problème se pose alors de déterminer le nombre de mesures nécessaires pour atteindre une précision donnée. Ceci se détermine grâce à l'équation suivante (Dagnelie, 1998b) ( $\alpha = 0,05$ ) :

$$n = 3,84 \sigma^2/d^2$$

Dans cette équation, n correspond au nombre de mesures (l'inconnue) et d à l'erreur absolue maximale admissible. On constate donc que le nombre de mesure à réaliser est directement dépendant de l'erreur maximum que l'on tolère, de la probabilité de dépassement  $\alpha$  de cette erreur et de la variabilité des mesures. Cette relation ne peut rigoureusement être appliquée que si la distribution de la population est normale.

Pour déterminer la variance  $\sigma^2$  de la proportion d'EG compris entre 2 et 8 mm de chacune de ces combinaisons, il faut faire des mesures sur un minimum de quatre échantillons (Colinet, comm.pers.) provenant de chacune de ces combinaisons.

Il y a donc ici un facteur d'imprécision que l'on ne peut pas estimer actuellement, faute de données.

#### b) Pondération

Dans le cas des parcelles situées à cheval sur des sols de pierrosités différentes, les estimations du volume de la charge peuvent être pondérées par rapport à la superficie qu'occupent chacun de ces différents types de sols.

Il faut alors signaler que pour l'élaboration de la Carte des Sols de la Belgique, des sondages ont été réalisés et décrits selon un maillage de 75 mètres, et que les limites des différentes unités cartographiques ont été replacées entre ces points en fonction notamment du relief ou de la végétation. Ces limites ne sont bien évidemment pas aussi tranchées dans la réalité. Il y a donc ici aussi un facteur d'imprécision.

#### c) Altération

L'altération de la charge est également un facteur important à prendre en considération lorsque l'on veut calculer plus finement le stock d'azote dans le sol. En effet, si les EG sont altérés, il se peut que leurs dimensions soient inférieures à 2 mm. Cette charge est dans ce cas considérée comme de la terre fine. Par exemple, une charge de psammite altérée donnera l'impression d'une texture sableuse.

La CNSW indique si la charge en EG est altérée (§2), mais pas dans quelle mesure (faiblement, fortement altérée ?). Il faudrait apporter un coefficient correcteur qui tiendrait compte de cette altération.

#### d) Porosité

Jusqu'à présent, on a considéré les EG comme étant des volumes inertes. Or Coutadeur et al. (2000) affirment, d'après les résultats d'une expérience menée sur des Calcosols (ou sols calcaires caillouteux) de Petite Beauce, qu'il est nécessaire de tenir compte du pourcentage volumique de la phase caillouteuse mais aussi de ses propriétés de rétention pour estimer correctement la réserve en eau utile (RU) de ces sols.

Dans ce cadre, cette expérience a montré que la non prise en compte de la phase caillouteuse conduisait à des surestimations de la RU de 22 à 39% mais que sa prise en compte comme une phase inerte (le volume des EG est pris en compte mais pas de leurs propriétés de rétention) conduisait à une sous-estimation de 8 à 34% de la RU. Les propriétés de rétention sont liées à la porosité de la phase caillouteuse.

Coutadeur et al. (2000) considéraient que les échanges entre phase caillouteuse et terre fine ne concernent pas uniquement l'eau mais aussi l'ensemble des éléments de la solution du sol. L'azote nitrique étant en solution dans l'eau du sol, celui-ci pourrait également se retrouver piégé dans des EG poreux (de type craie ou grès par exemple), et les plantes pourraient en avoir l'usage. Il serait donc intéressant d'évaluer la porosité effective (pores communicants) des différents types de charge pour affiner encore l'estimation des stocks d'azote nitrique dans les sols. Pour rappel, la nature lithologique de la charge est renseignée par la quatrième lettre, soit la troisième minuscule, du sigle de la série principale.

Il serait sans doute intéressant, notamment pour les conseils de fumure, de connaître approximativement les quantités d'azote qui peuvent être ainsi retenues et qui seront disponibles pour les végétaux.

Les propriétés de rétention (stockage et relargage de l'eau et donc des ions) de la phase caillouteuse en fonction de sa porosité sont donc à prendre en considération notamment dans les zones de grandes cultures où la conduite des cultures est fréquemment réalisée de façon indifférenciée par parcelle, les intrants étant gérés de façon uniforme quelle que soit l'hétérogénéité du milieu. Leurs propriétés devront être prises en compte dans le cadre des techniques d'agriculture de précision qui peuvent permettre d'apporter des solutions novatrices de différenciation des apports en fonction des types de sol (Cousin et al., 2003; Coutadeur et al., 2000; Tetegan et al., 2015).

#### e) Distribution de la charge caillouteuse dans le profil de sol

La CNSW ne propose pas, dans sa version actuelle, d'information relative à la distribution de la charge caillouteuse dans le profil de sol. En conséquence, la teneur moyenne renseignée par la CNSW est appliquée à toutes les couches de sol alors que dans la réalité, la charge caillouteuse est, dans la majorité des situations, plus importante en profondeur qu'en surface.

En conséquence, en surestimant la charge caillouteuse dans les couches de surface pour des échantillons prélevés dans des sols caillouteux, l'expression du résultat de l'analyse est sous-estimé dans ces contextes.

### 3.7 Estimation de la densité apparente

#### 3.7.1 Introduction

Comme annoncé précédemment (3.6 Estimation de la charge caillouteuse), l'expression finale du résultat d'une mesure de reliquat azoté nécessite la connaissance ou l'estimation de la densité apparente du sol. Cette dernière multiplie directement le résultat analytique.

Dans une situation très idéale, il conviendrait de mesurer la densité des couches sondées lors de chaque prise d'échantillon (une quinzaine par parcelles). Ce travail s'avère d'emblée très fastidieux et rendrait la mesure du reliquat azoté trop coûteuse.

Actuellement, la législation (PGDA) fixe la densité comme suit (tableau 2-25) :

**Tableau 2-25. Densités apparentes légales par couche de sol et affectation de parcelle.**

Affectation de la parcelle	Couche (cm)	Densité (t.m <sup>-3</sup> )
Prairie	0-30	1.3
Culture	0-30	1.35
	30-60	1.5
	60-90	1.5

On conçoit aisément que la densité d'un sol soit fonction de facteurs anthropiques (travail du sol) ou naturels (gel/dégel, durée de végétation). Les valeurs légales ont été proposées par Requasud (Destain et al, 2002) qui historiquement réalise, via ses laboratoires membres, des analyses de sol au printemps en vue de conseils de fertilisation.

La mesure du reliquat azoté dans un sol avant l'hiver n'étant dès lors pas une pratique courante ; il convient de valider les valeurs 'légales' en vue de conserver une démarche scientifiquement correcte. Ce faisant, les valeurs mesurées avant l'hiver peuvent être valablement :

- comparées à celles du printemps qui précède pour contribuer à l'établissement de bilans de prélèvement d'azote par la culture ;
- comparées à celles du printemps qui suit pour évaluer les pertes d'azote nitrique par lixiviation au cours de l'hiver ;
- utilisées dans des modèles de simulation tels que SWAT (Deneufbourg et al., 2012), (Sohier et al., 2009) pour prédire le flux de nitrate vers les eaux souterraines ou de surface.

D'autre part, dans un contexte de contrôle, il convient de pouvoir apprécier l'incertitude liée à l'estimation ou la mesure de chaque facteur utilisé dans l'expression du résultat final. Ainsi, une incertitude de 2% sur la densité conduirait à une incertitude (liée à la densité) de 2% sur le résultat APL (ce qui serait acceptable) ; une incertitude de 20% sur la densité conduirait à une incertitude de 20% sur le résultat APL (ce qui serait inacceptable et conduirait à adapter la tolérance dans l'appréciation d'un résultat de contrôle).

En raison de tous ces éléments, il convenait de mener des investigations pour répondre aux trois questions suivantes :

- les valeurs 'légales' sont-elles correctes ?
- quelle est la dispersion des résultats ou l'intervalle de confiance de ces moyennes ?
- si cette dispersion est élevée, quels sont les éventuels facteurs qui expliquent cette dispersion ?

### 3.7.2 Matériel et méthodes

Pour répondre à ces questions, deux campagnes d'échantillonnage ont été menées.

La première a été réalisée sur une parcelle limoneuse exploitée par la ferme de Gembloux Agro-Bio Tech. A cette occasion, des échantillons de sol ont été prélevés par deux méthodes :

- en avril 2011, de façon conventionnelle, à l'aide d'un anneau conformément à la norme NF X 31-501 (AFNOR, 1999) et
- en octobre 2011, à l'aide d'une gouge utilisée régulièrement dans le cadre de prélèvement d'échantillons de sol en vue du dosage du reliquat azoté.

L'objectif de cette première campagne d'échantillonnage vise à établir une relation entre les résultats de mesure à l'aide d'un anneau et d'une gouge.

La seconde campagne d'échantillonnage a été réalisée dans 48 parcelles du Survey Surfaces Agricoles où des échantillons ont été prélevés jusqu'à 30 cm (prairie) ou, en 3 couches de 30 cm, jusqu'à 90 cm (parcelle cultivée) à une (fin octobre 2011 ou fin décembre 2011) ou deux reprises (fin octobre 2011 et fin décembre 2011).

Ces prélèvements ont été réalisés dans le cadre de l'échantillonnage annuel mené pour établir les APL de référence. Dans ce contexte où le temps est compté (période obligatoire limitée à 10 jours et rendement fixé à 7 parcelles par jour) et la météo peu favorable, le nombre de parcelles est limité et un seul échantillon a pu être prélevé par parcelle en vue de l'estimation de la densité. Nous analyserons ultérieurement les conséquences de ce « choix ».

Au total, 147 échantillons de sol ont été prélevés lors de la seconde campagne d'échantillonnage.

L'expression de la densité ( $t.m^{-3}$ ) nécessite la mesure d'un volume et d'un poids. Dans le cas d'un prélèvement avec un anneau, le volume est constant ; il s'agit de celui de l'anneau. Dans le cas d'un prélèvement avec une gouge, l'échantillon (de 30 cm) peut être fracturé lors de l'extraction. Seule la partie de carotte cohérente est conservée pour la détermination de la densité. Ainsi, lors de chaque prise d'échantillon, la longueur de la partie cohérente est mesurée ; le diamètre de la carotte correspond au diamètre intérieur de la gouge. La longueur moyenne d'un échantillon cohérent est de l'ordre de 16 cm.

Les résultats sont traités avec le logiciel Minitab (ver. 16)

### 3.7.3 Campagne d'échantillonnage dans le Survey Surfaces Agricoles

#### 1 Résultats

Le tableau 2-26 et la figure 2-27 illustrent les résultats des mesures de densité réalisées dans les parcelles du Survey Surfaces Agricoles.

Quatre mesures 'aberrantes' (outliers) apparaissent dans les observations réalisées dans la couche 60-90 cm (figure 2-27).

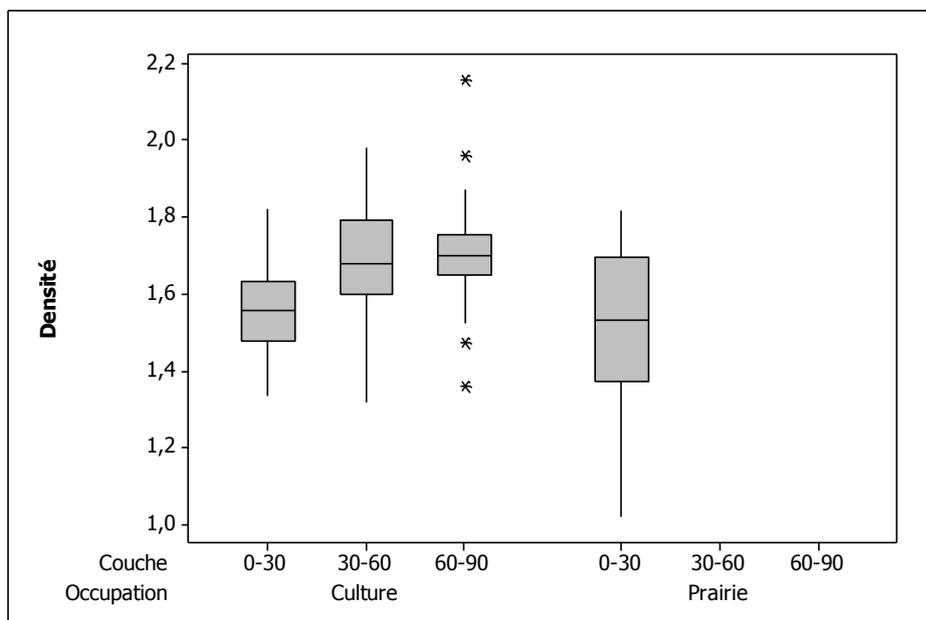
Pour rappel, étant donné que la mesure du reliquat azoté en prairie n'est effectuée que sur la couche 0-30 cm, aucune prise d'échantillon n'a été réalisée dans les couches sous-jacentes.

**Tableau 2-26. Synthèse des mesures de densité dans le Survey Surfaces Agricoles.**
**Results for Occupation = Culture**

Variable	Couche	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Densité	0-30	46	2	1,5534	0,0172	0,1167	1,3350	1,4781	1,5540
	30-60	45	0	1,6834	0,0209	0,1400	1,3182	1,5980	1,6772
	60-90	44	1	1,7054	0,0190	0,1259	1,3601	1,6482	1,6972
Variable	Couche	Q3	Maximum						
Densité	0-30	1,6303	1,8181						
	30-60	1,7912	1,9784						
	60-90	1,7548	2,1536						

**Results for Occupation = Prairie**

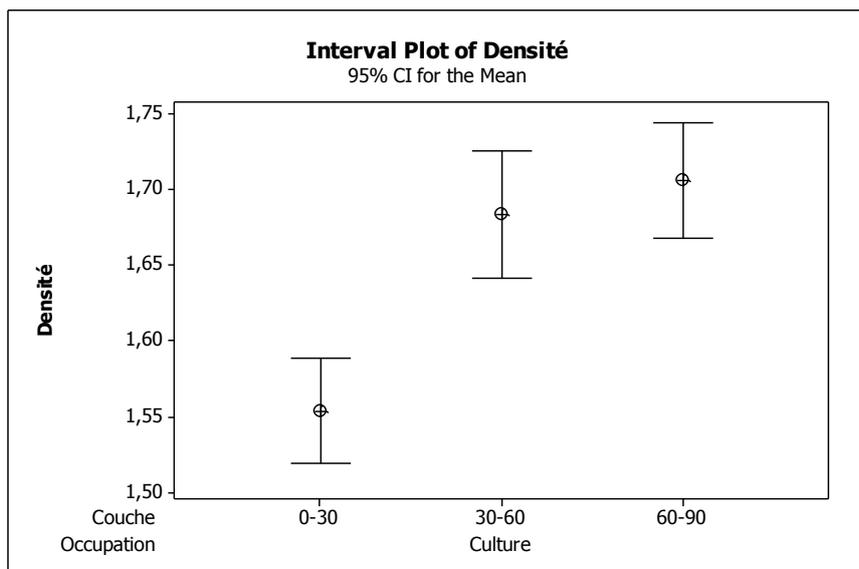
Variable	Couche	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Densité	0-30	12	0	1,4916	0,0701	0,2428	1,0201	1,3727	1,5297
Variable	Couche	Q3	Maximum						
Densité	0-30	1,6963	1,8152						


**Figure 2-27. Box plot des mesures de densité dans le Survey Surfaces Agricoles**

Un test de normalité (Anderson-Darling) indique que la distribution de la population est normale ( $P = 0.052$ ), condition nécessaire à la réalisation des tests statistiques suivants.

## 2 Estimation de la densité moyenne dans les parcelles cultivées

L'intervalle de confiance de la moyenne des observations est relativement faible ; de l'ordre de 2 à 2,5% de la moyenne (figure 2-28). Il apparaît donc que le biais possible lié à l'utilisation d'une valeur moyenne de densité pour exprimer le reliquat azoté d'une parcelle est très faible.



**Figure 2-28. Intervalle de confiance des densités moyennes observées en parcelles de culture.**

Une analyse de la variance avec comparaison des moyennes (méthode de Tukey) confirme ce qui peut être graphiquement observé, à savoir :

- le facteur 'couche' a un impact sur la densité ( $P=0.000$ ) et
- il n'y a pas de différence significative entre les observations des couches 30-60 et 60-90 mais bien entre la couche 0-30 et les deux couches 30-60 et 60-90.

### **3 Impact du type de sol dans les parcelles cultivées**

Cinq types de sol sont rencontrés dans les parcelles échantillonnées : limon, limon caillouteux, limon léger, limon sableux et limon sableux léger.

Même en regroupant les observations réalisées dans les couches 30-60 et 60-90 (eu égard à la similitude des densités moyennes dans ces deux couches) de manière à augmenter l'effectif ( $n = 90$ ), l'analyse de la variance ne met pas en évidence de différence de densité liée au facteur type de sol ( $P=0.892$ ).

### **4 Impact de la période d'échantillonnage dans les parcelles cultivées**

Une analyse de la variance effectuée sur l'ensemble de l'effectif, c'est-à-dire les parcelles échantillonnées à une reprise (octobre ou décembre) ou deux reprises (octobre et décembre), ne met pas en évidence d'impact du facteur « mois » ( $P=0.102$ ).

En ne conservant que les parcelles dans lesquelles un échantillon a été prélevé en octobre et en décembre, l'observation des résultats ne met clairement pas en évidence d'impact lié à la période de mesure (figure 2-29).

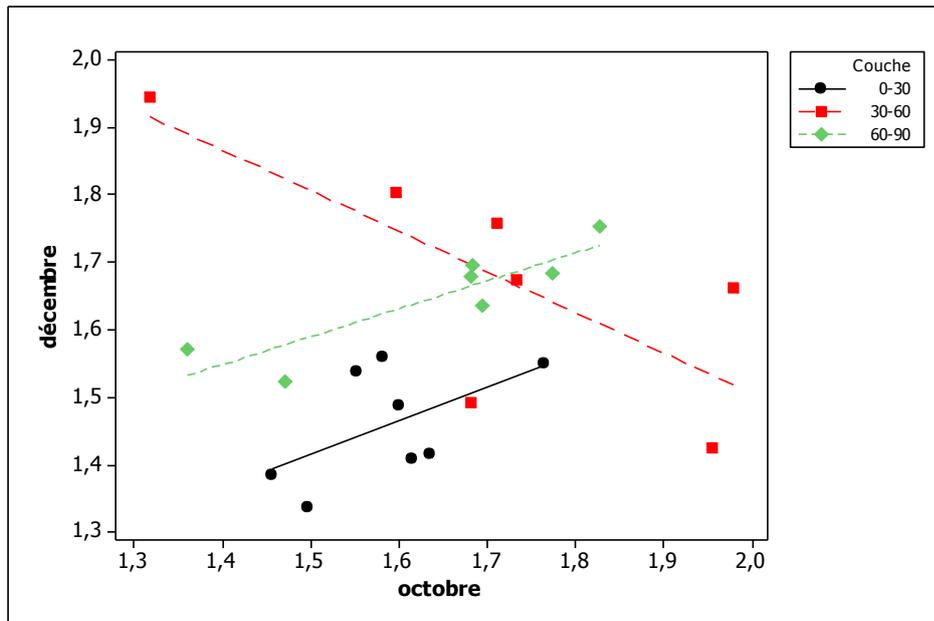


Figure 2-29. Comparaison des mesures de densité effectuées dans les parcelles échantillonnées en octobre et décembre.

La réalisation d'un test T sur les paires d'observations ne met pas en évidence de différence entre les observations réalisées en octobre et en décembre ( $P = 0.263$ ).

### 5 Estimation de la densité moyenne dans les prairies

Douze échantillons ont été prélevés dans onze prairies (une prairie ayant été échantillonnée en octobre et en décembre).

Le tableau 2-27 illustre la dispersion des mesures de densité réalisées en prairie.

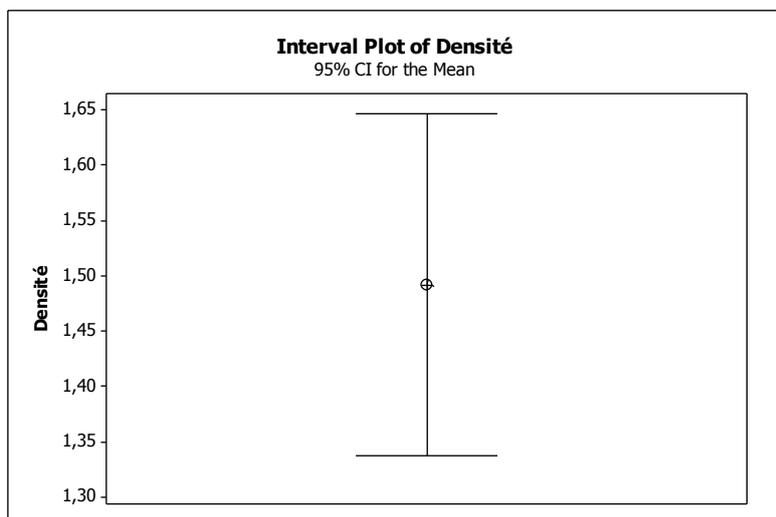
**Tableau 2-27. Description des mesures de densité réalisées en prairie.**

Descriptive Statistics: Densité

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3
Densité	12	0	1,4916	0,0701	0,2428	1,0201	1,3727	1,5297	1,6963

Variable	Maximum
Densité	1,8152

L'intervalle de confiance de la moyenne des observations est relativement élevé et de l'ordre de 10% de celle-ci (figure 2-30).



**Figure 2-30. Intervalle de confiance de la moyenne des mesures de densité en prairie.**

Le biais possible lié à l'utilisation d'une valeur moyenne de densité pour exprimer le reliquat azoté d'une prairie est donc du même ordre de grandeur.

### 6 Impact du type de sol dans les prairies

Compte tenu du nombre réduit d'observations (n=12), il n'est pas possible d'effectuer d'analyse statistique sur le facteur 'type de sol' (n=4).

La simple observation graphique des résultats ne permet pas non plus de tirer des conclusions ; tout au plus peut-on observer une tendance légèrement supérieure pour le contexte 'argile' et légèrement inférieure pour le contexte 'limon sableux léger' (figure 2-31).

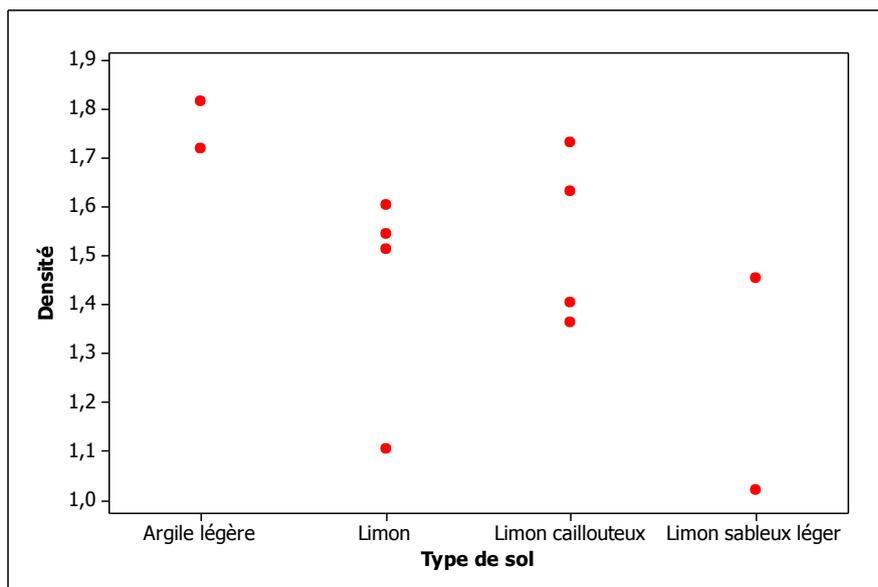


Figure 2-31. Mesures de densité en prairie en fonction du type de sol.

### 3.7.4 Campagne d'échantillonnage sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech

#### 1 Résultats

Le tableau 2-28 illustre les mesures de densité réalisées sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech. On observe que les moyennes des observations réalisées à l'aide d'un anneau (1.41, 1.55 et 1.58) sont légèrement supérieures (de 3 à 5%) aux valeurs légales (1.35, 1.50 et 1.50) pour les couches respectives (0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm)

Les moyennes des observations réalisées à l'aide de la gouge sont supérieures à celles observées à l'aide de l'anneau. Il convient de rappeler que seulement deux observations par couches ont été réalisées.

Tableau 2-28. Synthèse des mesures de densité sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech.

#### Results for Couche = 0-30

Variable	Site/méthode	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1
Densité	Gbx/anneau	21	0	1,4139	0,0226	0,1037	1,2158	1,3497
	Gbx/gouge	2	0	1,6631	*	*	1,6287	*

Variable	Site/méthode	Median	Q3	Maximum
Densité	Gbx/anneau	1,3945	1,4727	1,6287
	Gbx/gouge	1,6631	*	1,6976

#### Results for Couche = 30-60

Variable	Site/méthode	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1
Densité	Gbx/anneau	12	0	1,5519	0,0142	0,0493	1,4788	1,5204
	Gbx/gouge	2	0	1,6925	*	*	1,6321	*

Variable	Site/méthode	Median	Q3	Maximum
Densité	Gbx/anneau	1,5357	1,5862	1,6426
	Gbx/gouge	1,6925	*	1,7530

## Results for Couche = 60-90

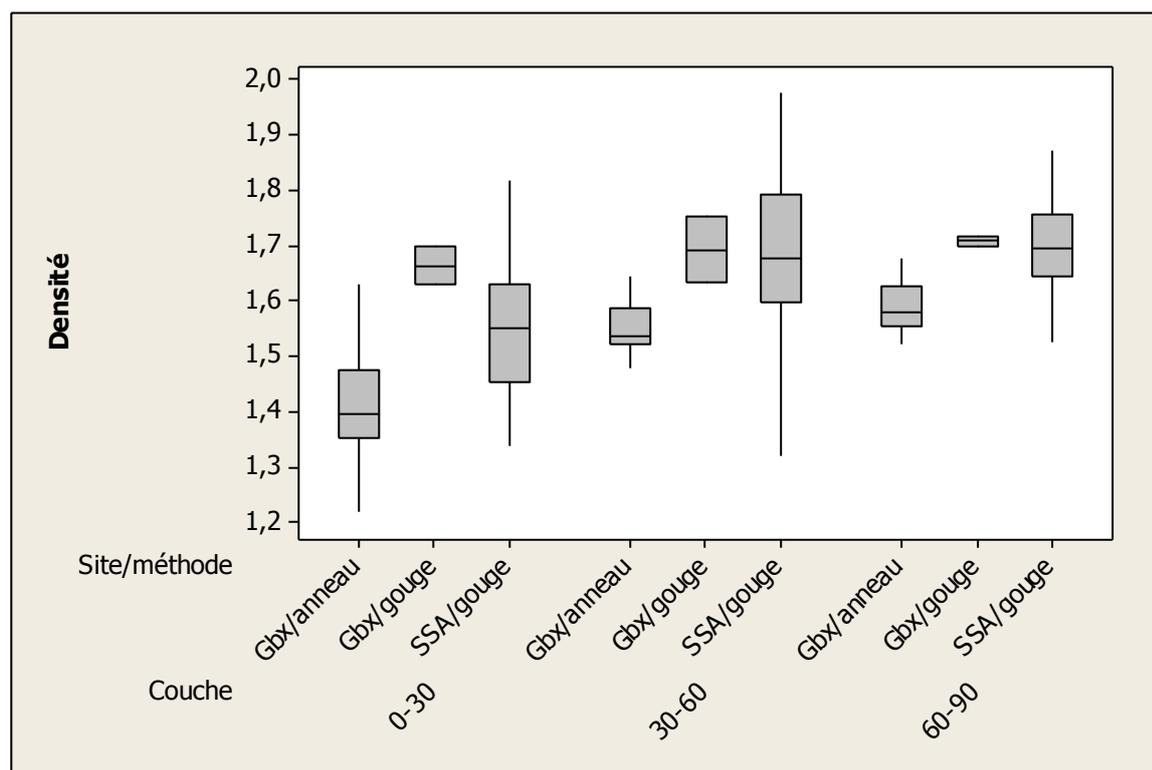
Variable	Site/méthode	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1
Densité	Gbx/anneau	12	0	1,5795	0,0188	0,0652	1,4282	1,5550
	Gbx/gouge	2	0	1,7084	*	*	1,6987	*
Variable	Site/méthode	Median	Q3	Maximum				
Densité	Gbx/anneau	1,5800	1,6273	1,6758				
	Gbx/gouge	1,7084	*	1,7181				

Les ratios de densité moyenne par couche et méthode d'échantillonnage sont respectivement pour les couches 0-30, 30-60 et 60-90 cm de 0.85, 0.92 et 0.92.

La différence de ratio entre la couche 0-30 et les deux couches sous-jacentes s'expliquent certainement par le fait que les mesures avec anneau ont été réalisées en avril 2011 alors que celles à l'aide de la gouge ont été réalisées le 12 octobre 2011.

De plus, la comparaison des mesures réalisées à l'aide d'une gouge sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech et dans le Survey Surfaces Agricoles (figure 2-32) indique que les valeurs observées dans la couche 0-30 cm sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech sont supérieures à celles observées dans le Survey Surfaces Agricoles.

Dès lors, les observations réalisées à l'aide de la gouge dans la couche 0-30 cm sur le site de Gembloux ne seront pas utilisées dans la suite de la réflexion.



**Figure 2-32. Box plot des mesures de densité sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech (Gbx) et dans le Survey Surfaces Agricoles (SSA).**

En comparant (figure 2-32) les observations réalisées avec une gouge et avec un anneau, on observe que l'échantillonnage à l'aide de la gouge conduit à surestimer la densité mesurée de manière conventionnelle à l'aide d'un anneau.

Par ailleurs, la comparaison des valeurs observées à l'aide d'une gouge aux valeurs légales indique (tableau 2-29) que le ratio est régulier (quel que soit l'occupation du sol et la couche considérée) et du

même ordre de grandeur que celui observé entre les deux méthodes d'échantillonnages (entre 0,85 et 0,92).

**Tableau 2-29. Comparaison des valeurs 'légalés' et des moyennes de densité observées à l'aide d'une gouge.**

Occupation	Couche (cm)	Valeur légale (t.m <sup>-3</sup> )	Moyenne observée (t.m <sup>-3</sup> )	Ratio
Prairie	0-30	1.30	1.49	0.87
Culture	0-30	1.35	1.55	0.87
	30-60	1.50	1.68	0.89
	60-90	1.50	1.71	0.88

### 3.7.5 Conclusions

Afin d'apprécier les valeurs légales de densité apparente utilisées pour l'expression du reliquat azoté à l'échelle d'une superficie (ha) et d'une couche de sol, deux campagnes d'échantillonnage ont été menées, l'une dans 48 parcelles du Survey Surfaces Agricoles, l'autre dans une parcelle de Gembloux Agro-Bio Tech.

Les résultats des quelques deux cents échantillons de sol analysés indiquent :

- l'estimation de la densité apparente à l'aide d'une gouge tend à surestimer d'environ 12% une mesure réalisée de manière conventionnelle à l'aide d'un anneau ;
- tenant compte de ce facteur, il apparaît que les valeurs légales proposées pour chaque couche de sol et type d'occupation sont globalement conformes aux observations réalisées par la méthode de l'anneau;
- pour les parcelles cultivées, l'intervalle de confiance des moyennes (par couche) observées est de l'ordre de 2 à 2.5%. Ce qui signifie que pour un reliquat azoté de 40 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>, l'erreur possible liée à la valeur de densité apparente utilisée n'excède pas 1 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>. Cette valeur est très inférieure à la tolérance (au minimum 15 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>) ajoutée dans le calcul du seuil de non-conformité pour un APL de référence (§ 1.5.1 Etablissement des références - page 37) ;
- pour les prairies, l'intervalle de confiance de la moyenne observée est de l'ordre de 10%. Ce qui signifie que pour un reliquat azoté de l'ordre de 20 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup> (voir figure 2-35, page 107), l'erreur n'excède pas 2 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>. Cette valeur est également très inférieure à la tolérance (23.6 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>) ajoutée dans le calcul du seuil de non-conformité pour un APL de référence,
- avec les réserves liées à un effectif réduit, les facteurs 'période d'échantillonnage' et 'type de sol' n'ont pas d'impact significatif sur la densité apparente.

Dès lors, l'absence de mesure de la densité apparente lors de chaque prise d'échantillon de sol en vue de la détermination du reliquat azoté n'ajoute en moyenne qu'une faible incertitude au résultat analytique.



## 4 Elaboration des références APL annuelles

### Référence de l'article

Vandenberghe, C., Detoffoli, M., Bachelart, F., Imbrecht, O., Lambert, R., and Marcoen, J. M. (2013). *Contrôle de l'azote potentiellement lessivable dans le sol en début de période de lixiviation. Etablissement des valeurs de référence. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 17, 231-236.

### 4.1 Introduction

L'actuel Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA), troisième Programme d'action au sens de la Directive Nitrates (91/676/CEE), prévoit un contrôle du reliquat azoté ( $\text{kg N-NO}_3\cdot\text{ha}^{-1}$ ) dans le sol en début de période de lixiviation (Azote potentiellement Lessivable - APL). Ce contrôle a été mis en place dès 2002 suite aux travaux réalisés par Lambert et al (2002) dans une vingtaine d'exploitations agricoles situées au-dessus de l'aquifère des sables du Bruxellien (projet Prop'eau Sable). Le programme d'action en vigueur à cette époque autorisait un apport maximum d'engrais de ferme à concurrence de  $80 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  sur les parcelles cultivées. Les agriculteurs désireux de valoriser des quantités supérieures (jusqu'à  $120 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) devaient demander une dérogation et, entre autres, autoriser le prélèvement d'échantillons de sol dans trois parcelles choisies au hasard en vue de vérifier la bonne gestion de l'azote. Les résultats de ces analyses étaient comparés à des valeurs de référence pour un panel de cultures établies chaque année (pour pouvoir tenir compte des conditions météorologiques) (Vandenberghe et Marcoen, 2004 ; Vandenberghe et al, 2006). Ces valeurs de référence étaient construites sur base d'observations réalisées dans le « Survey Surfaces Agricoles », réseau qui comptait à cette époque une vingtaine d'exploitations agricoles encadrées par les équipes universitaires de Gembloux Agro-Bio Tech et de l'Université catholique de Louvain (Vandenberghe et al, 2005). Dans ces exploitations, une dizaine de parcelles faisaient l'objet de conseils et d'un suivi de la fertilisation azotée. A trois reprises en automne, des échantillons de sol y étaient prélevés en vue d'un dosage de l'azote nitrique. Ainsi, chaque année, quelque 200 parcelles participaient à l'élaboration des valeurs de référence APL.

En cas de mauvais résultats répétés, l'agriculteur en dérogation se voyait retirer, au terme de quatre années, la possibilité de valoriser ces quantités supérieures d'engrais de ferme.

Compte tenu de la performance de l'outil APL, l'utilisation de celui-ci a été étendue dès 2007 à toute la zone vulnérable<sup>7</sup>. Depuis lors, chaque année, entre 3 et 5% des exploitations agricoles situées en zone vulnérable font l'objet d'un contrôle APL (Vandenberghe et al, 2011). Si, dans une exploitation agricole, le contrôle est positif, celle-ci entre dans un programme d'observation au cours duquel, des échantillons de sol seront prélevés chaque année, aux frais de l'exploitant, jusqu'à ce qu'elle ait eu deux années successives de contrôle négatif. Cependant, au cours de ce programme d'observation, si l'exploitation présente trois années de contrôle positif, elle se verra infliger une amende. Vandenberghe et al (2012) ont pu démontrer de manière théorique et sur base d'observations pluriannuelles que la méthodologie de ce contrôle présente un bon compromis entre la probabilité de sanctionner un vrai positif (gestion de l'azote déficiente sur une part importante des parcelles de l'exploitation) et de ne pas sanctionner un faux positif (gestion de l'azote déficiente sur une part très faible des parcelles de l'exploitation).

<sup>7</sup> Au sens de la Directive Nitrates (91/676 CEE), il s'agit du territoire dans lequel la concentration en nitrate mesurée dans les eaux souterraines est supérieure à  $50\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  ou présente une tendance nette à l'augmentation

## 4.2 **Matériel et méthode**

### 4.2.1 **Le Survey Surfaces Agricoles en 2011**

Le réseau d'exploitations agricoles de référence, appelé « Survey Surfaces Agricoles », compte 34 unités situées pour la plus grande partie en zone vulnérable. Quelque 250 parcelles ont été suivies au cours de l'année 2011. Les parcelles cultivées (210) ont fait l'objet d'un conseil de fertilisation (établi à l'aide de la méthode du bilan) au printemps et d'une mesure de reliquat azoté dans le sol (échantillon composite constitué de 15 carottes de sol, en trois couches de 30 cm, jusqu'à 90 cm) à deux reprises (dernière décade d'octobre et première décade de décembre). Les prairies font l'objet d'une mesure de reliquat azoté (échantillon composite constitué de 30 carottes de sol prélevées dans la couche 0-30 cm) à deux reprises (fin octobre et début décembre).

### 4.2.2 **Etablissement des références**

Les cultures sont réparties en sept classes selon l'itinéraire cultural (tableau 2-30). Les prairies (pâturées, fauchées et mixtes) sont regroupées dans une huitième classe.

**Tableau 2-30. Classes de cultures et prairie.**

Classe	Itinéraires culturaux
A1	Betterave (sucrière et fourragère)
A2	Céréales avec CIPAN*
A3	Céréales sans CIPAN, chicorée
A4	Maïs
A5	Pomme de terre
A6	Colza
A7	Légumes
A8	Prairies

\* Culture Intermédiaire Piège A Nitrate

Les mesures de reliquat azoté ont été réalisées par des laboratoires agréés pour ce type d'analyse<sup>8</sup>.

Après avoir éliminé les éventuels résultats aberrants (Test de Grubbs) et pratiques agricoles non conformes, trois niveaux d'interprétation sont calculés pour chaque classe :

- la médiane
- le centile 75
- le seuil d'intervention

Ce dernier est établi en ajoutant, au centile 75, 20 % de la valeur de la médiane.

Lorsque le résultat d'une parcelle contrôlée figure :

- sous la médiane : il est qualifié de « bon »,

<sup>8</sup> Arrêté du Gouvernement wallon fixant les conditions d'agrément des laboratoires chargés des analyses de sol pour y quantifier l'azote potentiellement lessivable (APL) dans le cadre de la mise en œuvre de l'article R.220 du livre II du Code de l'Environnement constituant le Code de l'Eau en ce qui concerne la gestion durable de l'azote en agriculture, tel que modifié le 15 février 2007, et dans le cadre de la mise en œuvre de l'arrêté du Gouvernement wallon du 14 février 2008 relatif au suivi par des mesures de l'azote potentiellement lessivable (APL) de la conformité des exploitations agricoles situées en zone vulnérable aux bonnes pratiques agricoles nécessaires à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles (M.B. 28.03.2008)

- entre la médiane et le centile 75 : il est qualifié de « satisfaisant »,
- entre le centile 75 et le seuil d'intervention : il est qualifié de « limite » ; l'agriculteur bénéficie d'une tolérance liée à l'imprécision de la mesure. Son attention doit être attirée.
- au-delà du seuil d'intervention : il est qualifié de mauvais.

Le nombre minimum de parcelles nécessaires à l'établissement des APL (10 pour les classes A1 et A2, 20 pour les classes A3 à A7, 30 pour la classe A8) est atteint pour la totalité des classes.

En moyenne, les observations ont été réalisées dans le Survey Surfaces Agricoles les 23 octobre et 3 décembre 2011. Etant donné que la période d'échantillonnage pour le contrôle débute le 15 octobre et se termine le 20 décembre, les références ont donc dû être extrapolées avant le 23 octobre et après le 3 décembre.

Pour la médiane, l'extrapolation est réalisée de manière linéaire sur base des observations réalisées en novembre et décembre. Pour éviter des médianes nulles ou négatives, une valeur plancher de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> a été fixée au 20 décembre en tenant compte d'observations réalisées en janvier (Vancutsem et al, 2012), ces observations montrent, en effet, peu de reliquats azotés inférieurs à cette valeur plancher.

Pour le centile 75, l'extrapolation est également réalisée de manière linéaire sur base des observations effectuées en novembre et décembre.

Pour la tolérance qui permet de fixer le seuil d'intervention (ou de non-conformité), il apparaît que lorsque la médiane est faible, la tolérance (20 % de la médiane) est excessivement faible et ne rend dès lors plus compte de l'incertitude liée à la mesure. Dès lors, une tolérance plancher de 15 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> a été fixée pour tenir compte d'une incertitude minimum<sup>9</sup>.

## **4.3 Résultats**

### **4.3.1 L'exemple de la betterave**

En 2011, les observations réalisées (tableau 2-31 et figure 2-33) montrent que :

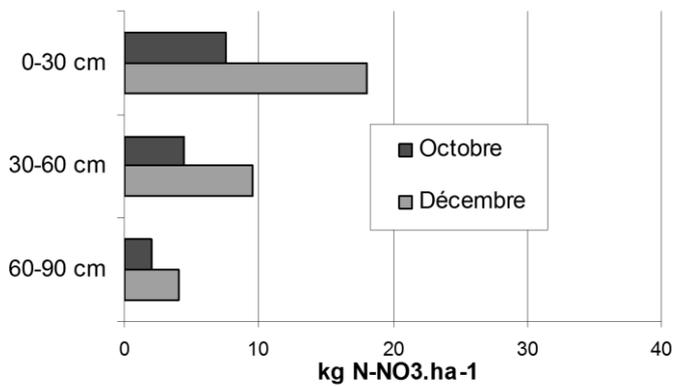
- la variabilité est assez faible (écart type de l'ordre du tiers de la moyenne), ce qui se traduit également par un centile 75 proche de la médiane ;
- le reliquat azoté est principalement localisé en surface tant en octobre qu'en décembre ;
- grâce à des températures particulièrement clémentes pour la saison (en moyenne 8°C en novembre, soit 3°C de plus que la normale), la minéralisation de la matière organique a enrichi la première couche du sol (0-30 cm) en azote nitrique entre les deux périodes d'échantillonnage ;
- la très faible pluviosité entre les deux périodes d'échantillonnage (de l'ordre de 10 à 15 mm ; soit deux à trois fois moins que la normale) n'a pas provoqué de modification de la forme du profil de concentration en azote nitrique (figure 2-33), tout au plus observe-t-on un léger enrichissement de la couche 30-90 cm causé par la lixiviation de l'azote nitrique produit à partir de la minéralisation de la matière organique dans la couche 0-30 cm, au cours de cette période.

---

<sup>9</sup> Arrêté ministériel du 2 février 2009 adaptant l'arrêté ministériel du 18 février 2008 portant certaines dispositions d'exécution relatives aux techniques de mesure de l'azote potentiellement lessivable et au « Survey surfaces agricoles » en application du chapitre IV de la partie réglementaire du Code de l'Eau

**Tableau 2-31. Synthèse des mesures d'azote potentiellement lessivable (APL - kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles de betterave du Survey Surfaces Agricoles.**

	Octobre	Décembre
Effectif	24	24
Min	7	16
Max	33	55
Médiane	15	33
Moyenne	16	33
Ecart-type	6	12
Centile 75	19	41
Seuil d'intervention	34	56



**Figure 2-33. Profil moyen du reliquat azoté dans le sol des parcelles de betteraves.**

A une exception près, toutes ces parcelles ont fait l'objet d'un semis de froment après la récolte des betteraves.

La figure 2-34 illustre les trois niveaux qui permettent la qualification d'un résultat de contrôle en 2011 pour la betterave.

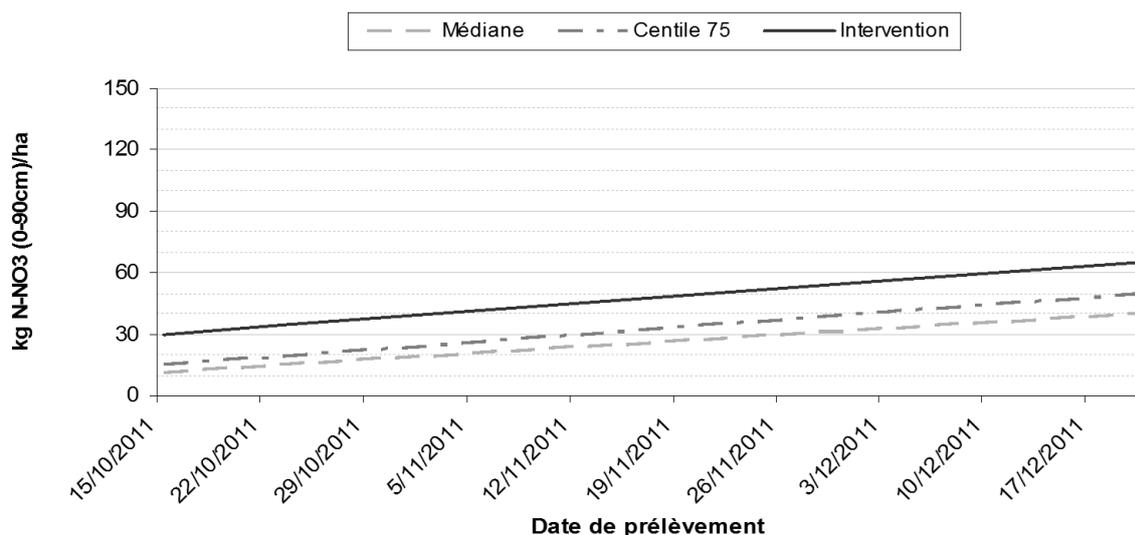


Figure 2-34. APL de référence pour la classe de culture betterave (A1) en 2011.

### 4.3.2 Synthèse des huit classes en 2011

Sur le même principe que la betterave, les sept autres classes d'occupation du sol ont fait l'objet d'un suivi du reliquat azoté dans le Survey Surfaces Agricoles. Les classes des prairies, betteraves et céréales avec CIPAN présentent les médianes les plus faibles tandis que les classes des pommes de terre, du colza et du maïs présentent les valeurs les plus élevées (figure 2-35).

La classe des céréales sans CIPAN montre la plus forte évolution (diminution) du reliquat azoté entre les deux périodes d'échantillonnage. Cette classe est majoritairement composée de parcelles de céréales suivies d'une culture d'hiver (céréale ou colza), culture qui a déjà prélevé de l'azote début décembre. A noter également que tout comme pour la classe de betterave, la forme du profil de concentration en azote nitrique ne s'est pas modifiée au cours de cette période.

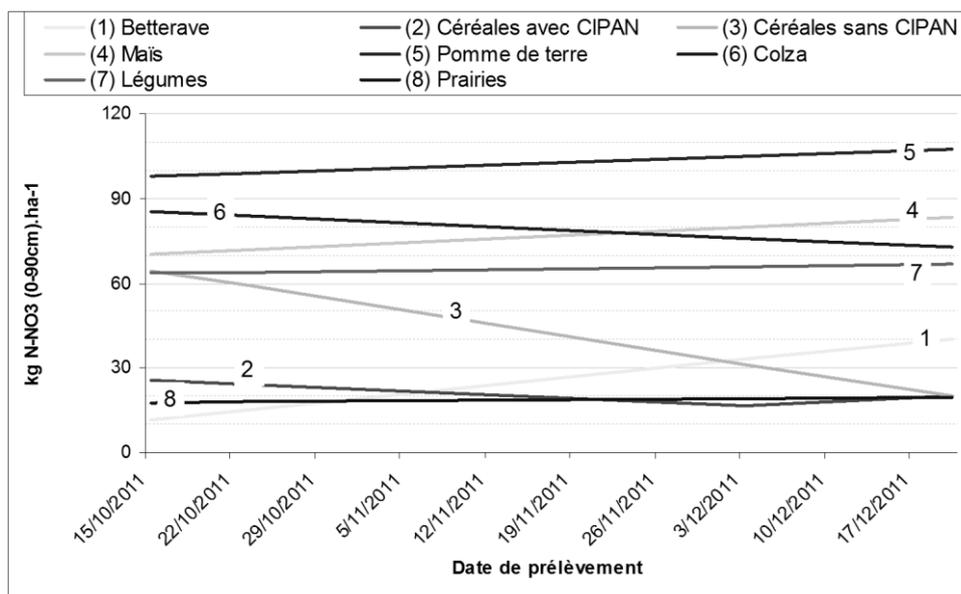


Figure 2-35. Médianes des huit classes de cultures/prairies (échantillonnage 0-90cm pour les cultures et 0-30 cm pour les prairies).

Les valeurs de référence ont calculées conformément à la procédure explicitée au § 2.2, et ont été publiées dans le Moniteur belge<sup>10</sup>.

La figure 4 illustre les différences entre cultures (par exemple de l'ordre de 80 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> entre la betterave et la pomme de terre), ce qui confirme la nécessité d'établir des références par culture plutôt qu'une valeur unique.

### 4.3.3 Evolution interannuelle

Depuis 2002, les référence APL sont définies sur base d'observations réalisées chaque année pour tenir compte des conditions météorologiques qui ont un impact tant sur le rendement de la culture (prélèvement d'azote) que sur la minéralisation de l'azote dans le sol. L'exemple de la classe du maïs (figure 2-36) illustre bien l'influence de ces conditions, les principaux paramètres d'influence (structure des exploitations agricoles du Survey Surfaces Agricoles, méthodologie du conseil de fertilisation) n'ayant pas significativement évolué au cours de la période 2007-2011.

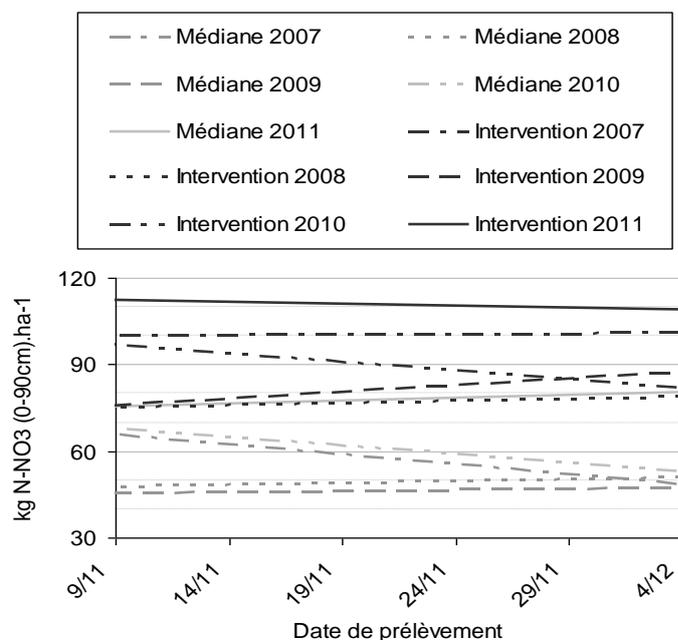


Figure 2-36. Evolution de la référence APL pour le maïs entre 2007 et 2011.

Une fixation annuelle des références contribue donc à rendre le contrôle de la gestion de l'azote plus efficace car une référence basée sur une moyenne interannuelle par culture pourrait conduire à sanctionner des agriculteurs injustement mais pourrait aussi ne pas sanctionner des agriculteurs qui devraient l'être.

<sup>10</sup> Arrêté ministériel établissant les valeurs de référence des mesures d'azote potentiellement lessivable pour l'année 2011 (M.B. 23.03.2012)

#### 4.4 **Conclusion**

Le contrôle APL s'inscrit, pour l'agriculteur, dans une obligation de résultats plutôt que dans une obligation de moyen (réalisation d'un plan de fertilisation, ...) dont la mise en œuvre est plus difficilement contrôlable.

Les observations réalisées en 2011 ainsi que précédemment illustrent le fait que chaque culture a son niveau d'APL propre. Celui-ci dépend entre autres :

- de l'enracinement de la culture (les légumes et pommes de terre ont un enracinement plus superficiel et sont donc incapables de valoriser l'azote nitrique situé dans la couche 60-90 cm échantillonnée lors du contrôle),
- de la date de récolte (une culture récoltée tardivement assimile l'azote produit par la minéralisation de l'humus du sol en automne)
- de la gestion du sol après la récolte (apport d'engrais de ferme, mise en place d'une CIPAN) et
- des conditions météorologiques de l'année.

L'établissement de références par classe de culture a donc tout son sens pour pouvoir évaluer (et au besoin sanctionner) la gestion de l'azote pratiquée par les agriculteurs contrôlés.

Les observations réalisées depuis 2002 ont permis de cibler les situations (culture/fertilisation) qui engendrent des niveaux de reliquat azoté relativement élevés dans le sol. Ces situations sont susceptibles d'avoir un impact négatif sur la qualité de l'eau qui percole au cours de la période de drainage hivernale (Fonder et al, 2010) ; il faut toutefois relativiser ce risque en fonction de l'importance de la surface occupée par la culture à l'échelle de la masse d'eau susceptible d'être atteinte.

L'expérience 'APL' mise en œuvre en région wallonne depuis 2002 est originale en Europe ; d'autres régions ont des systèmes moins élaborés (Flandre, Bade-Wurtemberg) ou commencent à s'en inspirer (Bretagne, Nord Pas-de-Calais).

Cette étude reçoit l'appui financier du Service Public de Wallonie (DGO3).

#### 4.5 **Bibliographie**

Fonder N., Deneufbourg M., Vandenberghe C., Xanthoulis D., Marcoen J.M., 2010. Suivi de la percolation du nitrate en terres cultivées par la technique lysimétrique *In* : Vandenberghe C., Marcoen J.M. *Atelier Nitrate-Eau. Evaluation du Programme de Gestion Durable de l'Azote*. 2-5 juin 2009. Peyresq, France. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **14(S1)**, 17-25.

<http://www.pressesagro.be/base/text/v14ns1/17.pdf>

Lambert R., Van Bol V., Maljean J-F., Peeters A., 2002. Projet Pilote pour la protection des eaux de la nappe des sables bruxelliens. Rapport final d'activités. Louvain. Belgique : Université catholique de Louvain, 107 p.

Vancutsem F., Seutin B., Destain J-P., Roisin C., Monfort B., Vandenberghe C., Marcoen J.M., Escarnot E., Lambert R., De Toffoli M., Bodson B. 2012 La Fumure azotée. *In* : Destain J\_P., Bodson B. *Le Livre Blanc. Céréales – Gembloux*. Edition Février 2012. 58 p.

<http://hdl.handle.net/2268/119687>

Vandenberghe Ch., Marcoen J.M., 2004. Transposition de la Directive Nitrates (CE) en région wallonne. : azote potentiellement lessivable de référence pour les sols cultivés en région wallonne. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **8**, 111-118, <http://www.pressesagro.be/base/text/v8n2/111.pdf>

Vandenberghe C., Bontemps P.Y., Lambert R., Peeters A., Marcoen J.M. , 2005. Implementation of the Nitrate Directive in Belgium : the Agricultural Surface Survey. *In* : Schröder J.J., Neeteson J.J., *N management in agrosystems in relation to the Water Framework Directive (14<sup>th</sup> N Workshop)*, Wageningen, the Netherlands, 332-334. <http://hdl.handle.net/2268/63420>

Vandenberghe C., Bontemps P.Y., Marcoen J.M., 2006. Le programme de gestion durable de l'azote en Région wallonne (premier programme d'action, période 2002-2006). *In* : Cellule Etat de l'Environnement wallon (2007). *Rapport analytique sur l'Etat de l'Environnement wallon 2006-2007*. 736 pp. <http://hdl.handle.net/2268/34942>

Vandenberghe C., Marcoen J.M., Sohier C., Degre A., Hendrickx C., Paulus P., 2011. Monitoring networks and modelling systems for assessing effectiveness of the EU Nitrates Directive Action Programmes: Approach by the Walloon Region (Belgium). *In*: National Institute for Public Health and the Environment. *Developments in monitoring the effectiveness of the EU Nitrates Directive Action Programmes*. Results of the second International Workshop, 10-11 june 2009. Wageningen. the Netherlands. 119-140. <http://hdl.handle.net/2268/17141>

Vandenberghe Ch., Palm R., Lambert R., Detoffoli M. & Marcoen J.M., 2012. Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture. Considérations pratiques et conceptuelles sur la méthodologie du contrôle public du reliquat d'azote nitrique dans le sol des exploitations agricoles wallonnes. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **16**, 25-32, <http://www.pressesagro.be/base/text/v16n1/25.pdf>, (31.08.12).

## **5 Evaluation de la méthodologie de contrôle APL**

### *Référence de l'article*

Vandenbergh, C., Palm, R., Lambert, R., Detoffoli, M., and Marcoen, J. M. (2012). *Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture. Considérations pratiques et conceptuelles sur la méthodologie du contrôle public du reliquat d'azote nitrique dans le sol d'exploitations agricoles wallonnes. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* **16**, 25-32.

### **5.1 Introduction**

La Directive Nitrate (91/676) a été transposée en Wallonie sous la forme d'un Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA). Ce Programme (Anonyme, 2011) impose aux agriculteurs une utilisation raisonnée de l'azote (engrais minéraux et engrais d'origine organique) en vue de prévenir une augmentation de la concentration en nitrate dans les eaux. Afin de vérifier le respect de cette règle, des contrôles sont effectués chaque année, dans 3% des exploitations agricoles, par le Service Public de Wallonie (Direction Générale de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement – DGARNE).

Dans trois parcelles des exploitations sélectionnées par la DGARNE, des échantillons de sols sont prélevés, entre le 15 octobre et le 30 novembre, en vue d'évaluer le reliquat en azote nitrique (APL<sup>11</sup>). Les résultats des analyses sont comparés aux valeurs de référence (APL de référence) établies chaque année par Gembloux Agro-Bio Tech et l'Université catholique de Louvain, membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal ([www.nitrawal.be](http://www.nitrawal.be)). Ces APL de référence sont établis (Vandenbergh et al., 2009) grâce aux observations réalisées dans le Survey Surfaces Agricoles constitué de quelques 250 parcelles réparties dans une trentaine d'exploitations agricoles dites de référence (Vandenbergh and Marcoen, 2004). Si l'APL mesuré dans une parcelle est supérieur à l'APL de référence, la parcelle est dite 'non conforme'. Si le contrôle décèle deux ou trois parcelles non conformes sur les trois parcelles observées dans l'exploitation, l'agriculteur est déclaré positif et entre dans un programme pluriannuel d'observation qui conduit, en fonction des résultats obtenus aux cours des années successives, soit à la sortie du programme sans amende, soit à une amende. En effet, durant ce programme, trois parcelles différentes sont sélectionnées annuellement et le nombre de parcelles non conformes est déterminé. Si ce nombre est supérieur à l'unité, l'agriculteur est déclaré positif pour l'année en question. Si par contre aucune ou bien une seule parcelle est non conforme, l'agriculteur est déclaré négatif. La sortie sans amende du programme d'observation est conditionnée à l'occurrence de deux années successives de contrôle négatif. L'amende est infligée après trois années, non nécessairement consécutives, de contrôle positif. L'objectif de cette étude est d'évaluer le risque qu'a un agriculteur d'être sanctionné en fonction de la proportion de parcelles non conformes présentes dans son exploitation et ainsi d'apprécier la performance du contrôle réalisé par le SPW. Cette évaluation se fera, d'une part en utilisant les observations réalisées dans 23 exploitations agricoles au cours de trois années successives et, d'autre part, de manière plus théorique mais en utilisant une hypothèse simplificatrice.

### **5.2 Matériel et méthode**

#### **5.2.1 Scénarios possibles**

Nous avons signalé, dans l'introduction, que pour une année donnée le contrôle est positif (+) si, sur les trois parcelles observées, deux ou trois parcelles sont non conformes et il est négatif (-) si au maximum une parcelle est non conforme.

Le tableau 2-32 reprend les 16 scénarios possibles, ainsi que les décisions associées et la durée moyenne du programme d'observation. Le scénario numéroté 0 correspond à un contrôle initial négatif

<sup>11</sup> Azote Potentiellement Lessivable

et les 15 autres scénarios à un contrôle initial positif suivi du programme d'observation pluriannuel de durée variable et conduisant soit à une sanction, soit à une sortie du programme d'observation.

**Tableau 2-32. Scénarios possibles.**

Numéro du scénario	Contrôle initial	Programme d'observation	Décision	Durée du programme d'observation
0	–		sans objet	
1	+	+++	sanction	3
2	+	++-+	sanction	4
3	+	+- -	sortie	4
4	+	+ - + +	sanction	4
5	+	+ - + - +	sanction	5
6	+	+ - + - -	sortie	5
7	+	+ - -	sortie	3
8	+	- + + +	sanction	4
9	+	- + + - +	sanction	5
10	+	- + + - -	sortie	5
11	+	- + - + +	sanction	5
12	+	- + - + - +	sanction	6
13	+	- + - + - -	sortie	6
14	+	- + - -	sortie	4
15	+	- -	sortie	2

### 5.2.2 Approche « SSA »

#### 1 Données

La première approche pour évaluer la performance du contrôle repose sur des observations réalisées dans 23 exploitations du Survey Surfaces Agricoles (SSA), exploitations encadrées en matière de gestion de l'azote, par ULg Gembloux Agro-Bio Tech et l'Université catholique de Louvain (Vandenbergh and Marcoen, 2004) et pour lesquelles on dispose de suffisamment de données.

A partir de six séries d'observations (deux dates d'observation au cours de trois ans), on a créé artificiellement deux jeux de données en considérant les observations faites à une date donnée au cours de trois années. Pour un de ces jeux de données, la chronologie retenue est cependant différente de la chronologie réelle, afin de prendre en compte la variabilité interannuelle. Ainsi, le premier jeu de données contenait les résultats des analyses effectuées en novembre de la première année, en décembre de la deuxième année et en octobre de la troisième année. Le second jeu de données contenait les résultats d'analyses effectuées en décembre de la troisième année, en novembre de la deuxième année et en décembre de la première année.

## 2 Calcul des probabilités

Dans la mesure où on ne dispose que de trois années d'observation, nous nous intéressons uniquement aux probabilités suivantes :

- probabilité d'avoir un contrôle initial négatif (scénario 0),
- probabilité d'avoir un contrôle initial positif, suivi de deux contrôles négatifs conduisant à la sortie du programme d'observation (scénario 15),
- probabilité d'avoir un premier contrôle positif suivi de deux contrôles dont au moins un est positif, conduisant à la poursuite du programme d'observation au-delà de deux ans (scénarios 1 à 14).

Pour un jeu de données et pour un agriculteur, on a dénombré les proportions  $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$  de parcelles non conformes pour les trois années. La probabilité d'un contrôle négatif au cours de l'année  $i$  ( $i = 1, \dots, 3$ ) si on prélève trois parcelles au hasard est obtenue par la distribution binomiale de paramètres  $n = 3$  et  $p = p_i$ . En désignant par  $X_i$  le nombre de parcelles non conformes pour l'année  $i$ , cette probabilité s'écrit :

$$\begin{aligned} P(X_i \leq 1) &= P(X_i = 0) + P(X_i = 1) \\ &= (1 - p_i)^3 + 3p_i(1 - p_i)^2 \end{aligned}$$

et la probabilité d'un contrôle positif est le complément à l'unité de la probabilité d'un contrôle négatif. Il en résulte que la probabilité relative au scénario 0 est égale à :

$$P0 = P(-) = (1 - p_1)^3 + 3p_1(1 - p_1)^2$$

Pour le scénario 15, on a :

$$P15 = P(+ --) = P(X_1 > 1)P(X_2 \leq 1)P(X_3 \leq 1)$$

$$\text{avec } P(X_1 > 1) = 1 - P0$$

$$P(X_2 \leq 1) = (1 - p_2)^3 + 3p_2(1 - p_2)^2$$

$$\text{et } P(X_3 \leq 1) = (1 - p_3)^3 + 3p_3(1 - p_3)^2$$

Enfin, la probabilité relative à l'ensemble des scénarios 1 à 14 est égale au complément à l'unité de la somme des probabilités relatives aux scénarios 0 et 15.

### 5.2.3 Approche théorique

#### 1 Hypothèse de départ

Dans la seconde approche, les probabilités relatives à chacun des 16 scénarios repris dans le tableau 1 sont établies de façon théorique, en considérant que la proportion des parcelles non conformes est constante au cours des années. On suppose donc implicitement que l'agriculteur ne modifierait pas ses pratiques au cours du programme d'observation. En soi, cette hypothèse conduit à un biais car il est vraisemblable qu'un agriculteur inscrit dans un programme d'observation devienne plus attentif à une bonne gestion de l'azote dans son exploitation afin d'éviter une sanction. Cependant, en ce début de procédure de contrôle officiel, à défaut d'observations représentatives sur l'évolution des pratiques d'un agriculteur inscrit dans un programme d'observation, ce biais ne peut être évité.

## 2 Probabilités relatives aux scénarios

En désignant par  $p$  la proportion de parcelles non conformes dans une exploitation, la probabilité d'avoir, au cours d'une année donnée  $i$ , un contrôle négatif s'obtient à partir de la loi binomiale de paramètres  $n = 3$  et  $p$  :

$$P(X_i \leq 1) = (1-p)^3 + 3p(1-p)^2 = P(-)$$

La probabilité d'avoir un contrôle positif est le complément à l'unité de la probabilité du contrôle négatif :

$$P(X_i > 1) = 1 - P(-) = P(+)$$

Il en résulte que la probabilité relative à un scénario caractérisé par  $j$  signes - et  $k$  signes + est égal à :

$$P = P(-)^j P(+)^k$$

## 3 Probabilités relatives à la décision

Soit  $P_0, \dots, P_{15}$  les probabilités relatives à chacun des scénarios. Ces scénarios étant exclusifs, la probabilité relative à un ensemble donné de scénarios est égale à la somme des probabilités des scénarios de cet ensemble.

La probabilité d'un contrôle initial négatif (et donc aussi de ne pas entrer dans la période d'observation) est égale à  $P_0$ .

La probabilité globale de sortie du programme d'observation sans sanction est égale à :

$$P(\text{Sortie}) : P_3 + P_6 + P_7 + P_{10} + P_{13} + P_{14} + P_{15}$$

et la probabilité de sanction est égale à :

$$P(\text{sanction}) = P_1 + P_2 + P_4 + P_5 + P_8 + P_9 + P_{11} + P_{12}$$

## 4 Durée moyenne de la période d'observation

Pour un agriculteur entrant dans la période d'observation, la durée d'observation dépend du scénario (voir tableau 2-32) et la durée moyenne s'écrit :

$$\text{Durée moyenne} : \frac{3P_1 + 4P_2 + 4P_3 + \dots + 2P_{15}}{P_1 + P_2 + \dots + P_{15}}$$

## 5.3 Résultats

### 5.3.1 Approche « SSA »

La figure 2-37 donne, pour chaque exploitation agricole (identifiable par sa proportion moyenne pour l'ensemble des deux jeux de données), la proportion de parcelles non conformes pour les deux jeux de données aux trois dates. Sur cette figure, une exploitation est donc représentée par un maximum de six points correspondant à une même abscisse. Toutefois, si plusieurs proportions sont identiques, le nombre de points est inférieur à six. On peut constater que ces proportions sont assez fluctuantes d'une date à l'autre et d'une exploitation agricole à l'autre. Ceci illustre la variabilité des performances entre exploitations et l'existence d'un effet « année ».

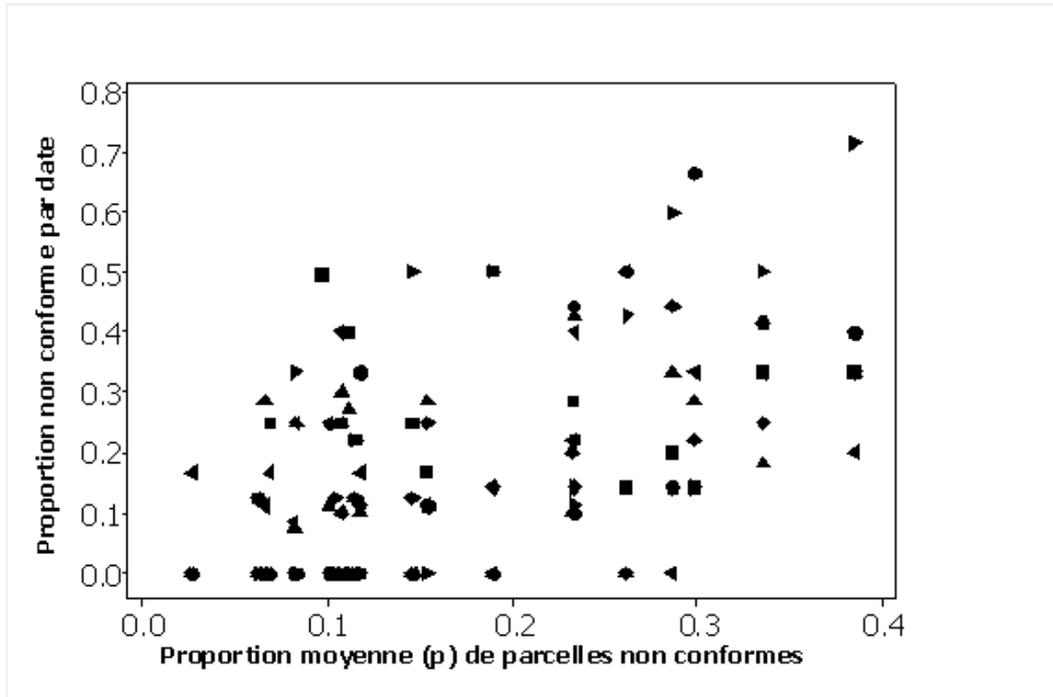


Figure 2-37. Proportions de parcelles non conformes aux différentes dates, en fonction de la proportion moyenne ( $p$ ) de parcelles non conformes de chaque exploitation agricole.

Les figures 2-38, figure 2-39 et figure 2-40 donnent respectivement les probabilités d'avoir un contrôle initial négatif, les probabilités d'avoir un contrôle initial positif suivi de deux contrôles négatifs et les probabilités de ne pas être sorti du programme d'observation à l'issue des deux premières années d'observation.

Comme attendu, la probabilité d'un premier contrôle négatif diminue avec la proportion moyenne de parcelles non conformes, mais, pour un agriculteur donné elle peut varier de manière importante selon le jeu de données, du fait des proportions de parcelles non conformes très différentes lors du contrôle initial (figure 2-38).

Les probabilités de sortie (figure 2-39) tout comme les probabilités de non sortie du programme pluriannuel sont évidemment dans l'ensemble plus faibles lorsque la proportion moyenne de parcelles non conformes est faible, puisque dans ce cas, la probabilité d'un contrôle initial positif est faible. On note aussi (figure 2-40) que la probabilité de ne pas être sorti de la période d'observation ne dépasse 10 % que dans 7 cas sur les 46 cas considérés (deux jeux de données relatives à 23 agriculteurs). Ces cas concernent des agriculteurs ayant, en moyenne, plus de 20 % de parcelles non conformes.

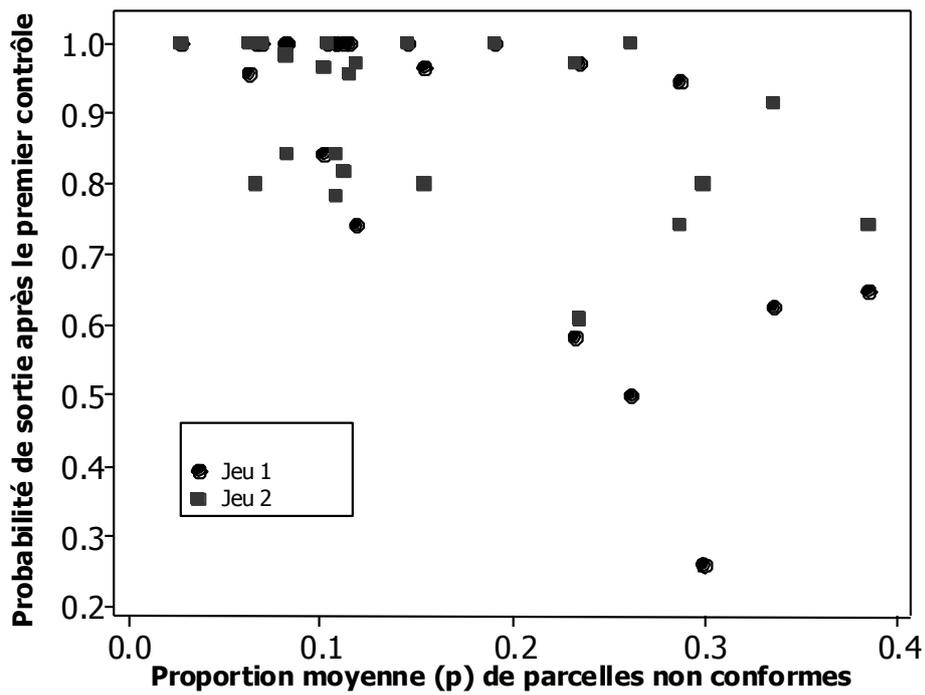


Figure 2-38. Probabilité d'un contrôle initial négatif, en fonction de la proportion moyenne (p) de parcelles non conformes de chaque exploitation agricole.

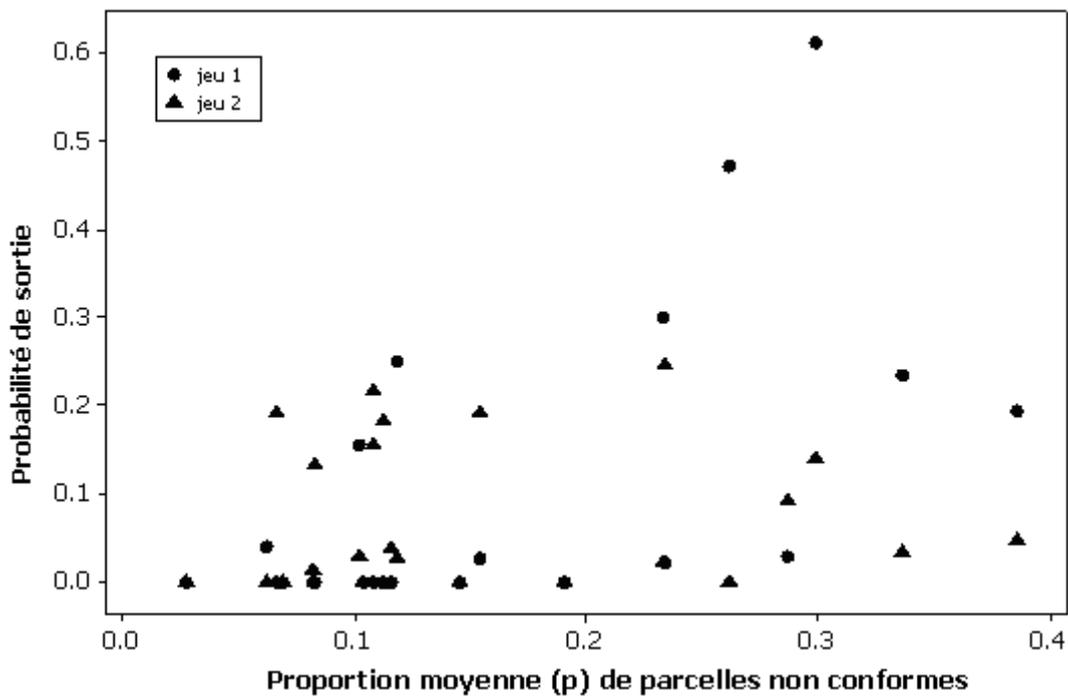


Figure 2-39. Probabilité de sortie du programme d'observation après les deux années, en fonction de la proportion moyenne (p) de parcelles non conformes dans chaque exploitation agricole.

### 5.3.2 Approche théorique

Le tableau 2-33 donne, pour différentes proportions de parcelles non conformes, la probabilité d'un contrôle initial négatif, la probabilité de sortie du contrôle, la probabilité de sanction et la durée moyenne de la période d'observation. L'évolution de ces caractéristiques en fonction de  $p$  est illustrée dans les figure 2-41 et figure 2-42.

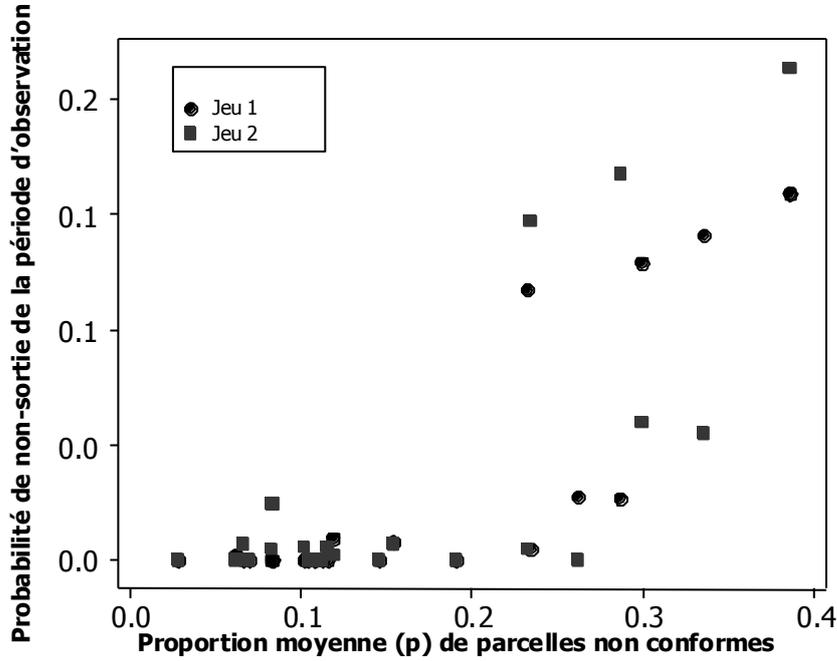


Figure 2-40. Probabilité de non-sortie du programme d'observation après les deux années en fonction de la proportion moyenne de parcelles non conformes.

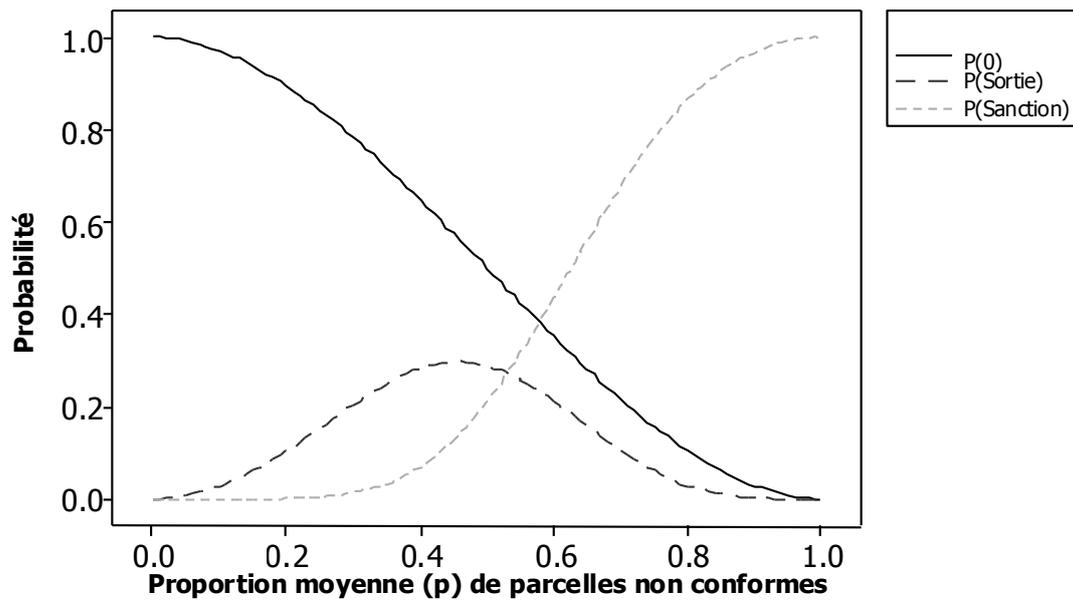


Figure 2-41. Probabilité d'un contrôle initial négatif  $P(0)$ , probabilité de sortie du programme d'observation  $P(\text{sortie})$  et probabilité de sanction  $P(\text{sanction})$  en fonction de la proportion  $p$  de parcelles non conformes.

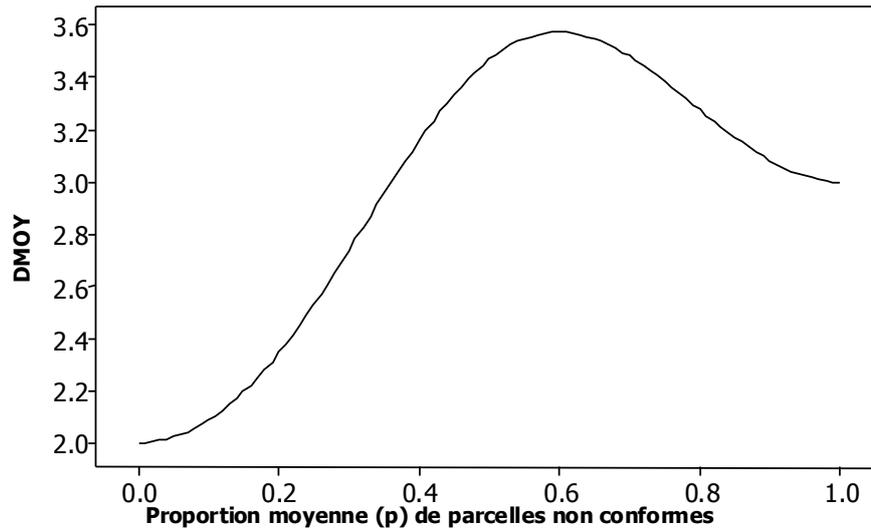


Figure 2-42. Durée moyenne (années) du programme d'observation  $D_{moy}$  en fonction de la proportion  $p$  de parcelles non conformes.

Tableau 2-33. Probabilité d'un contrôle initial négatif  $P_0$ , probabilité de sortie du contrôle  $P(\text{sortie})$ , probabilité de sanction  $P(\text{sanction})$  et durée moyenne (année) du contrôle  $D_{moy}$ , en fonction de la proportion  $p$  de parcelles non conformes.

$p$	$P_0$	$P(\text{sortie})$	$P(\text{sanction})$	$D_{moy}$
0,00	1,00	0,00	0,00	0,0
0,05	0,99	0,01	0,00	2,0
0,10	0,97	0,03	0,00	2,1
0,15	0,94	0,06	0,00	2,2
0,20	0,90	0,10	0,00	2,3
0,25	0,84	0,15	0,00	2,5
0,30	0,78	0,20	0,01	2,7
0,35	0,72	0,25	0,03	3,0
0,40	0,65	0,28	0,07	3,2
0,45	0,57	0,30	0,13	3,3
0,50	0,50	0,29	0,21	3,5
0,55	0,42	0,26	0,32	3,5
0,60	0,35	0,21	0,44	3,6
0,65	0,28	0,16	0,56	3,5
0,70	0,22	0,10	0,68	3,5
0,75	0,16	0,06	0,78	3,4
0,80	0,10	0,03	0,87	3,3
0,85	0,06	0,01	0,93	3,2
0,90	0,03	0,00	0,97	3,1
0,95	0,01	0,00	0,99	3,0
1,00	0,00	0,00	1,00	3,0

## 5.4 **Discussion**

### 5.4.1 **Approche « SSA »**

L'analyse réalisée à partir des données disponibles dans le Survey Surfaces Agricoles (SSA) permet de tirer plusieurs enseignements.

On observe que d'une année à l'autre, la probabilité d'un contrôle initial négatif ou positif varie fortement. L'approche normalisée (contrôle initial suivi d'un programme d'observation en cas de contrôle positif) est donc pertinente afin ne pas sanctionner un « faux positif »<sup>12</sup>. Par contre, un « faux négatif »<sup>13</sup> pourrait plus facilement échapper aux sanctions puisqu'une seule bonne année suffit pour ne pas entrer dans le programme d'observation.

Pour les agriculteurs qui pratiquent une fertilisation raisonnée (cas des agriculteurs du SSA), six fois sur 10, la probabilité d'un premier contrôle négatif est supérieure à 90%. La probabilité d'avoir un premier contrôle positif et de ne pas sortir du programme d'observation au bout de 2 ans n'est supérieure à 10 % que dans un cas sur six.

Il apparaît donc que la probabilité qu'un agriculteur pratiquant une fertilisation raisonnée subisse une amende est très faible.

Les données actuellement disponibles dans le SSA n'ont pas permis de faire de simulation sur plus de trois années. Cependant, le fait de disposer de six années aurait vraisemblablement confirmé, en moyenne, ce qui est montré avec l'approche théorique ; avec la réserve suivante : dans l'approche théorique, on a considéré que la proportion de parcelles non conformes était stable dans le temps. Dans l'approche SSA, on travaille avec du « réel », il serait donc probable que la proportion de parcelles non conformes diminue dans le temps si le premier contrôle est positif.

### 5.4.2 **Approche théorique**

L'approche théorique, développée pour une période de six ans (durée maximale du programme d'observation), livre les enseignements suivants :

- l'agriculteur qui a un quart (ou moins) de ses parcelles non conformes n'est pratiquement jamais sanctionné (probabilité inférieure à 1 %) ;
- l'agriculteur qui a la moitié de ses parcelles non conformes a une probabilité de 20 % d'être sanctionné ;
- l'agriculteur n'est sanctionné avec une probabilité supérieure à 90 %, que si plus de huit parcelles sur dix sont non conformes.

Il apparaît donc que la probabilité de sanctionner un agriculteur 'satisfaisant' est très faible. A cet égard, le système est bon. Par contre, la probabilité de ne pas sanctionner un agriculteur 'insatisfaisant' est trop élevée. A cet égard, le système est perfectible.

Pour augmenter la probabilité de sanctionner un agriculteur 'insatisfaisant', une solution serait d'abaisser le seuil de conformité des APL de référence. Actuellement, ce seuil de conformité est établi sur base du centile 75 des observations réalisées dans le Survey Surfaces Agricoles (Anonyme, 2008). L'abaissement du seuil de conformité pourrait se réaliser en se référant à un centile plus petit. Cette modification entraînerait une augmentation de la proportion de parcelles non conformes.

Il est à noter que ce faisant, la proportion des parcelles non conformes sera également augmentée pour les 'bons' agriculteurs. Ainsi, à l'extrême, si le seuil de non-conformité est établi à partir de la

---

<sup>12</sup> Exploitation agricole avec une proportion élevée de parcelles conformes et dans laquelle, la sélection aléatoire n'a pas été favorable à l'agriculteur (= contrôle positif).

<sup>13</sup> Exploitation agricole avec une proportion élevée de parcelles non conformes et dans laquelle, la sélection aléatoire a néanmoins été favorable à l'agriculteur (= contrôle négatif).

médiane (centile 50) des observations APL du SSA, un agriculteur du SSA (c'est-à-dire encadré et pratiquant une fertilisation raisonnée) aurait en moyenne une chance sur cinq d'être sanctionné ; ce qui serait inique. Il convient donc, préalablement à un abaissement du seuil de conformité, de fixer des objectifs en termes de probabilités de sanctionner un « vrai positif » et de ne pas sanctionner un « faux positif ».

Une autre approche pourrait être d'augmenter le nombre de parcelles contrôlées avec la même tolérance (une parcelle non conforme admise). Dans ce cas, la probabilité d'un contrôle négatif pour l'exploitation diminue avec le nombre de parcelles contrôlées comme le montre la figure 7, établie pour 2, 3 et 5 parcelles contrôlées. Ainsi, pour cinq parcelles contrôlées au lieu de trois, si 80 % des parcelles de l'exploitation sont non conformes, la probabilité d'un contrôle négatif passe de 10 % à 1 % ; la probabilité de déceler un « vrai positif » augmente donc. Par contre, si l'exploitation compte 20 % de parcelles non conformes, la probabilité d'un contrôle négatif passe de 90 % à 74 % ; la probabilité d'inscrire dans un programme d'observation un « faux positif » augmente également.

De plus, augmenter le nombre de parcelles contrôlées va également augmenter, dans le même ratio, le coût pour l'administration qui finance ce contrôle (en 2010,, de l'ordre de 60.000 €.an<sup>-1</sup> ou 0,15 €.ha<sup>-1</sup>). A l'inverse, diminuer le nombre de parcelles échantillonnées rendrait le contrôle inefficace. Ainsi, si 50 % des parcelles de l'exploitation sont non conformes, la probabilité d'un contrôle négatif est encore de 75 % si on ne prélève que deux parcelles.

Il apparaît donc que le système en vigueur est globalement cohérent en fonction des moyens disponibles (coût du contrôle).

On pourrait également essayer d'optimiser le contrôle, en définissant non seulement le nombre de parcelles observées mais également le nombre de parcelles non conformes autorisées pour déclarer un contrôle négatif. Pour cela, il faudrait cependant préciser davantage les attentes en matière de performance dans une exploitation. Concrètement, il faudrait définir une première proportion  $p_0$  de parcelles non conformes pour laquelle on souhaiterait une probabilité élevée, par exemple 0,90, d'avoir un premier contrôle négatif et une deuxième proportion  $p_1$  pour laquelle on souhaiterait une probabilité faible, par exemple 0,10, d'avoir un premier contrôle négatif. Disposant de ces deux proportions, des techniques particulières utilisées en contrôle de qualité permettent de définir la taille de l'échantillon et le nombre maximum de parcelles non conformes conduisant au contrôle négatif, pour autant du moins qu'un tel couple de valeurs existe (Schilling and Neubauer, 2009). Cela revient en fait à définir un plan d'échantillonnage dont la courbe donnant l'évolution de la probabilité d'un contrôle initial négatif en fonction de la proportion de parcelles non conformes passe par deux points fixés.

Si on souhaite des probabilités d'un contrôle initial négatif de 0,90 et 0,10 pour des proportions  $p_0 = 0,2$  et  $p_1 = 0,8$ , la figure 2-43 montre que la procédure actuellement en vigueur (observation de 3 parcelles et contrôle négatif si le nombre de parcelles non conformes est inférieur ou égal à l'unité) est la procédure qui répond à cette contrainte.

## 5.5 Conclusion

Vu les considérations pratiques et conceptuelles sur la méthodologie du contrôle public ici développées, il apparaît que le système actuel offre un acceptable rapport coût/efficacité. Pour l'améliorer, il faudrait nécessairement définir une proportion tolérable de parcelles non conformes dans une exploitation (choix politique) et vraisemblablement augmenter les moyens financiers (plus de parcelles contrôlées).

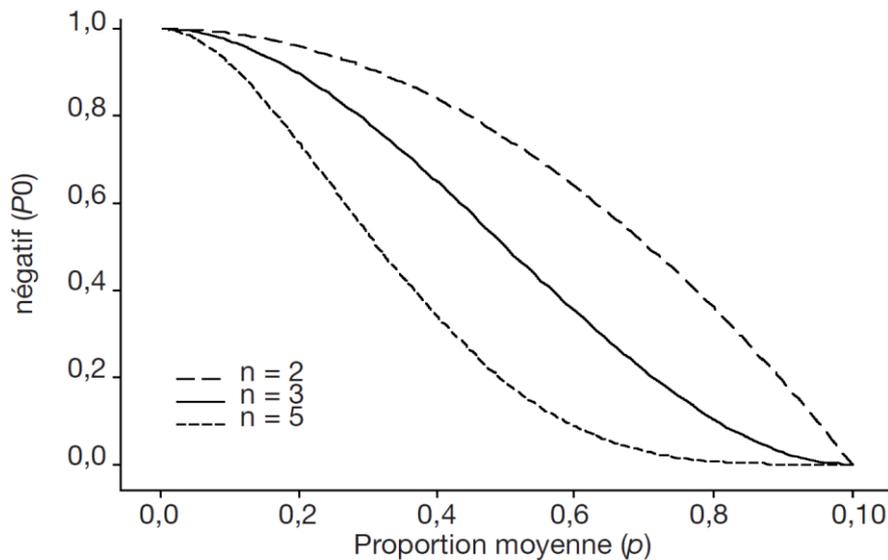


Figure 2-43. Probabilité d'un contrôle initial négatif ( $P_0$ ) en fonction de la proportion de parcelles non conformes ( $p$ ) et du nombre ( $n$ ) de parcelles contrôlées.

## 5.6 Bibliographie

Moniteur belge, 2007. Arrêté du Gouvernement wallon modifiant le Livre II du Code de l'Environnement constituant le Code de l'Eau en ce qui concerne la gestion durable de l'azote en agriculture. *Monit. Belg.*, 07.03.07.

Moniteur belge, 2008. Arrêté du Gouvernement wallon relatif au suivi, par des mesures de l'azote potentiellement lessivable (APL), de la conformité des exploitations agricoles situées en zone vulnérable aux bonnes pratiques agricoles nécessaires à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. *Monit. Belg.*, 28.03.08.

Schilling E. & Neubauer D., 2009. Acceptance sampling in Quality Control. London: CRC Press.

Vandenbergh C. & Marcoen J.M., 2004. Transposition de la Directive Nitrates (CE) en Région wallonne : azote potentiellement lessivable de référence pour les sols cultivés en Région wallonne. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **8**, 111-118, <http://www.pressesagro.be/base/text/v8n2/111.pdf>, (06.12.11).

Vandenbergh C. et al., 2009. Monitoring networks and modelling systems for assessing effectiveness of the EU Nitrates Directive Action Programmes: Approach by the Walloon Region (Belgium). In: Fraters B. et al., eds. *Developments in monitoring the effectiveness of the EU Nitrates Directive Action Programmes. Results of the second MonNO3 Workshop*, 10-11 June 2009, <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/680717019.pdf>, (06.12.11)



## **Chapitre 3 L'APL, indicateur agronomique et environnemental**

### **1 L'APL, indicateur agronomique de gestion de l'azote**

---

#### **1.1 Introduction**

L'évaluation de l'APL en tant qu'indicateur agronomique est réalisée sur une plateforme expérimentale destinée à étudier la réponse (rendement) d'une culture à une fertilisation croissante. Traditionnellement, dans ce type d'expérimentation, des objets (dose d'azote) sont volontairement placés au-delà de l'optimum attendu de rendement pour d'une part, valider l'optimum et, d'autre part, illustrer l'inutilité (voire l'impact négatif sur le rendement) d'un apport azoté excessif.

L'objectif additionnel de cette expérimentation est d'observer si les enseignements tirés à l'analyse des mesures réalisées lors de la récolte (rendement, reliquat azoté dans le sol) sont semblables à ceux qui peuvent être faits en examinant les résultats APL.

Le choix de la culture (colza) vise à se mettre volontairement dans les conditions les moins confortables pour la démonstration :

- il s'agit d'une culture très consommatrice d'azote (Rathke et al., 2006) ;
- la récolte est effectuée quatre mois avant la mesure de l'APL ;
- étant traditionnellement suivi d'un froment d'hiver (Leteinturier et al., 2007), il n'y a pas de culture intermédiaire piège à nitrate susceptible de 'lisser' un excès de fertilisation.

En 2007, dans l'objectif de tester, dans le contexte wallon, un outil de conseil de fertilisation azotée pour le colza développé en France par Terresinovia (anciennement CETIOM), une plateforme expérimentale a été installée par l'Association pour la Promotion des Protéagineux et Oléagineux (APPO, <http://www.gembloux.ulg.ac.be/pt/appo/>) en collaboration avec GRENeRA.

Cet outil, appelé « réglette azote colza », connaissait à cette époque 9 versions différentes, en fonction de 9 subdivisions du territoire français.

Deux réglottes semblent plus particulièrement adaptées au contexte wallon :

- La réglette « Régions Nord-Est » pour le sud du sillon Sambre et Meuse ;
- La réglette « Régions Champagne Nord-Picardie » pour le nord du sillon Sambre et Meuse.

#### **1.2 Matériel et Méthode**

##### **1.2.1 Contexte climatique**

L'événement climatique majeur observé pour la campagne culturale 2007 aura été sans conteste la sécheresse (figure 3-1) et les températures exceptionnelles (figure 3-2) observées au mois d'avril. On notera également des mois d'automne et d'hiver extrêmement cléments en 2006-2007, permettant au colza de particulièrement bien se développer durant les premiers mois.

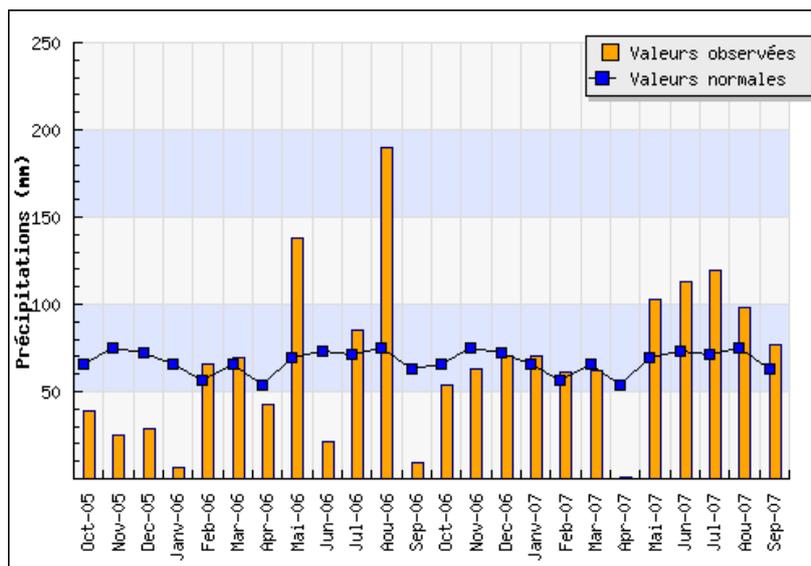


Figure 3-1. Précipitations mensuelles, comparaison par rapport aux valeurs normales (période 1950-1989) (Source : CRA-W, 2007).

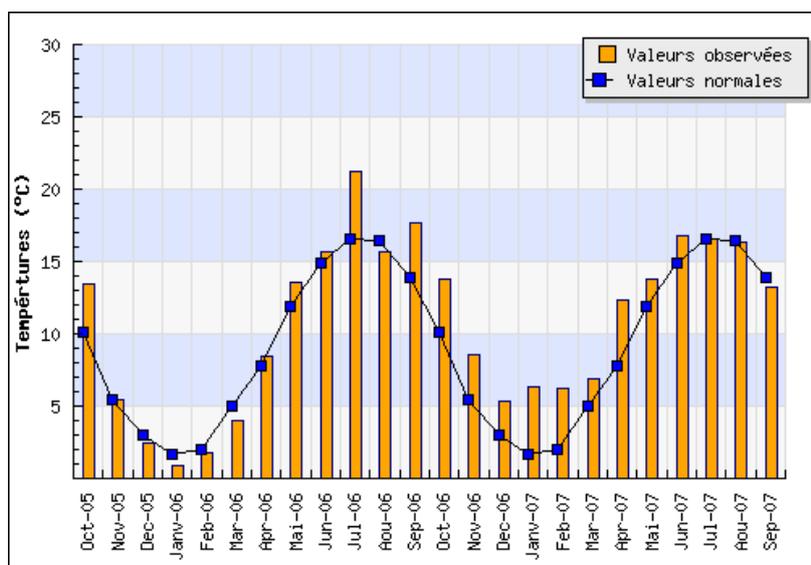


Figure 3-2. Températures moyennes mensuelles, comparaison par rapport aux valeurs normales (période 1950-1989) (Source : CRA-W, 2007(b)).

### 1.2.2 La réglette azote colza

Le conseil fourni par la réglette azote colza se présente comme illustré à la figure 3-3.

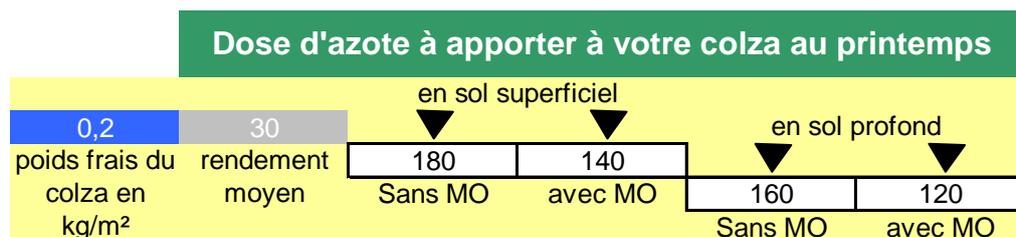


Figure 3-3. Exemple de conseil fourni par la réglette azote colza.

Deux paramètres sont à rentrer dans la réglette :

- ✓ Le poids frais de colza, exprimé en kg/m<sup>2</sup> : 2 placettes d'une surface de 1 m<sup>2</sup> sont délimitées dans le champ. Toutes les plantes situées dans les placettes sont alors coupées au niveau du sol. La masse végétale ainsi récoltée est pesée afin de déterminer le poids de colza par m<sup>2</sup>. Cette mesure est réalisée en janvier – février mais peut être avancée en cas de risque de gel (et de perte de feuilles subséquente).
- ✓ Le rendement moyen : il s'agit du rendement moyen attendu au vu du potentiel habituel de la parcelle ;

Dans le cas de la réglette « Champagne, Nord-Picardie », il existe 32 associations de ces 2 paramètres, allant de 0,2 kg/m<sup>2</sup> de poids frais de colza pour un objectif de 3000 kg.ha<sup>-1</sup> à 2,4 kg/m<sup>2</sup> de poids frais de colza associé à un objectif de plus de 4000 kg.ha<sup>-1</sup>.

En faisant coulisser la réglette jusqu'à sélection de l'association voulue (dans la figure 3-3) : 0,2 kg.m<sup>-2</sup> et 3000 kg.ha<sup>-1</sup>), 4 niveaux de fumures sont déterminés, en fonction de 2 variables :

- ✓ Le type de sol à prendre en considération (profond ou superficiel) ;
- ✓ La fréquence des apports organiques (supérieure ou inférieure à 1 fois/3 ans).

Le choix final de la fumure à appliquer se fera en fonction de la combinaison adéquate de ces 2 variables.

Le modèle utilisé pour le calcul de la fertilisation se formule comme suit :

$$E = (6,5 \times \text{rendement moyen}) + R_f - N_h - R_h - M$$

Où E : dose d'engrais à apporter

R<sub>f</sub> : azote minéral restant dans le sol après récolte du colza

N<sub>h</sub> : azote absorbé par les plantes en sortie d'hiver

R<sub>h</sub> : reliquats sortie hiver

M : minéralisation nette de printemps.

Les paramètres retenus sont repris au tableau 3-1.

**Tableau 3-1. Paramètres retenus pour la réglette azote colza des régions Champagne, Nord-Picardie.**

	R <sub>f</sub>	R <sub>h</sub>	M
Sols superficiels	30 kg N/ha	10 kg N/ha	20 kg N/ha
Sols profonds	40 kg N/ha	30 kg N/ha	40 kg N/ha

Coefficient pour passer du poids frais à N<sub>h</sub> : 70, ce qui se traduit par 70 x poids de colza (kg/m<sup>2</sup>) = azote absorbé par la culture en sortie hiver (kg N/ha).

Surplus de minéralisation en cas d'apport régulier de matière organique : 40 unités.

La somme ((6,5 x rendement moyen) + R<sub>f</sub>) est plafonnée à 330 unités.

### 1.2.3 Essai fumure COH2007-04bis

L'essai fumure COH2007-04, implanté par l'APPO, est organisé en blocs aléatoires complets faisant intervenir trois variables : la fumure azotée, la fumure soufrée et l'application d'un régulateur de croissance. L'essai comporte 4 répétitions. Il a été implanté à Gembloux, sur un sol limoneux profond.

La variété semée est *Standing*, un Composite Hybride Ligné (CHL). Cette association variétale qualifie un mélange intégrant des plantes hybrides mâles dépourvues de pollen (on parle de stérilité mâle) avec des plantes pollinisatrices. Comme les pollinisateurs sont deux lignées, l'association est qualifiée de CHL.

Dans le cadre de la collaboration, seuls sept objets sur les quinze que comporte l'essai ont été suivis, variant selon le seul critère de la fumure azotée. Afin de bien faire la distinction avec l'essai complet mené par l'APPO, l'essai restreint sera dénommé ci-après COH2007-04bis. Les fumures minérales testées (exprimées en kg N.ha<sup>-1</sup> ou unités) sont repris dans le tableau 3-2.

**Tableau 3-2. Protocole de fumure de l'essai COH2006-05bis.**

objets	fumure (kg N/ha)
1	0
2	50
3	100
4	150
5	200
6	250
7	300

Le tableau 3-3 reprend l'itinéraire technique de l'essai suivi.

**Tableau 3-3. Itinéraire phytotechnique de l'essai COH2007-04bis.**

Précédent : froment, variété robigus
Date de semis colza : 11/09/2006
Désherbage (en généralisé) : 14/09/06 : Butisan+ + Devrinol
Désherbage anti-graminées (en généralisé) : 22/02/07 : Fusilade
Azote : en 2 fractions, 15 mars et 26 avril 07, apport selon protocole (épandage manuel)
Régulateur de croissance : seul l'objet 9 (fumure de 300 unités) a fait l'objet d'une pulvérisation (1,2 l/ha de Caramba le 15 mars 07)
Fongicide en généralisé : 13/04/07 Ronilan SC (dernière année d'utilisation)
Date de récolte : du 8 au 10 juillet 2007

## 1.2.4 Mesures réalisées

La première mesure réalisée a été celle du poids de végétation, selon le protocole établi par la réglette azote. Cette mesure a permis d'établir la fumure recommandée pour le champ d'essai.

Trois paramètres ont fait l'objet d'un traitement statistique :

- le rendement ;
- le reliquat azoté post-récolte ;
- la mesure de l'Azote Potentiellement Lessivable, réalisée en période automnale.

Le rendement est mesuré par pesée des sacs de graines récoltées dans les sous-parcelles<sup>14</sup> d'essais. Le poids est corrigé pour être amené à une humidité de 9%. Le rendement est ensuite exprimé en kg de graines de colza par hectare.

Le reliquat azoté post-récolte ainsi que l'APL ont fait l'objet de prélèvements étalés chaque fois sur 4 jours, à raison d'une répétition par jour. Les prélèvements ont été effectués les 16, 17, 18 et 23 juillet pour les post-récoltes, les 19, 20, 21 et 26 novembre pour les APL.

À noter que le champ sur lequel se trouvait l'essai colza a été semé en froment début novembre. De ce fait, le passage d'un déchaumeur et d'un combiné herse rotative-semoir ne permettait pas de conserver les limites des sous-parcelles de l'essai. Celles-ci ont donc été retracées une fois les opérations de semis terminées, des repères ayant été placés à l'extérieur de la parcelle.

Dix prélèvements ont été effectués par sous-parcelle, sur 3 couches : de 0 à 30 cm, de 30 à 60 cm et de 60 à 90 cm. Ces dix prélèvements par sous-parcelle ont été mélangés pour constituer un échantillon composite qui a fait l'objet, après tamisage à 8 mm du sol frais, d'une extraction du nitrate au KCl 0,1N. Le nitrate ainsi extrait a ensuite été titré par colorimétrie.

## 1.3 Résultats et discussion

### 1.3.1 Conseil de fumure

Le premier résultat concerne la pesée de végétation faite pour établir la fumure optimale du champ d'essai.

Le tableau 3-4 reprend les résultats des pesées de végétation qui ont été réalisées sur le champ d'essai situé à Gembloux.

**Tableau 3-4. Pesées de végétation du colza, en vue de la détermination d'un conseil de fumure.**

date	pesée 1 (kg)	pesée 2 (kg)	pesée 3 (kg)	pesée 4 (kg)	moyenne (kg)	dimension (m <sup>2</sup> )	kg/m <sup>2</sup> MF
10/11/06	0,382	0,365	0,303	0,419	0,36725	0,3364	1,09
20/2/07	0,44	0,525	0,505		0,49	0,3364	1,46
en moyenne sur la 1ère et dernière pesée :			<b>1,27</b>	kg/m <sup>2</sup> MF			

L'un des premiers constats qui peut être fait est le faible niveau de végétation de l'essai, par rapport aux conditions exceptionnellement clémentes rencontrées lors de la fin d'année 2006. En effet, il n'a pas été rare de mesurer dans certains champs de colza des poids de près de 3 kg de matière fraîche par

<sup>14</sup> Une sous-parcelle correspond à un objet fumure dans une des répétitions. Par exemple, la parcelle 737 de l'essai correspond à la répétition 3 de l'objet 6.

m<sup>2</sup>. A titre indicatif, le colza a déjà, dans ces conditions, produit une quantité de matière fraîche de 30 tonnes par hectare, avant la reprise de végétation.

La fumure proposée par la réglette colza se situe entre 150 et 160 kg N.ha<sup>-1</sup>.

Les informations retenues sont :

- 1,27 kg de matière fraîche par m<sup>2</sup> ;
- rendement moyen attendu de 4000 kg.ha<sup>-1</sup> et plus ;
- en sol profond ;
- sans matière organique ;
- réglette de la région Champagne, Nord-Picardie.

### 1.3.2 Rendements

Les résultats de rendements sont synthétisés à la figure 3-4. La régression, de type logarithmique, montre une excellente corrélation entre le rendement et la fumure azotée, avec un r<sup>2</sup> supérieur à 0,9.

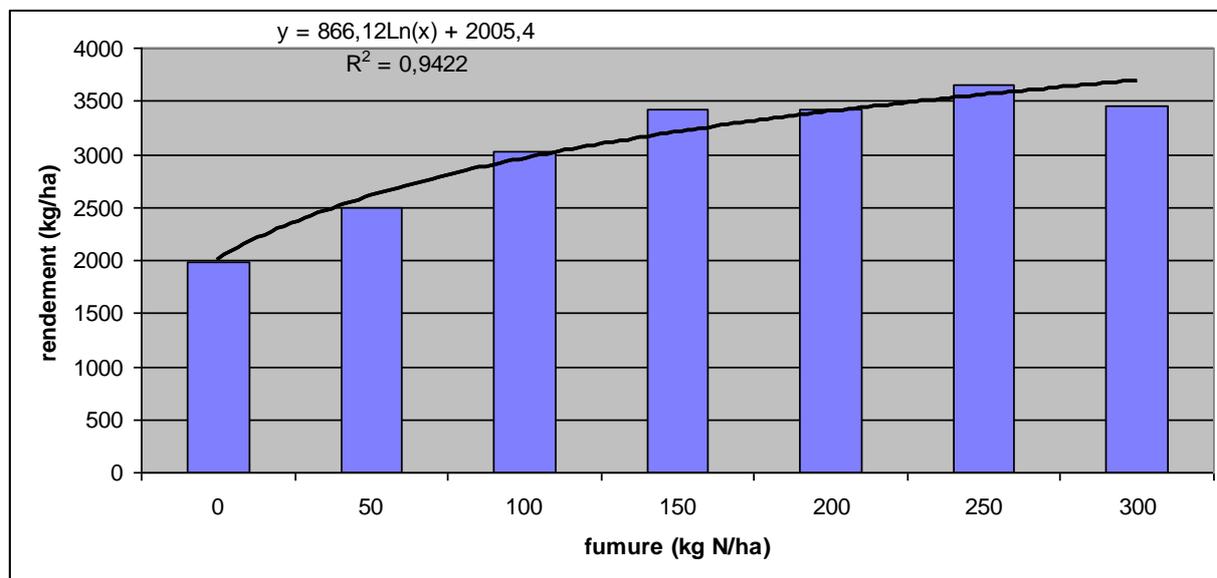


Figure 3-4. Rendement de l'essai COH2007-04bis.

Le tableau 3-5 reprend les paramètres principaux du traitement statistique de l'essai COH2007-04. L'essai a été traité dans son ensemble (les quinze objets que comporte l'essai, et non les seuls sept objets suivis par GRENeRA), afin de diminuer l'impact des données manquantes (quatre données de rendement faisaient défaut sur les 60 que comportent l'essai global).

**Tableau 3-5. Traitement statistique de la variable rendement de l'essai COH2007-04.**

variations	dl	F	0,05	0,01
traitements	14	20,32	S	S
blocs	3	2,80	NS	-
interaction	38			
totaux	55			
PPDS 05	283			
PPDS 01	378			
CV	6,09			

L'effet traitement est hautement significatif (mention S pour un  $\alpha$  de 0,01, avec une valeur du test F de 20,32) ; par contre, il n'y a pas d'effet bloc (mention NS, indiquant que le test F réalisé pour la variable bloc est non significatif). Le coefficient de variation (CV) est conforme à celui observé pour ce type d'essai, avec une valeur de 6,09.

Le dernier enseignement à tirer du tableau est la plus petite différence significative (PPDS). 2 valeurs ont été calculées : la PPDS 05, à savoir la PPDS associée à un risque de première espèce  $\alpha$  de 5%, et la PPDS 01, à savoir la PPDS associée à un risque de première espèce  $\alpha$  de 1%. Deux rendements sont considérés comme significativement différents si leur différence est supérieure à la PPDS, selon l' $\alpha$  concerné.

Le tableau 3-6 présente les résultats des rendements de l'essai, en fonction du niveau de fertilisation. Des regroupements ont été opérés.

**Tableau 3-6. Rendements de l'essai COH2007-04bis.**

fumure	rendement (kg/ha)	groupements
0	1976	a
50	2499	b
100	3018	c
150	3420	d
200	3414	d
250	3647	d
300	3447	d

Globalement, les rendements sont assez faibles, avec une moyenne de 3100 kg.ha<sup>-1</sup>. En comparaison, le niveau moyen de rendement observé en 2005 était de 5000 kg.ha<sup>-1</sup>.

De même, la fumure de 150 kg N.ha<sup>-1</sup> permettait d'obtenir un rendement de 4100 kg.ha<sup>-1</sup> en 2006, alors que le rendement n'est que de 3420 kg.ha<sup>-1</sup> par hectare en 2007, loin des objectifs de rendement fixés au départ (supérieur à 4000 kg.ha<sup>-1</sup>).

Différentes raisons expliquent les faibles rendements mesurés en 2007 :

- La sécheresse du mois d'avril a certainement eu un effet sur la formation du nombre de siliques. Pas une goutte de pluie pendant toute la floraison, situation jamais vue auparavant.
- Ensuite, il y a eu beaucoup d'*oidium*, ce qui est plutôt rare en Belgique. En effet, l'*oidium* affecte plus généralement les rendements dans le Sud de la France.
- Par contre, dans les essais, il n'y a pas eu de problème de *sclerotinia*, alors que dans le champ voisin, il y a eu beaucoup de dégâts.

- Enfin, les pluies et le vent de juin-juillet ont provoqué un égrenage important des plantes de colza à maturité, provoquant des pertes de graines avant récolte.

La plus petite différence significative (PPDS) a été utilisée pour déterminer des groupes de rendements qui ne sont pas significativement différents entre eux. La PPDS utilisée dans le cadre des développements suivants est la PPDS 05, soit un risque de première espèce  $\alpha$  de 5%. Ainsi, en se reportant au tableau 3-6, quatre groupes de rendements peuvent être illustrés (a, b, c et d).

Seul le groupe d comporte plusieurs valeurs de rendements non significativement différentes : de la fumure 150 à 300, les rendements associés peuvent être considérés comme identiques. De ce fait, la fumure de 150 kg N.ha<sup>-1</sup> est la plus basse permettant d'obtenir le rendement maximum.

À ce titre, il est intéressant de constater que le niveau de fumure de 150 kg N.ha<sup>-1</sup> est celui renseigné par la réglette azote colza (voir paragraphe 1.2.3).

### 1.3.3 Reliquats azotés post-récolte

Comme pour le rendement, les regroupements opérés dans le tableau 3-7 se basent sur la plus petite différence significative associée à un risque de première espèce de 5%, PPDS 05, reprise dans le tableau 3-8. La fumure de 150 kg N.ha<sup>-1</sup> est la plus basse permettant d'obtenir le rendement le plus élevé et la plus haute fournissant le reliquat azoté post-récolte le plus bas.

Au niveau des statistiques, l'effet traitement est très hautement significatif (mention S pour un  $\alpha$  de 0,01), mais un effet bloc se marque également (mention S pour un  $\alpha$  de 0,05). Ceci peut s'expliquer par le mode de prélèvement des APL post-récolte qui, comme évoqué au paragraphe 0, s'est étalé sur une semaine.

**Tableau 3-7. Reliquats d'azote nitrique post-récolte de l'essai COH2007-04bis.**

fumure	reliquat post-récolte (kg N/ha)	groupements
0	31	a
50	26	a
100	32	a
150	40	a
200	71	b
250	73	b
300	95	b

**Tableau 3-8. Traitement statistique de la variable reliquat azoté post-récolte de l'essai COH2007-04bis.**

variations	dl	F	0,05	0,01
traitements	6	10,12	S	S
blocs	3	4,30	S	-
interaction	17			
totaux	26			
PPDS 05	25			
PPDS 01	35			
CV	32,11			

### 1.3.4 APL de novembre

Le tableau 3-9 et le tableau 3-10 reprennent respectivement les résultats statistiques de l'essai et les résultats APL mesurés en novembre.

**Tableau 3-9. Traitement statistique de la variable APL de l'essai COH2007-04bis.**

variations	dl	F	0,05	0,01
traitements	6	12,39	S	S
blocs	3	15,75	S	S
interaction	17			
totaux	26			
PPDS 05	18			
PPDS 01	24			
CV	14,01			

**Tableau 3-10. APL de l'essai COH2007-04bis.**

fumure	APL (kg N/ha)	groupements	
0	68	a	
50	72	a	
100	66	a	
150	70	a	
200	93		b
250	105		b c
300	118		c
<b>moyenne</b>	<b>85</b>		

L'effet traitement est hautement significatif (mention S pour un  $\alpha$  de 0,01), mais un effet bloc se marque également, (mention S pour un  $\alpha$  de 0,01). Il apparaissait déjà lors de la mesure des reliquats azotés en post-récolte, il se présente ici avec un niveau de signification encore plus élevé. L'étalement des prélèvements sur une semaine se fait ici clairement ressentir.

Le coefficient de variation est par contre relativement bas. Cela souligne, entre autres, la réussite du retraçage de l'essai après le semis du froment (voir paragraphe 0).

Comme pour les autres paramètres étudiés, des regroupements ont été opérés suivant la méthode de la plus petite différence significative. Il est intéressant de constater que les regroupements opérés pour le reliquat azoté post-récolte se retrouvent pour les APL. La seule petite divergence s'observe pour les 3 fumures les plus élevées : les APL qui leur sont associés se répartissent dans deux groupes qui se chevauchent (tableau 3-10, groupes b et c) et non un (tableau 3-7, groupe b) comme le reliquat post-récolte.

Comme pour le reliquat azoté post-récolte, la fumure de 150 kg N.ha<sup>-1</sup> est la fumure la plus élevée de l'essai qui permet d'avoir un APL non significativement différent de l'APL mesuré sur la parcelle de fumure nulle (associée à un risque de première espèce de 5%).

Dans cet essai, l'APL, qui se mesure en novembre sur une parcelle dont la fertilisation a été raisonnée en suivant les conseils de la réglette azote, est donc de 70 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

## **1.4 Conclusions**

La fumure de 150 kg N.ha<sup>-1</sup> semble clairement assurer, dans le cadre de cet essai, le meilleur couple entre rendement et reliquat azoté : rendement optimum de l'essai et APL minimum. Cette fumure était celle donnée par la réglette azote du CETIOM. Pour information, déjà en 2006, la réglette avait permis d'obtenir le rendement optimal dans un essai similaire.

Par ailleurs, cet essai illustre la performance de l'APL en tant qu'indicateur environnemental : au-delà de la fertilisation conseillée, l'APL est significativement plus élevé que dans un contexte de fertilisation raisonnée.

Des observations similaires ont été enregistrées dans des expérimentations relatives au maïs menées par le Centre Indépendant de Promotion Fourragère (CIPF) et l'UCL (résultats non publiés et disponible à l'url suivant : <http://www.uclouvain.be/461111.html> ).

Outre l'aspect lié à la gestion de la fertilisation, l'APL permet également de mettre en évidence certaines pratiques agricoles perfectibles au sens d'un moindre stock d'azote nitrique dans le sol en début de période de lixiviation. Citons par exemple le semis tardif ou par un moyen inapproprié (compte tenu des conditions météorologiques ou de l'état du sol au moment du semis) des CIPAN ou un travail répété (trois à quatre fois, à une ou deux semaines d'intervalle) du sol après la récolte du colza.

## **2 L'APL, indicateur environnemental à l'échelle de la parcelle**

### Préambule

La représentativité des résultats, eu égard aux conséquences de la rupture de capillarité causée à la base des lysimètres (Muller, 1995; Weilherrmüller et al., 2007), sera abordée dans la discussion du chapitre 5 (conclusions et perspectives).

### Référence de l'article

*Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Heens, B., and Marcoen, J. M. (2012). Suivi de la lixiviation du nitrate en plein champ par la technique lysimétrique : retour de huit années d'expérience. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement 17 (S1), 177-186.*

(<http://hdl.handle.net/2268/147728>)

Remerciements : les auteurs adressent leurs remerciements au Service Public de Wallonie (DGO3) pour le financement de l'étude ainsi qu'aux agriculteurs chez qui se déroule le projet pour leur collaboration.

### **Titre abrégé : Suivi lysimétrique de la lixiviation du nitrate**

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

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

### **2.1 Introduction**

Depuis le milieu des années 1970, la concentration en nitrate dans les eaux souterraines a significativement augmenté en Wallonie (région wallonne de Belgique) (Vandenberghe, 2010). L'évolution de la qualité de l'eau est partiellement liée à l'évolution de l'agriculture (augmentation du

cheptel, augmentation des superficies dévolues au maïs et diminution des superficies de prairie, augmentation de l'utilisation d'azote minéral et organique), les secteurs « industriel » et « domestique » y contribuant également. Compte tenu de l'épaisseur variable du substrat non-saturé surmontant les aquifères wallons ainsi que de l'inertie du système, il convient de tenir compte d'un temps de réponse parfois important entre les actions menées en surface (mise en œuvre d'un programme d'actions par exemple) et leur impact sur la qualité de l'eau dans l'aquifère. Ainsi, pour l'aquifère du Crétacé de Hesbaye, l'impact de l'agriculture sur la qualité de l'eau se marque avec plus d'une décennie de retard (Dautrebande et al., 1996).

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

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

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

- fournir rapidement, par rapport au temps de réponse d'un aquifère, et de manière ciblée au secteur agricole, une assurance quant à la pertinence des normes et des valeurs des APL<sup>15</sup> de référence (Vandenberghé et al., 2013) définies dans le PGDA (Programme de Gestion Durable de l'Azote) pour évaluer la bonne gestion de l'azote ;
- vérifier l'adéquation entre ces valeurs de référence, les conseils de fumure et l'objectif de préservation de la qualité de l'eau ;
- apporter 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 expérimentation portant sur une réduction des niveaux de fertilisation et ses effets en termes de rendement sur la culture, de reliquats azotés du sol et de concentrations en nitrate dans l'eau récoltée est en cours à l'aplomb des lysimètres (Deneufbourg et al., 2010b, Heens et al., 2013). L'implantation de CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate) en interculture courte a également été testée soit dans des parcelles équipées d'un lysimètre soit dans une parcelle située à proximité.

## **2.2 Matériel et méthodes**

### **2.2.1 Description des sites d'études**

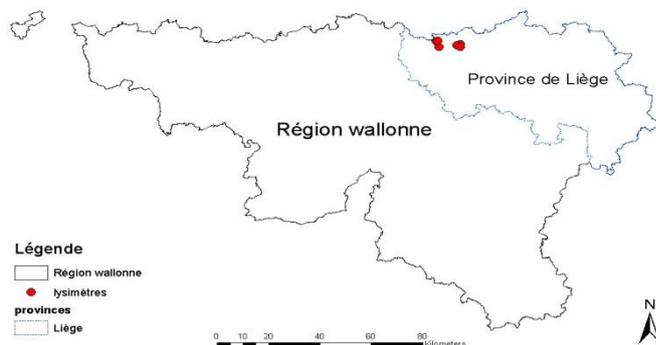
Les lysimètres sont installés dans la région de Hesbaye (Province de Liège, Wallonie – figure 3-5), au sein de trois fermes faisant partie du « Survey Surfaces Agricoles », réseau de 34 exploitations situées sur le territoire wallon et dans lesquelles près de 240 parcelles sont suivies en matière de gestion de l'azote, dans le but d'établir annuellement les valeurs d'APL de référence. Ces parcelles sont également suivies par l'ASBL Centre Provincial Liégeois des Productions Végétales et Maraîchères (CPL Végémar) qui contribue notamment à la gestion du périmètre irrigué utilisant des eaux usées de

---

15

Azote potentiellement lessivable : reliquat azoté mesuré dans le sol à l'automne jusqu'à une profondeur de 90cm.

l'usine de surgélation et de conditionnement de légumes s.a. Hesbaye Frost. Cinq des six lysimètres sont implantés dans des parcelles irrigables soit à l'eau claire, soit à l'eau usée provenant de l'usine.



**Figure 3-5. Localisation des lysimètres en Wallonie.**

Les six lysimètres sont installés sur des sols représentatifs de la région de Hesbaye, classés selon la carte pédologique des sols de Belgique comme limoneux, à développement de profil B textural, dénommés Aba ou Abp selon leur localisation sur un plateau ou sur une pente, avec des développements de profil plus ou moins enfoui et des conditions de drainage variables. 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).

Etant en conditions réelles d'exploitation, les cultures installées au droit des lysimètres sont dépendantes du choix des agriculteurs.

Cinq lysimètres sont installés dans des parcelles intégrant des cultures légumières industrielles en rotation avec les grandes cultures classiques (tableau 3-11) et un lysimètre (P6) est installé dans une parcelle cultivée uniquement de grandes cultures classiques (céréales, betterave, chicorée) avec apports réguliers de matière organique.

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

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

**Tableau 3-11. Itinéraires culturaux dans les parcelles équipées d'un lysimètre.**

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

### 2.2.2 Les lysimètres

Les lysimètres mis en place en Hesbaye sont constitués d'un cylindre en inox de 1m<sup>2</sup> de section pour une hauteur de 1,5m (figure 3-6). La cuve lysimétrique est placée verticalement à 50 cm sous la surface du sol, pour être en conditions réelles d'exploitation et sans gêne pour les pratiques agricoles, en plein champ, à l'extérieur des tournières. Le plancher drainant, situé à 2m de profondeur, évacue par le biais d'un tuyau les eaux récoltées par le lysimètre vers un bidon de récolte placé dans une chambre de visite construite en bordure de champ.

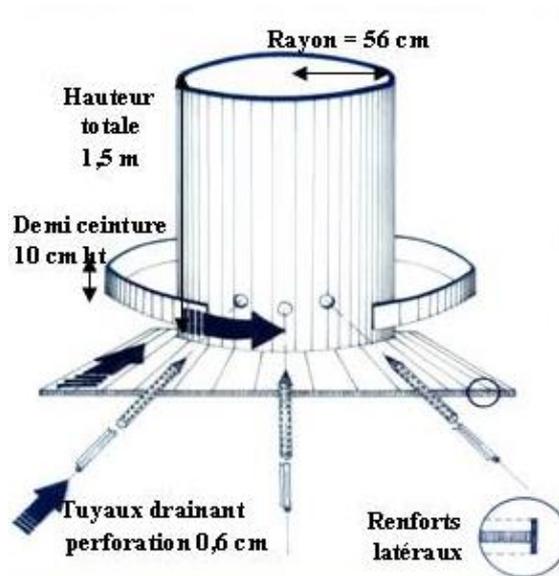


Figure 3-6. Schéma du lysimètre.

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

Entre avril et août 2003, cinq lysimètres ont été implantés dans les parcelles de deux exploitations de Hesbaye. Le sixième lysimètre a été placé en août 2009 dans une parcelle (tableau 3-12) d'une troisième exploitation, permettant d'étudier l'impact d'apports organiques plus réguliers sur la qualité de l'eau.

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

### 2.2.3 Essais d'implantation de CIPAN en interculture courte

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

avoine brésilienne ou moutarde) entre la culture principale et le froment semé après destruction de celle-ci, mi-octobre.

## 2.3 Résultats et discussion

### 2.3.1 Bilan hydrique

Le tableau 3-12 présente les bilans hydriques récapitulatifs pour quatre des six parcelles équipées d'un lysimètre. Ceux-ci permettent de donner une appréciation du fonctionnement des lysimètres installés et de vérifier que les quantités d'eau récoltées par percolation à la base des lysimètres à 2m de profondeur sont représentatives des eaux en voie de migration vers les réserves en eaux souterraines.

**Tableau 3-12. Bilans hydriques des lysimètres par saison de drainage.**

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

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

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

La durée des saisons de drainage est variable en fonction des conditions climatiques de l'année et des conditions culturales de la parcelle. Ceci peut expliquer les écarts parfois importants de pluviométrie observés entre les différentes années (tableau 3-12). Généralement, les saisons de drainage s'étalent de la fin de l'automne (novembre - décembre) jusqu'au milieu du printemps (avril – mai).

On considère que pour une pluviométrie ramenée à 100 %, 6 à 28 % migreront en profondeur et participeront à la recharge des nappes d'eaux souterraines<sup>16</sup>. Ce pourcentage varie en fonction des conditions géo-pédologiques, de l'occupation du sol, ... On voit dans le tableau 3-12 que les fractions moyennes de la pluviométrie qui sont récoltées dans les lysimètres varient de 14% à 16% en fonction de la parcelle. Ces fractions sont donc tout à fait conformes aux fractions attendues de la pluviométrie en voie de migration vers des horizons plus profonds et participant à la recharge des aquifères.

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

### 2.3.2 Qualité de l'eau de percolation récoltée

Globalement, les observations des concentrations en nitrate dans les lysimètres depuis le début de l'étude montrent qu'il existe une correspondance entre l'APL mesuré à l'automne (exprimé en  $\text{kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ ) et la concentration moyenne en nitrate (exprimée en  $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ ) de l'eau récoltée à l'exutoire des lysimètres lors de la saison de drainage suivante (figure 3-7). Malgré cette bonne correspondance (équivalence des ordres de grandeur), il ne faut pas en attendre une précision de l'ordre du  $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ , ce qui n'est d'ailleurs pas le but recherché.

Dans certaines situations, la correspondance entre l'APL et la concentration en nitrate dans l'eau de percolation n'est cependant plus vérifiée. On peut citer l'exemple d'un apport accidentellement trop important de compost de déchets verts (§3.2.3) ; alors que les APL mesurés les quatre années suivant cet apport de compost étaient corrects (entre 20 et 90  $\text{kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$ ), les concentrations dans l'eau de percolation récoltée durant la même période étaient d'un ordre de grandeur beaucoup plus élevé (entre 110 et 350  $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ ). Le front d'avancement du nitrate dans le sol consécutif à cet apport de compost a donc migré sous la profondeur d'enracinement des cultures légumières présentes sur cette parcelle durant les quatre années suivantes et est en cours de récupération à la base du lysimètre (à 2m) durant cette même période.

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

---

<sup>16</sup> Sohier et al., 2009, cité par Fonder et al., 2010

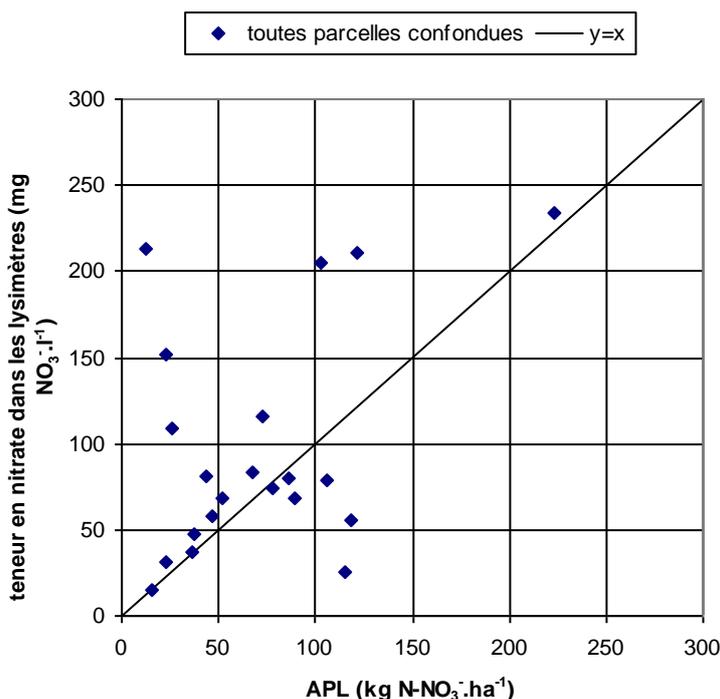


Figure 3-7. Relation entre l'APL mesuré en automne et la teneur moyenne en nitrate dans l'eau de percolation lors de la saison de drainage suivante.

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

Des graphiques de synthèse ont été réalisés pour chaque parcelle. Ceux-ci reprennent les volumes cumulés d'eau de percolation collectée (en litres), les concentrations en nitrate mesurées dans cette eau de percolation (en mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>) ainsi que les mesures de reliquat azoté dans le sol (en kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>). Les successions et rotations culturales ainsi que les apports azotés sont également repris dans ces figures. A titre illustratif, le graphique de synthèse de la parcelle P1 est présenté à la figure 3-8. Il est important de noter que, depuis le début de l'étude, les apports azotés dans ces parcelles ont été raisonnés, faisant l'objet de conseils de fertilisation basés sur des prélèvements de sol ; une réduction des conseils de fertilisation a également été testée pour certaines cultures à partir de 2008.

Les premiers échantillons d'eau ont été récoltés lors de l'hiver 2004-2005, suite à une double culture légumière de fève des marais et de chou frisé, laissant un APL relativement élevé (86 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>). La concentration moyenne en nitrate dans l'eau récoltée à 2m de profondeur lors de l'hiver suivant s'élevait à 80 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>, soit un ordre de grandeur comparable à l'APL.

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

La culture de pomme de terre implantée en 2006 a laissé des APL relativement importants (de 80 à 140 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>). On observe une migration du nitrate des horizons de surface vers les horizons de profondeur au cours de l'automne. Ceci est confirmé par la mesure des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation lors de la saison de drainage suivante, avec une augmentation de la concentration dans le temps, pour une valeur moyenne de 81 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>.

Les années 2007 et 2008 ont vu cette parcelle emblavée d'une succession betterave – froment – CIPAN. Les APL obtenus à la suite de ces cultures ne dépassaient pas 50 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>. Il ressort des

mesures dans l'eau de percolation que les concentrations en nitrate ont diminué suite à cette succession culturale (26 et 31 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup> en moyenne lors des saisons de drainage 2007-2008 et 2008-2009).

Suite à l'introduction d'une succession fève des marais – épinard d'automne sur cette parcelle en 2009, une légère augmentation de la concentration moyenne en nitrate dans l'eau de percolation est observée (37 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>), tout en restant faible dans l'absolu au regard de ce type de cultures.

En juillet 2010, des poireaux ont été repiqués sur cette parcelle. Etant donné les quantités importantes d'azote nitrique dans le sol à ce moment, aucun apport d'azote n'a été effectué sur les poireaux à l'aplomb du lysimètre. Les reliquats azotés mesurés en sortie d'hiver montrent une fuite de l'azote nitrique sous les 90cm durant l'hiver. Une forte augmentation des concentrations en nitrate dans l'eau récoltée dans les lysimètres est d'ailleurs observée au cours de cette saison de drainage, avec une valeur moyenne de 83 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>.

Enfin, en 2011, une culture de haricot a été implantée sur cette parcelle. Pour les besoins d'une expérimentation, aucun apport azoté n'a été effectué sur les haricots situés à l'aplomb du lysimètre, et une CIPAN (moutarde) a été implantée après la récolte du haricot. Malgré un APL tout à fait acceptable pour ce type de culture (inférieur à 40 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>) en raison du développement de la moutarde qui a prélevé l'azote nitrique libéré par les résidus de haricot, les concentrations en nitrate mesurées dans l'eau de percolation lors de l'hiver 2011-2012 étaient élevées (~ 150 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>). Il est probable que la quantité importante de nitrate passée sous les 90cm de profondeur lors de l'hiver 2010-2011 a continué d'être récupérée dans le lysimètre l'année suivante, ne pouvant être prélevée par le haricot, culture à faible enracinement.

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

- une succession betterave – céréale – CIPAN, associée à une fertilisation raisonnée, permet d'obtenir une eau de percolation faiblement chargée en nitrate. L'enracinement profond de ces cultures, la durée élevée de leur cycle de croissance et la couverture hivernale du sol permettent d'expliquer l'obtention d'une bonne qualité de l'eau de percolation en termes de nitrate ;
- l'absence de CIPAN après céréale se marque par une augmentation de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation, ce qui constitue un argument en faveur d'une couverture hivernale sur un maximum de surfaces après une céréale ;
- l'introduction de cultures à risques en termes d'APL (pomme de terre par exemple) se marque par une augmentation des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation l'année suivante. L'introduction d'une CIPAN et/ou d'une culture hivernale (céréale) après ce type de cultures permet d'atténuer ce constat ;
- l'introduction d'une (double) culture légumière entraîne une augmentation parfois significative des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation. Le faible enracinement de ces cultures, leur court cycle de développement et la minéralisation automnale de leurs résidus permettent d'expliquer ce constat. L'implantation (dans la mesure du possible) d'une CIPAN après ces cultures permet de limiter la dégradation de la qualité de l'eau.

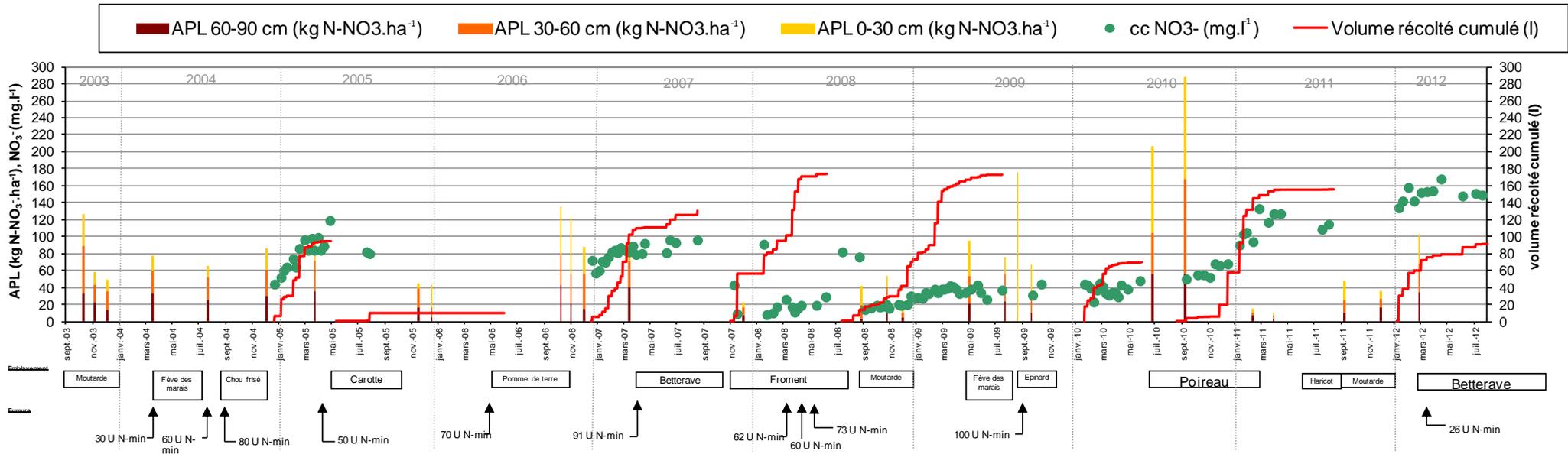


Figure 3-8. Synthèse des mesures et observations, parcelle P1.

Une des parcelles suivies (P2) a fait l'objet d'un apport de compost de déchets verts ( $25 \text{ t.ha}^{-1}$ ) après une céréale en 2006. L'analyse, parvenue trop tard à l'agriculteur, a montré que le compost était beaucoup plus riche en azote que prévu ( $25 \text{ kg N.t}^{-1}$ ) ; au final,  $625 \text{ kg N.ha}^{-1}$  ont donc été appliqués sous forme organique sur cette parcelle à l'automne 2006, ne respectant pas les prescriptions du PGDA (plafond de  $230 \text{ kg N.ha}^{-1}$  sous forme organique en terre de culture). L'impact de cet apport excessif d'azote organique est illustré à la figure 3-9.

L'apport de ce compost affecte sans délai les APL mesurés à l'automne 2006 (de 180 à  $260 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ). Les concentrations en nitrate dans l'eau récoltée à 2 m de profondeur augmentent brutalement au mois de janvier 2008, soit quinze mois après l'apport de compost. Du fait de son faible enracinement, la culture de carotte implantée en 2007 n'a donc pas pu prélever l'importante quantité d'azote nitrique lixivié en profondeur. Dans les conditions de l'année 2007 (drainage favorable et culture à faible enracinement), le temps de réponse de la qualité de l'eau de percolation à 2m de profondeur aux pratiques agricoles était donc de 15 mois.

Au cours de l'année 2008, les concentrations en nitrate dans l'eau ont augmenté progressivement pour atteindre un pic à  $400 \text{ mg NO}_3\text{.l}^{-1}$  au début de l'année 2009, soit plus de 27 mois après l'application du compost. Par la suite, les concentrations ont diminué pendant deux années, tout en restant élevées dans l'absolu. Ce n'est qu'au cours de l'hiver 2010-2011 que les concentrations ont retrouvé une valeur normale et attendue au regard des APL mesurés. Compte tenu des volumes drainés pendant les hivers 2007-2008 et 2008-2009, ce sont  $249 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  qui ont été lixiviés en profondeur durant ces deux saisons de drainage et qui se retrouveront *in fine* dans les eaux souterraines, et ce malgré une fertilisation raisonnée, voire réduite dans le cadre d'une expérimentation, au cours des quatre années qui ont suivi cet apport ( $120 \text{ kg N.ha}^{-1}$  au total sur ces quatre années).

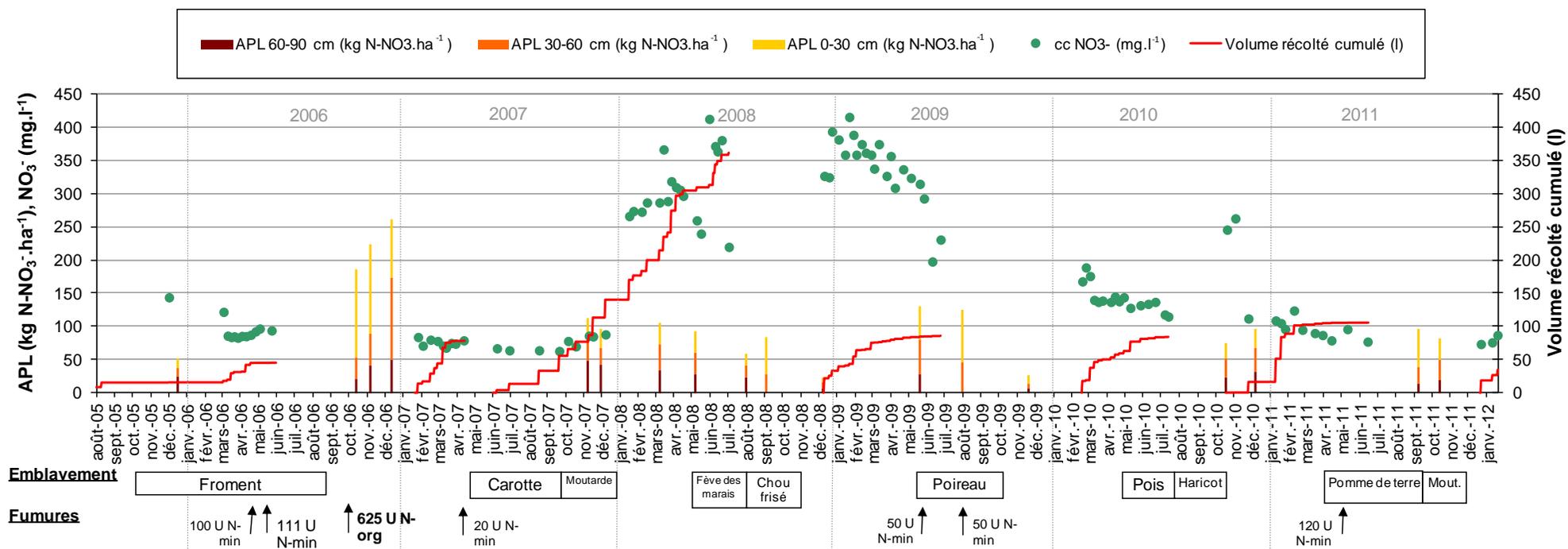


Figure 3-9. Impact sur la qualité de l'eau de percolation d'un apport excessif d'azote organique sous forme de compost (parcelle P2).

Enfin, une autre parcelle (P6) fait l'objet d'un apport régulier (tous les deux ans) de matière organique (compost, fumier de bovin), en respect des plafonds d'épandage définis dans le PGDA. Depuis la mise en place du lysimètre dans cette parcelle en août 2009, un froment suivi de CIPAN, une betterave et un pois y ont été cultivés. Il apparaît que les concentrations en nitrate dans l'eau de ce lysimètre étaient faibles au cours des hivers 2009-2010 (34 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup> en moyenne) et 2010-2011 (15 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup> en moyenne). Pour ce type de cultures et associé à une fertilisation minérale raisonnée, des apports raisonnés de matière organique, en accord avec les prescriptions du PGDA, sont donc compatibles avec l'obtention d'une qualité de l'eau de percolation tout à fait acceptable.

### 2.3.3 Essais d'implantation de CIPAN en interculture courte

Les résultats des trois essais d'implantation de CIPAN en interculture courte (après pois, haricot et pomme de terre) sont présentés au tableau 3-13. Ces trois essais concernaient l'implantation d'un nyger après récolte de pois, d'une avoine brésilienne après récolte de haricot et d'une moutarde après récolte de pomme de terre, avant le semis d'un froment en octobre. Dans ces trois essais menés en 2009 et 2011, le reliquat azoté a significativement augmenté entre la mesure en post-récolte et celle du mois d'octobre dans le cas du sol nu (augmentation chiffrée entre +54 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup> et +126 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup>). En revanche, l'implantation de CIPAN, même pour une durée relativement courte, a permis de limiter l'augmentation d'APL causée par la minéralisation des résidus de culture voire de diminuer celui-ci. Les CIPAN implantées dans de bonnes conditions (de sol, climatiques,...) se sont donc montrés efficaces (différences toujours significatives) pour prélever des quantités parfois conséquentes de nitrate, même sur une durée considérée comme courte.

**Tableau 3-13. Résultats des essais d'implantation de CIPAN en interculture courte.**

	Reliquat azoté post-récolte (kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .ha <sup>-1</sup> )		APL (kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .ha <sup>-1</sup> )		
			Date	Sol nu	CIPAN
Essai 1 : pois –(nyger)	1/8/2011	126	19/10/2011	188	64
Essai 2 : haricot- (avoine)	18/8/2009	66	13/10/2009	192	100
Essai 3 : pomme de terre – (moutarde)	8/9/2011	96	13/10/2011	150	82

## **2.4 Conclusions et perspectives**

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

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

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

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

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

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

## 2.5 **Bibliographie**

- Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007. *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007*. Namur, Belgique : MRW – DGRNE.
- Dautrebande S., Dewez A., 1996. *Programme Action-Hesbaye, rapport scientifique*. Gembloux, Belgique : Faculté universitaire des Sciences agronomiques, Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique agricole.
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Fonder N., Heens B., Xanthoulis D., Marcoen J M., 2010a. *Adaptation des pratiques agricoles en fonction des exigences de la Directives Nitrates et validation des résultats via le suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique. Rapport final. Période du 1<sup>er</sup> janvier 2008 au 30 juin 2010*. Gembloux, Belgique : Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech.
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Heens B., Bernaerdt R., Fonder N., Xanthoulis D., Marcoen J M., 2010b. *Adaptation des pratiques agricoles en fonction des exigences de la Directives Nitrates et validation des résultats via le suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique. Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **14** (S1),113-120.
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Heens B., Marcoen J.M., 2012. *Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique et expérimentation en matière de fertilisation azotée et de successions culturales en cultures industrielles légumières. Rapport intermédiaire, février 2012. Convention Service Public de Wallonie n°3523/4*. Gembloux, Belgique : Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech.
- Fonder N., Vandenberghe C., Xanthoulis D., Marcoen J.M., 2005. *Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture. Rapport final. Convention Région wallonne DGA n°3523/1. Période du 1er mars 2003 au 28 février 2005*. Gembloux, Belgique : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques.
- 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*. Gembloux, Belgique : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques.
- Fonder N., Deneufbourg M., Vandenberghe C., Xanthoulis D., Marcoen J M., 2010. *Suivi de la percolation du nitrate en terres cultivées par la technique lysimétrique. Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **14** (S1), 17-25.
- Goss M.J., Ehlers W., Unc A., 2010. *The role of lysimeters in the development of our understanding of processes in the vadose zone relevant to contamination of groundwater aquifers. Physics and Chemistry of the Earth*, 35 (15-18), 913-926.
- Heens B., 2013. *Fertilisation azotée des légumes industriels. In 2<sup>e</sup> Atelier.... Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **17** (S1), 207-214.
- Müller J.-C., 1996. *Un point sur trente ans de lysimétrie en France (1960 – 1990)*. Paris : INRA, COMIFER.
- Vandenberghe C., De Toffoli M., Bachelart F., Imbrecht O., Lambert R., Marcoen J M., 2013. *Contrôle de l'azote potentiellement lessivable dans le sol en début de période de lixiviation. Etablissement des valeurs de référence. Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **17** (S1), 231-236.
- 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.



### **3 L'APL, indicateur environnemental à l'échelle du bassin versant**

---

#### Référence de l'article

Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Gaule, D., Bolly, P-Y., and Marcoen, J. M. (2012). *Mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote à l'échelle de deux petits bassins versants agricoles (Arquennes – Belgique) et évaluation d'impact par le suivi des flux de nitrate aux exutoires et par modélisation numérique. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement 17 (S1), 164-176.*

(<http://hdl.handle.net/2268/147725>)

Remerciements : les auteurs adressent leurs remerciements à la SPGE pour le financement de l'étude, aux sept agriculteurs actifs dans les deux bassins pilotes pour leur collaboration et leur disponibilité, à la SWDE et au SPW (Direction des Cours d'eau non navigables) pour la mise à disposition d'informations et le monitoring des débits d'eau.

#### **Résumé**

Quatre prises d'eau exploitées par la Société Wallonne des Eaux (SWDE) sur la commune d'Arquennes (Belgique, Province du Hainaut) sont contaminées par le nitrate (concentrations comprises entre 60 et 70 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>) depuis plusieurs années. Les bassins d'alimentation de ces prises d'eau (31ha et 47ha) sont situés en zone exclusivement agricole et les sols y sont limoneux. Depuis octobre 2004, ces bassins servent de site pilote pour l'évaluation environnementale de bonnes pratiques agricoles en matière de gestion de l'azote (adaptation de la fertilisation minérale et organique, gestion de l'interculture...) via un encadrement des agriculteurs y exploitant. Cet encadrement s'inscrit dans le contexte du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA), transposition de la directive européenne « Nitrates » en droit wallon. Un second objectif est de mettre en place un outil d'aide à la décision en matière de prévention de la contamination des eaux par le nitrate d'origine agricole à proximité des ouvrages de prise d'eau. Pour cela, les modèles numériques SWAT et FEFLOW<sup>®</sup> ont été couplés pour simuler les flux d'eau et de nitrate depuis la surface jusqu'aux exutoires principaux. Le calibrage et la validation des deux modèles ont reposé entre autres sur une caractérisation précise du sol et du sous-sol et des traçages en milieux saturé et non-saturé. De plus, pendant huit ans, un suivi du rendement des cultures et des pratiques culturales ainsi qu'un monitoring aux exutoires des bassins versants (flux d'eau et de nitrate) et dans l'aquifère (niveau piézométrique et concentration en nitrate) ont été réalisés. L'analyse des résultats des simulations réalisées jusqu'en 2010 indiquait que l'application du PGDA dans les conditions d'Arquennes permettrait de ramener les concentrations en nitrate aux alentours des 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup> dans les prises d'eau à l'horizon 2012. Cette amélioration attendue de la qualité de l'eau s'observe dans les prises d'eau depuis le début de l'année 2009, avec une concentration moyenne légèrement inférieure à 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup> à la fin de l'année 2012.

**Mots-clés.** Bassin versant, conservation de l'eau, qualité de l'eau, eau du sol, modélisation environnementale, lixiviation, nitrate, pollution diffuse, captage d'eau, Belgique.

#### **Abstract**

Four water catchments exploited by the Walloon Society of Water (SWDE) in the rural village of Arquennes (Belgium, Province of Hainaut) have been contaminated by nitrate (concentrations between 60 and 70 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>) for several years. The catchment basins (31 ha and 47 ha) are located

exclusively in a cultivated area on loamy soils. Since October 2004, these basins are used as pilot area for environmental evaluation of good agricultural practices as regards nitrogen management (adaptation of mineral nitrogen fertilizers amounts, farm manure management, soil cover after harvest...) thanks to farmers monitoring. This fits into the general pattern of the Sustainable Nitrogen Management Program (PGDA in french), transposition of the European Nitrate Directive in wallon legislation. Second objective of the working scheme is to study and to set up a decision-making tool concerning prevention of water contamination by agricultural nitrate around water catchments. Two numerical models (SWAT and FEFLOW®) were coupled in order to simulate water and nitrogen fate from soil surface to water catchments outlets. Models calibration and validation were based among other things on soil and subsoil characterization and on tracer testing in both saturated and unsaturated zones. Moreover crop yield, farming practices, water and nitrate fluxes in water catchments, groundwater levels and nitrate concentration in groundwater were monitored for eight years. The results of simulations show that the application of PGDA in Arquennes watersheds should lead to a decrease in nitrate concentration (near 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>) in water catchments in the year 2012. This expected improvement in water quality can be seen since 2009 in water catchments, with mean nitrate concentration lower than 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup> at the end of 2012.

**Keywords.** Watersheds, water conservation, water quality, soil water, environmental modelling, leaching, nitrates, nonpoint pollution, water harvesting, Belgium.

### **3.1 Introduction**

Depuis plusieurs années, une tendance à l'augmentation de la pollution par le nitrate est observée dans la majorité des aquifères wallons (dont provient 80 % du volume d'eau destiné à la distribution publique en région wallonne). Sur l'ensemble du territoire wallon, la proportion de prises d'eau présentant des teneurs en nitrate supérieures à 40 mg.l<sup>-1</sup> est passée de 16 % pour la période 2000 – 2003 à 17 % pour la période 2005 - 2008 (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2010). Depuis la fin des années 2000, les niveaux de concentration semblent toutefois s'être quelque peu stabilisés. Les niveaux de contamination les plus élevés sont observés dans les masses d'eau du Crétacé de Herve, des Sables quaternaires de Comines-Warneton, des Sables et Craies du bassin de la Meuse et des sables du Bruxellien, dans des zones où la densité de population et/ou les activités agricoles sont particulièrement importantes. Le cas de la zone des sables du Bruxellien est préoccupant quant à la tendance observée : avant 2001, moins de 15 % des prises d'eau situées dans cette zone présentaient des eaux brutes dépassant la norme de potabilité fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé en termes de nitrate (50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup>), alors que ce chiffre atteignait 25 % en 2007 (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007).

Les sites de prise d'eau d'Arquennes (province du Hainaut, Belgique) sont composés de deux galeries et deux émergences qui sollicitent l'aquifère libre des sables du Bruxellien. Ils sont contaminés par le nitrate, la situation s'étant particulièrement dégradée à la fin des années 1990 et au début des années 2000 (Deneufbourg et al., 2010). En vue d'y restaurer la qualité de l'eau, un programme d'actions coordonné par GRENeRA (ULg – Gembloux Agro-Bio Tech) y a été mis en œuvre entre 2004 et 2010 (Deneufbourg et al., 2009), avec un double objectif.

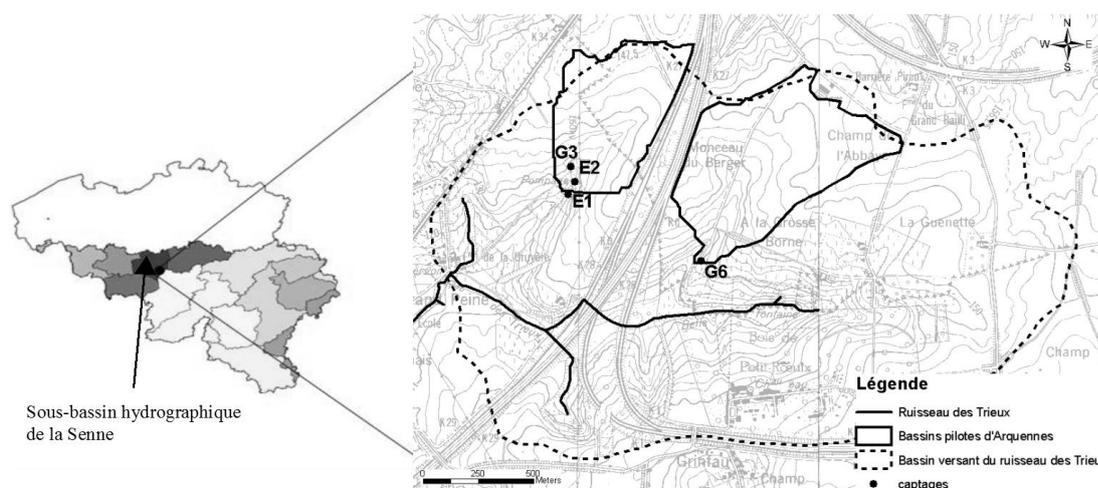
Tout d'abord, les bassins d'alimentation de ces captages étant situés en zone exclusivement agricole (contexte de grandes cultures), ils ont servi de site pilote pour la mise en œuvre et l'évaluation du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture, transposition de la Directive européenne Nitrates (91/676/CEE) en droit wallon (Moniteur belge, 2007). Concrètement, les agriculteurs y exploitant des parcelles ont été encadrés afin d'ajuster leurs pratiques agricoles en vue d'améliorer la qualité de l'eau. L'approche par bassin versant telle qu'appliquée à Arquennes s'impose comme l'échelle de travail la plus à même de valider les mesures en vigueur dans le PGDA au regard de ses objectifs car elle permet de confronter des indicateurs « parcelle » et « exploitation » à l'indicateur qui s'impose naturellement à cette échelle : la concentration en nitrate mesurée à l'exutoire du bassin versant.

Le second objectif du programme d'actions était l'étude et la mise en place d'un outil informatique d'aide à la décision en matière de prévention de la contamination des eaux par le nitrate d'origine agricole à proximité des ouvrages de prise d'eau. En effet, en région wallonne, la diversité (épaisseur et propriétés) des sols (en ce compris la zone vadose) est telle que l'impact d'une activité/action sur la qualité de l'eau souterraine n'est parfois observable que plusieurs dizaines d'années après l'occurrence de cette première. Le recours aux modèles hydro-biogéochimiques permet de tenir compte de la variabilité spatiale des sols, des cultures et des pratiques agricoles au sein d'un bassin versant pour prédire la dynamique des transferts de nitrate vers les eaux souterraines. La méthodologie utilisée à Arquennes a consisté en un couplage des modèles SWAT (zone racinaire) et FEFLOW® (zones vadose et saturée) pour déterminer le temps nécessaire pour que l'impact des modifications de pratiques en surface soit visible au niveau des eaux souterraines et des exutoires de celles-ci.

## 3.2 Matériel et méthodes

### 3.2.1 Description physique des bassins pilotes d'Arquennes

Quatre prises d'eau sont exploitées par la Société Wallonne des Eaux (SWDE). Il s'agit de deux galeries (G3 et G6) et de deux émergences (E1 et E2) qui fournissent ensemble un débit de l'ordre de 160000 m<sup>3</sup>.an<sup>-1</sup>. Ces sites de prise d'eau constituent les exutoires de deux bassins versants (figure 3-10): un bassin situé à l'ouest, d'une superficie de 31 ha, comprenant une galerie (G3) et deux émergences (E1 et E2) et un bassin situé à l'est, d'une superficie de 47 ha, et comprenant une galerie (G6). Les deux bassins sont entièrement occupés par des parcelles agricoles.



**Figure 3-10. Emplacement des sites de prise d'eau de la SWDE et des bassins pilotes à Arquennes et contexte hydrographique – Water catchments and pilot watersheds localization in Arquennes and hydrographic context.**

Les bassins pilotes (latitude 50,6° Nord – longitude 4,3° Est) sont localisés dans le bassin hydrographique de l'Escaut. Ils sont situés dans le bassin versant du ruisseau des Trieux, lui-même situé dans le bassin versant de la Samme, lui-même situé dans le bassin versant de la Senne, un des 15 sous-bassins hydrographiques définis par la Région wallonne<sup>17</sup> lors de l'établissement de sa politique de gestion de l'eau (figure 3-10). La zone d'étude est, elle-même, subdivisée en deux bassins, le bassin pilote ouest et le bassin pilote est. Ces deux bassins sont séparés en surface par le tracé de l'autoroute E19.

<sup>17</sup> Décret relatif au livre II du Code de l'eau constituant le Code de l'Environnement (Moniteur Belge du 23 septembre 2004)

Les bassins pilotes sont localisés sur le plateau hennuyer, un des bas-plateaux de la Moyenne Belgique. Leur relief peut être caractérisé de mollement ondulé. L'altitude varie entre les cotes +120 et +160 m. Un levé par DGPS (3600 points) a été réalisé afin d'élaborer le modèle numérique de terrain nécessaire à la délimitation précise des limites topographiques des bassins versants pilotes.

Les bassins considérés s'étendent sur des couches tabulaires de l'Eocène et plus particulièrement sur des formations du Lutécien (formations de Lede et de Bruxelles) et de l'Yprésien (formations de Mons-en-Pévèle et de Carnières), recouvertes par 1 à 7m de limons quaternaires.

La nappe d'eau étudiée s'écoule dans l'aquifère des sables éocènes qui comprennent les Formations de Lede, de Bruxelles et de Mons-en-Pévèle. Cependant, au droit des bassins est et ouest d'Arquennes, seules les Formations de Bruxelles et de Mons-en-Pévèle sont présentes. Sous l'aquifère des sables éocènes se trouve l'aquiclude des argiles yprésiennes qui comprend la Formation de Carnières. Cette formation de 10 m d'épaisseur assure une barrière hydrogéologique entre l'aquifère des sables éocènes et l'aquifère des calcaires dévono-carbonifères sous-jacents.

Afin d'améliorer la compréhension géologique et hydrogéologique de la région d'Arquennes, deux coupes ont été tracées. Ces coupes mentionnent les Formations traversées mais également le niveau piézométrique. La coupe Nord-Sud tracée pour le bassin versant ouest est présentée à la figure 3-11.

Sur cette coupe sont représentées quatre lithologies différentes:

- les limons du Quaternaire formant une couche d'épaisseur variable (LIM);
- les Formations de Bruxelles et de Mons-en-Pévèle, constituant les sables aquifères de l'Eocène (BXL et MEP);
- le sommet de la Formation de Carnières, constituant l'aquiclude des argiles yprésiennes (CAR).

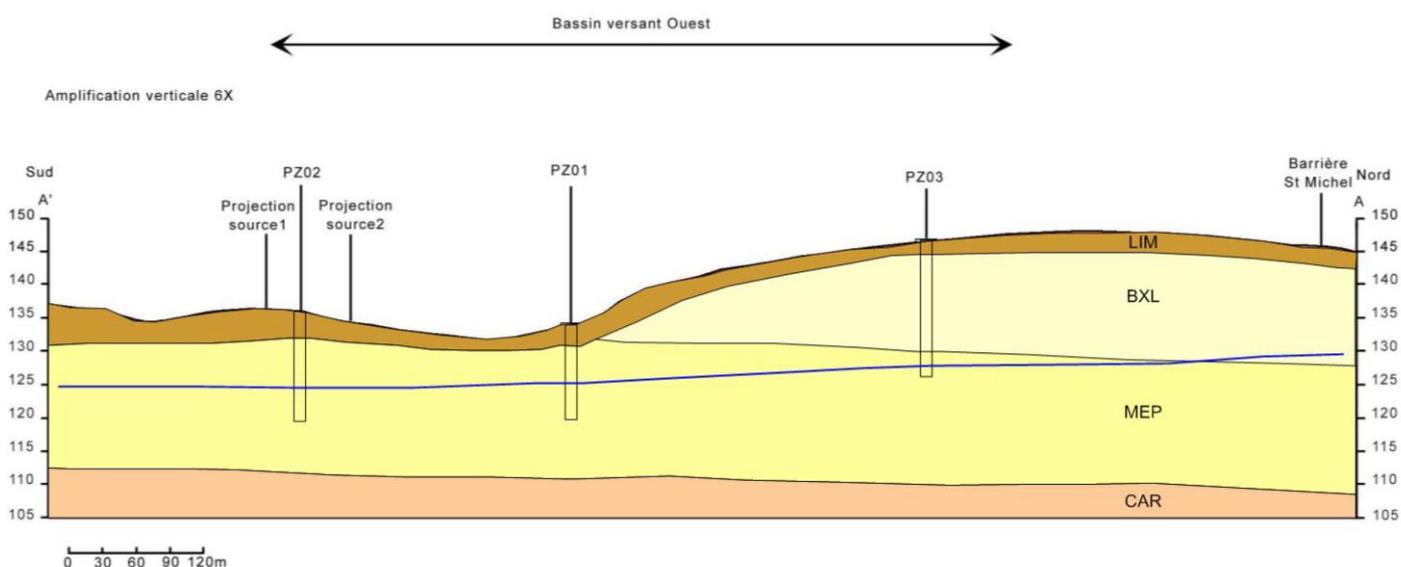


Figure 3-11. Coupe géologique et hydrogéologique au droit du bassin versant ouest à Arquennes – Geological and hydrogeological section through western watershed in Arquennes.

Les contextes pédologiques des deux bassins sont assez similaires. Les sols des plateaux et des pentes sont des sols limoneux ou sablo-limoneux, généralement profonds à drainage favorable. Leur valeur agricole est élevée à très élevée. Ils présentent une assez bonne économie en eau : le drainage naturel est bon et le pouvoir de rétention pour l'eau est assez élevé pour pouvoir assurer un approvisionnement en eau toute l'année (Pecrot, 1957 ; Louis, 1958).

Les sols des vallées sont sans développement de profil sur des matériaux limoneux ou limono-sableux. Le drainage y varie de favorable à imparfait sauf vers l'exutoire où il ralentit fortement et devient très pauvre.

Le climat de la région est qualifié de tempéré et humide (figure 3-12). L'eau est disponible en abondance toute l'année, avec des maxima aux mois de juillet et août. Sur les neuf années suivies (de 2000 à 2008), il est tombé à Arquennes en moyenne 943 mm de pluie par an, ce qui est supérieur à la normale annuelle calculée sur 30 ans à Uccle (852 mm).

Le mois le plus froid est le mois de janvier avec une température moyenne de 3,7 °C. Le mois le plus chaud est le mois de juillet avec une température moyenne de 17,9 °C.

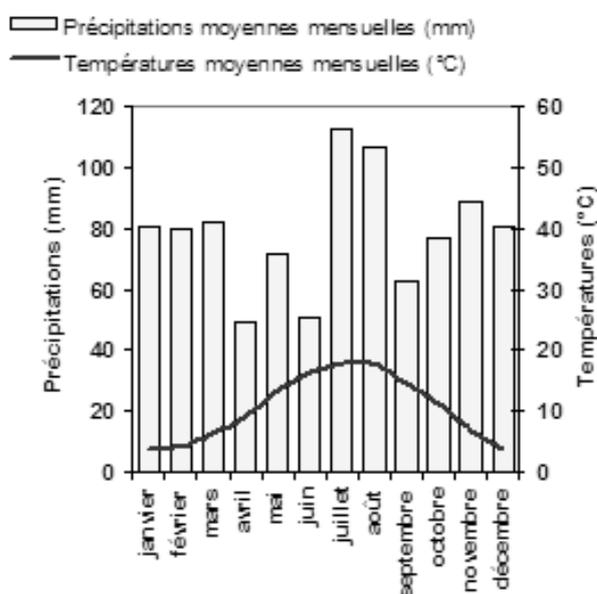


Figure 3-12. Diagramme ombrothermique (réalisé à partir des données du 01/01/2000 au 31/12/2008) de la région de Arquennes – Ombrothermic diagram (built from datas from 01/01/2000 to 31/12/2008) of Arquennes area.

### 3.2.2 Suivi du PGDA sur les bassins pilotes d'Arquennes

Les deux bassins pilotes se situent en zone vulnérable au sens du PGDA. Les agriculteurs exploitant des parcelles sur les bassins d'Arquennes sont donc soumis aux prescriptions en vigueur dans ces zones. Sept exploitations disposent d'une superficie significative sur la zone d'étude. En 2009, le taux de liaison au sol (LS<sup>18</sup>) moyen de ces exploitations était de 0,69. Cette valeur est légèrement supérieure au LS moyen de la région wallonne (0,65 en 2007). Ce bassin pilote est donc représentatif en matière de pression 'azote organique'. Les agriculteurs ont été encadrés par Nitrawal ASBL ([www.nitrawal.be](http://www.nitrawal.be)) entre 2004 et 2010 pour l'application du PGDA, non seulement en ce qui concerne les bassins pilotes mais également sur l'ensemble de leurs exploitations.

L'encadrement a porté sur le respect des périodes, conditions et doses maximum d'épandage définis dans le PGDA. La gestion de l'interculture a également été suivie. Des conseils de fertilisation ont été établis chaque année au printemps par les conseillers de Nitrawal sur base de profils azotés réalisés dans les parcelles des bassins pilotes.

<sup>18</sup> Rapport entre la quantité d'azote contenu dans les effluents produits par le cheptel de l'exploitation et la capacité de valorisation (potentiel d'épandage sur les terres) de l'exploitation.

Cinq des agriculteurs exploitant sur les bassins pilotes étaient concernés par la mise aux normes de leurs bâtiments d'élevage afin de respecter les prescriptions en vigueur, à savoir une capacité de stockage de six mois pour les effluents liquides et un dimensionnement des fumières en fonction du type de fumier produit.

Sur chaque parcelle des bassins d'Arquennes, la concentration en azote nitrique du sol a été mesurée chaque automne en début de période de lixiviation, constituant les APL (Azote Potentiellement Lessivable), indicateurs du risque de migration du nitrate en profondeur en hiver avec les eaux de percolation. Les APL ainsi mesurés ont été comparés à des valeurs de référence établies chaque année dans un réseau de plus de 200 parcelles réparties dans 34 exploitations en Wallonie (Vandenberghé et al., 2013). Ces exploitations constituent le « Survey Surfaces Agricoles », dans lequel les agriculteurs sont encadrés en matière de gestion de l'azote par les deux partenaires scientifiques (ULg - Gembloux Agro-Bio Tech et Université Catholique de Louvain) appartenant à la structure d'encadrement de Nitrawal ASBL. La comparaison des APL mesurés aux APL de référence constitue ainsi un indicateur de performance de la gestion de l'azote par l'agriculteur.

### 3.2.3 Piézométrie

Sept piézomètres ont été forés en 2005 pour couvrir les bassins d'Arquennes (figure 3-13). Un piézomètre supplémentaire (« PZE4 ») a été foré au nord du bassin est ; situé en dehors des bassins versants, il permet de mieux préciser la limite hydrogéologique des bassins.

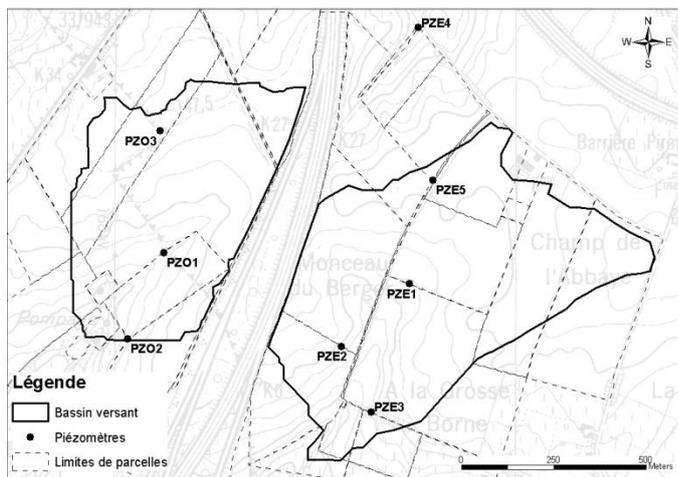


Figure 3-13. Carte de localisation des piézomètres dans les bassins versants d'Arquennes – Piezometers localization in Arquennes watersheds.

Ce réseau de piézomètres à Arquennes a permis :

- la caractérisation du sol, du sous-sol et de l'aquifère. L'identification des couches de sol et de sous-sol traversées lors du forage et le relevé des hauteurs piézométriques ont permis la réalisation de coupes hydrogéologiques (figure 3-11).
- d'estimer, via une campagne de pompages d'essai en février 2006, les perméabilités de l'aquifère;
- un suivi de la réactivité de la nappe en fonction de la pluviométrie annuelle et la détermination des gradients d'écoulement ;
- la réalisation d'essais de traçage en milieux non-saturé et saturé.

### 3.2.4 Essais de traçage

Un des objectifs du projet mis en place à Arquennes est la détermination de l'intervalle de temps entre les actions menées en surface en termes de pratique agricole et leur impact sur la qualité de l'eau. Pour

cela, deux essais de traçage ont été menés sur les bassins pilotes d'Arquennes : un essai en milieu non-saturé et un essai en milieu saturé.

L'essai en milieu non-saturé a été mené d'avril 2006 à octobre 2008. Outre la détermination du temps de transfert d'un polluant entre la surface du sol et le toit de la nappe, l'objectif de cet essai était de préciser les paramètres hydrodispersifs verticaux locaux du milieu non-saturé. Le dispositif d'injection a consisté en une planche d'infiltration située à l'amont immédiat du piézomètre PZ E3, dans une zone du bassin versant présentant une épaisseur minimale (six mètres) de terrain en milieu non saturé. Le traçage a consisté en l'injection d'uranine via cette planche d'infiltration. Un volume d'eau (1 m<sup>3</sup>) a ensuite été déversé sur la planche d'infiltration afin de chasser un maximum de traceur dans le sol. La migration (verticale et horizontale) de ce traceur a été suivie par des échantillonnages réguliers de sous-sol (via des tarières réalisées au droit de la planche d'infiltration) et d'eau (via des prélèvements réalisés au droit du piézomètre PZE3 et dans la galerie G6).

L'essai de traçage quantitatif en milieu saturé a été mené de mars à juillet 2007 avec une injection de naphthionate dans le piézomètre PZE3. Outre la détermination du temps de transfert du traceur depuis son injection dans la nappe libre jusqu'à la galerie G6, l'objectif de cet essai était de préciser les paramètres hydrodispersifs locaux du milieu saturé.

### 3.2.5 Modélisation des flux d'eau et de nitrate

Une des actions entreprises à Arquennes concerne la modélisation des flux d'eau et de nitrate aussi bien en milieu non-saturé qu'en milieu saturé, en vue de contribuer à l'évaluation du temps de réponse des bassins versants aux pratiques agricoles et de quantifier l'impact de certaines (modifications de) pratiques. L'originalité de l'approche repose sur le découpage vertical du bassin versant en deux zones et le couplage de deux modèles numériques complémentaires :

- pour l'étude du transport dynamique en milieu non-saturé (zone racinaire), le modèle SWAT, physiquement basé, est utilisé afin de modéliser la distribution du nitrate dans l'eau de percolation parvenant à une profondeur de 2 mètres sous la surface du sol (l'étude de la migration du nitrate n'étant pas physiquement basée en zone vadose dans SWAT);
- pour l'étude de la migration verticale en milieu non saturé (depuis 2 mètres de profondeur jusqu'au toit de la nappe) ainsi que pour l'étude de la migration 3D et 2D du nitrate en milieu saturé, le modèle FEFLOW<sup>®</sup>, physiquement basé, est utilisé complémentairement au modèle SWAT.

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été développé afin de prédire les impacts de la gestion du territoire sur l'eau, les sédiments et les rendements agricoles dans des bassins versants intégrant la variabilité des sols et dont l'occupation et les pratiques culturales peuvent varier sur plusieurs années (Arnold et al., 1993; Romanowicz et al., 2005). Les entrées du modèle sont l'occupation du sol, les pratiques culturales (dates de semis, de récolte, fertilisation), la topographie des bassins, les données « sol » et le climat. SWAT est un modèle qui fonctionne au pas de temps journalier et à trois dimensions. Horizontalement, l'unité spatiale de base est la HRU (Hydrological Response Unit) qui est le résultat de la combinaison unique d'un type de sol, d'une classe d'occupation de sol et d'une série climatique. Chaque HRU est supposée représenter un comportement agro-hydrologique homogène.

Le modèle SWAT, version 2003, a été calibré pour les années 2000 à 2005 sur le bassin pilote est en veillant à reproduire de manière satisfaisante les rendements observés, les différents termes du bilan hydrique (évapotranspiration, ruissellement, percolation) et la lixiviation du nitrate et en adaptant les paramètres du modèle en conséquence. Le modèle ainsi calibré a alors été appliqué sur le bassin est pour les années 2006 et 2007, ainsi que sur le bassin ouest pour les années 2000 à 2007.

Les écoulements (eau) et transferts (nitrate) dans la zone vadose (à l'exception de la zone racinaire) et dans la zone saturée ont été modélisés à l'aide du modèle FEFLOW® version 6.0 (Finite Element Subsurface FLOW & Transport Simulation System) (Diersch, 2009). Les « outputs » (percolation, lixiviation de l'azote nitrique) des simulations réalisées à l'aide de SWAT dans la zone racinaire ont servi d'entrées de données pour FEFLOW®.

La première étape a consisté à élaborer le modèle conceptuel sur base des données collectées sur le terrain (puits, logs de forage, coupes géologiques...), c'est-à-dire à représenter l'aquifère de manière simplifiée mais néanmoins réaliste. Le modèle numérique a alors été élaboré (détermination des limites du modèle, construction du maillage, attribution numérique des propriétés des matériaux...).

Le modèle d'écoulement 3D ainsi développé avec FEFLOW pour le milieu saturé a ensuite été précalibré en régime permanent et transitoire selon les équations en milieu saturé et en veillant à reproduire de manière satisfaisante l'ordre de grandeur des niveaux piézométriques et des débits (captages et ruisseau) enregistrés au droit des bassins, ainsi que le traçage réalisé en milieu saturé (§2.4).

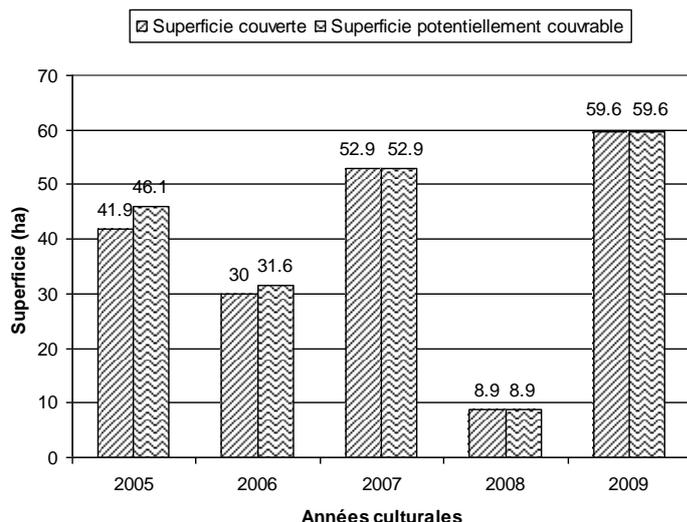
Le modèle 3D ainsi précalibré en flux et en transport a ensuite été exploité pour préciser les lignes de flux (pathlines) contribuant de façon prépondérante à l'alimentation des deux galeries G3 et G6 alimentées par ces deux bassins. Compte tenu d'une part de l'absence de données hydrogéologiques et hydrogéochimiques ayant un véritable caractère 3D pour l'ensemble du milieu non-saturé et d'autre part des temps de calcul extrêmement conséquents requis pour la simulation 3D du transport en milieu non-saturé à l'aide de FEFLOW, un modèle 2D d'écoulement et de transport a été développé, tant pour le milieu non saturé que pour le milieu saturé.

Le processus de calibrage et de validation de ce modèle 2D a été opéré pour la période 2000 à 2007 jusqu'à obtenir des résultats comparables à ceux observés sur le terrain (débits et évolution des concentrations en nitrate à la galerie G3, évolution des concentrations en nitrate et niveau d'eau au droit de la nappe, vitesses des flux observées lors des traçages). Le modèle 2D d'écoulement et de transport ainsi calibré, tant pour le milieu non saturé que pour le milieu saturé, a enfin été exploité à des fins prévisionnelles, via des simulations prédictives.

### **3.3 Résultats et discussion**

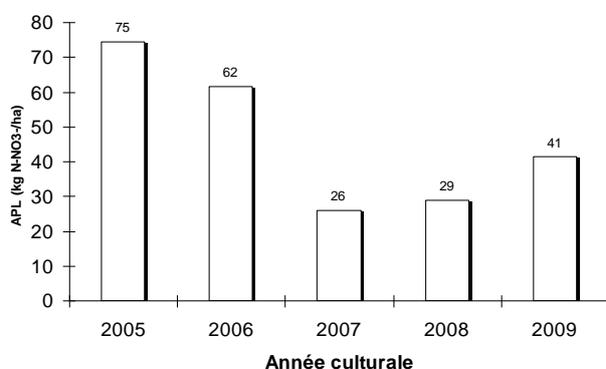
#### **3.3.1 Encadrement**

En zone vulnérable, le PGDA prévoit chaque année, pour le 15 septembre, un couvert hivernal sur une proportion d'au moins 75 % des terres arables sur lesquelles la récolte a eu lieu avant le premier septembre et destinées à recevoir une culture implantée l'année suivante, à l'exception du lin et du pois. Ce couvert (CIPAN) ne peut être détruit avant le 15 novembre. Sur les bassins d'Arquennes, depuis 2007 (figure 3-14), 100% des parcelles récoltées avant le 15 septembre sont couvertes de CIPAN.



**Figure 3-14. Couverture de sol sur les bassins d'Arquennes – Soil cover on Arquennes watersheds.**

Depuis le début du projet en 2004, une campagne systématique d'échantillonnage est réalisée en automne afin de déterminer les APL sur les bassins pilotes d'Arquennes (voir § 2.2). Entre 2005 et 2007, l'APL moyen mesuré sur les parcelles des bassins d'Arquennes a régulièrement diminué (figure 3-15). En 2008 et 2009, une légère augmentation de l'APL moyen a été observée, tout en restant inférieur aux valeurs mesurées en 2005 et 2006. De faibles écarts interannuels d'APL moyens peuvent être expliqués en partie par les différences d'assolement (cultures à risques plus ou moins présentes selon les années).



**Figure 3-15. Evolution de l'APL moyen mesuré sur les bassins pilotes d'Arquennes entre 2005 et 2009 – Average APL evolution on the pilot watersheds of Arquennes between 2005 and 2009.**

Selon une étude menée sur des lysimètres installés en plein champ (Fonder et al., 2010), l'ordre de grandeur de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation (exprimée en mg NO<sub>3</sub>-l<sup>-1</sup>) à 2 m de profondeur est comparable aux reliquats azotés mesurés à l'automne (APL, Azote Potentiellement Lessivable, exprimé en kg N-NO<sub>3</sub>-ha<sup>-1</sup>) avec un décalage de 6 à 18 mois, en fonction de la pluviométrie et des conditions culturales. L'APL moyen obtenu en 2007 sur les bassins pilotes indique donc que l'eau qui a percolé en profondeur à partir de 2008 présentait, en moyenne à l'échelle des bassins versants, une concentration en nitrate inférieure à 50 mg NO<sub>3</sub>-l<sup>-1</sup>.

Dès 2009, l'ensemble des prescriptions du PGDA ont été respectées par tous les agriculteurs exploitant des parcelles dans les bassins pilotes, à savoir :

- un taux de liaison au sol interne inférieur à l'unité ;
- la mise aux normes des infrastructures de stockage d'effluents ;
- le respect des périodes et des conditions d'épandage ;
- le respect des plafonds d'épandage à la parcelle.

### 3.3.2 Essais de traçage

L'échantillonnage automatique dans le piézomètre PZ E3 et dans la galerie G6 a permis de préciser la vitesse de transfert de l'uranine en phase liquide entre la surface du sol et la nappe à 2,2cm par jour, en supposant négligeable le temps de transfert dans la zone saturée jusqu'au piézomètre.

Néanmoins, dès lors qu'il est nécessaire de tenir compte d'un phénomène d'adsorption en phase solide dans le milieu non saturé, les vitesses de migration associées à l'évolution du traceur dans la matrice solide en milieu non saturé peuvent être plus faibles. Ainsi, sur base des six prélèvements d'échantillons de sous-sol réalisés à la tarière au droit de la planche d'épandage entre 2 et 29 mois après l'injection du traceur, la vitesse de migration de l'uranine en phase solide (partie adsorbée) est estimée à 0,09 cm par jour.

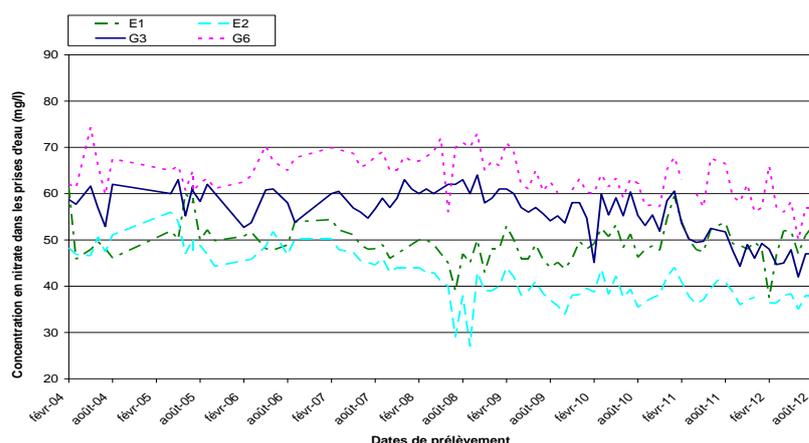
En ce qui concerne l'essai de traçage en milieu saturé, les vitesses de migration horizontale sont très élevées : la première restitution à la galerie G6 est observée moins de quatre jours après l'injection au droit de PZ E3, correspondant à une vitesse d'environ 4800cm par jour.

Sur la base de l'épaisseur moyenne du milieu non saturé déduite des différents piézomètres forés (environ 10 m) et des vitesses de première arrivée du traceur, on peut estimer qu'il faudra en moyenne, et à l'échelle du bassin versant, 13 mois pour qu'un traceur tel que l'uranine commence à être restitué au droit de la nappe après avoir été épandu en surface. Néanmoins, localement, en fonction de l'épaisseur des terrains limoneux traversés et de la profondeur de la nappe :

- la première arrivée n'apparaîtrait à la surface de la nappe qu'entre 9 mois et 3 ans après l'épandage du traceur en surface ;
- le pic de concentration maximal n'apparaîtrait à la surface de la nappe qu'entre 21 et 72 mois après l'épandage du traceur en surface ;
- les concentrations à la surface de la nappe ne rejoindraient le bruit de fond initial qu'entre 51 et plus de 100 mois après épandage du traceur en surface.

### 3.3.3 Teneur en nitrate dans les prises d'eau

La teneur en nitrate dans les prises d'eau d'Arquennes est suivie depuis plusieurs années (figure 3-16). La galerie G6, située sur le bassin est, montre une teneur en nitrate historiquement supérieure à celle des prises d'eau situées sur le bassin ouest. Au début du projet, à la fin de l'année 2004, les concentrations étaient proches ou dépassaient les  $50 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  dans les quatre prises d'eau, avec des tendances marquées à la hausse.



**Figure 3-16. Evolution des concentrations en nitrate dans les prises d'eau d'Arquennes (période 2004 – 2012) – Evolution of nitrate concentrations in Arquennes water catchments (from 2004 to 2012).**

Depuis le début du projet (fin de l'année 2004), les teneurs en nitrate dans les galeries G3 et G6 sont tout d'abord restées stabilisées jusque la fin de l'année 2008 : entre 60 et 70 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  dans la G6 et de l'ordre de 60 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  dans la G3. Par la suite, à partir de l'année 2009, les concentrations en nitrate dans les deux galeries ont régulièrement diminué et sont de l'ordre de 55 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  dans la G6 et de 45 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  dans la G3 à la fin de l'année 2012, avec des tendances marquées à la décroissance. On peut noter que l'intervalle de temps entre la modification des pratiques en surface et son impact sur la qualité de l'eau aux prises d'eau est conforme à celui prédit par les essais de traçage réalisés au cours de l'étude (§ 3.3), à savoir un intervalle de quatre à cinq années.

Dans les émergences E1 et E2, les concentrations en nitrate étaient proches ou dépassaient les 50 mg  $\cdot \text{l}^{-1}$  au début du projet (fin 2004). Depuis, les concentrations sont restées relativement stables autour de 50 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  dans l'émergence E1, tandis que depuis le début de l'année 2007, une diminution constante des concentrations en nitrate s'observe dans l'émergence E2, stabilisées entre 35 et 40 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  à la fin de l'année 2012.

Signalons que les diminutions de concentrations observées dans les prises d'eau constituent des tendances d'évolution qui ne tiennent pas compte des variations mensuelles engendrées par les fluctuations d'eau utile et par l'arrivée irrégulière du nitrate dans la nappe du fait de l'hétérogénéité du milieu non-saturé.

### 3.3.4 Modélisation des flux d'eau et de nitrate

Le calibrage du modèle SWAT a porté sur des paramètres de croissance des plantes et de prélèvement de nitrate par les plantes, des initialisations des niveaux de nitrate et d'azote organique dans le sol, des valeurs de Curve Number (SCS Engineering Division, 1986) ainsi que des paramètres généraux relatifs au cycle de l'azote pour tenter de reproduire au mieux les différents termes du bilan d'eau (évapotranspiration, ruissellement, percolation), les rendements ainsi que la lixiviation du nitrate sous la zone racinaire.

Les résultats en termes de lixiviation du nitrate sont présentés dans le tableau 3-14. On peut voir que les concentrations moyennes (à l'échelle des bassins versants) en nitrate simulées à une profondeur de 2m en 2006 et 2007 (conséquentes aux pratiques culturales de 2005 et 2006, correspondant au début de l'application du PGDA) diminuent par rapport aux concentrations observées avant 2005 ; l'ordre de grandeur de ces concentrations simulées se situe entre 55 et 60 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ .

Ces résultats ont été comparés aux APL moyens mesurés à l'échelle des bassins versants (§3.1.2). L'APL moyen calculé en fonction de la superficie de chaque parcelle des bassins pilotes s'élève à 74

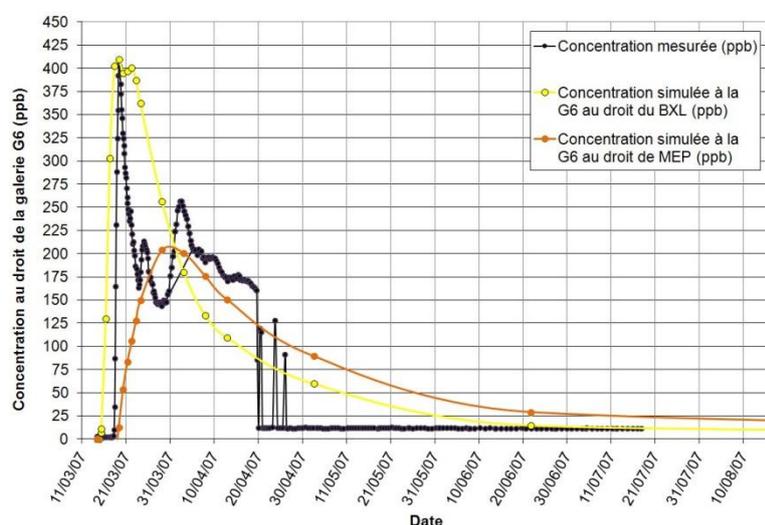
kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup> en 2005 et à 62 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.ha<sup>-1</sup> en 2006. Ces valeurs sont à comparer avec la teneur en nitrate calculée par SWAT dans l'eau de percolation durant les années 2006 et 2007 respectivement (en raison du décalage d'un an). Il apparaît donc que la valeur de 59,9 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup> calculée par SWAT en moyenne sur les deux bassins en 2006 (tableau 1) est légèrement sous-évaluée. L'ordre de grandeur de cette différence reste cependant acceptable ; la valeur de 56,8 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.l<sup>-1</sup> calculée par SWAT en moyenne sur les deux bassins en 2007 est du même ordre de grandeur que l'APL moyen mesuré à l'automne précédent.

La comparaison des concentrations en nitrate simulées par SWAT dans l'eau de percolation à 2m de profondeur avec les concentrations observées dans les prises d'eau ne peut être entreprise qu'en tenant compte du temps de transfert de l'azote dans la zone vadose et dans la zone saturée. Ceci est décrit dans le paragraphe suivant.

**Tableau 3-14. Quantité d'azote lixivié (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) et concentration moyenne en nitrate dans l'eau de percolation (mg NO<sub>3</sub>-l<sup>-1</sup>) calculées par SWAT sur les bassins versants d'Arquennes – Amount of leached nitrogen (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) and mean nitrate concentration in percolation (mg NO<sub>3</sub>-l<sup>-1</sup>) predicted by SWAT on Arquennes watersheds**

Année	Quantité d'azote lixivié SWAT (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )	Concentration en nitrate SWAT (mg NO <sub>3</sub> .l <sup>-1</sup> )
2000	23,6	48,6
2001	52,9	82,7
2002	47,1	93,8
2003	17,6	73,6
2004	17,5	73,1
2005	16,4	62,2
2006	15,4	59,9
2007	20,3	56,8
moyenne	26,3	68,8

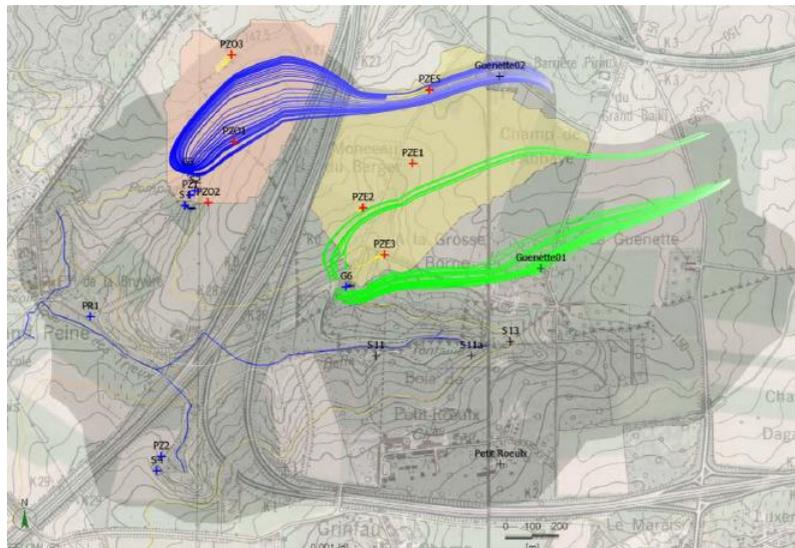
Après élaboration du modèle conceptuel et du modèle numérique dans FEFLOW, le modèle 3D d'écoulement a été pré-calibré en régime permanent et transitoire dans le milieu saturé pour tenter de reproduire de manière satisfaisante l'ordre de grandeur des niveaux piézométriques, des débits aux prises d'eau et des vitesses de migrations déterminées par le traçage réalisé en milieu saturé. A titre d'exemple, les résultats du calibrage de l'essai de traçage sont montrés à la figure 3-17. Le modèle 3D est à même de reproduire les écoulements (selon un régime permanent) et le transport (selon un régime transitoire) et peut être considéré comme pré-calibré.



**Figure 3-17. Courbes de restitution de naphthionate mesurée et simulée à la galerie G6 (essai de traçage en milieu saturé) – Measured and simulated naphthionate restitution curves at G6 catchment (tracing test in saturated area).**

Le modèle 3D ainsi précalibré en flux et en transport a ensuite été exploité pour préciser les lignes de flux (pathlines) contribuant de façon prépondérante à l'alimentation des deux galeries G3 et G6 alimentées par ces deux bassins (figure 3-18). Il apparaît que la zone d'alimentation de la galerie G3 se situe principalement au droit du bassin ouest mais s'étend au-delà de ce dernier, vers l'amont et le

bassin est. La zone d'alimentation de la galerie G6 se situe seulement partiellement au droit du bassin est et s'étend majoritairement au droit de terrains situés à l'est de celui-ci, où les données culturales ne sont pas connues.



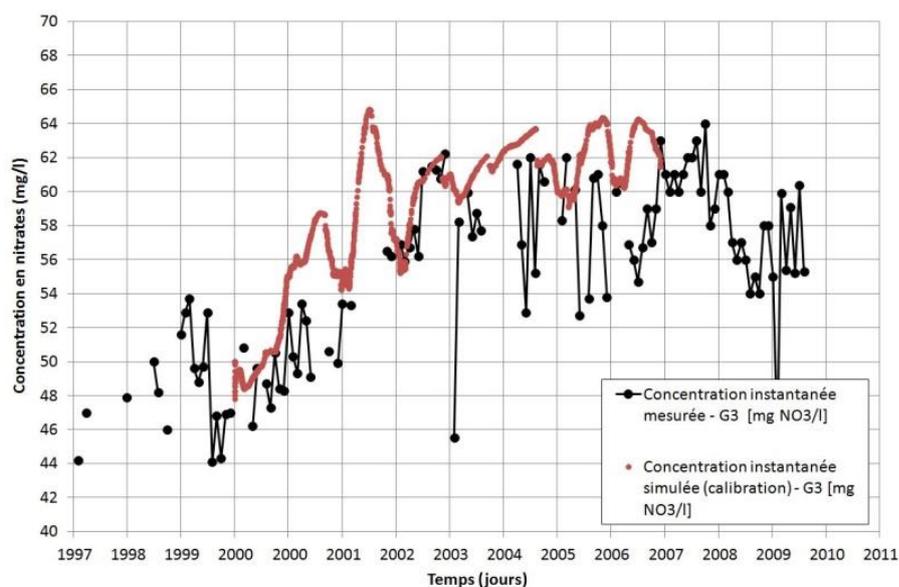
**Figure 3-18. Lignes de flux contribuant à l'alimentation des galeries G3 (en bleu) et G6 (en vert) – Contributing pathlines of G3 (in blue) and G6 (in green) catchments.**

Dès lors, le modèle 2D d'écoulement et de transport retenu a été élaboré :

- à partir d'une coupe 2D définie au sein du modèle 3D ;
- selon l'axe principal des pathlines menant à la galerie G3 ;
- limité dans sa partie amont par le piézomètre PZE5 et dans sa partie aval par la galerie G3 du bassin pilote ouest.

Le modèle 2D d'écoulement et de transport ainsi retenu et développé a conservé inchangés les paramètres intrinsèques issus du calibrage du modèle 3D initialement développé à l'échelle du bassin ouest.

A titre d'exemple, le résultat du processus de calibrage du modèle 2D concernant l'évolution mensuelle des concentrations en nitrate à la galerie G3 pour la période 2000 – 2007 est montré à la figure 3-19. On peut voir que le modèle reproduit de manière tout à fait satisfaisante tant l'évolution croissante des concentrations à la galerie entre 2000 ( $48 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ ) et 2003 ( $62 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ ) que la quasi stabilisation de ces concentrations au-delà de  $60 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  entre 2004 et 2007. Dès lors, le modèle numérique 2D est jugé correctement calibré en transport pour la période janvier 2000 – décembre 2007.



**Figure 3-19. Comparaison entre les concentrations en nitrate simulées et observées à la galerie G3 – Comparison between simulated and measured nitrate concentrations in G3 catchment.**

Enfin, quatre simulations ont été réalisées à l'aide du modèle calibré FEFLOW pour la période 2007 – 2027 afin d'évaluer l'évolution dans la zone non saturée puis saturée des concentrations en nitrate dans l'eau de percolation. Ces quatre simulations correspondent, pour cette période, à des concentrations moyennes dans l'eau de percolation entrant dans la zone vadose de 60, 50, 40 et 10 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  (figure 3-20). Pour rappel, la concentration moyenne dans l'eau de percolation sous-racinaire correspondant à l'application du PGDA dans les bassins d'Arquennes entre 2005 et 2007 se situe entre 55 et 60 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ , d'après les résultats de SWAT (§3.4.1). On voit que pour une telle concentration dans l'eau de percolation (entre la courbe rouge et la courbe orange), une amélioration de la qualité de l'eau captée à la galerie G3 est attendue, avec une concentration simulée se situant aux environs de 55 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  à l'horizon 2012 – 2013, en fonction des fluctuations mensuelles liées à l'arrivée irrégulière du contaminant dans la nappe.

Au regard des concentrations observées dans la galerie G3 durant l'année 2012 (sous les 50 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  - figure 3-16), il apparaît que l'amélioration attendue de la qualité de l'eau est en réalité plus rapide et légèrement plus importante que dans les simulations prédictives. On peut donc supposer que la concentration moyenne en nitrate dans l'eau qui a transité sous la zone racinaire entre 2007 et 2012 s'approchait effectivement plus des 50 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  (courbe orange) que des 55 mg  $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$  prédits par SWAT en 2006 et 2007. Une explication pourrait être que les agriculteurs ont amélioré leurs pratiques de gestion de l'azote au cours du projet, avec pour effet une diminution des concentrations en nitrate de l'eau de percolation sous-racinaire.

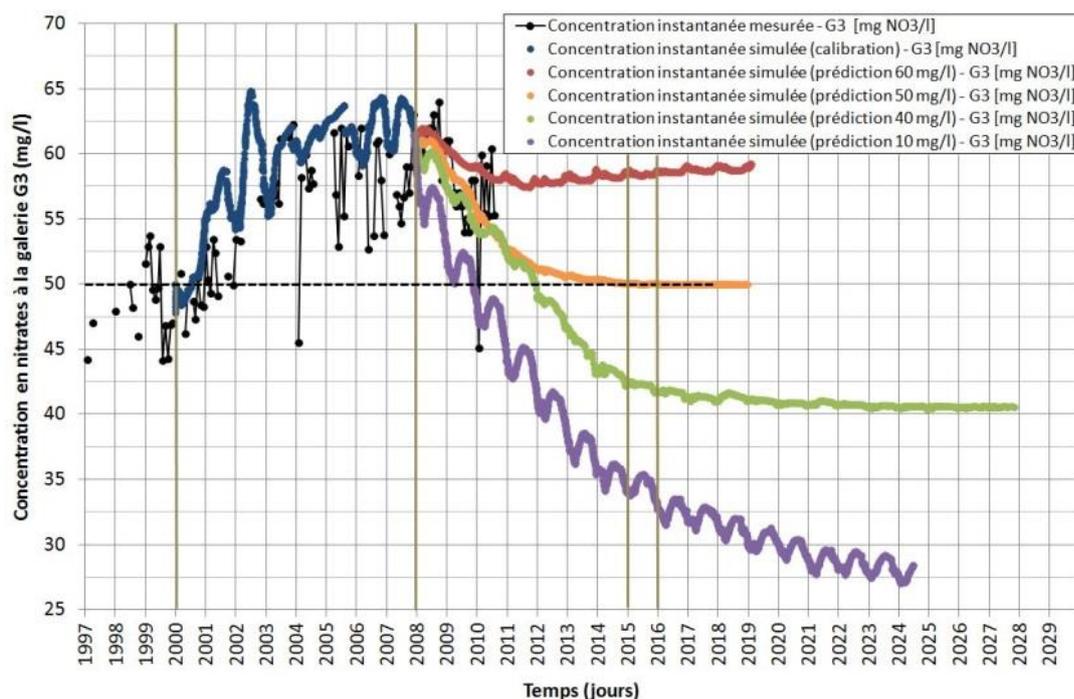


Figure 3-20. Résultats des simulations prédictives réalisées à l'aide de FEFLOW – Results of the FEFLOW predictive simulations.

### 3.4 Conclusions

Ce projet a permis de mener, entre 2005 et 2010, une série d'actions en vue de restaurer la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant, occupé exclusivement par des terres agricoles sur le territoire d'Arquennes (Belgique). Les agriculteurs exploitant sur les bassins pilotes ont été encadrés dans leur gestion de l'azote de telle sorte que l'application du PGDA y soit effective.

L'encadrement des agriculteurs dès 2005 a entraîné une diminution des teneurs en nitrate dès la fin de l'année 2008 dans l'eau captée aux prises d'eau. Entre la fin de l'année 2008 (maximum de concentration) et la fin de l'année 2012, la diminution moyenne de la concentration mesurée aux prises d'eau s'est chiffrée à  $9 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$ . Les concentrations en nitrate sont actuellement (fin 2012) inférieures à  $50 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$  dans trois des quatre prises d'eau des bassins pilotes.

Un ensemble d'investigations et mesures (levé topographique au DGPS, forage de piézomètres, essais de traçage, suivi du niveau de nappe et de la qualité de l'eau souterraine, suivi des débits...) a permis de caractériser les bassins pilotes depuis leur surface jusqu'à l'aquifère et ses exutoires principaux.

Sur la base de cette caractérisation, la modélisation du devenir du nitrate depuis son apport en surface jusqu'aux prises d'eau a été réalisée. L'originalité de la méthode développée dans le cadre de ce projet réside dans le couplage des modèles SWAT (pour la zone racinaire) et FEFLOW (pour la zone vadose et la zone saturée). Les deux modèles ont été calibrés et sont à même de reproduire en régime transitoire et de manière satisfaisante les observations (rendement des cultures, débits, concentrations en nitrate dans les prises d'eau...) recueillies sur le terrain. Ils ont alors été exploités à des fins prédictives afin d'évaluer l'évolution future des concentrations en nitrate à la galerie et dans la nappe selon divers scénarios prédéfinis.

Afin de confirmer le caractère validé de SWAT, la comparaison des résultats obtenus (rendement et concentration nitrique sous-racinaire) à Arquennes avec les résultats obtenus sur ce même bassin à l'aide du modèle de culture STICS (Brissin et al, 2003) est entamée (Deneufbourg et al., 2012).

Ce projet débouche sur l'établissement de l'outil d'aide à la décision SWAT-FEFLOW en matière de protection contre la contamination des eaux par le nitrate d'origine agricole à proximité des prises d'eau. Ainsi, cet outil est transposable à d'autres sites pour :

- cibler les parcelles à suivre pour s'assurer de la bonne mise en œuvre du P.G.D.A. nécessaire à une amélioration de la qualité des eaux souterraines et des captages ;
- estimer la durée minimale de l'encadrement des agriculteurs nécessaire avant d'en observer concrètement l'effet sur l'amélioration de la qualité des eaux souterraines et des captages visés.

### 3.5 **Bibliographie**

- Brisson N. et al., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.*, **18**, 309-332.
- Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007. Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007. Namur, Belgique : MRW – DGRNE.
- Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2010. Tableau de bord de l'environnement wallon 2010. Namur, Belgique : SPW – DGARNE – DEMNA – DEE.
- Deneufbourg M. et al., 2009. Programme d'actions pour la protection des captages contre les contaminations d'origine agricole. Bassins pilotes d'Arquennes. Rapport d'activités annuel intermédiaire 2009. Cinquième année. Convention S.P.G.E. – Nitrawal.  
[http://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1\\_fichiers/Rap\\_activites/Arquennes/Rapport\\_2009.pdf](http://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1_fichiers/Rap_activites/Arquennes/Rapport_2009.pdf), (22/10/2012).
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Marcoen J.M., 2010. Mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote et évaluation d'impact à l'échelle d'un bassin versant agricole (Arquennes, Belgique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2010 **14**(S1), 27-38.
- Deneufbourg M., Pugeaux N., Huguet J., Duval J., Vandenberghe C., Marcoen J M., Beaudoin N., 2012. Coupling long term database with SWAT and STICS models for testing models and simulating nitrogen management scenarios. In: Richards K.G., Fenton O., Watson C.J., eds. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Nitrogen Workshop - Innovations for Sustainable Use of Nitrogen Resources. 26<sup>th</sup> – 29<sup>th</sup> June 2012, Wexford, Ireland*, 297-298.
- Diersch H.-J.G., 2009. FEFLOW – Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, Reference Manual. Berlin: DHI – WASY GmbH.
- Fonder N., Deneufbourg M., Vandenberghe C., Xanthoulis D., Marcoen J M., 2010. Suivi de la percolation du nitrate en terres cultivées par la technique lysimétrique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **14** (S1), 17-25.
- Louis A., 1958. *Texte explicatif de la planchette de Feluy 128 E. Carte des sols de Belgique*. Bruxelles : Institut pour l'encouragement de la Recherche dans l'Industrie et l'Agriculture.
- Moniteur belge, 2007. Arrêté du Gouvernement wallon modifiant le Livre II du Code de l'Environnement constituant le Code de l'Eau en ce qui concerne la gestion durable de l'azote en agriculture. *Monit. Belg.*, 07.03.07.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2005. *Soil and Water Assessment tool. Theoretical documentation – Version 2005*. Temple: USDA Agricultural Research Service.
- Pecrot A., 1957. *Texte explicatif de la planchette de Nivelles 129 W. Carte des sols de Belgique*. Bruxelles : Institut pour l'encouragement de la Recherche dans l'Industrie et l'Agriculture.
- Romanowicz A.A., Vanclouster M., Rounsevell, M., La Junesse I., 2005. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: A case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling*, **187** (1), 27-39.
- Soil Conservation Service (SCS) Engineering Division, 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. *Tech. Release 55*. US Department of Agriculture, Washington DC.
- Vandenberghe C., De Toffoli M., Bachelart F., Imbrecht O., Lambert R., Marcoen J M., 2013. Contrôle de l'azote potentiellement lessivable dans le sol en début de période de lixivation. Etablissement des valeurs de référence. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **17** (S1), 231-236.

## **4 Effet de la teneur en carbone du sol sur l'APL**

---

Article accepté dans la revue Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement (BASE).

La gestion de la matière organique du sol, un enjeu important pour limiter la lixiviation du nitrate vers les eaux souterraines

Titre abrégé : humus du sol : un risque pour la lixiviation du nitrate ?

### Résumé

**Description du sujet.** La concentration en nitrate dans la moitié des masses d'eau souterraine de la région wallonne (Belgique) a justifié le classement de celles-ci en zone vulnérable, en application de la Directive Nitrates (DN). Cette zone vulnérable présente une diversité relativement importante de contextes agro-pédologiques. Ainsi, le contenu en azote des sols agricoles peut localement varier d'un facteur 4.

**Objectif.** L'étude consiste à établir si la teneur en carbone d'un sol constitue un facteur de risque significatif quant à la lixiviation du nitrate vers les eaux souterraines.

**Méthode.** L'article s'appuie sur des mesures de reliquat d'azote nitrique (APL) et de carbone organique total dans le sol en début de période de lixiviation, réalisées dans 1500 parcelles lors d'un contrôle organisé en application du Programme de Gestion Durable de l'Azote, transposition de la DN en région wallonne.

**Résultats.** L'examen des résultats illustre d'une part que l'APL est positivement corrélé au contenu en carbone total du sol et que les résultats APL qualifiés de 'non conforme' présentent une concentration moyenne en carbone organique total significativement supérieure aux autres résultats.

**Conclusion.** L'APL étant un indicateur environnemental du risque de lixiviation du nitrate, il apparaît qu'un contenu important en carbone organique total est généralement de nature, par sa minéralisation, à constituer un risque de contamination des eaux souterraines. Il convient dès lors d'une part d'améliorer la prise en compte de ce paramètre dans les conseils de fertilisation azotée et d'autre part, dans le cas de récolte estivale, de gérer au mieux le sol par une mise en place efficiente de cultures piège à nitrate.

Mots clés : agriculture, azote, nitrate, carbone, eau.

The management of soil organic matter, an important issue to reduce nitrate leaching to groundwater

Titre abrégé : Soil organic carbon : a risk for nitrate leaching ?

Abstract

**Topic description.** The nitrate concentration in half of the groundwater bodies of the Walloon Region (Belgium) justified the classification of these into vulnerable zone under the Nitrates Directive (ND). This vulnerable area has a relatively high diversity of agro- soil environments. Thus, the nitrogen content of agricultural soils can locally vary by a factor 4.

**Goal.** The study aims to establish whether the carbon content of a soil is a significant risk factor in nitrate leaching to groundwater

**Method.** The article is based on measurements of nitrate nitrogen residue (APL) and soil total organic carbon (TOC) at the beginning of the leaching period, made in 2012 into 1500 plots during controls organized by the Wallonia Public Service, in application of the Sustainable Management Program of the Nitrogen, the ND transposition in the Walloon region.

**Results.** Examination of the results shows both that the APL is positively correlated to the TOC and that qualified APL results 'noncompliant' have an average TOC significantly higher than the other results.

**Conclusion.** Since APL is an environmental indicator of the risk of nitrate leaching, it appears that the TOC may constitute a risk of groundwater contamination by nitrate. Should therefore on the one hand to improve the inclusion of this parameter in the nitrogen fertilization advice and secondly , in the case of summer harvest , to better manage the sowing of the catch crops.

Keywords : agriculture, nitrogen, nitrate, carbon, water.

## 4.1 **Introduction**

En région wallonne (Belgique), l'évolution de la qualité (concentration en nitrate) des eaux souterraines entre 1980 et 2000 a justifié la délimitation de zones vulnérables et la mise en œuvre d'un programme d'actions (Programme de Gestion Durable de l'Azote – PGDA<sup>19</sup>) en application de la Directive Nitrates (91/676/CEE) (Vandenberghe et al, 2010 ; Vandenberghe et al, 2013a). Le suivi de la concentration en nitrate dans les eaux souterraines est réalisé par les producteurs d'eau potable dans les aquifères qu'ils sollicitent et par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP) dans les aquifères non exploités. Des échantillons d'eau sont ainsi prélevés régulièrement dans près de 900 ouvrages (galeries, puits, piézomètres, ...) et analysés en vue d'y mesurer entre autres la concentration en nitrate.

Le PGDA mis en place en 2002 et déjà révisé à plusieurs reprises fixe des règles en matière de gestion de l'azote (organique et minéral) et de successions culturales afin de limiter la lixiviation et le ruissellement du nitrate. Des contrôles sont organisés par le Service Public de Wallonie pour vérifier la bonne mise en œuvre de ces règles par les agriculteurs. Le dosage du reliquat d'azote nitrique dans le sol (0-90 cm) en fin d'automne (azote potentiellement lessivable - APL) fait partie des outils de contrôle. Ainsi, chaque année, des échantillons de sol sont prélevés dans plus de 5% des exploitations agricoles situées en zone vulnérable et les résultats d'analyse sont comparés à des valeurs de référence (Vandenberghe et al, 2013b).

Destain et al (2010), Deneufbourg et al (2013a), Deneufbourg et al (2013b) ont montré (respectivement avec l'isotope 15 de l'azote, avec des lysimètres à l'échelle de la parcelle ou à l'échelle d'un petit bassin versant) que l'APL constitue un indicateur environnemental de la lixiviation du nitrate vers les eaux souterraines.

En 2012, les épandages d'engrais de ferme (fumier, lisier, compost, ...) représentaient un apport de l'ordre de 95 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Brahy *et al*, 2014), ce qui correspond à environ une quinzaine de tonnes de matière organique (fraîche) par hectare enfouie dans le sol chaque année.

Depuis plusieurs années, la thématique du carbone dans les sols fait l'objet d'un intérêt croissant, que ce soit pour la protection des sols (la diminution du stock de carbone est identifiée par l'Europe comme une des huit menaces sur les sols<sup>20</sup>) ou la lutte contre le changement climatique (par exemple, Objectif « 4 pour 1000 » en France<sup>21</sup>).

En Wallonie, les sols agricoles sont suivis régulièrement depuis plusieurs dizaines d'années pour des paramètres tels que le carbone organique total (Renneson et al, 2015) et l'azote total (Colinet et al, 2005 ; Genot et al, 2012).

Les matières organiques (endogène et exogène) présentent des effets agronomiques et environnementaux positifs :

- pour la stabilité du sol et la limitation de l'érosion (Chenu *et al*, 2000 ; Bronick and Lal, 2005),
- pour la fourniture d'éléments nutritifs aux plantes (Nevens and Rehoul, 2005 ; Grignani *et al*, 2007 ; Maltas *et al*, 2013),
- pour la valorisation de 'déchets' organiques anthropiques ou issus d'élevages,
- pour la dégradation de produits phytopharmaceutiques utilisés pour la protection des cultures et la lutte contre les ravageurs (Mukherjee, 2009 ; Fenoll *et al*, 2011 ; Fenoll *et al*, 2014),
- pour le stockage de carbone (Buisse *et al*, 2013 ; D'Hose *et al*, 2014 ; Vanden Hest *et al*, 2014) dans la lutte contre le réchauffement climatique.

---

<sup>19</sup> <http://environnement.wallonie.be/legis/Codeenvironnement/codeeaucoordonneR.html>

<sup>20</sup> <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0231&from=EN> (consulté le 16 février 2016)

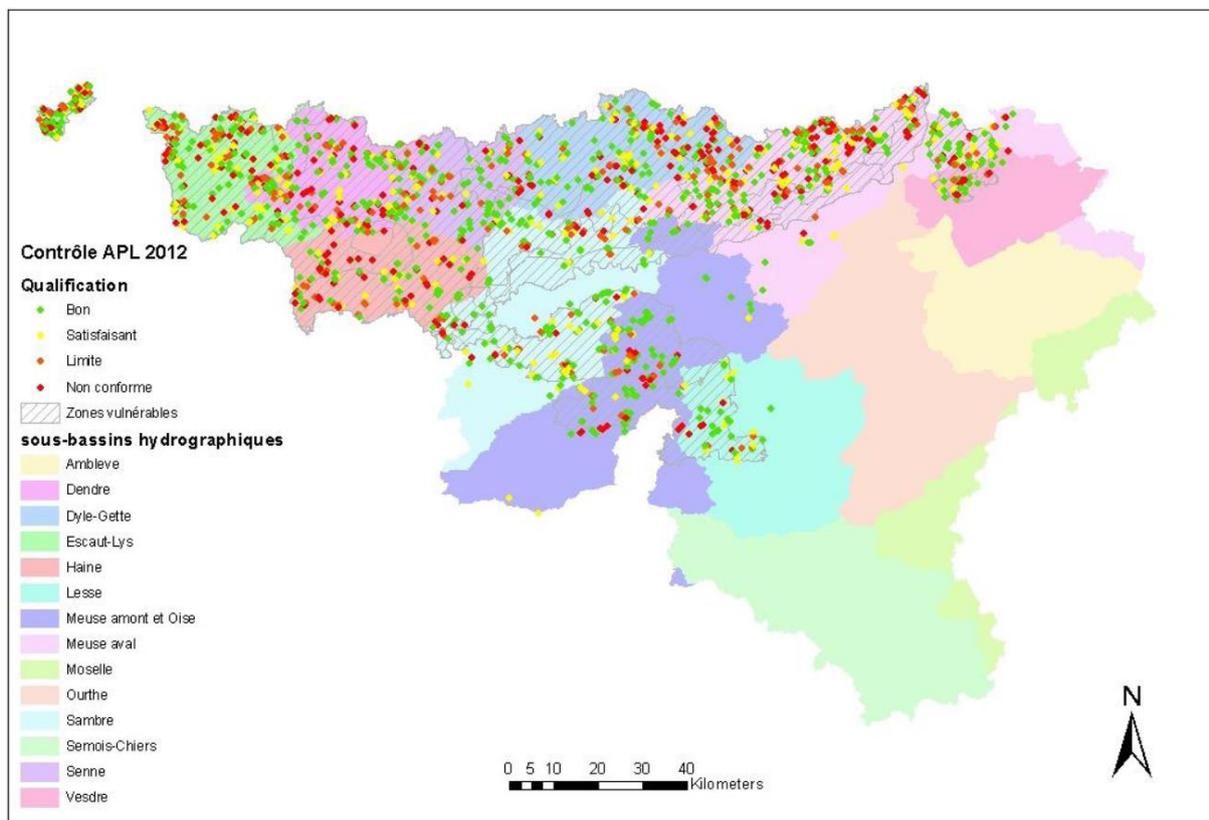
<sup>21</sup> <http://agriculture.gouv.fr/rejoignez-linitiative-4-pour-1000> (consulté le 16 février 2016)

Il convient cependant d'évaluer si cette course vers plus de carbone dans les sols ne présente pas d'effets négatifs pour l'environnement. On sait par exemple que les stocks importants de matière organique dans les sols, lorsqu'ils minéralisent, peuvent engendrer des flux importants (en concentration et en durée) de nitrate comme par exemple lors du retournement de vieilles prairies (Whitmore *et al*, 1992). La présente étude vise à apporter quelques éléments de réflexion à ce sujet, plus spécifiquement sur la thématique du nitrate et de l'eau.

## 4.2 Matériel et méthode.

### 4.2.1 Matériel

En 2012, en application du PGDA, le Service Public de Wallonie a commandé près de 1500 contrôles APL dans des parcelles agricoles afin d'y évaluer la qualité de la gestion de l'azote pratiquée. La figure 3-21 illustre, entre autres, la distribution spatiale des parcelles contrôlées qui sont majoritairement situées en zone vulnérable.



**Figure 3-21. Spatialisation et qualification des résultats de contrôle APL en 2012.**

Les cultures emblavées dans ces parcelles étaient pour moitié, des céréales et pour un quart, du maïs; la betterave, la pomme de terre, le colza, les légumes et prairies représentant le dernier quart (figure 3-22). Les échantillons prélevés lors de ces contrôles ont été analysés pour doser l'azote nitrique dans la couche 0-90 cm et le carbone organique total dans la couche 0-30 cm.

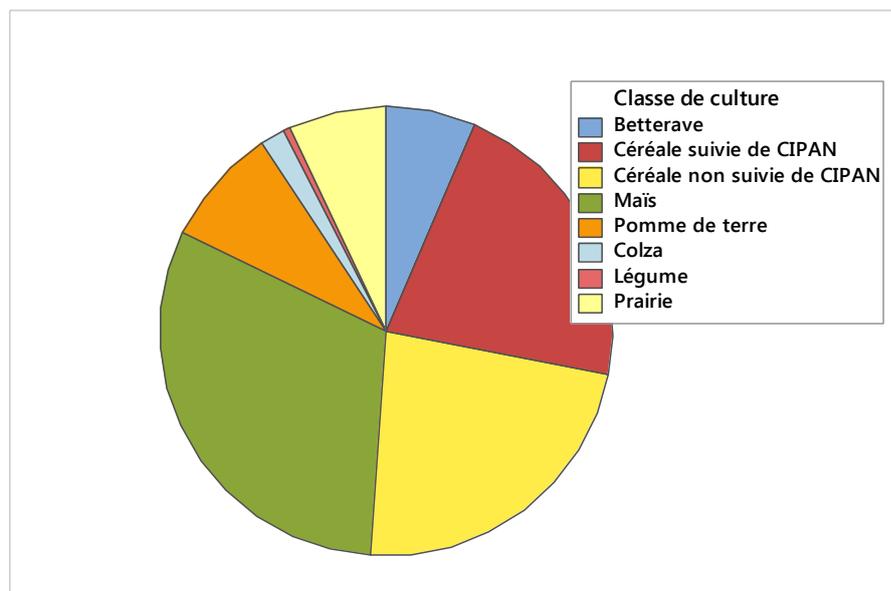


Figure 3-22. Distribution des cultures contrôlées lors de l'échantillonnage APL 2012.

#### 4.2.2 Méthode

Afin d'évaluer correctement le contenu en azote nitrique du sol, au moins 15 prélèvements de sol sont réalisés pour constituer un échantillon composite (Vandenberghé et Colinet, 2014). Les prélèvements sont effectués dans trois couches successives de 30 cm pour atteindre ainsi la profondeur de 90 cm. Ces échantillons sont conduits, dans un coffre thermiquement isolé, à un laboratoire agréé par le Service Public de Wallonie. Ils sont analysés immédiatement ou stockés en chambre froide (1°C à 4°C) pendant au maximum cinq jours avant analyse. Les échantillons, non séchés, sont homogénéisés par tamisage (8mm) après quoi l'extraction de l'ion nitrate est effectuée sur une aliquote de minimum 30 grammes d'échantillon par une solution KCl de concentration 0,1N au minimum. Le rapport d'extraction (poids de terre/volume de solution d'extraction) est de 1/5<sup>ème</sup>. Les flacons sont placés dans un agitateur rotatif pendant une demi-heure. La solution est ensuite laissée au repos pendant une demi-heure pour décantation. Le dosage du nitrate est effectué sur le surnageant qui, selon la méthode de dosage, est préalablement filtré ou centrifugé.

Si le dosage n'est pas effectué endéans les trois heures qui suivent l'extraction, les extraits sont stockés en chambre froide, à une température maximale de 4 °C, à l'abri de la lumière pendant une durée maximale de 48 heures ou sont congelés.

Le dosage est effectué selon l'une des méthodes suivantes :

- la méthode colorimétrique de dosage direct du nitrate par l'acide chromotrope (West & Lyles, 1960);
- la méthode colorimétrique de dosage direct du nitrate par la brucine (Baker, 1967);
- la méthode colorimétrique de réduction du nitrate en nitrite (à l'aide notamment de cadmium ou d'hydrazine) avec dosage de l'ion nitrite par la réaction de Griess-Ilosvay modifiée (Bremner, 1965; Guiot 1975).

Le résultat obtenu est exprimé en kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (sur 90 cm de profondeur) en tenant compte :

- de la teneur en eau de l'échantillon de sol (24h de séchage à 105°C),
- d'une densité de 1.35 g.cm<sup>-3</sup> pour la couche 0-30 cm, de 1.5 g.cm<sup>-3</sup> pour les deux couches sous-jacentes et

- de la charge caillouteuse renseignée par la Carte Numérique des Sols de Wallonie (Bah et al, 2005).

Chaque résultat est ensuite comparé à une référence établie sur base d'observations réalisées en situation de gestion optimale de l'azote (Vandenberghe et al, 2004 ; Vandenberghe et al, 2005 ; Vandenberghe et al, 2013b) pour pouvoir être qualifié (*bon, satisfaisant, limite* ou *non conforme*).

Le dosage du carbone dans les échantillons prélevés dans la couche 0-30 cm a été effectué par combustion sèche (norme ISO 10694 de 1995) ou par la méthode de Walkley Black (dérivée de la norme ISO 14235 de 1998). Le résultat obtenu est exprimé en % carbone organique total (%COT), soit g COT.100g<sup>-1</sup> sol.

Enfin, chaque résultat est également repositionné sur la Carte Numérique des Sols de Wallonie afin de pouvoir lui attribuer quelques propriétés édaphiques dont la texture et l'hydromorphie.

Le traitement statistique (analyse de la variance) des résultats est effectué à l'aide du logiciel Minitab® 17.1.0.

## 4.3 Résultats

### 4.3.1 Relation %COT - APL

Les résultats ont été analysés en fonction de la culture récoltée. Les analyses de variance (Dagnelie P., 1999) indiquent des relations au moins significatives ( $\alpha = 0.05$ ) entre le %COT et l'APL pour les céréales suivies d'une culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN), le maïs et les prairies. Dans ces trois situations, le coefficient de détermination reste cependant relativement faible (~ 0.1). Ceci n'est cependant pas illogique puisque l'APL est avant tout un indicateur de la gestion de l'azote comme Fonder et al (2010) et Heens (2013) l'ont montré.

Pour la betterave, la pomme de terre, le colza et les céréales non suivies d'une CIPAN, la relation entre le %COT et l'APL n'est pas significative.

### 4.3.2 Relation %COT – qualification de l'APL

Les résultats ont également été analysés, toutes cultures confondues (prairies exclues), sous un angle qualitatif ; l'objectif étant d'observer si le %COT a un impact sur la qualification de l'APL (quatre classes, de *bon* à *non conforme*).

L'analyse de la variance des 1362 observations (tableau 3-15) indique l'existence d'une différence très hautement significative ( $P=0.000$ ) de %COT en fonction de la qualification du résultat ; les parcelles qualifiées 'non conformes' présentant un %COT significativement différent des autres parcelles.

**Tableau 3-15. Intervalle de confiance de la teneur en carbone organique total en fonction de la qualification du résultat APL**

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
1 - Bon	586	1,2064	0,4094	(-----*-----)
2 - Satisfaisant	249	1,3017	0,5379	(-----*-----)
3 - Limite	227	1,3128	0,6030	(-----*-----)
4 - Non conforme	300	1,5196	0,9978	(-----*-----)

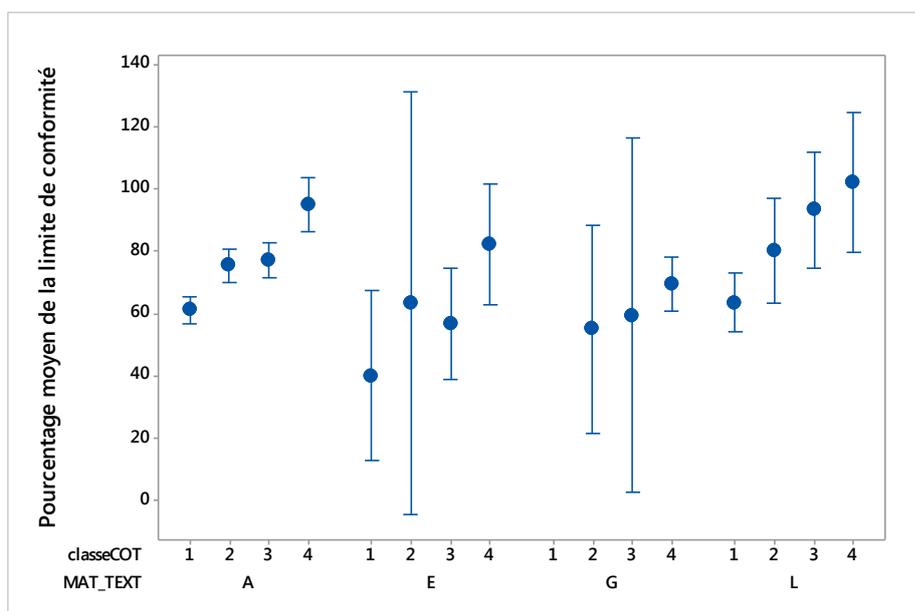
-----+-----+-----+-----+-----  
1,20      1,32      1,44      1,56

### 4.3.3 Relation %COT – propriétés édaphiques – %APL

Pour cette étude, seuls les sols cultivés sablo-limoneux (L), limoneux (A), limono-caillouteux (G) et argileux légers (E) ont été retenus, soit 1262 observations. Les sept autres classes texturales présentent des effectifs trop faibles et parfois des textures intermédiaires aux quatre classes précitées. Les résultats %COT ont été répartis en quatre classes d'effectif équivalent dont les limites sont 0.998% (1<sup>er</sup> quartile), 1.150% (médiane) et 1.400% (3<sup>ème</sup> quartile).

L'analyse de la variance a mis en évidence des différences très hautement significatives ( $P=0.000$ ) entre la moyenne des valeurs APL (exprimées en pourcent par rapport à la limite de conformité fixée pour la classe d'occupation de sol considérée) et d'une part la texture et d'autre part, la classe de COT. Un test de Tukey permet de préciser ces différences : les textures L et A présentent des APL plus proches des limites de conformité que les textures E et G (respectivement 84%, 77%, 61% et 53% pour les classes L, A, E et G). En ce qui concerne le COT, les classes 2 et 3 (valeurs %COT comprises entre les quartiles 1 et 3) sont significativement différentes des classe 1 et 4. (respectivement 52%, 67%, 69% et 87% pour les classes 1, 2, 3 et 4).

La même analyse de variance révèle également l'absence d'interaction entre le %COT et la texture, telle que l'illustre la figure 3-23.



**Figure 3-23.** Intervalle de confiance du pourcentage moyen de l'APL par rapport à la limite de non-conformité, par texture (A = limoneux, L = sablo limoneux, E = argile légère, G = limono-caillouteux) et %COT (1 = < 0.998%, 2 = < 1.150% , 3 = < 1.400%, 4 = > 1.400%).

La prise en compte des propriétés hydromorphiques des sols n'a pas permis de mieux expliquer les résultats APL et les interactions entre facteurs explicatifs.

## 4.4 Discussion et conclusions

L'examen des résultats d'analyses pratiquées 1362 échantillons de sol a mis en évidence l'existence d'une relation significative entre l'APL et le %COT pour plusieurs cultures : plus le %COT est élevé, plus l'APL est élevé. Des observations similaires ont été mises en évidence par Geypens et al (2005) : seulement 38% des parcelles à taux de carbone élevé présentaient un APL inférieur au seuil de 90 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> alors que 78% des parcelles à taux de carbone faible présentaient un APL inférieur à ce seuil.

Par ailleurs, chaque résultat APL est qualifié (de *bon* à *non conforme*) après comparaison à des références (par culture) établies annuellement (pour tenir compte de l'année climatique) par culture. Pour une exploitation contrôlée, plusieurs résultats non conformes impliquent l'entrée dans un programme d'observation voire des sanctions financières. L'analyse statistique réalisée a mis en évidence une relation très hautement significative entre la qualification d'un résultat APL et le %COT : les parcelles non conformes présentent un %COT supérieur aux autres parcelles.

La prise en compte de propriétés édaphiques met en évidence que l'APL moyen est plus proche de la limite de non-conformité pour les textures limoneuses et argileuses que pour les textures sablo-limoneuses ou limono-caillouteuses. A texture identique, l'APL moyen est également plus proche de la limite de conformité lorsque la teneur en COT augmente. L'analyse de la variance n'a cependant pas révélé d'interaction entre ces deux facteurs (%COT et texture).

Cette étude met donc en évidence que le sol et principalement sa teneur en carbone organique total constituent un facteur de risque d'APL élevé et par conséquent de contamination des eaux souterraines par le nitrate. Il convient dès lors, d'une part de s'assurer que cette teneur est suffisamment prise en compte dans les conseils de fertilisation azotée qui peuvent être prodigués aux agriculteurs et d'autre part de sensibiliser ceux-ci à bien intégrer ce paramètre dans la gestion de leurs engrais azotés (minéraux et organiques) et de leurs cultures pièges à nitrate (assurer une mise en place correcte du couvert pour bien capter l'azote nitrique produit lors de la minéralisation automnale).

#### 4.5 **Bibliographie**

- Bah B. B., Legrain X., Engels P., Colinet G. & Bock L., 2007. *Légende de la Carte Numérique des sols de Wallonie. Version 2*. Gembloux Agro-Bio Tech ULg. <http://hdl.handle.net/2268/24723>
- Baker A.S., 1967. Colorimetric determination of nitrate in soil and plant extracts with brucine. *J. Agric. Food Chem.*, **15** (5), 802–806.
- Brahy V., Bellayachi A., Cuvelier C., Dejemeppe J., Genereux C., Maes E., Marzo G., Renard V., Thiry V., 2014. Les Indicateurs clés de l'environnement wallon 2014. Service Public de Wallonie. 208 p. <http://etat.environnement.wallonie.be/index.php?page=icew-2014>
- Bronick C.J., Lal R., 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma*. **124** (1-2), 3-22.
- Bremner J. M., 1965. Inorganic Forms of Nitrogen. In : *Methods of Soils Analysis. Part2*. Black C. A. (ed) American Society of Agronomy. Madison, USA., 1179-1237.
- Buysse P., Schnepf-Kiss A.-C, Carnol M., Malchair S., Roisin C., Aubinet M., 2013. Fifty years of crop residue management have a limited impact on soil heterotrophic respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*. **180**, 102-111.
- Chenu C., Le Bissonais Y., Arrouays D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, **64** (4), 1479-1486.
- Colinet G., Laroche J., Toussaint B., Goffaux M.-J., Martinez M., Oger R., 2005. Base de données sols de Requasud. 2<sup>ème</sup> Synthèse. asbl Requasud. 36p. [http://www.requasud.be/img/page/publication/ReQuaSud\\_BaseDonnees\\_Sols.pdf](http://www.requasud.be/img/page/publication/ReQuaSud_BaseDonnees_Sols.pdf) (26/08/2015)
- Dagnelie P., 1999. Statistique théorique et appliquée. Tome 2. Inférence statistique à une et deux dimensions. 2<sup>ème</sup> édition. De Boeck Université.
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Heens B. & Marcoen J.M., 2013a. Suivi de la lixiviation du nitrate en plein champ par la technique lysimétrique : retour de huit années d'expérience. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **17** (S1), 177-186. <http://hdl.handle.net/2268/147728>
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Gaule D., Bolly P.-Y. & Marcoen J.M., 2013a. Mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote à l'échelle de deux petits bassins versants (Arquennes - Belgique) et évaluation d'impact par le suivi des flux de nitrate aux exutoires et par modélisation

- numérique. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **17** (S1), 164-176. <http://hdl.handle.net/2268/147725>
- Destain J-P., Fonder N., Xanthoulis D., Reuteur V., 2010. L'isotope stable  $^{15}\text{N}$  et le lysimètre, des outils complémentaires pour l'étude de la lixiviation de l'azote dans les sols agricoles. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **14** (S1), 91-96. <http://hdl.handle.net/2268/35012>
- D'Hose T., Cougnon M., De Vlieghe A., Vandecasteele B., Viane N., Cornelis W., Van Bockstaele E., Reheul D., 2014. The positive relationship between soil quality and crop production : a case study on effect of farm compost application. *Applied Soil Ecology*. **75**, 189-198.
- Fenoll J ; Vela N., Navarro G., Pérez-Lucas G., Navarro S., 2014. Assessment of agro-industrial and compost organic wastes for reducing the potential leaching of triazine herbicide residue through the soil. *Science of the Total Environment*. **493**, 124-132.
- Fenoll J., Ruiz E., Flores P., Hellin P., Navarro S., 2011. Reduction of the movement and persistence of pesticides in soil through common agronomic practices. *Chemosphere*. **85** (8), 1375-1382.
- Fonder N., Heens B. & Xanthoulis D., 2010. Optimisation de la fertilisation azotée en cultures industrielles légumières sous irrigation. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **14** (S1), 103-112. <http://hdl.handle.net/2268/35014>
- Genot V., Renneson M., Colinet G., Goffaux M-J., Cugon T., Toussaint B., Buffet D., Oger R., 2012. Base de données sols de Requasud. 3<sup>ème</sup> Synthèse. asbl Requasud. 35p. [http://www.requasud.be/img/page/publication/page\\_sols\\_2012%20VF.pdf](http://www.requasud.be/img/page/publication/page_sols_2012%20VF.pdf) (26/08/2015)
- Geypens M., Mertens J., Ver Elst P., Bries J., 2005. Evaluation of fall residual nitrogen influenced by soil chemical characteristics and crop history in Flanders (Belgium). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **36** (1-3), 363-372.
- Grignani C., Zavattaro L., Sacco D., Monaco S., 2007. Production, nitrogen and carbon balance of maize-based forage systems. *European Journal of Agronomy*. **26** (4), 442-453.
- Guiot J., 1975. Estimation des réserves azotées du sol par détermination de l'azote minéral. *Revue Agricole*, **28**, 1117 – 1132.
- Heens B., 2013. Fertilisation azotée des légumes industriels. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **17** (S1), 207-214.
- Maltas A., Charles R., Jeangros B., Sinaj S., 2013. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland. *Soil and Tillage Research*. **126**, 11-18.
- Mukherjee I., 2009. Effect of organic amendments on degradation of atrazine. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. **83** (6), 832-835.
- Nevens F., Reheul D., 2005. Agronomical and environmental evaluation of a long term experiment with cattle slurry and supplemental inorganic N applications in silage maize. *European Journal of Agronomy*. **22** (3), 349-361
- Vandenbergh C., Mohimont A. C., Garot T., & Marcoen J. M., 2004. The agricultural area survey as a tool for implementing the European Nitrates Directive in the Walloon Region of Belgium. In : Hatch D.J., Chadwick D. R., Jarvis S. C. & Roker J. A., *Controlling nitrogen flows and losses*. Wageningen, Netherlands: Wageningen Academic Publishers., 93-96. <http://hdl.handle.net/2268/92932>
- Vandenbergh C., Bontemps P.-Y., Lambert R., Peeters A., & Marcoen J. M., 2005. Implementation of the Nitrate Directive in Belgium : the Agricultural Surface Survey. In : Schröder J. J. & Neeteson, *N management in agrosystems in relation to the Water Framework Directive*. Wageningen, the Netherlands: Plant Research International, 332-334. <http://hdl.handle.net/2268/63420>
- Vandenbergh C., 2010. Mise en relation de l'évolution de l'agriculture et de la qualité de l'eau entre 1950 et 2000. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **14** (S1), 9-16.

<http://hdl.handle.net/2268/32714>

Vandenberghé C., Colinet G., Destain J-P. & Marcoen J. M., 2013a. Mise en œuvre de la révision du Programme d'action lié à la Directive Nitrates. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **17 (S1)**, 161-163. <http://hdl.handle.net/2268/147724>

Vandenberghé C., De Toffoli M., Bachelart F., Imbrecht O., Lambert R., & Marcoen J. M., 2013b. Contrôle de l'azote potentiellement lessivable dans le sol en début de période de lixiviation. Etablissement des valeurs de référence. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **17 (S1)**, 231-236. <http://hdl.handle.net/2268/147729>

Vandenberghé C. & Colinet, G. (2014, February 26). Estimation of the soil nitric nitrogen concentration at plot scale. Impact of the sampling density on the result's precision. Poster session presented at Day of the Young Scientists, Bruxelles, Belgique. <http://hdl.handle.net/2268/164474>

Vanden Nest T., Vandecasteele B., Ruyschaert G., Coughnon M., Merckx R., 2014. Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C levels, crop yield and P leaching in a long term trial on a silt loam soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **197**, 309-317.

West P. W. & Lyles G. L., 1960. A new method for the determination of nitrates. *Analytica Chimica Acta*. **23**, 227-232.

Whitmore A.P., Bradburg N.J. and Johnson P.A., 1992. Potential contribution of ploughed grassland to nitrate leaching. *Agriculture, Ecosystem and Environment* **39**, 3-4, 221-233.

## Chapitre 4 Valorisations additionnelles de l'APL

### ***1 Utilisation de l'APL pour un conseil de fertilisation idoine***

#### **1.1 Introduction**

Depuis la mise en œuvre en région wallonne de l'indicateur APL, chaque année, un millier d'analyses APL est réalisé en novembre.

En plus de constituer un indicateur de la performance de gestion de l'azote (comparaison aux valeurs de référence) et un indicateur de risque environnemental (Chapitre 2 Définition de l'APL), il est opportun de s'interroger sur la possibilité d'utiliser ces résultats en vue d'un conseil de fertilisation pour la culture qui suivra la mesure de l'APL.

Le conseil de fertilisation s'appuie sur la méthode du bilan :

Exportations	-	Fournitures	= Solde
besoins de la culture		reliquat azoté en sortie d'hiver	reliquat azoté à la récolte
		minéralisation de l'humus	
		effet des engrais de ferme	
		effet du précédent cultural	
		engrais (=conseil de fertilisation)	

Pour l'estimation des fournitures et plus spécifiquement en ce qui concerne l'azote présent dans le sol, la mesure est réalisée à la sortie de l'hiver pour deux raisons :

- à cette période, les pertes par lixiviation sont généralement très faibles (sauf fin d'hiver très pluvieuse). Le biais éventuel est donc peu important ;
- la culture n'est pas encore en place (culture de printemps) ou, si elle l'est (culture d'hiver), les prélèvements déjà effectués par celle-ci sont faibles (sauf colza). Les besoins de la culture sont donc bien connus.

En utilisant les valeurs d'APL (mesurées avant la lixiviation), on comprend immédiatement que le biais pourrait être plus important. Il est donc nécessaire d'en estimer son ampleur et d'analyser les facteurs (culture précédente, région agricole, lame drainante) qui pourraient la conditionner afin d'éventuellement pouvoir utiliser les APL pour établir des conseils de fertilisation.

#### **1.2 Méthodologie**

Pour évaluer la possibilité d'utiliser l'APL en vue d'un conseil de fertilisation idoine, il convient d'observer et d'établir si possible entre l'APL et le reliquat azoté mesuré au printemps.

Deux approches sont envisagées.

La première (§1.3. Résultats à partir de moyennes APL régionales) s'appuie sur un volume de données important (plusieurs centaines par an) mais pour lesquelles d'une part, les mesures d'APL et de reliquat azoté au printemps n'ont pas été réalisées dans les mêmes parcelles et d'autre part, les informations relatives à la parcelle sont peu nombreuses (région agricole, précédent cultural). Trois années de mesures sont disponibles pour tenter d'observer cette éventuelle relation entre APL et reliquat azoté au printemps.

La seconde (§ 1.4. « Résultats à partir de données APL à la parcelle ») s'appuie sur un volume de données réduit (plusieurs dizaines par an) mais pour lesquelles d'une part, les mesures d'APL et de reliquat azoté sont effectuées dans les mêmes parcelles et d'autre part, les informations relatives à la parcelle sont plus nombreuses (type de sol, précédents culturaux, fertilisation appliquée). Par ailleurs, dans ces séries de données, tous les APL sont mesurés à la même période (première décennie de décembre). Dix années de mesures sont disponibles pour tenter d'observer cette éventuelle relation entre APL et reliquat azoté au printemps.

La performance de ces deux approches sera comparée à l'utilisation d'une base de données de RSH<sup>22</sup> constituée annuellement pour la prédiction d'un RSHP<sup>23</sup> en fonction de divers critères. L'avantage de cette approche est également son inconvénient : il n'est pas nécessaire d'avoir une observation APL (→ méthode utilisable pour toutes les parcelles) mais un contexte peu courant en automne (par exemple une APL élevée) n'est pas pris en compte dans l'estimation du RSHP.

### **1.3 Résultats à partir de moyennes APL régionales**

En première approche, seules les associations culture/région agricole comportant au moins dix observations tant en entrée d'hiver (APL) qu'en sortie d'hiver (reliquat azoté de printemps) sont considérées.

La figure suivante (figure 4-1) illustre les résultats (médiane des observations) pour quelques associations culture/région agricole au cours des hivers 2008-2009 et 2009-2010.

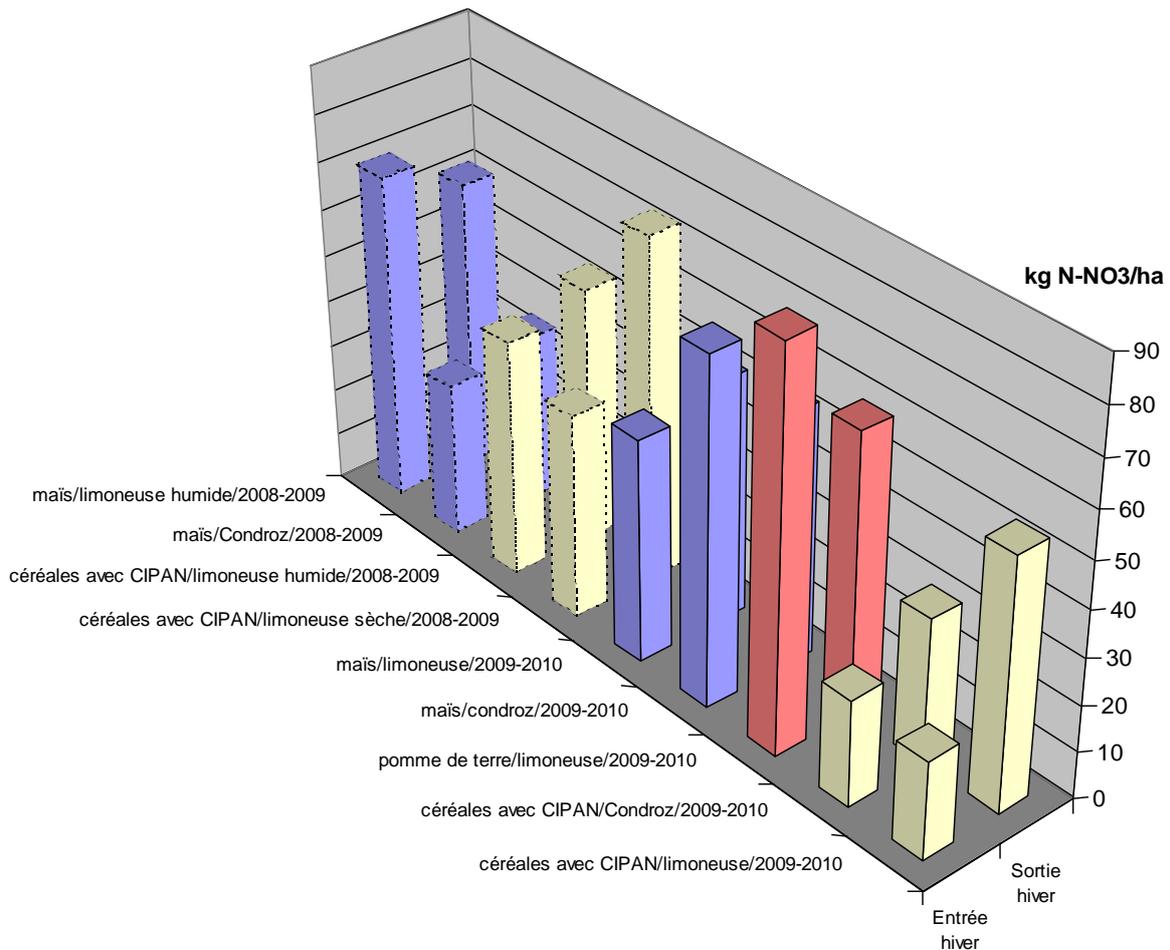
Au cours d'un même hiver et pour une même culture (exemple du maïs en 2008-2009), on observe d'une part, une variabilité importante entre régions agricoles et d'autre part une anisotropie dans l'évolution du reliquat azoté au cours de l'hiver : tendance à la diminution en région limoneuse humide et à l'augmentation en Condroz.

L'impact du régime hydrique peut être observé pour le maïs. L'hiver 2008-2009 (décembre 2008 à février 2009) a été caractérisé par une pluviométrie conforme à la normale (195 mm) tandis que l'hiver 2009-2010 a été particulièrement humide (265 mm). Cet effet semble être visible pour le maïs en région limoneuse : le reliquat azoté a diminué au cours de l'hiver 'humide' et est resté plus ou moins constant au cours de l'hiver 'normal' ; ceci ne voulant pas dire qu'il n'y ait pas eu de perte mais plutôt que la lixiviation a, en moyenne, été compensée par la minéralisation.

---

<sup>22</sup> Reliquat azoté dans le sol en Sortie d'Hiver

<sup>23</sup> Reliquat azoté dans le sol en Sortie d'Hiver Prédit



**Figure 4-1. Comparaison entrée et sortie hiver pour quelques associations culture/région agricole au cours des hivers 2008-2009 et 2009-2010.**

Le même constat ne peut cependant être réalisé pour les céréales avec CIPAN.

En conclusion, il apparaît que les données APL à l'échelle régionale ne peuvent être utilisées en vue d'estimer un reliquat azoté au printemps. Les causes, déjà pressenties en introduction, résident dans la variabilité des résultats APL ainsi que dans la méconnaissance du contexte précis où la mesure est réalisée.

#### **1.4 Résultats à partir de données APL à la parcelle**

Cette évaluation a été menée via les étapes suivantes :

1. Constitution des couples APL – RSH ; l'APL étant discrétisé en trois résultats correspondant aux trois couches sondées
2. Classement des couples par précédent (la culture récoltée l'année de la mesure de l'APL)
3. Elaboration d'une équation de régression (y compris analyse de la variance), pour chaque précédent, entre le RSH et l'APL :  $RSH = fct(APL)$
4. Estimation du RSH pour chaque parcelle à l'aide de l'équation
5. Comparaison du RSH estimé au RSH mesuré (médiane, Q1, Q3 des différences entre mesures et estimations)

Les régressions ainsi établies ont été régulièrement améliorées par la prise en compte des éléments suivants :

- le délai (en jours) entre la mesure de l'APL et la mesure du RSH ;
- la pluviométrie mensuelle des mois de décembre, janvier et février ;
- dans le cas d'un précédent céréale, la précision de la céréale (froment ou escourgeon) et de l'éventuel engrais de ferme (à action rapide ou à action lente) après la récolte de la céréale.

Le tableau 4-1 illustre la qualité de la relation pour les sept précédents étudiés.

**Tableau 4-1. Evaluation (médiane, 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartile) de l'erreur (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) de prédiction du RSH**

Précédent	Effectif	Q1	Médiane	Q3
Betterave	45	9	20	36
Céréale + CIPAN	85	7	18	26
Céréale sans CIPAN	39	5	10	16
Maïs	54	7	14	29
Pomme de terre	20	5	11	15
Colza	22	2	4	8
Légumes	21	7	12	21

L'examen de ce tableau indique que pour la majorité des précédents, plus de la moitié des prédictions est entachée d'une erreur supérieure à 10 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et que pour quatre précédents (betterave, céréale avec CIPAN, maïs et légumes), dans un cas sur quatre, l'erreur est supérieure à 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

Il convient de rappeler que les observations utilisées pour établir ces régressions proviennent de la base de données des résultats enregistrés dans les parcelles des exploitations agricoles du Survey Surfaces Agricoles encadrées par GRENeRA. Dans ces parcelles, l'APL est mesuré à deux reprises : fin octobre et début décembre.

Dans un premier temps, seuls les couples APL<sub>décembre</sub> – RSH ont été valorisés. Dans un second temps, les couples APL<sub>octobre</sub> – RSH ont été ajoutés à la base de données pour ainsi doubler le nombre d'observations. Cet ajout a régulièrement dégradé la qualité de la prédiction.

La prédiction du RSH à partir d'une mesure APL à la parcelle a également été tentée (Petit, 2012) par une méthodologie plus complexe (réseaux de neurones artificiels) mettant en œuvre des observations nettement plus documentées d'un point de vue pédologique (granulométrie, teneur en carbone organique total, perméabilité), qu'agronomique (précédent cultural, fertilisations azotées) et climatique (pluviométrie, température). Cette approche apporte une légère amélioration aux prédictions mais requiert un investissement plus important dans l'acquisition de données. L'analyse de sensibilité réalisée a mis en évidence l'importance de la fraction sableuse dans la prédiction. Cet impact du facteur sol sur le RSH a également été observé par Beaudoin et al. (2005) et Thorup-Kristensen and Dresboll (2010).

D'autres travaux de prédiction du RSH ont été initiés par Gaillard (2012), dans le cadre d'un projet européen (SUN – Sustainable Use of Nitrogen). Dans ce cas, les prédictions ont été réalisées à l'aide d'un modèle physiquement basé (Azofert ®) (Malta et al., 2015). La performance de prédiction est comparable à celle observée pour les deux méthodes précitées.

Par ailleurs, en région wallonne, une culture semée/plantée au printemps suit généralement une culture récoltée en été (Leteinturier et al., 2007). Au cours de cette période d'interculture, le PGDA impose le semis d'une CIPAN. Thorup-Kristensen (1994) et Möller and Reents (2009) ont montré que dans ces conditions, le RSH dépendait fortement du type de CIPAN (espèce(s) semée(s)) et de sa durée de végétation.

## 1.5 Estimation à partir d'observations réalisées au printemps

Depuis 2009, GRENeRA collecte et diffuse 'en temps réel' des résultats d'analyse de sol réalisées en sortie d'hiver en vue de conseils de fertilisation. Ces résultats proviennent de l'asbl Nitrawal et des deux membres scientifiques (GxABT-GRENeRA et UCL) de Nitrawal.

La diffusion (une à deux fois par semaine entre mi-février et début avril) d'une synthèse de ces résultats via le site internet de Nitrawal permet aux agriculteurs d'élaborer un conseil de fertilisation idoine ; c'est-à-dire sans mesure de reliquat azoté dans les parcelles pour lesquelles ils établissent ces conseils.

L'analyse de la distribution des résultats par précédent (à titre d'exemple, figure 4-2) permet d'évaluer l'erreur que l'on peut commettre en utilisation ces valeurs moyennes.

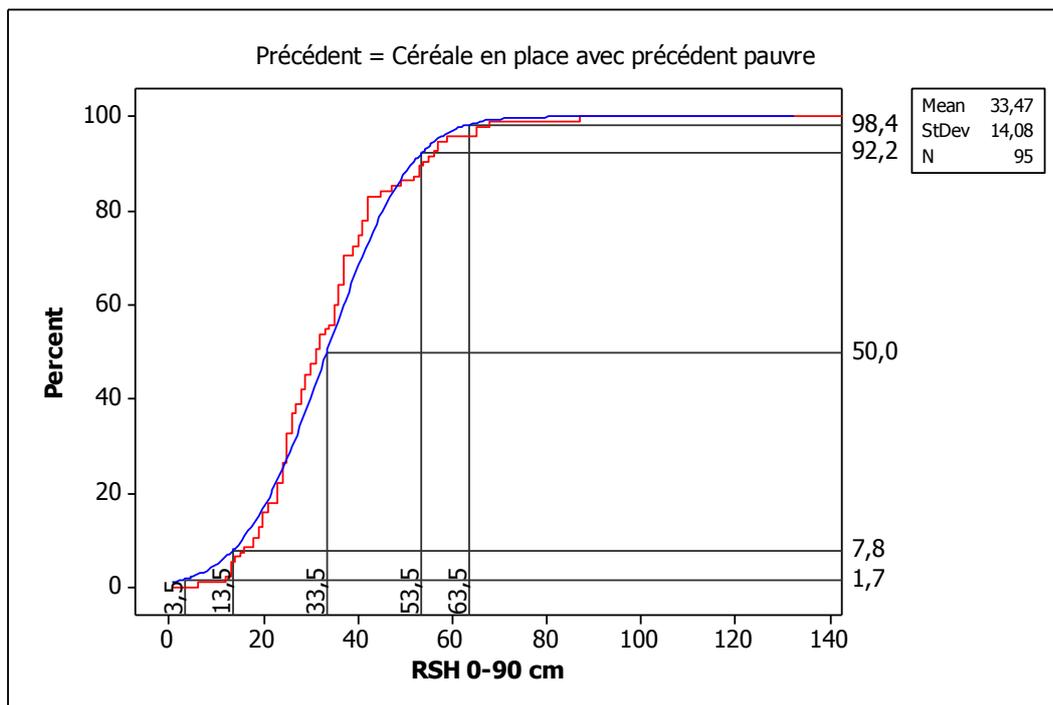


Figure 4-2. Distribution de fréquence des observations réalisées en céréale avec précédent pauvre.

Les observations sont discrétisées en fonction des critères suivants :

- culture précédente
- culture éventuellement en place (colza ou céréale)
- région agricole
- application d'engrais de ferme après la récolte
- présence d'une CIPAN si récolte estivale
- période de mesure du RSH

L'examen de ces distributions indique que dans le cas de cultures en place (céréale ou colza), on ne commet une erreur supérieure à 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> que dans 10 à 15% des cas. Par contre, en sol nu (souvent après un maïs ou une céréale), ce même niveau d'erreur est observé dans près de 40% des situations.

Ces constatations indiquent qu'il convient, pour un agriculteur, de privilégier la mesure d'un RSH dans une parcelle devant faire l'objet d'un semis/plantation au printemps.

## **1.6 Conclusion**

Trois approches de prédiction du RSH ont été évaluées. La première, réalisée à partir d'une moyenne d'observations menées en entrée d'hiver (APL) et en sortie d'hiver (RSH) n'a pas livré de résultats performants : la prédiction est relativement médiocre.

La seconde, applicable pour des parcelles dans lesquelles l'APL a été mesuré, permet une prédiction presque satisfaisante : dans la moitié des cas, l'erreur sera inférieure à  $15 \text{ kg N-NO}_3.\text{ha}^{-1}$ . Cependant, cette approche n'est applicable que si l'APL est connu et mesuré assez tardivement en automne et elle nécessite également la connaissance de la pluviométrie mensuelle de décembre à janvier.

La troisième ne s'appuie que sur des observations moyennes de RSH collectée par Nitrawal et ses membres scientifiques. Elle est simple d'utilisation (synthèse disponible sur le site internet de Nitrawal) et offre un niveau de précision largement suffisant lorsque la parcelle est occupée par une culture d'hiver (colza ou céréale). Par contre le niveau de précision est insuffisant lorsque le sol est nu en sortie d'hiver. Dans ce cas de figure, il revient à l'agriculteur ou au conseiller Nitrawal d'évaluer en fonction des pratiques mises en œuvre sur la parcelle si le RSH se situe à proximité du premier ou du troisième quartile des observations.

Ces trois approches sont développées de manière exhaustive en annexe 2.

## **2 Utilisation de l'APL pour l'évaluation du risque de lixiviation lié à certaines pratiques agricoles**

---

### Référence de l'article

Vandenbergh, C., Detoffoli M., Lambert R., Colinet G. (2016). *L'épandage d'engrais de ferme avant le semis d'une CIPAN présente-t-il un risque important de lixiviation de nitrate ?* *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* **20** (2), 143-150.

(<http://hdl.handle.net/2268/194891>)

### Résumé

**Description du sujet.** La transposition de la Directive Nitrates en région wallonne (Belgique), autorise l'épandage estival d'engrais de ferme à condition qu'une culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN) soit semée avant le 15 septembre pour préserver la qualité des eaux.

**Objectif.** L'étude consiste à établir si cette pratique est de nature à constituer un risque plus important que l'absence de toute intervention en période d'interculture.

**Méthode.** L'étude s'appuie sur des mesures de reliquat d'azote nitrique dans le sol réalisées dans des parcelles de références et lors de contrôles en début de période de lixiviation ; cette mesure étant indicatrice du risque de contamination des eaux souterraines.

**Résultats.** Entre 2008 et 2013, les analyses réalisées lors de contrôles ont montré que la présence d'une CIPAN (l'apport et le type d'engrais de ferme n'est pas connu) conduit à une médiane des observations plus faible (différence très hautement significative) que l'absence de toute intervention au cours de l'interculture. Au cours de la même période, les observations réalisées dans des parcelles de référence ont conduit à un constat similaire. De plus, dans ces parcelles de référence, il a été montré que la nature de l'engrais de ferme (à action lente ou rapide) n'engendre pas de différence significative entre les reliquats azotés moyens observés.

**Conclusion.** L'apport d'engrais de ferme suivi du semis d'une CIPAN ne présente pas un risque plus important pour la qualité de l'eau qu'une céréale suivie d'une culture semée en automne sans CIPAN et sans apport d'engrais de ferme au cours de la courte interculture.

**Mots clés :** pratiques agricoles, nitrate, pollution de l'eau, fumier, lisier, culture intermédiaire piège à nitrate.

## 2.1 Introduction

En région wallonne (Belgique), les céréales occupent environ la moitié de la superficie des cultures annuelles, le reste étant occupé par du maïs, de la betterave, du colza, de la pomme de terre ou des légumineuses. Après la récolte des céréales, suit soit une culture dite d'hiver (céréale, colza) semée en automne, soit une culture mise en place au printemps (betterave, maïs, pomme de terre) (Leteinturier et al, 2007).

Dans ce second cas de figure, ces cultures 'de printemps' constituent des têtes de rotations pour lesquelles les quantités de phosphore et potassium à apporter sont souvent assez élevées (entre 50 et 100 kg P/ha, entre 100 et 200 kg K/ha). Elles dépendent de la fertilité de la parcelle (Genot et al, 2011a ; Genot et al, 2011b) et des besoins de la tête de rotation. Pour couvrir ces besoins, les engrais de ferme (fumier, lisier, fientes) constituent une base importante de la fumure. Pour des raisons agronomiques (bonne homogénéisation dans le sol avant labour, limitation de la compaction avant installation de la culture de printemps) et environnementales (interdiction d'épandage sur sol gelé), ces matières sont régulièrement apportées avant l'automne qui précède la culture 'tête de rotation'.

En plus de contenir du phosphore et du potassium, ces matières renferment également de l'azote sous forme minérale (essentiellement ammoniacal) et organique avec des teneurs variables en fonction de la matière (lisier, fumier, fientes) et du cheptel producteur (bovin, porcin, volaille) (Genot et al, 2011b). La part d'azote ammoniacal ainsi que le rapport carbone/azote constituent les deux critères qui permettent de classer<sup>24</sup> l'engrais de ferme sur base de sa vitesse d'action pour sa valorisation dans le cadre du raisonnement de la fertilisation azotée (figure 4-3). Un engrais de ferme à action rapide tel que du lisier ou des fientes aura donc tendance à libérer assez vite de l'azote minéral alors que dans le cas d'un engrais de ferme à action lente tel que du fumier bovin, cette cinétique sera plus lente (Burger M., 2008 ; Cooper et al, 2011).

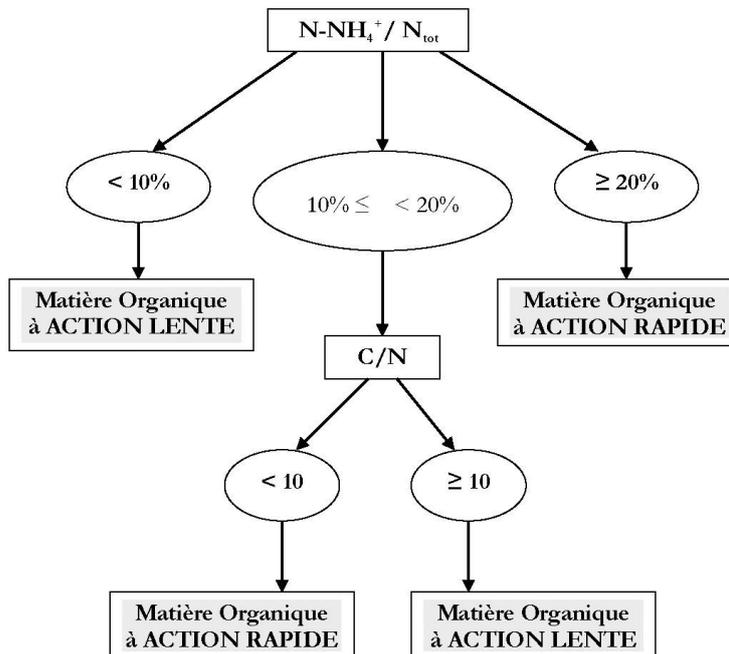


Figure 4-3. Détermination de la nature (action rapide – action lente) d'un engrais de ferme (Source : J-P. Destain et M. Thirion, 2004).

<sup>24</sup> Annexe XXV du Code de l'eau

(<http://environnement.wallonie.be/legis/Codeenvironnement/codeeaucoordonneR.html>)

Le Code de l'Eau, transposition de la Directive Cadre sur l'Eau (réf. 2000/60/CE) et plus spécifiquement le Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA), transposition de la Directive Nitrates (réf. 91/676/CEE) en vigueur en région wallonne tient compte de cette différence, entre autres en matière de période d'épandage, de dose et de gestion de la parcelle après l'apport d'un engrais de ferme.

Ainsi et à titre d'exemple, en ce qui concerne les engrais de ferme à action rapide, tout apport est interdit dès le 16 septembre et, du 1<sup>er</sup> juillet au 15 septembre, chaque apport doit être suivi par le semis d'une culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN) telle que de la moutarde (*Sinapis alba*) ou de la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) (liste non exhaustive) ou par une culture dite 'd'hiver' car semée avant l'hiver. Dans ce dernier cas, l'apport d'engrais de ferme est limité à l'équivalent de 80 kgN.ha<sup>-1</sup>.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer si l'épandage estival d'un engrais de ferme et plus particulièrement d'un engrais de ferme à action rapide avant la mise en place d'une CIPAN présente un risque accru pour la qualité de l'eau par comparaison de divers scénarios de pratiques agricoles après récolte d'une céréale en été.

Cette évaluation est réalisée par l'examen de reliquats d'azote nitrique dans le sol en entrée d'hiver (plus communément appelé *azote potentiellement lessivable* ou APL) observés dans ces scénarios. Fonder et al (2010) et Deneufbourg et al (2013) ont montré par des suivis lysimétriques en plein champ que l'APL est un bon indicateur du risque pour la qualité de l'eau dans le contexte pédo-climatique de la zone vulnérable<sup>25</sup> wallonne.

Les résultats APL proviennent d'observations réalisées dans un réseau de parcelles de référence (Survey Surfaces Agricoles) ou menées dans le cadre du contrôle des agriculteurs situés en zone vulnérable.

## **2.2 Matériel et méthodes.**

### **2.2.1 Matériel**

#### ***1 Le Survey Surfaces Agricoles***

En 2001, dans le cadre de la mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture, Gembloux Agro-Bio Tech (ULg) et Earth and Life Institute (UCL) ont mis en place un réseau de points d'observation situés en zone vulnérable. Ces points, distribués dans environ 200 parcelles de 25 exploitations agricoles situées en zone vulnérable, ont été choisis de manière à être représentatifs tant d'un point de vue pédologique qu'agronomique (successions culturales, cheptel) des exploitations agricoles situées dans les quatre zones vulnérables de l'époque (Vandenberghe and Marcoen, 2004a ; Vandenberghe et al, 2004b)

Dans ces exploitations, des « parcelles de référence » font chaque année l'objet d'un conseil de fertilisation azotée établi par les laboratoires des services agricoles provinciaux sur base de la méthode du bilan prévisionnel (prise en compte des besoins de la culture, des restitutions par le sol, ...) (Destain et al, 2003) et communiqué aux agriculteurs. Des mesures de reliquat azoté dans le sol sont régulièrement réalisées peu après la récolte pour vérifier la qualité et le respect du conseil de fertilisation.

Chaque automne, des prélèvements de sol sont à nouveau réalisés dans ces parcelles pour évaluer le stock d'azote nitrique en début de période de lixiviation du nitrate. Ces observations, nommées APL (Azote Potentiellement Lessivable), servent de base à l'élaboration des références annuelles (Vandenberghe et al, 2005, Vandenberghe et al, 2013) à partir desquelles des agriculteurs situés en zone vulnérable sont évalués (voir paragraphe 2.1.2).

---

<sup>25</sup> au sens de la Directive Nitrate

Depuis 2008, plus de 600 observations sont ainsi réalisées (en sortie d'hiver, à la récolte et/ou en début de période de lixiviation) chaque année dans ces parcelles de référence. Ces observations sont interprétées à la lumière des pratiques (successions culturales, gestion de l'interculture, fertilisation azotée, ...) mises en œuvre par les agriculteurs sur ces parcelles.

En 2013, suite aux extensions des zones vulnérables lors des révisions successives du PGDA, le Survey Surfaces Agricoles a été étendu et compte actuellement environ 260 parcelles de référence distribuées dans 40 exploitations agricoles.

## 2 Le contrôle en zone vulnérable

Depuis 2008, le Service Public de Wallonie (SPW) a mis œuvre un contrôle APL dans un minimum de 3% des exploitations agricoles situées en zone vulnérable. En 2013, le SPW a ainsi fait réaliser 2.200 analyses 'APL', essentiellement entre le 15 octobre et le 15 novembre, dans un peu plus de 700 exploitations agricoles.

Contrairement au Survey Surfaces Agricoles, l'itinéraire technique dans ces exploitations n'est pas connu. Le seul critère de stratification des résultats APL réside dans les modalités d'interculture au moment de l'échantillonnage de sol :

1. présence d'une CIPAN régulièrement avec apport préalable d'engrais de ferme (cette dernière information n'est pas connue) (figure 2 - scénario 3c)
2. présence d'une culture dite 'd'hiver' (figure 2 - scénario 4)

### 2.3 Méthodes

La démarche de l'article est d'évaluer si l'apport d'engrais de ferme en été est de nature à constituer un risque de lixiviation importante de nitrate au cours de l'hiver. Cette évaluation est réalisée par la comparaison des résultats APL observés dans quatre scénarios post récolte céréale (figure 4-4) :

- scénario 1 : céréale suivie d'un sol nu au cours de l'automne-hiver
- scénario 2 : céréale suivie d'une CIPAN
- scénarios 3 : céréale suivie d'un apport d'engrais de ferme et d'une CIPAN
- scénario 4 : céréale suivie d'un colza ou d'une céréale sans apport d'engrais de ferme

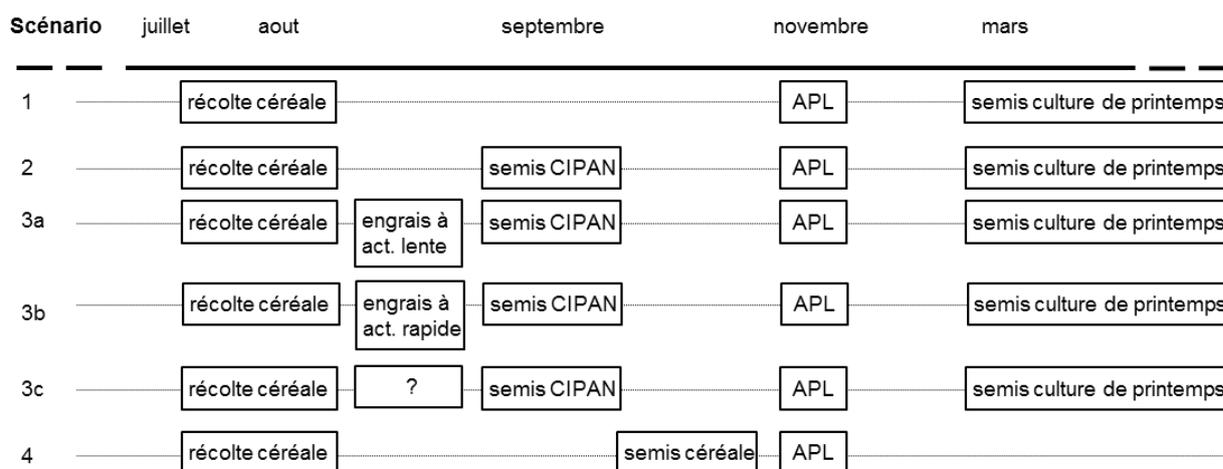


Figure 4-4. Scénarios de pratiques agricoles.

Pour pouvoir valablement estimer le stock d'azote nitrique dans le sol, au moins 15 prélèvements de sol sont effectués pour constituer un échantillon composite (Vandenberghe et Colinet, 2014). Chaque prélèvement est subdivisé en trois couches successives de 30 cm pour atteindre ainsi la profondeur de 90 cm.

Ces échantillons sont acheminés, dans un conteneur thermiquement isolé, à un laboratoire agréé par le SPW. Ils sont analysés immédiatement ou stockés en chambre froide (1°C à 4°C) pendant au maximum cinq jours avant analyse.

Les échantillons, non séchés, sont homogénéisés par tamisage (8mm). Immédiatement après tamisage, l'extraction de l'ion nitrate se réalise sur une partie aliquote de minimum 30 grammes (constitués en 4 à 5 prises dans l'échantillon tamisé) d'échantillon par une solution KCl 0,1N. Le rapport d'extraction (poids de terre/volume de solution d'extraction) est de 1/5<sup>ème</sup>. Les flacons sont placés dans un agitateur rotatif pendant 30 minutes. La solution est ensuite laissée au repos pendant 30 minutes pour décantation. Le dosage du nitrate est effectué sur le surnageant qui, selon la méthode de dosage, est préalablement filtré ou centrifugé.

Si le dosage n'est pas effectué endéans les trois heures qui suivent l'extraction, les extraits sont stockés en chambre froide, à une température maximale de 4 °C, à l'abri de la lumière pendant une durée maximale de 48 heures ou sont congelés.

Le dosage est effectué selon l'une des méthodes suivantes :

- la méthode colorimétrique de dosage direct du nitrate par l'acide chromotropique (West & Lyles, 1960);
- la méthode colorimétrique de dosage direct du nitrate par la brucine (Baker, 1967);
- la méthode colorimétrique de réduction du nitrate en nitrite (à l'aide notamment de cadmium ou d'hydrazine) avec dosage de l'ion nitrite par la réaction de Griess-Ilosvay modifiée (Bremner, 1965; Guiot 1975).

Le résultat obtenu est exprimé en kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> en tenant compte de la teneur en eau de l'échantillon de sol (24h de séchage à 105°C), de la charge caillouteuse, d'une densité de 1.35 g.cm<sup>-3</sup> pour la couche 0-30 cm et de 1.5 g.cm<sup>-3</sup> pour les deux couches sous-jacentes.

Le traitement statistique (analyse de la variance et test de Mann-Withney) des résultats a été effectué à l'aide du logiciel Minitab® 17.1.0.

## 2.4 Résultats

### 2.4.1 Le Survey Surfaces Agricoles

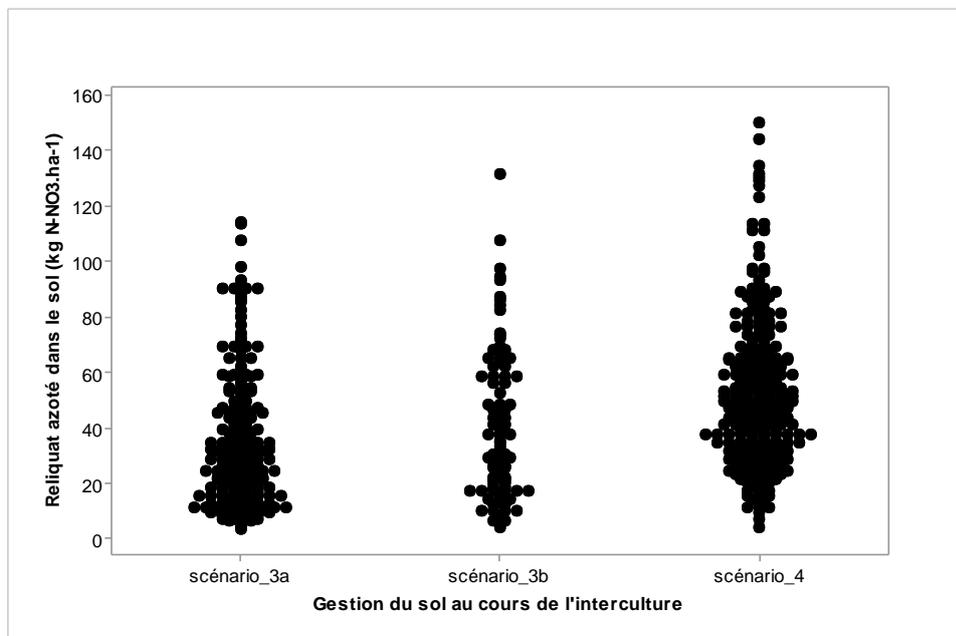
Le tableau 4-2 résume les résultats d'analyses APL réalisées entre 2008 et 2013 dans les exploitations de référence.

**Tableau 4-2. Synthèse des résultats (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>, 0-90 cm) APL dans le Survey Surfaces Agricoles entre 2008 et 2013.**

SCENARIO	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
3a	214	34,33	23,90	3,00	15,75	28,00	47,00	114,00
3b	94	40,91	26,62	4,00	17,75	37,00	59,00	131,00
4	311	51,32	25,84	4,00	32,00	48,00	65,00	150,00

La figure 4-5 illustre la dispersion des observations dans les trois catégories étudiées :

- céréale suivie d'un apport d'engrais de ferme à action lente et du semis d'une CIPAN (figure 2 – scénario 3a) ;
- céréale suivie d'un apport d'engrais de ferme à action rapide et du semis d'une CIPAN (figure 2 – scénario 3b) et
- céréale non suivie d'une CIPAN et suivie d'une culture semée en automne (figure 2 – scénario 4).



**Figure 4-5. Distribution des résultats pour trois catégories de parcelles (scénarios) du Survey Surfaces Agricoles.**

Les quelques valeurs élevées observées dans les parcelles ayant fait l'objet d'un apport d'engrais de ferme (à action rapide ou lente) suivi d'un semis de CIPAN sont souvent imputables au mauvais développement de la CIPAN (observations de terrain non quantifiées).

Cette figure met en évidence la non-normalité de la distribution des résultats dans ces trois populations. Cette observation visuelle est confirmée par un test d'Anderson-Darling ( $P$ value < 0.005). Cette condition n'est cependant pas requise pour pouvoir réaliser une analyse de la variance (Dagnelie P., 1999). Celle-ci nécessite cependant, dans le cas de populations à effectifs différents (tableau 1), une égalité des variances. Le test de Levene indique que l'hypothèse d'égalité des variances peut être acceptée ( $\alpha = 0.05$ ,  $P=0.25$ ).

L'analyse de la variance met en évidence une différence très hautement significative ( $P$ value <  $10^{-4}$ ) entre ces trois catégories de parcelles. L'examen de la figure 4-6 ainsi que le résultat d'un test de Tukey indiquent que les parcelles de céréale suivie d'une culture d'hiver ou de printemps (sans semis d'une CIPAN en interculture) présentent un résultat moyen plus élevé que les parcelles de céréale ayant fait l'objet d'un apport d'engrais de ferme (à action rapide ou à action lente) avant le semis d'une CIPAN. Par ailleurs, ce même test révèle qu'en présence d'une CIPAN, le type d'engrais de ferme épandu (action rapide ou action lente) n'a pas d'impact significatif sur le reliquat azoté mesuré en début de période de lixiviation.

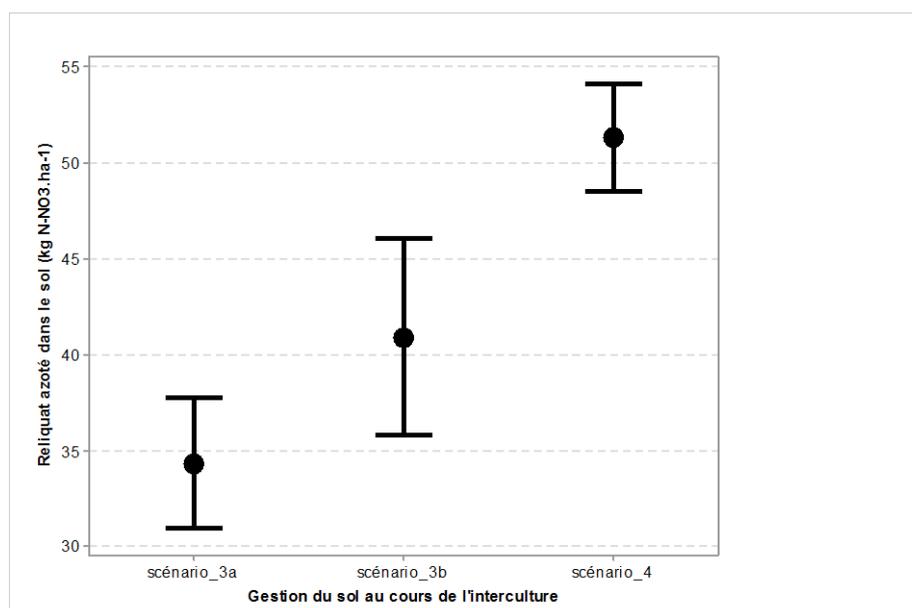


Figure 4-6. Moyennes et intervalles de confiance (95%), par catégorie de parcelles (scénarios), des résultats enregistrés dans les parcelles du Survey Surfaces Agricoles entre 2008 et 2013.

#### 2.4.2 Le contrôle en zone vulnérable

Le tableau 4-3 donne un résumé des 3600 résultats de contrôles APL commandés par le SPW entre 2008 et 2013 dans des parcelles de céréale suivie d'une CIPAN (avec régulièrement un apport préalable d'engrais de ferme) (figure 4-4 – scénario 3c) et dans des parcelles de céréale suivies d'une culture d'hiver (figure 4-4 – scénario 4).

Tableau 4-3. Synthèse des résultats (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>, 0-90 cm) APL lors du contrôle SPW entre 2008 et 2013.

SCENARIO	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
3c	1905	40,800	31,793	3,000	17,000	32,200	54,455	265,000
4	1676	60,979	37,751	2,000	35,043	54,890	78,023	284,600

Ce tableau renseigne une différence d'environ 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> entre ces deux catégories de parcelles. Tout comme dans le cas du Survey Surfaces Agricoles, les résultats ne sont pas normalement distribués (figure 4-7). Cette observation visuelle est confirmée par un test d'Anderson-Darling (Pvalue < 0.005).

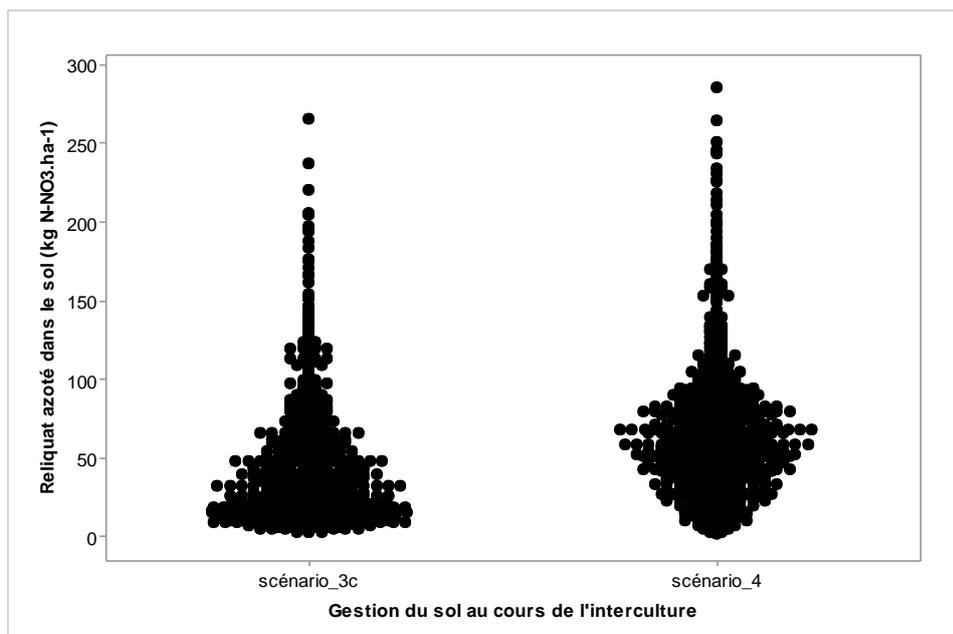


Figure 4-7. Distribution des résultats pour deux catégories de parcelles (scénarios). Contrôle SPW 2008-2013.

Le test (Levene) d'égalité des variances indique que celle-ci sont différentes ( $\alpha = 0.05$ ,  $Pvalue < 10^{-3}$ ), interdisant l'exécution d'une analyse de la variance. Le résultat du test non paramétrique de Mann-Whitney met néanmoins en évidence une différence très hautement significative ( $Pvalue < 10^{-4}$ ) entre les médianes (tableau 2) de ces deux populations.

## 2.5 Discussion

La figure 4-4 résume les scénarios comparés dans le cadre de cette étude. Les observations relatives aux scénarios 1 et 2 (tableau 4-4) sont extraites d'une revue bibliographique d'études menées principalement dans le contexte pédo-climatique de la région wallonne ou dans un contexte pédo-climatique proche. Dans ce tableau, la présence d'une gamme de valeurs illustre la répétition (spatiale ou temporelle) d'une expérimentation ou la présence de plusieurs objets « CIPAN » dans l'expérimentation.

Tableau 4-4. Synthèse des mesures de reliquat azoté dans le sol en début de période de lixiviation (APL) pour les scénarios 1 (céréale suivie d'un sol nu en automne) et 2 (céréale suivie d'un semis d'une CIPAN sans apport d'engrais de ferme).

Source	APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )	
	Scénario 1	Scénario 2
Tychon <i>et al</i> , 1990	52 (90)	-
Thorup-Christensen <i>et al</i> , 2003	70 (90)	15-20 (90)
Lambert <i>et al</i> , 2004	80 (90)	20 (90)
MacDonald <i>et al</i> , 2005	62 (100)	33-45 (100)
De Toffoli <i>et al</i> , 2010	86 (90)	5-13 (90)
De Toffoli <i>et al</i> , 2010	33 (100)	9-28 (100)
Constantin <i>et al</i> , 2010	49-68 (90)	25-34 (90)
Constantin <i>et al</i> , 2010	49-82 (110)	40-45 (110)
De Toffoli <i>et al</i> , 2013	87-165 (90)	6-28 (90)

(xx) = profondeur d'échantillonnage (cm)

Suite à la mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (transposition de la Directive Nitrates en région wallonne), le scénario 1, assimilable à un scénario 'témoin', est quasiment devenu théorique puisque les agriculteurs exploitant en zone vulnérable ont l'obligation de couvrir par une CIPAN au moins 90% des superficies correspondant à ce scénario ; la non-obligation sur les 10% restants ouvre une fenêtre d'une part pour pouvoir lutter mécaniquement contre les adventices et d'autre part, pour pouvoir anticiper (avant le 15 novembre) un labour hivernal dans des sols naturellement très humides.

L'observation et la comparaison des gammes d'APL dans ces deux scénarios illustrent sans équivoque l'intérêt des CIPAN pour le prélèvement de l'azote nitrique présent dans le sol à la récolte ou produit par la minéralisation de l'humus au cours de l'automne. Ce constat est corroboré par l'importante étude bibliographique réalisée par Justes et al (2012) qui rapporte des prélèvements d'azote par les CIPAN (racines comprises) de 100 à 250 kg.ha<sup>-1</sup>.

L'examen des résultats d'analyses commandées par le SPW montre que la médiane des observations réalisées dans des parcelles de céréale suivie d'une CIPAN (avec régulièrement un apport d'engrais de ferme) (scénario 3c) est inférieure à celle des observations réalisées dans des parcelles de céréale suivie d'une culture semée en hiver (scénario 4).

L'importante variabilité des résultats (tableau 4-3) témoigne de la diversité des pratiques agricoles wallonne, diversité illustrée en France par Hermon et Mignolet (2012) et plus précisément de l'impact de facteurs tels que

- l'année climatique, mis en évidence par Vandenberghe *et al* (2013) ;
- l'espèce de CIPAN semée, mis en évidence par De Toffoli *et al* (2010), Destain *et al* (2010) ;
- la période de semis, mis en évidence par Allison *et al* (1998) ;
- la technique de semis, mis en évidence par De Toffoli *et al* (2012).

L'examen des résultats d'analyses effectuées dans le Survey Surfaces Agricoles confirme et affine ce constat : le semis d'une CIPAN après l'apport d'un engrais de ferme, qu'il soit à action lente (tel que du fumier bovin) (scénario 3a) ou à action rapide (tel que du lisier porcin ou de la fiente de volaille) (scénario 3b), engendre un APL moindre que celui observé dans la succession d'une céréale par une culture semée en fin d'automne (scénario 4).

De Toffoli *et al* (2010) ont comparé l'impact d'un apport d'engrais de ferme à action rapide (40 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de lisier de porc) après récolte de l'escourgeon et avant le semis de CIPAN (scénario 3b), à un témoin (sans apport d'engrais de ferme, sans CIPAN) correspondant au scénario 1. Les auteurs ont mesuré fin novembre un APL inférieur à 13 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> quel que soit l'objet CIPAN<sup>26</sup> étudié. Dans la même plateforme expérimentale, l'APL moyen du témoin atteignait 86 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> à la même date.

Lors d'une autre expérimentation, les mêmes auteurs ont croisé l'effet *plante* (moutarde, phacélie et ray-grass) avec l'effet *engrais de ferme* (fumier de bovin, lisier de porc, fumier de poule, lisier de bovin et compost de déchet vert). L'analyse de la variance a indiqué qu'il n'y avait pas d'effet *engrais de ferme*. Ce constat est similaire à celui réalisé par le traitement des résultats du Survey Surfaces Agricoles (ci-dessus). Par contre, ils ont mis en évidence un effet *plante* : l'APL moyen (tous les engrais de ferme confondus) mesuré fin novembre dans les parcelles de moutarde (18 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) était significativement plus faible que celui observé dans les parcelles de ray-grass et de phacélie (respectivement 28 et 36 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

Enfin, ils ont comparé le scénario 2 (CIPAN sans engrais de ferme) à un scénario 3b (lisier de porc suivi d'un semis de ray-grass) toujours après récolte d'une parcelle d'escourgeon. Les mesures d'APL dans deux objets *lisier* testés (153 et 306 kg N.ha<sup>-1</sup>) ont révélé fin novembre, des APL (38 et 37 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) significativement plus élevés qu'en absence d'apport de lisier (11 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Les auteurs expliquent cette différence par un plus faible développement racinaire du ray-grass illustré par

---

<sup>26</sup> avoine, féverole + moutarde, moutarde, phacélie, radis, ray-grass, trèfle + ray-grass

la part plus importante (environ 90%) de l'APL situé dans la couche 30-90 cm. Par ailleurs, il convient également de rappeler que les CIPAN ont une limite quant au prélèvement d'azote nitrique présent dans le sol (Justes *et al*, 2012) ; ce qui justifie la fixation d'un plafond en matière d'apport d'engrais de ferme.

## **2.6 Conclusions**

L'examen et la comparaison d'observations réalisées après récolte d'une céréale au cours de plusieurs années dans des plateformes expérimentales, dans un réseau des parcelles de référence relativement bien contrôlées (Survey Surfaces Agricoles) ou dans le cadre d'un monitoring à l'échelle de la zone vulnérable (contrôle SPW) a mis en évidence :

- l'intérêt de la CIPAN pour absorber l'azote nitrique produit par la minéralisation automnale (scénario 2 *versus* scénario 1) ;
- le niveau d'APL similaire (pas de différence significative) quel que soit le type d'engrais de ferme apporté (scénario 3a *versus* scénario 3b) ;
- l'intérêt de privilégier une CIPAN à enracinement profond et rapide tel que de la moutarde lorsqu'un effluent à action rapide est épandu (scénario 2 *versus* scénario 3b) ;
- que lorsque la céréale est suivie d'un engrais de ferme et d'une CIPAN avant la culture de printemps, l'APL est significativement plus bas que si cette céréale avait été suivie d'une céréale ou d'un colza semé au cours de l'automne (scénarios 3 *versus* scénario 4).

En conclusion, la valorisation en été d'engrais de ferme, même à action rapide, après récolte d'une céréale n'est pas de nature à constituer un risque accru pour la qualité des eaux souterraines en comparaison à la succession d'une céréale par une autre culture (céréale ou colza) semée au cours de l'automne.

Néanmoins, comme le souligne Beaudoin *et al* (2012), il convient entre autres :

- de s'assurer que le reliquat azoté post récolte est faible (observé dans la majorité des situations après récolte de céréale mais pas après récolte de légumineuses) ;
- de préférer une CIPAN à croissance rapide et profonde telle qu'une crucifère et
- de la semer correctement (proscrire le semis à la volée) et suffisamment tôt pour maximiser son développement et le prélèvement d'azote

Enfin, l'azote apporté lors de l'épandage de l'engrais de ferme et capté par la CIPAN est partiellement destiné à alimenter la culture subséquente. Il importera donc d'intégrer les éléments suivants dans le raisonnement de la fertilisation de cette culture :

- espèce(s) semée(s) (particulièrement en présence d'une légumineuse),
- importance de la biomasse lors de la destruction (gel et/ou enfouissement),
- période de la destruction,
- nature et quantité de l'engrais de ferme apporté.

Les auteurs remercient la Wallonie pour le soutien financier apporté et la mise à disposition des résultats des contrôles APL et les agriculteurs du Survey Surfaces Agricoles pour leur collaboration.

## 2.7 **Bibliographie**

- Allison M.F., Armstrong M.J., Jaggard K.W. & Todd A.D., 1998. Integration of nitrate cover crops into sugarbeet (*Beta vulgaris*) rotations. Management and effectiveness of nitrate cover crops. *Journal of Agricultural Science* **130**, 53-60.
- Baker A.S., 1967. Colorimetric determination of nitrate in soil and plant extracts with brucine. *J. Agric. Food Chem.*, **15** (5), 802-806.
- Beaudoin N., Tournebize J., Ruiz L., Constantin J. & Justes E., 2012. Nitrate et eau en période d'interculture. In Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V. & Tournebize J., 2012. *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques*. Rapport d'étude, INRA (France).
- Bremner J. M., 1965. Inorganic Forms of Nitrogen. In : *Methods of Soils Analysis. Part2*. Black C. A. (ed) American Society of Agronomy. Madison, USA., 1179-1237.
- Burger M., 2008. Nitrogen immobilization and mineralization kinetics of cattle, hog and turkey manure applied to soil. *Soil. Sci. Soc. Am J*, **72**, 1570-1579.
- Constantin J., Mary B., Laurent F., Aubrion G., Fontaine A., Kerveillant P., Beaudoin N., 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol 135 (4). 268-278. [doi:10.1016/j.agee.2009.10.005](https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.10.005)
- Cooper J M., Burton D., Daniel T J., Griffiths B S., Zebarth B J., 2011. Carbon mineralization kinetics and soil biological characteristics as influenced by manure addition in soil incubated at a range of temperatures. *European Journal of Soil Biology*, **47**, 392-399.
- Dagnelie P., 1999. Statistique théorique et appliquée. Tome 2. Inférence statistique à une et deux dimensions. 2<sup>ème</sup> édition. De Boeck Université.
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Heens B. & Marcoen J.M., 2013. Suivi de la lixiviation du nitrate en plein champ par la technique lysimétrique : retour sur huit années d'expérience. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **17**, 177-186. <http://hdl.handle.net/2268/147728>
- Destain J-P, Reuter V., Toussaint B., Goffaux M-J., Martinez M., Oger R., Legrand G., 2003. L'analyse du nitrate dans le sol, son intérêt en vue d'établir un conseil de fumure adapté à la parcelle. L'exemple de la betterave sucrière. asbl Requasud. 20p. [http://www.requasud.be/img/page/publication/ReQuaSud\\_NITRATE.pdf](http://www.requasud.be/img/page/publication/ReQuaSud_NITRATE.pdf) (1/04/2015)
- Destain J-P., Reuter V. & Goffart J-P., 2010. Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) et engrais verts : protection de l'environnement et intérêt agronomique. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **14** (S1), 73-78
- De Toffoli M., Bontemps P-Y. & Lambert R., 2010. Synthèse de résultats d'essais de cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) à l'Université catholique de Louvain. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **14** (S1), 79-90
- De Toffoli M., Decamps C. & Lambert R., 2013. Evaluation de la capacité de cultures intermédiaires à piéger l'azote et produire du fourrage. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **17**, 237-242.
- De Toffoli M, Merchier M, Imbrecht O. & Lambert R, 2012. Cultures intermédiaires piège à nitrate : comparaison de techniques de semis de la moutarde blanche - Synthèse des résultats des expérimentations 2009-2012. Université Catholique de Louvain. 29p. [https://www.uclouvain.be/cps/ucl/doc/sst-agrolouvain/images/UCL\\_12\\_47b\\_technique\\_semis\\_CIPAN\\_2009\\_2012.pdf](https://www.uclouvain.be/cps/ucl/doc/sst-agrolouvain/images/UCL_12_47b_technique_semis_CIPAN_2009_2012.pdf)
- Fonder N., Deneufbourg M., Vandenberghe C., Xanthoulis D. & Marcoen J.M., 2010. Suivi de la

- percolation du nitrate en terres cultivées par la technique lysimétrique. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **14** (S1), 17-26. <http://hdl.handle.net/2268/32735>
- Genot V., Renneson M., Colinet G., Goffaux M-J., Cugon T., Toussaint B., Buffet D., Oger R., 2011a. Base de données sols de Requasud. 3<sup>ème</sup> Synthèse. asbl Requasud. 36p. [http://www.requasud.be/img/page/publication/page\\_sols\\_2012%20VF.pdf](http://www.requasud.be/img/page/publication/page_sols_2012%20VF.pdf) (1/04/2015)
- Genot V., Renneson M., Bock L., Colinet G., Goffaux M-J., Cugon T., Coutisse P., Lizin P., Blondiau L.M., Vanvyve D., Lambert R., Toussaint B., Courtois P., Balon J., 2011b. Un conseil de fumure raisonné. Le cas du phosphore. asbl Réquasud. 15p. [http://www.requasud.be/img/page/publication/Cr2451\\_Requasud\\_LD.pdf](http://www.requasud.be/img/page/publication/Cr2451_Requasud_LD.pdf) (1/04/2015)
- Guiot J., 1975. Estimation des réserves azotées du sol par détermination de l'azote minéral. *Revue Agricole*, **28**, 1117 – 1132.
- Hermon C. & Mignolet C., 2012. Gestion de l'interculture : contexte réglementaire et pratiques agricole. In Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V. & Tournebize J., 2012. *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques*. Rapport d'étude, INRA (France).
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V. & Tournebize J., 2012. *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques*. Rapport d'étude, INRA (France).
- Lambert R., Van Bol V. & Peeters A., 2004. Decrease in the amount of residual nitrate in cultivated land. In : Hatch D.J., Chadwick D.R., Jarvis S.C. & Roker J.A. *Controlling nitrogen flows and losses. 12<sup>th</sup> N Workshop. 21<sup>th</sup>-24<sup>th</sup> September, 2003. Exeter, UK*. Wageningen Academic Publisher. 515-517.
- Leteinturier, B., Tychon, B., Oger, R., 2007. Agronomical and agro-environmental diagnosis of crop sequences in wallonia (Belgium). *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, **11** (1), 235-250.
- <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84907160647&partnerID=40&md5=eaf6d08c01fcc61987331b1d52f045ba> (1/04/2015)
- MacDonald A.J., Poulton P.R., Howe M.T., Goulding K.W.T. & Powlson D.S., 2005. The use of cover crops in cereal-based cropping systems to control nitrate leaching in SE England. *Plant and Soil* **273**. 355-373.
- Thorup-Kristensen K., Magid J., Jensen L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy*, **79**, 227-302.
- Tychon B., Guiot J., Debbaut V. & Vander Borgh P., 1990. Evolution du profil d'azote des sols agricoles du sud de la Belgique. In : Calvet R. Nitrates – Agriculture – Eau. 7<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> november. Paris-La Défense (France). 375-380.
- Vandenbergh, C., & Marcoen, J. M., 2004a. Transposition de la Directive Nitrate (CE) en Région wallonne : azote potentiellement lessivable de référence pour les sols cultivés en Région wallonne. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **8**, 111-118. <http://hdl.handle.net/2268/32606>
- Vandenbergh, C., Mohimont, A. C., Garot, T., & Marcoen, J. M., 2004b. The agricultural area survey as a tool for implementing the European Nitrates Directive in the Walloon Region of Belgium. In : Hatch D.J., Chadwick D. R., Jarvis S. C. & Roker J. A., *Controlling nitrogen flows and losses*. Wageningen, Netherlands: Wageningen Academic Publishers., 93-96. <http://hdl.handle.net/2268/92932>
- Vandenbergh, C., Bontemps, P.-Y., Lambert, R., Peeters, A., & Marcoen, J. M., 2005. Implementation of the Nitrate Directive in Belgium : the Agricultural Surface Survey. In : Schröder J. J. & Neeteson, *N management in agrosystems in relation to the Water Framework Directive*.

Wageningen, the Netherlands: Plant Research International, 332-334.  
<http://hdl.handle.net/2268/63420>

Vandenberghe, C., De Toffoli, M., Bachelart, F., Imbrecht, O., Lambert, R., & Marcoen, J. M., 2013. Contrôle de l'azote potentiellement lessivable dans le sol en début de période de lixiviation. Etablissement des valeurs de référence. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **17**, 231-236. <http://hdl.handle.net/2268/147729>

Vandenberghe, C., & Colinet, G. (2014, February 26). Estimation of the soil nitric nitrogen concentration at plot scale. Impact of the sampling density on the result's precision. Poster session presented at Day of the Young Scientists, Bruxelles, Belgique. <http://hdl.handle.net/2268/164474>

West P. W. & Lyles G. L., 1960. A new method for the determination of nitrates. *Analytica Chimica Acta*. **23**, 227-232.



### **3 Extrapolation spatiale et historique de l'APL**

---

#### **3.1 Introduction**

L'APL pouvant être considéré comme un indicateur environnemental (lixiviation du nitrate), il est possible d'évaluer la pression de l'agriculture sur l'eau à l'échelle d'un territoire plus important (région agricole ou province).

Il peut dès lors être instructif de pouvoir comparer les valeurs observées 'aujourd'hui' à des valeurs mesurées il y a une vingtaine d'années, voire à des estimations lorsque la mesure du reliquat azoté n'existait pas encore.

L'objectif est d'évaluer si l'agriculture actuelle a une empreinte 'nitrate' plus légère ou plus lourde que dans le passé, en se remémorant que

- la dégradation de la qualité des eaux souterraines a débuté au milieu des années septante ;
- depuis quelques années la concentration en nitrate n'augmente plus ;
- il faut entre 5 et 25 années (dépendant de l'épaisseur et de la texture de la zone vadose et de l'importance de l'aquifère) pour que l'effet d'un changement de pratiques se marque sur la qualité des eaux souterraines.

Ce paragraphe 3 reprend quelques parties d'un texte plus complet figurant en Annexe 3.

#### **3.2 Estimation de l'APL moyen autour des années 2010**

##### **3.2.1 Introduction**

Le 14 février 2008, le Gouvernement wallon adopte un arrêté relatif au suivi, par des mesures de l'Azote Potentiellement Lessivable (APL) dans le sol, de la conformité des exploitations agricoles situées en zone vulnérable aux bonnes pratiques agricoles nécessaires à la protection des eaux contre la pollution par le nitrate à partir de sources agricoles. Cet arrêté est entré en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et fixe les modalités de l'évaluation des APL mesurés dans les exploitations situées en zone vulnérable en région wallonne. Il s'agit là d'une mesure importante s'inscrivant dans le cadre de la révision en 2007 du Programme de Gestion Durable de l'Azote en Agriculture (PGDA), transposition de la directive européenne Nitrates dans la législation belge.

Concrètement, chaque année, l'Administration sélectionne au moins 5% des agriculteurs (~600 agriculteurs) situés en zone vulnérable. Dans chacune des exploitations, l'APL est mesuré dans trois parcelles. Les résultats d'APL sont comparés à des valeurs de référence établies dans des parcelles de la culture concernée appartenant à un réseau de fermes de référence, le Survey Surfaces Agricoles (SSA), suivi par les membres scientifiques (GxABT et UCL) de la Structure d'encadrement Nitrawal. Si les résultats ne s'avèrent pas conformes par rapport aux valeurs de référence, l'agriculteur doit entrer dans un programme d'observation au cours duquel les résultats doivent s'améliorer, faute de quoi des amendes sont prévues.

La campagne de contrôle menée en 2012 est la cinquième campagne "effective" de contrôle des résultats APL. L'objectif de ce dossier est d'analyser les résultats de la campagne 2012 en vue d'évaluer la performance des agriculteurs contrôlés en matière de gestion de l'azote, en tenant compte de facteurs tels que la taille de la parcelle, la zone géographique dans laquelle elle se situe, la culture en place, le taux de liaison au sol (LS) de l'exploitation,...

Un retour sur les contrôles des années précédentes permet également de suivre l'évolution de la performance des agriculteurs contrôlés en matière de gestion de l'azote.

Enfin, l'établissement d'un APL moyen, à partir des données du contrôle, et tenant compte de la superficie de chaque classe de culture dans l'assolement de chaque région agricole permet de donner une vue du risque global de lixiviation du nitrate vers les eaux souterraines.

### 3.2.2 APL moyen par région agricole entre 2008 et 2012

L'objectif est d'estimer un APL moyen par région agricole en extrapolant les résultats observés dans les parcelles contrôlées à l'ensemble de la région agricole considérée. Cette extrapolation nécessite la connaissance de la part de chaque culture dans le paysage de chaque région agricole. Le §1 détaille la répartition des cultures et des prairies dans les différentes régions agricoles, le § 2 synthétise les APL moyens observés dans les parcelles de culture et de prairie lors du contrôle 2012 et le §3 Chapitre 43.2.23 présente le résultat de l'extrapolation des APL obtenus lors du contrôle 2012 à l'ensemble de la région agricole. Enfin, le §4 compare les résultats de 2012 par rapport aux résultats des années précédentes.

#### 1 Répartition des cultures dans le paysage agricole

Les données disponibles en 2012<sup>27</sup> permettent d'avoir une vue d'ensemble de la part de chaque classe de culture et prairie (au sens du PGDA) dans la SAU de chaque région agricole en zone vulnérable (tableau 4-5).

A titre d'exemple, la région sablo-limoneuse compte 257.984 ha dont 94% (242.942 ha) sont occupés par des cultures susceptibles de subir un contrôle APL. Cependant, pour une classe de culture donnée dans une région agricole donnée, il se peut que l'effectif de parcelles contrôlées soit trop faible (inférieur à 5 parcelles) et par conséquent non représentatif. C'est par exemple le cas du colza et des légumes dans la région sablo-limoneuse. Dans ce cas, la superficie des parcelles de colza et de légumes est déduite et la part de la SAU pour laquelle des mesures d'APL ont été réalisées est recalculée.

Les superficies occupées par des classes de cultures susceptibles de subir un contrôle APL et présentant un nombre suffisant de mesures APL représentent de 88 à 97% de la SAU selon les régions (tableau 4-5). L'extrapolation d'APL à l'échelle des différentes régions agricoles peut donc être jugée représentative.

**Tableau 4-5. Superficie des cultures et prairie par région agricole en 2012.**

	Région sablo-limoneuse	Région limoneuse	Région herbagère liégeoise	Condroz	Famenne
Betterave	14.272	34.490	385	7.620	457
céréales	54.538	116.658	1.850	45.561	8.780
chicorées	680	3.944	32	413	0
maïs	58.482	36.030	4.406	10.762	5.506
pdt	20.349	25.900	155	3.130	107
colza	768	2.498	35	7.205	1.077
légumes	14.886	12.057	219	1.863	166
prairie	78.966	63.528	47.476	46.095	42.757
SAU déclarée	257.984	308.449	55.153	126.573	59.953
SAU comptabilisée dans les classes APL	242.942	295.105	54.558	122.648	58.851
% / SAU déclarée	94%	96%	99%	97%	98%
SAU comptabilisée dans les classes APL avec mesures d'APL	227.289	295.105	53.765	117.655	57.043
% / SAU déclarée	88%	96%	97%	93%	95%

Les céréales peuvent être suivies d'une CIPAN. La superficie de céréales suivies de CIPAN par région agricole est estimée à partir de la proportion de parcelles de céréales suivies de CIPAN lors du contrôle 2012 (tableau 4-6).

<sup>27</sup>Enquête agricole de mai 2012 - Direction générale Statistique et Information économique  
[http://statbel.fgov.be/fr/binaries/DBREF-L05-2012-TAB-A-FR\\_V3\\_tcm326-226799.xls](http://statbel.fgov.be/fr/binaries/DBREF-L05-2012-TAB-A-FR_V3_tcm326-226799.xls)

Les proportions estimées de superficies de céréales suivies d'une CIPAN sont faibles en Famenne et dans le Condroz mais il faut savoir que la majorité des parcelles de céréales sans CIPAN (classe A3) dans ces deux régions sont suivies d'une culture d'hiver (froment, escourgeon, colza) et donc non-concernées par le semis d'une CIPAN.

**Tableau 4-6. Proportion de CIPAN par région agricole lors du contrôle 2012.**

	Condroz	Famenne	Herbagère liégeoise	Limoneuse	Sablo- limoneuse
Nb de parcelles de céréale avec CIPAN en 2012	19	9	4	301	43
Nb de parcelles de céréale contrôlées en 2012	86	34	12	554	90
Proportion estimée de superficie de céréale avec CIPAN	22%	26%	33%	54%	48%

En région limoneuse et sablo-limoneuse, compte tenu des superficies cultivées (tableau 4-5) et de la part de CIPAN après céréales (tableau 4-6), on peut déduire que celles-ci représentent respectivement 20% et 10% de la SAU.

## 2 APL moyen dans les parcelles contrôlées

Le tableau 4-7 synthétise les APL mesurés dans les principales régions agricoles situées en zone vulnérable. L'effectif étant trop faible pour la Fagne (6 parcelles) et l'Ardenne (3 parcelles), il n'a évidemment pas été possible de calculer un APL moyen pour ces régions.

Pour rappel, seules les classes de culture présentant un effectif d'au moins 5 parcelles contrôlées dans la région considérée sont prises en compte pour le calcul de l'APL moyen par région.

**Tableau 4-7. APL moyen (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles contrôlées en 2012.**

	Culture	Effectif	Moyenne	Ecart type
<b>CONDROZ</b>		<b>188</b>		
	Betterave	10	14	5
	Céréales avec CIPAN	19	45	24
	Céréales sans CIPAN	67	45	33
	Maïs	50	63	49
	Colza	19	65	25
	Prairies	18	4	4
<b>FAMENNE</b>		<b>86</b>		
	Céréales avec CIPAN	9	33	20
	Céréales sans CIPAN	25	46	37
	Maïs	30	68	48
	Prairies	18	8	7
<b>REGION HERBAGERE</b>		<b>127</b>		
	Céréales sans CIPAN	8	62	29
	Maïs	78	63	38
	Prairies	31	11	5

<b>REGION LIMONEUSE</b>	<b>1126</b>		
Betterave	86	23	21
Céréales avec CIPAN	301	47	33
Céréales sans CIPAN	253	72	35
Maïs	305	61	39
Pomme de terre	118	88	43
Colza	9	96	24
Légumes	8	76	59
Prairies	46	14	11
<b>REGION SABLO-LIMONEUSE</b>	<b>207</b>		
Betterave	13	19	13
Céréales avec CIPAN	43	49	30
Céréales sans CIPAN	47	68	35
Maïs	76	60	66
Pomme de terre	21	81	26
Prairies	6	4	2

On peut voir dans le tableau 4-7 que les APL moyens "cultures" établis en région herbagère liégeoise et en Famenne se limitent aux classes de cultures "céréales" et "maïs" en raison de l'effectif insuffisant pour les autres classes de culture. La classe de cultures "pommes de terre" n'est en revanche rencontrée que dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse. Toutes les classes de cultures sont représentées en région limoneuse.

### 3 Extrapolation à la région agricole

En tenant compte des résultats présentés ci-dessus pour les cultures (tableau 4-5 à tableau 4-7), il est possible de calculer une valeur moyenne d'APL "culture" et une valeur moyenne d'APL "prairie" pour chacune des cinq principales régions agricoles situées en zone vulnérable (figure 4-8). La figure 4-8 renseigne également le rapport culture / prairie pour chaque région agricole.

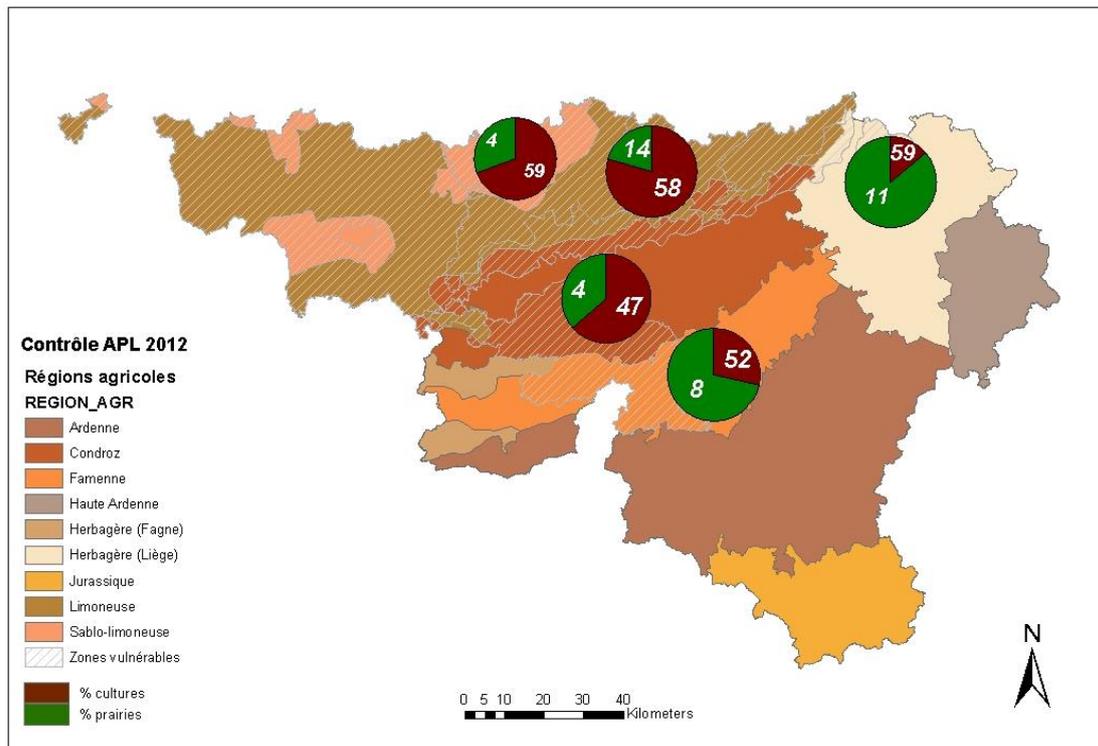


Figure 4-8. APL moyens en culture (sur 90 cm) et prairie (sur 30 cm) par région agricole.

Les APL moyens "culture" les plus élevés sont observés en Région herbagère liégeoise et en région sablo-limoneuse. Ceci peut s'expliquer par le fait que seule les classe de culture "maïs" et "céréales sans CIPAN" présentaient un effectif suffisant pour le calcul de l'APL moyen dans la région herbagère liégeoise et que les résultats en maïs et pomme de terre étaient élevés en région sablo-limoneuse, ces deux classes de cultures représentant une part importante de l'assolement dans cette région.

En revanche, l'APL moyen "culture" le plus faible est observé dans le Condroz. Ceci peut s'expliquer par le fait que les APL mesurés dans les parcelles de céréales et de maïs y sont corrects, ces deux cultures étant dominantes dans l'assolement.

Il faut également tenir compte de la proportion de prairies dans chaque région afin d'avoir une vue globale de la quantité de nitrate qui risque d'être lixiviée à l'échelle de la région agricole. Il est ainsi possible de calculer un APL moyen total en extrapolant les résultats obtenus en prairie pour la couche 0–30 cm aux couches 30–60 cm et 60–90 cm. Pour ce faire, la base de données du Survey Surfaces Agricoles est mise à profit. Les observations faites entre 2002 et 2004 montrent que le reliquat azoté mesuré sur une épaisseur de 90 cm (somme des trois couches) correspond approximativement au double du reliquat azoté observé dans la première couche (0-30 cm). Ce coefficient sera donc adopté pour extrapoler jusqu'à 90 cm les résultats obtenus lors du contrôle 2012 dans la première couche (0–30 cm).

Les APL moyens totaux par région agricole sont repris dans le tableau 4-8.

**Tableau 4-8. APL moyen total par région agricole.**

Région agricole	APL moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )	Part de la SAU représentée dans l'APL moyen(%)
Région sablo-limoneuse	43	88%
Région limoneuse	52	96%
Région herbagère (Liège)	27	97%
Condroz	33	93%
Famenne	27	95%

On voit que la région herbagère liégeoise et la Famenne présentent les APL moyens les plus faibles (27 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Ces deux régions présentent les proportions de prairies les plus élevées. La région limoneuse présente quant à elle l'APL moyen le plus élevé (52 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) ; c'est dans cette région que l'APL moyen en prairie est le plus élevé (14 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) et l'APL moyen en culture y est également assez élevé par rapport aux autres régions (58 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Ces valeurs restent cependant peu élevées en valeur absolue.

#### **4 Comparaison avec les années précédentes**

Les APL moyens par région agricole calculés à partir des données de la campagne de contrôle 2012 peuvent être comparés avec ceux issus des campagnes des années précédentes (tableau 4-9).

De manière globale, les APL moyens ont fortement diminué dans toutes les régions agricoles par rapport à la campagne de contrôle 2011 (diminution de l'ordre de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

L'APL moyen dans la région sablo-limoneuse en 2012 est faible, seul l'APL moyen de 2010 étant encore plus faible dans cette région. Une diminution importante par rapport à 2011 s'observe (- 22 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

L'APL moyen en région limoneuse est en forte baisse par rapport à celui de 2011 (- 22 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) et revient aux niveaux observés en 2008, 2009 et 2010 (~55 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Cet APL moyen en région limoneuse a un poids non-négligeable dans l'APL moyen total en région wallonne, étant donné que la SAU est maximale dans cette région par rapport aux autres régions agricoles.

En région herbagère liégeoise, l'APL moyen est en diminution depuis 2010 et affiche son niveau le plus bas depuis le début des campagnes de contrôles. Les efforts des agriculteurs en matière de gestion de l'azote sur leurs parcelles de maïs et leurs prairies se reflètent dans ce résultat.

Les APL moyens mesurés dans le Condroz et en Famenne sont également en baisse en 2012 et reviennent aux niveaux mesurés en 2008 et 2009 après une augmentation en 2010 et 2011.

**Tableau 4-9. Comparaison et moyenne des APL moyens (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) de 2008 à 2012.**

Région agricole	2008	2009	2010	2011	2012	2008-2012
Région sablo-limoneuse	46,1	50,7	41,0	64,7	43,4	49,2
Région limoneuse	53,5	52,9	57,2	72,8	52,3	57,7
Région herbagère	30,4	42,0	74,8	48,5	26,7	44,5
Condroz	36,4	29,0	46,9	45,7	32,8	38,2
Famenne	30,9	14,0	47,0	44,7	27,0	32,7

### 3.2.3 Conclusions

L'extrapolation à l'échelle des régions agricoles des observations réalisées dans les exploitations contrôlées a mis en évidence des différences d'APL moyen entre régions agricoles, imputables en partie aux différences rencontrées dans les assolements. Les APL moyens sont en nette diminution en 2012 par rapport à 2010 et 2011, et cela pour toutes les régions agricoles. Cette diminution des APL moyens est à imputer à deux facteurs : les conditions climatiques favorables (cf. APL de référence bas) mais aussi une amélioration dans la gestion globale de l'azote par les agriculteurs (cf. amélioration du pourcentage de conformité des exploitations).

## 3.3 Estimation de l'APL moyen dans les années nonante

Fin des années quatre-vingt, la perception de la nécessité d'une gestion raisonnée de l'azote en vue de préserver la qualité des eaux se concrétise par l'adoption de la Directive Nitrate (réf. 91/676) en 1991.

Sa transposition en région wallonne se fera en deux étapes :

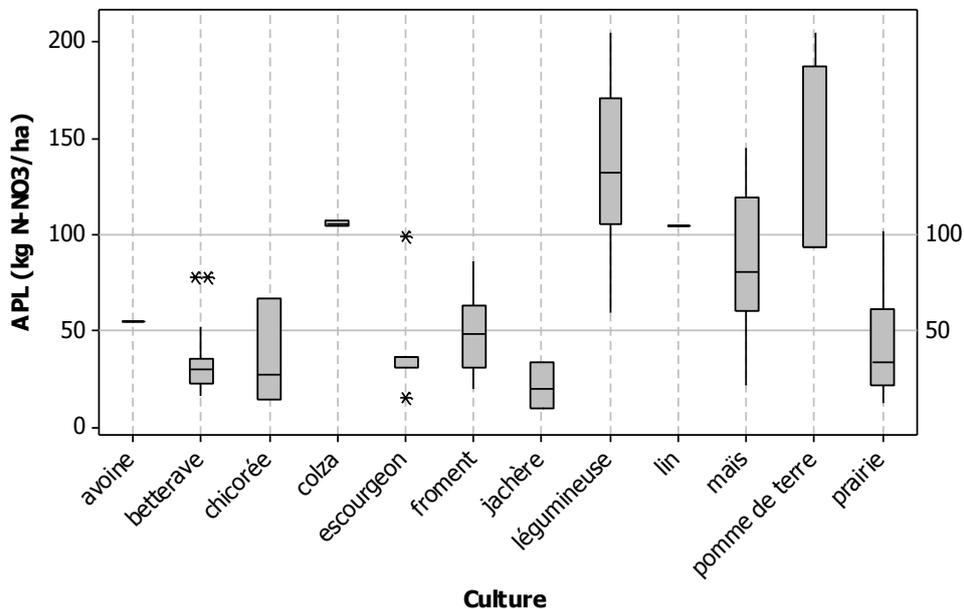
1. en 1996 : un code de bonnes pratiques agricoles, d'application volontaire et
2. en 2002 : le 1<sup>er</sup> Programme de Gestion Durable de l'Azote, d'application obligatoire.

Les premières observations d'APL en exploitation agricole sont réalisées à partir de cette époque par le CRAw et l'UCL.

L'estimation de l'APL moyen par région agricole (extrapolation sur base des observations APL et de la part de chaque culture dans le paysage de chaque région agricole) est réalisée sur base de ces observations (APL) et de l'enquête réalisée par l'Institut National de Statistiques (occupation du sol par région agricole).

### 3.3.1 Synthèse et interprétation

La figure 4-9 synthétise les observations APL ainsi réalisées entre 1993 et 1997 par le CRAw et l'UCL (cf Annexe 3).



**Figure 4-9. Distribution des mesures APL observées entre 1993 et 1997.**

Le colza, les légumineuses, le maïs et la pomme de terre présentent des niveaux d'APL assez élevés. Pour ces cultures, les APL sont de l'ordre de 20 à 50 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> supérieurs à ceux observés lors du contrôle réalisé en 2012 (tableau 4-7). Avec les réserves liées à la taille des effectifs (moins d'une dizaine par culture dans les années '90), la gestion de l'azote s'est améliorée entre les années '90 et 2010.

Pour la betterave, les quelques 36 observations réalisées illustrent un niveau d'APL globalement équivalent à celui rencontrés autour des années 2010 lors du contrôle APL.

La dispersion (de 15 à 99 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) des résultats rencontrés après céréales (escourgeon et froment) témoigne de la diversité des situations (avec ou sans engrais de ferme, avec ou sans vesce ou moutarde).

Il convient cependant d'observer que la valeur retenue (sur base des quelques observations réalisées à cette époque) pour les céréales est très vraisemblablement sous-estimée. En effet, à cette époque, le semis de moutarde était quasiment inexistant, le semis de vesce était occasionnel et les épandages d'engrais de ferme ne précédaient pas spécialement le semis de ce couvert.

Pour mémoire, entre 2008 et 2012, l'APL moyen d'une céréale suivie d'une CIPAN est de 42 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et l'APL moyen d'une céréale suivie d'une culture d'hiver est de 65 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>. Dès lors, en considérant que les pratiques culturales n'ont pas évolués pour ce dernier cas de figure et en doublant l'APL du premier cas de figure (apport régulier d'engrais de ferme sans CIPAN), l'APL moyen après céréale devrait se situer aux environs de 75 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (au lieu des 49 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> mentionnés à la figure 4-9).

Par ailleurs, il convient également d'observer que la valeur retenue en prairie ne repose que sur une dizaine d'observations réalisées dans le Brabant wallon.

### 3.3.2 Répartition des cultures dans le paysage agricole

Le tableau 4-10 illustre la spécificité des régions agricoles en termes de répartition des cultures dans la superficie agricole utile. Ainsi, le Condroz présente plus d'un tiers de sa SAU en prairie alors qu'en région limoneuse, la prairie ne représente pas un quart de la SAU.

**Tableau 4-10. Superficie des cultures et prairie par région agricole en 1990.**

Occupation	Condroz	Région herbagère	Région limoneuse	Région sablo-limoneuse
Betterave	12.074	570	60.876	29.568
Céréales	48.114	1.892	138.489	67.511
Chicorée	49	-	1.032	470
Colza	3.526	23	467	118
Légumes	3.896	116	7.675	11.394
Lin	1.383	38	5.436	1.776
Maïs	8.967	2.364	25.602	29.014
Pomme de terre	891	110	11.502	22.941
Prairie	54.427	55.201	71.539	87.606
SAU 'APL'	133.326	60.314	322.618	250.397
SAU	134.553	61.032	328.961	261.896
%SAU 'APL' / SAU	99%	99%	98%	96%

### 3.3.3 Estimation de l'APL moyen

En prenant pour références les valeurs moyennes d'APL par culture de la figure 4-9, on obtient les résultats par région agricole repris au tableau 4-11.

**Tableau 4-11. APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) moyen par région agricole en 1990 (observations céréales non modifiées).**

	Condroz	région herbagère	région limoneuse	région sablo-limoneuse
APL moyen culture	59	127	56	70
APL moyen prairie	17	17	17	17
part de la SAU en culture	60%	10%	78%	67%
part de la SAU en prairie	40%	90%	22%	33%
APL moyen total	42	27	48	52

Par contre, si on affecte un APL moyen en céréale adapté compte tenu des hypothèses évoquées précédemment, l'APL moyen par région agricole augmente logiquement (tableau 4-12).

**Tableau 4-12. APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) moyen par région agricole en 1990 (hypothèses en céréales).**

	Condroz	région herbagère	région limoneuse	région sablo-limoneuse
APL moyen culture	75	127	71	81
APL moyen prairie	17	17	17	17
part de la SAU en culture	60%	10%	78%	67%
part de la SAU en prairie	40%	90%	22%	33%
APL moyen total	52	27	59	60

### 3.4 Estimation au cours des décennies précédentes

Il devient malheureusement hasardeux d'estimer un APL moyen pour une période antérieure à 1990. Les raisons sont multiples :

- la mesure du reliquat azoté dans le sol a débuté fin des années septante, uniquement en post-récolte ;
- certaines périodes de fertilisation ont évolué (jusque dans les années septante, il était conseillé d'apporter une première fraction d'azote en automne, lors du semis des céréales) ;
- même si l'on peut faire des hypothèses réalistes sur la fertilisation appliquée aux cultures (Annexe 3), il n'est pas possible d'en estimer l'APL compte tenu de l'évolution variétale et des rendements (exportation d'azote).

En Annexe 3, quelques considérations complémentaires sont développées pour illustrer l'évolution des pratiques agricoles au cours de cette période (importance de la CIPAN, diminution de la surface de prairie, augmentation de la surface de maïs, ...).

### 3.5 Discussion

Grâce au contrôle APL mis en place à partir de 2008 en zone vulnérable, il est possible d'évaluer le stock d'azote nitrique dans le sol à la parcelle mais également pour des territoires administratifs (province), pédoclimatiques (région agricole) ou hydrogéologiques (masse d'eau souterraine).

L'agrégation des données pour ces différents territoires est rendue possible grâce à un géoréférencement précis des résultats APL et des occupations de sol (PAC) qui peuvent être traités via des systèmes d'information géographique (SIG).

Entre les années nonante et les années autour de 2010, l'évolution de l'APL moyen montre une tendance à la hausse (de l'ordre de  $5 \text{ kg N-NO}_3\text{-ha}^{-1}$ ). Cette augmentation s'appuie entre autres sur quelques observations réalisées dans les années nonante après céréales dans des contextes très favorables (pas d'apport de matières organiques).

Néanmoins, la comparaison des reliquats azotés mesurés dans le sol en sortie d'hiver à ces deux époques indique une tendance inverse. On observe en effet une diminution de  $10 \text{ à } 20 \text{ kg N-NO}_3\text{-ha}^{-1}$ , signe que les pratiques de fertilisation azotée sont mieux adaptées.

Pour une période plus lointaine (années soixante à nonante), quelques indices laissent paraître que l'APL moyen devait vraisemblablement être encore plus élevé.

Au cours de cette période, on observe deux tendances importantes. La première est la diminution (~30%) des superficies couvertes de prairies. La conversion de ces prairies en terres cultivées a un impact sur l'APL :

- à court terme : la minéralisation de l'important stock de carbone organique va conduire à des APL élevés pendant trois à cinq ans ;
- à long terme : l'APL en prairie est toujours plus faible que l'APL moyen en culture, quelle que soit la rotation.

La seconde tendance est l'augmentation des emblavements en maïs. Pendant des décennies, la gestion de l'azote pour cette culture a vraisemblablement été la cause d'APL très régulièrement élevés :

- contrairement aux céréales, elle n'est pas négativement impactée par un excès d'azote ;
- elle est semée à partir de la fin avril, ce qui donne l'opportunité d'épandre des engrais de ferme au printemps sur terrain 'portant', voire (à cette époque) en hiver sur sol gelé.

De plus, le maïs va très régulièrement suivre une céréale après laquelle un épandage d'engrais de ferme aura également pu être réalisé (souvent sans CIPAN).

Il convient également de rappeler (Annexe 1) qu'entre 1950 et 1970, le cheptel porcin a très fortement augmenté (+60%) et qu'à cette époque, les capacités de stockage de lisier étaient souvent limitées, forçant les agriculteurs à *vidanger* régulièrement les citernes tous les 2-3 mois.

Dans le même ordre d'idée, entre 1960 et 1990, le cheptel bovin a également augmenté (+10%) en région wallonne (Annexe 1). A cette époque, le compostage et épandage en prairies n'était pas (peu) pratiqué, de sorte que l'épandage du fumier était essentiellement concentré en terre de culture avec l'impact que l'on peut aisément imaginer dans des exploitations principalement herbagères.

Cette augmentation de la disponibilité d'azote organique est également concomitante à un doublement de la consommation d'engrais azoté de synthèse.

Enfin, dans les années soixante et septante, il était d'usage d'apporter une première fraction d'azote lors du semis des céréales (Annexe 1). L'APL de la culture qui précédait devait donc être régulièrement augmenté de quelques dizaines d'unités.

Il convient également de mentionner qu'au cours de la période 1960-1990, la part du territoire occupé par le secteur agricole a régulièrement régressé (~10%) et que les rendements des cultures ont augmenté de 20 à 50%, exportant ainsi plus d'azote (principalement sous forme de protéines).

Il importe cependant de ne pas jeter l'opprobre sur ces agriculteurs. D'une part, parce qu'après la guerre (durant laquelle la famine a parfois régné), le mot d'ordre était de produire toujours plus et d'autre part, parce qu'à cette époque, les enjeux environnementaux, qu'ils soient liés au secteur de l'agriculture ou de l'industrie (sidérurgie, textile, ...) n'étaient pas perçus ou considérés.

## Chapitre 5 Conclusions et perspectives

### 1 Acquis de la thèse

Au cours du vingtième siècle, la population mondiale a plus que triplé alors qu'en Belgique et dans les pays limitrophes, elle n'a été multipliée que par un facteur 1,5. Ce taux de croissance, jamais observé dans le passé, a été permis par la capacité de notre société à d'une part, produire plus d'alimentation et d'autre part, à soigner les maladies.

Ces progrès observés en agriculture et dans le domaine de la santé sont le fruit de découvertes dans les domaines du vivant (humain, animal, végétal), de la chimie et des technologies (matériaux, énergies, ...). Plus spécifiquement en ce qui concerne l'agriculture, les progrès enregistrés au cours de la seconde moitié du vingtième siècle (développement de la mécanisation, sélection variétale, protection contre les adventices, maladies et ravageurs) ont permis d'augmenter les rendements des cultures et de diminuer la pénibilité du travail. Ils ont également modifié notre paysage (apparition du maïs, agrandissement de la taille des parcelles, diminution des superficies de prairies) (**Annexe 1**).

La production d'engrais azotés de synthèse a permis d'améliorer les récoltes tant d'un point de vue quantitatif (rendement) que qualitatif (taux de protéines).

Cependant, l'usage non-raisonné de ces engrais, combiné à une production croissante d'effluents d'élevage (conséquence d'une augmentation de la production de viande et produits laitiers) a partiellement contribué à détériorer la qualité des eaux. En Wallonie, les premiers signes de dégradation de la qualité des eaux souterraines ont ainsi été observés à partir du milieu des années septante (**Chapitre 1**).

Dans le courant des années quatre-vingt, l'Europe a pris la mesure de cette problématique en élaborant une directive « Nitrates » promulguée en 1991 et dont l'objectif est de prévenir ou, le cas échéant, réduire la pollution des eaux par le nitrate d'origine agricole.

Le nitrate n'a pas été la seule molécule à faire l'objet d'une attention des pouvoirs politiques. Au cours de cette décennie, l'Europe s'est également intéressée aux produits phytosanitaires ainsi qu'aux émissions d'ammoniac et de phosphore.

Concrètement, la directive « Nitrates » impose à chaque état membre de :

- délimiter des zones vulnérables (territoires où l'eau est (susceptible d'être) polluée par le nitrate ou touchée par l'eutrophisation) ;
- établir des programmes d'actions obligatoires dans ces territoires et un code de bonnes pratiques agricoles (d'application volontaire) ;
- suivre l'efficacité de ces programmes et l'évolution de la qualité des eaux ;
- soumettre tous les quatre ans un rapport de mise en œuvre de la directive (évaluation critique du programme d'action et de la délimitation des zones vulnérables sur base d'un monitoring des pratiques agricoles et de la qualité de l'eau).

Cette directive a été complètement transposée dans la législation wallonne en 2002 sous forme d'un Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en agriculture qui, depuis lors, a été révisé à deux reprises.

Pour améliorer la qualité de l'eau dans les zones vulnérables, le PGDA prévoit pour chaque exploitation :

- des obligations de moyens :
  - mise en place d'une culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN) entre une récolte estivale et un semis vernal
  - limitation des apports d'engrais de ferme par unité de surface avec, pour conséquence, transfert d'une partie de ceux-ci lorsqu'ils sont produits au-delà de la capacité de valorisation dans l'exploitation agricole ;
  - interdiction/limitation d'apports azotés (minéral et organique) durant des périodes propices aux pertes par lixiviation et/ou ruissellement ou sur sol inapproprié (forte pente, gelé, ...) avec, pour conséquence, l'obligation de disposer d'une capacité de stockage suffisante pour les engrais de ferme ;
  - ...
- une obligation de résultat : satisfaire à un contrôle du reliquat azoté dans le sol en début de période de lixiviation du nitrate.

Cette mesure de reliquat azoté est communément dénommée APL pour Azote Potentiellement Lessivable.

Concrètement, la mesure de l'APL s'opère par (**Chapitre 2.1**) :

1. la constitution d'un échantillon composite de sol dans une parcelle,
2. la mise en solution du nitrate contenu dans cet échantillon,
3. le dosage du nitrate dans cette solution
4. l'expression du résultat sous forme de  $\text{kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  via la pondération du résultat analytique par l'épaisseur de la couche de sol échantillonnée, la charge caillouteuse moyenne de la parcelle, l'humidité de l'échantillon et la densité apparente.

Le contrôle, coordonné chaque année par le Service Public de Wallonie dans au moins 5% des exploitations agricoles situées en zone vulnérable, consiste en la mesure de l'APL dans trois parcelles. Ces résultats sont comparés aux références établies annuellement pour huit classes de cultures et prairies à partir d'observations réalisées dans plus de 250 parcelles dites *de référence* c'est-à-dire où les pratiques sont jugées conformes aux prescrits du PGDA (**Chapitre 2.4**).

L'objectif de la thèse visait à évaluer la performance de l'APL en tant qu'indicateur agronomique (reflet de la gestion de l'azote pratiquée sur la parcelle) et environnemental (reflet du risque de contamination des eaux souterraines) (1) dans le cadre pour lequel et il a été élaboré et (2) dans un cadre élargi à d'autres échelles spatiales (région agricole, masse d'eau) et temporelles (explication de la dégradation de la qualité de l'eau à partir des années septante et perspectives pour l'avenir).

Concrètement, les travaux menés ont visé à répondre aux questions suivantes :

- L'APL est-il facilement compréhensible et facile à interpréter ?
- L'APL est-il facilement mesurable ?
- La mesure de l'indicateur APL est-elle scientifiquement validée ?
- L'APL peut-il être applicable dans la majorité des exploitations agricoles belges ?
- L'APL permet-il de faire la distinction entre des changements dus à des facteurs externes, à des modes de gestions différenciés ?
- L'APL est-il bien en relation avec le risque de contamination des eaux souterraines par le nitrate ?
- L'APL peut-il aider au contrôle des effets des décisions politiques et à l'identification des régions ou des systèmes où une action politique est nécessaire ?

## 1.1 L'APL, indicateur agronomique et environnemental

Sur le volet agronomique, les résultats d'expérimentations sur la réponse d'une culture à une fertilisation croissante ont été valorisés pour contribuer à la démonstration. Ainsi (**Chapitre 3.1**), tant pour une culture récoltée en été (telle que le colza) où le sol a été laissé nu jusqu'au semis du froment (fin octobre) que pour une culture récoltée en automne (telle que le maïs) où l'APL s'apparente à une mesure du reliquat azoté 'post récolte', les observations ont indiqué que :

- jusqu'à l'optimum de rendement, l'APL reste stable. En d'autres termes, il n'y a statistiquement pas de gain (diminution de l'APL) à réduire l'apport azoté en deçà de celui qui conduit à l'optimum de rendement ;
- au-delà de l'optimum de rendement, l'APL augmente de façon significative.

L'examen des références APL établies depuis 2007 (**Chapitre 2.4**) indique des niveaux d'APL variables :

- entre classes de cultures : les prairies, les parcelles de betterave ou de céréale suivie d'une CIPAN présentent chaque année les valeurs les plus basses alors que les parcelles de pomme de terre, de maïs ou de colza présentent les valeurs les plus élevées ;
- d'une année à l'autre : le climat de l'année (distribution de la température et de la pluviométrie) peut impacter le rendement de la culture, la cinétique de développement de l'éventuelle CIPAN et globalement la minéralisation de la matière organique du sol. Cette 'variable' climatique va ainsi engendrer une variabilité interannuelle des références APL.

Ces observations indiquent donc que l'APL permet à la fois d'évaluer la gestion de l'azote pour une culture donnée et de discriminer les cultures entre-elles.

Dans le cadre de l'évaluation 'agronomique' de l'APL, un regard a également été jeté sur la procédure de contrôle APL<sup>28</sup> (**Chapitre 2.5**). Les tests réalisés ont indiqué que la probabilité de sanctionner :

- un vrai positif (exploitation non conforme où la part de parcelles non-conformes serait très élevée) est grande ;
- un faux positif (exploitation non conforme où la part de parcelles non-conformes serait très faible) est petite.

Pour rendre le contrôle encore plus efficient, il serait cependant judicieux d'augmenter le nombre de parcelles contrôlées au cours du programme d'observation pour réduire la probabilité qu'une exploitation ayant une part significative de parcelles non-conformes soit qualifiée de conforme.

Sur le volet environnemental, la démonstration s'est appuyée sur des observations réalisées pendant une dizaine d'années, spatialement à deux échelles (la parcelle et le bassin versant) et verticalement à deux niveaux (à la base de la zone racinaire et dans l'aquifère).

Six parcelles ont été équipées en 2003 d'un lysimètre installé en plein champ et de façon à ne pas entraver le travail du sol. L'eau de percolation est régulièrement récoltée à deux mètres de profondeur en vue d'un dosage du nitrate. La comparaison de ces résultats aux APL permet de tirer les enseignements suivants (**Chapitre 3.2**) :

- l'ordre de grandeur de l'APL (exprimé en  $\text{kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ) correspond à l'ordre de grandeur de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation (exprimée en  $\text{mg NO}_3\text{.l}^{-1}$ ) ou, en d'autres termes, un APL inférieur à  $40 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  conduit certainement à une concentration inférieure à  $50 \text{ mg NO}_3\text{.l}^{-1}$  et un APL supérieur à  $60 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  conduit certainement à une concentration supérieure à cette limite ;

<sup>28</sup> Pour une année donnée, trois parcelles de l'exploitation contrôlée sont échantillonnées et l'exploitation est jugée conforme si au moins deux des trois résultats sont conformes.

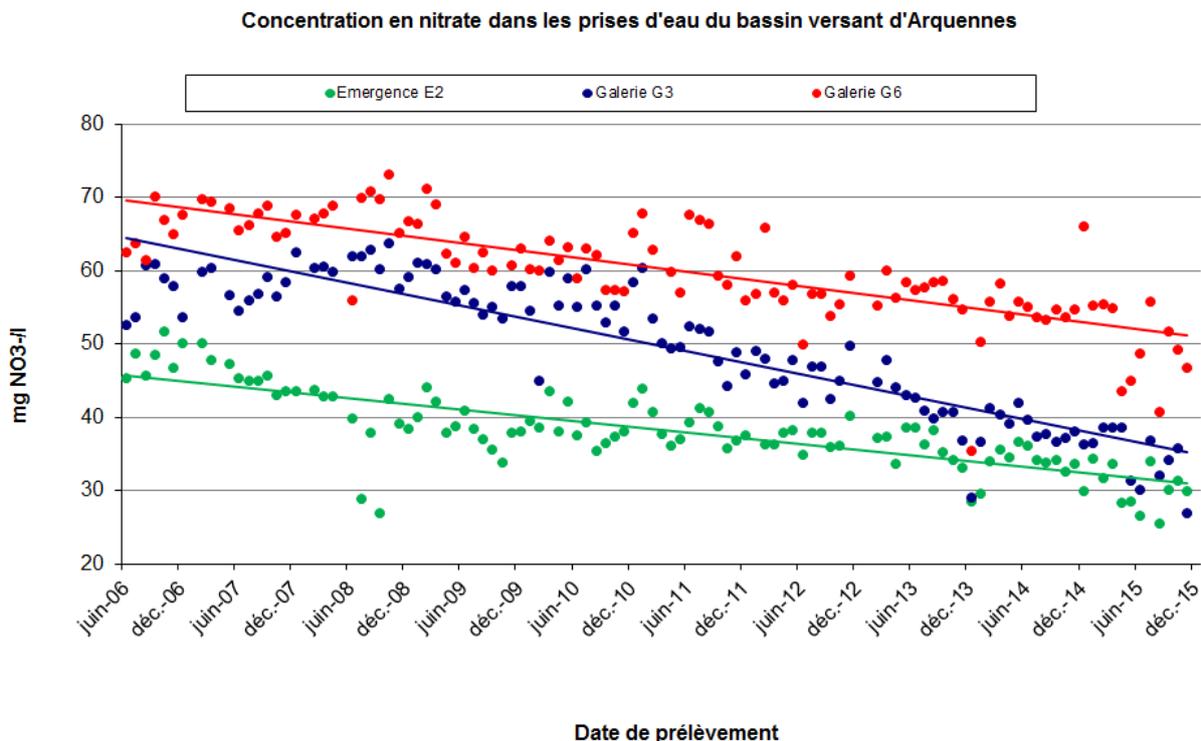
- le temps de réponse entre l'APL mesuré dans les nonante premiers centimètres de sol et la concentration en nitrate mesurée à deux mètres de profondeur est de trois à douze mois, fonction de la culture précédant la mesure de l'APL et de la pluviométrie hivernale. Les six lysimètres étant installés dans des limons profonds, il n'est pas possible de discriminer le temps de réponse en fonction du type de sol.

Il convient néanmoins de mentionner que, par leur construction, ces dispositifs créent une rupture de capillarité à la base des lysimètres. Par conséquent, le régime hydrique (cinétique d'humectation et d'assèchement dans le lysimètre, flux d'eau à l'exutoire du lysimètre) peut être affecté (diminution de la percolation). Cependant, les enseignements des observations réalisées, même avec ce biais, sont concordants aux mesures réalisées à l'exutoire d'un bassin versant, synthétisées ci-dessous.

A l'échelle du bassin versant, un programme d'actions a été mis en œuvre sur le site pilote d'Arquennes entre 2004 et 2010 (**Chapitre 3.3**). Il a consisté en l'encadrement des agriculteurs (par les conseillers de Nitrawal) et la réalisation d'observations et de mesures (entre autres APL et concentration en nitrate dans les prises d'eau) en vue d'une modélisation des flux d'eau et de nitrate vers l'aquifère (sables du Bruxellien).

La stricte application du PGDA au cours de cette période a permis de réduire en deux ou trois ans l'APL moyen du bassin versant de 70 à 40 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>. Les résultats des modélisations effectuées en partenariat avec une équipe d'hydrogéologues (Aqual Ecofox Développement) prédisaient le temps de réponse de l'aquifère à une modification de pratiques agricoles à environ cinq ans.

Comme l'illustre la figure suivante, on peut constater qu'à partir de 2011, la concentration en nitrate à l'exutoire des deux principales prises d'eau (les galeries) a commencé à diminuer pour conduire, fin 2015, à une concentration moyenne de l'ordre de 40 mg NO<sub>3</sub>.l<sup>-1</sup>.



L'examen des observations réalisées tant à l'échelle de la parcelle qu'à celle du bassin versant confirme donc la performance de l'APL en tant qu'indicateur environnemental.

Parmi les autres atouts de l'APL, nous avons également relevés ses qualités de transférabilité (comparaison possible dans le temps et dans l'espace), de transparence (facilement compréhensible), de mesurabilité (coût et validité analytique) (**Chapitre 2.2**).

Il convient cependant de signaler quelques limites ou contraintes (qui peuvent être perçues comme des pistes d'amélioration) :

1. L'APL est une photographie du stock d'azote nitrique dans le sol à un moment donné (**Chapitre 2.3**). Or, compte tenu de sa grande solubilité (sensibilité à la lixiviation) et de la cinétique de minéralisation de la matière organique du sol (dépendante des conditions climatiques et du travail de sol), la répétition d'une mesure à quelques semaines d'intervalle peut livrer des résultats assez contrastés, voire des interprétations opposées (changement de statut de conformité d'une parcelle contrôlée).
2. De façon assez prévisible, il apparaît une légère dépendance entre l'APL et des paramètres édaphiques tels que la concentration en carbone organique total ou la texture (**Chapitre 3.4**). L'éventuelle extension d'un contrôle APL dans des contextes climatiques assez différents de ceux observés au nord du sillon Sambre et Meuse devrait dès lors conduire à établir des références APL particulières dans cette situation.

Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse ont permis de mieux appréhender ces facteurs de variations/incertitudes et, le cas échéant, de proposer des adaptations de la méthode pour en réduire l'ampleur.

Enfin, pour compléter la réflexion sur les indicateurs agronomiques et environnementaux, il convient de mentionner l'existence d'autres indicateurs tels que la consommation d'engrais azotés, la production d'engrais de ferme, le bilan azoté et l'occupation du sol.

#### Utilisation d'engrais azoté

Il s'agit d'un indicateur relativement simple puisqu'il peut être 'saisi' via les comptabilités des exploitations agricoles.

Cependant, à l'échelle de l'exploitation, un usage mal distribué par culture/parcelle (en relation avec les éventuels apports d'engrais de ferme) peut générer ponctuellement un APL non conforme.

#### L'occupation du sol

Il s'agit là d'un indicateur encore plus simple à saisir grâce aux déclarations de superficies qu'accomplissent chaque année les agriculteurs. On peut ainsi mettre dans la colonne *favorable* les couverts permanents tels que les prairies et dans la colonne *défavorable*, les couverts annuels à faible enracinement tels que certains légumes, la pomme de terre, ...

Il convient cependant d'attirer l'attention sur les limites de cette méthodologie avec l'exemple du Pays de Herve, territoire le plus herbager dont l'aquifère est pourtant contaminé par le nitrate à cause d'une disponibilité très importante d'engrais de ferme qui, dans le passé (faute de capacité de stockage suffisante) n'ont pas toujours été valorisés à bon escient.

### Le cheptel et la disponibilité d'azote organique

Pour des raisons sanitaires, le cheptel étant administrativement très suivi dans chaque exploitation, il est aisé de pouvoir estimer la quantité d'azote organique produite par unité de surface.

Cependant, l'usage qui en est fait (quantité, période) conditionne fortement sa valorisation agronomique et son impact environnemental.

### Le bilan d'azote

Il s'agit certainement d'un indicateur très pertinent tant d'un point de vue agronomique qu'environnemental puisqu'il intègre les informations des trois indicateurs précédents :

- la culture à fertiliser (dont on connaît les besoins azotés pour un rendement optimum) ;
- les engrais de ferme valorisés ;
- la fumure azotée appliquée.

En France, dans le cadre de la directive 'Nitrates', il fait partie des outils de contrôle puisque chaque agriculteur doit remplir un plan prévisionnel de fertilisation (qui est en fait un bilan d'azote) qui sera contrôlé par l'Administration. Cependant, la comparaison de ces bilans à des mesures d'APL fait parfois apparaître certaines incohérences (bilan équilibré  $\Leftrightarrow$  APL très élevé).

Contrairement aux trois indicateurs précédents, l'APL présente l'avantage de prendre en compte l'impact de la gestion de l'interculture. En effet, il convient de rappeler que les CIPAN jouent un rôle très important dans la prévention de la lixiviation du nitrate ; effet qui devrait idéalement être considéré dans un indicateur environnemental.

## **1.2 Extension de l'usage de l'APL**

Chaque année, environ deux milles parcelles font l'objet d'une mesure APL. Outre l'évaluation de la gestion de l'azote pour la culture qui précède, on peut envisager de valoriser la mesure dans l'élaboration du conseil de fertilisation azotée pour la culture qui suit (**Chapitre 4.1** et **Annexe 2**).

Sur base de 660 couples d'observations APL-RSH mesurés entre 2003 et 2013, des équations ont été établies pour chaque culture pouvant faire l'objet d'une mesure APL. La qualité de la prédiction a été évaluée par la comparaison des RSH prédits aux RSH mesurés. Les travaux ont mis en évidence :

- l'intérêt d'intégrer la pluviométrie hivernale et le délai entre la mesure de l'APL et la prédiction du RSH ;
- la précision est améliorée lorsque la mesure de l'APL est réalisée à la fin de l'automne plutôt qu'à la mi automne.

Dans ces conditions, l'erreur médiane de prédiction est de l'ordre de  $15 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$  et le troisième quartile étant environ double de la médiane.

Cette approche a été comparée à deux autres approches.

La première s'appuie sur les bases de données du contrôle APL et des RSH mesurés par les laboratoires (plus de mille observations par an) en sachant que les RSH ne sont pas spécifiquement mesurés là où l'APL l'a été. Cette approche n'a pas donné de résultats concluants.

La seconde s'appuie uniquement sur la base de données RSH constituée chaque année par les membres de Nitrawal. L'analyse de la distribution des RSH par région agricole, précédent cultural et en tenant compte de l'éventuel apport d'engrais de ferme (nature et période) indique un risque d'erreur plus faible que celui obtenu pour la méthode étudiée.

Compte tenu de la contrainte relative à la méthode étudiée (nécessité de disposer de la pluviométrie et d'une mesure APL idéalement réalisée en fin d'automne), il convient de privilégier l'estimation du RSH sur base de la seconde approche, le cas échéant (un résultat APL disponible) en pondérant l'estimation sur base de la distribution des RSH.

L'APL a également été valorisé pour évaluer le risque de certains itinéraires techniques pour la qualité des eaux (**Chapitre 4.2**). En l'occurrence, l'objectif était de comparer l'impact sur l'APL d'un apport d'engrais de ferme (après une récolte estivale et avant le semis d'une CIPAN) à trois autres scénarios :

- un sol laissé nu de la récolte estivale au semis de la culture suivante au printemps ;
- un sol sur lequel une CIPAN a été semée, sans apport préalable d'engrais de ferme, après la récolte estivale ;
- un sol sur lequel, après une récolte estivale, une culture a été semée en automne pour être récoltée l'été suivant.

L'analyse des résultats a mis en évidence l'intérêt de la CIPAN pour piéger l'azote nitrique présent dans le sol en automne : l'APL y est plus bas que dans les premier et troisième scénarii. Par ailleurs, lorsque l'engrais de ferme est de type lisier porcin ou fiente de volaille, il convient de privilégier une CIPAN telle que la moutarde pour garantir un niveau d'APL comparable à celui observé en l'absence d'apport d'engrais de ferme.

Enfin l'APL a également été utilisé comme indicateur (environnemental) de pression 'nitrate' à des échelles plus petites (la région agricole, la province) (**Chapitre 4.3 & Annexe 3**). L'intérêt a été porté sur une estimation de son évolution au cours du temps (décennies) en y intégrant la part de chaque culture dans le paysage agricole. Les premières observations APL n'ayant débuté que dans les années nonante, il n'a pas été possible d'observer une évolution antérieurement à cette époque. La discussion s'est alors appuyée sur l'évolution du paysage agricole et des pratiques de fertilisation à partir des années cinquante (**Annexe 1**).

Moyennant quelques hypothèses correctives pour les années nonante, on observe une diminution de l'APL entre cette décennie et l'époque actuelle.

En ce qui concerne les décennies antérieures (au cours desquelles la qualité des eaux souterraines s'est dégradée), on observe une disparition de certaines pratiques défavorables à la qualité de l'eau telle que la fertilisation des céréales lors du semis, les sols laissés sans couvert au cours de l'automne mais également une augmentation de pratiques défavorables à la qualité de l'eau telle que la conversion de prairie en terre cultivée (**Annexe 1**).

## **2 Perspectives**

---

L'examen des observations APL a mis en évidence un impact de la teneur en carbone et de la texture du sol sur le résultat (**Chapitres 2.3 et 3.4**).

Il a été montré que plus la teneur en carbone organique total d'un sol est élevée, plus le risque d'un APL non-conforme est élevé. Pour améliorer l'interprétation des résultats APL ainsi que les conseils de fertilisation, il conviendrait d'évaluer l'intérêt que pourrait avoir une meilleure connaissance des diverses formes de carbone dans le sol, à travers des mesures de fractionnement (physique, chimique et granulométrique).

Actuellement, la démonstration de la pertinence de l'APL (tant sur le volet agronomique qu'environnemental) a essentiellement été menée sur base d'observations réalisées en zone limoneuse, au nord du sillon Sambre et Meuse.

Si l'usage de l'APL devait être étendu à toute la région wallonne (soit par une extension de zone vulnérable, soit lors d'actions plus ponctuelles à proximité de zones de captage), il conviendrait de pouvoir préalablement mener quelques expérimentations pour valider ou, le cas échéant, adapter l'interprétation d'un résultat APL :

- sur le volet agronomique : les références par cultures seraient-elles identiques au nord et au sud du sillon Sambre et Meuse ? Si non, quels seraient les critères pour fixer la/les frontière(s) ?
- sur le volet environnemental : les sols étant souvent moins épais et la pluviométrie plus importante au sud du sillon Sambre et Meuse, la relation entre APL et qualité de l'eau évolue-t-elle sensiblement ?

D'autre part, la mesure de l'APL en terre cultivée est réalisée jusqu'à 90 cm pour des raisons techniques (prélèvements manuels ou légèrement mécanisés) et financières. Les observations menées jusqu'à 150 cm par Lambert et al. (2002) ont illustré la présence (parfois importante dans le cas de cultures à enracinement peu profond) d'azote nitrique dans la couche 100-150 cm. Il conviendrait d'évaluer dans quelle mesure la connaissance du stock d'azote dans cette couche modifie/améliore l'interprétation de l'APL, tant sur le volet agronomique qu'environnemental.

En ce qui concerne la précision de la mesure APL et plus particulièrement l'impact de la densité d'échantillonnage dans une parcelle sur cette précision, les observations réalisées dans deux parcelles (l'une avec un APL faible et l'autre avec un APL élevé) ont mis en évidence que plus l'APL est élevé, plus la densité d'échantillonnage doit être importante pour maintenir une certaine précision du résultat (**Chapitre 2.3**).

Dans le cadre du contrôle APL, des résultats très (très !) élevés sont parfois observés et font régulièrement l'objet de critiques après qu'une ré-analyse de la parcelle en question présente un résultat 30 à 50% supérieur ou inférieur à la première analyse. Il conviendrait de profiter de telles situations pour étendre l'expertise relative à la variabilité intraparcellaire de l'APL et à la relation densité d'échantillonnage – précision du résultat.

Par ailleurs, actuellement, chaque résultat analytique est pondéré par un coefficient illustrant la charge caillouteuse estimée de la parcelle, coefficient identique pour les trois couches de sol échantillonnées. Il conviendrait d'évaluer si l'anisotropie de la distribution verticale de la charge impacte significativement la qualité du résultat final et, le cas échéant, de voir dans quelle mesure il serait possible d'améliorer la Carte Numérique des Sols de Wallonie.

Toujours en relation avec la charge caillouteuse, il conviendrait, plus spécialement pour les sols crayeux (généralement renseignés avec une charge caillouteuse supérieure à 15%), d'évaluer dans quelle mesure cette charge participe au stockage/transfert du nitrate et, le cas échéant, d'adapter la pondération du résultat analytique. Rappelons cependant que ces sols crayeux (cartographiés G..n ou G..nx) couvrent moins de 0.1% de la Wallonie.

Sur le volet 'environnemental' de l'indicateur APL, il serait opportun de compléter l'étude des résultats enregistrés dans les parcelles équipées d'un lysimètre par une comparaison de la concentration en nitrate de la solution du sol à la concentration de l'eau récoltée à l'exutoire du lysimètre.

Enfin, il serait intéressant de poursuivre les contacts pris avec les scientifiques étrangers pour alimenter la réflexion d'un regard neuf avec parfois un contexte pédoclimatique très différencié.

## Chapitre 6 Bibliographie

- AFNOR (1999). "Qualité des sols."
- Anonyme (2000). "L'environnement wallon à l'aube du XXIème siècle. Approche évolutive.." Ministère de la Région wallonne, Namur.
- Anonyme (2008). Arrêté du Gouvernement wallon relatif au suivi, par des mesures de l'azote potentiellement lessivable (APL), de la conformité des exploitations agricoles situées en zone vulnérable aux bonnes pratiques agricoles nécessaires à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles (M.B. 28.03.2008). *Moniteur belge*, 17275-17278.
- Anonyme (2011). Arrêté du Gouvernement wallon modifiant le Livre II du Code de l'Environnement contenant le Code de l'Eau en ce qui concerne la gestion durable de l'azote en agriculture. *Moniteur belge*, 25217-25234.
- Anonyme (2015). Decreet tot wijziging van het decreet van 22 december 2006 houdende de bescherming van water tegen de verontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen (M.B. 29.07.2015). *Moniteur belge*, 47994-48029.
- Arnold, J. G., Engel, B. A., and Srinivasan, R. (1993). Continuous-time, grid cell watershed model. In "Application of Advanced Information Technologies for the Management of Natural Resources". ASAE, Spokane.
- Arrouays, D., Vion, I., Jolivet, C., Guyon, D., Couturier, A., and Wilbert, J. (1997). Variabilité intraparcellaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France). Conséquences sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. *Etude et Gestion des Sols* **4**, 5-16.
- Bah, B., Engels, P., Colinet, G., and Bock, L. (2005). "Légende de la carte numérique des sols de Wallonie (Belgique)," Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. Unité Sol-Ecologie-Territoire. Laboratoire de Géopédologie.
- Baize, D., and Jabiol, B. (1995). "Guide pour la description des sols," INRA, Paris.
- Baker, A. S. (1967). Colorimetric determination of nitrate in soil and plant extracts with brucine. *J. Agric. Food chem.* **15**, 802-806.
- Barroin, G., Dorioz, J. M., Durand, P., and Merot, P. (1997). Entraînement de l'azote dans les eaux de surface et conséquences sur les écosystèmes aquatiques. In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes" (G. Lemaire and B. Nicolardot, eds.), pp. 39-53. INRA Editions, Reims (France).
- Beaudoin, N. (2006). Caractérisation expérimentale et modélisation des effets des pratiques culturales sur la pollution nitrique d'un aquifère en zone de grande culture. Application au site de Bruyères (02). INAPG (AgroParisTech), Paris.
- Beaudoin, N., Launay, M., Sauboua, E., Ponsardin, G., and Mary, B. (2008). Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyères catchment *European Journal of Agronomy* **29**, 46-57.
- Beaudoin, N., Saad, J. K., Van Laethem, C., Machet, J. M., Maucorps, J., and Mary, B. (2005). Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France : effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystem & Environment* **111**, 292-310.
- Bertrand, R., Kilian, J., Raunet, M., Guillobez, S., and Bourgeon, G. (1985). La connaissance des systèmes de paysages naturels, un préalable à la protection du milieu. L'approche morphopédologique. *Bulletin de Recherches Agronomiques de Gembloux* **20**, 545-559.
- Bock, L. (1994). Analyses de sols et gestion de l'espace. *Etude et Gestion des Sols* **1**, 23-33.
- Bockstaller, C., Feschet, P., and Angevin, F. (2015). Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *Oilseeds & fats Crops and Lipids* **22**, D102.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Keichinger, O., Girardin, P., Galan, M.-B., and Gaillard, G. (2009). Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems : a review. *Agron. Sustain. Dev.* **29**, 223-235.

- Bolan, N. S., Saggar, S., Luo, J. F., Bhandral, R., and Singh, J. (2004). Gaseous emissions of nitrogen from grazed pastures: Processes, measurements and modelling, environmental implications, and mitigation. In "Advances in Agronomy, Vol 84" (D. L. Sparks, ed.), Vol. 84, pp. 37-120.
- Boniface, R. (1996). Lysimètres de Versailles. Bilan 1974-1990. In "Un point sur trente ans de lysimétrie en France" (J. C. Muller, ed.), pp. 327-385. Comifer & INRA.
- Bothe, H., Fergusson, S., and Newton, W. E. (2007). "Biology of the nitrogen cycle."
- Boulaine, J. (1992). "Histoire d'agronomie en France," Lavoisier, Paris.
- Boussingault, J.-B. (1860). "Agronomie, chimie agricole et physiologie," Malet Bachelier, Paris.
- Bremner, J. M. (1965). Inorganic forms of nitrogen. In "Methods of soils analysis. Part 2." (C. A. Black, ed.), pp. 1179-1237. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Brouyère, S., Orban, P., and Ruty, I. (2006). "L'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines en région wallonne. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon.." ULg, Liège.
- Bruckler, L., de Cockborne, A. M., Renault, P., Claudot, B., and Sablier, L. (1996). Sampling strategies for estimating nitrate budget at a field scale. In "L'eau souterraine en région agricole", pp. 9-12, Poitiers.
- Brye, K. R., and Gbur, E. E. (2010). Regional Differences in Soil Carbon and Nitrogen Storage as Affected by Land Use and Soil Moisture Regime. *Soil Science* **175**, 339-348.
- Buczko, U., and Kuchenbuch, R. O. (2010). Environmental indicators to assess the risk of diffuse nitrogen losses from agriculture. *Environmental Management* **45**, 1201-1222.
- Cann, C. (1998). Evolution de l'agriculture et de sa pression polluante sur le bassin et en Bretagne. In "Agriculture intensive et qualité des eaux" (C. Cheverry, ed.), pp. 25-40. INRA, Versailles (France).
- Canter, L. W. (1997). "Nitrates in groundwater," Lewis, University of Oklahoma.
- Catin, G. (2001). "Lessivage des nitrates en systèmes de cultures annuelles – Diagnostic du risque et propositions de gestion de l'interculture," Comifer - Groupe Azote.
- Cellier, P., Germon, J. C., Henault, C., and Genermont, S. (1997). Les émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote par les sols cultivés : mécanismes de production et quantification des flux. In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes" (G. Lemaire and B. Nicolardot, eds.), pp. 25-37. INRA Editions, Reims (France).
- Chapot, J. Y., Schwab, G., and Huck, C. (1996). Le dispositif lysimétrique de Colmar. Etude de l'incidence de l'introduction de cultures pièges à nitrates, pendant l'interculture, sur les flux d'eau et d'azote. In "Un point sur trente ans de lysimétrie en France" (J. C. Muller, ed.), pp. 151-168. Comifer & INRA.
- Christensen, S., Simikins, S., and Tiedje, J. M. (1990). Spatial variation in denitrification : dependency of activity centers on the soil environment. *Soil Science Society of America Journal* **54**, 1608-1613.
- Commission\_européenne (2013). "Rapport de la Commission au Conseil et au Parlement européen relatif à la mise en oeuvre de la directive 91/676/CEE du Conseil concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, sur la base des rapports établis par les Etats membres pour la période 2008-2011."
- Corpen (1992). "Gerer l'interculture pour limiter les fuites de nitrates vers les eaux," Corpen editeur.
- Corpen (2006). "Des indicateurs AZOTE pour gérer des actions de maîtrise des pollutions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire," Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, France.
- Cousin, I., Nicoullaud, B., and Coutadeur, C. (2003). Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena* **53**, 97-114.
- Coutadeur, C., Cousin, I., and Nicoullaud, B. (2000). Influence de la phase caillouteuse sur la réserve en eau des sols. Cas des sols de Petite Beauce du Loiret. *Etude et Gestion des Sols* **7**, 191-205.
- Dagnelie, P. (1998a). "Statistique théorique et appliquée. Inférence statistique à une et deux dimensions.."
- Dagnelie, P. (1998b). "Statistique théorique et appliquée. Statistique descriptive et base de l'inférence statistique."
- Dautrebande, S., and Dewez, A. (1996). "Programme-Action-Hesbaye, rapport scientifique.." Faculté universitaire des Sciences agronomiques, Unité d'Hydraulique agricole, Gembloux.

- De Leon, A. (1990). Nitric pollution of waters in Spain : present situation and prospects. In "Nitrates-Agriculture-Eau. International Symposium" (R. Calvet, ed.), pp. 576. INRA, Paris (La Défense) - France.
- De Ruijter, F. J., Boumans, L. J. M., Smit, A. L., and Van Den Bergh, M. (2007). Nitrate in upper groundwater on farms under tillage as affected by fertilizer use, soil type and groundwater table. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **77**, 155-167.
- de Scorraille, G. (1986). La fertilisation d'hier à aujourd'hui. *Culture Technique* **16**, 78-85.
- De Serres, O. (1651). "Le théâtre d'agriculture et mesnage des champs," La Maison Rustique, Paris.
- de Thysebaert, D., Brahy, V., Bellayachi, A., Cuvelier, C., Dejemeppe, J., Genereux, C., Maes, E., Marzo, G., Renard, V., and Thiry, V. (2015). Les indicateurs clés de l'environnement wallon 2014. In "Rapport sur l'état de l'environnement wallon." (S. P. d. Wallonie, ed.), pp. 205, Namur.
- Delloye, F., Demarets, X., Imerzoukène, S., and Masset, R. (2011). Etat des nappes d'eau souterraine de la Wallonie. Service Public de Wallonie, Jambes.
- Demyttenaere, P., Hofman, G., Ronse, D., and Van Ruymbeke, M. (1990). Excessive soil mineral-N at harvest of field-grown vegetables : impact on the nitrate pollution of ground and surface water. In "Nitrates-Agriculture-Eau" (R. Calvet, ed.), pp. 237-244. INRA, Paris (France).
- Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Fonder, N., Heens, B., Bernaerdt, R., Xanthoulis, D., and Marcoen, J. M. (2009). "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.." Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech.
- Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Fonder, N., Heens, B., Xanthoulis, D., and 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.." Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech.
- Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Fonder, N., Heens, B., Xanthoulis, D., and 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. Convention Service Public de Wallonie n° 3523/4. ." Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech.
- Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Gaule, D., Bolly, P.-Y., and Marcoen, J. M. (2012). Mise en oeuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote à l'échelle de deux petits bassins versants agricoles (Arquennes-Belgique) et évaluation d'impact par le suivi des flux de nitrate aux exutoires et par modélisation numérique. In "2ème Atelier Nitrate-Eau. Evaluation du Programme de Gestion Durable de l'Azote" (C. Vandenberghe, G. Colinet, J. P. Destain and J. M. Marcoen, eds.), Vol. 17 (S1), pp. 145. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Dent, D., and Young, A. (1981). "Soil Survey and Land Evaluation," London.
- Deprez, B., Parmentier, R., Lambert, R., and Peeters, A. (2007). "Les prairies temporaires : une culture durable pour les exploitations mixtes de la Moyenne Belgique.," Service Public de Wallonie, Namur, Belgique.
- Destain, J. P., Reuter, V., Frankinet, M., Delcarte, E., Mohimont, A.-C., Vandenberghe, C., and Marcoen, J. M. (2002). Etablissement d'un cahier des charges pour la mesure d'azote nitrique dans les sols. Synthèse et justifications. Dossier GRENeRA 02-01. In "Convention-cadre relative au programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne. Rapport d'activités annuel intermédiaire 2002" (J. M. Marcoen, C. Vandenberghe, A.-C. Mohimont and T. Garot, eds.), pp. 20. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Duchaufour, P. (1995). "Pédologie. Sol, végétation, environnement," quatrième/Ed. Masson, Paris.
- Dumas, J.-L. (1965). Liebig et son empreinte sur l'agronomie moderne. *Revue d'histoire des sciences et de leurs application* **18**, 73-108.
- Favrot, J. C., Arrouays, D., Bornand, M., Girard, M. C., and Hardy, R. (1994). Informatisation et spatialisation de la ressource sol: le programme «Inventaire, Gestion et conservation des sols». *Cahiers Agricultures* **3**, 237-246.

- Fergusson, R. B., Frank, K. D., Herbert, G. W., Penas, E. J., and Wiese, R. A. (1991). "Guidelines for soil sampling," Institute of Agricultural and Natural Resources, University of Nebraska, Lincoln.
- Fonder, N., Debauche, O., Vandenberghe, C., Xanthoulis, D., and 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.." Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Fonder, N., Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Xanthoulis, D., and Marcoen, J. M. (2010). Suivi de la percolation du nitrate en terres cultivées par la technique lysimétrique. In "Atelier Nitrate-Eau. Evaluation du programme de gestion durable de l'azote" (C. Vandenberghe and J. M. Marcoen, eds.), Vol. 14 S1, pp. 17-25. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Peyresq (France).
- Fonder, N., Vandenberghe, C., Xanthoulis, D., and 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.." Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Gaillard, J. (2012). "Sustainable Use of Nitrogen. Action 2.4. Reliquat Virtuel. Test opérationnel 2012. Rapport Final." INRA & ITB, Laon.
- Gault, J., Guillet, M., Guerber, F., Hubert, C., Paulin, F., and soulié, M. C. (2015). "Analyse de la mise en oeuvre de la directive nitrates par d'autres Etats membres de l'Union européenne. Allemagne, Belgique (Flandre), Danemark, Espagne (Catalogne), Irlande, Pays Bas.." Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie & Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt., Paris.
- Genot, V., Renneson, M., Colinet, G., Goffaux, M.-J., Toussaint, B., Buffet, D., and Oger, R. (2012). "Base de données sols de Requasud (3ème synthèse)," Requasud asbl.
- Gervasoni, L. (1996). Contribution à l'établissement d'un référentiel géomorphopédologique et agropédologique en vue d'une gestion durable des sols., Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques, Gembloux.
- Geypens, M., Feyen, J., Hofman, G., Merckx, R., Van Cleemput, O., and Van Orshoven, J. (2001). Mineral nitrogen in the soil as a policy instrument to reduce N-leaching from agricultural soils. In "11ème Atelier sur l'azote", pp. 451-452. INRA.
- Godinot, O., Leterme, P., Vertès, F., and Carof, M. (2016). Indicators to evaluate agricultural nitrogen efficiency of the 27 member states of the European Union. *Ecological indicators* **66**, 612-622.
- Gros, A. (1957). "Engrais. Guide pratique de la fertilisation," La maison rustique, Paris.
- Guiot, J. (1971). Evolution de l'azote minéral dans le sol et fumure azotée du blé d'hiver. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* **6**, 280-325.
- Guiot, J. (1973). La migration de l'azote dans le sol. In "Semaine d'étude Sol et Fertilisation", pp. 378-385. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Guiot, J. (1975). Estimation des réserves azotées du sol par détermination de l'azote minéral. *Revue Agricole* **28**, 1117-1132.
- Guiot, J., Goffart, J.-P., and Destain, J.-P. (1992). Le dosage des nitrates dans le sol. *Bulletin de Recherches Agronomiques de Gembloux*, 61-64.
- Jolivet, C. (2000). Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles., Université de Bourgogne.
- Juang, T. C., Wang, M. K., Chen, H. J., and Tan, C. C. (2001). Ammonium fixation by surface soils and clays. *Soil Science* **166**, 345-352.
- Kheyrodin, H., and Autoun, H. (2011). Tillage and manure effect on soil physical and chemical properties and on carbon and nitrogen mineralization potentials. *African Journal of Biotechnology* **10**, 9824-9830.
- Knappe, S., Haferkorn, U., and Meissner, R. (2002). Influence of different agricultural management systems on nitrogen leaching: results of lysimeter studies. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* **165**, 73-77.
- Kumar, K., and Goh, K. M. (2000). Crop residues and management practices: Effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. *Advances in Agronomy, Vol 68* **68**, 197-319.

- Ladha, J. K., Pathak, H., Krupnik, T. J., Six, J., and van Kessel, C. (2005). Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *In "Advances in Agronomy, Vol 87"* (D. L. Sparks, ed.), Vol. 87, pp. 85-156.
- Laloux, R., Darcheville, M., and Poelart, J. (1969). Quelques considérations sur la fumure des cultures de rotation. *In "La fumure"*, pp. 141-155. Centre de Recherches Agronomiques de l'Etat, Namur.
- Lambert, R., Van Bol, V., Maljean, J. F., and Peeters, A. (2002). "Prop'Eau-Sable Projet-pilote pour la protection des eaux de la nappe des sables bruxelliens." Université catholique de Louvain (Laboratoire d'Ecologie des Prairies - Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale), Louvain-la-Neuve.
- Lecrenier, A. (1969). Introduction. *In "La fumure"*, pp. 3-5. Centre de Recherches Agronomiques de l'Etat, Namur.
- Leip, A., Billen, G., Garnier, J., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Reis, S., Simpson, D., Sutton, M. A., De Vries, W., Weiss, F., and Westhoek, H. (2015). Impacts of European livestock production: Nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters* **10**.
- Lemaire, G., Gastal, F., Plenet, D., and Le Bot, J. (1997). Le prélèvement d'azote par les peuplements végétaux et la production des cultures. *In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes"* (G. Lemaire and B. Nicolardot, eds.), pp. 121-139. INRA Editions, Reims (France).
- Leteinturier, B., Tychon, B., and Oger, R. (2007). Agronomical and agro-environmental diagnosis of crop sequences in wallonia (Belgium). *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement* **11**, 235-250.
- Liebig, J. (1823). "Les lois naturelles de l'agriculture; traduit d'après la dernière édition allemande par Ad. Scheler," Librairie agricole de la "Maison Rustique"/Ed., Paris.
- Lozet, J., and Mathieu, C. (1990). "Dictionnaire de science du sol," Lavoisier, Paris (France).
- Lozet, J., and Mathieu, C. (2002). "Dictionnaire de Science du Sol," Tec & Doc, Paris.
- Makowski, D., Tichit, M., Guichard, L., Van Keulen, H., and Beaudoin, N. (2009). Measuring the accuracy of agro-environmental indicators. *Journal of environmental Management* **90**, 139-146.
- Maltas, A., Machet, J. M., Le Roux, C., Damay, N., and Sinaj, S. (2015). Evaluation of AzoFert®, a software tool for optimising nitrogen fertilisation of swiss field crops. *Agrarforschung Schweiz* **6**, 336-345.
- Manning, J. C. (1997). "Applied principles of hydrology," 3rd /Ed., Englewood Cliffs NJ, USA.
- Marchetti, R., Stevanato, P., and Biancardi, E. (2001). Nitrogen available to sugar beet in the deep soil profile. *In "11ème Atelier sur l'azote"* (INRA, ed.), pp. 491-492.
- Marcoen, J. M., De Brakeleer, J., and Champagne, J.-P. (2002). La Directive 2000/60/CE établissant un cadre pour la politique communautaire dans le domaine de l'eau. Première rencontre des acteurs impliqués dans sa mise en oeuvre. *Tribune de l'Eau* **55**.
- Mary, B., and Recous, S. (1994). Measurement of nitrogen mineralization and immobilization fluxes in soil as a mean of predicting net mineralization. *European Journal of Agronomy* **3**, 291-300.
- Moal, J. F., Martinez, J., Guiziou, F., and Coste, C. M. (1995). Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. *The Journal of Agriculture Science* **125**, 245-252.
- Mohimont, A.-C., Maesen, P., Vandenberghe, C., Delcarte, E., and Marcoen, J. M. (2003). "Etude comparative de différents modes de conservation d'échantillons de sol en vue de l'analyse d'azote nitrique." Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Möller, K., and Reents, H.-J. (2009). Effects of various cover crops after peas on nitrate leaching and nitrogen supply to succeeding winter wheat or potato crops. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172**, 277-287.
- Monaco, S., Sacco, D., Pelissetti, S., Dinuccio, E., Balsari, P., Rostami, M., and Grignani, C. (2011). Laboratory assessment of ammonia emission after soil application of treated and untreated manures. *The Journal of Agriculture Science*.
- Muller, J. C. (1995). "Un point sur trente ans de lysimétrie en France (1960-1990). Une technique, un outil pour l'étude de l'environnement.," INRA - Comifer, Paris.

- Muntz, M. A., and Girard, A.-C. (1888). "Les engrais. Alimentation des plantes. Fumiers," Bibliothèque de l'enseignement agricole, Paris.
- Muntz, M. A., and Girard, A.-C. (1889). "Les engrais. Engrais azotés - engrais phosphatés," Bibliothèque de l'enseignement agricole, Paris.
- Murphy, D. V., Recous, S., Stockdale, E. A., Fillery, I. R. P., Jensen, L. S., Hatch, D. J., and Goulding, K. W. T. (2003). Gross nitrogen fluxes in soil: Theory, measurement and application of N-15 pool dilution techniques. *Advances in Agronomy, Vol 79* **79**, 69-118.
- Nicolardot, B., Mary, B., Houot, S., and Recous, S. (1997). La dynamique de l'azote dans les sols cultivés. In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes" (G. Lemaire and B. Nicolardot, eds.), pp. 87-103. INRA Editions, Reims (France).
- Nisard, M. (1844). "Les agronomes latins : Caton, Varron, Columelle, Palladius," Paris.
- O'Geen, A. T., Budd, R., Gan, J., Maynard, J. J., Parikh, S. J., and Dahlgren, R. A. (2010). Mitigating nonpoint source pollution in agriculture with constructed and restored wetlands. In "Advances in Agronomy, Vol 108" (D. L. Sparks, ed.), Vol. 108, pp. 1-76.
- Pamperin, L., Scheffer, B., and Schäfer, W. (2003). Recommendations for a groundwater conserving land use in a water protection area on the basis of field experiment data. *Landnutzung und Landentwicklung* **44**, 63-69.
- Papy, F. (2008). Le système de culture : un concept riche de sens pour penser le futur. *Cahiers Agricultures* **17**, 263-269.
- Peeters, A., Biolders, C., Hermy, M., Mathijs, E., Muys, B., and Vanclooster, M. (2005). Framework for assessing sustainability levels in belgian agricultural systems (SAFE). In "Sustainable production and consumption patterns", pp. 125. Belgian Science Policy, Bruxelles.
- Pelster, D. E., Larouche, F., Rochette, P., Chantigny, M. H., Allaire, S., and Angers, D. A. (2011). Nitrogen fertilization but not soil tillage affects nitrous oxide emissions from a clay loam soil under a maize-soybean rotation. *Soil and Tillage Research* **115-116**, 16-26.
- Petit, S. (2012). Développement d'un outil de prédiction du reliquat azoté du sol au printemps dans les parcelles agricoles wallonnes sur base de l'APL, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Pineros Garcet, J. D., Tilmant, A., Javaux, M., Degant, E., Rentmeesters, G., Vanclooster, M., and Persoons, E. (2000). "Mobilité des Nitrates au dessus des Cultures Agricoles. Etude expérimentale et numérique en vue de la mise en oeuvre du programme d'action de la directive européenne CEE/91/676. Rapport final.." Unité de Génie Rural. Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Rathke, G.-W., Behrens, T., and Diepenbrock, W. (2006). Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) : a review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **117**, 80-108.
- Recous, S., Loiseau, P., Machet, J. M., and Mary, B. (1997). Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies. In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes" (G. Lemaire and B. Nicolardot, eds.), pp. 105-120. INRA Editions, Reims (France).
- Romanowicz, A. A., Vanclooster, M., Rounsevell, M., and La Jeunesse, I. (2005). Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling*
- Rozier, F. (1785). "Cours complet d'agriculture, théorique, pratique, économique, et de médecine rurale et vétérinaire, suivi d'une méthode pour étudier l'agriculture par principes.," Paris.
- Sauvenier, X., Valckx, J., Van Cauwenbergh, N., Wauters, E., Bachev, H., Biala, K., Biolders, C., Brouckaert, V., Franchois, L., Garcia-Cidad, V., Goyens, S., Hermy, M., Mathijs, E., Muys, B., Reijnders, J., Vanclooster, M., Van der Veken, S., and Peeters, A. (2005). "SAFE - Framework for assessing sustainability levels in Belgian agricultural systems," Belgian Science Policy Office, Bruxelles.
- Schilling, E., and Neubauer, D. (2009). "Acceptance sampling in Quality Control.," CRC Press, London.
- Schimdhalter, U., Alfoeldi, T., and Oertli, J. J. (1992). Représentativité des analyse de l'azote minéral résiduel du sol. *Revue suisse agricole* **24**, 51-56.
- Schimel, D. S. (1986). Carbon and nitrogen turnover in adjacent grassland and cropland ecosystems. *Biogeochemistry* **2**, 345-357.

- Schvartz, C., Muller, J. C., and Decroux, J. (2005). "Guide de la fertilisation raisonnée. Grandes cultures et prairies," France Agricole/Ed.
- Schweigert, P., and Zimmerman, P. (2003). The Nmin content of the soil as an agricultural environmental indicator of water pollution with nitrate. *Berichte uber Landwirtschaft* **81**, 192-207.
- Scokart, P. O., Guns, M., and De Borger, R. (1990). Lixiviation des nitrates sous différents systèmes de culture : premiers résultats d'études en cases lysimétriques. In "Nitrates-Agriculture-Eau" (R. Calvet, ed.), pp. 227-232. INRA, Paris (France).
- Sebillotte, M., and Meynard, J. M. (1990). Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. In "Nitrates-Agriculture-Eau" (R. Calvet, ed.), pp. 576. INRA, Paris-La Défense (France).
- Shepherd, M. A., and Webb, J. (1999). Effects of overwinter cover on nitrate loss and drainage from a sandy soil: consequences for water management? *Soil Use and Management* **15**, 109-116.
- Sicard, P. (2006). Caractérisation des retombées atmosphériques en France en zone rurale sous forme de précipitations, gaz et aérosols. Analyse des tendance spatio-temporelles et des séries chronologiques, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- Silverthooth, J. C., Watson, J. E., Malcuit, J. E., and Doerge, T. A. (1992). Bromide and nitrate movement in an irrigated cotton production system. *Soil Science Society of America Journal* **56**, 548-555.
- Sohier, C., Degre, A., and Dautrebande, S. (2009). From root zone modelling to regional forecasting of nitrate concentration in recharge flows - The case of the Walloon Region (Belgium) *Journal of Hydrology* **369**, 350-359.
- Sommer, S. G., Olesen, J. E., and Christensen, B. T. (1991). Effect of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. *The Journal of Agriculture Science* **117**, 91-100.
- Spychaj-Fabisiak, E., and Gonet, S. S. (2001). Leaching of ammonium nitrogen from soils as a function of soils properties,. In "11ème Atelier sur l'azote" (INRA, ed.), pp. 363-365.
- Stenger, R., Priesack, E., and Beese, F. (2002). Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot scale. *Geoderma* **102**, 259-275.
- Tabor, J. A., Warrick, A. W., Meyers, D. E., and Pennington, D. A. (1985). Spatial variability on nitrate in irrigated cotton. Soil nitrate and correlated variables. *Soil Science Society of America Journal* **49**, 390-394.
- Tavernier, R., and Marechal, R. (1958). Carte des associations de sols de la Belgique. *Pédologie* **8**, 375-380.
- Tetegan, M., Richer de Forges, A. C., Verbeque, B., Nicoullaud, B., Desbourdes, C., Bouthier, A., Arrouays, D., and Cousin, I. (2015). The effect of soil stoniness on the estimation of water retention properties of soils: A case study from central France. *Catena* **129**, 95-102.
- Thamdrup, B. (2012). New pathways and processes in the global nitrogen cycle. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* **43**, 407-428.
- Thorup-Kristensen, K. (1994). The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops. *Fertilizer Research* **37**, 227-234.
- Thorup-Kristensen, K., and Dresboll, D. B. (2010). Incorporation time of nitrogen catch crops influences the N effect for the succeeding crop. *Soil and Use Management* **26**, 27-35.
- Thorup-Kristensen, K., Magid, J., and Jensen, L. S. (2003). Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy, Vol 79* **79**, 227-302.
- Turbé, A., De Toni Benito, A., Lavelle, P., Lavelle, P., Ruiz Camacho, N., Van Der Putten, W., Labouze, E., and Mudgal, S. (2010). "Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. Rapport de synthèse."
- Tychon, B., Guiot, J., Debbaut, V., and Vanderborgh, P. (1990). Evolution du profil en azote des sols agricoles du sud de la Belgique. In "Nitrates-Agriculture-Eau" (R. Calvet, ed.), pp. 375-380. INRA, Paris (France).
- Van Cauwenbergh, N., Biala, K., Biielders, C., Brouckaert, V., Franchois, L., Garcia-Cidad, V., Hermy, M., Mathijs, E., Muys, B., Reijnders, J., Sauvenier, X., Valckx, J., Vanclooster, M., Van der Veken, B., Wauters, E., and Peeters, A. (2007). SAFE—A hierarchical framework for

- assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, Ecosystem & Environment* **120**, 229-242.
- van der Werf, H. M. G., and Petit, J. (2002). Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level : a comparison and analysis of 12 indicators-based methods. *Agriculture, Ecosystem & Environment* **93**, 131-145.
- Vandenberghé, C. (2010). Mise en relation de l'évolution de l'agriculture et de la qualité des eau entre 1950 et 2000. *Biotechnologie Agronomie Societe et Environnement* **14 (S1)**, 9-16.
- Vandenberghé, C., Colinet, G., Destain, J. P., and Marcoen, J. M. (2013). Mise en oeuvre de la révision du Programme d'action lié à la Directive Nitrates. *Biotechnologie Agronomie Societe et Environnement* **17**, 161-163.
- Vandenberghé, C., and Marcoen, J. M. (2004). Transposition of the Nitrate Directive (EC) in the Walloon Region (Belgium): establishment of the potentially leachable nitrogen references in the Walloon Region. *Biotechnologie Agronomie Societe et Environnement* **8**, 111-118.
- Vandenberghé, C., and Marcoen, J. M. (2010). Scientific contribution to the efficiency of the nitrate action programmes. In "3rd International Meuse Symposium, 22-23 avril 2010". Région wallonne, Direction Générale Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement, the University of Liege (Aquapole) and the University of Namur, in collaboration with the International Meuse Commission and the delegations, Liège.
- Vandenberghé, C., Marcoen, J. M., Sohler, C., Degre, A., Hendrickx, C., and Paulus, F. (2009). Monitoring networks and modelling systems for assessing effectiveness of the EU Nitrates Directive Action Programmes: Approach by the Walloon Region (Belgium). In "Developments in monitoring the effectiveness of the EU Nitrates Directive Action Programmes." (D. Fraters and K. Kovar, eds.), pp. 119-140. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM, Bilthoven, the Netherlands), Amsterdam.
- Vandenberghé, C., Warin, A., and Marcoen, J. M. (2005). "Evaluation d'indicateurs environnementaux –contribution à la convention d'étude SAFE. Dossier GRENeRA 04-04." Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Vermoesen, A., Van Cleemput, O., and Hofman, G. (1993). Nitrogen loss processes. *Pédologie* **XLIII-3**, 417-433.
- Vetter, H., and Steffens, G. (1990). Land utilization, nitrogen management and water quality. In "Nitrates – Agriculture – Eaux" (INRA, ed.), pp. 555-572.
- Watts, D. B., Torbert, H. A., and Prior, S. A. (2010). Soil Property and Landscape Position Effects on Seasonal Nitrogen Mineralization of Composted Dairy Manure. *Soil Science* **175**, 27-35.
- Weilhermüller, L., Siemens, J., Deurer, M., Knoblauch, S., Rupp, H., Göttlein, A., and Pütz, T. (2007). In situ soil water extraction: A review. *Journal of Environmental Quality* **36**, 1735-1748.
- West, P. W., and Lyles, G. L. (1960). A new method for the determination of nitrates. *Anal. Chim. Acta.* **23**, 227-232.

COMMUNAUTÉ FRANÇAISE DE BELGIQUE

UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBOUX AGRO-BIO TECH

**Performance de l'indicateur *Azote*  
*Potentiellement Lessivable* pour l'évaluation de  
la gestion du nitrate en agriculture et du risque  
pour la qualité de l'eau**

Ir Christophe VANDENBERGHE

# ANNEXES

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en  
sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs : Professeurs G. Colinet & J.M. Marcoen

Année 2016

## Table des matières

### **ANNEXE 1. EVOLUTION DE L'AGRICULTURE..... 1-12**

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>1-12</b>
<b>2</b>	<b>L'occupation du sol.....</b>	<b>1-13</b>
2.1	La superficie agricole utile.....	1-13
2.2	Les prairies.....	1-13
2.3	Les cultures.....	1-14
2.4	Synthèse par province.....	1-22
<b>3</b>	<b>La fertilisation.....</b>	<b>1-26</b>
3.1	Les céréales.....	1-28
3.2	La betterave.....	1-34
3.3	Le maïs.....	1-37
3.4	La pomme de terre.....	1-38
3.5	Le colza.....	1-38
3.6	La prairie.....	1-39
3.7	Les légumineuses.....	1-41
3.8	Le lin.....	1-41
<b>4</b>	<b>Le cheptel.....</b>	<b>1-42</b>
4.1	Introduction.....	1-42
4.2	Cheptel bovin.....	1-42
4.3	Cheptel porcin.....	1-43
4.4	Production d'azote par les cheptels bovin et porcin.....	1-44

### **ANNEXE 2. EVALUATION DE L'UTILITÉ DE L'APL POUR UN CONSEIL DE FERTILISATION IDOINE ..... 2-46**

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>2-46</b>
<b>2</b>	<b>Méthodologie.....</b>	<b>2-46</b>
<b>3</b>	<b>A partir de moyennes régionales.....</b>	<b>2-47</b>
3.1	Sources des données.....	2-47
3.2	Résultats 2008-2009.....	2-49
3.3	Résultats 2009-2010.....	2-54
3.4	Perspectives.....	2-59
<b>4</b>	<b>A partir de données à la parcelle.....</b>	<b>2-61</b>
4.1	Introduction.....	2-61
4.2	Matériel et méthode.....	2-61
4.3	Impact de l'occupation du sol et de l'année.....	2-63
4.4	Prédiction du RSH.....	2-64
4.5	Conclusions.....	2-123
<b>5</b>	<b>Prédiction uniquement sur base d'observations RSH.....</b>	<b>2-126</b>
5.1	Introduction.....	2-126
5.2	Description de la base de données.....	2-126
5.3	Description des données.....	2-129
5.4	Evaluation de l'erreur liée à l'utilisation d'une valeur médiane.....	2-134
5.5	Conclusion.....	2-142

## **ANNEXE 3. ESTIMATION D'UN APL MOYEN ET ÉVOLUTION AU COURS DES SOIXANTE DERNIÈRES ANNÉES ..... 3-144**

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>3-144</b>
<b>2</b>	<b>Estimation de l'APL moyen en 2010.....</b>	<b>3-145</b>
2.1	Introduction .....	3-145
2.2	Le contrôle APL .....	3-145
2.3	Les résultats du contrôle 2012 .....	3-146
2.4	APL moyen par région agricole entre 2008 et 2012 .....	3-165
2.5	Conclusions .....	3-170
<b>3</b>	<b>Estimation de l'APL moyen dans les années nonante .....</b>	<b>3-172</b>
3.1	Introduction .....	3-172
3.2	Observations APL .....	3-172
3.3	Synthèse et interprétation .....	3-175
3.4	Répartition des cultures dans le paysage agricole.....	3-176
3.5	Estimation de l'APL moyen .....	3-177
<b>4</b>	<b>Estimation au cours des décennies précédentes .....</b>	<b>3-178</b>
4.1	Introduction .....	3-178
4.2	1980.....	3-178
4.3	1960.....	3-179
<b>5</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>3-180</b>

## **ANNEXE 4. BIBLIOGRAPHIE ..... 4-182**



## Liste des tableaux

Tableau 1-1. Evolution du nombre d'exploitations agricoles dans le Hainaut entre 1950 et 2007....	1-12
Tableau 1-2. Evolution de la part des prairies dans la superficie agricole utile des provinces wallonnes .....	1-14
Tableau 1-3. Evolution de la part des cultures dans la superficie agricole utile des provinces wallonnes.....	1-14
Tableau 1-4. Evolution de la consommation d'engrais en Belgique (1910-1950) (en kg N.ha <sup>-1</sup> ).....	1-26
Tableau 1-5. Evolution de la consommation d'engrais en Belgique (1955-1973) (en kg.ha <sup>-1</sup> ).....	1-27
Tableau 1-6. Fertilisation azotée mise en œuvre dans l'essai 'céréale' de la Station de Phytotechnie en 1962-1966.....	1-29
Tableau 1-7. Fertilisation azotée mise en œuvre dans l'essai 'froment d'hiver' de la Station de Phytotechnie en 1965. ....	1-30
Tableau 1-8. Fertilisation azotée mise en œuvre dans l'essai 'froment de printemps' de la Station de Phytotechnie en 1965. ....	1-30
Tableau 1-9. Rendements moyens par hectare des céréales en Belgique pour les années culturales 1964-1965 et 1965-1966. ....	1-31
Tableau 1-10. Fertilisation azotée mise en œuvre dans l'essai 'céréale' de la Station de Phytotechnie en 1968-1969.....	1-31
Tableau 1-11. Fertilisation azotée optimale en céréales entre 1966 et 1972. ....	1-32
Tableau 1-12. Fertilisation azotée mise en œuvre dans les essais 'betterave' de l'Institut Agronomique de l'Etat entre 1953 et 1956 .....	1-34
Tableau 1-13. Fertilisation azotée mise en œuvre dans les essais de la Station de Phytotechnie de 1960-1962.....	1-35
Tableau 1-14. Evolution de la taille du cheptel bovin entre 1950 et 2010. ....	1-42
Tableau 1-15. Evolution de la taille du cheptel porcin entre 1950 et 2010. ....	1-43
Tableau 1-16. Proportion et production d'azote par sous-catégorie de cheptel bovin. ....	1-44
Tableau 1-17. Proportion et production d'azote par sous-catégorie de cheptel porcin. ....	1-44
Tableau 2-1. APL 2008 classés par région agricole et par précédent.....	2-49
Tableau 2-2. Reliquat azoté du printemps 2009 classés par région agricole et par précédent. ....	2-51
Tableau 2-3. APL 2009 classés par région agricole et par précédent.....	2-55
Tableau 2-4. Reliquat azoté du printemps 2010 classés par région agricole et par précédent. ....	2-57
Tableau 2-5. Classes d'occupation de sol .....	2-62
Tableau 2-6. Description des données après précédent 'betterave' et mesure du RSH jusqu'à 90 cm	2-64
Tableau 2-7. Description des données après précédent 'betterave' et mesure du RSH jusqu'à 60 cm	2-64
Tableau 2-8. Betterave. Régression RSH 90 cm - APL .....	2-65
Tableau 2-9. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie totale .....	2-66
Tableau 2-10. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle .....	2-67
Tableau 2-11. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai .....	2-68

Tableau 2-12. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction .....	2-69
Tableau 2-13. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL(oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai .....	2-69
Tableau 2-14. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-70
Tableau 2-15. Betterave. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle .....	2-71
Tableau 2-16. Betterave. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai .....	2-72
Tableau 2-17. Betterave. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-73
Tableau 2-18. Betterave. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction (sans valeur aberrante) .....	2-73
Tableau 2-19. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL.....	2-74
Tableau 2-20. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie.....	2-75
Tableau 2-21. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle.....	2-76
Tableau 2-22. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle /évaluation de l'erreur de prédiction .....	2-77
Tableau 2-23. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle. ....	2-78
Tableau 2-24. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction. ....	2-79
Tableau 2-25. Froment suivi d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle - délai. ....	2-80
Tableau 2-26. Froment suivi d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-81
Tableau 2-27. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle. ....	2-81
Tableau 2-28. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle - délai. ....	2-82
Tableau 2-29. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction. ....	2-83
Tableau 2-30. Céréales suivies d'un apport de fumier et d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.....	2-84
Tableau 2-31. Céréales suivies d'un apport de fumier et d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-85
Tableau 2-32. Céréales suivies d'une CIPAN sans apport d'engrais de ferme. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle - délai.....	2-85
Tableau 2-33. Céréales suivies d'une CIPAN sans apport d'engrais de ferme. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-86
Tableau 2-34. Céréales suivies d'un apport d'engrais de ferme à action rapide et d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai. ....	2-87
Tableau 2-35. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle.....	2-88

Tableau 2-36. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle.....	2-89
Tableau 2-37. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle/évaluation de l'erreur de prédiction. ....	2-90
Tableau 2-38. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.....	2-90
Tableau 2-39. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-91
Tableau 2-40. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.....	2-92
Tableau 2-41. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai (sans valeurs aberrantes).....	2-93
Tableau 2-42. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction (sans valeurs aberrantes). ....	2-94
Tableau 2-43. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL.....	2-95
Tableau 2-44. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL - pluviométrie. ....	2-96
Tableau 2-45. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle. ....	2-97
Tableau 2-46. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle / évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-97
Tableau 2-47. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai. ....	2-98
Tableau 2-48. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-99
Tableau 2-49. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle - délai. ....	2-99
Tableau 2-50. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-100
Tableau 2-51. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle - délai. ....	2-101
Tableau 2-52. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-102
Tableau 2-53. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai (sans valeur aberrante).....	2-102
Tableau 2-54. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction (sans valeur aberrante).....	2-103
Tableau 2-55. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai.....	2-104
Tableau 2-56. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-105
Tableau 2-57. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL.....	2-106
Tableau 2-58. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL - pluviométrie.....	2-107
Tableau 2-59. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle. ....	2-108
Tableau 2-60. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.....	2-109
Tableau 2-61. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.....	2-110

Tableau 2-62. Pomme de terre. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.	2-111
Tableau 2-63. Pomme de terre. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l’erreur de prédiction.	2-112
Tableau 2-64. Colza. Régression RSH 90 cm – APL.	2-113
Tableau 2-65. Colza. Régression RSH 90 cm – APL - pluviométrie.	2-114
Tableau 2-66. Colza. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie totale janvier et février.	2-115
Tableau 2-67. Colza. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle janvier et février. ....	2-116
Tableau 2-68. Colza. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai - sans valeur aberrante.	2-117
Tableau 2-69. Colza. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l’erreur de prédiction.	2-118
Tableau 2-70. Colza. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai - sans valeur aberrante.	2-119
Tableau 2-71. Colza. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l’erreur de prédiction.	2-120
Tableau 2-72. Légumes. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai.	2-121
Tableau 2-73. Légumes. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l’erreur de prédiction.	2-122
Tableau 2-74. Synthèse des régressions RSH– APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )	2-124
Tableau 2-75. Synthèse des RSH par précédent cultural.	2-130
Tableau 2-76. Analyse de la variance des RSH par précédent cultural.	2-130
Tableau 2-77. Impact de la région agricole sur le RSH	2-131
Tableau 2-78. Impact de la date d’échantillonnage sur le RSH	2-132
Tableau 2-79. Impact de l’engrais de ferme sur le RSH	2-133
Tableau 2-80. Impact de la CIPAN sur le RSH.	2-133
Tableau 3-1. Correspondance des classes de culture.	3-147
Tableau 3-2. Evolution des résultats globaux des contrôles de 2008 à 2012.	3-149
Tableau 3-3. Variabilité des APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles de betterave contrôlées en 2012.	3-150
Tableau 3-4. Variabilité des APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles de céréales avec CIPAN contrôlées en 2012.	3-151
Tableau 3-5. Variabilité des APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles de céréale sans CIPAN contrôlées en 2012.	3-152
Tableau 3-6. Variabilité des APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles de maïs contrôlées en 2012.	3-153
Tableau 3-7. Variabilité des APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles de pomme de terre contrôlées en 2012.	3-154
Tableau 3-8. Variabilité des APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles de colza contrôlées en 2012.	3-155
Tableau 3-9. Variabilité des APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles de légume contrôlées en 2012.	3-156

Tableau 3-10. Variabilité des APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les prairies contrôlées en 2012. ....	3-157
Tableau 3-11. Evolution des effectifs, des APL moyens (en kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) et pourcentages de conformité pour les différentes classes de culture depuis 2008. ....	3-158
Tableau 3-12. Pourcentage de parcelles contrôlées conformes et APL moyen en fonction de la classe de culture en 2012. ....	3-160
Tableau 3-13. Proportion de parcelles contrôlées conformes et APL moyen en fonction de la région agricole dans les exploitations contrôlées en 2012.....	3-161
Tableau 3-14. Proportion de parcelles contrôlées conformes en fonction de la présence d'une CIPAN en 2012. ....	3-162
Tableau 3-15. Pourcentage de parcelles conformes par échantillonneur. ....	3-163
Tableau 3-16. Pourcentage de parcelles conformes en fonction de la taille de la parcelle dans les exploitations contrôlées en 2012. ....	3-163
Tableau 3-17. Pourcentage de conformité des parcelles contrôlées en fonction du bassin hydrographique lors du contrôle 2012.....	3-164
Tableau 3-18. Superficie des cultures et prairie par région agricole en 2012. ....	3-166
Tableau 3-19. Superficie des cultures et prairie par province en 2010. ....	3-166
Tableau 3-20. Proportion de CIPAN par région agricole lors du contrôle 2012. ....	3-166
Tableau 3-21. APL moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) dans les parcelles contrôlées en 2012.....	3-167
Tableau 3-22. APL moyen total par région agricole. ....	3-169
Tableau 3-23. Comparaison et moyenne des APL moyens (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) de 2008 à 2012. ....	3-170
Tableau 3-24. Observations APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) après betterave et maïs en 1993. ....	3-172
Tableau 3-25. Observations APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) après pomme de terre et haricot en 1993. ....	3-172
Tableau 3-26. Observations APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) après froment et escourgeon en 1993.....	3-173
Tableau 3-27. Observations APL après betterave, pomme de terre et maïs en 1994. ....	3-173
Tableau 3-28. Observations APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) après betterave, chicorée, colza, avoine et fève des marais en 1995. ....	3-173
Tableau 3-29. Reliquat azoté après betterave, légumineuse, pomme de terre, chicorée, maïs et colza fin janvier 1998. ....	3-174
Tableau 3-30. Reliquat azoté moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) par occupation de sol pour les années nonante.3-175	
Tableau 3-31. Superficie des cultures et prairie par région agricole en 1990. ....	3-176
Tableau 3-32. Superficie des cultures et prairie par province en 1990. ....	3-177
Tableau 3-33. APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) moyen par région agricole en 1990 (observations céréales non modifiées).....	3-177
Tableau 3-34. APL (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> ) moyen par région agricole en 1990 (hypothèses en céréales).....	3-177
Tableau 3-35. Superficie des cultures et prairie par province en 1980. ....	3-179
Tableau 3-36. Superficie des cultures et prairie par province en 1960. ....	3-179

## Liste des figures

Figure 1-1. Proportion de prairie dans la superficie agricole utile des communes wallonnes en 2010. 1-13	
Figure 1-2. Evolution des superficies des grandes cultures de 1850 à 1980 en Belgique.....	1-15
Figure 1-3. Evolution des superficies de céréales de 1840 à 1980 en Belgique.....	1-16
Figure 1-4. Evolution des superficies des rendements moyens des principales cultures de 1840 à 1980 en Belgique.....	1-17
Figure 1-5. Evolution des superficies de maïs (grain + pâteux + fourrager), par canton administratif, entre 1960 et 1970.....	1-18
Figure 1-6. Evolution des superficies (en milliers d'ha) de maïs (grain + pâteux + fourrager) dans les provinces wallonnes, entre 1970 et 1980.....	1-19
Figure 1-7. Evolution de la superficie cultivée en betterave sucrière, du nombre d'exploitation et de leur rendement de 1840 à 1980 en Belgique.....	1-21
Figure 1-8. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province du Hainaut.....	1-22
Figure 1-9. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province du Brabant wallon.....	1-23
Figure 1-10. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province de Liège.....	1-24
Figure 1-11. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province de Namur.....	1-24
Figure 1-12. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province de Luxembourg.....	1-25
Figure 1-13. Evolution de la production sucrière en Belgique (en kg.ha <sup>-1</sup> ).....	1-36
Figure 1-14. Evolution de la taille du cheptel bovin entre 1950 et 2010.....	1-43
Figure 1-15. Evolution de la taille du cheptel porcin entre 1950 et 2010.....	1-43
Figure 1-16. Evolution de la production d'azote par les cheptels bovin et porcin entre 1950 et 2010. 1-44	
Figure 2-1. Méthodologie de constitution de la base de données.....	2-47
Figure 2-2. Ecran d'encodage d'un reliquat de printemps.....	2-48
Figure 2-3. Histogramme de la nature des précédents dans les parcelles échantillonnées en entrée d'hiver.....	2-49
Figure 2-4. Histogramme de la nature des précédents dans les parcelles échantillonnées en sortie d'hiver.....	2-50
Figure 2-5. Reliquat azoté (région sablo-limoneuse) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.....	2-52
Figure 2-6. Reliquat azoté (région limoneuse humide) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.....	2-53
Figure 2-7. Reliquat azoté (région limoneuse sèche) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.....	2-53
Figure 2-8. Reliquat azoté (Condroz) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver. ...	2-54
Figure 2-9. Histogramme de la nature des précédents dans les parcelles échantillonnées en entrée d'hiver.....	2-55

Figure 2-10. Histogramme de la nature des précédents dans les parcelles échantillonnées en sortie d'hiver.....	2-56
Figure 2-11. Reliquat azoté (région sablo-limoneuse) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.....	2-58
Figure 2-12. Reliquat azoté (région limoneuse) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.....	2-58
Figure 2-13. Reliquat azoté (Condroz) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver..	2-59
Figure 2-14. Comparaison entrée et sortie hiver pour quelques associations culture/région agricole au cours des hivers 2008-2009 et 2009-2010.....	2-60
Figure 2-15. Carte des fermes de référence en région wallonne .....	2-61
Figure 2-16. Distribution de la pluviométrie (mm) hiver mensuelle entre 2003 et 2013. Source : CRAw.....	2-63
Figure 2-17. Ecran d'encodage d'un reliquat de printemps.....	2-127
Figure 2-18. Résultats des analyses en Famenne avec précédent « céréales pailles enlevées ».....	2-128
Figure 2-19. Requête .....	2-128
Figure 2-20. Répartition des mesures de RSH par région agricole .....	2-129
Figure 2-21. Répartition des mesures de RSH par précédent cultural.....	2-129
Figure 2-22. Distribution de fréquence des observations réalisées en colza .....	2-134
Figure 2-23. Distribution de fréquence des observations réalisées en céréale avec précédent pauvre..	2-135
Figure 2-24. Distribution de fréquence des observations réalisées en céréale avec précédent riche ....	2-135
Figure 2-25. Distribution de fréquence des observations réalisées après une céréale paille enlevée....	2-136
Figure 2-26. Distribution de fréquence des observations réalisées après un maïs fourrager .....	2-137
Figure 2-27. Distribution de fréquence des observations réalisées après un maïs fourrager en région herbagère liégeoise.....	2-138
Figure 2-28. Distribution de fréquence des observations réalisées, par région agricole, après un maïs fourrager.....	2-138
Figure 2-29. Distribution de fréquence des observations réalisées, par région agricole, après une céréale paille enlevée.....	2-139
Figure 2-30. Distribution de fréquence des observations réalisées en Condroz sur un colza (culture en place).....	2-139
Figure 2-31. Distribution de fréquence des observations réalisées en région limoneuse sèche sur une céréale après un précédent pauvre.....	2-140
Figure 2-32. Distribution de fréquence des observations réalisées en région limoneuse sèche sur une céréale après un précédent riche.....	2-140
Figure 2-33. Distribution de fréquence des observations réalisées, par type d'engrais de ferme (apport en été –automne avec CIPAN), après une céréale paille enlevée.....	2-141
Figure 2-34. Distribution de fréquence des observations réalisées, par type d'engrais de ferme (apport en été –automne avec CIPAN), sur les parcelles de colza (culture en place).....	2-141
Figure 3-1. Déroulement du programme d'observation.....	3-146
Figure 3-2. Répartition et conformité des parcelles contrôlées en 2012. ....	3-147

Figure 3-3. Distribution des cultures échantillonnées depuis 2007.....	3-148
Figure 3-4. Distribution de la conformité de l'exploitation en fonction du mode de sélection. ....	3-149
Figure 3-5. Résultats APL sur les parcelles de betterave contrôlées en 2012. ....	3-150
Figure 3-6. Résultats APL sur les parcelles de céréale avec CIPAN contrôlées en 2012. ....	3-151
Figure 3-7. Résultats APL sur les parcelles de céréale sans CIPAN contrôlées en 2012.....	3-152
Figure 3-8. Résultats APL sur les parcelles de maïs contrôlées en 2012. ....	3-153
Figure 3-9. Résultats APL sur les parcelles de pomme de terre contrôlées en 2012.....	3-154
Figure 3-10. Résultats APL sur les parcelles de colza contrôlées en 2012. ....	3-155
Figure 3-11. Résultats APL sur les parcelles de légume contrôlées en 2012.....	3-156
Figure 3-12. Résultats APL sur les prairies contrôlées en 2012.....	3-157
Figure 3-13. APL moyens en culture (sur 90 cm) et prairie (sur 30 cm) par région agricole. ....	3-168
Figure 3-14. Distribution des mesures APL (Prop'Eau-Sable) en 1997. ....	3-174
Figure 3-15. Distribution des mesures APL observées entre 1993 et 1997. ....	3-175
Figure 3-16. Part de la culture dérobée dans la SAU (période 1979-1982). ....	3-178

# Annexe 1. Evolution de l'agriculture

## 1 Introduction

Au cours des cent dernières années, l'agriculture, comme bien d'autres secteurs d'activités (primaire ou secondaire) a connu une forte évolution liée dans un premier temps à la mécanisation et dans un second temps aux progrès de la phytotechnie (sélection variétale, protection des cultures et lutte contre les adventices).

Le paysage agricole (dans le premier sens du terme) a également évolué. De nouvelles espèces sont apparues telles que le maïs et plus récemment la moutarde alors que des prairies sont de plus en plus souvent converties en terre cultivée suite à la disparition du cheval de trait (remplacé par les tracteurs) et à la concentration des cheptels dans des unités toujours plus imposantes (vers un 'zero grazing').

Quelques chiffres peuvent illustrer l'importance de cette mutation. Ainsi, au début du siècle dernier, 25 à 30 hommes étaient nécessaires pour faucher (sans ramasser, lier et battre) un hectare de blé en une heure. Aujourd'hui, une moissonneuse-batteuse conduite par un seul homme effectue le tout en deux fois moins de temps. En considérant le temps nécessaire à ramasser, lier et battre le blé, on peut estimer l'augmentation de productivité de l'ordre de grandeur d'un facteur 1000.

La force de traction animale (essentiellement les chevaux de trait) a été abondamment utilisée jusque dans les années cinquante. A cette époque, deux chevaux de trait pouvaient labourer un demi-hectare par jour. Aujourd'hui, un tracteur fait près du triple en une heure. La productivité a ainsi été augmentée de l'ordre de grandeur d'un facteur 50.

Cette évolution a logiquement eu un impact sur la population active en agriculture. Ainsi, à titre d'exemple, entre 1950 et 2007, la province du Hainaut a perdu 97 % de ses exploitations agricoles soit un peu plus 200.000 unités (tableau 1-1).

**Tableau 1-1. Evolution du nombre d'exploitations agricoles dans le Hainaut entre 1950 et 2007.**

	1950	2007
Sans terres	3.804	62
De 0,01 à moins de 5 ha	192.202	761
De 5 ha à moins de 10 ha	6.850	469
De 10 à moins de 20 ha	5.405	672
De 20 à moins de 30 ha	1.451	616
De 30 à moins de 50 ha	726	1.226
De 50 ha et plus	333	2.157
S.A.U. de la province	260.787 ha	212.987 ha

Aujourd'hui, dans le Hainaut, deux tiers des superficies agricoles sont cultivées par des exploitations qui comptent plus de 50 ha alors qu'en 1950, la même proportion était cultivée par des exploitations qui comptaient moins de 20 ha.

Il est à noter qu'en 1950, l'immense majorité des exploitations ont une taille qui ne dépasse guère un are, la superficie d'un gros potager ; ceci explique pourquoi, à cette époque, les superficies occupées par la pomme de terre étaient si importantes.

Cette annexe a pour objet d'illustrer l'évolution du paysage agricole wallon, des cultures et pratiques de fertilisation. Ce développement permettra ainsi de mieux appréhender l'impact de ces changements sur notre environnement et plus spécifiquement sur la qualité des eaux souterraines.

## 2 L'occupation du sol

### 2.1 La superficie agricole utile

Entre 1870 et 1940, la superficie agricole utile occupe environ 20.000 km<sup>2</sup> (figure 1-2) soit les 2/3 de la superficie du territoire belge. A partir de cette époque, l'industrialisation, l'urbanisation et la construction de réseaux de communication ont entraîné la perte de près d'un quart de la superficie agricole (Bouquiaux, 1995).

### 2.2 Les prairies

Aujourd'hui, les prairies occupent de l'ordre de 10 à 30 % de la SAU en région limoneuse ou sablo-limoneuse, de 30 à 50 % en Condroz et plus de 50 % dans les autres régions agricoles (figure 1-1).

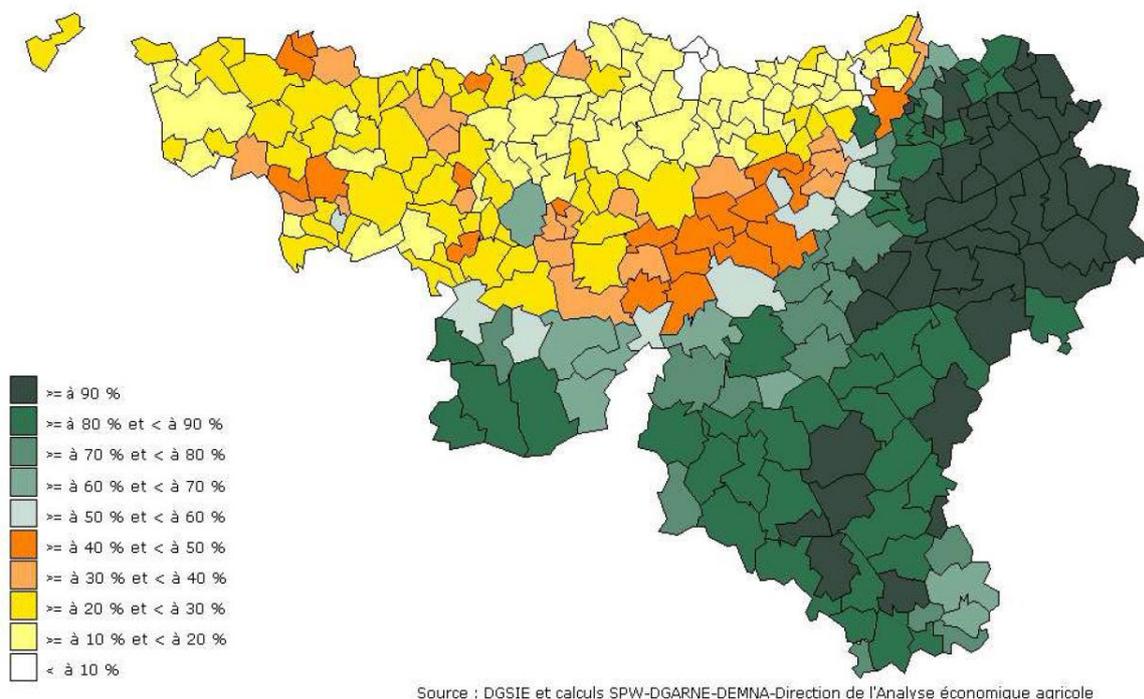


Figure 1-1. Proportion de prairie dans la superficie agricole utile des communes wallonnes en 2010.

La part des prairies dans nos paysages a évolué (principalement à la baisse) au cours du temps, pour les motifs cités ci-dessus mais également pour des raisons plus agro-économiques :

- avènement de la mécanisation qui a simplifié<sup>1</sup> et augmenté la productivité des ouvriers agricoles,
- développement des engrais de synthèse qui ont marginalisé l'intérêt des engrais de ferme,
- amélioration des rendements et de la rentabilité des productions végétales par rapport aux productions animales

<sup>1</sup> On n'est plus obligé de se lever à 4 heures du matin pour nourrir un cheval qui partira 2 heures plus tard au champ et de rentrer 2 à 3 fois par jour pour changer de chevaux.

Le tableau 1-2 illustre ainsi la diminution, depuis 1950, de la part des prairies dans la superficie agricole utile de la région wallonne.

**Tableau 1-2. Evolution de la part des prairies dans la superficie agricole utile des provinces wallonnes**

	1950	1961	1970	1981	1991	2010
Hainaut	52%	49%	45%	38%	35%	32%
Liège	65%	68%	68%	63%	62%	60%
Luxembourg	66%	66%	73%	78%	84%	86%
Namur	56%	56%	56%	50%	47%	47%
Brabant wallon	32%	31%	30%	20%	17%	18%

## **2.3 Les cultures**

### **2.3.1 Introduction**

Depuis le début du XXème siècle, le paysage agricole a fortement évolué sous l'influence de divers phénomènes/facteurs tels que l'exode rural, la mécanisation, l'apparition des engrais, la mécanisation, les changements d'habitudes alimentaires, ...

Après la seconde guerre mondiale, la taille des exploitations des exploitations n'a cessé de croître grâce à la mécanisation. Corolaire, le nombre d'exploitants agricoles a été réduit de l'ordre de 60% (Bouquiaux, 1995).

Par ailleurs, après la seconde guerre mondiale, la part des surfaces cultivées n'a cessé d'augmenter dans la superficie agricole utile des provinces wallonnes, à l'exception de la province du Luxembourg (tableau 1-3).

**Tableau 1-3. Evolution de la part des cultures dans la superficie agricole utile des provinces wallonnes**

	1950	1961	1970	1981	1991	2010
Hainaut	48%	51%	55%	62%	65%	68%
Liège	35%	32%	32%	37%	38%	40%
Luxembourg	34%	34%	27%	22%	16%	14%
Namur	44%	44%	44%	50%	53%	53%
Brabant wallon	68%	69%	70%	80%	83%	82%

### 2.3.2 Les céréales

Les céréales ont constitué depuis plus de deux mille ans, la base de l'alimentation de nos ancêtres. Au XVIème et XVIIème siècle, le nord du pays est plus agricole que le sud qui présente à cette époque plus d'activités dans les secteurs forestiers et miniers (Guldentops, 1983). Fin du XIXème siècle, avec l'apparition des engrais, les céréales occupent une place prépondérante dans le paysage agricole belge (figure 1-2).

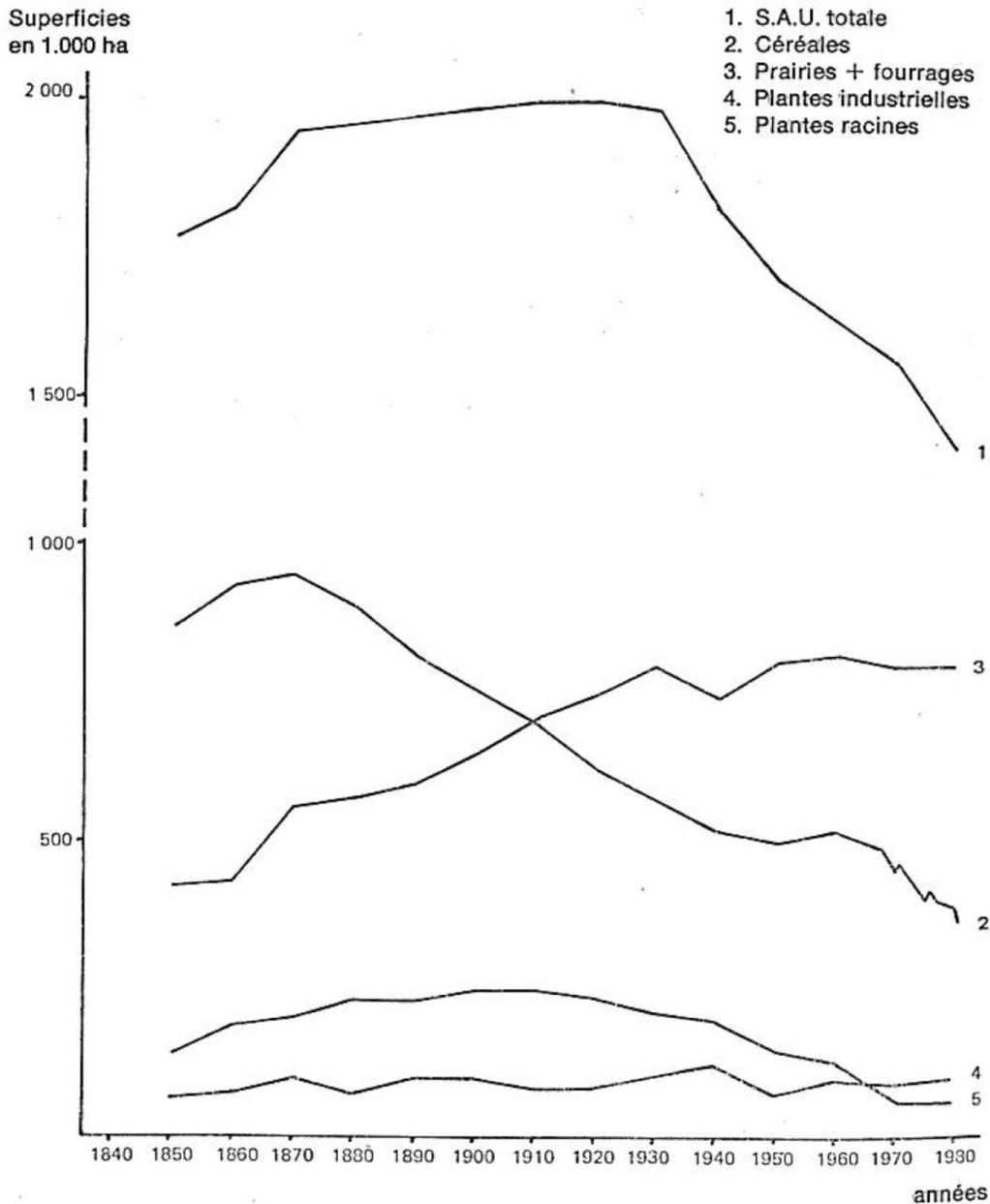


Figure 1-2. Evolution des superficies des grandes cultures de 1850 à 1980 en Belgique.

Le gain en productivité (figure 1-4) a plus que compensé la perte de superficie emblavées en céréales (figure 1-2). Ainsi, la production belge de céréales est passée de 1.600.000 tonnes en 1950 à 2.000.000 tonnes en 1990 (Bouquiaux, 1995).

Jusqu'au début des années cinquante, le froment, le seigle et l'avoine occupent le trio de tête. A cette époque, l'importance de la traction chevaline (250.000 chevaux) pour les travaux aux champs explique les quelques 500.000 hectares d'avoine et de seigle (soit un quart de la S.A.U.) cultivés chaque année

pour nourrir les chevaux (Forget, 1949; Guldentops, 1983). L'apparition de la mécanisation réduira considérablement le nombre de chevaux de trait et les emblavements en avoine et seigle.

Après la seconde guerre mondiale, l'orge va prendre une importance de plus en plus grande dans nos campagnes pour occuper, à partir de 1965, la deuxième place dans le paysage céréalier belge (figure 1-3).

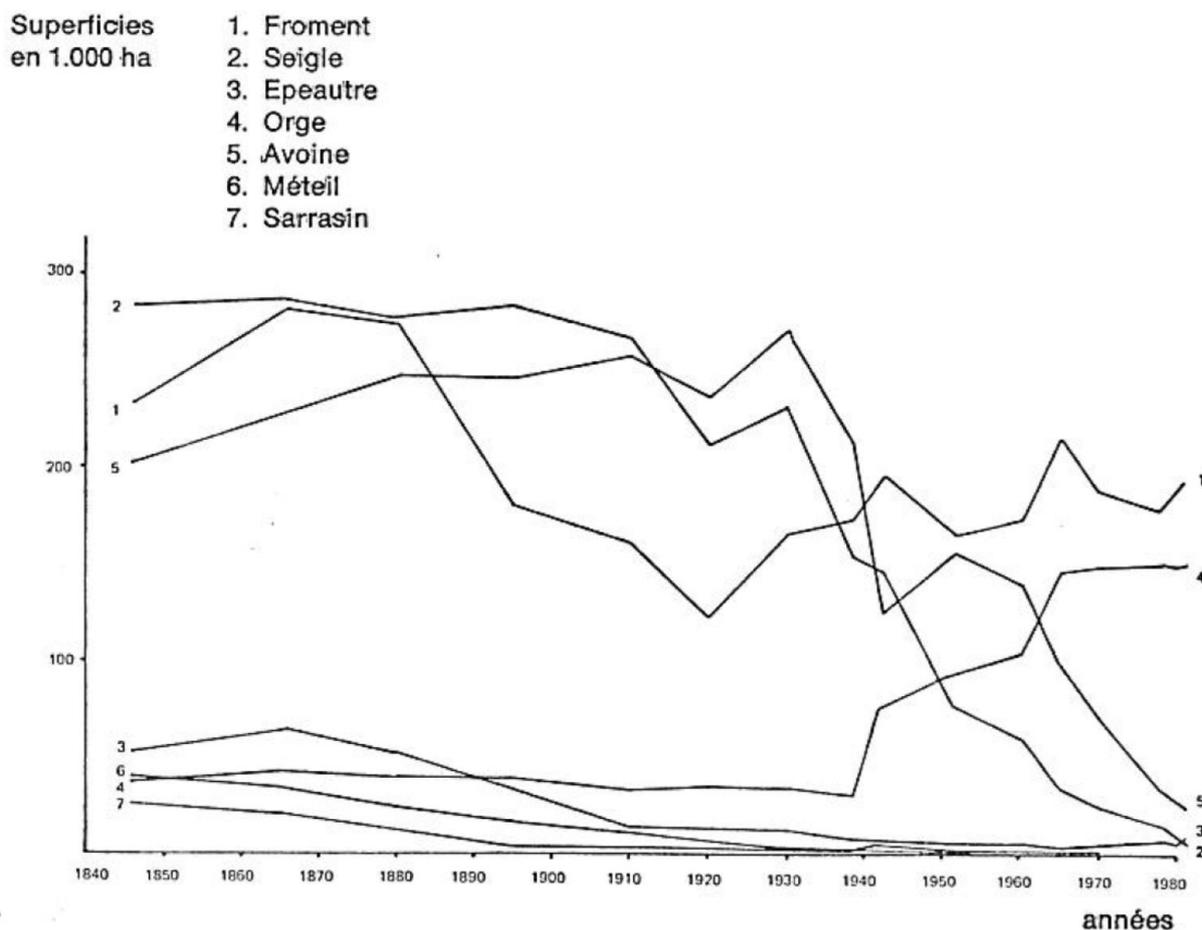


Figure 1-3. Evolution des superficies de céréales de 1840 à 1980 en Belgique.

Cette tendance est la conséquence d'une augmentation importante des rendements de cette culture (figure 1-4), fruit d'une sélection variétale et d'une phytotechnie (fertilisation et protection phytosanitaire) plus performante.

Jusqu'en 1970, l'orge de printemps représente  $\frac{3}{4}$  des emblavements d'orge en Belgique. En trois années, ce ratio va complètement s'inverser. En effet, à partir de 1973, l'orge d'hiver (escourgeon) va représenter plus des deux tiers des emblavements d'orge et, en 1981, plus de 85% (Nutelet and De Schrijver, 1983).

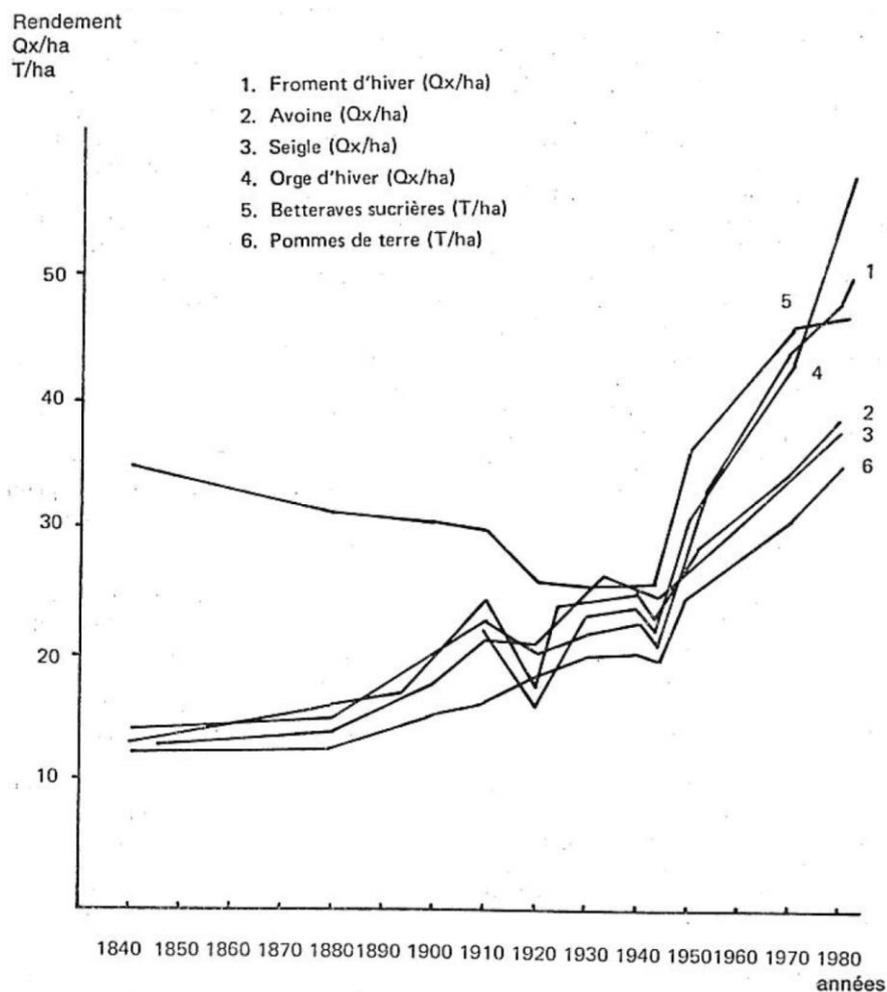
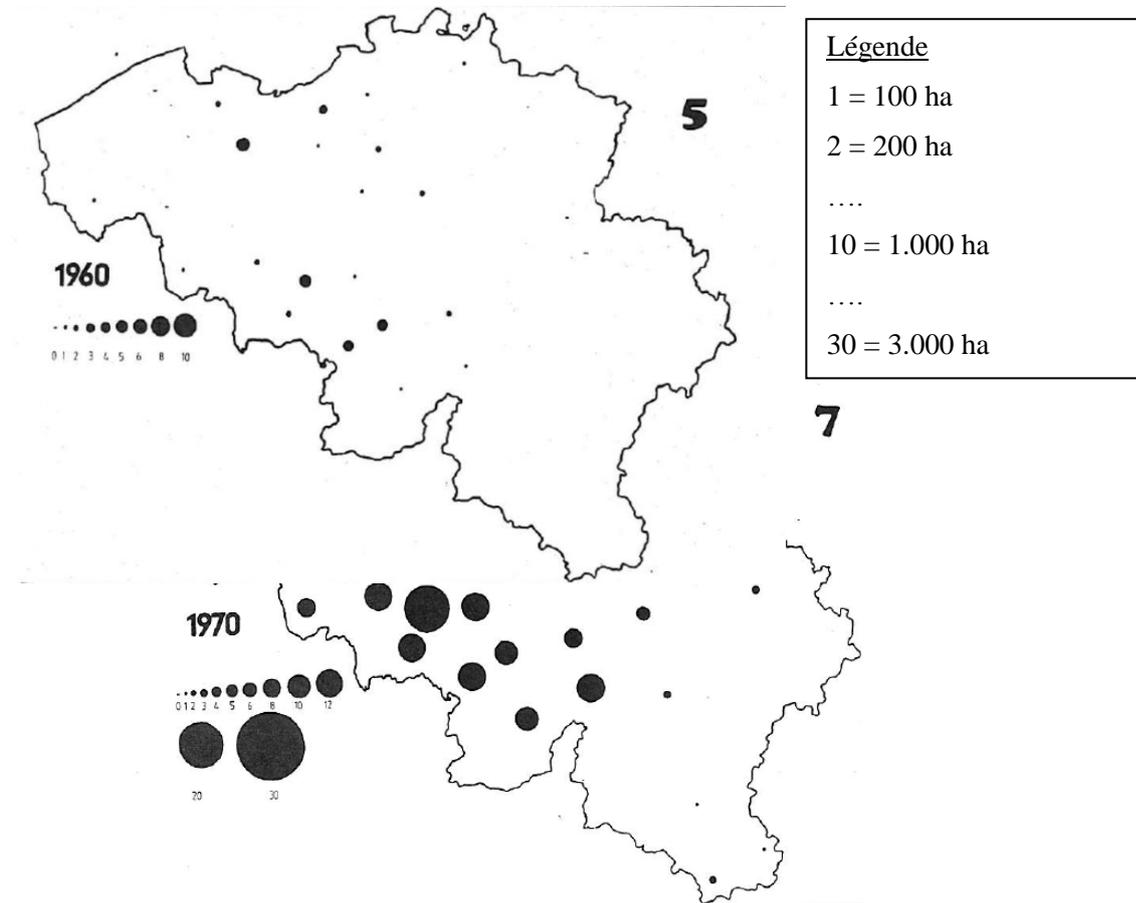


Figure 1-4. Evolution des superficies des rendements moyens des principales cultures de 1840 à 1980 en Belgique.

### 2.3.3 Le maïs

Présent en Flandre dans la fin des années vingt, le maïs ne fera son entrée en Wallonie qu'à partir de 1950 (Ledent and Pironnet, 1982). A partir de cette époque, sa place dans le paysage sera sans cesse croissante (figure 1-5 et figure 1-6).



**Figure 1-5. Evolution des superficies de maïs (grain + pâteux + fourrager), par canton administratif, entre 1960 et 1970.**

En 1970, la majorité du maïs se trouve dans la province du Hainaut (figure 1-5). Ce constat n'évoluera pas jusqu'en 1980 (figure 1-6).

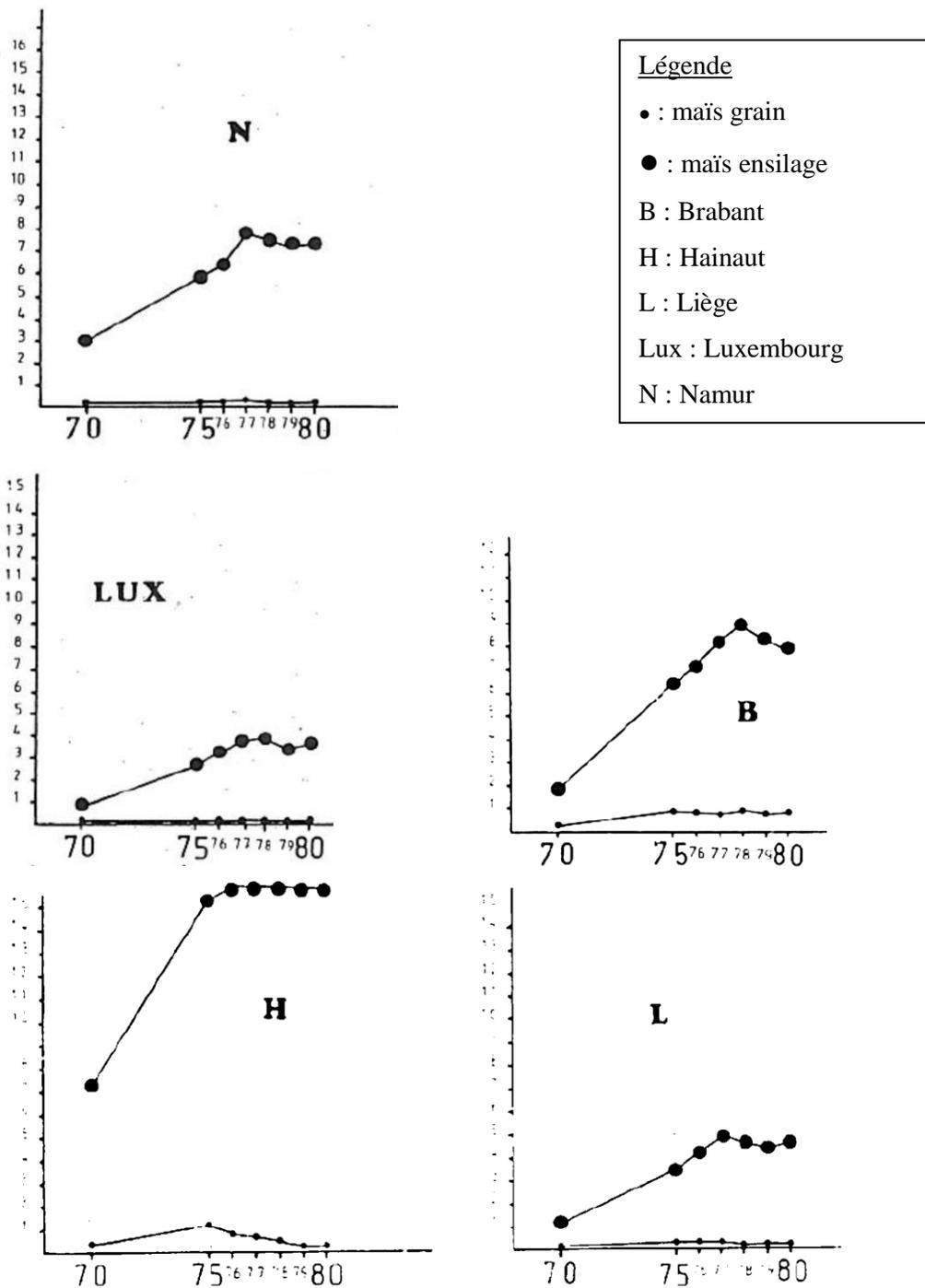


Figure 1-6. Evolution des superficies (en milliers d'ha) de maïs (grain + pâteux + fourrager) dans les provinces wallonnes, entre 1970 et 1980.

### **2.3.4 La pomme de terre**

Importée en Europe au XVIème siècle, elle est cultivée presque partout en Belgique au XVIIIème siècle et constitue au même titre que le blé, une base importante de l'alimentation humaine. En 1880, elle occupe près de 200.000 ha en Belgique (Guldentops, 1983).

Entre 1960 et 1975, les superficies dédiées à cette culture vont régresser de moitié (Bouquiaux, 1995; Nutelet and De Schrijver, 1983) grâce à une augmentation des rendements (figure 1-4) et à cause d'une diminution de la consommation (de 135 kg par an et par habitant en 1960 à 101 kg en 1980) (Guldentops, 1983).

La diminution est plus faible (de l'ordre de 20%) dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse (qui couvrent la Flandre et la Wallonie) et plus importante en région sablonneuse et en Campine (situées en Flandre) (Nutelet and De Schrijver, 1983).

### 2.3.5 La betterave

En 1812, la première sucrerie belge est construite dans l'Abbaye de la Cambre (Bruxelles). En 1872, le maximum de 149 sucreries est atteint (Guldentops, 1983) en Belgique. Aujourd'hui, seuls subsistent les sites de Fontenoy et Longchamps en Wallonie.

Le rendement en sucre a fortement évolué : de 1% fin du XVIIIème siècle (Guldentops, 1983) à 14% en 1950 (Bouquiaux, 1995), 16% en 1960 (Roussel and Jardin, 1975), il est aujourd'hui proche de 20%.

Grâce à son rendement financier et à ses « sous-produits » (pulpes, feuilles, collets, écumes), la betterave sucrière va prendre une importance de plus en plus grande dans le paysage belge. Ainsi, entre 1950 et 1975, sa superficie va quasiment doubler (figure 1-7) (Bouquiaux, 1995; Guldentops, 1983; Nutelet and De Schrijver, 1983).

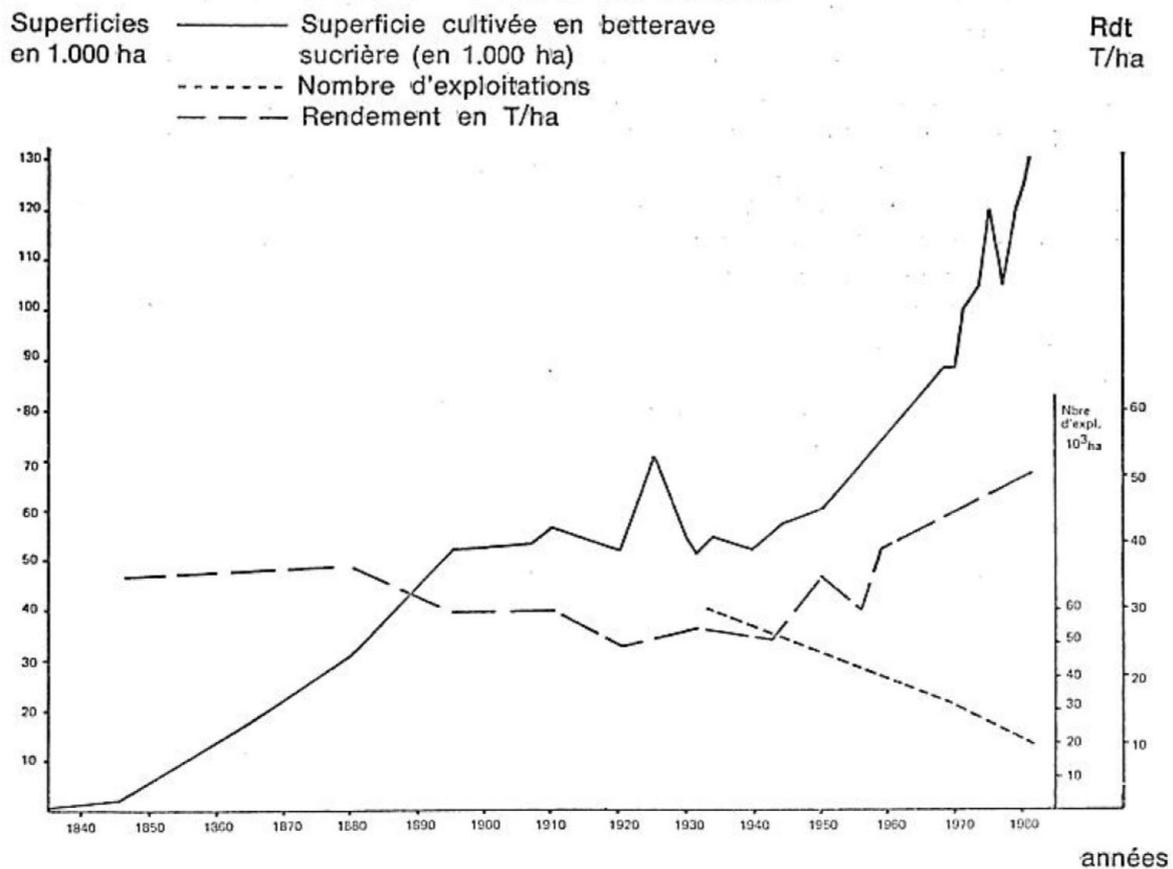


Figure 1-7. Evolution de la superficie cultivée en betterave sucrière, du nombre d'exploitation et de leur rendement de 1840 à 1980 en Belgique.

Au cours de cette période, plus de 80% de la production belge se fait dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse (Nutelet and De Schrijver, 1983).

## 2.4 Synthèse par province

Les statistiques agricoles couvrant l'ensemble du siècle dernier concernent bien souvent l'entièreté de la Belgique.

Il est cependant intéressant de pouvoir disposer d'un regard plus ciblé, province par province pour pouvoir observer quelques différences souvent dictées par un contexte pédoclimatique particulier.

La figure 1-8 illustre l'évolution observée en province du Hainaut. En 2010, la superficie agricole utile représentait 57% du territoire de cette province, soit le pourcentage le plus élevé (avec le Brabant wallon) en Wallonie.

Au cours du temps, on observe :

- une diminution de l'ordre de 40.000 ha (~ 16%) de la part de l'agriculture ;
- la perte d'un tiers des prairies entre 1950 et 2010 ;
- la disparition des cultures 'fourrages' dans les années septante au profit du maïs ;
- une perte de 15.000 ha de betterave au profit de la pomme de terre au cours des trente dernières années.

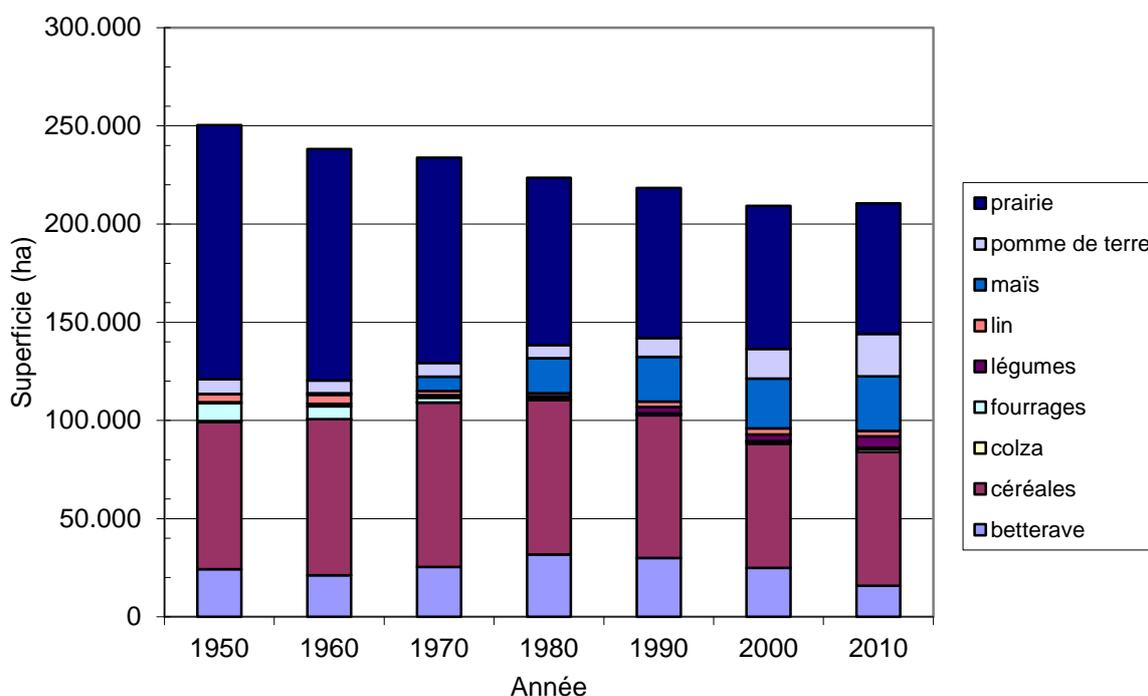
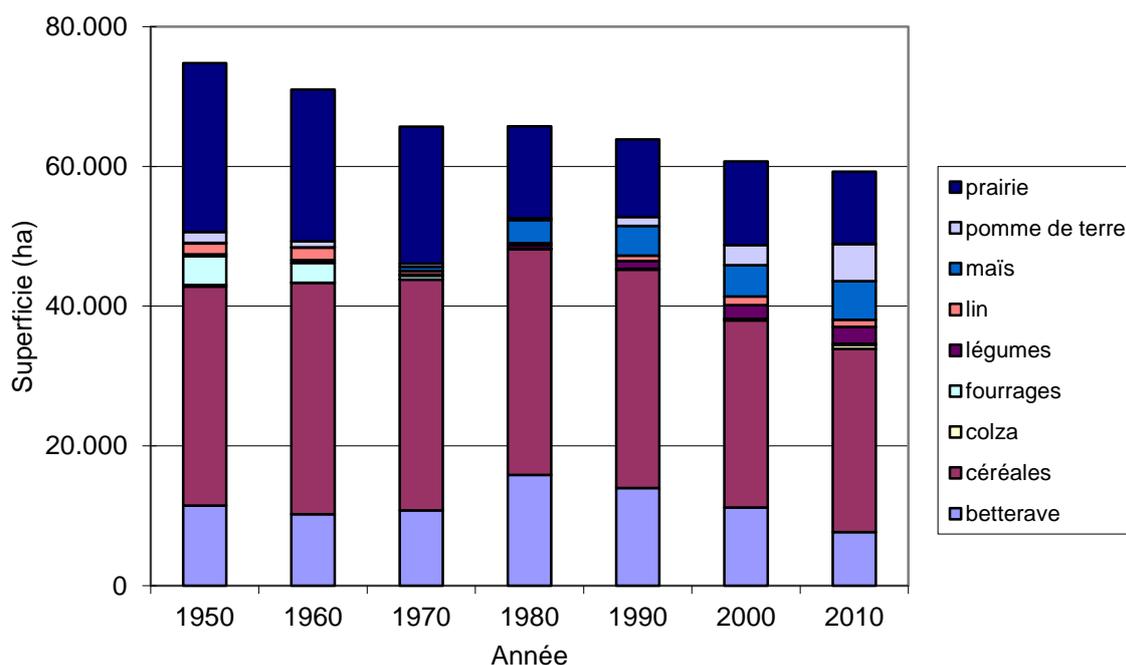


Figure 1-8. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province du Hainaut.

La figure 1-9 illustre l'évolution observée en province du Brabant wallon. En 2010, la superficie agricole utile représentait 58% du territoire de cette province, soit le pourcentage le plus élevé (avec le Hainaut) en Wallonie.

Au cours du temps, on observe :

- une diminution de l'ordre de 15.000 ha (~ 20%) de la part de l'agriculture ;
- la perte de près de 60% des prairies entre 1950 et 2010
- la disparition des cultures 'fourrages' dans les années septante au profit du maïs
- une perte de 8.000 ha de betterave au profit (5.000 ha) de la pomme de terre au cours des trente dernières années.



**Figure 1-9. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province du Brabant wallon.**

La figure 1-10 illustre l'évolution observée en province de Liège. Cette province présente une particularité qui complique l'interprétation des tendances à cette échelle. En effet, sa superficie est pour moitié située en région limoneuse, grosso modo au nord de la Meuse et pour moitié située, grosso modo au sud de la Meuse, en Condroz, Famenne, région herbagère, Ardenne et Haute Ardenne. Le contexte pédoclimatique de la moitié nord est donc assez proche de celui du Brabant wallon tandis que la moitié sud est plus proche des provinces de Namur et du Luxembourg.

En 2010, la superficie agricole utile représentait 41% du territoire de cette province. Cette valeur cache un gradient nord-sud relativement important puisque, à titre d'exemple, la commune de Waremme (nord de la Meuse) consacre près de 75% de son territoire à l'agriculture (essentiellement des terres cultivées) et 1% aux forêts alors que la commune de Stavelot (sud de la Meuse) ne consacre que 34% de son territoire à l'agriculture (essentiellement des prairies) et 50% aux forêts.

Au cours du temps, à l'échelle de la province, on observe :

- une diminution de l'ordre de 45.000 ha (~ 22%) de la part de l'agriculture ;
- la perte de près de 30% des prairies (~ 37.000 ha) entre 1950 et 2010 ;
- la disparition des cultures 'fourrages' dans les années septante au profit du maïs.

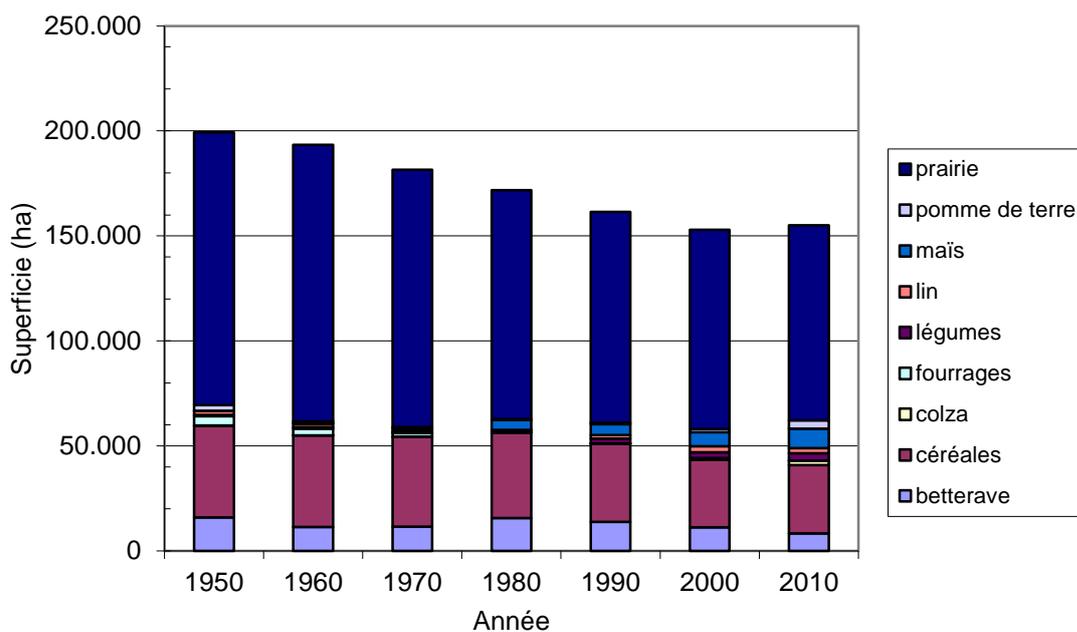


Figure 1-10. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province de Liège.

La figure 1-11 illustre l'évolution observée en province de Namur. En 2010, la superficie agricole utile représentait 43% du territoire de cette province.

Au cours du temps, on observe :

- une diminution de l'ordre de 41.000 ha (~ 20%) de la part de l'agriculture ;
- la perte de près de 38 % des prairies entre 1950 et 2010 ;
- la disparition des cultures 'fourrages' dans les années septante au profit du maïs ;
- une perte de 8.000 ha de betterave au profit (4.000 ha) de la pomme de terre au cours des trente dernières années.

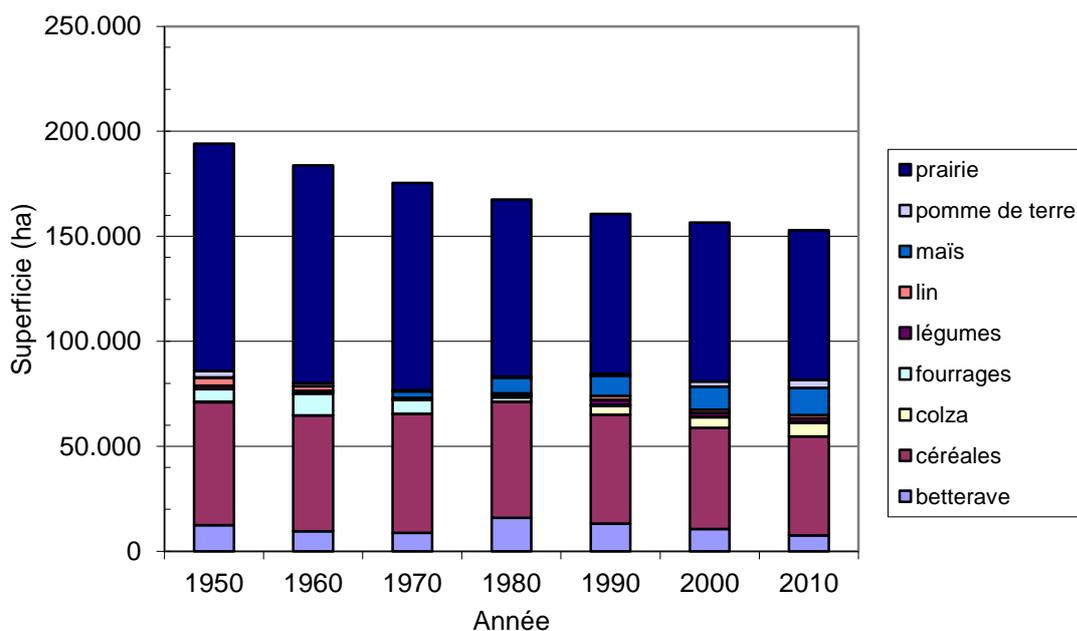
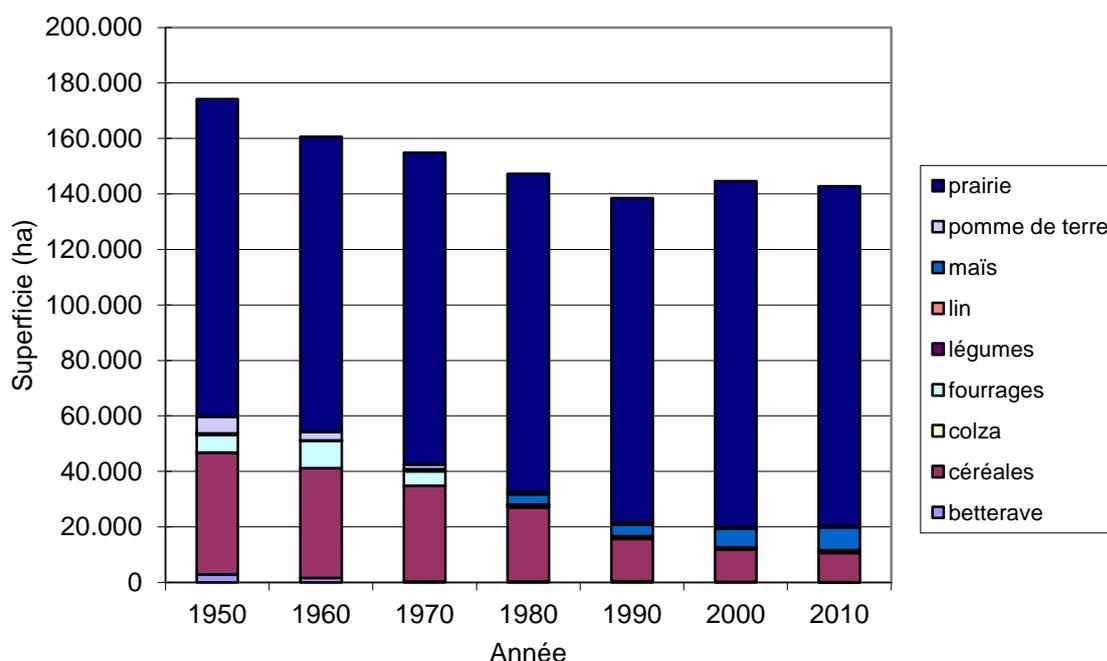


Figure 1-11. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province de Namur.

La figure 1-12 illustre l'évolution observée en province de Luxembourg. En 2010, la superficie agricole utile représentait 32% du territoire de cette province.

Au cours du temps, on observe :

- une diminution de l'ordre de 32.000 ha (~ 18%) de la part de l'agriculture ;
- la perte de près de 75 % (33.000 ha) de céréales entre 1950 et 2010 ;
- la disparition des cultures 'fourrages' dans les années septante au profit du maïs.



**Figure 1-12. Evolution (1950-2010) des superficies emblavées par type de culture en province de Luxembourg.**

Dans cette dernière province, on observe comme dans les autres provinces, une diminution de la part du secteur agricole dans le territoire. Cependant, contrairement aux autres provinces où la diminution concerne essentiellement les prairies, dans la province du Luxembourg, la superficie de prairies reste stable et ce sont les pertes de surfaces céréalières qui expliquent la diminution globale de la part du secteur agricole dans la province.

### 3 La fertilisation

---

Au XIX<sup>ème</sup> siècle (Muntz and Girard, 1889), les besoins en azote étaient évalués souvent de façon empirique d'une part sur l'aspect du sol (plus il est brun, plus il est riche en azote) et d'autre part, a posteriori, sur l'aspect des récoltes. Les méthodes d'analyse de sol étaient nombreuses et les résultats, souvent peu concordant entre eux (Muntz and Girard, 1888). Néanmoins, il était admis qu'une terre riche contenait entre 2 et 10 gr d'azote par kg (soit moins de 1% d'azote) et une terre pauvre, moins de 0,5 gr N.kg<sup>-1</sup> (Muntz and Girard, 1889).

Globalement, il était conseillé d'apporter la fumure organique à l'automne et la fumure minérale au printemps.

Muntz and Girard (1889) relèvent à cette époque des pratiques de fertilisation excessive dans certaines régions du nord de la France où des apports de 1200 kg de nitrate/ha y sont effectués.

Dans les années '30, l'agriculture belge consommait de l'ordre de 59.000 tonnes d'azote par an. Au cours de l'année culturale 1945-46, 87.000 tonnes d'azote ont été épandues sur les terres en Belgique, soit, en moyenne, 50 kg N.ha<sup>-1</sup>. Les prévisions font état d'une croissance de la consommation de l'ordre de 5% par an (Anonyme, 1946).

Entre 1910 et 1950, Bublott (1957) relève que la consommation d'engrais azotés en Belgique a été multipliée par 2,3. Au cours de la même époque, Blomme (1988) estime que celle-ci a plus que quadruplé en Wallonie (tableau 1-4).

**Tableau 1-4. Evolution de la consommation d'engrais en Belgique (1910-1950) (en kg N.ha<sup>-1</sup>)**

	Belgique	Flandre	Wallonie
1910	13,3	20,05	6,50
1950	51,2	74,49	29,06

De 1953 à 1972, les quantités d'engrais apportées par hectare ont augmenté de 3,8 kg par an ; soit un taux de croissance annuel de 5% (Thonon, 1975). Plus particulièrement, entre 1957 et 1969, la consommation d'engrais azoté en Belgique va tout simplement doubler alors que l'utilisation de phosphore et de potasse n'enregistrera qu'une hausse de l'ordre de 20% (Roussel and Jardin, 1975) (tableau 1-5).

**Tableau 1-5. Evolution de la consommation d'engrais en Belgique (1955-1973) (en kg.ha<sup>-1</sup>)**

Année	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1955	53,9	53,2	78,4
1956	49,3	55,9	85,9
1957	51,1	63,4	92,0
1958	51,5	69,3	83,8
1959	56,8	53,4	88,7
1960	52,8	54,8	90,6
1961	59,0	47,5	89,6
1962	61,9	51,3	101,7
1963	75,1	55,7	114,6
1964	82,7	61,0	112,1
1965	74,1	65,7	98,4
1966	89,5	68,8	102,8
1967	95,3	83,2	108,8
1968	105,3	89,6	109,8
1969	102,1	81,9	100,9
1970	114,4	90,9	117,7
1971	105,9	90,7	117,4
1972	106,5	95,0	108,9
1973	106,9	95,4	120,4

### 3.1 Les céréales

Fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, il était conseillé d'apporter la fumure ammoniacale (1/4 de la fumure totale) au semis, le reste (fumure nitrique) étant apporté au tallage. L'effet de l'excès d'azote sur la verse des céréales était déjà connu (Muntz and Girard, 1889).

En 1951, dans son analyse d'une exploitation agricole située en Famenne, Tournay (1951) relève que la fertilisation du froment est réalisée par un apport de 16 kg N.ha<sup>-1</sup> réalisé au printemps. L'épeautre et l'avoine reçoivent respectivement 12 et 16 kg N.ha<sup>-1</sup> au printemps alors que le seigle ne reçoit pas d'azote.

En 1953, dans son analyse d'une exploitation agricole située dans la région de Gembloux, Rixhon (1953) relève pour le froment, une fertilisation azotée très dépendante de la culture précédente :

- dans le cas d'un précédent betterave ou trèfle, une faible dose (quantité non précisée) est apportée si nécessaire au printemps ;
- dans le cas d'un précédent pois, un apport de 20 kg N.ha<sup>-1</sup> est réalisé avant le semis de la céréale ;

Il en est de même pour l'escourgeon :

- dans le cas d'un précédent trèfle, il n'y a aucun apport azoté en septembre. En fonction de l'état de la culture au printemps, une faible dose (quantité non précisée) peut être apportée si nécessaire ;
- dans le cas d'un précédent pois, un apport de 20 kg N.ha<sup>-1</sup> est réalisé avant le semis de la céréale. un complément (dose non spécifiée) peut être apporté au printemps si nécessaire;
- dans le cas d'un précédent lin ou avoine, un apport de 40 kg N.ha<sup>-1</sup> est réalisé avant le semis de la céréale.

En 1955, dans son analyse de plan de culture d'une exploitation agricole hennuyère, Crohain (1955) relève pour le froment, une fertilisation azotée très dépendante de la culture précédente :

- dans le cas d'un précédent betterave ou pomme de terre, aucun apport azoté n'est réalisé si la culture est luxuriante. Dans le cas contraire, un apport de 20 kg N.ha<sup>-1</sup> est effectué ;
- dans le cas d'un précédent avoine, un apport de 50 kg N.ha<sup>-1</sup> est réalisé en mars ;
- dans le cas d'un précédent trèfle, un apport maximum de 20 kg N.ha<sup>-1</sup> est effectué également en mars.

En ce qui concerne l'avoine, culture qui, dans l'exploitation étudiée, suit traditionnellement la betterave, il n'y a pas d'apport d'azote.

La fertilisation de l'escourgeon s'appuie sur deux apports de 30 kg N.ha<sup>-1</sup> réalisés en septembre lors du semis et en mars.

Fin des années cinquante, Laloux (1957) recommande l'application de 45 à 60 kg N.ha<sup>-1</sup> pour des céréales telles que le froment, l'avoine ou l'escourgeon placées dans une rotation quinquennale comprenant de la betterave, du lin ou de la luzerne. Une application de 40 à 45 tonnes par hectare de fumier est conseillée après la céréale qui précède la tête de rotation (betterave). A noter qu'il n'est fait aucune mention d'un éventuel semis d'engrais vert après l'épandage du fumier.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole située dans l'entre Sambre et Meuse, Brakel (1957b) relève que la fertilisation azotée apportée au froment est de 16 à 28 kg N.ha<sup>-1</sup> appliqués au printemps. Dans la même exploitation, la culture d'escourgeon suit la récolte du lin.

Dans ce cas, l'escourgeon reçoit l'équivalent de 30 kg N.ha<sup>-1</sup> à l'automne et la même quantité au printemps.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hesbignonne, Sohet (1957) relève que pour obtenir un rendement moyen de 5,5 tonnes par hectare, la fertilisation azotée du froment suit le schéma suivant :

- 39 kg N.ha<sup>-1</sup> en septembre, avant le semis ;
- 39 kg N.ha<sup>-1</sup> en mars ;
- 8 kg N.ha<sup>-1</sup> (si nécessaire) à l'épiaison

En ce qui concerne l'escourgeon, le même agriculteur applique 64 kg N.ha<sup>-1</sup> dont les ¾ (48 kg N.ha<sup>-1</sup>) sont appliqués lors du semis en septembre et ¼ (16 kg N.ha<sup>-1</sup>) est appliqué au printemps. A noter que l'agriculteur effectue dès le mois d'avril un 'sursemis' de vesce (engrais vert) dans l'escourgeon.

En 1959, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole de Famenne, Limbourg (1959) observe que 30 à 40 tonnes de fumier par hectare sont appliqués avant le semis de l'avoine qui précèdera une culture de trèfle. La fertilisation du froment et des céréales de printemps est réalisée au printemps à l'aide d'un apport de respectivement 60 et 40 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1961, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole, Guillaume (1961) observe que le froment ou l'épeautre sont semés après le labour de prairies temporaires. Dans ces conditions, la fertilisation des céréales s'appuie sur un apport de 30 tonnes de fumier par hectare et un complément d'engrais équivalent à 10 kg N.ha<sup>-1</sup>.

De 1962 à 1966, au cours d'une étude sur la valeur fertilisante d'un engrais vert (vesce), d'une paille de céréale ou d'écumes de sucrerie (45.000 kg.ha<sup>-1</sup>), Crohain and Rixhon (1968) ont mis en place un dispositif expérimental comprenant une année de culture betteravière suivie de 3 années de céréales.

Afin de pouvoir optimiser les observations sur les valeurs fertilisantes, les fertilisations mises en œuvre pour les céréales (tableau 1-6) ont été qualifiées par les auteurs de non-exagérées.

L'étude ne renseigne malheureusement pas les modalités (date d'apport et fractionnement éventuel) de fertilisation de ces céréales.

**Tableau 1-6. Fertilisation azotée mise en œuvre dans l'essai 'céréale' de la Station de Phytotechnie en 1962-1966.**

Année	Dispositif 1		Dispositif 2		Dispositif 3	
	Culture	Fertilisation (kg N.ha <sup>-1</sup> )	Culture	Fertilisation (kg N.ha <sup>-1</sup> )	Culture	Fertilisation (kg N.ha <sup>-1</sup> )
1962	Froment	72,5				
1963	Avoine	67,5	Avoine	49		
1964	Escourgeon	56	Froment	80	Froment	60
1965			Escourgeon	60	Escourgeon	60
1966					Avoine	52

En 1965, dans le cadre d'une expérimentation relative aux régulateurs de croissance, Rixhon and Crohain (1965) ont mis en place un dispositif expérimental en froment d'hiver (tableau 1-7) et de printemps (tableau 1-8), en escourgeon, en orge de printemps et en avoine.

La fertilisation azotée appliquée au froment d'hiver a varié de 90 à 150 kg N.ha<sup>-1</sup>. A noter que la fumure (90 kg N.ha<sup>-1</sup>) appliquée au semis (automne) est qualifiée de 'normale' par les auteurs.

La fertilisation appliquée à l'escourgeon a varié de 52 à 97 kg N.ha<sup>-1</sup>

**Tableau 1-7. Fertilisation azotée mise en œuvre dans l'essai 'froment d'hiver' de la Station de Phytotechnie en 1965.**

Objet	Fumure azotée (kg N.ha <sup>-1</sup> )			Rendement (kg.ha <sup>-1</sup> )
	Au semis	Au tallage	En mi-montaison	
1	90	-	-	5.782
2	90	-	45	6.492
3	90	15	30	6.590
4	90	30	15	6.557
5	90	45	-	6.480
6	90	30	30	6.822
7	90	45	15	6.692

La fertilisation appliquée au froment de printemps a varié de 64 à 112 kg N.ha<sup>-1</sup> (tableau 1-8).

**Tableau 1-8. Fertilisation azotée mise en œuvre dans l'essai 'froment de printemps' de la Station de Phytotechnie en 1965.**

Objet	Fumure azotée (kg N.ha <sup>-1</sup> )		Rendement (kg.ha <sup>-1</sup> )
	Au semis	Au tallage	
1	64	0	4.705
2	64	16	4.805
3	64	32	4.988
4	64	48	5.013

Les rendements observés dans les essais menés à Gembloux sont cependant pas représentatifs des rendements moyens observés en Belgique à cette même époque (Ministère de l'Agriculture, 1967) (tableau 1-9).

**Tableau 1-9. Rendements moyens par hectare des céréales en Belgique pour les années culturales 1964-1965 et 1965-1966.**

Culture	Rendements moyens (kg.ha <sup>-1</sup> )	
	Récolte 1965	Récolte 1966
Froment d'hiver	3.820	3.010
Froment de printemps	3.710	3.100
Seigle d'hiver	2.850	2.510
Epeautre	2.650	2.670
Escourgeon	3.600	3.100
Orge de printemps	3.540	3.020
Avoine	3.080	3.210

Jusqu'au milieu des années soixante, 'il est une habitude courante dans certaines régions, d'appliquer au semis de la culture une forte fumure azotée ; dans l'esprit de ceux qui l'adoptent, cette méthode est celle qui tout en présentant une facilité et une certaine sécurité, permet de sustenter le plus harmonieusement la culture et de couvrir ses besoins' (Laloux, 1967).

En 1967-1968, au cours d'une des premières études en matière de suivi du reliquat azoté dans le sol (Guiot, 1969), la Station de Phytotechnie de l'Etat à Gembloux<sup>2</sup> a appliqué, dans le cas un froment semé le 24 octobre 1967, le plan de fertilisation suivant :

- 23/10/1967 : 130 kg N.ha<sup>-1</sup>
- 25/03/1968 : 26 kg N.ha<sup>-1</sup>

La récolte du froment a été effectuée le 21 août 1968 ; le rendement était de 6.300 kg.ha<sup>-1</sup>.

Selon Laloux (1968), il était inutile d'apporter plus de 140 kg N.ha<sup>-1</sup>. Si le semis avait lieu après le 15 octobre, il était conseillé d'apporter 25 kg N.ha<sup>-1</sup> lors du semis.

En 1968-1969, l'expérience a été ré-éditée par la Station de Phytotechnie de l'Etat (Guiot, 1971). Le froment a été semé le 29 novembre 1968. Quatre fertilisations azotées différentes ont été testées : un témoin (sans fertilisation) et trois objets de 140 kg.ha<sup>-1</sup> (tableau 1-10).

**Tableau 1-10. Fertilisation azotée mise en œuvre dans l'essai 'céréale' de la Station de Phytotechnie en 1968-1969.**

Traitement	Fumure azotée (kg N.ha <sup>-1</sup> )			
	Au semis 29/11/68	Au tallage 3/4/69	A la montaison 21/5/69	A l'épiaison 12/6/69
1	-	-	-	-
2	140	-	-	-
3	90	50	-	-
4	20	60	40	20

<sup>2</sup> Cette Station fait aujourd'hui partie du CRA-w

Sur base d'expérimentations menées la même année, (Laloux, 1969) conclut qu'un apport de 20 kg N.ha<sup>-1</sup> est préconisé lors du semis du froment alors que l'escourgeon ne nécessite plus cette fertilisation au semis.

Début des années '70, les avis concernant l'application d'une fertilisation azotée au semis sont contrastés : de 0 à 60 kg.ha<sup>-1</sup> selon les études (Laloux, 1971), (Laloux et al., 1975), (Roland, 1970).

En 1971-1972, une étude comparable à celle de 1967-1968 (Guiot, 1969) a été à nouveau menée par la Station de Phytotechnie de l'Etat (Guiot, 1973). Le froment a été semé le 28 octobre 1971 avec le plan de fertilisation suivant :

- 4/12/1971 : 90 kg N.ha<sup>-1</sup>
- 13/04/1972 : 40 kg N.ha<sup>-1</sup>

La récolte du froment a été effectuée le 21 août 1972 ; le rendement était de 6.147 kg.ha<sup>-1</sup>.

En 1967-1968, Laloux (1973) étudie l'impact de la date d'apport de la fertilisation azotée et la densité de semis (nombre de grains au m<sup>2</sup>) sur le nombre de plantes, de talles et d'épis ainsi que sur le rendement. Le froment a été semé le 27 octobre 1967. La fertilisation appliquée était de 120 kg N.ha<sup>-1</sup> répartis en trois objets comme suit :

- semis du froment : 80 à 120 kg N.ha<sup>-1</sup>
- 27/02/1967 : 0 à 40 kg N.ha<sup>-1</sup>
- 15/03/1967 : 0 à 40 kg N.ha<sup>-1</sup>

Dans le cadre d'expérimentation, le recours à une première fraction (40 kg N.ha<sup>-1</sup>) lors du semis est toujours d'actualité en 1977 (Frankinet and Rixhon, 1983).

Par ailleurs, l'auteur observe que les fumures ayant donné les meilleurs rendements au cours de la période 1966-1972 sont celles pour lesquelles la fertilisation appliquée au semis est inférieure ou égale à 20 kg N.ha<sup>-1</sup> (tableau 1-11).

**Tableau 1-11. Fertilisation azotée optimale en céréales entre 1966 et 1972.**

Année	Fumure azotée (kg N.ha <sup>-1</sup> )				
	Semis	Tallage	Redressement	Dernière feuille	Total
1966	20	20	50	30	120
1967	20	20	75	25	140
1968	20	20	75	25	140
1969	-	15	65	25	105
1970	-	25	70	30	125
1971	-	-	75	30	105
1972	-	15	60	30	105

En 1971, dans son analyse d'une exploitation mixte en région limoneuse, Despontin (1971) relève que les parcelles de froment et d'escourgeon reçoivent généralement respectivement de l'ordre de 110 et 95 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1972, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole située en région limoneuse, Vanorlé (1972) relève que les parcelles de froment et d'escourgeon reçoivent généralement de l'ordre de 90 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1973, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation, Dony (1973) relève que la fertilisation appliquée au froment, à l'escourgeon et à l'orge de printemps comporte un seul apport, réalisé en mars, de respectivement 75, 40 et 50 kg N.ha<sup>-1</sup> alors que les conseils connus de l'agriculteur suggéraient un apport de respectivement 110, 80 et 60 kg.ha<sup>-1</sup>.

En 1973, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hennuyère, Couvreur (1973) relève que 60 et 30 kg N.ha<sup>-1</sup> sont appliqués respectivement en avril et mai pour le froment. En ce qui concerne l'escourgeon, la fertilisation est réalisée à l'aide de 52 kg N.ha<sup>-1</sup> ; l'auteur ne précise malheureusement pas la période (automne ou printemps) de l'apport. La fertilisation appliquée tant au froment qu'à l'escourgeon est qualifiée de faible par l'auteur.

En 1975, dans son étude d'une exploitation agricole mixte située en région sablo-limoneuse, Delvaux (1975) relate un apport de 85 kg N.ha<sup>-1</sup> pour le froment dont un quart est apporté lors du semis. Pour l'escourgeon, la fertilisation est de 75 kg N.ha<sup>-1</sup> dont un tiers est apporté lors du semis.

### 3.2 La betterave

De 1953 à 1956, des essais de fertilisation en plein champ ont été menés par Laloux (1957) dans des parcelles exploitées par l'Institut Agronomique de l'Etat<sup>3</sup>. Ces essais portaient tant sur le type d'engrais (cyanamide pulvérulente, nitrate d'ammoniaque, urée, nitrate de soude) que sur la dose apportée.

Les fertilisations appliquées (tableau 1-12) ont varié au cours de ces quatre années, entre 100 et 180 kg N.ha<sup>-1</sup> avec, comme culture précédente, une céréale suivie en automne d'un apport de 40 à 45 tonnes par hectare de fumier. A noter qu'il n'est fait aucune mention d'un éventuel semis d'engrais vert après l'épandage du fumier.

**Tableau 1-12. Fertilisation azotée mise en œuvre dans les essais 'betterave' de l'Institut Agronomique de l'Etat entre 1953 et 1956**

	Fumure azotée (kg N.ha <sup>-1</sup> )			
	Année 1953	Année 1954	Année 1955	Année 1956
Dose(s) appliquée(s)	133	0 100 125 150	125 150 175	120 150 180

En 1954, le rendement moyen de l'essai est de 49.700 kg.ha<sup>-1</sup>, la teneur en azote mesurée dans les racines est de l'ordre de 0,65 % de la matière sèche. En 1970, le rendement de la betterave exprimé en tonne de matière sèche par hectare est de l'ordre de 13 tonnes (De Leenheer and Van Ruymbeke, 1973).

En 1951, dans son analyse d'une exploitation agricole située en Famenne, Tournay (1951) relève que la fertilisation de la betterave est réalisée au printemps uniquement par un apport de 60 tonnes de fumier par hectare.

En 1953, dans son analyse d'une exploitation agricole située dans la région de Gembloux, (Rixhon, 1953) relève pour la betterave (sucrière ou fourragère), une fertilisation azotée dépendante de la culture précédente :

- dans le cas d'un précédent froment, un apport de 50 tonnes de fumier par hectare est réalisé en décembre et suivi d'un labour. La fertilisation minérale (85 kg N.ha<sup>-1</sup>) est effectuée en mars ;
- dans le cas d'un précédent escourgeon, une vesce est semée à la récolte de la céréale. En décembre, un apport de 35 tonnes de fumier par hectare est réalisé avant le labour de la parcelle. La fertilisation minérale (85 kg N.ha<sup>-1</sup>) est effectuée en mars.

En 1955, dans son analyse de plan de culture d'une exploitation agricole hennuyère, Crohain (1955) relève qu'un apport 45 tonnes par hectare de fumier est réalisé en novembre. En mars, la fertilisation organique de l'automne est complétée par un apport de 145 kg N.ha<sup>-1</sup>. Cette fertilisation est qualifiée de forte par l'auteur mais, selon l'agriculteur, elle permet de ne pas utiliser d'azote pour la sole qui suit.

---

<sup>3</sup> Aujourd'hui Gembloux Agro-Bio Tech (ULg)

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation, Brakel (1957b) relève que la fertilisation appliquée à la betterave (qu'elle soit sucrière ou fourragère) est de 120 kg N.ha<sup>-1</sup> appliqués au printemps après un apport en automne de 40 tonnes de fumier par hectare, enfouis aussi vite que possible. Si une culture de luzerne précède la culture de betterave, la fertilisation azotée est réduite à 65 kg.ha<sup>-1</sup>.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hesbignonne, Sohet (1957) relève qu'un apport de 20 tonnes de fumier par hectare est réalisé l'automne qui précède le semis de la betterave, sur des parcelles précédemment occupées par de l'escourgeon ou du lin. Dans ces situations (précédent de lin ou d'escourgeon), un engrais vert (vesce) est régulièrement semé afin, selon l'agriculteur, de maintenir un bon taux d'humus dans son sol. La fertilisation azotée appliquée à la betterave est, selon le précédent, déclinée comme suit :

- si le précédent est du lin (suivi d'un apport de fumier et d'un semis de vesce) : apport de 65 kg N.ha<sup>-1</sup> en novembre et de 65 kg N.ha<sup>-1</sup> en mars ;
- si le précédent est de l'escourgeon (suivi d'un apport de fumier et d'un semis de vesce) : apport de 80 kg N.ha<sup>-1</sup> en novembre et de 80 kg N.ha<sup>-1</sup> en mars.

Avec ces pratiques, l'agriculteur observe un rendement moyen de l'ordre de 50 tonnes par hectare.

En 1961, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole, Guillaume (1961) observe que la fertilisation azotée de la betterave s'appuie sur un apport de 50 tonnes par hectare de fumier et un complément d'engrais équivalent à 100 kg N.ha<sup>-1</sup>.

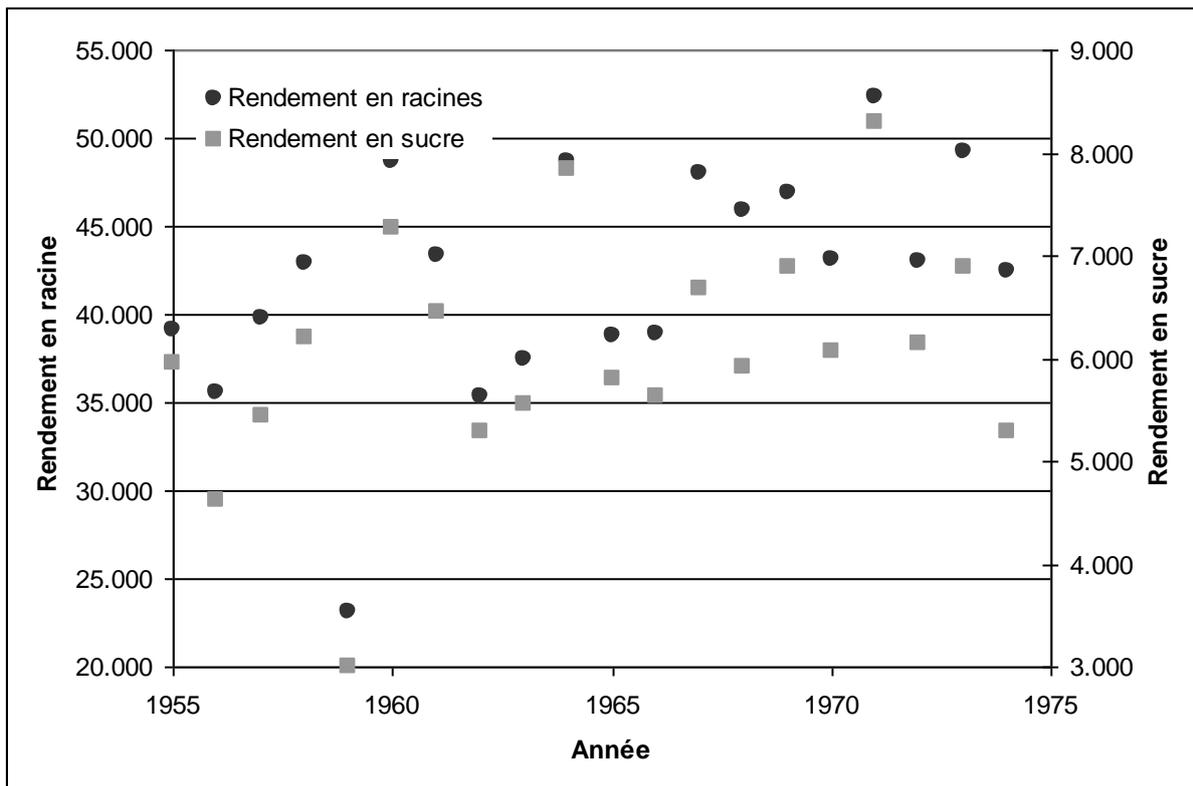
De 1960 à 1962, au cours d'une étude sur la valeur fertilisante (pour la betterave) d'un engrais vert (vesce), d'une paille de céréale ou d'écumes de sucrerie (45.000 kg.ha<sup>-1</sup>), Crohain and Rixhon (1968) ont mis en place un dispositif expérimental de petites parcelles de betterave avec des objets de fertilisation allant de 30 à 210 kg N.ha<sup>-1</sup> (tableau 1-13).

**Tableau 1-13. Fertilisation azotée mise en œuvre dans les essais de la Station de Phytotechnie de 1960-1962.**

	Fumure azotée (kg N.ha <sup>-1</sup> )			
	Ni paille, ni écumes	Avec paille	Avec écumes	Avec paille et écumes
Sans engrais vert	110 à 170	150 à 210	70 à 130	110 à 170
En présence de racines et chaumes d'engrais vert	90 à 150	130 à 190	50 à 110	90 à 150
En présence de l'engrais vert entier	70 à 130	110 à 170	30 à 90	70 à 130

Les rendements moyens annuels observés se situaient entre 37.100 kg.ha<sup>-1</sup> (1961) et 51.600 kg.ha<sup>-1</sup> (1960).

Au cours de cette décennie, les rendements (racines et sucre) ont globalement peu évolué en Belgique (figure 1-13) (Roussel and Jardin, 1975) et sont du même ordre de grandeur que ceux observés par Crohain and Rixhon (1968).



**Figure 1-13. Evolution de la production sucrière en Belgique (en kg.ha<sup>-1</sup>).**

De 1960 à 1963, dans le cadre d'une étude sur la valeur fertilisante des feuilles et collets de betterave, Crohain and Rixhon (1967) ont montré qu'en moyenne au cours des quatre années de suivi, les feuilles et collets de betterave apportaient 114 kg N.ha<sup>-1</sup> au sol. Malheureusement, les auteurs ne mentionnent pas la fertilisation azotée appliquée lors de semis de la betterave.

En 1970, dans son analyse d'une exploitation mixte du Hainaut, Paduart (1970) observe qu'un apport de 50 tonnes par hectare de fumier est réalisé au cours de l'automne qui précède le semis. A la même période, cet épandage est complété d'un apport de l'ordre de 170 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1971, dans son analyse d'une exploitation mixte en région limoneuse, Despontin (1971) relève que l'automne qui précède le semis, 12 tonnes de fumier par hectare sont appliquées sur un couvert de vesce. Au printemps, un apport de 130 kg N.ha<sup>-1</sup> est réalisé.

En 1972, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole située en région limoneuse, Vanorlé (1972) relève que les parcelles de betterave reçoivent généralement l'été qui précède le semis, un apport de fumier. Cet apport est suivi d'une culture de vesce. A la fin mars, un apport de l'ordre de 180 kg N.ha<sup>-1</sup> est réalisé.

En 1973, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hennuyère, Couvreur (1973) relève que les parcelles de betterave reçoivent généralement l'été qui précède le semis, un apport de 50 tonnes par hectare de fumier. Cet apport est suivi d'une culture de vesce. Au printemps, la fertilisation minérale de la betterave s'appuie sur 140 à 160 kg N.ha<sup>-1</sup>.

### **3.3 Le maïs**

En 1953, dans son analyse d'une exploitation agricole située dans la région de Gembloux, Rixhon (1953) relève pour le maïs, une fertilisation composée d'un apport de 35 tonnes de fumier par hectare en hiver, complété au printemps par un apport de 16 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1957, dans son étude d'une exploitation agricole, Brakel (1957a) observe que la fertilisation azotée du maïs comporte un apport de 30 au 40 tonnes de fumier par hectare auquel est ajouté 120 kg N.ha<sup>-1</sup> de façon à obtenir un rendement moyen de l'ordre de 50 tonnes de matière fraîche par hectare.

Entre 1969 et 1971, dans le cadre d'expérimentations menées par la Station de Phytotechnie de Gembloux sur six variétés de maïs grain, la fertilisation azotée variait en fonction des années, de 150 à 200 kg.ha<sup>-1</sup>. Les rendements (ramenés à 15% d'eau) moyens (6 variétés) ont évolué de 6.050 kg.ha<sup>-1</sup> (1969) à 8.732 kg.ha<sup>-1</sup> (1970) (Delhaye, 1972).

Lequeut (1970) signale dans son étude sur les rendements et coût de production que la fertilisation du maïs s'appuie à la fin des années 60, sur un épandage de 24 m<sup>3</sup> de lisier par hectare auquel est ajouté un apport de 180 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1972, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole située en région limoneuse, Vanorlé (1972) relève que les parcelles de maïs reçoivent une fertilisation minérale équivalente à 170 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1973, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation, Dony (1973) relève que la fertilisation appliquée au maïs comporte un apport de 70 tonnes de fumier par hectare et de 140 kg N.ha<sup>-1</sup> ; ce qui, selon l'auteur, était en accord avec les conseils donnés à cet agriculteur.

En 1973, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hennuyère, Couvreur (1973) relève que la pratique suivante pour la fertilisation du maïs : un apport de l'ordre de 50 tonnes de fumier par hectare est réalisé en février-mars. Suite à cet apport, les parcelles concernées sont labourées et reçoivent un premier apport d'azote minéral équivalent à 90 à 100 kg N.ha<sup>-1</sup> avant le semis du maïs et un second de l'ordre de 55 kg N.ha<sup>-1</sup> après le semis.

### **3.4 La pomme de terre**

En 1953, dans son analyse d'une exploitation agricole située dans la région de Gembloux, Rixhon (1953) relève pour la pomme de terre, une fertilisation composée d'un apport de 30 tonnes de fumier par hectare en hiver, complété au printemps par un apport de 85 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1951, dans son analyse d'une exploitation agricole située en Famenne, Tournay (1951) relève que la fertilisation de la pomme de terre est réalisée au printemps uniquement par un apport de 60 tonnes de fumier par hectare.

En 1955, dans son analyse de plan de culture d'une exploitation agricole hennuyère, Crohain (1955) relève qu'un apport 40 tonnes par hectare de fumier est réalisé au cours de l'hiver qui précède la plantation. En mars, la fertilisation est complétée par un apport de 150 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation, Brakel (1957b) relève que la fertilisation appliquée à la pomme de terre est de 125 kg N.ha<sup>-1</sup> appliqués au printemps après un apport en automne de 30 tonnes de fumier par hectare.

En 1961, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole, Guillaume (1961) observe que la fertilisation azotée de la pomme de terre s'appuie sur un apport de 40 tonnes par hectare de fumier et un complément d'engrais équivalent à 50 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1975, le Centre de Recherches Agronomique de l'Etat – Gembloux (Nys, 1975) estime qu'il y a excès d'azote lorsque, en plus d'une réserve organique suffisante ou d'une application adéquate (20 à 30 t.ha<sup>-1</sup>) de fumier, on applique plus de 125 à 150 kg N.ha<sup>-1</sup>. Une dose minérale moyenne doit se situer entre 90 et 120 kg N.ha<sup>-1</sup>.

### **3.5 Le colza**

De 1967 à 1970, des expérimentations sur six variétés de colza ont été menées à la Station de Phytotechnie de Gembloux. Les rendements observés variaient en fonction des années et des variétés de 2.474 à 3.519 kg.ha<sup>-1</sup>. La fertilisation azotée appliquée se situait, en fonction des années, entre 150 et 200 kg N.ha<sup>-1</sup> dont environ 50 kg.ha<sup>-1</sup> étaient appliqués peu après le semis (Delhay, 1971).

### **3.6 La prairie**

En 1951, dans son analyse d'une exploitation agricole située en Famenne, Tournay (1951) relève que la fertilisation des prairies n'est assurée que par l'épandage de purin dont la quantité n'est pas précisée.

En 1952, dans son analyse d'une exploitation agricole herbagère située sur le plateau de Herve, Deliège (1952) observe que les prairies pâturées font l'objet d'un apport total de 100 à 120 kg N.ha<sup>-1</sup> réalisé en quatre fois. Les prairies de fauche reçoivent la même fertilisation minérale complétée d'un apport de 30 tonnes de fumier par hectare et de 10 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de purin.

En 1953, dans son analyse d'une exploitation agricole située dans la région de Gembloux, Rixhon (1953) observe que les prairies reçoivent deux apports azotés totalisant 56 kg N.ha<sup>-1</sup>. Si du purin (quantité non spécifiée par l'auteur) a pu être épandu, la fertilisation minérale est réduite à 36 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1955, dans son analyse de plan de culture d'une exploitation agricole hennuyère, Crohain (1955) relève que les prairies pâturées ou de fauche reçoivent 10 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de purin complété par un apport de 80 kg N.ha<sup>-1</sup> réalisé en deux ou quatre applications selon que la prairie soit de fauche ou pâturée.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation, Brakel (1957b) relève qu'un apport de 5 m<sup>3</sup> de lisier par hectare est réalisé en deux applications. Cette fertilisation est complétée par un apport d'engrais équivalent à 60 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hesbignonne, Sohet (1957) relève qu'un apport de 10 m<sup>3</sup> de purin par hectare est réalisé en décembre sur les prairies de l'exploitation. La période de l'apport (décembre) correspond à une disponibilité de la main d'œuvre pour effectuer ces travaux. Cette fertilisation est complétée par deux apports de 16 kg N.ha<sup>-1</sup> effectués au printemps et en été.

Fin des années '60, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole de Famenne, Limbourg (1959) observe qu'aucune fertilisation organique n'est réalisée sur les prairies de l'exploitation étudiée ; le fumier était destiné aux cultures et le purin n'était pas récolté, il s'écoulait dans les fossés ou sur les chemins.

En 1961, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole, Guillaume (1961) observe que les prairies sont fertilisées avec 20 kg N.ha<sup>-1</sup> si apport de 30 m<sup>3</sup> de purin par hectare est effectué. Dans le cas contraire (aucun épandage de purin), un apport d'engrais équivalent à 40 kg N.ha<sup>-1</sup> est réalisé.

Fin des années 60, Lequeut (1970) signale dans son étude sur les rendements et coût de production que la fertilisation du ray-grass doit être réalisée en quatre apports : un premier, en mars, de 103 kg N.ha<sup>-1</sup> et trois apports (mai, juillet et août) de 42 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1970, le Département de Botanique de l'Université de Liège recommande pour les prairies de fauche l'application en plusieurs fois de 50 m<sup>3</sup> de lisier de bovin par hectare complétée de 100 à 150 kg N.ha<sup>-1</sup> (de Leval, 1970).

En 1972, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole située en région limoneuse, Vanorlé (1972) relève que les prairies pâturées reçoivent une fertilisation minérale comprise entre 230 et 295 kg N.ha<sup>-1</sup>. L'auteur qualifie cette fertilisation d'élevée.

En 1973, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation, Dony (1973) relève que la fertilisation appliquée aux prairies pâturées est comprise entre 100 et 140 kg N.ha<sup>-1</sup>; les prairies de fauche, vu l'absence de restitution directe, reçoivent un apport de 115 à 150 kg N.ha<sup>-1</sup>.

En 1973, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hennuyère, Couvreur (1973) relève que la fertilisation du ray-grass est de 262 kg N.ha<sup>-1</sup> appliquée en cinq fractions. Pour les prairies pâturées, un apport de 104 kg N.ha<sup>-1</sup> est réalisé en deux fractions : la première au printemps, la seconde en été.

### **3.7 Les légumineuses**

En 1953, dans son analyse d'une exploitation agricole située dans la région de Gembloux, (Rixhon, 1953) relève que le pois et la luzerne font l'objet d'une fertilisation azotée que si nécessaire ; la dose n'étant pas spécifiée par l'auteur.

En 1955, dans son analyse de plan de culture d'une exploitation agricole hennuyère, (Crohain, 1955) relève que les parcelles de trèfle reçoivent un apport de  $10 \text{ kg N.ha}^{-1}$  afin d'assurer le démarrage de la culture à la sortie de l'hiver.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation, Brakel (1957b) relève qu'un apport de 10 tonnes de fumier par hectare est réalisé en novembre sur les parcelles de trèfle et de luzerne et 15 tonnes de fumier par hectare sur les parcelles de féverole.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hesbignonne, Sohet (1957) relève qu'un apport de  $20 \text{ kg N.ha}^{-1}$  est réalisé pour fertiliser une culture de pois dont le rendement attendu est de l'ordre de 4 tonnes par hectare.

### **3.8 Le lin**

En 1953, dans son analyse d'une exploitation agricole située dans la région de Gembloux, (Rixhon, 1953) relève pour le lin, une fertilisation azotée de l'ordre de  $30 \text{ kg N.ha}^{-1}$ .

En 1955, dans son analyse de plan de culture d'une exploitation agricole hennuyère, (Crohain, 1955) relève qu'un apport de  $45 \text{ kg N.ha}^{-1}$  est réalisé sur les parcelles de lin qui suivent traditionnellement une récolte de froment.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation agricole située dans l'entre Sambre et Meuse, Brakel (1957b) relève qu'un apport de  $45 \text{ kg N.ha}^{-1}$  est réalisé sur les parcelles de lin.

En 1957, dans son analyse du plan de culture d'une exploitation hesbignonne, Sohet (1957) relève que pour  $20 \text{ kg N.ha}^{-1}$  sont appliqués en mars aux parcelles qui seront occupées par du lin.

## 4 Le cheptel

---

### 4.1 Introduction

Comme l'illustre le cycle de l'azote (Thèse, figure 1.6), le cheptel joue un rôle important dans la fourniture d'azote au sol, soit par restitution directe lors du pâturage, soit par épandage (le plus souvent en champs) des effluents collectés dans les bâtiments d'élevage.

Par soucis de simplification, seuls les cheptels bovin et porcin sont abordés.

Il convient néanmoins de rappeler la nécessité des chevaux de traits jusque dans les années '50 (à cette époque, ils représentent de l'ordre de 10% du cheptel bovin). Dès la sortie de la seconde guerre mondiale, la mécanisation de l'agriculture va engendrer une lente disparition de ces chevaux de nos campagnes. Ainsi, en 1970, leur nombre a régressé d'un facteur 20.

Les volailles, moutons, chèvres et autres lapins sont également 'oubliés' dans le cadre de cette réflexion ; leur poids dans le cycle de l'azote étant négligeable : moins de 5% de la production d'azote par le cheptel bovin en 1950. Cette proportion aura tendance à diminuer au cours des trois décennies suivantes puisque, contrairement au cheptel bovin, leur nombre va décroître.

### 4.2 Cheptel bovin

La région wallonne a compté, au cours de la seconde moitié de ce dernier siècle entre un million et un million et demi de têtes de bovin a peu près également réparti dans toutes les provinces (tableau 1-14).

**Tableau 1-14. Evolution de la taille du cheptel bovin entre 1950 et 2010.**

	1950	1961	1970	1981	1991	2010
Hainaut	295.603	371.275	393.446	398.472	422.380	331.442
Liège	331.078	415.594	385.137	363.934	349.377	274.877
Luxembourg	188.228	268.910	311.882	339.374	400.461	365.961
Namur	186.669	254.632	278.295	266.391	295.694	260.493
Brabant wallon	69.187	82.419	77.104	78.419	78.419	79.284
Brabant	212.570	253.223	236.893	223.431		

Entre 1950 (Anonyme, 1953) et 1970 (Anonyme, 1970), le cheptel bovin a cru de l'ordre de 37% en Wallonie (figure 1-14).

Entre 1981 et 1991 (Anonyme, 1991), le cheptel bovin a cru de 7% en Wallonie avec quelques disparités à l'échelle provinciale : +18% en province du Luxembourg et - 4% en province de Liège. En 1991, il y avait 1.546.331 têtes en Wallonie, cheptel équivalent à celui présent en Flandre.

Entre 1991 et 2010 (Anonyme, 2012), à l'exception du Brabant wallon, le cheptel a décré de l'ordre de 16%, principalement en région limoneuse.

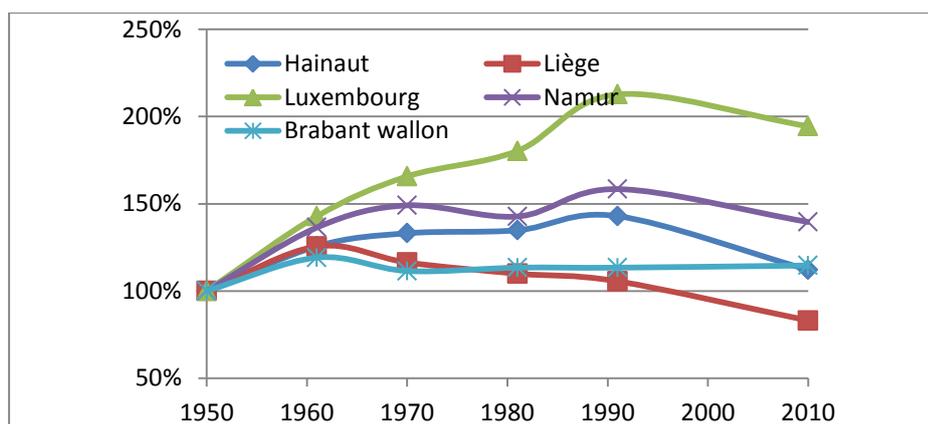


Figure 1-14. Evolution de la taille du cheptel bovin entre 1950 et 2010.

### 4.3 Cheptel porcin

La région wallonne a compté, au cours de la seconde moitié de ce dernier siècle entre trois cents et sept cents mille têtes de porcin dont près de la moitié est située en province de Liège (tableau 1-15).

Tableau 1-15. Evolution de la taille du cheptel porcin entre 1950 et 2010.

	1950	1961	1970	1981	1991	2010
Hainaut	67.493	81.863	189.602	110.194	102.480	114.250
Liège	189.888	263.037	258.435	159.085	106.587	118.006
Luxembourg	68.929	63.968	91.044	25.505	11.222	14.027
Namur	50.065	53.755	81.378	38.035	23.582	25.791
Brabant wallon	36.181	43.292	48.124	34.677	28.782	32.537
Brabant	124.490	148.956	315.947	227.663		

Entre 1950 (Anonyme, 1953) et 1970 (Anonyme, 1970), le cheptel porcin a cru de près de 66% en Wallonie (principalement dans le Hainaut (figure 1-15).

Entre 1981 et 1991 (Anonyme, 1991), le cheptel porcin a diminué de près de 30% en Wallonie. Seule la province du Hainaut fût moins impactée (-7%) par cette érosion. En 1991, il y avait 272.653 têtes en Wallonie, soit 4% du cheptel du royaume.

Entre 1991 et 2010 (Anonyme, 2012), le cheptel a augmenté de l'ordre de 12%.

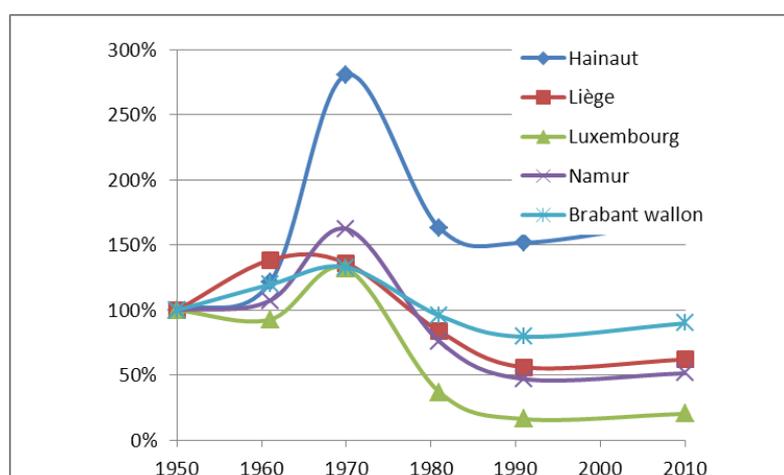


Figure 1-15. Evolution de la taille du cheptel porcin entre 1950 et 2010.

#### 4.4 Production d'azote par les cheptels bovin et porcin

Les sous-catégories de cheptel figurant dans les statistiques agricoles (effectif) et celle figurant dans le PGDA (production d'azote par tête) ne sont malheureusement pas identiques. Il convient dès lors d'affecter à chaque catégorie d'effectif une valeur estimée sur base de celles figurant dans le PGDA.

Par ailleurs, l'analyse de l'évolution temporelle de la part de chaque sous-catégorie de cheptel indique une certaine stabilité au cours des décennies (variations inférieures à 3%).

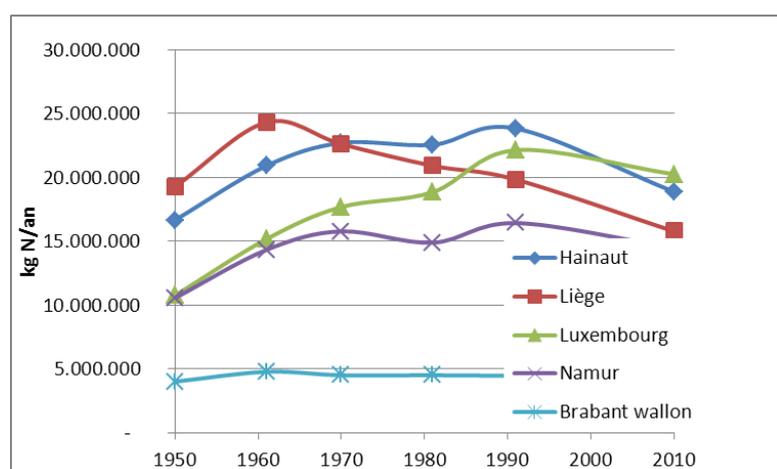
Sur cette base, les tableau 1-16 et tableau 1-17 ont été établis en vue d'estimer la production d'azote par les cheptels bovin et porcin (figure 1-16).

**Tableau 1-16. Proportion et production d'azote par sous-catégorie de cheptel bovin.**

	Proportion	Production d'azote/tête.an
moins d'un an	27%	20
d'un à deux ans	24%	44
plus de deux ans	49%	80

**Tableau 1-17. Proportion et production d'azote par sous-catégorie de cheptel porcin.**

	Proportion	Production d'azote/tête.an
moins de 8 semaines	23%	1,5
de 8 semaines à 6 mois	51%	4
verrats	1%	15
truies	12%	15
porcs à l'engrais	13%	7,8



**Figure 1-16. Evolution de la production d'azote par les cheptels bovin et porcin entre 1950 et 2010.**

Il apparaît ainsi qu'entre 1950 et 1970, la valorisation d'engrais de ferme issus d'élevages bovins et porcins a augmenté de 40 à 50% dans les quatre grandes provinces de la région wallonne.



## **Annexe 2. Evaluation de l'utilité de l'APL pour un conseil de fertilisation idoine**

### **1 Introduction**

Depuis la mise en œuvre en région wallonne de l'indicateur APL, chaque année, un millier d'analyses APL est réalisé en novembre.

En plus de constituer un indicateur de la performance de gestion de l'azote (comparaison aux valeurs de référence) et un indicateur de risque environnemental, il est opportun de s'interroger sur la possibilité d'utiliser ces résultats en vue d'un conseil de fertilisation pour la culture qui suivra la mesure de l'APL.

Le conseil de fertilisation s'appuie sur la méthode du bilan :

Exportations	-	Fournitures	= Solde
besoins de la culture		reliquat azoté en sortie d'hiver	reliquat azoté à la récolte
		minéralisation de l'humus	
		effet des engrais de ferme	
		effet du précédent cultural	
		engrais (=conseil de fertilisation)	

Pour l'estimation des fournitures et plus spécifiquement en ce qui concerne l'azote présent dans le sol, la mesure est réalisée à la sortie de l'hiver pour deux raisons :

- à cette période, les pertes par lixiviation sont généralement très faibles (sauf fin d'hiver très pluvieuse). Le biais éventuel est donc peu important ;
- la culture n'est pas encore en place (culture de printemps) ou, si elle l'est (culture d'hiver), les prélèvements déjà effectués par celles-ci sont faibles (sauf colza). Les besoins de la culture sont donc bien connus.

En utilisant les valeurs d'APL (mesurées avant la lixiviation), on comprend immédiatement que le biais pourrait être plus important. Il est donc nécessaire d'en estimer son ampleur et d'analyser les facteurs (culture précédente, région agricole, lame drainante) qui pourraient la conditionner afin d'éventuellement pouvoir utiliser les APL pour établir des conseils de fertilisation.

### **2 Méthodologie**

Pour évaluer la possibilité d'utiliser l'APL en vue d'un conseil de fertilisation idoine, il convient d'observer et d'établir si possible entre l'APL et le reliquat azoté mesuré au printemps.

Deux approches sont envisagées.

La première (cf. 3. A partir de moyennes régionales) s'appuie sur un volume de données important (plusieurs centaines par an) mais pour lesquelles d'une part, les mesures d'APL et de reliquat azoté au printemps n'ont pas été réalisées dans les mêmes parcelles et d'autre part, les informations relatives à la parcelle sont peu nombreuses (région agricole, précédent cultural). Trois années de mesures sont disponibles pour tenter d'observer cette éventuelle relation entre APL et reliquat azoté au printemps.

La seconde (cf. 4. A partir de données à la parcelle) s'appuie sur un volume de données réduit (plusieurs dizaines par an) mais pour lesquelles d'une part, les mesures d'APL et de reliquat azoté sont effectuées dans les mêmes parcelles et d'autre part, les informations relatives à la

parcelle sont plus nombreuses (type de sol, précédents culturaux, fertilisation appliquée). Par ailleurs, dans ces séries de données, tous les APL sont mesurés à la même période (première décennie de décembre). Dix années de mesures sont disponibles pour tenter d'observer cette éventuelle relation entre APL et reliquat azoté au printemps.

La performance de ces deux approches sera comparée à l'utilisation d'une base de données de RSH constituée annuellement pour la prédiction d'un RSHP en fonction de divers critères (cf. 5. Prédiction uniquement sur base d'observations RSH). L'avantage de cette approche est également son inconvénient : il n'est pas nécessaire d'avoir une observation APL (→ méthode utilisable pour toutes les parcelles) mais un contexte peu courant en automne (par exemple une APL élevée) n'est pas pris en compte dans l'estimation du RSHP.

### 3 A partir de moyennes régionales

#### 3.1 Sources des données

Les données d'APL sont les résultats des analyses commandées par le SPW dans le cadre du contrôle APL.

Depuis 2009, les données de reliquat azoté au printemps sont communiquées par trois des cinq membres de la Structure d'encadrement Nitrawal.

Nitrawal asbl, GRENeRA (GxABT) et l'UCL font réaliser chaque année plusieurs centaines de mesures de reliquat azoté dans les sols au printemps. Cette information est (1) enregistrée dans une base de données temporaire par les trois organismes précités, (2) transférée à GRENeRA pour (3) être contrôlée et implémentée dans une base de données mise à jour. Celle-ci est (4) ensuite placée sur un serveur web pour être accessible à Nitrawal afin de (5) permettre aux conseillers de pouvoir établir des conseils de fumure dans des parcelles sans avoir de mesure de reliquat azoté (figure 2-1).

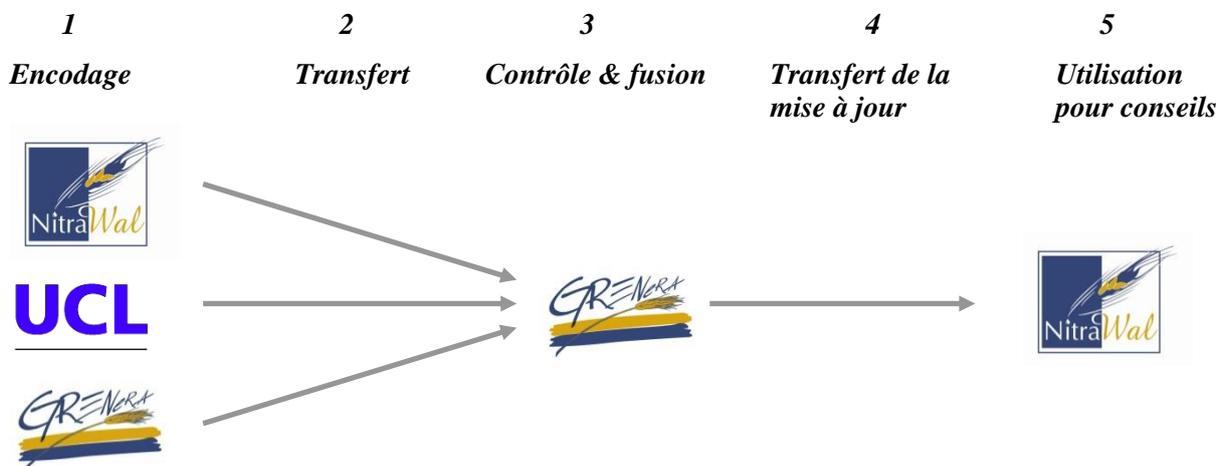


Figure 2-1. Méthodologie de constitution de la base de données.

La base de données développée par GRENeRA a initialement deux objectifs :

- permettre l'encodage des observations
- offrir une synthèse automatique des résultats et un outil de requête spécifique

Mise à jour annuellement, cette base de données est utilisée par Nitrawal pour élaborer des conseils de fertilisation idoines. Elle offre ainsi une information « moyenne » dans différents contextes et permet également aux conseillers d'appréhender la dispersion des observations réalisées dans des situations bien spécifiques.

Les conseils de fertilisation sont réalisés avec, entre autres, la connaissance d'informations telles que :

- la région agricole,
- la culture précédente,
- la présence d'une CIPAN,
- l'application d'engrais de ferme (y compris type et période).

Ces informations doivent donc forcément accompagner une valeur de reliquat azoté pour qu'une moyenne puisse être établie dans chaque contexte. Le formulaire d'encodage suivant (figure 2-2) a donc été créé.

Figure 2-2. Ecran d'encodage d'un reliquat de printemps.

Comme l'illustre cette figure, 343 valeurs ont été encodées dans cette base de données en 2009. Les 'fournisseurs' d'informations sont Nitrawal asbl (74%), GRENeRA (19%) et l'UCL (7%).

En 2010, 505 valeurs ont été encodées dans cette base de données.

Une synthèse des résultats est réalisée chaque année dans le rapport d'activités de GRENeRA (Vandenberghe et al., 2010; Vandenberghe and Marcoen, 2009).

Un travail a dû être effectué sur les deux bases de données (APL et reliquat azoté au printemps) pour pouvoir réaliser la comparaison :

- suppression des résultats avec un échantillonnage limité à 60 cm (rare en entrée d'hiver, plus fréquent en sortie d'hiver) ;
- simplification et harmonisation des libellés (région agricole, précédent) et
- suppression des résultats associés à des régions agricoles et cultures peu représentées.

## 3.2 Résultats 2008-2009

### 3.2.1 APL 2008

L'effectif est de 636 parcelles de culture, la médiane des observations est de 57 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (quartile 1 = 34 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> quartile 3 = 85 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Les parcelles échantillonnées en entrée d'hiver 2008 étaient principalement (81%) emblavées en céréales ou maïs (figure 2-3).

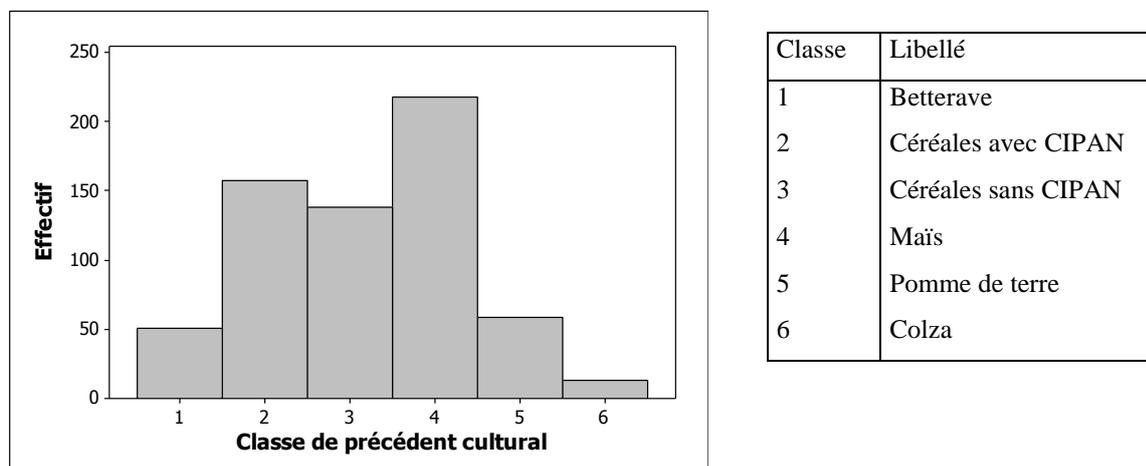


Figure 2-3. Histogramme de la nature des précédents dans les parcelles échantillonnées en entrée d'hiver.

Le tableau suivant (tableau 2-1) détaille les observations réalisées en entrée d'hiver dans chaque région agricole.

L'observation de ce tableau indique que la région limoneuse humide présente des APL en maïs et pomme de terre généralement plus élevés qu'ailleurs. Une attention particulière devrait donc être donnée à la fertilisation de ces deux cultures dans cette région.

Tableau 2-1. APL 2008 classés par région agricole et par précédent.

#### Condroz

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
APL	Betterave	4	21,25	23,00	48,05
	Céréales sans CIPAN	25	39,50	68,00	83,00
	Céréales avec CIPAN	7	17,0	35,0	68,0
	Colza	8	46,5	87,5	130,0
	Maïs	20	20,75	33,00	53,00
	Pomme de terre	3	35,0	103,0	146,0

#### Famenne

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
APL	Céréales sans CIPAN	6	29,9	63,0	90,3
	Céréales avec CIPAN	9	24,3	49,8	67,0
	Colza	3	44,00	59,00	71,00
	Maïs	23	32,07	55,42	91,89

#### Limoneuse humide

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
----------	-----------	---	----	---------	----

APL	Betterave	26	22,06	26,75	33,70
	Céréales sans CIPAN	52	43,76	57,47	82,97
	Céréales avec CIPAN	76	29,58	50,98	73,68
	Maïs	100	46,03	70,80	98,18
	Pomme de terre	38	73,75	101,67	122,76

### Limoneuse sèche

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
APL	Betterave	14	16,00	21,00	36,50
	Céréales sans CIPAN	41	56,50	70,00	96,50
	Céréales avec CIPAN	55	24,00	44,00	78,00
	Colza	2	*	47,5	*
	Maïs	46	30,00	40,50	71,50
	Pomme de terre	13	53,00	60,15	84,50

### Sablo-limoneuse

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
APL	Betterave	7	11,00	14,00	19,00
	Céréales sans CIPAN	14	35,4	52,6	75,0
	Céréales avec CIPAN	10	40,0	75,9	105,0
	Maïs	29	40,00	60,13	104,83
	Pomme de terre	5	40,49	56,60	77,75

### 3.2.2 Reliquat de printemps 2009

L'effectif est de 220 parcelles, la médiane des observations est de 51 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (quartile 1 = 33 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> quartile 3 = kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Les parcelles échantillonnées en sortie d'hiver (début 2009) étaient principalement (71%) emblavées en céréales (figure 2-4).

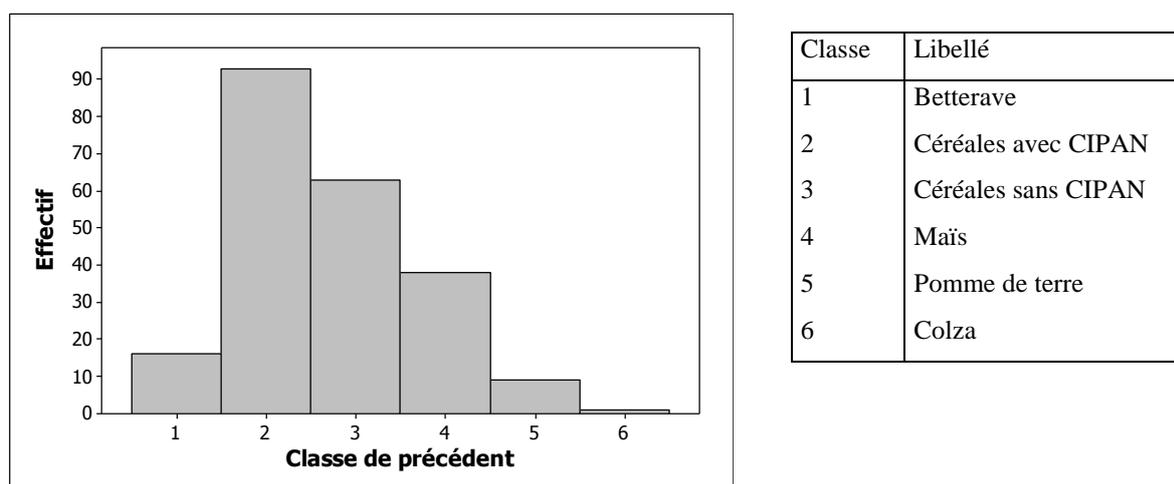


Figure 2-4. Histogramme de la nature des précédents dans les parcelles échantillonnées en sortie d'hiver

Le tableau suivant (tableau 2-2) détaille les observations réalisées en sortie d'hiver dans chaque région agricole.

L'observation de ce tableau confirme le constat réalisé en entrée d'hiver : la région limoneuse humide présente, dans les parcelles occupées par du maïs l'année précédente, généralement des reliquats azotés plus élevés que dans les autres régions.

**Tableau 2-2. Reliquat azoté du printemps 2009 classés par région agricole et par précédent.**

### Condroz

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Betterave	0	*	*	*
	Céréales sans CIPAN	26	18,75	21,00	40,25
	Céréales avec CIPAN	28	31,00	37,00	54,00
	Colza	0	*	*	*
	Maïs	13	25,0	36,0	63,0
	Pomme de terre	0	*	*	*

### Famenne

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Céréales sans CIPAN	4	18,0	54,5	79,0
	Céréales avec CIPAN	4	27,25	28,00	31,00
	Colza	1	*	26,000	*
	Maïs	4	29,75	48,50	53,75

### Limoneuse humide

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Betterave	5	56,50	69,00	90,50
	Céréales sans CIPAN	10	39,5	68,0	109,0
	Céréales avec CIPAN	12	49,50	55,00	69,00
	Maïs	15	57,00	62,00	74,00
	Pomme de terre	8	73,50	81,50	103,75

### Limoneuse sèche

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Betterave	11	44,00	51,00	53,00
	Céréales sans CIPAN	13	29,00	55,00	80,00
	Céréales avec CIPAN	33	56,50	74,00	105,00
	Colza	0	*	*	*
	Maïs	3	47,00	66,00	80,00
	Pomme de terre	1	*	83,000	*

### Sablo-limoneuse

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Betterave	0	*	*	*
	Céréales sans CIPAN	10	41,25	49,50	62,25
	Céréales avec CIPAN	16	31,50	37,00	61,25
	Maïs	3	33,00	52,00	63,00
	Pomme de terre	0	*	*	*

### 3.2.3 Evolution

Afin d'assurer la fiabilité de la comparaison, seule les classes de céréales avec CIPAN, maïs et pomme de terre ont été utilisées pour illustrer l'évolution du reliquat azoté au cours de l'hiver.

En effet, la classe de betterave présente un effectif trop réduit, la classe de céréales sans CIPAN comprend, en entrée d'hiver, des parcelles nues, des parcelles suivies d'une céréale ou d'un colza alors qu'en sortie d'hiver, les parcelles de colza sont distinctes des deux autres cas de figure.

#### Région sablo-limoneuse

La figure suivante illustre une diminution relativement importante du reliquat azoté au cours de l'hiver. A noter les valeurs d'APL élevées pour la classe des céréales avec CIPAN et faible pour la pomme de terre.

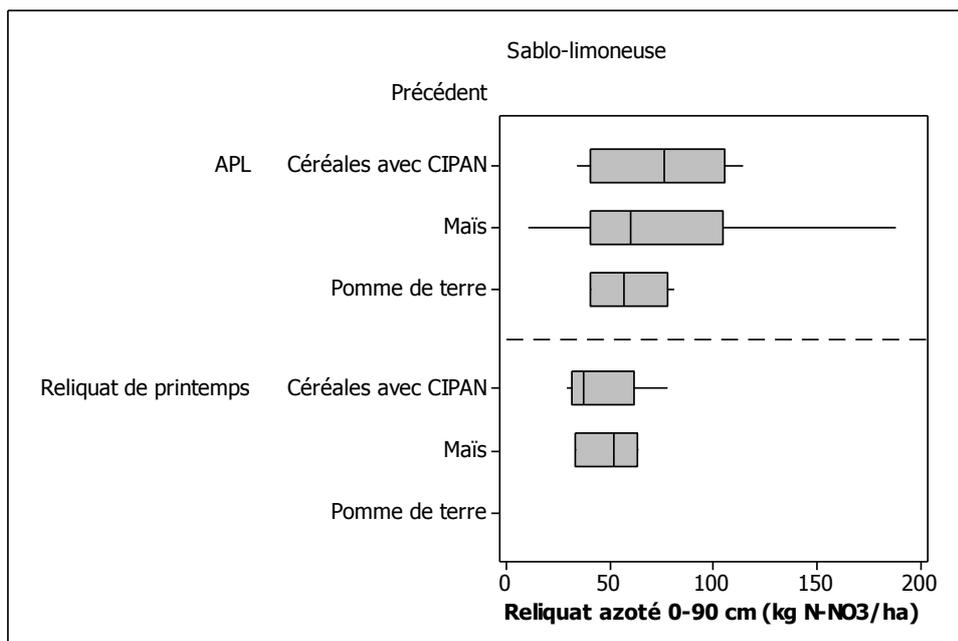


Figure 2-5. Reliquat azoté (région sablo-limoneuse) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.

#### Région limoneuse humide

La figure suivante illustre une diminution de l'amplitude des valeurs de reliquat azoté au cours de l'hiver. A noter une médiane des observations pour la classe des céréales avec CIPAN identique en entrée et sortie d'hiver alors que les médianes des classes de maïs et pomme de terre diminuent.

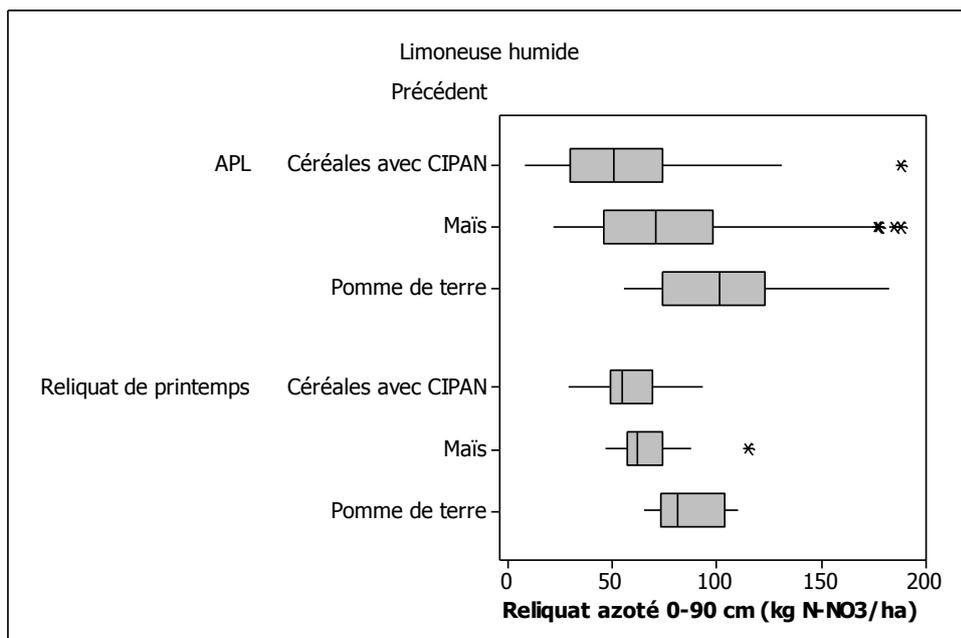


Figure 2-6. Reliquat azoté (région limoneuse humide) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.

### Région limoneuse sèche

La figure suivante illustre une augmentation des valeurs de reliquat azoté en précédent 'céréales avec CIPAN' au cours de l'hiver sans effet marqué sur l'interquartile des résultats.

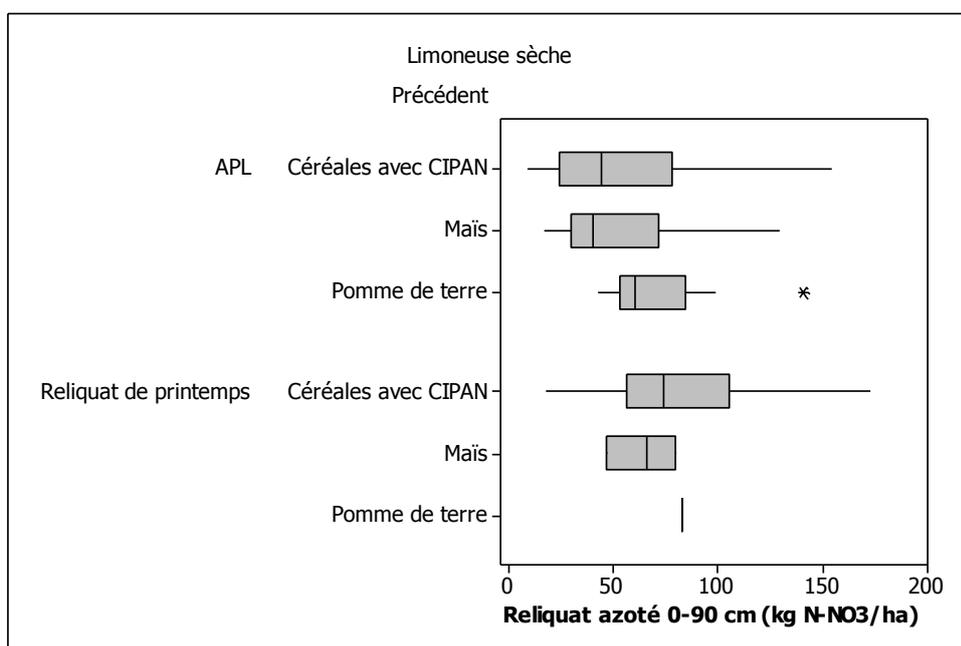


Figure 2-7. Reliquat azoté (région limoneuse sèche) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.

## Condroz

La figure suivante illustre une augmentation des valeurs de reliquat azoté au cours de l'hiver sans effet marqué sur l'interquartile des résultats. A noter, comme pour la région limoneuse sèche, des médianes comparables pour les classes de céréales avec CIPAN et de maïs. Enfin, l'interquartile évolue de façon inverse pour ces deux classes : plus grande dispersion des résultats en maïs et plus faible en céréales avec CIPAN en sortie d'hiver par rapport à l'entrée d'hiver.

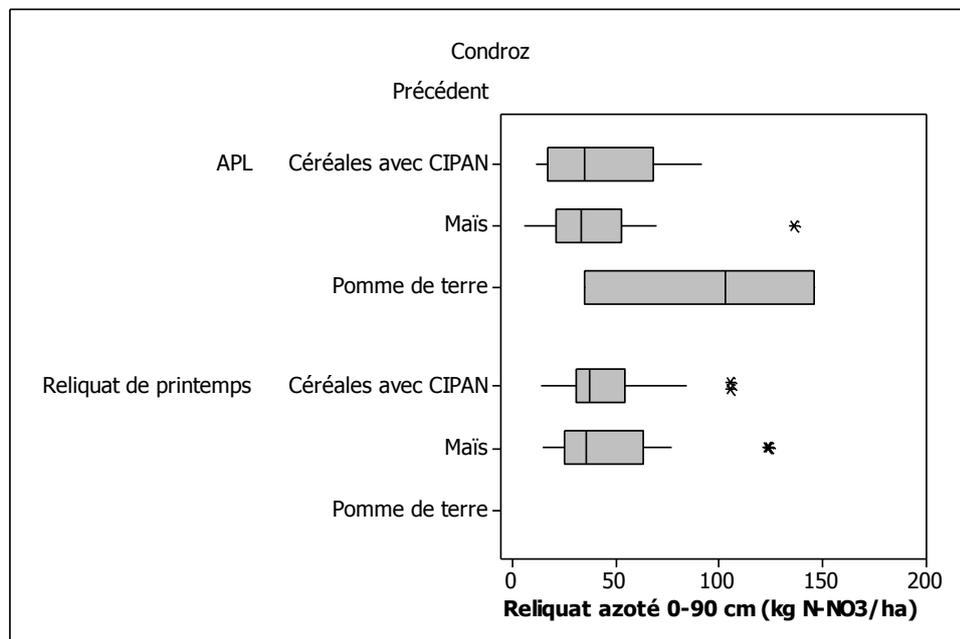


Figure 2-8. Reliquat azoté (Condroz) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.

### 3.2.4 Enseignements

De manière générale, au cours de l'hiver 2008-2009, le reliquat azoté a eu tendance à :

- diminuer en région sablo-limoneuse,
- stagner en Condroz et
- augmenter en région limoneuse sèche et région limoneuse humide.

Les facteurs explicatifs de ces différences observées entre régions résident vraisemblablement dans la nature du sol (plus filtrant en région sablo-limoneuse), la température (plus froide dans le Condroz), la fréquence d'apport de matière organique (plus élevée en région limoneuse humide).

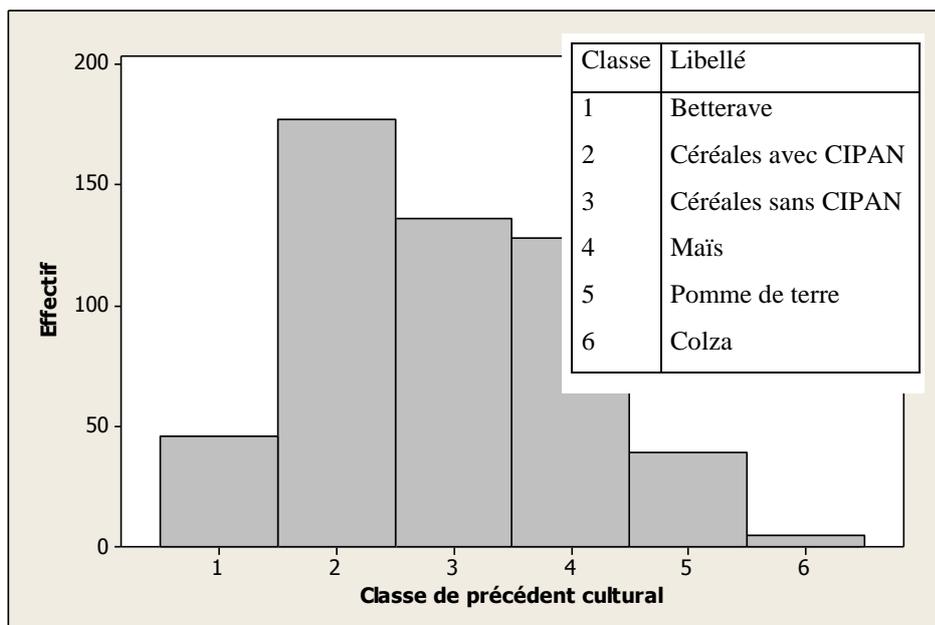
## 3.3 Résultats 2009-2010

### 3.3.1 APL 2009

L'effectif est de 531 parcelles de culture, la médiane des observations est de 46 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (quartile 1 = 23 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> quartile 3 = 71 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

Les parcelles de culture échantillonnées en entrée d'hiver 2009 étaient principalement emblavées en céréales ou maïs (figure 2-9).

Par rapport à 2008 (636 parcelles analysées), on observe une évolution positive (d'un point de vue environnemental) du reliquat azoté puisque tant la médiane que les deux quartiles ont diminué de l'ordre de 10 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.



**Figure 2-9. Histogramme de la nature des précédents dans les parcelles échantillonnées en entrée d'hiver.**

Le tableau suivant (tableau 2-3) détaille les observations réalisées en entrée d'hiver dans chaque région agricole.

L'effectif réduit de résultats en Condroz et Famenne (généralement, moins d'une dizaine d'observation par culture ne permet pas réellement de tirer des enseignements extrapolables à l'ensemble de ces régions agricoles. Pour la culture de maïs, il apparaît cependant que tant la médiane que le quartile 3 sont nettement supérieurs à ceux observés dans les régions limoneuse ou sablo-limoneuse. Une attention particulière doit donc être donnée à cette culture.

Avec un effectif également très réduit (5 observations en Condroz), on note que le colza présente le niveau (médiane) de reliquat azoté le plus élevé, toutes régions et cultures confondues.

Par contre, les céréales (avec ou sans CIPAN) présentent, en Condroz (pas d'observation en Famenne) des reliquats azotés équivalents voire inférieures à ceux observés en région limoneuse ou sablo-limoneuse.

La région limoneuse présente un reliquat azoté en pomme de terre relativement élevé. Il convient de soutenir les efforts d'encadrement pour cette culture qui occupe une place de plus en plus importante dans le paysage agricole.

**Tableau 2-3. APL 2009 classés par région agricole et par précédent.**

### Condroz

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
APL	Betterave	1	*	21,000	*
	Céréales avec CIPAN	11	9,00	22,91	36,00
	Céréales sans CIPAN	13	23,26	36,00	56,50
	Colza	5	55,5	93,0	103,5
	Maïs	5	46,8	74,0	259,5

### Famenne

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
APL	Céréales avec CIPAN	2	*	38,5	*
	Maïs	3	47,0	85,0	126,0

## Limoneuse

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
APL	Betterave	39	16,00	29,00	48,00
	Céréales avec CIPAN	148	13,46	21,33	48,34
	Céréales sans CIPAN	114	44,98	64,06	85,00
	Maïs	92	37,20	48,36	62,41
	Pomme de terre	33	60,39	85,56	122,80

## Sablo-limoneuse

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
APL	Betterave	6	16,3	26,5	70,0
	Céréales avec CIPAN	16	12,28	24,50	56,96
	Céréales sans CIPAN	9	38,95	41,40	74,00
	Maïs	28	40,5	53,5	69,6
	Pomme de terre	6	67,9	73,3	135,7

### 3.3.2 Reliquat de printemps 2010

L'effectif est de 227 parcelles, la médiane des observations est de 47 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (quartile 1 = 32 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> quartile 3 = 66 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Les parcelles échantillonnées en sortie d'hiver (début 2010) étaient principalement emblavées en céréales en 2009 (figure 2-10).

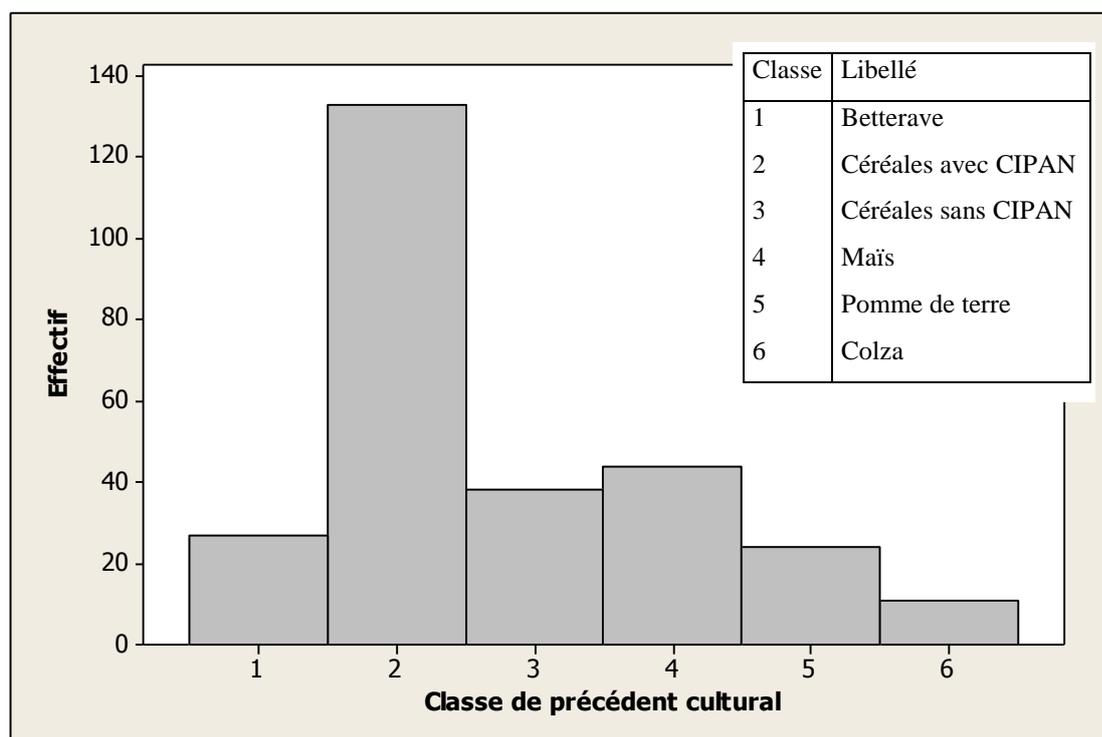


Figure 2-10. Histogramme de la nature des précédents dans les parcelles échantillonnées en sortie d'hiver.

Ces observations sont inférieures de quelques kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> par rapport à celles réalisées en 2009.

Le tableau suivant (tableau 2-4) détaille les observations réalisées en sortie d'hiver dans chaque région agricole.

L'observation de ce tableau indique que la région limoneuse présente, dans les parcelles occupées par une céréale avec CIPAN, du maïs ou de la pomme de terre l'année précédente, généralement des reliquats azotés plus élevés que dans les autres régions.

Les parcelles avec un précédent maïs présentent des reliquats azotés en sortie d'hiver similaire en Condroz et région limoneuse. Il est bon de noter que le quartile 3 de ces observations en Condroz est nettement supérieur à celui observé en région limoneuse ; pour mémoire, un constat similaire a été fait pour les observations APL 2009.

**Tableau 2-4. Reliquat azoté du printemps 2010 classés par région agricole et par précédent.**

### Condroz

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Betterave	2	*	24,50	*
	Céréales avec CIPAN	18	27,00	31,00	42,25
	Céréales sans CIPAN	8	15,25	38,00	39,75
	Colza	5	16,50	31,00	55,00
	Maïs	12	42,75	54,50	81,75
	Pomme de terre	1	*	46,000	*

### Famenne

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Céréales avec CIPAN	8	22,00	30,00	58,00
	Céréales sans CIPAN	1	*	20,000	*
	Maïs	3	24,0	60,0	68,0

### Limoneuse

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Betterave	25	36,50	46,00	57,50
	Céréales avec CIPAN	96	43,25	54,00	74,00
	Céréales sans CIPAN	26	24,75	29,50	52,00
	Colza	6	35,00	40,00	46,00
	Maïs	28	39,25	52,50	69,00
	Pomme de terre	23	43,00	60,00	77,00

### Sablo limoneuse

Variable	Précédent	N	Q1	Médiane	Q3
Reliquat de printemps	Céréales avec CIPAN	11	29,00	38,00	63,00
	Céréales sans CIPAN	3	12,00	27,00	39,00
	Maïs	1	*	44,000	*

### 3.3.3 Evolution

**Afin d'assurer la fiabilité de la comparaison, seule les classes de céréales avec CIPAN, maïs et pomme de terre ont été utilisées pour illustrer l'évolution du reliquat azoté au cours de l'hiver.**

En effet, la classe de betterave présente un effectif trop réduit, la classe de céréales sans CIPAN comprend, en entrée d'hiver, des parcelles nues, des parcelles suivies d'une céréale ou d'un colza alors qu'en sortie d'hiver, les parcelles de colza sont distinctes des deux autres cas de figure.

## Région sablo-limoneuse

La figure suivante (figure 2-11) indique qu'il n'y a pas d'évolution importante du reliquat azoté au cours de l'hiver pour les céréales avec CIPAN. Pour les autres cultures sélectionnées, l'effectif insuffisant ne permet pas d'établir des tendances.

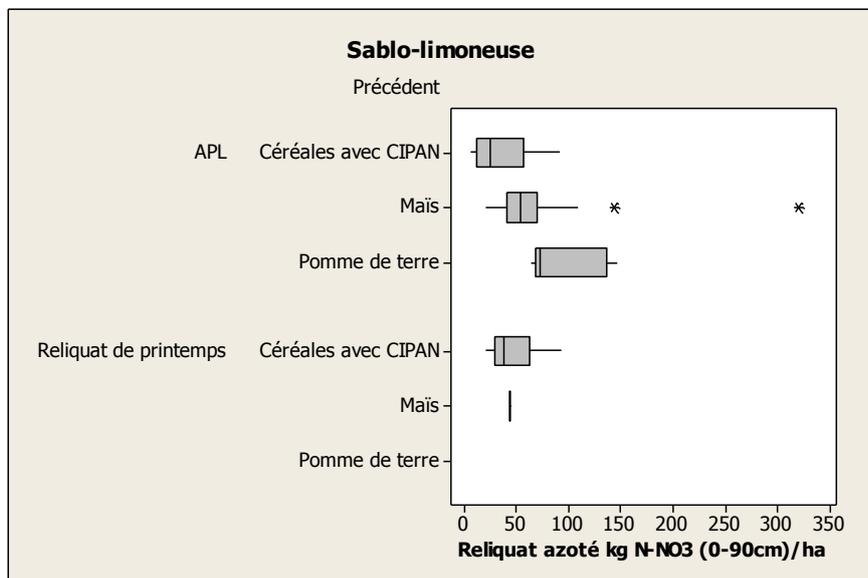


Figure 2-11. Reliquat azoté (région sablo-limoneuse) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.

## Région limoneuse

La figure suivante (figure 2-12) illustre une diminution de l'amplitude des valeurs de reliquat azoté au cours de l'hiver pour les observations faites dans les parcelles de pomme de terre.

Dans les parcelles de céréales avec CIPAN, la médiane des observations de reliquat azoté a eu tendance à augmenter au cours de l'hiver pour se situer à un niveau comparable à celui du maïs dont la médiane des observations a peu évolué en comparaison à celle établie avec les données APL.

Il faut noter que ces tendances ne sont pas celles observées l'année dernière. Une simple 'extrapolation' des APL pour réaliser des conseils de fertilisation idoines ne peut donc être envisagée.

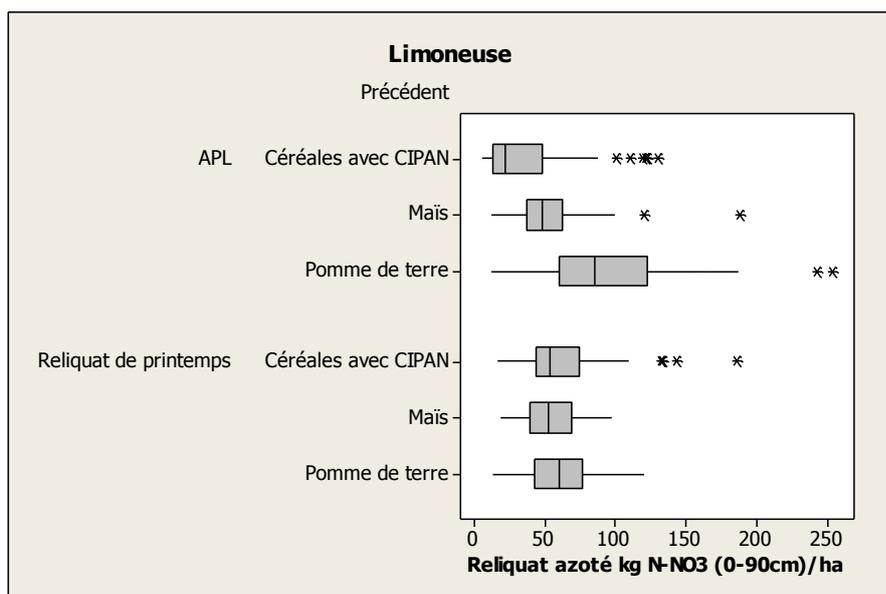


Figure 2-12. Reliquat azoté (région limoneuse) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.

## Condroz

Tout comme en région limoneuse, la figure suivante (figure 2-13) illustre une légère augmentation du reliquat azoté mesuré au cours de l'hiver dans les parcelles de céréales avec CIPAN.

Dans les parcelles de maïs, la médiane et l'amplitude des observations ont très fortement diminué au cours de l'hiver

Il faut noter que ces tendances ne sont pas celles observées l'année dernière. Comme annoncé précédemment, une simple 'extrapolation' des APL pour réaliser des conseils de fertilisation idoines ne peut donc être envisagée.

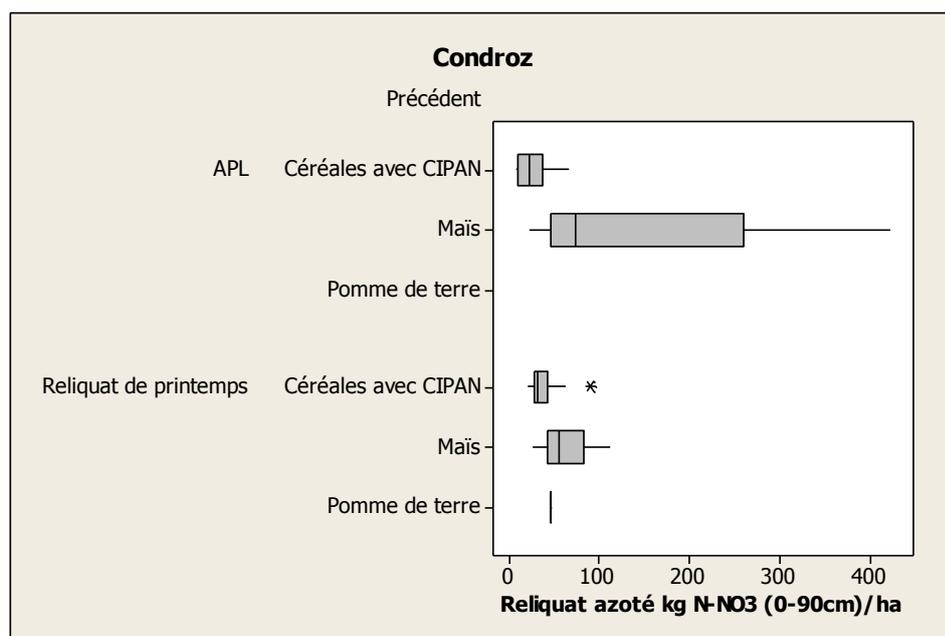


Figure 2-13. Reliquat azoté (Condroz) en entrée (APL) et sortie (Reliquat de printemps) d'hiver.

### 3.3.4 Enseignements

De manière générale, au cours de l'hiver 2009-2010, le reliquat azoté a eu tendance à :

- diminuer dans les situations de précédent maïs ou pomme de terre et
- augmenter dans les contextes de céréales avec CIPAN

Les facteurs explicatifs de ces différences observées entre cultures s'expliquent vraisemblablement par :

- o le niveau du reliquat azoté au début de la période de lixiviation (généralement plus faible pour les céréales avec CIPAN et plus élevé pour le maïs et la pomme de terre) et
- o l'effet de la CIPAN souvent accompagnée d'un apport de matière organique.

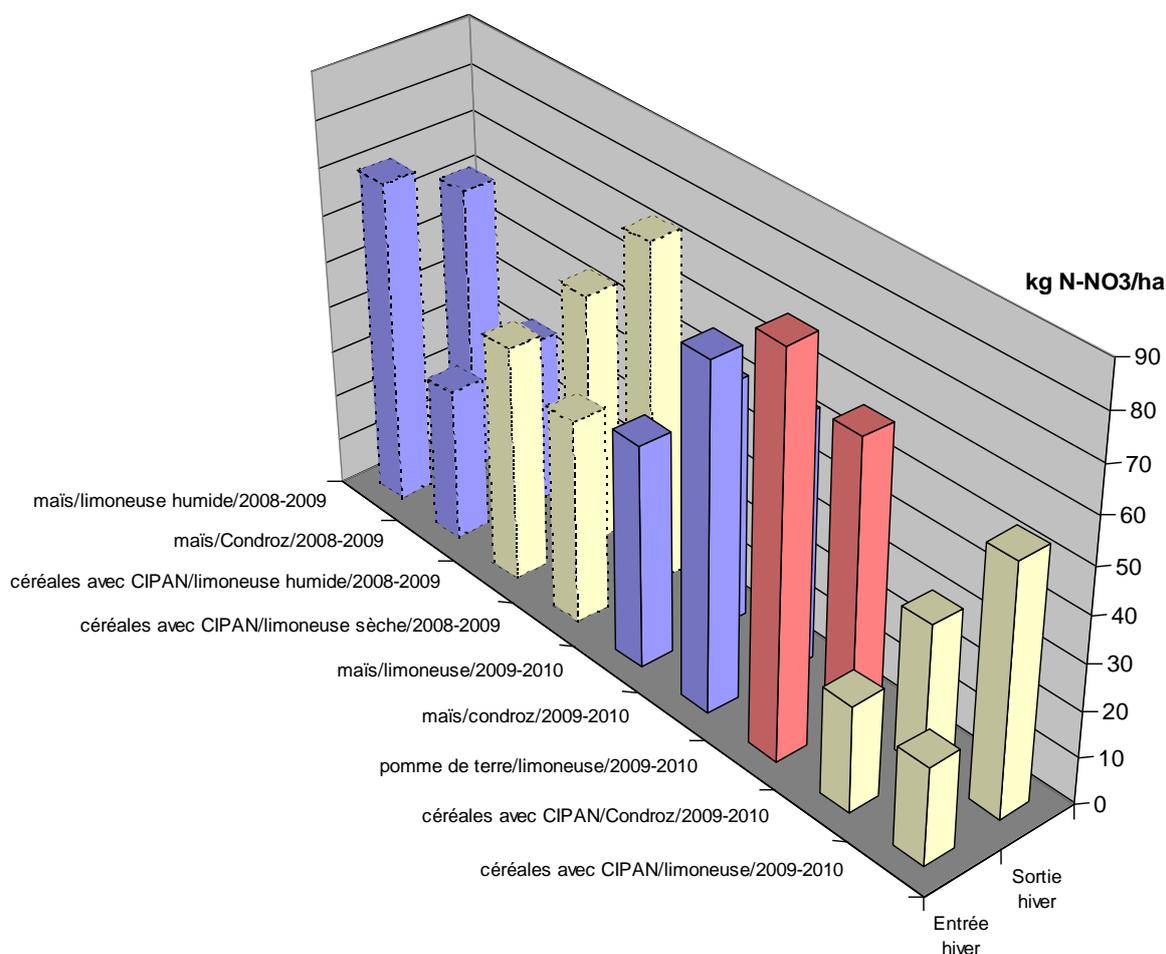
## 3.4 Perspectives

En première approche, seules les associations culture/région agricole comportant au moins dix observations tant en entrée d'hiver (APL) qu'en sortie d'hiver (reliquat azoté de printemps) sont considérées.

La figure suivante (figure 2-14) illustre les résultats (médiane des observations) pour quelques associations culture/région agricole au cours des hivers 2008-2009 et 2009-2010.

Au cours d'un même hiver et pour une même culture (exemple du maïs en 2008-2009), on observe d'une part, une variabilité importante entre régions agricoles et d'autre part une anisotropie dans l'évolution du reliquat azoté au cours de l'hiver : tendance à la diminution en région limoneuse humide et à l'augmentation en Condroz.

L'impact du régime hydrique peut être observé pour le maïs. L'hiver 2008-2009 (décembre 2008 à février 2009) a été caractérisé par une pluviométrie conforme à la normale (195 mm) tandis que l'hiver 2009-2010 a été particulièrement humide (265 mm). Cet effet semble être visible pour le maïs en région limoneuse : le reliquat azoté a diminué au cours de l'hiver 'humide' et est resté plus ou moins constant au cours de l'hiver 'normal' ; ceci ne voulant pas dire qu'il n'y ait pas eu de perte mais plutôt que la lixiviation a, en moyenne, été compensée par la minéralisation.



**Figure 2-14. Comparaison entrée et sortie hiver pour quelques associations culture/région agricole au cours des hivers 2008-2009 et 2009-2010.**

Le même constat ne peut cependant être réalisé pour les céréales avec CIPAN.

En conclusion, il apparaît que les données APL à l'échelle régionale ne peuvent être utilisées en vue d'estimer un reliquat azoté au printemps. Les causes, déjà pressenties en introduction, résident dans la variabilité des résultats APL ainsi que dans la méconnaissance du contexte précis où la mesure est réalisée.

## 4 A partir de données à la parcelle

### 4.1 Introduction

Chaque année, dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA), le Service Public de Wallonie fait échantillonner des parcelles entre le 15 octobre et le 20 décembre en vue de doser le reliquat azoté (APL – Azote Potentiellement Lessivable) en début de période de lixiviation.

Les résultats des analyses sont comparés à des valeurs de références établies par l'ULG-GxABT et l'UCL.

En 2012, quelques 1600 observations ont ainsi été réalisées en zone vulnérable.

Une question remonte régulièrement des campagnes via les conseillers de Nitrawal : y-aurait-il moyen d'estimer le reliquat azoté en sortie d'hiver (RSH) au départ d'observations réalisées en entrée d'hiver ?

Le présent paragraphe vise à évaluer via une approche statistique et avec des paramètres quantifiables s'il est possible d'établir une équation pour prédire le RSH et quelle serait la fiabilité de la prévision.

### 4.2 Matériel et méthode

Dans le cadre de sa mission de soutien scientifique au PGDA, GRENeRA encadre depuis 2002 une vingtaine d'exploitations agricoles situées dans une grande partie de la zone vulnérable (figure 2-15).

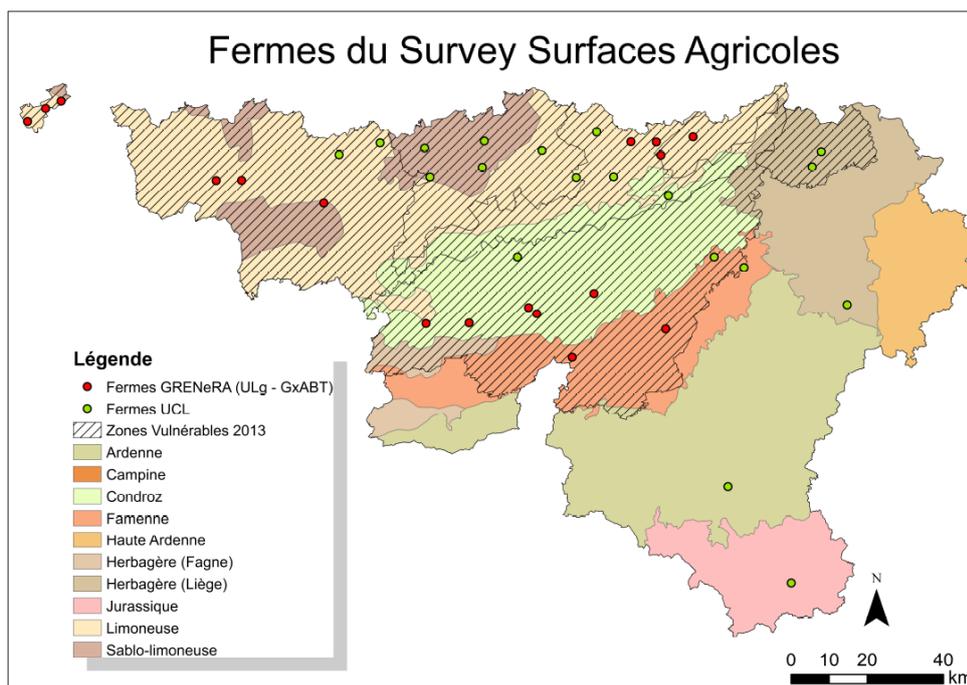


Figure 2-15. Carte des fermes de référence en région wallonne

Dans plusieurs parcelles par exploitation, des mesures de reliquat azoté sont réalisées chaque année, en sortie d'hiver (pour le RSH en vue de l'établissement d'un conseil de fertilisation) et en automne (pour l'APL de référence). Ces observations sont systématiquement réalisées sur une profondeur de 90 cm pour l'APL (en culture) et discrétisées en 3 couches de 30 cm. Pour le RSH, dans près de 80% des situations, les observations sont également réalisées sur 90 cm.

Les observations APL sont classées en 8 catégories en fonction du précédent cultural (tableau 2-5).

**Tableau 2-5. Classes d'occupation de sol**

<b>Classe</b>	<b>Occupation du sol</b>
<b>1</b>	<b>Betterave</b>
<b>2</b>	<b>Céréale suivie d'une CIPAN</b>
<b>3</b>	<b>Céréale non suivie d'une CIPAN ou chicorée</b>
<b>4</b>	<b>Maïs</b>
<b>5</b>	<b>Pomme de terre</b>
<b>6</b>	<b>Colza</b>
<b>7</b>	<b>Légume</b>
<b>8</b>	<b>Prairie</b>

De 2003 à 2013, quelques 660 couples « APL-RSH » ont ainsi été observés.

Ces valeurs sont classées selon différents critères pertinents :

- l'occupation du sol qui précède la mesure de l'APL,
- l'année,
- l'apport d'engrais de ferme l'été qui précède la mesure de l'APL,
- la profondeur d'échantillonnage du RSH

Par ailleurs, d'autres variables sont également considérées pour la prévision du reliquat azoté en sortie d'hiver (RSHP) :

- la distribution mensuelle de la pluviométrie entre la mesure de l'APL et la mesure du RSH,
- la date de mesure de l'APL,
- la date de mesure du RSH

### 4.3 Impact de l'occupation du sol et de l'année

Au cours des dix années d'observations du reliquat azoté, on a pu observer une variabilité relativement importante dans la distribution de la pluviométrie mensuelle entre les mesures d'APL et de RSH (période décembre – février) (figure 2-16).

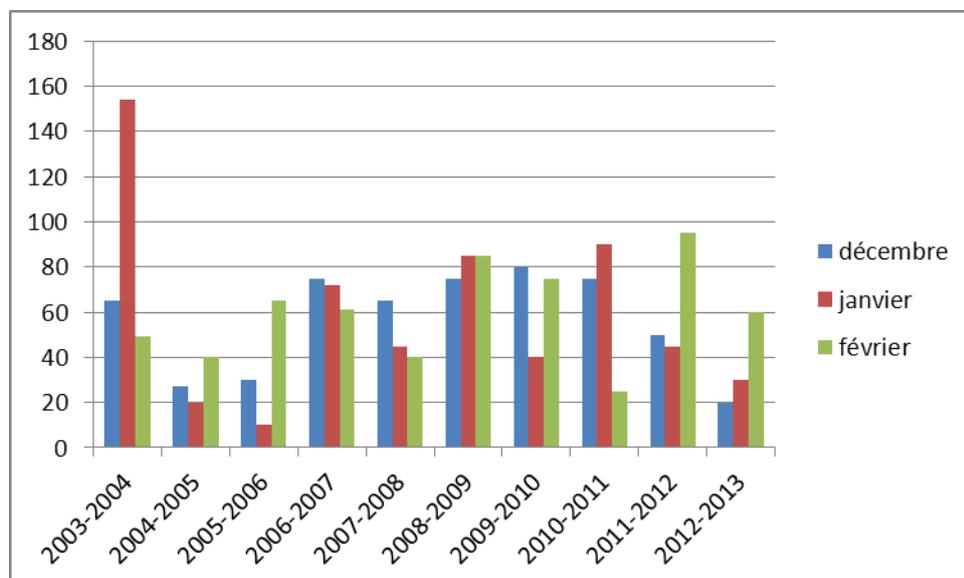


Figure 2-16. Distribution de la pluviométrie (mm) hiver mensuelle entre 2003 et 2013. Source : CRAw

Cette variabilité a nécessairement un impact sur la cinétique de lixiviation du nitrate au cours de cette période.

Il a été montré (Vandenberghe et al, 2012) que la médiane des observations « APL de référence » présente des écarts interannuels qui, par exemple dans le cas du maïs, atteignent  $30 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ . Sachant que ces observations sont réalisées dans des parcelles où la fertilisation a été raisonnée et que la distribution spatiale de ces parcelles n'évolue quasiment pas d'une année à l'autre, ces variations ne peuvent être dues qu'aux conditions climatiques

In fine, nous retenons donc que les deux facteurs qui expliquent le niveau d'APL sont la classe d'occupation du sol et l'année d'observation.

## 4.4 Prédiction du RSH.

### 4.4.1 Préambule

Dans un certain nombre de situations (par exemple, dans le cas d'un conseil de fertilisation pour une culture de pomme de terre), la mesure du RSH n'est réalisée que jusque 60 cm de profondeur. Par conséquent, l'effectif de couples APL 0-90 cm – RSH 0-60 cm est plus important que l'effectif de couple APL 0-90 cm – RSH 0-90 cm.

Les prédictions seront donc étudiées pour ces deux épaisseurs (60 et 90 cm).

La performance de la prédiction sera analysée via l'estimation de l'erreur moyenne ( $|RSH_P - RSH|$ ).

### 4.4.2 Betterave

#### *I Description des données*

Le tableau 2-6 décrit l'effectif des données APL et RSH et la dispersion de celles-ci lorsque la mesure de RSH est réalisée jusque 90 cm.

**Tableau 2-6. Description des données après précédent 'betterave' et mesure du RSH jusqu'à 90 cm**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
APL_0_30	24	18,42	1,78	8,72	7,00	11,50	17,00	26,00	39,00
APL_30_60	24	12,08	1,60	7,83	3,00	7,25	9,00	14,75	32,00
APL_60_90	24	6,500	0,934	4,578	2,000	4,000	6,000	8,750	24,000
RSH_0_30	24	26,17	8,04	39,38	7,00	11,00	16,50	23,75	205,00
RSH_30_60	24	17,54	2,50	12,23	6,00	8,00	15,00	24,00	56,00
RSH_60_90	24	19,75	4,41	21,61	3,00	8,25	14,00	23,75	112,00

Le tableau 2-7 décrit l'effectif des données APL et RSH et la dispersion de celles-ci lorsque la mesure de RSH n'est réalisée que jusque 60 cm.

**Tableau 2-7. Description des données après précédent 'betterave' et mesure du RSH jusqu'à 60 cm**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
APL_0_30	32	16,81	1,44	8,13	7,00	11,00	14,00	19,00	39,00
APL_30_60	32	12,03	1,23	6,94	3,00	8,00	10,00	14,00	32,00
APL_60_90	32	6,938	0,806	4,557	2,000	4,000	6,000	9,000	24,000
RSH_0_30	32	23,31	6,08	34,41	5,00	11,00	16,50	22,75	205,00
RSH_30_60	32	16,41	1,92	10,84	6,00	8,25	14,50	18,50	56,00

## 2 Préviation du RSH 0-90 cm

Il existe une relation significative ( $P=0.019$ ) entre le RSH et la distribution de l'APL dans le sol (0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm). Cependant, la distribution des résidus n'est pas satisfaisante (tableau 2-8).

**Tableau 2-8. Betterave. Régression RSH 90 cm - APL**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = -1,7 + 1,49 \text{ APL}_{0\_30} - 0,34 \text{ APL}_{30\_60} + 6,43 \text{ APL}_{60\_90}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1,72	24,16	-0,07	0,944
APL_0_30	1,494	1,828	0,82	0,423
APL_30_60	-0,343	2,186	-0,16	0,877
APL_60_90	6,432	2,665	2,41	0,026

S = 48,1311 R-Sq = 38,4% R-Sq(adj) = 29,2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	28898	9633	4,16	0,019
Residual Error	20	46332	2317		
Total	23	75230			

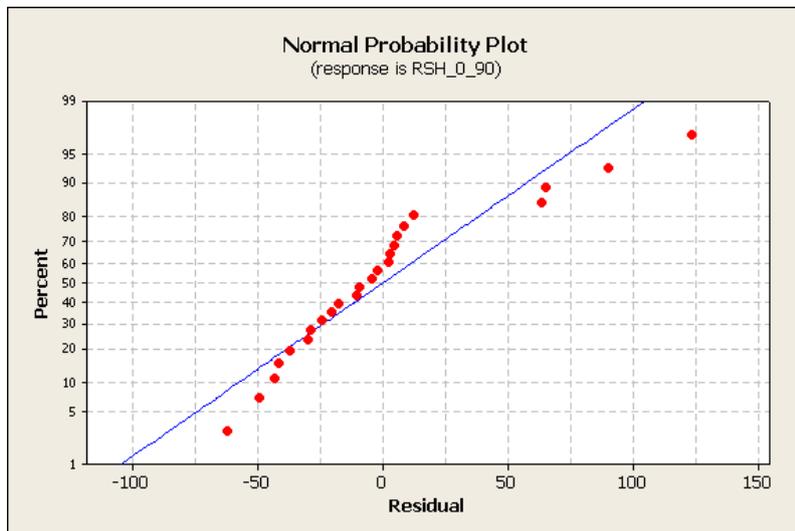
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	13959
APL_30_60	1	1448
APL_60_90	1	13491

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
11	19,0	160,00	36,79	16,02	123,21	2,71R
16	35,0	285,00	194,64	39,63	90,36	3,31RX

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



L'ajout de la variable "pluviométrie décembre à février" améliore un peu la relation ( $r^2 = 0.463$ ) ainsi que la distribution des résidus (tableau 2-9). On observe également (voir équation et valeurs Seq SS) que le RSH est principalement affecté par les valeurs APL 0-30 cm et APL 60-90 cm.

**Tableau 2-9. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie totale**

The regression equation is

$$\text{RSH\_0\_90} = 36,8 + 1,67 \text{ APL\_0\_30} + 0,99 \text{ APL\_30\_60} + 5,47 \text{ APL\_60\_90} - 0,290 \text{ pluvio\_djf}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	36,84	32,65	1,13	0,273
APL_0_30	1,672	1,754	0,95	0,352
APL_30_60	0,993	2,241	0,44	0,663
APL_60_90	5,474	2,616	2,09	0,050
pluvio_djf	-0,2899	0,1731	-1,67	0,110

S = 46,0970    R-Sq = 46,3%    R-Sq(adj) = 35,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	34856	8714	4,10	0,015
Residual Error	19	40374	2125		
Total	23	75230			

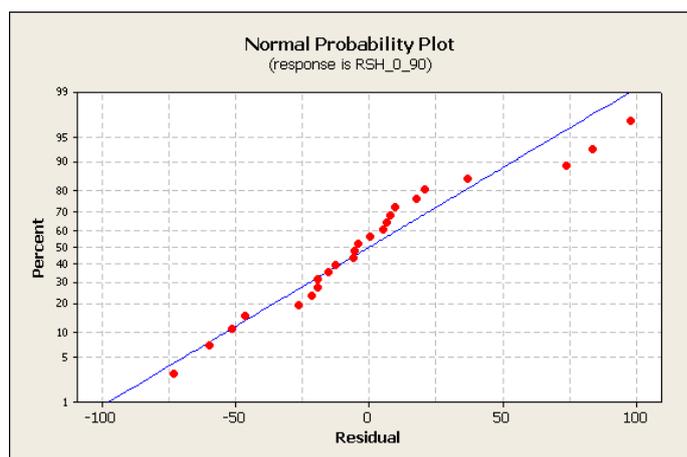
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	13959
APL_30_60	1	1448
APL_60_90	1	13491
pluvio_djf	1	5958

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
11	19,0	160,00	62,29	21,62	97,71	2,40R
16	35,0	285,00	201,46	38,18	83,54	3,23RX

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



Le remplacement de la variable “pluviométrie décembre à février” par trois variables (pluviométries mensuelles de décembre à janvier) améliore la relation ( $r^2 = 0.522$ ) ainsi que la distribution des résidus. On observe également (voir équation et valeurs Seq SS) que le RSH est principalement affecté par les valeurs APL 0-30 cm (tableau 2-10).

**Tableau 2-10. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 46,3 + 2,61 \text{ APL}_{0\_30} + 0,64 \text{ APL}_{30\_60} + 3,20 \text{ APL}_{60\_90} + 0,593 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,554 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,906 \text{ Pluvio}_{\text{fév}}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	46,30	39,09	1,18	0,253
APL_0_30	2,608	1,898	1,37	0,187
APL_30_60	0,639	2,468	0,26	0,799
APL_60_90	3,201	3,051	1,05	0,309
Pluvio_déc	0,5931	0,6754	0,88	0,392
Pluvio_jan	-0,5542	0,3073	-1,80	0,089
Pluvio_fév	-0,9059	0,5225	-1,73	0,101

S = 45,9925    R-Sq = 52,2%    R-Sq(adj) = 35,3%

Analysis of Variance

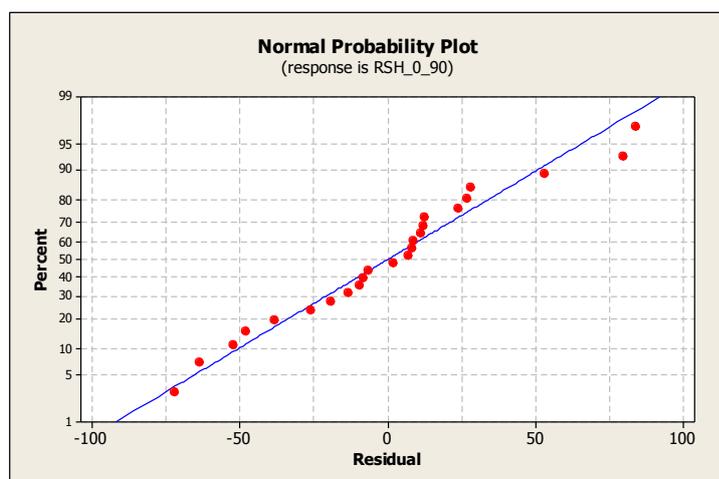
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	39270	6545	3,09	0,031
Residual Error	17	35960	2115		
Total	23	75230			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	13959
APL_30_60	1	1448
APL_60_90	1	13491
Pluvio_déc	1	909
Pluvio_jan	1	3106
Pluvio_fév	1	6357

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
11	19,0	160,00	76,06	24,55	83,94	2,16R
16	35,0	285,00	205,53	38,24	79,47	3,11R

R denotes an observation with a large standardized residual.



L'ajout d'une variable 'délai' (entre la mesure de l'APL et du RSH) améliore légèrement la relation ( $r^2 = 0.534$ ). On observe également (voir équation et valeurs Seq SS) que le RSH est principalement affecté par les valeurs APL 0-30 cm (tableau 2-11). Cependant, l'analyse de la variance indique que cette relation n'est plus significative ( $P = 0.052$ )

**Tableau 2-11. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 80,4 + 2,36 \text{ APL}_{0\_30} + 1,20 \text{ APL}_{30\_60} + 3,30 \text{ APL}_{60\_90} + 0,523 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,587 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,887 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} - 0,325 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	80,40	65,68	1,22	0,239
APL_0_30	2,356	1,969	1,20	0,249
APL_30_60	1,198	2,653	0,45	0,658
APL_60_90	3,300	3,108	1,06	0,304
Pluvio_déc	0,5227	0,6956	0,75	0,463
Pluvio_jan	-0,5867	0,3166	-1,85	0,082
Pluvio_fév	-0,8872	0,5324	-1,67	0,115
délai	-0,3249	0,4982	-0,65	0,523

S = 46,7899    R-Sq = 53,4%    R-Sq(adj) = 33,1%

Analysis of Variance

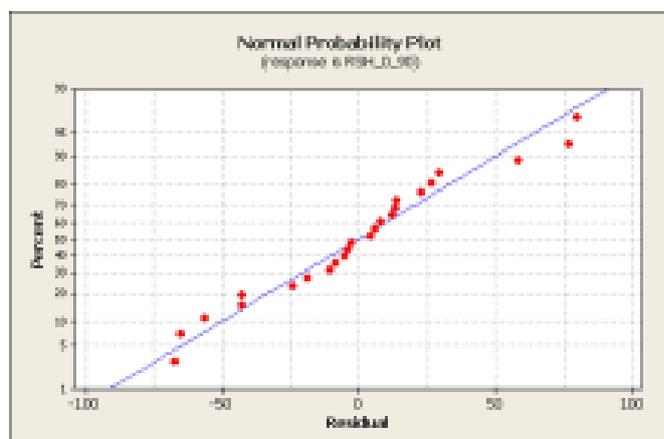
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	40201	5743	2,62	0,052
Residual Error	16	35029	2189		
Total	23	75230			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	13959
APL_30_60	1	1448
APL_60_90	1	13491
Pluvio_déc	1	909
Pluvio_jan	1	3106
Pluvio_fév	1	6357
délai	1	932

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
11	19,0	160,00	80,61	25,93	79,39	2,04R
16	35,0	285,00	208,42	39,15	76,58	2,99R

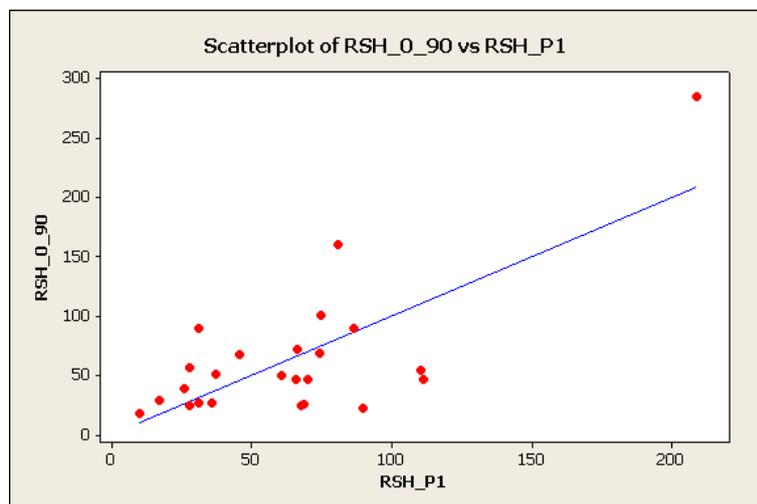
R denotes an observation with a large standardized residual.



A ce stade, l'évaluation de l'erreur de prédiction indique que la qualité de la prévision n'est pas suffisante puisque l'erreur médiane est de plus de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-12).

**Tableau 2-12. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH <sub>P</sub> - RSH	24	0	29,07	5,17	25,32	2,99	8,09	20,52	53,05	79,28



En prenant tout le jeu de données APL ; c'est-à-dire en ajoutant aux observations réalisées la première décade de décembre, celles réalisées la dernière décade d'octobre, la relation est très légèrement améliorée ( $r^2 = 0.558$  au lieu de 0.534) (tableau 2-13) et devient hautement significative ( $P=0.000$ ).

**Tableau 2-13. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL(oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0-90} = 68,9 + 1,60 \text{ APL}_{0\_30} + 0,79 \text{ APL}_{30\_60} + 2,27 \text{ APL}_{60\_90} + 0,876 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,521 \text{ pluvio}_{\text{jan}} - 1,08 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 0,076 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	68,86	41,27	1,67	0,104
APL_0_30	1,604	1,200	1,34	0,189
APL_30_60	0,793	1,887	0,42	0,677
APL_60_90	2,271	2,351	0,97	0,340
Pluvio_déc	0,8762	0,4667	1,88	0,068
pluvio_jan	-0,5210	0,1728	-3,02	0,005
Pluvio_fév	-1,0814	0,3437	-3,15	0,003
délai	0,0760	0,2296	0,33	0,743

S = 41,4252    R-Sq = 55,8%    R-Sq(adj) = 47,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	80242	11463	6,68	0,000
Residual Error	37	63494	1716		
Total	44	143735			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	44212
APL_30_60	1	763
APL_60_90	1	8164
Pluvio_déc	1	776

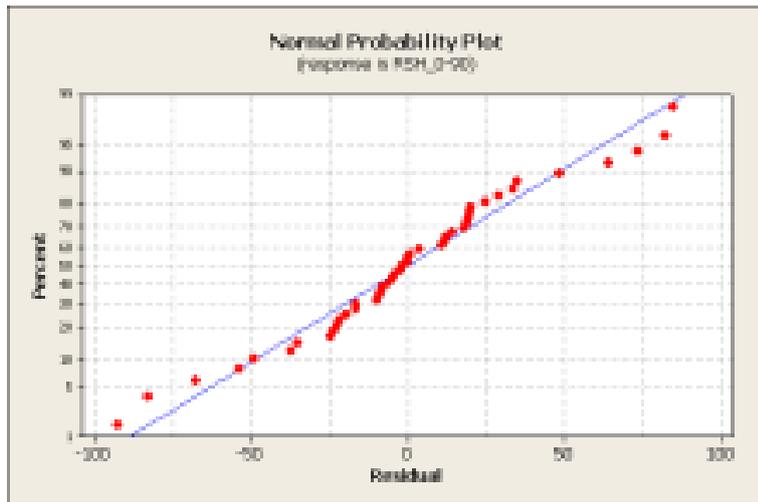
```

pluvio_jan 1 7453
Pluvio_fév 1 18686
délai 1 188

```

Unusual Observations

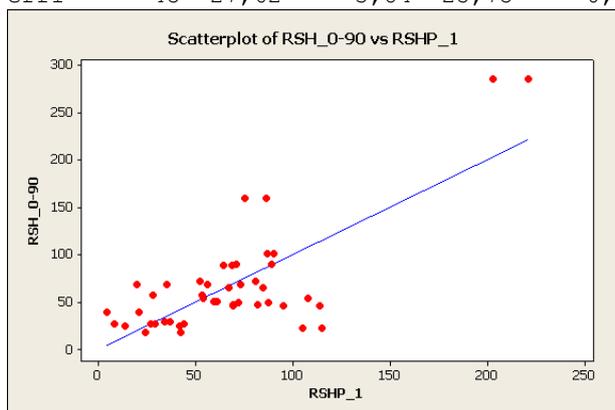
Obs	APL_0_30	RSH_0-90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
13	27,0	22,00	114,83	18,13	-92,83	-2,49R
15	13,0	160,00	75,35	13,06	84,65	2,15R
19	18,0	22,00	105,14	16,01	-83,14	-2,18R
23	28,0	46,00	113,96	24,41	-67,96	-2,03R
30	58,0	285,00	221,23	29,38	63,77	2,18R
31	35,0	285,00	202,96	31,91	82,04	3,11RX



A ce stade, l'évaluation de l'erreur de prédiction indique que la qualité de la prévision n'est pas améliorée puisque l'erreur médiane est de près de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-14).

**Tableau 2-14. Betterave. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	45	27,62	3,84	25,75	0,11	8,82	19,59	36,40	92,79



La suppression de deux valeurs aberrantes, la transformation logarithmique des variables APL et du délai n'apporte pas d'amélioration à la distribution des résidus ni à l'analyse de la variance ni à la corrélation.

### 3 Préviation du RSH 0-60 cm

Dans diverses situations, l'établissement d'un conseil de fertilisation ne s'appuie que sur la connaissance du reliquat azoté dans la couche 0-60 cm. C'est ainsi le cas pour des cultures à enracinement peu profond (légumes, pomme de terre), des semis tardif (maïs) ou des sols peu profonds.

Dans ces contextes, la qualité de la prédiction jusqu'à 60 cm est évaluée en tenant compte des pluviométries mensuelles (décembre à février) (tableau 2-15) et en y ajoutant le délai entre les deux observations (APL et RSH) (tableau 2-16). Les deux analyses de variance indiquent que ces relations sont significatives.

**Tableau 2-15. Betterave. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_60} = 8,1 + 2,25 \text{ APL}_{0\_30} - 0,44 \text{ APL}_{30\_60} + 3,46 \text{ APL}_{60\_90} + 0,424 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,264 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,499 \text{ Pluvio}_{\text{fév}}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,14	29,11	0,28	0,782
APL_0_30	2,247	1,202	1,87	0,073
APL_30_60	-0,445	1,844	-0,24	0,811
APL_60_90	3,458	2,022	1,71	0,100
Pluvio_déc	0,4242	0,4706	0,90	0,376
Pluvio_jan	-0,2637	0,1962	-1,34	0,191
Pluvio_fév	-0,4992	0,3478	-1,44	0,164

S = 35,9205 R-Sq = 44,8% R-Sq(adj) = 31,5%

Analysis of Variance

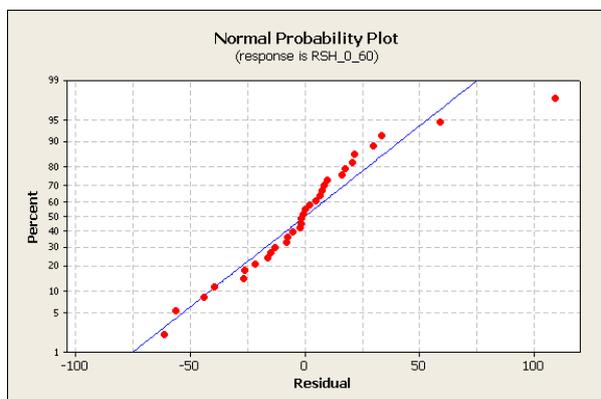
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	26153	4359	3,38	0,014
Residual Error	25	32257	1290		
Total	31	58410			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	10849
APL_30_60	1	1235
APL_60_90	1	10302
Pluvio_déc	1	45
Pluvio_jan	1	1065
Pluvio_fév	1	2657

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
17	28,0	26,00	87,47	23,36	-61,47	-2,25R
24	35,0	261,00	152,04	26,70	108,96	4,54R

R denotes an observation with a large standardized residual.



**Tableau 2-16. Betterave. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai**

The regression equation is

$$\text{RSH\_0\_60} = -12,3 + 2,28 \text{ APL\_0\_30} - 0,68 \text{ APL\_30\_60} + 3,58 \text{ APL\_60\_90} \\ + 0,462 \text{ Pluvio\_déc} - 0,246 \text{ Pluvio\_jan} - 0,489 \text{ Pluvio\_fév} \\ + 0,184 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-12,31	49,66	-0,25	0,806
APL_0_30	2,284	1,222	1,87	0,074
APL_30_60	-0,684	1,929	-0,35	0,726
APL_60_90	3,583	2,067	1,73	0,096
Pluvio_déc	0,4619	0,4833	0,96	0,349
Pluvio_jan	-0,2458	0,2022	-1,22	0,236
Pluvio_fév	-0,4890	0,3536	-1,38	0,180
délai	0,1845	0,3600	0,51	0,613

S = 36,4624    R-Sq = 45,4%    R-Sq(adj) = 29,4%

Analysis of Variance

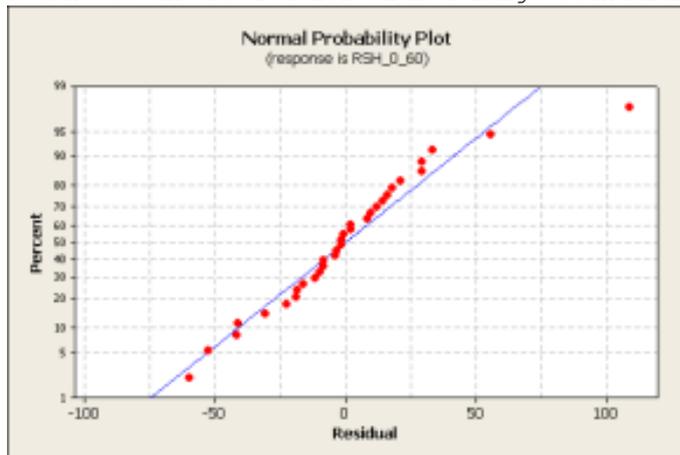
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	26502	3786	2,85	0,026
Residual Error	24	31908	1330		
Total	31	58410			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	10849
APL_30_60	1	1235
APL_60_90	1	10302
Pluvio_déc	1	45
Pluvio_jan	1	1065
Pluvio_fév	1	2657
délai	1	349

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
17	28,0	26,00	86,21	23,84	-60,21	-2,18R
24	35,0	261,00	152,58	27,13	108,42	4,45R

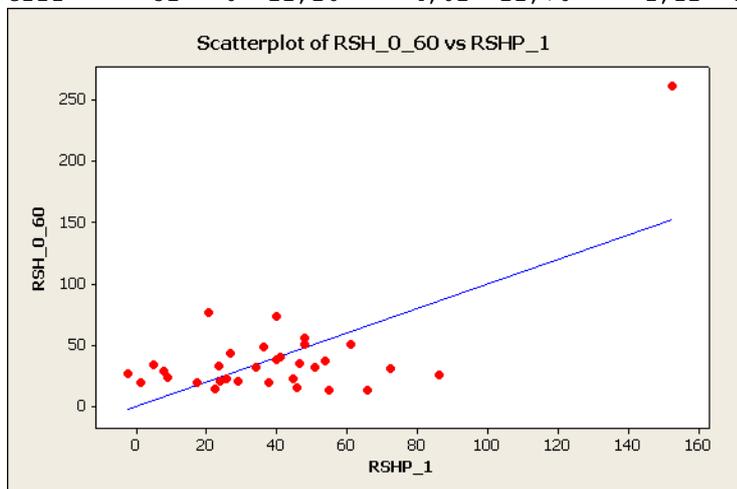
R denotes an observation with a large standardized residual.



A ce stade, l'évaluation de l'erreur de prédiction indique que la qualité de la prévision n'est pas améliorée puisque l'erreur médiane est de plus de 16 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-17).

**Tableau 2-17. Betterave. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction**

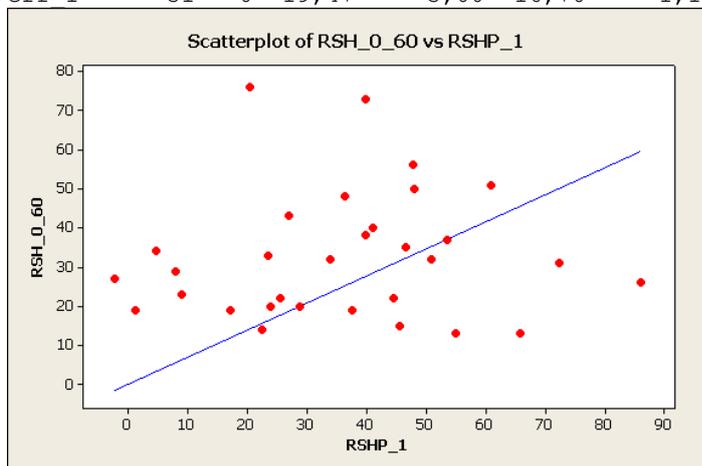
Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	32	0	22,26	4,02	22,76	1,12	8,19	16,33	30,31	108,56



En enlevant une valeur aberrante, la qualité de la prédiction n'est guère améliorée (tableau 2-18),

**Tableau 2-18. Betterave. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction (sans valeur aberrante)**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err 1	31	0	19,47	3,00	16,70	1,12	8,11	16,08	29,21	60,08



En prenant tout le jeu de données d'automne (observations réalisées la dernière décade d'octobre et la première décade de décembre), la prédiction n'est guère améliorée ( $r^2=0.554$ , erreur médiane = 15.58 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

### 4.4.3 Céréales suivies d'une CIPAN

#### 1 Préviation du RSH 0-90 cm

Une simple régression entre les résultats APL de décembre et le RSH donne des résultats non satisfaisants : la relation est à peine significative ( $P=0.050$ ) et l'APL n'explique que très peu le RSH ( $r^2 = 0.09$ ) (tableau 2-19).

**Tableau 2-19. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 39,3 + 0,653 \text{ APL}_{0\_30} - 0,802 \text{ APL}_{30\_60} + 1,20 \text{ APL}_{60\_90}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	39,328	5,362	7,33	0,000
APL_0_30	0,6525	0,2869	2,27	0,026
APL_30_60	-0,8018	0,5265	-1,52	0,132
APL_60_90	1,1976	0,6665	1,80	0,076

S = 29,0391 R-Sq = 9,1% R-Sq(adj) = 5,8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	6875,4	2291,8	2,72	0,050
Residual Error	81	68304,7	843,3		
Total	84	75180,0			

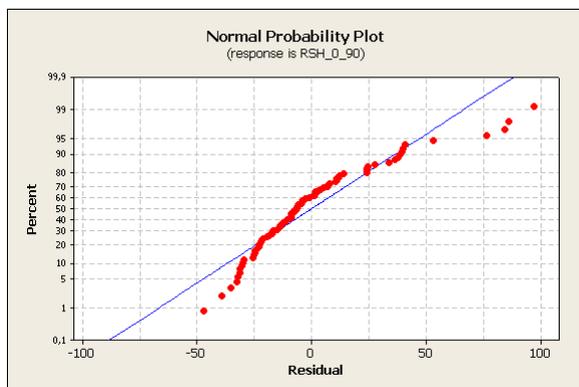
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4052,8
APL_30_60	1	100,1
APL_60_90	1	2722,5

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	12,0	31,00	52,61	12,84	-21,61	-0,83 X
8	21,0	153,00	56,12	8,10	96,88	3,47R
11	83,0	68,00	80,17	14,98	-12,17	-0,49 X
13	6,0	131,00	54,81	5,87	76,19	2,68R
15	46,0	76,00	52,03	11,71	23,97	0,90 X
23	7,0	130,00	45,88	4,09	84,12	2,93R
24	9,0	132,00	45,99	4,26	86,01	2,99R
39	49,0	97,00	72,87	11,06	24,13	0,90 X
40	52,0	51,00	75,62	11,53	-24,62	-0,92 X
43	6,0	58,00	68,73	14,53	-10,73	-0,43 X
49	66,0	42,00	61,41	16,64	-19,41	-0,82 X
50	64,0	83,00	83,82	13,15	-0,82	-0,03 X

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



L'ajout de la pluviométrie totale (décembre à février) améliore un peu la relation mais pas suffisamment ( $r^2 = 0.214$ ) (tableau 2-20).

**Tableau 2-20. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 72,2 + 0,769 \text{ APL}_{0\_30} - 1,17 \text{ APL}_{30\_60} + 1,55 \text{ APL}_{60\_90} - 0,196 \text{ pluvio\_djf}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	72,23	10,56	6,84	0,000
APL_0_30	0,7686	0,2704	2,84	0,006
APL_30_60	-1,1714	0,5036	-2,33	0,023
APL_60_90	1,5509	0,6315	2,46	0,016
pluvio_djf	-0,19590	0,05535	-3,54	0,001

S = 27,1702    R-Sq = 21,4%    R-Sq(adj) = 17,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	16122,6	4030,6	5,46	0,001
Residual Error	80	59057,5	738,2		
Total	84	75180,0			

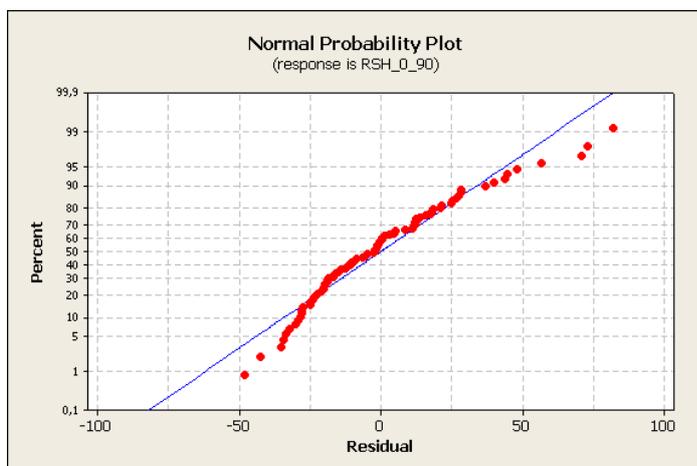
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4052,8
APL_30_60	1	100,1
APL_60_90	1	2722,5
pluvio_djf	1	9247,2

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	12,0	31,00	30,55	13,53	0,45	0,02 X
8	21,0	153,00	71,06	8,67	81,94	3,18R
11	83,0	68,00	96,14	14,72	-28,14	-1,23 X
13	6,0	131,00	74,51	7,82	56,49	2,17R
23	7,0	130,00	59,35	5,40	70,65	2,65R
24	9,0	132,00	59,33	5,49	72,67	2,73R
43	6,0	58,00	77,93	13,84	-19,93	-0,85 X
49	66,0	42,00	39,14	16,79	2,86	0,13 X
50	64,0	83,00	74,43	12,59	8,57	0,36 X

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



La discrétisation mensuelle de la pluviométrie (décembre à février) n'apporte guère d'amélioration (tableau 2-21). L'ajout du délai entre la mesure de l'APL et la mesure du RSH n'apporte aucune amélioration.

**Tableau 2-21. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 71,7 + 0,769 \text{ APL}_{0\_30} - 1,30 \text{ APL}_{30\_60} + 1,74 \text{ APL}_{60\_90} - 0,070 \text{ Pluvio\_jan} - 0,014 \text{ Pluvio\_fév} - 0,501 \text{ Pluvio\_déc}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	71,69	13,38	5,36	0,000
APL_0_30	0,7685	0,2684	2,86	0,005
APL_30_60	-1,3032	0,5046	-2,58	0,012
APL_60_90	1,7444	0,6464	2,70	0,009
Pluvio_jan	-0,0695	0,1061	-0,66	0,514
Pluvio_fév	-0,0142	0,1429	-0,10	0,921
Pluvio_déc	-0,5014	0,1941	-2,58	0,012

S = 26,8944    R-Sq = 25,0%    R-Sq(adj) = 19,2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	18762,1	3127,0	4,32	0,001
Residual Error	78	56418,0	723,3		
Total	84	75180,0			

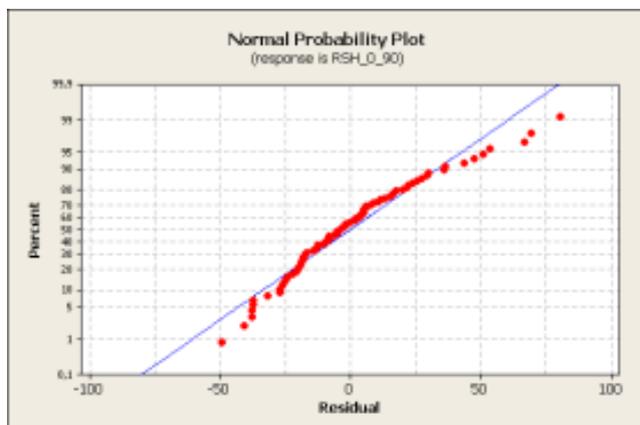
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4052,8
APL_30_60	1	100,1
APL_60_90	1	2722,5
Pluvio_jan	1	6930,2
Pluvio_fév	1	131,4
Pluvio_déc	1	4825,2

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	12,0	31,00	39,31	14,83	-8,31	-0,37 X
8	21,0	153,00	72,49	8,68	80,51	3,16R
11	83,0	68,00	94,90	14,63	-26,90	-1,19 X
13	6,0	131,00	77,39	8,10	53,61	2,09R
23	7,0	130,00	63,04	5,69	66,96	2,55R
24	9,0	132,00	62,83	5,74	69,17	2,63R
43	6,0	58,00	74,56	14,04	-16,56	-0,72 X
49	66,0	42,00	38,33	17,00	3,67	0,18 X

R denotes an observation with a large standardized residual.

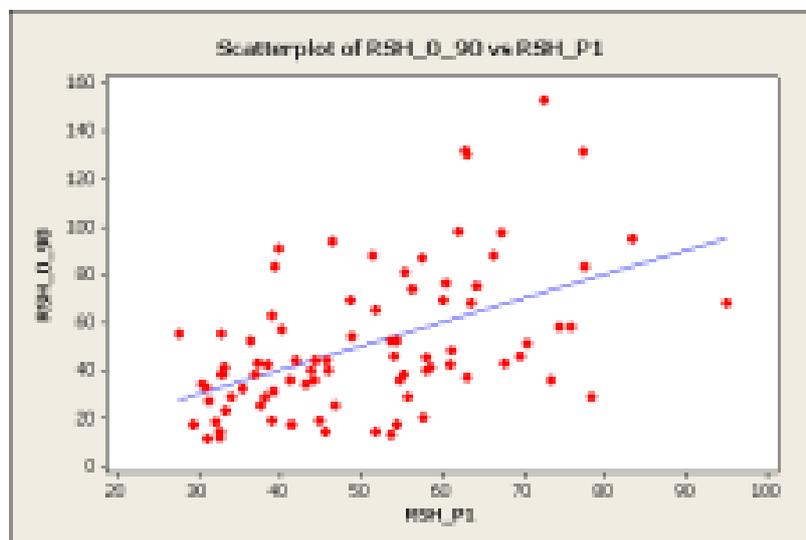
X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



A ce stade, l'erreur médiane commise reste trop importante ( $17.61 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ) (tableau 2-22).

**Tableau 2-22. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle /évaluation de l'erreur de prédiction**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err_1	85	0	19,94	1,78	16,41	0,42	6,85	17,61	26,45	80,48



L'ajout des données APL d'octobre et du délai entre les mesures dégrade la relation ( $r^2$  passe de 0.250 à 0.158) (tableau 2-23).

**Tableau 2-23. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0-90} = 64,3 + 0,532 \text{ APL}_{0\_30} - 0,911 \text{ APL}_{30\_60} + 0,814 \text{ APL}_{60\_90} - 0,505 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,0621 \text{ pluvio}_{\text{jan}} - 0,171 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 0,251 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	64,27	16,59	3,87	0,000
APL_0_30	0,5321	0,2044	2,60	0,010
APL_30_60	-0,9108	0,4081	-2,23	0,027
APL_60_90	0,8138	0,4804	1,69	0,092
Pluvio_déc	-0,5052	0,1715	-2,95	0,004
pluvio_jan	-0,06213	0,09560	-0,65	0,517
Pluvio_fév	-0,1707	0,1317	-1,30	0,197
délai	0,2505	0,1054	2,38	0,019

S = 34,8147    R-Sq = 15,8%    R-Sq(adj) = 12,3%

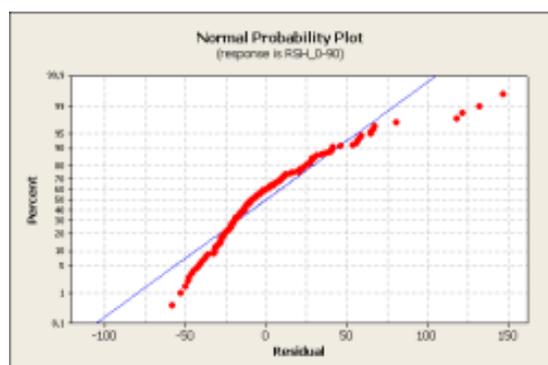
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	38073	5439	4,49	0,000
Residual Error	167	202415	1212		
Total	174	240488			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4420
APL_30_60	1	529
APL_60_90	1	672
Pluvio_déc	1	23584
pluvio_jan	1	10
Pluvio_fév	1	2012
délai	1	6846

Unusual Observations

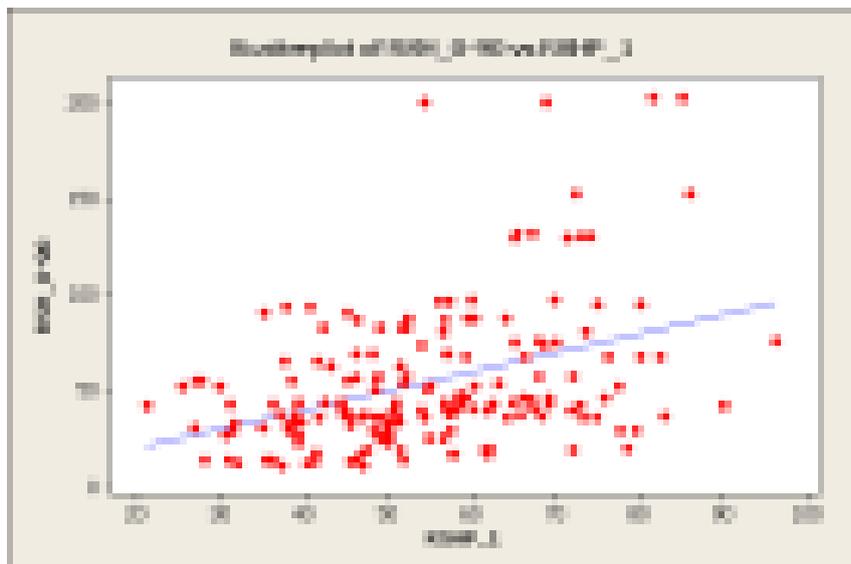
Obs	APL_0_30	RSH_0-90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	28	31,00	26,69	16,09	4,31	0,14 X
14	8	203,00	84,89	8,88	118,11	3,51R
24	5	203,00	81,44	7,30	121,56	3,57R
26	21	153,00	72,17	6,79	80,83	2,37R
61	28	201,00	68,59	8,57	132,41	3,92R
68	13	44,00	56,66	15,23	-12,66	-0,40 X
73	23	201,00	54,11	5,56	146,89	4,27R
89	67	19,00	71,88	16,23	-52,88	-1,72 X
91	96	40,00	71,76	13,09	-31,76	-0,98 X
99	141	42,00	89,90	21,60	-47,90	-1,75 X
105	66	42,00	21,20	14,61	20,80	0,66 X
111	27	55,00	26,84	13,49	28,16	0,88 X



Vu ce qui précède, l'erreur médiane commise reste est augmentée (20.92 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) (tableau 2-24).

**Tableau 2-24. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err_1	175	25,42	1,71	22,66	0,35	10,60	20,92	31,38	146,79



En limitant le champ de données aux seules observations réalisées après froment, on n'apporte pas d'amélioration à la relation (tableau 2-25) ni à la qualité de la prédiction (tableau 2-26).

**Tableau 2-25. Froment suivi d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0-90} = 61,5 + 1,17 \text{ APL}_{0\_30} - 1,77 \text{ APL}_{30\_60} + 1,35 \text{ APL}_{60\_90} - 0,665 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,096 \text{ pluvio}_{\text{jan}} - 0,228 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 0,381 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	61,47	21,27	2,89	0,005
APL_0_30	1,1686	0,3215	3,64	0,000
APL_30_60	-1,7731	0,5816	-3,05	0,003
APL_60_90	1,3507	0,5875	2,30	0,023
Pluvio_déc	-0,6653	0,2336	-2,85	0,005
pluvio_jan	-0,0960	0,1371	-0,70	0,485
Pluvio_fév	-0,2283	0,1618	-1,41	0,161
délai	0,3812	0,1345	2,84	0,005

S = 36,4180    R-Sq = 26,3%    R-Sq(adj) = 21,6%

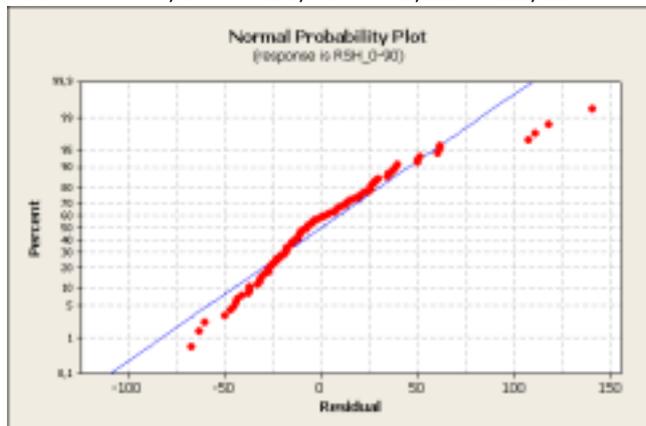
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	52016	7431	5,60	0,000
Residual Error	110	145889	1326		
Total	117	197905			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	7488
APL_30_60	1	1990
APL_60_90	1	1097
Pluvio_déc	1	28879
pluvio_jan	1	25
Pluvio_fév	1	1878
délai	1	10660

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0-90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	28,0	31,00	1,45	21,88	29,55	1,02 X
8	8,0	203,00	95,93	11,24	107,07	3,09R
14	5,0	203,00	92,47	9,41	110,53	3,14R
15	83,0	68,00	105,00	17,62	-37,00	-1,16 X
39	28,0	201,00	83,64	11,63	117,36	3,40R
45	13,0	44,00	56,41	17,52	-12,41	-0,39 X
48	23,0	201,00	60,80	7,69	140,20	3,94R
58	67,0	19,00	82,11	21,13	-63,11	-2,13RX



**Tableau 2-26. Froment suivi d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err_1	118	26,47	2,14	23,24	0,51	11,56	21,29	34,33	140,09

## 2 Préviation du RSH 0-60 cm

Dans diverses situations, l'établissement d'un conseil de fertilisation ne s'appuie que sur la connaissance du reliquat azoté dans la couche 0-60 cm. C'est ainsi le cas pour des cultures à enracinement peu profond (légumes, pomme de terre), des semis tardif (maïs) ou des sols peu profonds.

Dans ces contextes, la qualité de la prédiction jusqu'à 60 cm est évaluée en tenant compte des pluviométries mensuelles (décembre à février) (tableau 2-27) et en y ajoutant le délai entre les deux observations (APL et RSH) (tableau 2-28). Les deux analyses de variance indiquent que ces relations sont significatives.

**Tableau 2-27. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_60} = 44,1 + 0,772 \text{ APL}_{0\_30} - 1,21 \text{ APL}_{30\_60} + 1,58 \text{ APL}_{60\_90} - 0,282 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,0720 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} + 0,030 \text{ Pluvio}_{\text{fév}}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	44,069	9,706	4,54	0,000
APL_0_30	0,7715	0,2028	3,80	0,000
APL_30_60	-1,2124	0,3798	-3,19	0,002
APL_60_90	1,5845	0,4659	3,40	0,001
Pluvio_déc	-0,2817	0,1470	-1,92	0,058
Pluvio_jan	-0,07196	0,08085	-0,89	0,376
Pluvio_fév	0,0300	0,1041	0,29	0,774

S = 20,8194    R-Sq = 25,7%    R-Sq(adj) = 20,8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	13521,9	2253,7	5,20	0,000
Residual Error	90	39010,4	433,4		
Total	96	52532,3			

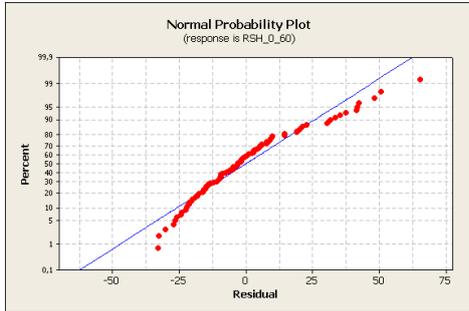
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4420,1
APL_30_60	1	257,9
APL_60_90	1	3117,5
Pluvio_déc	1	5280,4
Pluvio_jan	1	409,9
Pluvio_fév	1	36,0

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	12,0	19,00	26,40	10,95	-7,40	-0,42 X
8	21,0	117,00	51,66	6,47	65,34	3,30R
11	83,0	46,00	76,28	11,07	-30,28	-1,72 X
13	6,0	104,00	55,86	5,94	48,14	2,41R
35	27,0	108,00	57,27	7,34	50,73	2,60R
41	22,0	80,00	37,58	3,52	42,42	2,07R
49	6,0	43,00	59,19	10,01	-16,19	-0,89 X
60	66,0	35,00	32,69	12,78	2,31	0,14 X
61	64,0	69,00	69,48	9,94	-0,48	-0,03 X
74	8,0	70,00	28,32	4,63	41,68	2,05R

88      12,0      80,00   38,66      4,19      41,34      2,03R

R denotes an observation with a large standardized residual.  
 X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



**Tableau 2-28. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\begin{aligned} \text{RSH\_0\_60} = & 40,0 + 0,790 \text{ APL\_0\_30} - 1,23 \text{ APL\_30\_60} + 1,60 \text{ APL\_60\_90} \\ & - 0,276 \text{ Pluvio\_déc} - 0,0767 \text{ Pluvio\_jan} + 0,030 \text{ Pluvio\_fév} \\ & + 0,042 \text{ délai} \end{aligned}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	39,96	17,37	2,30	0,024
APL_0_30	0,7903	0,2142	3,69	0,000
APL_30_60	-1,2288	0,3861	-3,18	0,002
APL_60_90	1,5982	0,4707	3,40	0,001
Pluvio_déc	-0,2756	0,1493	-1,85	0,068
Pluvio_jan	-0,07672	0,08295	-0,92	0,358
Pluvio_fév	0,0298	0,1047	0,28	0,777
délai	0,0417	0,1460	0,29	0,776

S = 20,9265    R-Sq = 25,8%    R-Sq(adj) = 20,0%

Analysis of Variance

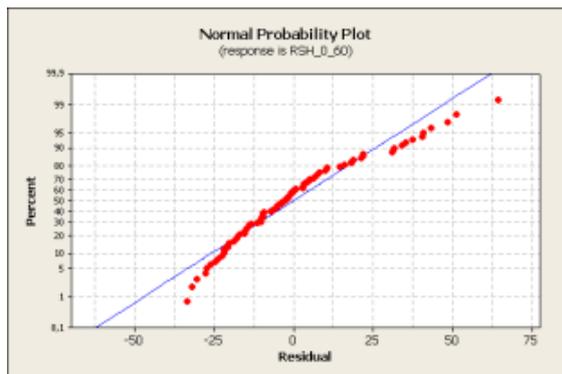
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	13557,7	1936,8	4,42	0,000
Residual Error	89	38974,7	437,9		
Total	96	52532,3			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4420,1
APL_30_60	1	257,9
APL_60_90	1	3117,5
Pluvio_déc	1	5280,4
Pluvio_jan	1	409,9
Pluvio_fév	1	36,0
délai	1	35,7

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	12,0	19,00	26,32	11,01	-7,32	-0,41 X
8	21,0	117,00	52,48	7,12	64,52	3,28R
11	83,0	46,00	76,30	11,13	-30,30	-1,71 X
13	6,0	104,00	55,38	6,20	48,62	2,43R
35	27,0	108,00	56,91	7,49	51,09	2,61R
41	22,0	80,00	36,63	4,86	43,37	2,13R
49	6,0	43,00	58,31	10,51	-15,31	-0,85 X
60	66,0	35,00	32,06	13,02	2,94	0,18 X
74	8,0	70,00	29,05	5,31	40,95	2,02R

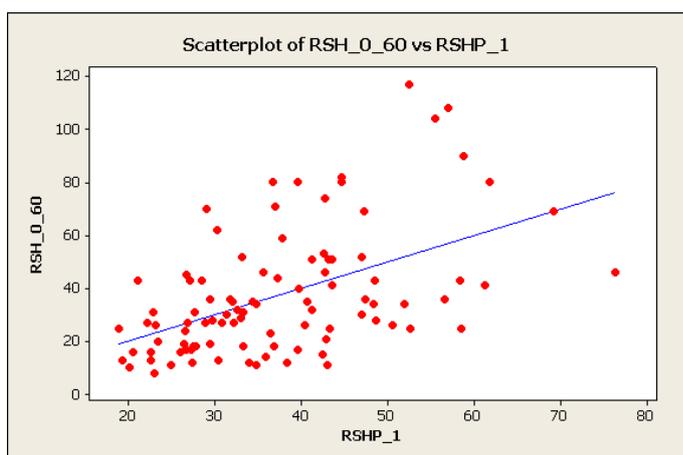
R denotes an observation with a large standardized residual.  
 X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



Etant donné que la prédiction est limitée à la couche 0-60 cm, l'erreur médiane est réduite par rapport à une prédiction sur couche plus importante (0-90 cm) (tableau 2-29).

**Tableau 2-29. Céréales suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err_1	97	0	15,39	1,31	12,91	0,18	5,04	11,39	21,90	64,45



Couramment, entre la récolte de la céréale et le semis de la CIPAN, des engrais de ferme (fumier, lisier, fiente ou compost) sont épandus sur ces parcelles. Cette matière organique va se décomposer et produire du nitrate avec une cinétique dépendant entre autres du type de matière (action lente pour du fumier, action rapide pour du lisier ou des fientes). La distinction entre ces deux types de matière et les parcelles n'ayant pas reçu de matière organique pourrait améliorer la qualité de la prédiction.

Pour les parcelles de céréales ayant reçu du fumier avant le semis de la CIPAN, la relation est significative ( $P = 0.013$ ), le coefficient de corrélation est faible (0.219) (tableau 2-30) et l'erreur médiane de prédiction est de  $13.55 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  (tableau 2-31).

**Tableau 2-30. Céréales suivies d'un apport de fumier et d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_60} = 43,8 + 0,402 \text{ APL}_{0\_30} - 0,679 \text{ APL}_{30\_60} + 1,34 \text{ APL}_{60\_90} - 0,264 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,0117 \text{ pluvio}_{\text{jan}} + 0,120 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} - 0,0664 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	43,78	15,82	2,77	0,007
APL_0_30	0,4023	0,2397	1,68	0,098
APL_30_60	-0,6791	0,4840	-1,40	0,165
APL_60_90	1,3375	0,5291	2,53	0,014
Pluvio_déc	-0,2638	0,1578	-1,67	0,099
pluvio_jan	-0,01167	0,09236	-0,13	0,900
Pluvio_fév	0,1198	0,1119	1,07	0,288
délai	-0,06643	0,09431	-0,70	0,484

S = 20,1987    R-Sq = 21,9%    R-Sq(adj) = 14,1%

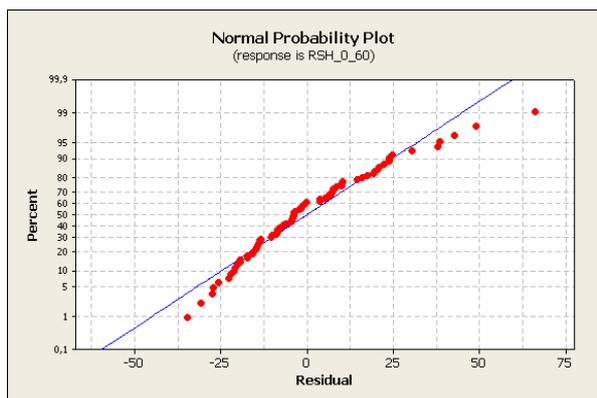
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	7996,1	1142,3	2,80	0,013
Residual Error	70	28559,2	408,0		
Total	77	36555,4			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	3257,7
APL_30_60	1	15,7
APL_60_90	1	1742,5
Pluvio_déc	1	2289,1
pluvio_jan	1	110,7
Pluvio_fév	1	378,1
délai	1	202,4

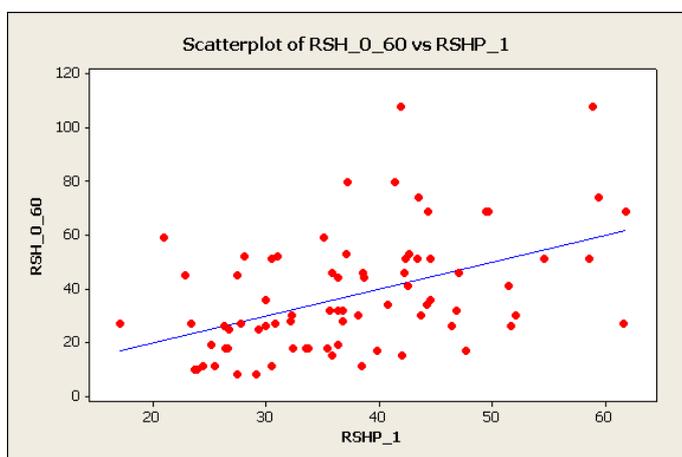
Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
17	28,0	108,00	41,85	3,60	66,15	3,33R
18	27,0	108,00	58,84	8,36	49,16	2,67R
21	11,0	80,00	37,16	5,61	42,84	2,21R
61	96,0	27,00	61,59	12,95	-34,59	-2,23RX



**Tableau 2-31. Céréales suivies d'un apport de fumier et d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err_1	78	14,96	1,36	12,01	0,31	6,13	13,55	20,88	66,11



Pour les parcelles de céréales n'ayant reçu aucun apport de matière organique avant le semis de la CIPAN, la relation est très hautement significative ( $P = 0.000$ ), le coefficient de corrélation est amélioré (0.425) (tableau 2-32) mais l'erreur médiane de prédiction est plus importante que précédemment :  $16.63 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  (tableau 2-33).

**Tableau 2-32. Céréales suivies d'une CIPAN sans apport d'engrais de ferme. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is  

$$\text{RSH}_{0\_60} = 1,7 + 2,14 \text{ APL}_{0\_30} - 2,68 \text{ APL}_{30\_60} + 1,57 \text{ APL}_{60\_90} - 0,973 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} + 0,356 \text{ pluvio}_{\text{jan}} - 0,089 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 0,669 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,67	24,23	0,07	0,945
APL_0_30	2,1394	0,4330	4,94	0,000
APL_30_60	-2,6835	0,6068	-4,42	0,000
APL_60_90	1,5731	0,6313	2,49	0,015
Pluvio_déc	-0,9734	0,3788	-2,57	0,012
pluvio_jan	0,3559	0,2651	1,34	0,184
Pluvio_fév	-0,0890	0,1884	-0,47	0,638
délai	0,6692	0,1452	4,61	0,000

S = 30,0545    R-Sq = 42,5%    R-Sq(adj) = 36,6%

Analysis of Variance

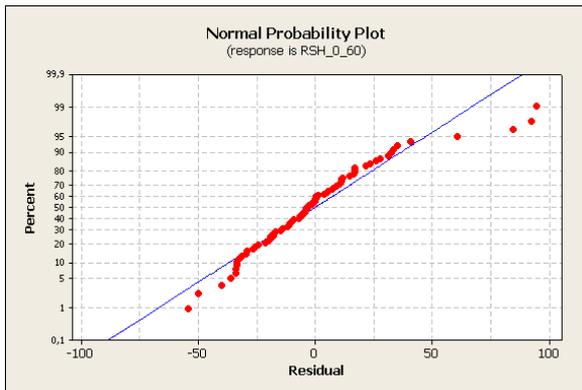
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	45484,5	6497,8	7,19	0,000
Residual Error	68	61422,5	903,3		
Total	75	106907,0			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	7578,2
APL_30_60	1	6995,2
APL_60_90	1	490,2
Pluvio_déc	1	7335,2
pluvio_jan	1	2373,6
Pluvio_fév	1	1533,8
délai	1	19178,2

Unusual Observations

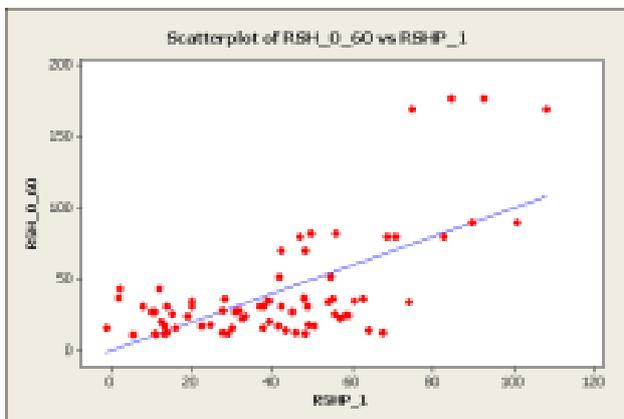
Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	8,0	177,00	92,61	11,42	84,39	3,04R
2	5,0	177,00	84,44	9,72	92,56	3,25R
49	13,0	35,00	38,82	18,52	-3,82	-0,16 X
67	28,0	169,00	108,10	12,90	60,90	2,24R
68	23,0	169,00	74,55	8,15	94,45	3,26R
72	49,0	90,00	100,55	17,74	-10,55	-0,43 X

R denotes an observation with a large standardized residual.  
 X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



**Tableau 2-33. Céréales suivies d'une CIPAN sans apport d'engrais de ferme. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai /évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err_1	76	20,63	2,26	19,69	0,07	6,77	16,63	30,59	94,36



Pour les parcelles de céréales ayant reçu un apport de matière organique à action rapide avant le semis de la CIPAN, l'analyse de la variance renseigne une absence de relation (P=0.649) entre le RSH et les facteurs explicatifs attendus (APL, pluviométrie, délai entre les mesures) (tableau 2-34).

**Tableau 2-34. Céréales suivies d'un apport d'engrais de ferme à action rapide et d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_60} = 70,7 + 0,019 \text{ APL}_{0\_30} - 0,107 \text{ APL}_{30\_60} - 0,015 \text{ APL}_{60\_90} - 0,187 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,107 \text{ pluvio}_{\text{jan}} - 0,116 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} - 0,028 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	70,70	28,39	2,49	0,017
APL_0_30	0,0192	0,2160	0,09	0,930
APL_30_60	-0,1073	0,5160	-0,21	0,836
APL_60_90	-0,0145	0,6819	-0,02	0,983
Pluvio_déc	-0,1866	0,2813	-0,66	0,511
pluvio_jan	-0,1069	0,1148	-0,93	0,358
Pluvio_fév	-0,1156	0,2958	-0,39	0,698
délai	-0,0284	0,2048	-0,14	0,890

S = 27,7081 R-Sq = 11,8% R-Sq(adj) = 0,0%

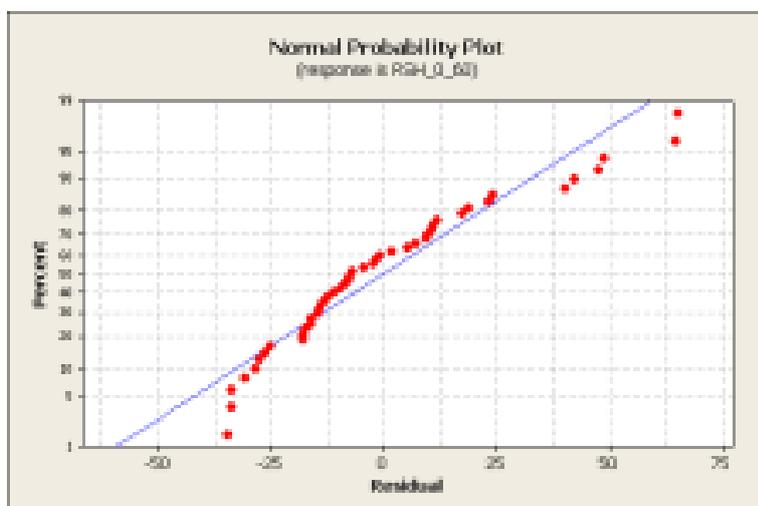
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	3911,6	558,8	0,73	0,649
Residual Error	38	29174,1	767,7		
Total	45	33085,7			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	31,6
APL_30_60	1	362,8
APL_60_90	1	3,1
Pluvio_déc	1	2752,8
pluvio_jan	1	639,7
Pluvio_fév	1	106,9
délai	1	14,8

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
5	47	117,00	51,74	10,42	65,26	2,54R
6	21	117,00	52,33	8,69	64,67	2,46R
15	141	35,00	33,22	23,22	1,78	0,12 X



#### 4.4.4 Céréales non suivies d'une CIPAN

##### 1 Préviation du RSH 0-90 cm

Il n'y a pas de relation significative ( $P = 0.273$ ) entre le RSH et les facteurs 'prédicatifs' APL, pluviométrie mensuelle (tableau 2-35).

**Tableau 2-35. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle.**

The regression equation is  

$$\text{RSH}_{0\_90} = 49,1 + 0,440 \text{ APL}_{0\_30} + 0,774 \text{ APL}_{30\_60} - 1,14 \text{ APL}_{60\_90} - 0,154 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} + 0,019 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,179 \text{ Pluvio}_{\text{fév}}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	49,10	26,06	1,88	0,068
APL_0_30	0,4399	0,8487	0,52	0,608
APL_30_60	0,7743	0,6724	1,15	0,258
APL_60_90	-1,1404	0,7842	-1,45	0,155
Pluvio_déc	-0,1544	0,3179	-0,49	0,630
Pluvio_jan	0,0194	0,1945	0,10	0,921
Pluvio_fév	-0,1793	0,3456	-0,52	0,607

S = 36,4292    R-Sq = 19,0%    R-Sq(adj) = 4,7%

Analysis of Variance

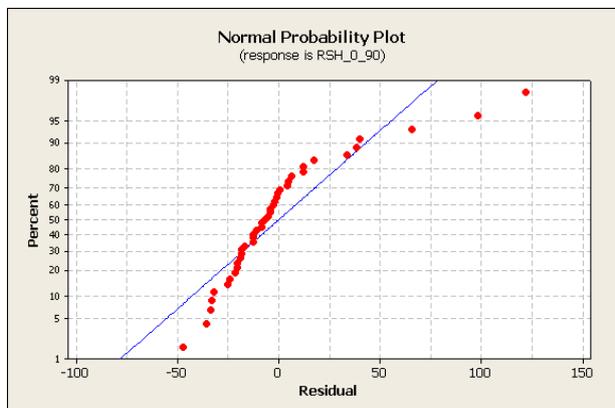
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	10553	1759	1,33	0,273
Residual Error	34	45121	1327		
Total	40	55674			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	5330
APL_30_60	1	846
APL_60_90	1	3398
Pluvio_déc	1	550
Pluvio_jan	1	72
Pluvio_fév	1	357

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	10,0	155,00	33,23	18,90	121,77	3,91R
8	24,0	154,00	55,76	14,14	98,24	2,93R
14	27,0	146,00	80,27	21,76	65,73	2,25R

R denotes an observation with large standardized residual.



En enlevant deux valeurs aberrantes, la relation devient hautement significative ( $P = 0.002$ ) et les facteurs APL et pluviométrie permettent d'expliquer 46.1% du RSH (tableau 2-36). L'erreur médiane de prédiction est de 10.33 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-37).

**Tableau 2-36. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 22,4 + 0,555 \text{ APL}_{0\_30} + 1,06 \text{ APL}_{30\_60} - 0,341 \text{ APL}_{60\_90} + 0,136 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,294 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,091 \text{ Pluvio}_{\text{fév}}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	22,44	15,72	1,43	0,163
APL_0_30	0,5554	0,5257	1,06	0,299
APL_30_60	1,0611	0,4015	2,64	0,013
APL_60_90	-0,3412	0,4711	-0,72	0,474
Pluvio_déc	0,1363	0,1924	0,71	0,484
Pluvio_jan	-0,2943	0,1316	-2,24	0,032
Pluvio_fév	-0,0905	0,2045	-0,44	0,661

S = 21,4078    R-Sq = 46,1%    R-Sq(adj) = 36,0%

Analysis of Variance

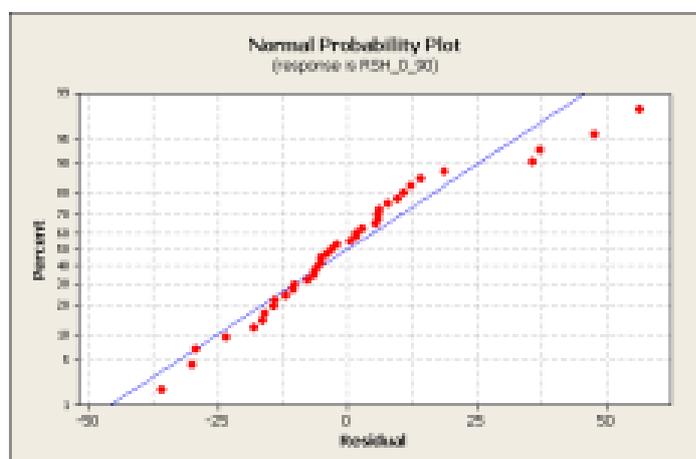
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	12531,6	2088,6	4,56	0,002
Residual Error	32	14665,5	458,3		
Total	38	27197,1			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4422,5
APL_30_60	1	4253,7
APL_60_90	1	1188,7
Pluvio_déc	1	372,8
Pluvio_jan	1	2204,1
Pluvio_fév	1	89,9

Unusual Observations

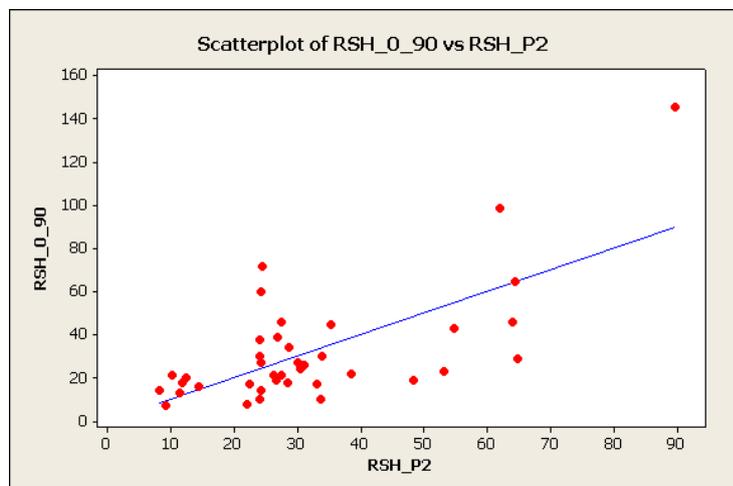
Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	49,0	29,00	64,92	12,88	-35,92	-2,10R
8	35,0	99,00	61,97	10,77	37,03	2,00R
11	7,0	72,00	24,50	6,48	47,50	2,33R
12	27,0	146,00	89,73	12,92	56,27	3,30R

R denotes an observation with a large standardized residual.



**Tableau 2-37. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle/évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err2	39	0	14,22	2,14	13,35	0,63	5,31	10,33	18,05	56,42



L'ajout du facteur 'délai' dans l'analyse de la variance n'apporte guère d'amélioration dans la relation (tableau 2-38) ni dans l'erreur médiane de prédiction (tableau 2-39).

**Tableau 2-38. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is  

$$\text{RSH\_0\_90} = 13,0 + 0,424 \text{ APL\_0\_30} + 1,07 \text{ APL\_30\_60} - 0,341 \text{ APL\_60\_90} \\ + 0,135 \text{ Pluvio\_déc} - 0,278 \text{ Pluvio\_jan} - 0,059 \text{ Pluvio\_fév} \\ + 0,103 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	13,02	27,71	0,47	0,642
APL_0_30	0,4241	0,6194	0,68	0,499
APL_30_60	1,0725	0,4077	2,63	0,013
APL_60_90	-0,3408	0,4774	-0,71	0,481
Pluvio_déc	0,1353	0,1949	0,69	0,493
Pluvio_jan	-0,2775	0,1393	-1,99	0,055
Pluvio_fév	-0,0591	0,2205	-0,27	0,790
délai	0,1027	0,2472	0,42	0,681

S = 21,6901    R-Sq = 46,4%    R-Sq(adj) = 34,3%

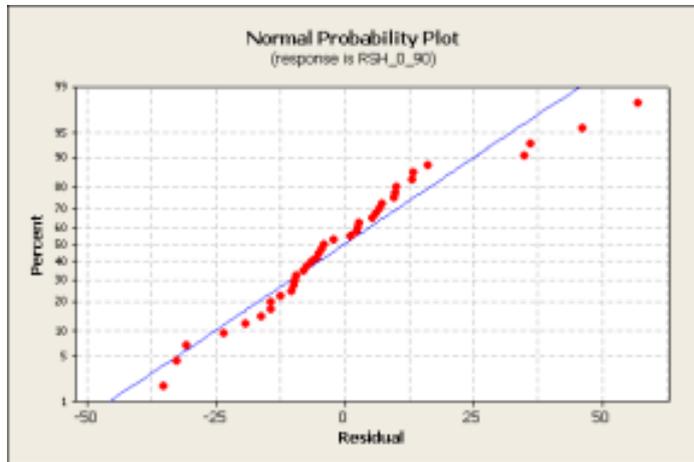
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	12612,8	1801,8	3,83	0,004
Residual Error	31	14584,3	470,5		
Total	38	27197,1			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4422,5
APL_30_60	1	4253,7
APL_60_90	1	1188,7
Pluvio_déc	1	372,8
Pluvio_jan	1	2204,1
Pluvio_fév	1	89,9
délai	1	81,2

Unusual Observations

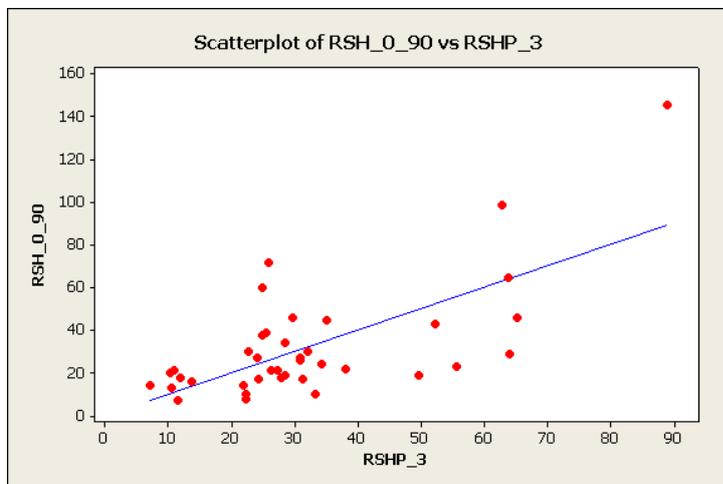
Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	49,0	29,00	64,18	13,17	-35,18	-2,04R
11	7,0	72,00	25,96	7,44	46,04	2,26R
12	27,0	146,00	89,13	13,17	56,87	3,30R

R denotes an observation with a large standardized residual.



**Tableau 2-39. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err3	39	0	14,37	2,10	13,11	1,27	5,45	9,82	16,38	57,01



En prenant en compte tout le jeu de données APL (oct-déc) et en retirant quatre valeurs aberrantes, ni la relation, ni la qualité de la prédiction ne sont améliorées.

## 2 Préviation du RSH 0-60 cm

Dans diverses situations, l'établissement d'un conseil de fertilisation ne s'appuie que sur la connaissance du reliquat azoté dans la couche 0-60 cm. C'est ainsi le cas pour des cultures à enracinement peu profond (légumes, pomme de terre), des semis tardif (maïs) ou des sols peu profonds.

Dans ces contextes, la qualité de la prédiction jusqu'à 60 cm est évaluée en tenant compte des pluviométries mensuelles (décembre à février) et du délai entre les deux observations (APL et RSH) (tableau 2-40). L'analyse de variance indique que la relation n'est pas significative (P = 0.089).

**Tableau 2-40. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_60} = -29,7 - 0,300 \text{ APL}_{0\_30} + 0,130 \text{ APL}_{30\_60} - 0,824 \text{ APL}_{60\_90} - 0,128 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} + 0,132 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} + 0,089 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 0,746 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-29,68	34,25	-0,87	0,393
APL_0_30	-0,3002	0,7320	-0,41	0,684
APL_30_60	0,1302	0,5131	0,25	0,801
APL_60_90	-0,8242	0,5983	-1,38	0,178
Pluvio_déc	-0,1282	0,2424	-0,53	0,600
Pluvio_jan	0,1320	0,1495	0,88	0,383
Pluvio_fév	0,0890	0,2782	0,32	0,751
délai	0,7460	0,2870	2,60	0,014

S = 27,6857    R-Sq = 29,5%    R-Sq(adj) = 14,6%

Analysis of Variance

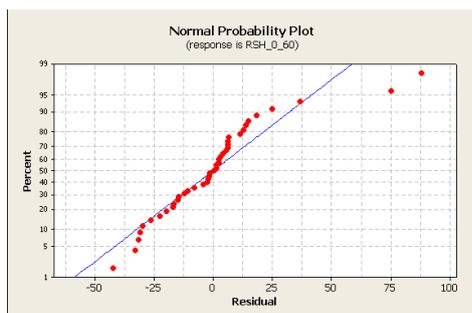
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	10592,5	1513,2	1,97	0,089
Residual Error	33	25294,4	766,5		
Total	40	35887,0			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	2171,2
APL_30_60	1	209,9
APL_60_90	1	2102,8
Pluvio_déc	1	342,8
Pluvio_jan	1	336,3
Pluvio_fév	1	249,6
délai	1	5179,8

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	10,0	143,00	54,94	16,84	88,06	4,01R
8	24,0	133,00	57,77	11,91	75,23	3,01R

R denotes an observation with a large standardized residual.



En enlevant deux valeurs aberrantes, la relation devient hautement significative ( $P = 0.008$ ). Les facteurs permettent d'expliquer 43.7% du RSH (tableau 2-41) et l'erreur médiane de prédiction n'est que de 4.96 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-42).

**Tableau 2-41. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai (sans valeurs aberrantes).**

The regression equation is  
 $RSH\_0\_60 = 10,9 + 0,601 APL\_0\_30 + 0,279 APL\_30\_60 - 0,237 APL\_60\_90$   
 $+ 0,087 Pluvio\_déc - 0,198 Pluvio\_jan - 0,044 Pluvio\_fév$   
 $+ 0,086 \text{ délai}$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	10,92	16,75	0,65	0,519
APL_0_30	0,6006	0,3745	1,60	0,119
APL_30_60	0,2794	0,2465	1,13	0,266
APL_60_90	-0,2374	0,2886	-0,82	0,417
Pluvio_déc	0,0874	0,1178	0,74	0,464
Pluvio_jan	-0,19809	0,08423	-2,35	0,025
Pluvio_fév	-0,0437	0,1333	-0,33	0,745
délai	0,0862	0,1494	0,58	0,568

S = 13,1118    R-Sq = 43,7%    R-Sq(adj) = 31,0%

Analysis of Variance

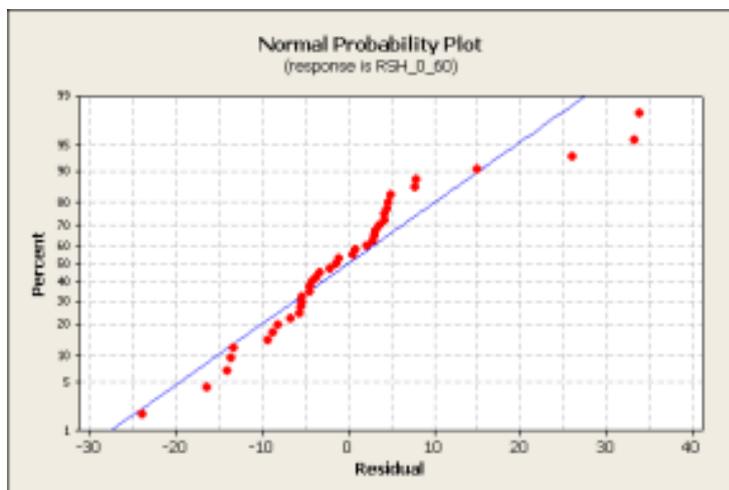
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	4144,4	592,1	3,44	0,008
Residual Error	31	5329,5	171,9		
Total	38	9473,9			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1678,6
APL_30_60	1	368,0
APL_60_90	1	610,1
Pluvio_déc	1	239,3
Pluvio_jan	1	1137,4
Pluvio_fév	1	53,9
délai	1	57,3

Unusual Observations

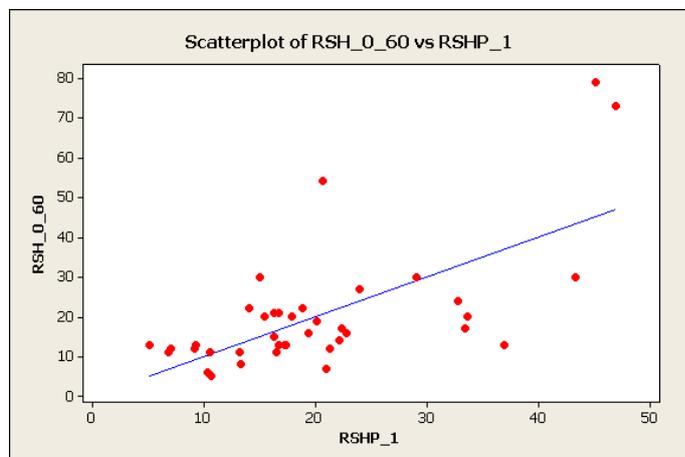
Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
8	35,0	79,00	45,18	6,72	33,82	3,00R
9	23,0	13,00	36,98	5,69	-23,98	-2,03R
11	7,0	54,00	20,68	4,50	33,32	2,71R
12	27,0	73,00	46,94	7,96	26,06	2,50R

R denotes an observation with a large standardized residual.



**Tableau 2-42. Céréales non suivies d'une CIPAN. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction (sans valeurs aberrantes).**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	39	0	8,31	1,33	8,33	0,48	3,32	4,96	9,31	33,88



En ajoutant le jeu de données APL d'octobre, ni la relation, ni la qualité de prédiction ne sont améliorées.

## 4.4.5 Maïs

### 1 Préviation du RSH 0-90 cm

Il existe une relation hautement significative entre le RSH et l'APL ( $P = 0.001$ ). Cependant, ces facteurs prédictifs ne permettent d'expliquer que 26.4% du RSH (tableau 2-43).

**Tableau 2-43. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 34,1 + 0,651 \text{ APL}_{0\_30} + 0,056 \text{ APL}_{30\_60} + 0,067 \text{ APL}_{60\_90}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	34,071	9,252	3,68	0,001
APL_0_30	0,6509	0,1794	3,63	0,001
APL_30_60	0,0556	0,3480	0,16	0,874
APL_60_90	0,0674	0,4067	0,17	0,869

S = 27,3689    R-Sq = 26,4%    R-Sq(adj) = 21,9%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	13405,5	4468,5	5,97	0,001
Residual Error	50	37452,9	749,1		
Total	53	50858,4			

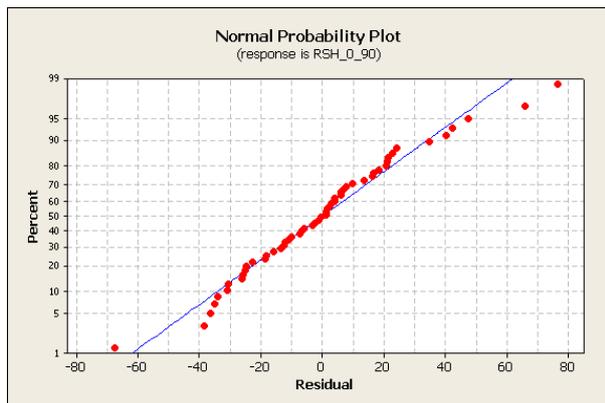
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	13321,5
APL_30_60	1	63,4
APL_60_90	1	20,6

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	72	19,00	86,65	9,29	-67,65	-2,63R
6	153	187,00	139,44	22,27	47,56	2,99RX
7	43	90,00	68,54	15,52	21,46	0,95 X
12	23	130,00	53,59	7,20	76,41	2,89R
15	16	40,00	51,00	13,07	-11,00	-0,46 X
48	10	107,00	40,92	8,10	66,08	2,53R

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



En y ajoutant un facteur de pluviométrie (somme des pluviométries mensuelles de décembre à février), la corrélation est légèrement améliorée ( $r^2 = 0.311$ ) (tableau 2-44).

**Tableau 2-44. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL - pluviométrie.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 59,6 + 0,677 \text{ APL}_{0\_30} + 0,010 \text{ APL}_{30\_60} - 0,062 \text{ APL}_{60\_90} - 0,133 \text{ pluvio\_djf}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	59,65	16,59	3,59	0,001
APL_0_30	0,6774	0,1759	3,85	0,000
APL_30_60	0,0095	0,3410	0,03	0,978
APL_60_90	-0,0617	0,4035	-0,15	0,879
pluvio_djf	-0,13318	0,07246	-1,84	0,072

S = 26,7405    R-Sq = 31,1%    R-Sq(adj) = 25,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	15820,8	3955,2	5,53	0,001
Residual Error	49	35037,6	715,1		
Total	53	50858,4			

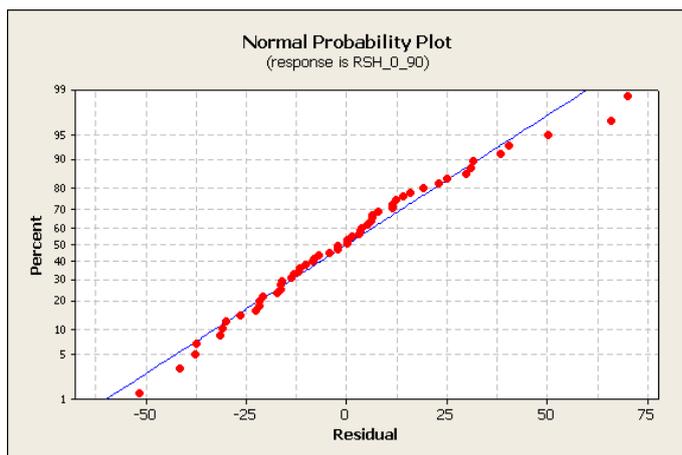
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	13321,5
APL_30_60	1	63,4
APL_60_90	1	20,6
pluvio_djf	1	2415,3

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	72	19,00	70,63	12,59	-51,63	-2,19R
6	153	187,00	148,51	22,31	38,49	2,61RX
7	43	90,00	76,03	15,70	13,97	0,65 X
12	23	130,00	60,04	7,87	69,96	2,74R
48	10	107,00	41,10	7,91	65,90	2,58R

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



En discrétisant la pluviométrie hivernale en trois pluviométrie mensuelle (décembre à février), la corrélation est encore légèrement améliorée ( $r^2 = 0.331$ ) (tableau 2-45). L'erreur médiane de prédiction est de 14.67 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-46).

**Tableau 2-45. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle.**

The regression equation is

$$\text{RSH\_0\_90} = 55,2 + 0,706 \text{ APL\_0\_30} + 0,010 \text{ APL\_30\_60} - 0,276 \text{ Pluvio\_jan} - 0,215 \text{ Pluvio\_fév} + 0,142 \text{ Pluvio\_déc}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	55,20	18,35	3,01	0,004
APL_0_30	0,7063	0,1688	4,18	0,000
APL_30_60	0,0097	0,2948	0,03	0,974
Pluvio_jan	-0,2761	0,1461	-1,89	0,065
Pluvio_fév	-0,2148	0,1602	-1,34	0,186
Pluvio_déc	0,1417	0,2413	0,59	0,560

S = 26,6204    R-Sq = 33,1%    R-Sq(adj) = 26,2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	16843,3	3368,7	4,75	0,001
Residual Error	48	34015,1	708,6		
Total	53	50858,4			

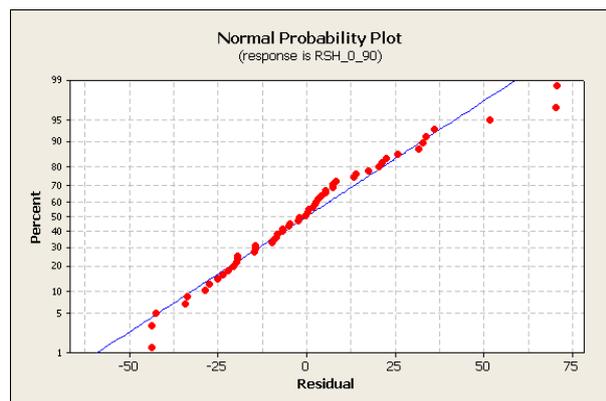
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	13321,5
APL_30_60	1	63,4
Pluvio_jan	1	2048,0
Pluvio_fév	1	1165,9
Pluvio_déc	1	244,5

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
6	153	187,00	153,32	21,81	33,68	2,21RX
12	23	130,00	59,45	8,05	70,55	2,78R
23	17	88,00	36,36	7,39	51,64	2,02R
48	10	107,00	36,57	9,37	70,43	2,83R

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



**Tableau 2-46. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle / évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err_1	54	0	18,94	2,26	16,62	0,11	5,42	14,67	27,80	70,55

En ajoutant comme facteur prédictif le délai entre les deux observations (APL et RSH), on n'améliore que très peu la corrélation ( $r^2 = 0.386$ ) (tableau 2-47) et l'erreur médiane de prédiction ( $14.10 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ) (tableau 2-48).

**Tableau 2-47. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 81,4 + 0,720 \text{ APL}_{0\_30} + 0,217 \text{ APL}_{30\_60} - 0,232 \text{ APL}_{60\_90} + 0,156 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,301 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,254 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} - 0,294 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	81,45	22,18	3,67	0,001
APL_0_30	0,7199	0,1795	4,01	0,000
APL_30_60	0,2172	0,3451	0,63	0,532
APL_60_90	-0,2318	0,4211	-0,55	0,585
Pluvio_déc	0,1558	0,2406	0,65	0,520
Pluvio_jan	-0,3009	0,1485	-2,03	0,049
Pluvio_fév	-0,2539	0,1685	-1,51	0,139
délai	-0,2944	0,1513	-1,95	0,058

S = 26,0585    R-Sq = 38,6%    R-Sq(adj) = 29,2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	19622,3	2803,2	4,13	0,001
Residual Error	46	31236,1	679,0		
Total	53	50858,4			

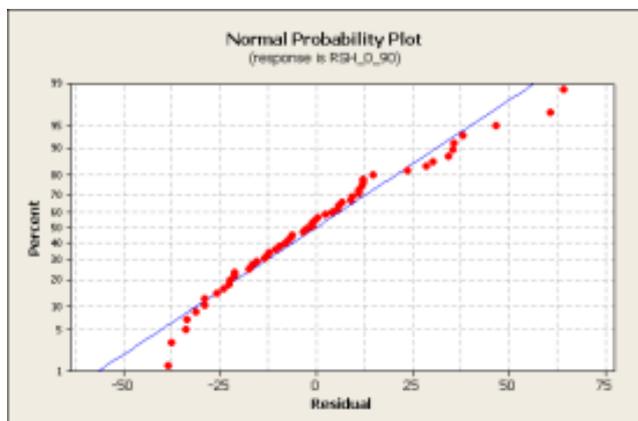
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	13321,5
APL_30_60	1	63,4
APL_60_90	1	20,6
Pluvio_déc	1	525,5
Pluvio_jan	1	1638,3
Pluvio_fév	1	1482,2
délai	1	2570,7

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
6	153	187,00	149,00	21,86	38,00	2,68RX
12	23	130,00	65,77	8,48	64,23	2,61R
48	10	107,00	46,39	10,43	60,61	2,54R

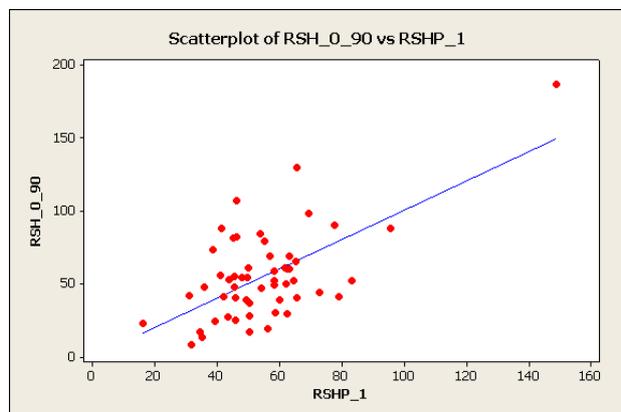
R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



**Tableau 2-48. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	54	0	19,00	2,03	14,89	0,26	7,11	14,10	29,24	64,27



Comme précédemment, la prise en compte des résultats APL d'octobre n'améliore pas la corrélation entre le RSH et les facteurs prédictifs ( $r^2 = 0.218$ ) (tableau 2-49) ni l'erreur médiane de prédiction ( $17.79 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ) (tableau 2-50).

**Tableau 2-49. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0-90} = 83,2 + 0,352 \text{ APL}_{0\_30} + 0,322 \text{ APL}_{30\_60} - 0,457 \text{ APL}_{60\_90} + 0,018 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,218 \text{ pluvio}_{\text{jan}} - 0,102 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} - 0,220 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	83,23	17,04	4,88	0,000
APL_0_30	0,35242	0,09384	3,76	0,000
APL_30_60	0,3222	0,2058	1,57	0,121
APL_60_90	-0,4570	0,3306	-1,38	0,170
Pluvio_déc	0,0179	0,1745	0,10	0,918
pluvio_jan	-0,2181	0,1108	-1,97	0,052
Pluvio_fév	-0,1016	0,1295	-0,78	0,434
délai	-0,22039	0,09221	-2,39	0,019

S = 28,5898    R-Sq = 21,8%    R-Sq(adj) = 16,3%

Analysis of Variance

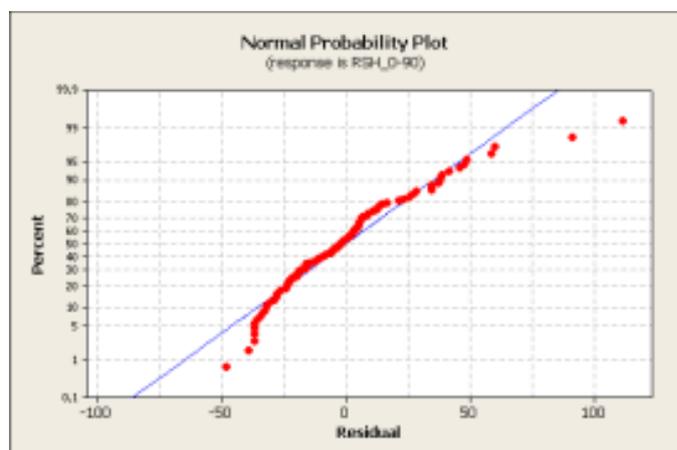
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	22600,8	3228,7	3,95	0,001
Residual Error	99	80920,3	817,4		
Total	106	103521,1			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	11608,5
APL_30_60	1	1320,3
APL_60_90	1	193,7
Pluvio_déc	1	2109,4
pluvio_jan	1	2293,7
Pluvio_fév	1	406,2
délai	1	4669,0

Unusual Observations

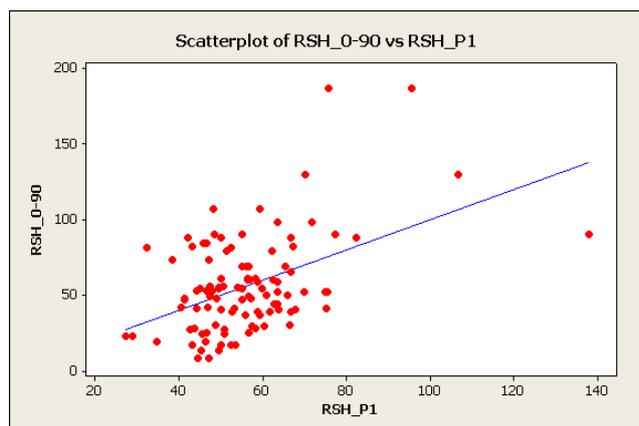
Obs	APL_0_30	RSH_0-90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
10	293	90,00	138,02	22,69	-48,02	-2,76RX
11	58	187,00	75,68	6,34	111,32	3,99R
18	153	187,00	95,70	13,50	91,30	3,62R

21	105	130,00	106,91	18,07	23,09	1,04 X
30	23	130,00	70,23	6,18	59,77	2,14R
85	5	107,00	48,18	6,46	58,82	2,11R



**Tableau 2-50. Maïs. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	107	20,72	1,76	18,16	0,13	5,76	17,79	31,32	111,35



## 2 Préviation du RSH 0-60 cm

Dans diverses situations, l'établissement d'un conseil de fertilisation ne s'appuie que sur la connaissance du reliquat azoté dans la couche 0-60 cm. C'est ainsi le cas pour des cultures à enracinement peu profond (légumes, pomme de terre), des semis tardif (maïs) ou des sols peu profonds.

Dans ces contextes, la qualité de la prédiction jusqu'à 60 cm est évaluée en tenant compte des pluviométries mensuelles (décembre à février) et du délai entre les deux observations (APL et RSH) (tableau 2-51). La corrélation n'est pas très élevée ( $r^2 = 0,275$ ) et l'erreur médiane de prédiction est de  $10,70 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  (tableau 2-52).

**Tableau 2-51. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc)– pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\begin{aligned} \text{RSH}_{0\_60} = & 35,5 + 0,5181 \text{ APL}_{0\_30} - 0,097 \text{ APL}_{30\_60} - 0,111 \text{ APL}_{60\_90} \\ & + 0,115 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,109 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,083 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} \\ & - 0,0609 \text{ délai} \end{aligned}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	35,54	13,16	2,70	0,009
APL_0_30	0,5181	0,1067	4,86	0,000
APL_30_60	-0,0968	0,1418	-0,68	0,497
APL_60_90	-0,1112	0,1530	-0,73	0,470
Pluvio_déc	0,1148	0,1306	0,88	0,382
Pluvio_jan	-0,10907	0,06144	-1,78	0,080
Pluvio_fév	-0,0830	0,1012	-0,82	0,415
délai	-0,06091	0,09719	-0,63	0,533

S = 17,7429    R-Sq = 27,5%    R-Sq(adj) = 20,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	8607,6	1229,7	3,91	0,001
Residual Error	72	22666,3	314,8		
Total	79	31274,0			

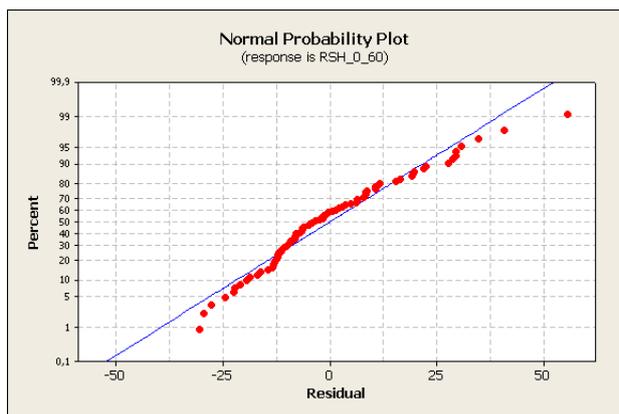
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	6564,2
APL_30_60	1	895,4
APL_60_90	1	0,2
Pluvio_déc	1	21,6
Pluvio_jan	1	812,6
Pluvio_fév	1	190,0
délai	1	123,7

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
7	9	54,00	19,14	5,63	34,86	2,07R
16	153	113,00	97,49	13,34	15,51	1,33 X
24	71	51,00	42,85	10,51	8,15	0,57 X
33	31	21,00	29,65	10,11	-8,65	-0,59 X
43	37	81,00	40,08	5,12	40,92	2,41R
74	10	86,00	30,33	5,97	55,67	3,33R

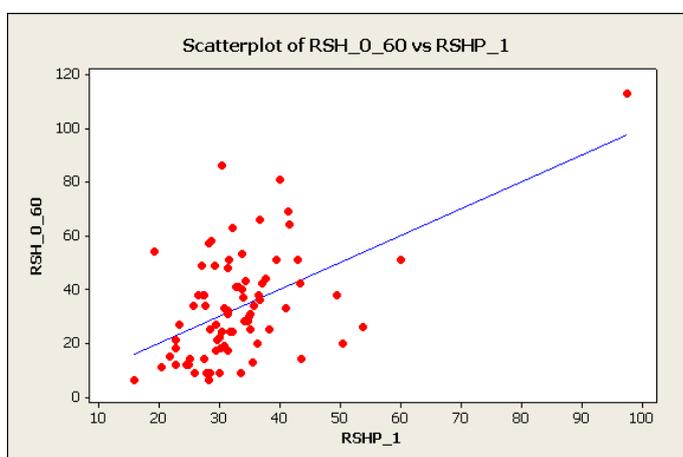
R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



**Tableau 2-52. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l’erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	80	0	13,34	1,15	10,32	0,33	6,33	10,70	19,36	55,70



En enlevant une valeur aberrante (différence trop importante entre une valeur de décembre et une valeur de janvier), la corrélation (tableau 2-53) et l’erreur médiane de prédiction sont légèrement améliorées (tableau 2-54).

**Tableau 2-53. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai (sans valeur aberrante).**

The regression equation is  

$$\text{RSH\_0\_60} = 29,9 + 0,528 \text{ APL\_0\_30} - 0,069 \text{ APL\_30\_60} - 0,091 \text{ APL\_60\_90} \\ + 0,137 \text{ Pluvio\_déc} - 0,117 \text{ Pluvio\_jan} - 0,140 \text{ Pluvio\_fév} \\ + 0,0039 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	29,93	12,29	2,44	0,017
APL_0_30	0,52818	0,09883	5,34	0,000
APL_30_60	-0,0691	0,1316	-0,53	0,601
APL_60_90	-0,0907	0,1418	-0,64	0,524
Pluvio_déc	0,1373	0,1211	1,13	0,261
Pluvio_jan	-0,11714	0,05695	-2,06	0,043
Pluvio_fév	-0,14028	0,09503	-1,48	0,144
délai	0,00394	0,09179	0,04	0,966

S = 16,4324    R-Sq = 32,6%    R-Sq(adj) = 26,0%

Analysis of Variance

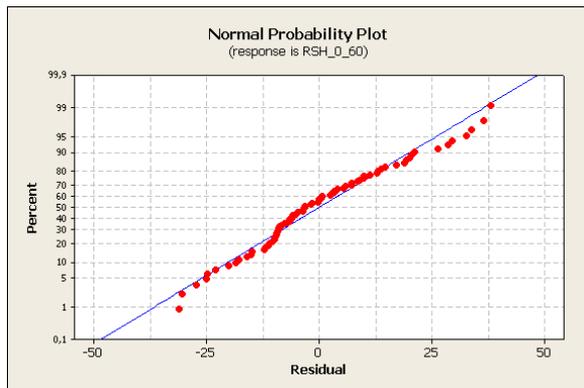
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	9281,9	1326,0	4,91	0,000
Residual Error	71	19171,6	270,0		
Total	78	28453,5			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	7455,3
APL_30_60	1	452,8
APL_60_90	1	10,1
Pluvio_déc	1	1,9
Pluvio_jan	1	770,7
Pluvio_fév	1	590,5
délai	1	0,5

Unusual Observations

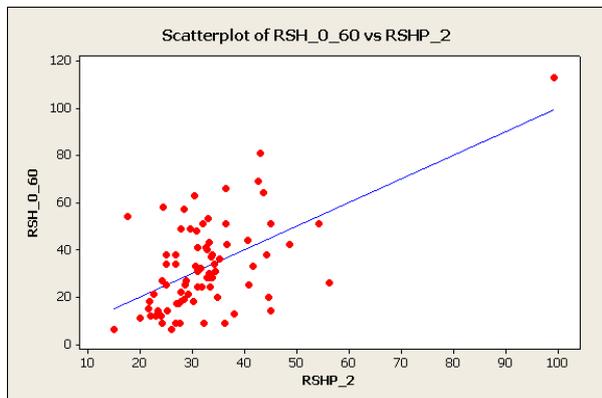
Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
7	9	54,00	17,60	5,23	36,40	2,34R
10	72	14,00	44,97	5,87	-30,97	-2,02R
16	153	113,00	99,24	12,36	13,76	1,27 X
22	23	63,00	30,37	4,18	32,63	2,05R
24	71	51,00	45,08	9,75	5,92	0,45 X
33	31	21,00	29,23	9,36	-8,23	-0,61 X
43	37	81,00	43,02	4,81	37,98	2,42R
48	17	58,00	24,30	4,36	33,70	2,13R
63	60	26,00	56,32	6,75	-30,32	-2,02R

R denotes an observation with a large standardized residual.  
 X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



**Tableau 2-54. Mais. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction (sans valeur aberrante).**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err2	79	0	12,37	1,07	9,53	0,01	5,40	9,76	18,53	38,03



Comme précédemment, la prise en compte des résultats APL d'octobre n'améliore pas la corrélation entre le RSH et les facteurs prédictifs ( $r^2= 0.081$ ) (tableau 2-55) ni l'erreur médiane de prédiction ( $13.19 \text{ kg N-NO}_3\text{-ha}^{-1}$ ) (tableau 2-56).

**Tableau 2-55. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH\_0\_60} = 34,7 + 0,175 \text{ APL\_0\_30} - 0,0379 \text{ APL\_30\_60} + 0,013 \text{ APL\_60\_90} \\ + 0,0480 \text{ Pluvio\_déc} - 0,0730 \text{ pluvio\_jan} + 0,0036 \text{ Pluvio\_fév} \\ - 0,0410 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	34,71	10,28	3,38	0,001
APL_0_30	0,17512	0,05928	2,95	0,004
APL_30_60	-0,03793	0,09992	-0,38	0,705
APL_60_90	0,0131	0,1340	0,10	0,922
Pluvio_déc	0,04800	0,09823	0,49	0,626
pluvio_jan	-0,07298	0,04542	-1,61	0,110
Pluvio_fév	0,00365	0,08059	0,05	0,964
délai	-0,04099	0,05856	-0,70	0,485

S = 19,6962 R-Sq = 8,1% R-Sq(adj) = 3,8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	5164,2	737,7	1,90	0,073
Residual Error	151	58579,1	387,9		
Total	158	63743,4			

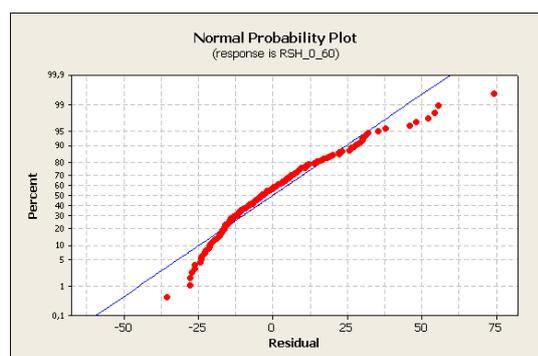
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	3455,6
APL_30_60	1	45,2
APL_60_90	1	219,4
Pluvio_déc	1	167,5
pluvio_jan	1	1083,6
Pluvio_fév	1	2,8
délai	1	190,1

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
30	293	44,00	79,65	14,78	-35,65	-2,74RX
31	58	113,00	38,68	3,72	74,32	3,84R
38	153	113,00	57,42	8,05	55,58	3,09RX
41	105	63,00	44,60	9,09	18,40	1,05 X
53	71	51,00	42,81	9,41	8,19	0,47 X
81	31	21,00	35,73	9,26	-14,73	-0,85 X
82	29	81,00	32,93	4,06	48,07	2,49R
88	37	81,00	34,95	3,09	46,05	2,37R
137	5	86,00	31,56	3,95	54,44	2,82R
144	10	86,00	33,90	5,06	52,10	2,74R

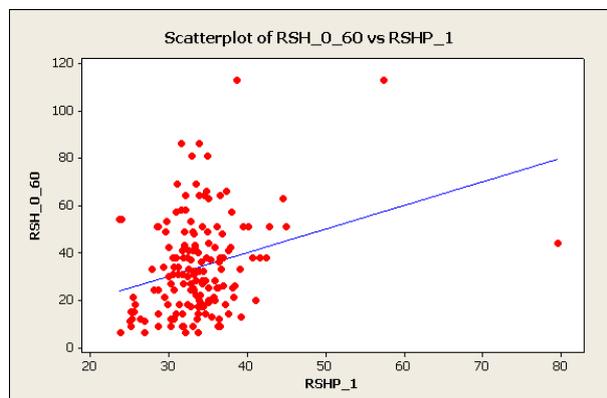
R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



**Tableau 2-56. Maïs. Régression RSH 60 cm – APL (oct & déc) – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	159	14,989	0,954	12,027	0,021	6,073	13,198	20,925	74,341



En enlevant une valeur aberrante, ni la corrélation ni la qualité de la prédiction ne sont améliorées.

## 4.4.6 Pomme de terre

### 1 Prévision du RSH 0-90 cm

Il n'existe pas de relation significative entre l'APL (mesuré début décembre) et le RSH ( $p = 0.309$ ) (tableau 2-57).

**Tableau 2-57. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 49,5 + 0,217 \text{ APL}_{0\_30} + 0,355 \text{ APL}_{30\_60} + 0,03 \text{ APL}_{60\_90}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	49,47	24,70	2,00	0,062
APL_0_30	0,2168	0,2072	1,05	0,311
APL_30_60	0,3550	0,3679	0,97	0,349
APL_60_90	0,026	1,328	0,02	0,984

S = 26,6370    R-Sq = 19,6%    R-Sq(adj) = 4,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	2767,6	922,5	1,30	0,309
Residual Error	16	11352,4	709,5		
Total	19	14120,0			

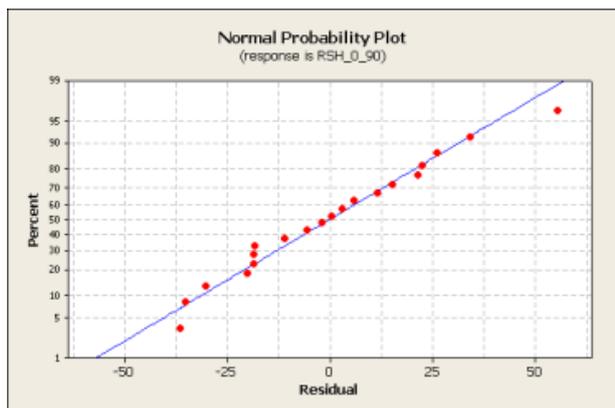
Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1868,4
APL_30_60	1	898,9
APL_60_90	1	0,3

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
5	76	141,00	85,52	10,92	55,48	2,28R
16	64	128,00	101,93	21,84	26,07	1,71 X

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



En ajoutant la pluviométrie hivernale (pluviométrie de décembre à février), la relation devient hautement significative ( $P = 0.008$ ) (tableau 2-58). Les facteurs APL et pluviométrie permettent d'expliquer 58.1% du RSH.

**Tableau 2-58. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL - pluviométrie.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 117 + 0,145 \text{ APL}_{0\_30} + 0,757 \text{ APL}_{30\_60} - 0,76 \text{ APL}_{60\_90} - 0,344 \text{ pluvio\_djf}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	116,92	25,86	4,52	0,000
APL_0_30	0,1455	0,1556	0,93	0,365
APL_30_60	0,7570	0,2948	2,57	0,021
APL_60_90	-0,758	1,012	-0,75	0,466
pluvio_djf	-0,34441	0,09272	-3,71	0,002

S = 19,8553    R-Sq = 58,1%    R-Sq(adj) = 47,0%

Analysis of Variance

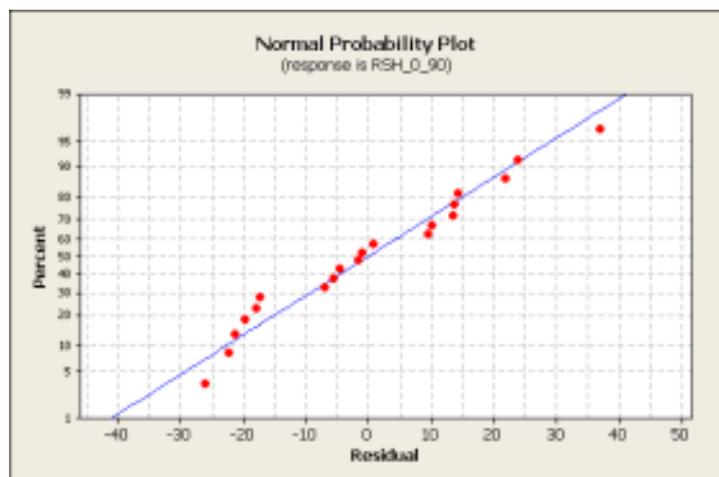
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	8206,5	2051,6	5,20	0,008
Residual Error	15	5913,5	394,2		
Total	19	14120,0			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1868,4
APL_30_60	1	898,9
APL_60_90	1	0,3
pluvio_djf	1	5439,0

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	103	103,00	66,09	10,90	36,91	2,22R

R denotes an observation with a large standardized residual.



L'erreur moyenne est de prédiction est de 14,44 kg N-NO<sub>3</sub>/ha (intervalle de confiance : 4,28 kg N-NO<sub>3</sub>/ha).

En discrétisant la pluviométrie hivernale en pluviométrie mensuelle, la relation n'est plus que significative mais la corrélation est légèrement améliorée ( $r^2 = 0.633$ ) (tableau 2-59).

**Tableau 2-59. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 74,9 + 0,446 \text{ APL}_{0\_30} + 0,896 \text{ APL}_{30\_60} - 0,55 \text{ APL}_{60\_90} + 0,419 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,576 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,575 \text{ Pluvio}_{\text{fév}}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	74,90	40,63	1,84	0,088
APL_0_30	0,4458	0,3232	1,38	0,191
APL_30_60	0,8963	0,3137	2,86	0,013
APL_60_90	-0,551	1,073	-0,51	0,616
Pluvio_déc	0,4195	0,5769	0,73	0,480
Pluvio_jan	-0,5756	0,1951	-2,95	0,011
Pluvio_fév	-0,5753	0,3256	-1,77	0,101

S = 19,9540    R-Sq = 63,3%    R-Sq(adj) = 46,4%

Analysis of Variance

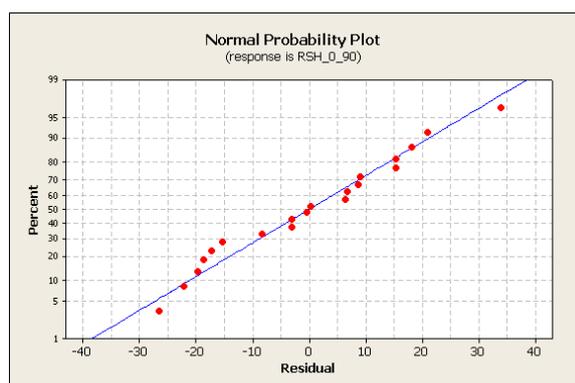
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	8943,9	1490,6	3,74	0,022
Residual Error	13	5176,1	398,2		
Total	19	14120,0			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1868,4
APL_30_60	1	898,9
APL_60_90	1	0,3
Pluvio_déc	1	2662,6
Pluvio_jan	1	2270,9
Pluvio_fév	1	1242,8

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	103	103,00	69,19	14,06	33,81	2,39R

R denotes an observation with a large standardized residual.



Pour cette prévision, l'erreur moyenne est de 13,45 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (intervalle de confiance : 4,06 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

En ajoutant le facteur ‘délai’ (entre la mesure de l’APL et celle du RSH), la relation devient hautement significative, la corrélation est améliorée ( $r^2 = 0.802$ ) (tableau 2-60) et l’erreur moyenne de prédiction réduite ( $10.52 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ) (tableau 2-61).

**Tableau 2-60. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = -95,3 + 0,847 \text{ APL}_{0\_30} + 0,589 \text{ APL}_{30\_60} + 2,38 \text{ APL}_{60\_90} + 1,74 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,913 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,617 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 0,746 \text{ délai}$$

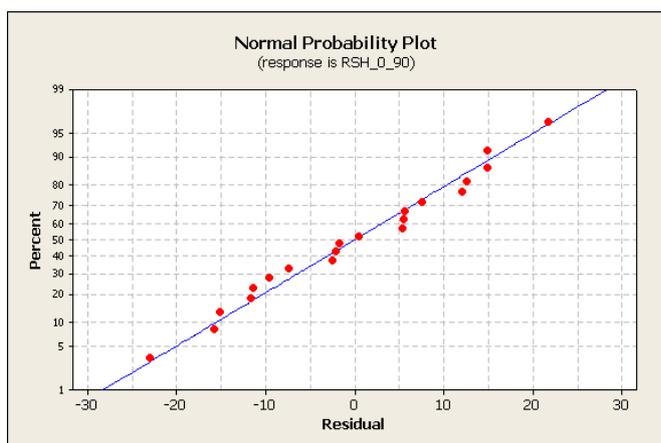
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-95,29	61,77	-1,54	0,149
APL_0_30	0,8470	0,2776	3,05	0,010
APL_30_60	0,5894	0,2588	2,28	0,042
APL_60_90	2,383	1,233	1,93	0,077
Pluvio_déc	1,7379	0,6050	2,87	0,014
Pluvio_jan	-0,9127	0,1830	-4,99	0,000
Pluvio_fév	-0,6169	0,2497	-2,47	0,029
délai	0,7462	0,2340	3,19	0,008

S = 15,2793    R-Sq = 80,2%    R-Sq(adj) = 68,6%

Analysis of Variance

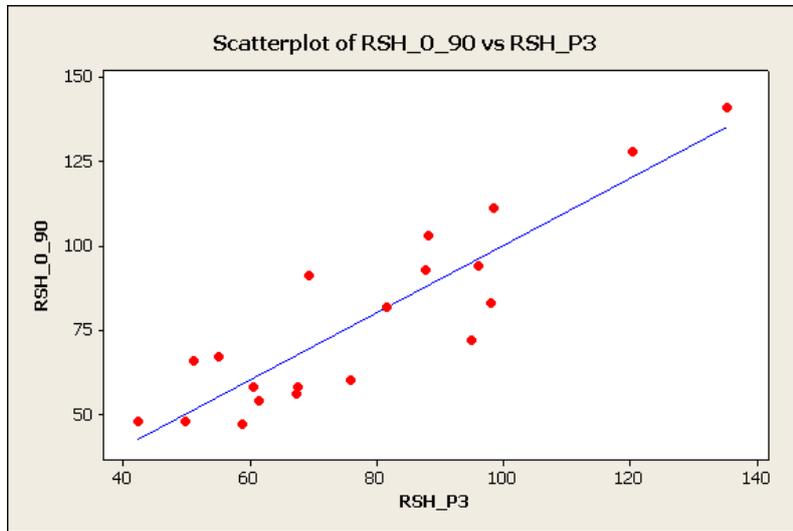
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	11318,5	1616,9	6,93	0,002
Residual Error	12	2801,5	233,5		
Total	19	14120,0			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1868,4
APL_30_60	1	898,9
APL_60_90	1	0,3
Pluvio_déc	1	2662,6
Pluvio_jan	1	2270,9
Pluvio_fév	1	1242,8
délai	1	2374,7



**Tableau 2-61. Pomme de terre. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l’erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err_3	20	0	10,05	1,43	6,41	0,32	5,42	10,52	14,93	23,00



Comme précédemment, la prise en compte des observations APL réalisées en octobre n’améliore ni la relation ni l’erreur médiane de prédiction.

## 2 Préviation du RSH 0-60 cm

Dans diverses situations, l'établissement d'un conseil de fertilisation ne s'appuie que sur la connaissance du reliquat azoté dans la couche 0-60 cm. C'est ainsi le cas pour des cultures à enracinement peu profond (légumes, pomme de terre), des semis tardif (maïs) ou des sols peu profonds.

Dans ces contextes, la qualité de la prédiction jusqu'à 60 cm est évaluée en tenant compte des pluviométries mensuelles (décembre à février) et du délai entre les deux observations (APL et RSH) (tableau 2-62). La corrélation ( $r^2 = 0.617$ ) est moins élevée que pour la prédiction sur 90 cm et l'erreur médiane de prédiction est logiquement moindre  $6.19 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  (tableau 2-63).

**Tableau 2-62. Pomme de terre. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle - délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_60} = 11,8 + 0,573 \text{ APL}_{0\_30} - 0,013 \text{ APL}_{30\_60} - 0,005 \text{ APL}_{60\_90} + 0,610 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,395 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,395 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 0,264 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11,82	18,43	0,64	0,528
APL_0_30	0,5728	0,1145	5,00	0,000
APL_30_60	-0,0126	0,1560	-0,08	0,936
APL_60_90	-0,0045	0,4156	-0,01	0,991
Pluvio_déc	0,6098	0,2169	2,81	0,010
Pluvio_jan	-0,39536	0,09244	-4,28	0,000
Pluvio_fév	-0,3952	0,1221	-3,24	0,004
délai	0,2644	0,1071	2,47	0,021

S = 12,0167 R-Sq = 61,7% R-Sq(adj) = 50,0%

Analysis of Variance

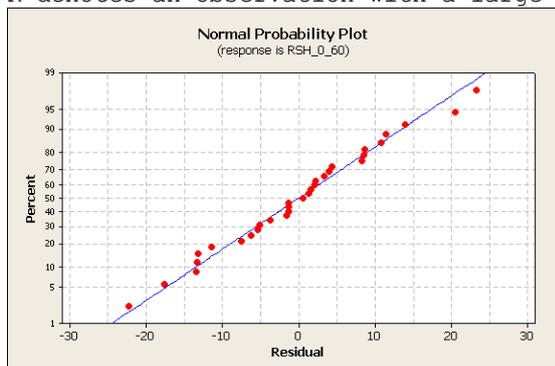
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	5341,2	763,0	5,28	0,001
Residual Error	23	3321,2	144,4		
Total	30	8662,4			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1833,9
APL_30_60	1	254,9
APL_60_90	1	0,1
Pluvio_déc	1	110,6
Pluvio_jan	1	833,8
Pluvio_fév	1	1428,9
délai	1	879,0

Unusual Observations

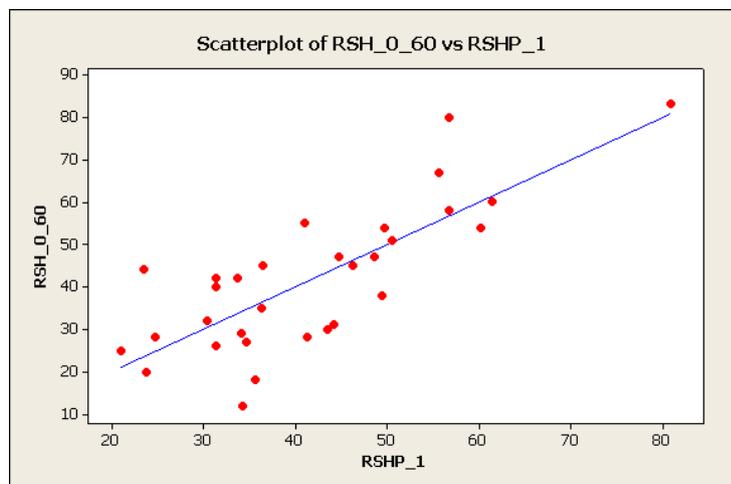
Obs	APL_0_30	RSH_0_60	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
14	61	80,00	56,77	4,50	23,23	2,08R
16	14	12,00	34,31	4,87	-22,31	-2,03R

R denotes an observation with a large standardized residual.



**Tableau 2-63. Pomme de terre. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l’erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	31	0	8,06	1,19	6,60	0,56	2,13	6,19	13,16	23,27



Comme précédemment, la prise en compte des observations APL réalisées en octobre n’améliore ni la relation (qui devient non significative) ni l’erreur médiane de prédiction.

## 4.4.7 Colza

### 1 Prévision du RSH 0-90 cm

Il n'existe pas de relation significative entre l'APL (mesur e début décembre) et le RSH ( $p = 0.055$ ) (tableau 2-64).

**Tableau 2-64. Colza. Régression RSH 90 cm – APL.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 33,6 + 0,335 \text{ APL}_{0\_30} - 0,113 \text{ APL}_{30\_60} + 0,948 \text{ APL}_{60\_90}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	33,644	8,101	4,15	0,001
APL_0_30	0,3350	0,1576	2,12	0,047
APL_30_60	-0,1133	0,2883	-0,39	0,699
APL_60_90	0,9482	0,5408	1,75	0,096

S = 14,9688 R-Sq = 32,3% R-Sq(adj) = 21,6%

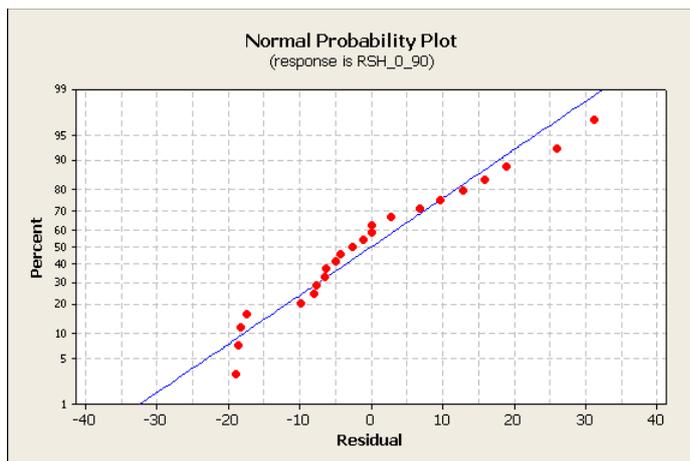
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	2028,1	676,0	3,02	0,055
Residual Error	19	4257,2	224,1		
Total	22	6285,3			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1118,1
APL_30_60	1	221,1
APL_60_90	1	688,8

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	43,0	90,00	71,10	12,06	18,90	2,13RX
11	5,0	68,00	36,88	7,18	31,12	2,37R
20	85,0	82,00	66,03	10,92	15,97	1,56 X



En ajoutant la pluviométrie hivernale comme facteur prédictif, la relation devient significative (P = 0.018). Ces deux facteurs (APL et pluviométrie hivernale) permettent d'expliquer 46.9% du RSH (tableau 2-65).

**Tableau 2-65. Colza. Régression RSH 90 cm – APL - pluviométrie.**

The regression equation is

$$\text{RSH\_0\_90} = 155 + 0,353 \text{ APL\_0\_30} + 0,188 \text{ APL\_30\_60} + 0,347 \text{ APL\_60\_90} - 0,636 \text{ pluvio\_djf}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	154,82	54,95	2,82	0,011
APL_0_30	0,3528	0,1437	2,46	0,024
APL_30_60	0,1884	0,2953	0,64	0,532
APL_60_90	0,3472	0,5613	0,62	0,544
pluvio_djf	-0,6363	0,2860	-2,23	0,039

S = 13,6194    R-Sq = 46,9%    R-Sq(adj) = 35,1%

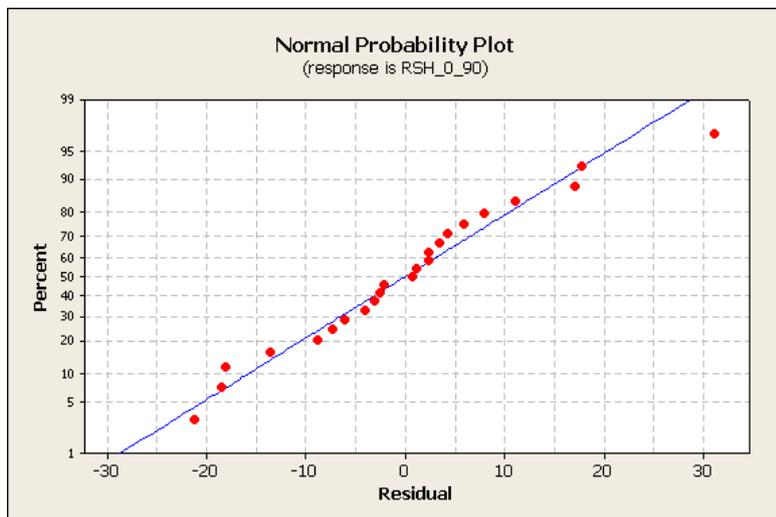
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	2946,5	736,6	3,97	0,018
Residual Error	18	3338,8	185,5		
Total	22	6285,3			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1118,1
APL_30_60	1	221,1
APL_60_90	1	688,8
pluvio_djf	1	918,5

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	43,0	90,00	72,97	11,00	17,03	2,12RX
11	5,0	68,00	36,94	6,53	31,06	2,60R



En ne considérant pas la pluviométrie du mois de décembre ni l'APL dans la couche 60-90 cm, la relation est améliorée : elle devient hautement significative (P = 0.000) et permet d'expliquer 61% du RSH (tableau 2-66).

**Tableau 2-66. Colza. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie totale janvier et février.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 125 + 0,539 \text{ APL}_{0\_30} + 0,279 \text{ APL}_{30\_60} - 0,752 \text{ pluvio\_jf}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	125,12	19,57	6,39	0,000
APL_0_30	0,5393	0,1309	4,12	0,001
APL_30_60	0,2793	0,1663	1,68	0,109
pluvio_jf	-0,7520	0,1712	-4,39	0,000

S = 11,3646    R-Sq = 61,0%    R-Sq(adj) = 54,8%

Analysis of Variance

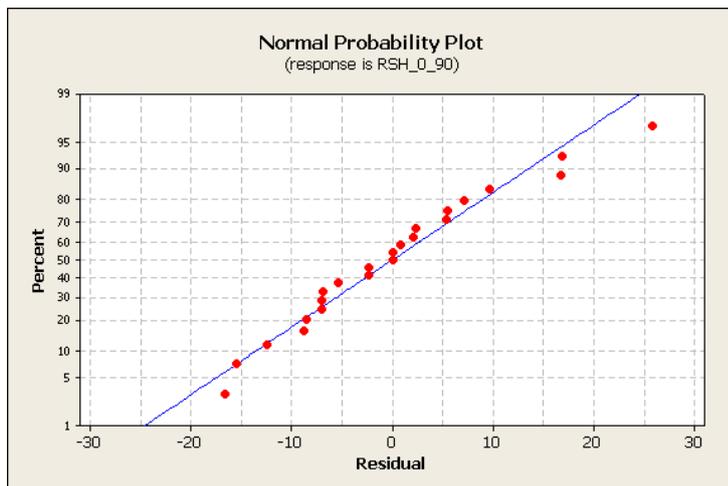
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	3831,4	1277,1	9,89	0,000
Residual Error	19	2453,9	129,2		
Total	22	6285,3			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1118,1
APL_30_60	1	221,1
pluvio_jf	1	2492,1

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	43,0	90,00	84,45	9,56	5,55	0,90 X
11	5,0	68,00	42,17	4,48	25,83	2,47R

R denotes an observation with a large standardized residual.  
X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



En discrétisant la pluviométrie de janvier et février en deux pluviométries mensuelles, la corrélation est très légèrement améliorée (tableau 2-67).

**Tableau 2-67. Colza. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle janvier et février.**

The regression equation is

$$\text{RSH\_0\_90} = 133 + 0,531 \text{ APL\_0\_30} + 0,243 \text{ APL\_30\_60} - 0,844 \text{ Pluvio\_jan} - 0,769 \text{ Pluvio\_fév}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	133,08	23,28	5,72	0,000
APL_0_30	0,5313	0,1334	3,98	0,001
APL_30_60	0,2435	0,1775	1,37	0,187
Pluvio_jan	-0,8444	0,2238	-3,77	0,001
Pluvio_fév	-0,7693	0,1758	-4,38	0,000

S = 11,5391    R-Sq = 61,9%    R-Sq(adj) = 53,4%

Analysis of Variance

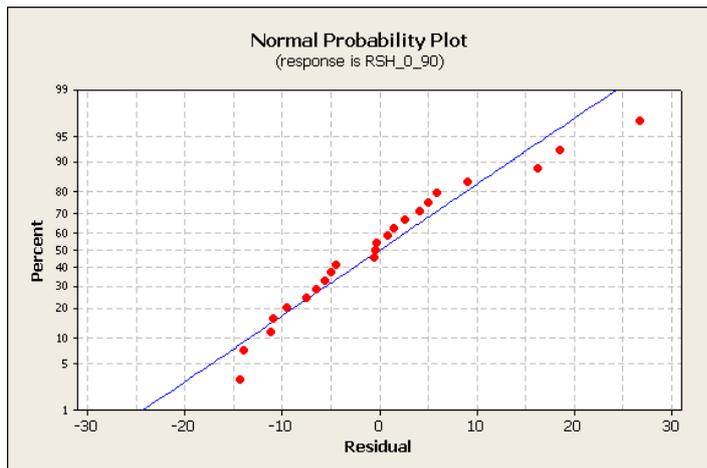
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	3888,6	972,2	7,30	0,001
Residual Error	18	2396,7	133,1		
Total	22	6285,3			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1118,1
APL_30_60	1	221,1
Pluvio_jan	1	0,0
Pluvio_fév	1	2549,3

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	43,0	90,00	84,17	9,71	5,83	0,94 X
11	5,0	68,00	41,23	4,77	26,77	2,55R

R denotes an observation with a large standardized residual.  
X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



La suppression d'une valeur aberrante et l'ajout du facteur 'APL 60-90 cm', du délai entre la mesure de l'APL et du RSH et de la pluviométrie de décembre porte le coefficient de corrélation à 0.844 (tableau 2-68).

**Tableau 2-68. Colza. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai - sans valeur aberrante.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = 181 + 0,503 \text{ APL}_{0\_30} + 0,375 \text{ APL}_{30\_60} - 0,007 \text{ APL}_{60\_90} - 1,27 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,888 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 1,11 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 1,10 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	181,20	40,09	4,52	0,000
APL_0_30	0,50308	0,09871	5,10	0,000
APL_30_60	0,3745	0,2415	1,55	0,143
APL_60_90	-0,0074	0,4909	-0,02	0,988
Pluvio_déc	-1,2708	0,4888	-2,60	0,021
Pluvio_jan	-0,8880	0,1921	-4,62	0,000
Pluvio_fév	-1,1105	0,2511	-4,42	0,001
délai	1,0963	0,4239	2,59	0,022

S = 8,23534    R-Sq = 84,4%    R-Sq(adj) = 76,6%

Analysis of Variance

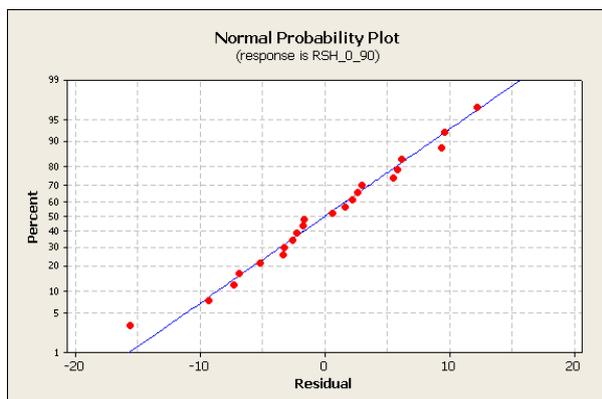
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	5135,96	733,71	10,82	0,000
Residual Error	14	949,49	67,82		
Total	21	6085,45			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	1337,13
APL_30_60	1	476,66
APL_60_90	1	1272,42
Pluvio_déc	1	86,69
Pluvio_jan	1	623,57
Pluvio_fév	1	885,81
délai	1	453,69

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
10	24,0	45,00	60,58	3,57	-15,58	-2,10R

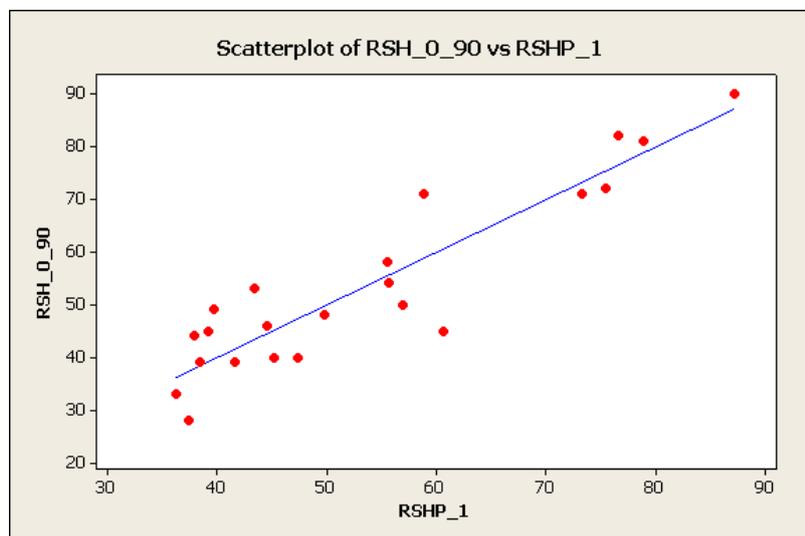
R denotes an observation with a large standardized residual.



Pour cette relation, l'erreur médiane de prédiction est de 4.29 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-69).

**Tableau 2-69. Colza. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	22	0	5,341	0,835	3,917	0,630	2,257	4,291	7,884	15,663



Comme précédemment, la prise en compte de toutes les données APL (octobre et décembre) n'améliore pas la relation : le coefficient de corrélation diminue et l'erreur médiane de prédiction est plus que doublée.

## 2 Préviation du RSH 0-60 cm

Dans diverses situations, l'établissement d'un conseil de fertilisation ne s'appuie que sur la connaissance du reliquat azoté dans la couche 0-60 cm. C'est ainsi le cas pour des cultures à enracinement peu profond (légumes, pomme de terre), des semis tardif (maïs) ou des sols peu profonds.

Dans ces contextes, la qualité de la prédiction jusqu'à 60 cm est évaluée en tenant compte des pluviométries mensuelles (décembre à février) et du délai entre les deux observations (APL et RSH) (tableau 2-70). La corrélation ( $r^2 = 0.772$ ) est moins élevée que pour la prédiction sur 90 cm et l'erreur médiane de prédiction est logiquement moindre  $3.84 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$  (tableau 2-71).

**Tableau 2-70. Colza. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai - sans valeur aberrante.**

The regression equation is

$$\begin{aligned} \text{RSH}_{0\_60} = & 108 + 0,171 \text{ APL}_{0\_30} + 0,154 \text{ APL}_{30\_60} - 0,093 \text{ APL}_{60\_90} \\ & - 0,905 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,381 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,613 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} \\ & + 0,715 \text{ délai} \end{aligned}$$

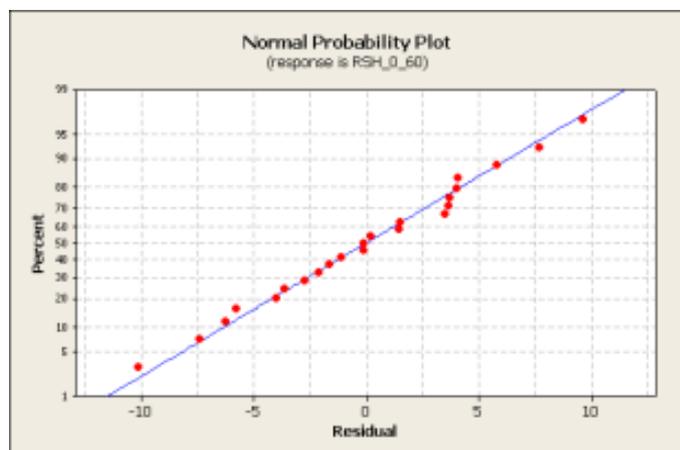
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	108,37	26,30	4,12	0,001
APL_0_30	0,17081	0,07100	2,41	0,029
APL_30_60	0,1536	0,1698	0,90	0,380
APL_60_90	-0,0929	0,3197	-0,29	0,775
Pluvio_déc	-0,9050	0,2136	-4,24	0,001
Pluvio_jan	-0,3814	0,1393	-2,74	0,015
Pluvio_fév	-0,6126	0,1549	-3,96	0,001
délai	0,7146	0,1270	5,63	0,000

S = 5,97377    R-Sq = 77,2%    R-Sq(adj) = 66,6%

Analysis of Variance

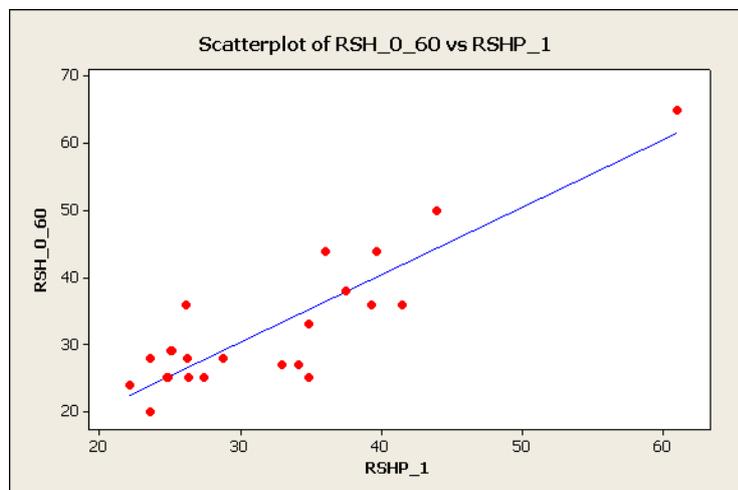
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	1814,45	259,21	7,26	0,001
Residual Error	15	535,29	35,69		
Total	22	2349,74			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	27,00
APL_30_60	1	24,53
APL_60_90	1	69,35
Pluvio_déc	1	84,40
Pluvio_jan	1	0,07
Pluvio_fév	1	478,94
délai	1	1130,16



**Tableau 2-71. Colza. Régression RSH 60 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	23	0	3,935	0,599	2,874	0,163	1,757	3,842	5,928	9,907



Comme précédemment, la prise en compte de toutes les données APL (octobre et décembre) n'améliore pas la relation : le coefficient de corrélation diminue.

## 4.4.8 Légumes

Il existe une relation significative entre le RSH et l'APL, la pluviométrie mensuelle et le délai entre la mesure de l'APL et du RSH ( $P = 0.01$ ). Ces facteurs permettent d'expliquer 70.7 % du RHS (tableau 2-72).

**Tableau 2-72. Légumes. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai.**

The regression equation is

$$\text{RSH}_{0\_90} = -62,8 + 1,12 \text{ APL}_{0\_30} - 0,093 \text{ APL}_{30\_60} + 0,594 \text{ APL}_{60\_90} + 1,03 \text{ Pluvio}_{\text{déc}} - 0,408 \text{ Pluvio}_{\text{jan}} - 0,081 \text{ Pluvio}_{\text{fév}} + 0,829 \text{ délai}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-62,83	40,83	-1,54	0,148
APL_0_30	1,1194	0,4348	2,57	0,023
APL_30_60	-0,0933	0,4750	-0,20	0,847
APL_60_90	0,5939	0,5583	1,06	0,307
Pluvio_déc	1,0316	0,3647	2,83	0,014
Pluvio_jan	-0,4083	0,1986	-2,06	0,060
Pluvio_fév	-0,0815	0,2942	-0,28	0,786
délai	0,8291	0,2789	2,97	0,011

S = 22,0847    R-Sq = 70,7%    R-Sq(adj) = 54,9%

Analysis of Variance

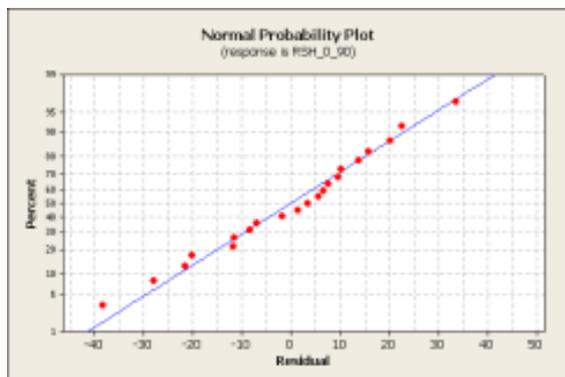
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	15285,7	2183,7	4,48	0,010
Residual Error	13	6340,6	487,7		
Total	20	21626,3			

Source	DF	Seq SS
APL_0_30	1	4425,5
APL_30_60	1	3010,0
APL_60_90	1	1,4
Pluvio_déc	1	943,9
Pluvio_jan	1	2487,0
Pluvio_fév	1	106,3
délai	1	4311,5

Unusual Observations

Obs	APL_0_30	RSH_0_90	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	73,0	165,00	131,48	15,38	33,52	2,12R
12	28,0	90,00	128,50	13,21	-38,50	-2,18R

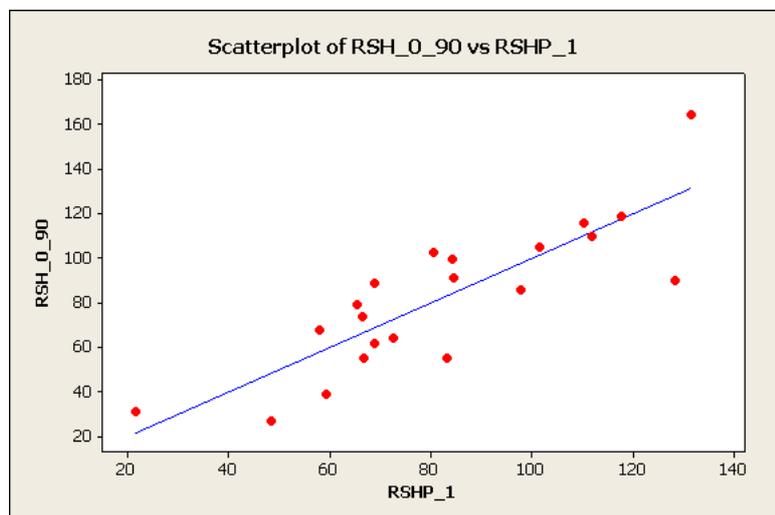
R denotes an observation with a large standardized residual.



Pour cette relation, l'erreur médiane de prédiction est de 11.71 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-73).

**Tableau 2-73. Légumes. Régression RSH 90 cm – APL – pluviométrie mensuelle – délai / évaluation de l'erreur de prédiction.**

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
err1	21	0	14,21	2,24	10,25	1,36	6,75	11,71	20,89	38,48



Comme précédemment, la prise en compte de toutes les données APL (octobre et décembre) n'améliore pas la relation : le coefficient de corrélation diminue (0.51) et l'erreur médiane de prédiction augmente (17.81 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

## 4.5 Conclusions

Le présent paragraphe 4 vise à évaluer via une approche statistique s'il est possible d'établir une équation à partir de l'APL et d'autres variables qualitatives (précédent cultural, région agricole) ou quantitatives (pluviométrie, date de la mesure de l'APL) pour prédire le reliquat azoté dans le sol en sortie d'hiver (RSH) en vue d'un conseil de fertilisation et quelle serait la fiabilité de la prévision.

Dans le cadre de sa mission de soutien scientifique au PGDA, GRENeRA encadre depuis 2002 une vingtaine d'exploitations agricoles représentatives des principales régions agricoles de la zone vulnérable.

Ainsi, chaque année, dans plusieurs parcelles de ces exploitations, des mesures de reliquat azoté sont réalisées, en sortie d'hiver (pour le RSH en vue de l'établissement d'un conseil de fertilisation) et en automne (pour l'établissement des références APL). Ces observations sont systématiquement menées sur une profondeur de 90 cm pour l'APL (en culture) et discrétisées en 3 couches de 30 cm. Pour le RSH, dans près de 80% des situations, les observations sont également réalisées sur 90 cm.

De 2003 à 2013, quelques 660 couples « APL-RSH » ont ainsi été observés.

Ces valeurs sont classées selon différents critères pertinents :

- l'occupation du sol qui précède la mesure de l'APL,
- l'année,
- l'apport d'engrais de ferme l'été qui précède la mesure de l'APL,
- la profondeur d'échantillonnage du RSH

Chaque année, dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA), le Service Public de Wallonie fait échantillonner des parcelles entre le 15 octobre et le 20 décembre en vue de doser le reliquat azoté (APL – Azote Potentiellement Lessivable) en début de période de lixiviation.

En 2012, environ 1600 observations ont ainsi été réalisées en zone vulnérable.

L'objectif était donc d'évaluer la possibilité de valoriser chaque année ce volume d'observations pour proposer un conseil de fertilisation idoine.

L'évaluation de la qualité de la prédiction s'est faite via deux approches complémentaires :

- via une analyse de la variance, établir un coefficient de détermination pour chaque équation et déterminer son niveau de significativité ;
- comparer les RSH prédits aux RSH mesurés en vue de calculer l'erreur médiane de prédiction.

Le tableau 2-74 synthétise les résultats de la trentaine de régressions établies. L'examen de ce tableau met en évidence :

- l'intérêt d'intégrer le facteur 'année' (représenté par la pluviométrie mensuelle hivernale) : le coefficient de détermination et le niveau de significativité s'en trouvent améliorés ;
- dans une moindre mesure, la prise en compte du délai entre la mesure de l'APL et la date de prédiction du RSH améliore encore l'estimation ;
- la perte de qualité de la prédiction lorsque la mesure de l'APL est réalisée tôt en automne (fin octobre).

Dans ces conditions, l'erreur médiane de prédiction est de l'ordre de 15 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>. Le troisième quartile étant environ double de la médiane, on peut donc estimer que dans approximativement un cas

sur quatre, l'erreur de prédiction aura un impact soit sur le rendement (surestimation du RSH et donc sous-estimation de la fertilisation azotée à apporter), soit sur l'APL (sous-estimation du RSH et donc surestimation de la fertilisation azotée à apporter).

**Tableau 2-74. Synthèse des régressions RSH– APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>)**

0-90 cm				
Culture	Facteurs explicatifs			
	APL décembre	+ pluviométrie	+ délai entre observations	+ APL octobre
Betterave	0.38 (*)	0.52 (*)	0.53 () 21	0.56 (**) 20
Céréale suivie de CIPAN	0.09 ()	0.25 (**) 18		0.16 (***) 21
Céréales non suivie de CIPAN		0.46 (**) 10	0.46 (**) 10	0.32 (***) 10
Maïs	0.26 (**)	0.33 (**) 15	0.39 (**) 14	0.22 (**) 18
Pomme de terre	0.20 ()	0.63 (*) 14	0.80 (**) 10	0.44 (**) 16
Colza	0.32 ()		0.84 (**) 4	0.71 (***) 7
Légumes			0.71 (*) 12	0.52 (**) 18
0-60 cm				
Betterave		0.45 (*)	0.45 (*) 16	0.56 () 16
Céréale suivie d'une CIPAN avec engrais de ferme à action lente			0.22 (*) 14	
Céréale suivie d'une CIPAN avec engrais de ferme à action rapide			0.12 ()	
Céréale suivie d'une CIPAN sans engrais de ferme			0.43 (***) 17	
Céréale non suivie de CIPAN			0.44 (**) 5	0.35 (***) 5
Maïs			0.33 (**) 10	0.13 (**) 12
Pomme de terre			0.62 (**) 6	0.18 () 12
Colza			0.77 (**) 4	0.62 (***) 3

Légende : 0.xx = coefficient de détermination  
 () : signification de la relation : () = non significatif  
 (\*) = significatif (P < 0.05)  
 (\*\*) = hautement significatif (P < 0.01)  
 (\*\*\*) = très hautement significatif (P < 0.001)  
 chiffre en italique : erreur médiane de prédiction du RSH

Si cet outil devait être mis en œuvre par des conseillers agricoles, il importera d'apprécier la fiabilité de l'informateur (l'agriculteur) et la qualité des renseignements collectés.



## **5 Prédiction uniquement sur base d'observations RSH**

---

### **5.1 Introduction**

Depuis 2009, à l'initiative de GRENeRA, les reliquats azotés mesurés en sortie d'hiver (RSH) pour Nitrawal asbl et ses deux partenaires scientifiques sont intégrés dans une base de données mise à jour par GRENeRA à l'attention de Nitrawal asbl<sup>4</sup>.

En 2013, quelques 776 valeurs ont ainsi été collectées et diffusées pour permettre d'établir des conseils de fertilisation pour des parcelles en l'absence de mesure de RSH dans ces parcelles.

Cette base de données a ainsi permis d'établir des conseils de fertilisation dans quelques 569 exploitations agricoles pour un peu moins de 10.000 ha de parcelles cultivées en 2013<sup>5</sup>.

L'objectif du présent document est d'évaluer l'erreur qui peut être commise en utilisant une valeur 'moyenne' extraite de la base de données au lieu de mesurer effectivement le RSH dans la parcelle. Signalons d'emblée l'utopie de pouvoir disposer d'une mesure du RSH dans les quelques 150.000 parcelles cultivées de la région wallonne : inenvisageable humainement et financièrement.

### **5.2 Description de la base de données**

La base de données développée par GRENeRA a deux objectifs :

- permettre l'encodage des observations et
- offrir une synthèse automatique des résultats et un outil de requête spécifique.

Cette base de données est utilisée par Nitrawal pour élaborer des conseils de fertilisation idoines. Elle offre ainsi une information « moyenne » dans différents contextes et permet également aux conseillers d'appréhender la dispersion des observations réalisées dans des situations bien spécifiques.

#### **5.2.1 Encodage des observations**

Les conseils de fertilisation sont réalisés avec, entre autres, la connaissance d'informations telles que :

- la région agricole,
- la culture précédente,
- la présence d'une CIPAN,
- l'application d'engrais de ferme (y compris type et période).

Ces informations doivent donc forcément accompagner une valeur de reliquat azoté pour qu'une moyenne puisse être établie dans chaque contexte. Le formulaire d'encodage suivant (figure 2-17) a donc été créé.

---

<sup>4</sup> Rapport d'activités 2010 (Dossier GRENeRA 10-04)

<sup>5</sup> Rapport d'activités 2013 de la Structure d'encadrement Nitrawal (fiche action E2.1)

Reliquat

Formulaire d'encodage des reliquats azotés de printemps

Historique cultural

Sol nu - précédent :

- Betterave
- Céréales pailles enfouies
- Céréales pailles enlevées
- Chicorée
- Légume
- Légumineuse
- Lin
- Maïs fourrager
- Maïs grain
- Pomme de terre
- Colza

Sol couvert :

- Ray-grass moins de 18 mois
- Colza (culture à fertiliser)

Engrais de ferme

- Fumier
- Lisier
- Compost
- Fientes
- Aucun

CIPAN

Période d'apport de l'engrais de ferme

- Eté-automne
- Hiver-printemps
- non concerné

Reliquat 0-30 cm

Reliquat 30-60 cm

Reliquat 60-90 cm

Commentaire:

**Nouvel enregistrement**

Période d'échantillonnage

- Janvier-février
- Mars-avril

Région d'échantillonnage

- Ardenne
- Condroz
- Famenne
- Herbagère liégeoise
- Jurassique
- Limoneuse humide
- Limoneuse sèche
- Sablo-limoneuse

Enr : 1 sur 505

Figure 2-17. Ecran d'encodage d'un reliquat de printemps

### 5.2.2 Synthèse ou requête des informations

L'utilisateur a le choix entre générer une synthèse complète des observations dont sont extraits ci-dessous (figure 2-18), à titre d'exemple, les résultats des analyses réalisées en Famenne dans le précédent 'céréales pailles enlevées'.

Précédent : Céréales pailles enlevées

CIPAN non

Date échantillonnage		Reliquat			
Période apport EF	Type EF	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
Eté-automne	Fumier	4	8	8	20
Synthèse pour 'Période_éah' = 2 (1 enregistrement détail)					
Moyenne		4	8	8	20
Synthèse pour 'CIPAN' = non (1 enregistrement détail)					
Moyenne		4	8	8	20

CIPAN oui

Date échantillonnage		Reliquat			
Période apport EF	Type EF	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
Eté-automne	Fumier	4	3	3	10
Eté-automne	Fumier	22	25	24	71
Synthèse pour 'Période_éah' = 1 (2 enregistrements détail)					
Moyenne		13	14	14	41

Date échantillonnage		Reliquat			
Période apport EF	Type EF	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
Eté-automne	Fumier	35	17	11	63
Eté-automne	Fumier	7	8	6	21
Eté-automne	Fumier	35	6	2	43
Eté-automne	Fumier	9	10	10	29
Hiver-printemps	Fumier	13	9	3	25
non-osoerné	Auoun	12	10	9	31
Synthèse pour 'Période_éah' = 2 (6 enregistrements détail)					
Moyenne		19	10	7	35
Synthèse pour 'CIPAN' = oui (8 enregistrements détail)					
Moyenne		17	11	9	37
Synthèse pour 'Précédent' = 3 (9 enregistrements détail)					
Moyenne		16	11	8	35

Figure 2-18. Résultats des analyses en Famenne avec précédent « céréales pailles enlevées »

L'utilisateur peut également recourir à un écran de requête illustré (figure 2-19) pour spécifier lui-même les options recherchées.

The screenshot shows a window titled "FormRequete" with a search criteria selection interface. The main heading is "Sélectionnez un ou plusieurs critères de choix". Below this, there are several dropdown menus for selection: "Précédent", "Cipan", "type d'engrais de ferme apporté", "Période d'apport de l'engrais de ferme", "Période de mesure du profil azoté", and "Région". At the bottom, there are buttons for "Aperçu", "Aperçu simplifié", and "Effacer les critères!". A status bar at the bottom indicates "Enr : 1 sur 1".

Figure 2-19. Requête

### 5.3 Description des données

De façon tout-à-fait logique, près de la moitié des mesures ont été réalisées en région limoneuse (figure 2-20). En outre, il convient également d'observer la part relativement importante de la région herbagère liégeoise (en comparaison à la région limoneuse humide), eu égard à la faible proportion de terre cultivée dans cette région. Ceci témoigne de l'investissement humain mis en œuvre par Nitrawal asbl dans cette région.

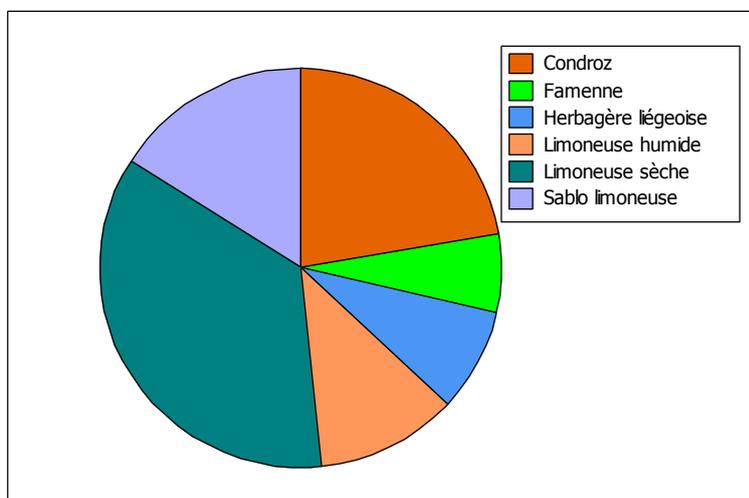


Figure 2-20. Répartition des mesures de RSH par région agricole

De l'ordre d'un quart des observations sont réalisées pour des cultures en place (céréale ou colza) (figure 2-21). La part relativement élevée des précédents 'maïs' (par rapport aux précédents 'betterave' ou 'pomme de terre') indique que dans bon nombre de ces situations, les parcelles de maïs sont restées nues en hiver. Ceci est conforme au propos du paragraphe précédent (part importante de la région herbagère liégeoise où l'on retrouve essentiellement du maïs en monoculture).

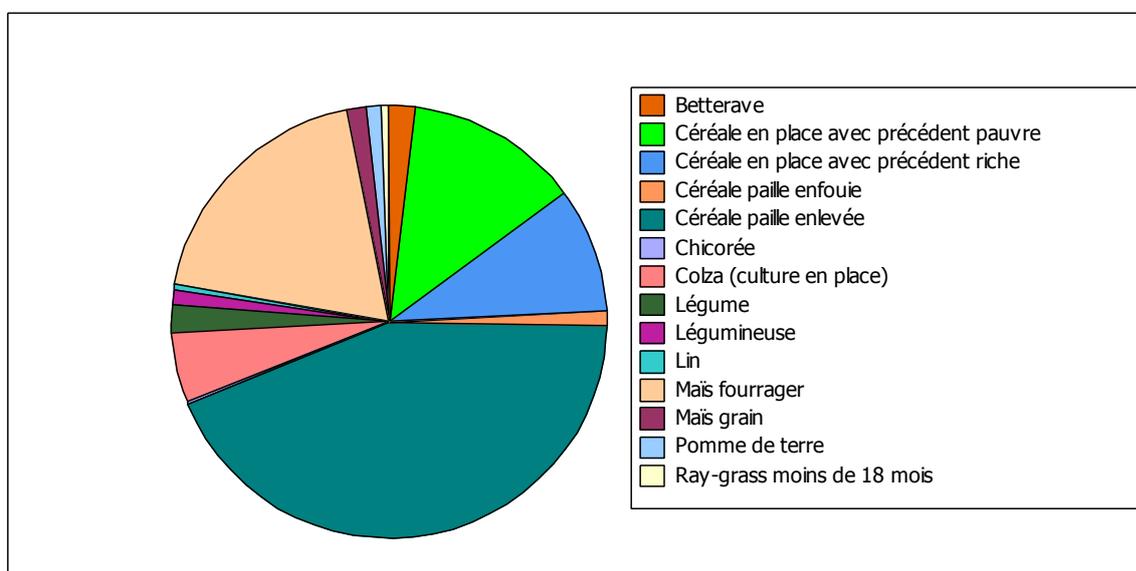


Figure 2-21. Répartition des mesures de RSH par précédent cultural

### 5.3.1 Les observations par culture précédente ou en place

Le tableau 2-75 illustre de manière synthétique le contenu de la base de données. Les RSH les plus faibles sont observés dans les parcelles de colza en place ; les plus élevés sont rencontrés sur sol nu après légumes, pomme de terre ou maïs.

**Tableau 2-75. Synthèse des RSH par précédent cultural**

Variable	Précédent	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Betterave	7	25,00	29,00	46,00	53,00
	Céréale en place avec pré. pauvre	95	24,00	31,00	41,00	87,00
	Céréale en place avec pré. riche	73	31,50	42,00	55,50	88,00
	Céréale paille enfouie	4	33,50	45,50	101,00	118,00
	Céréale paille enlevée	220	28,00	41,00	59,00	147,00
	Chicorée	1	*	21,00	*	21,00
	Colza (culture en place)	34	15,75	20,50	43,00	139,00
	Légume	6	30,75	55,50	64,00	73,00
	Légumineuse	6	10,80	38,50	73,00	91,00
	Lin	3	31,00	33,00	36,00	36,00
	Maïs fourrager	106	38,00	50,00	63,25	141,00
	Maïs grain	9	29,00	33,00	50,50	54,00
	Pomme de terre	6	35,50	50,50	79,00	124,00
	Ray-grass moins de 18 mois	5	15,50	42,00	51,00	57,00

Une analyse de la variance (tableau 2-76) indique l'existence de différence très hautement significative ( $P=0.000$  et distribution normale des résidus) entre les moyennes observées par précédent.

**Tableau 2-76. Analyse de la variance des RSH par précédent cultural**

Source	DF	SS	MS	F	P
Précédent	13	32243	2480	5,21	0,000
Error	561	266817	476		
Total	574	299060			

S = 21,81    R-Sq = 10,78%    R-Sq(adj) = 8,71%

Individual 95% CIs For Mean Based on  
Pooled StDev

Level	CI
Betterave	(----*----)
Céréale en place avec pr pauvre	(*--)
Céréale en place avec pr riche	(*--)
Céréale paille enfouie	(-----*-----)
Céréale paille enlevée	(*)
Colza (culture en place)	(--*-)
Légume	(-----*-----)
Légumineuse	(-----*-----)
Lin	(-----*-----)
Maïs fourrager	(--*)
Maïs grain	(----*----)
Pomme de terre	(-----*-----)
Ray-grass moins de 18 mo	(-----*-----)

### 5.3.2 Les observations par région agricole

On observe des variations de médiane entre régions agricoles parfois supérieures à 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-77). Ce paramètre est donc important.

**Tableau 2-77. Impact de la région agricole sur le RSH**

#### Results for Précédent = Céréale en place avec précédent pauvre

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	45	25,00	35,00	40,50	87,00
	Famenne	1	*	29,00	*	29,00
	Limoneuse humide	3	13,00	37,00	65,00	65,00
	Limoneuse sèche	40	21,50	29,50	40,75	57,00
	Sablo limoneuse	6	17,00	26,00	45,50	59,00

#### Results for Précédent = Céréale en place avec précédent riche

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	22	25,25	39,50	50,00	63,00
	Famenne	3	21,00	27,00	30,00	30,00
	Limoneuse humide	12	31,75	38,50	49,25	77,00
	Limoneuse sèche	28	36,75	51,00	59,25	88,00
	Sablo limoneuse	8	34,25	38,00	43,75	85,00

#### Results for Précédent = Céréale paille enlevée

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	46	27,00	35,50	48,25	125,00
	Famenne	10	29,00	39,50	47,75	86,00
	Herbagère liégeoise	1	*	46,00	*	46,00
	Limoneuse humide	18	21,75	43,00	63,75	101,00
	Limoneuse sèche	85	28,50	44,00	63,50	147,00
	Sablo limoneuse	60	32,00	41,50	61,25	135,00

#### Results for Précédent = Colza (culture en place)

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	19	19,00	23,00	43,00	45,00
	Famenne	8	13,25	15,00	16,00	28,00
	Limoneuse sèche	6	23,80	41,00	78,30	139,00
	Sablo limoneuse	1	*	11,00	*	11,00

#### Results for Précédent = Maïs fourrager

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	10	25,00	38,00	56,25	78,00
	Famenne	15	27,00	45,00	67,00	102,00
	Herbagère liégeoise	51	44,00	52,00	67,00	115,00
	Limoneuse humide	10	39,25	47,50	58,75	68,00
	Limoneuse sèche	6	32,80	45,50	78,00	132,00
	Sablo limoneuse	14	30,50	52,00	60,25	141,00

### 5.3.3 L'impact de la période d'échantillonnage

L'impact de la date d'échantillonnage sur le RSH est peu visible car dans la plupart des situations, l'effectif (pour une région agricole donnée et pour un précédent donné) est trop faible pour pouvoir conclure. La seule exception est le précédent 'céréale paille enlevée' en région limoneuse sèche : les valeurs observées en janvier-février et en mars-avril sont assez similaires (tableau 2-78).

**Tableau 2-78. Impact de la date d'échantillonnage sur le RSH**

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; Date = Janvier-février

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	1	*	64,00	*	64,00
	Limoneuse humide	5	18,00	21,00	41,00	42,00
	Limoneuse sèche	38	30,50	43,50	58,75	86,00
	Sablo limoneuse	3	33,00	49,00	74,00	74,00

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; Date = Mars-avril

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	45	27,00	35,00	47,50	125,00
	Famenne	10	29,00	39,50	47,75	86,00
	Herbagère liégeoise	1	*	46,00	*	46,00
	Limoneuse humide	13	31,50	59,00	72,00	101,00
	Limoneuse sèche	47	28,00	45,00	67,00	147,00
	Sablo limoneuse	57	29,50	41,00	60,50	135,00

### 5.3.4 L'effet d'un apport d'engrais de ferme et d'une CIPAN

L'impact d'un apport d'engrais de ferme est variable selon les régions et le type d'engrais mais il peut engendrer des différences de l'ordre de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-79).

**Tableau 2-79. Impact de l'engrais de ferme sur le RSH**

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; CIPAN = oui; EF\_type = Aucun

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	4	13,75	22,50	31,25	32,00
	Famenne	1	*	40,000	*	40,000
	Limoneuse humide	7	18,0	38,0	59,0	101,0
	Limoneuse sèche	29	24,00	36,00	45,00	67,00
	Sablo limoneuse	14	30,75	39,00	53,25	93,00

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; CIPAN = oui; EF\_type = Compost

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Limoneuse sèche	10	37,50	56,50	69,75	75,00
	Sablo limoneuse	1	*	73,00	*	73,00

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; CIPAN = oui; EF\_type = Fientes

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	1	*	40,00	*	40,00
	Limoneuse sèche	5	54,0	103,00	133,00	147,00

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; CIPAN = oui; EF\_type = Fumier

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	28	26,50	41,00	54,50	87,00
	Famenne	7	14,00	44,00	56,00	86,00
	Limoneuse humide	7	44,00	63,00	78,00	95,00
	Limoneuse sèche	28	28,75	48,00	70,50	104,00
	Sablo limoneuse	41	25,50	42,00	67,00	135,00

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; CIPAN = oui; EF\_type = Lisier

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	3	27,00	31,00	39,00	39,00
	Limoneuse humide	3	21,00	25,00	57,00	57,00
	Limoneuse sèche	1	*	68,00	*	68,00
	Sablo limoneuse	3	41,00	59,00	65,00	65,00

La présence d'une CIPAN conduit logiquement à abaisser le RSH de l'ordre de 10 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (tableau 2-80). Néanmoins, dans ces situations, l'azote nitrique se trouve plutôt dans la couche 0-30 cm.

**Tableau 2-80. Impact de la CIPAN sur le RSH**

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; EF\_type = Aucun; CIPAN = non

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	9	28,00	36,00	52,00	125,00
	Limoneuse humide	1	*	13,00	*	13,00
	Limoneuse sèche	12	31,50	44,00	58,75	67,00
	Sablo limoneuse	1	*	45,00	*	45,00

Results for Précédent = Céréale paille enlevée; EF\_type = Aucun; CIPAN = oui

Variable	Région	N	Q1	Median	Q3	Maximum
RSH 0-90 cm	Condroz	4	13,75	22,50	31,25	32,00
	Limoneuse humide	7	18,00	38,00	59,00	101,00
	Limoneuse sèche	29	24,00	36,00	45,00	67,00
	Sablo limoneuse	14	30,75	39,00	53,25	93,00

## 5.4 Evaluation de l'erreur liée à l'utilisation d'une valeur médiane

### 5.4.1 Méthodologie

Dans une première approche dite 'globale', c'est-à-dire en faisant fi de tout autre paramètre que le précédent agricole, on va établir la probabilité de commettre une erreur supérieure à 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

En seconde approche, l'impact des autres paramètres sera étudié dans les situations où l'effectif est suffisant.

L'appréciation se fera sur base de l'examen des graphiques de fréquences cumulées en établissant à partir de quel centile, le RSH est supérieur ou inférieur de 20 ou 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> à la valeur médiane.

### 5.4.2 Approche globale

#### 1 *Sol couvert par une culture d'hiver*

Dans la base de données, trois cas de figures sont possibles :

1. un colza,
2. une céréale semée après un précédent 'pauvre',
3. une céréale semée après un précédent 'riche'.

La qualification du précédent (riche ou pauvre) est laissée à l'appréciation du conseiller. Un précédent 'betterave' ou 'céréale' est normalement pauvre (APL attendu faible), un précédent 'pomme de terre', 'légume' ou 'colza' est normalement riche (APL attendu élevé). Le cas du maïs est plus problématique car l'amplitude des APL rencontrés est très importante (de 30 à 300 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Dans ce cas et en l'absence de mesure d'APL (majorité des situations), c'est l'intuition du conseiller qui doit le guider pour l'encodage (classement en 'pauvre' ou 'riche').

Dans le cas du colza, la médiane des observations réalisées est de 29.2 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-22). En prenant cette valeur pour établir un conseil de fertilisation, on commet dans 39% des cas une erreur (par excès ou par défaut) de plus de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans 9.9% des cas, une erreur de plus de 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

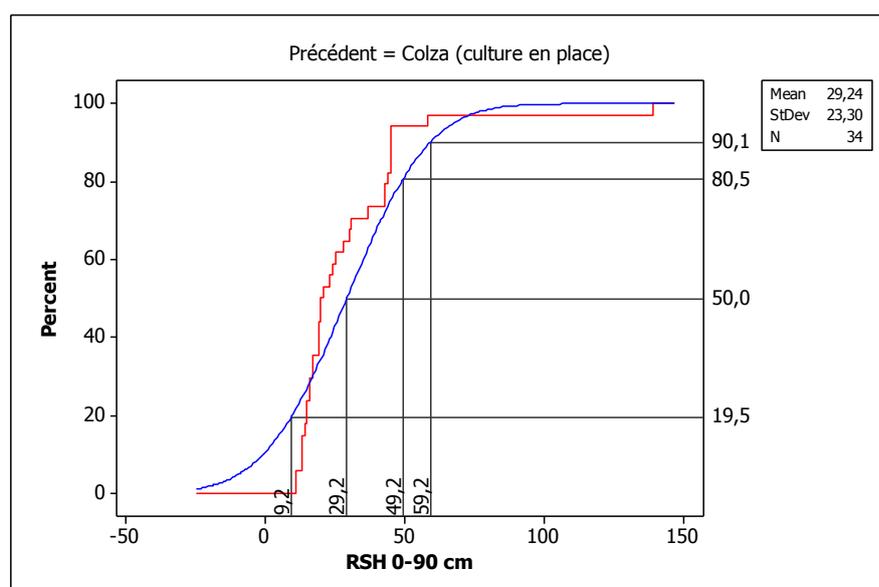


Figure 2-22. Distribution de fréquence des observations réalisées en colza

Dans le cas d'une céréale en place avec précédent pauvre, la médiane des observations réalisées est de 33.5 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-23). En prenant cette valeur pour établir un conseil de fertilisation, on commet dans 15.6% des cas une erreur (par excès ou par défaut) de plus de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans 3.4% des cas, une erreur de plus de 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

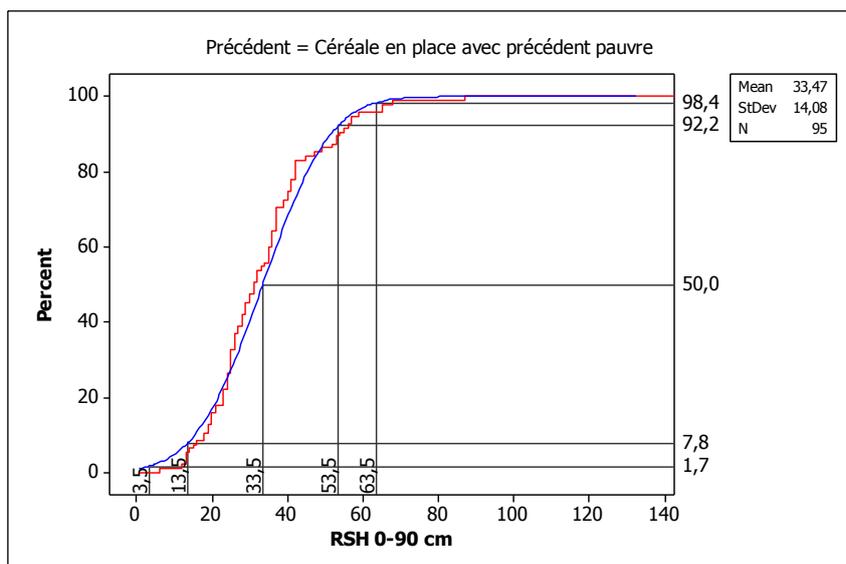


Figure 2-23. Distribution de fréquence des observations réalisées en céréale avec précédent pauvre

Dans le cas d'une céréale en place avec précédent riche, la médiane des observations réalisées est de 43.3 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-24). En prenant cette valeur pour établir un conseil de fertilisation, on commet dans 21% des cas une erreur (par excès ou par défaut) de plus de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans 6% des cas, une erreur de plus de 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

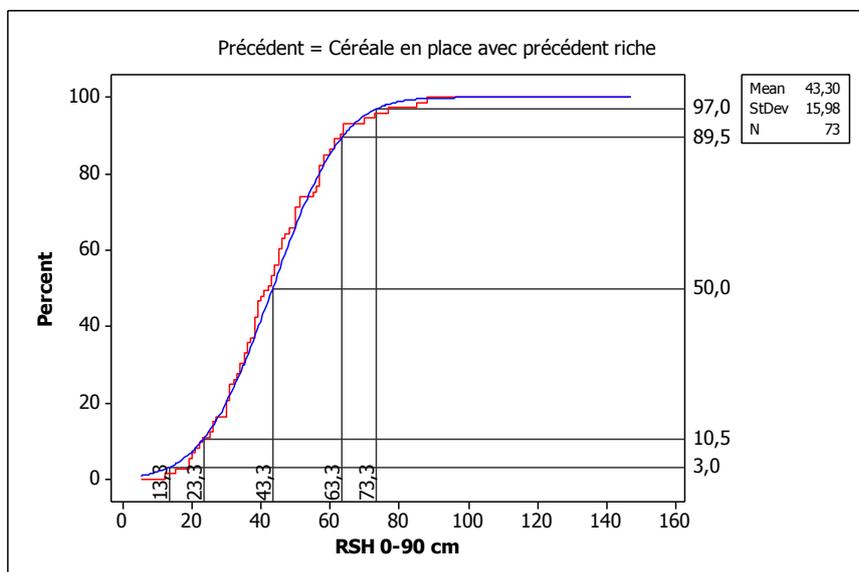


Figure 2-24. Distribution de fréquence des observations réalisées en céréale avec précédent riche

## 2 Sol nu en vue d'une culture de printemps

Dans la base de données, douze précédents sont possibles :

1. céréale paille enlevée
2. céréale paille enfouie
3. maïs fourrager
4. maïs grain
5. betterave
6. pomme de terre
7. légume
8. légumineuse
9. ray-grass de moins de 18 mois
10. lin
11. colza
12. chicorée

Certains précédents sont peu rencontrés. Nous ne nous attarderons que sur les données 'céréale paille enlevée' et 'maïs fourrager' pour lesquels les données sont suffisamment nombreuses.

Dans le cas d'un précédent céréale paille enlevée, la médiane des observations réalisées est de 45.9 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-25). En prenant cette valeur pour établir un conseil de fertilisation, on commet dans 41.4% des cas une erreur (par excès ou par défaut) de plus de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans 22% des cas, une erreur de plus de 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

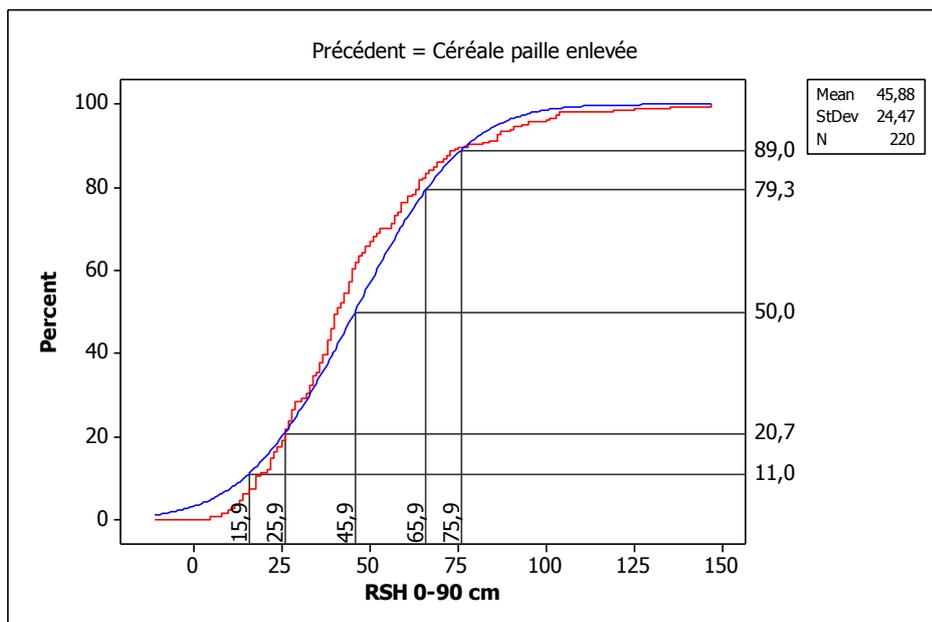


Figure 2-25. Distribution de fréquence des observations réalisées après une céréale paille enlevée

Dans le cas d'un précédent maïs fourrager, la médiane des observations réalisées est de 43.3 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-26). En prenant cette valeur pour établir un conseil de fertilisation, on commet dans 40.2% des cas une erreur (par excès ou par défaut) de plus de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans 21% des cas, une erreur de plus de 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

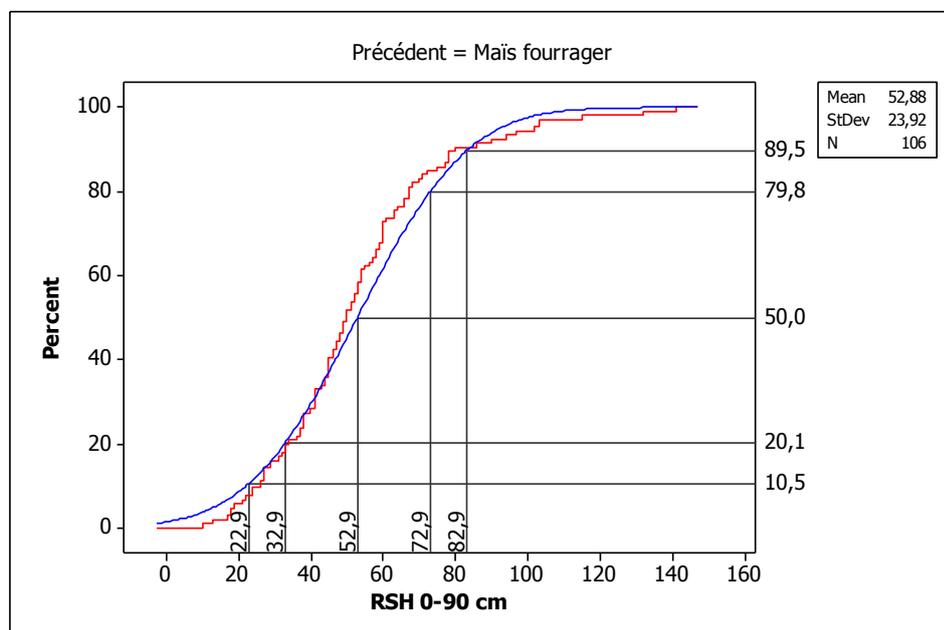


Figure 2-26. Distribution de fréquence des observations réalisées après un maïs fourrager

### 5.4.3 Prise en compte de la région agricole et de la fertilisation organique

#### 1 La région agricole

Dans le cas du maïs fourrager, la prise en compte du facteur 'région agricole' permet d'améliorer la fiabilité de la prédiction dans le cas de la région herbagère liégeoise (effectif important et moyenne supérieure (non significatif) à la moyenne globale) : la médiane des observations réalisées est de 57.1 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-27) ; dans 35.2% des cas une erreur (par excès ou par défaut) de plus de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans 16.2% des cas, une erreur de plus de 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>. A noter que si l'on ne s'intéresse qu'à la couche 0-60 cm (effectif plus important et valeurs plus faibles), ces pourcentages 'tombent' à 18% et 4% pour ces mêmes niveaux d'erreur.

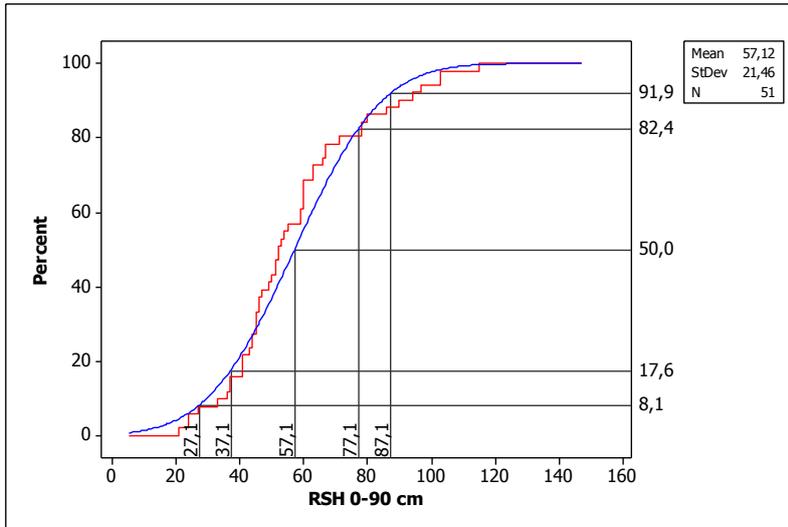


Figure 2-27. Distribution de fréquence des observations réalisées après un maïs fourrager en région herbagère liégeoise

Dans les autres régions agricoles (figure 2-28), la petitesse de l'effectif et ou sa distribution de fréquence n'améliore pas la fiabilité de la prédiction.

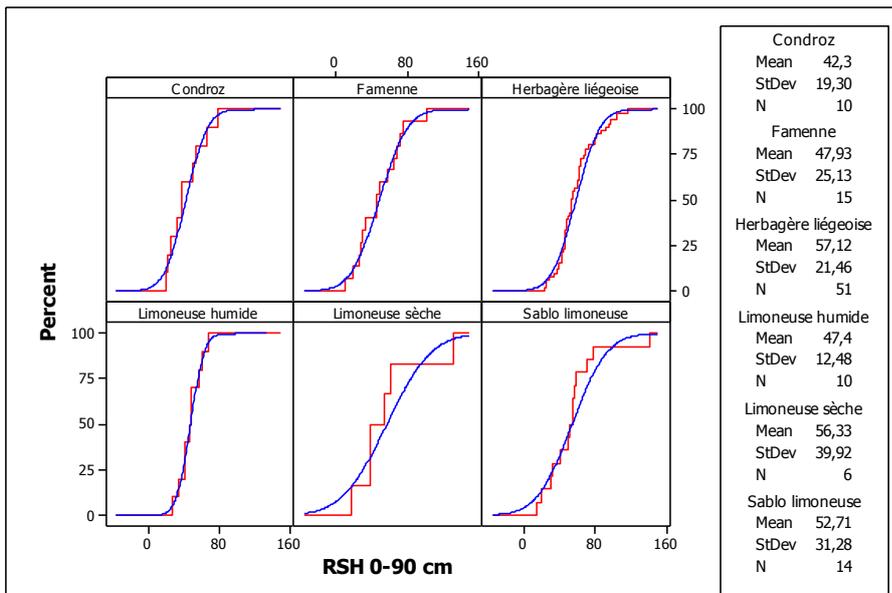


Figure 2-28. Distribution de fréquence des observations réalisées, par région agricole, après un maïs fourrager

Dans le cas du précédent ‘céréale paille enlevée’, la prise en compte du facteur ‘région agricole’ améliore peu la qualité de la prédiction : les distributions de fréquences (figure 2-29) ne sont pas plus verticales qu’en l’absence de prise en compte de la région agricole (figure 2-25).

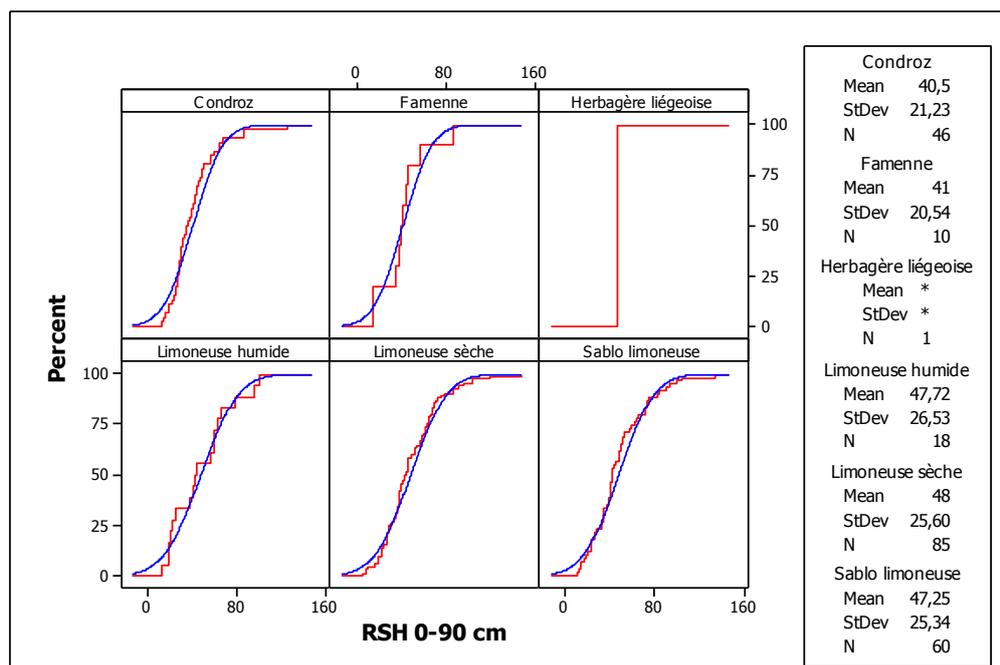


Figure 2-29. Distribution de fréquence des observations réalisées, par région agricole, après une céréale paille enlevée

Néanmoins, le Condroz et la Famenne présente des moyennes plus faibles (non significatif) que celles observées en régions limoneuses et sablo limoneuse (figure 2-29).

Dans le cas d’un ‘colza (culture en place)’, la prise en compte de la région agricole améliore nettement la prédiction : dans 10% des situations, l’erreur est inférieure à 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans moins d’un pourcent des situations, elle est inférieure à 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-30).

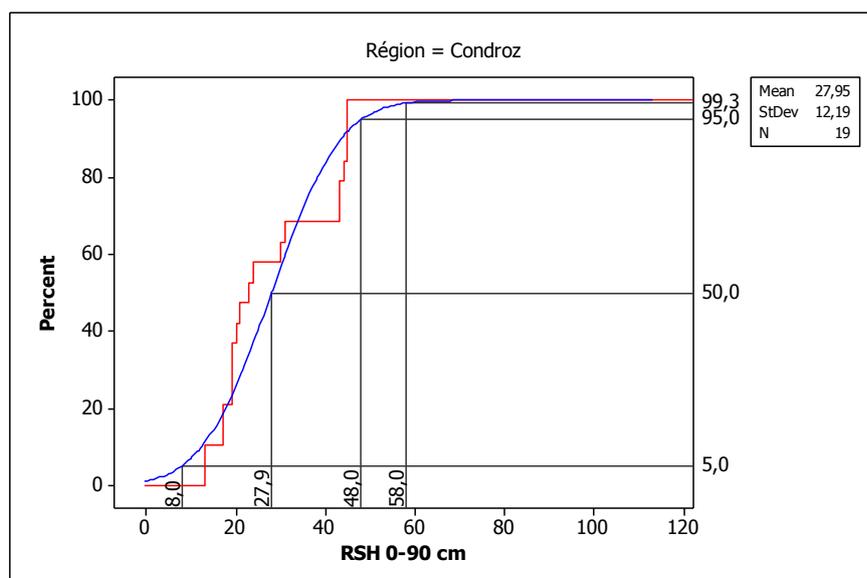
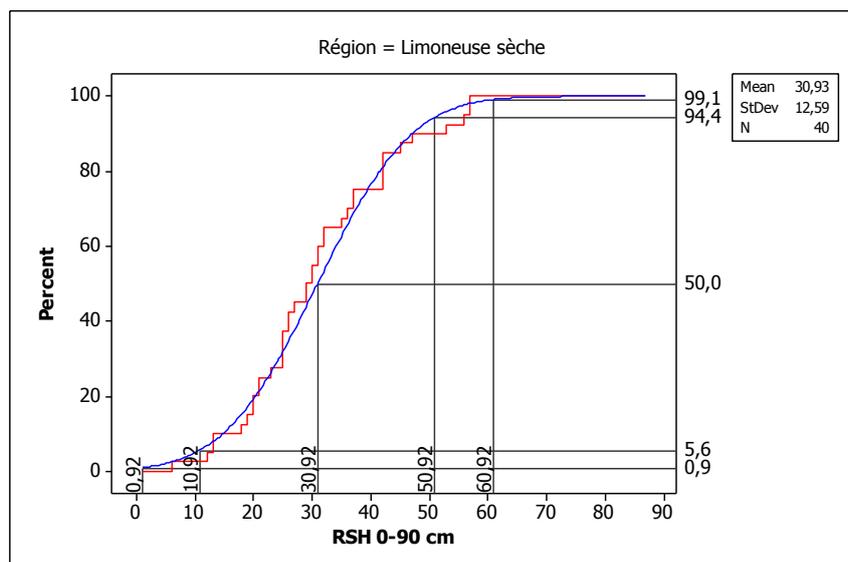


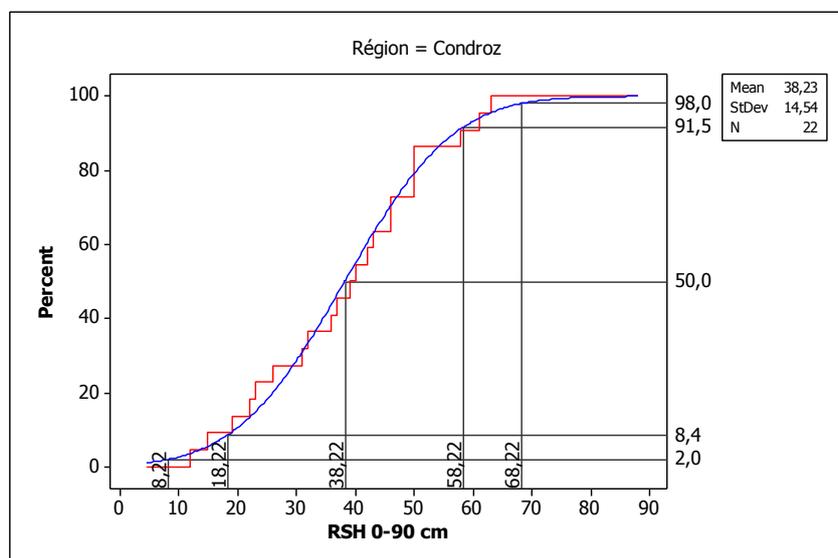
Figure 2-30. Distribution de fréquence des observations réalisées en Condroz sur un colza (culture en place)

Dans le cas d'une 'céréale après un précédent pauvre', la prise en compte de la région agricole améliore également la prédiction : en région limoneuse sèche, dans 11.2% des situations, l'erreur est inférieure à 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans 1.8% des situations, elle est inférieure à 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-31).



**Figure 2-31. Distribution de fréquence des observations réalisées en région limoneuse sèche sur une céréale après un précédent pauvre**

Dans le cas d'une 'céréale après un précédent riche', la prise en compte de la région agricole améliore également la prédiction : par exemple, en région limoneuse sèche, dans 17% des situations l'erreur est inférieure à 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et dans 4% des situations, elle est inférieure à 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (figure 2-32).



**Figure 2-32. Distribution de fréquence des observations réalisées en région limoneuse sèche sur une céréale après un précédent riche**

La condition nécessaire pour espérer une amélioration de la prédiction est de pouvoir disposer de plus d'une vingtaine d'observations par région. Cette condition n'est cependant pas suffisante, il faut également que la distribution de fréquence soit la plus verticale possible (majorité des valeurs proche de la médiane).

## 2 Les engrais de ferme

La prise en compte du type d'engrais de ferme permet également d'améliorer la qualité de la prédiction (figure 2-33, figure 2-34) :

- la valeur moyenne est adaptée au type d'engrais de ferme (exemple des fientes ou en l'absence d'apport d'engrais de ferme) et
- la probabilité d'une erreur supérieure à 20 ou à 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> est plus faible (distribution plus verticale que la figure 2-25).

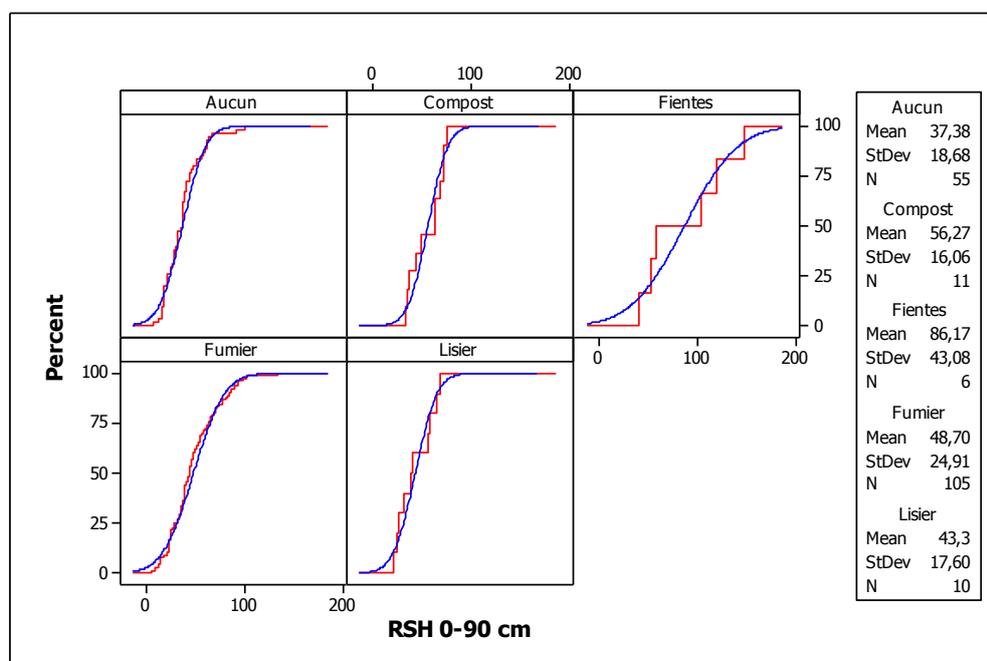


Figure 2-33. Distribution de fréquence des observations réalisées, par type d'engrais de ferme (apport en été-automne avec CIPAN), après une céréale paille enlevée

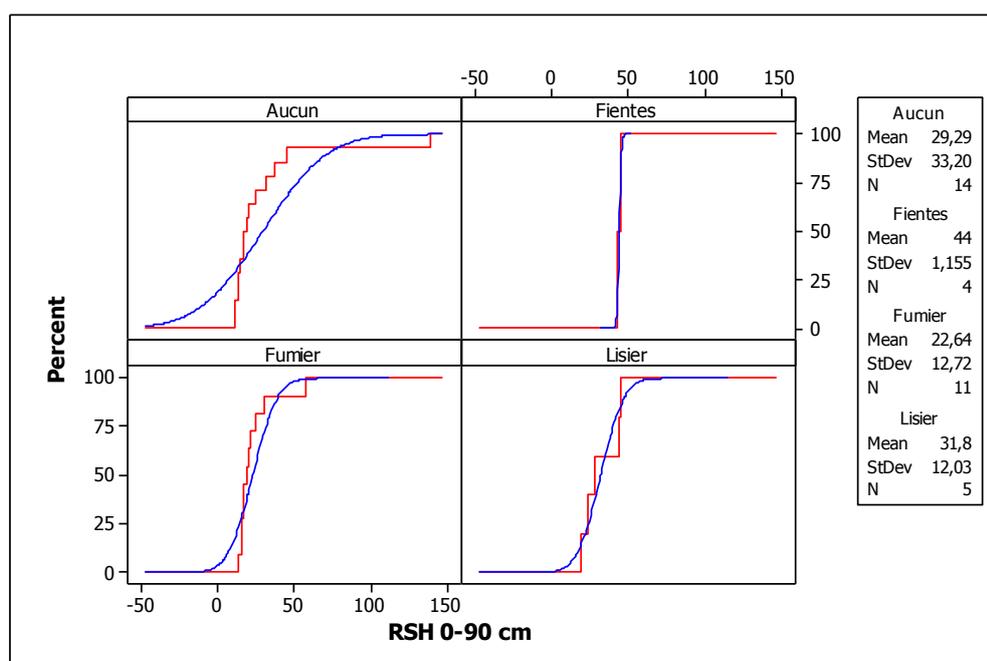


Figure 2-34. Distribution de fréquence des observations réalisées, par type d'engrais de ferme (apport en été-automne avec CIPAN), sur les parcelles de colza (culture en place)

## 5.5 Conclusion

Depuis 2009, la Structure d'encadrement Nitrawal rassemble les résultats de mesures de reliquat azoté commandés ou réalisés en sortie d'hiver (Reliquat Sortie d'Hiver – RSH) pour pouvoir disposer de moyennes en vue d'établir des conseils de fertilisation idoines.

En 2013, 776 observations ont été enregistrées dans la base de données. Parmi celles-ci, 200 ne concernaient que les couches 0-30 cm et 30-60 cm. L'objectif étant la prédiction sur une épaisseur de 90 cm, ces observations n'ont pas été utilisées dans le cadre de la présente réflexion.

La majorité des observations sont réalisées soit sur des parcelles de céréales en place (suite à la récolte d'un maïs, d'une pomme de terre, d'une betterave, d'un colza, ...), soit sur des parcelles où une céréale ou un maïs a été récolté l'année précédente.

La médiane des observations par culture varie de 20 (colza en place) à 55 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (précédent 'légume').

La performance de la prédiction du RSH est évaluée par l'observation de la distribution de fréquence (cumulée) des observations réalisées :

- une distribution des valeurs très étalée des observations conduit à une courbe oblique
- une distribution des valeurs très centrée autour d'une valeur moyenne ou médiane conduit à une courbe plus verticale.



Une approche par distribution de fréquence a été préférée à une approche sur base de la moyenne et de l'écart-type car la distribution des résultats est peu souvent normale et, dans ces conditions, l'utilisation et l'interprétation de l'écart-type sont fortement limitées.

L'analyse des résultats s'est faite par la détermination :

- du centile correspondant à la valeur de la médiane + 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et
- du centile correspondant à la valeur de la médiane + 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

Une erreur inférieure à 20 kg N-NO<sub>3</sub>/ha n'est préjudiciable ni d'un point de vue agronomique (perte de rendement) ni d'un point de vue environnemental (APL trop élevé) ; une erreur supérieure à 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> peut être préjudiciable sous un de ces deux angles.

Si les centiles ainsi déterminés sont très éloignés de la médiane, cela signifie que le risque d'erreur (en recourant à une valeur médiane pour établir un conseil de fertilisation) est faible.

Dans une première approche dite globale, c'est-à-dire en ne considérant que le facteur « culture précédente ou en place », on a pu déterminer que pour une culture en place (céréale ou colza), le risque d'une erreur supérieure à 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> est inférieure à 10%. Par contre, lorsque le sol est nu en sortie d'hiver, la probabilité d'une telle erreur est quasiment double.

Afin d'affiner la prédiction, les facteurs « région agricole » et « fertilisation organique » ont été étudiés.

La prise en compte de ces paramètres permet généralement d'améliorer plus ou moins fortement la qualité de la prédiction : une moyenne plus ciblée (précédent cultural - région agricole – fertilisation organique) et un risque d'erreur plus faible : pour la majorité des situations régulièrement rencontrées, dans moins de 10% des cas, voire moins de 5% des cas, l'erreur sera de plus 30 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>.

Ce pourcentage est établi sans tenir compte de la 'personnalité' de l'agriculteur à conseiller. En effet, dans certaines situations, le conseiller Nitrawal est à même de présager (soit parce qu'il dispose d'analyses réalisées pour cet agriculteur dans d'autres parcelles, soit sur base des dires de l'agriculteur) dans quelle partie de la distribution de fréquence le RSH estimé se trouvera.

Enfin, rappelons que ces estimations sont réalisées pour la couche 0-90 cm. Dans un certain nombre de situations (cas de la pomme de terre, de légumes, du maïs (en fonction de la date de semis)), il n'est nécessaire que de disposer d'un reliquat pour la couche 0-60 cm. Dans ce cas de figure, les mêmes risques d'erreur sont grosso modo divisés par 2.

En conclusion, il apparaît donc que la constitution et diffusion d'une synthèse de RSH constitue un outil efficace pour l'établissement de conseils de fertilisation idoines.

## **Annexe 3. Estimation d'un APL moyen et évolution au cours des soixante dernières années**

### **1 Introduction**

---

L'APL pouvant être considéré comme un indicateur agronomique (gestion de l'azote) et environnemental (lixiviation du nitrate), il est possible d'évaluer la pression de l'agriculture sur l'eau à l'échelle d'une parcelle, d'une exploitation agricole ou d'un territoire plus important (région agricole ou province).

Il peut dès lors être instructif de pouvoir comparer les valeurs observées 'aujourd'hui' à des valeurs mesurées il y a une vingtaine d'années, voire à des estimations lorsque la mesure du reliquat azoté n'existait pas encore.

L'objectif est d'évaluer si l'agriculture actuelle a une empreinte 'nitrate' plus légère ou plus lourde que dans le passé, en se remémorant que

- la dégradation de la qualité des eaux souterraines a débuté au milieu des années septante ;
- depuis quelques années la concentration en nitrate n'augmente plus ;
- il faut entre 5 et 25 années<sup>6</sup> pour que l'effet d'un changement de pratiques se marque sur la qualité des eaux souterraines.

---

<sup>6</sup> dépendant de l'épaisseur et de la texture de la zone vadose et de l'importance de l'aquifère

## **2 Estimation de l'APL moyen en 2010**

---

Source : Contrôle APL

### **2.1 Introduction**

Le 14 février 2008, le Gouvernement wallon adopte un arrêté relatif au suivi, par des mesures de l'Azote Potentiellement Lessivable (APL) dans le sol, de la conformité des exploitations agricoles situées en zone vulnérable aux bonnes pratiques agricoles nécessaires à la protection des eaux contre la pollution par le nitrate à partir de sources agricoles. Cet arrêté est entré en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et fixe les modalités de l'évaluation des APL mesurés dans les exploitations situées en zone vulnérable en région wallonne. Il s'agit là d'une mesure importante s'inscrivant dans le cadre de la révision en 2007 du Programme de Gestion Durable de l'Azote en Agriculture (PGDA), transposition de la directive européenne Nitrates dans la législation belge.

Concrètement, chaque année, l'Administration sélectionne au moins 5% des agriculteurs (~600 agriculteurs) situés en zone vulnérable. Dans chacune des exploitations, l'APL est mesuré dans trois parcelles. Les résultats d'APL sont comparés à des valeurs de référence établies dans des parcelles de la culture concernée appartenant à un réseau de fermes de référence, le Survey Surfaces Agricoles (SSA), suivi par les membres scientifiques (GxABT et UCL) de la Structure d'encadrement Nitrawal. Si les résultats ne s'avèrent pas conformes par rapport aux valeurs de référence, l'agriculteur doit entrer dans un programme d'observation au cours duquel les résultats doivent s'améliorer, faute de quoi des amendes sont prévues.

La campagne de contrôle menée en 2012 est la cinquième campagne "effective" de contrôle des résultats APL. L'objectif de ce dossier est d'analyser les résultats de la campagne 2012 en vue d'évaluer la performance des agriculteurs contrôlés en matière de gestion de l'azote, en tenant compte de facteurs tels que la taille de la parcelle, la zone géographique dans laquelle elle se situe, la culture en place, le taux de liaison au sol (LS) de l'exploitation,...

Un retour sur les contrôles des années précédentes permet également de suivre l'évolution de la performance des agriculteurs contrôlés en matière de gestion de l'azote.

Enfin, l'établissement d'un APL moyen, à partir des données du contrôle, et tenant compte de la superficie de chaque classe de culture dans l'assolement de chaque région agricole permet de donner une vue du risque global de lixiviation du nitrate vers les eaux souterraines.

### **2.2 Le contrôle APL**

#### **2.2.1 Sélection des exploitations**

Chaque année, l'Administration procède à la sélection de minimum 5% d'exploitations agricoles parmi celles déclarant plus de 20% de leur superficie agricole en zone vulnérable. Au sein des exploitations choisies, trois parcelles identifiées par l'Administration font l'objet d'un prélèvement d'échantillons de sol entre le 15 octobre et le 30 novembre, en vue d'y doser l'APL. Une parcelle de remplacement est également choisie. Les échantillons prélevés sont analysés par un laboratoire agréé. Le coût de ces analyses est pris en charge par la Région wallonne. Chaque agriculteur peut également faire échantillonner à ses frais par un laboratoire agréé de son choix une ou plusieurs parcelles précédemment échantillonnées, en vue d'une analyse contradictoire.

#### **2.2.2 Conformité des APL**

Chaque APL est comparé à la valeur de l'APL de référence de la classe correspondante, augmenté de la marge de tolérance, à la même date de prélèvement. Pour être jugé conforme, l'APL mesuré doit être inférieur au seuil d'intervention à cette date de prélèvement.

### 2.2.3 Evaluation de l'exploitation

L'évaluation de l'exploitation est positive si au moins deux APL mesurés sur trois sont conformes. Le contrôle est alors clôturé. L'exploitation est toutefois susceptible de figurer parmi les exploitations contrôlées l'année suivante. Si par contre au moins deux APL sur trois sont non conformes, l'évaluation est négative et l'exploitation entre alors dans un programme d'observation.

### 2.2.4 Le programme d'observation

La durée du programme d'observation est de deux ans minimum (figure 3-1). Pendant ce programme d'observation, chaque année, trois nouveaux APL sont mesurés. Pour sortir du programme d'observation, il faudra obtenir une évaluation positive, c'est-à-dire deux APL conformes sur trois, pendant deux années consécutives. Si par contre dans le programme d'observation, l'exploitation obtient une évaluation négative à trois reprises, l'agriculteur s'expose alors à une amende pouvant atteindre 120€ par hectare de SAU déclaré à la PAC. Durant le programme d'observation, le coût des analyses est à la charge de l'agriculteur excepté le coût de celles réalisées l'année de sortie du programme d'observation.

CONTRÔLE	PROGRAMME D'OBSERVATION				
2008	2009	2010	2011	2012	2013
			SANCTION		
				SANCTION	
					SANCTION
		SORTIE DU PROGRAMME D'OBSERVATION			
				SORTIE DU PROGRAMME D'OBSERVATION	
					SORTIE DU PROGRAMME D'OBSERVATION

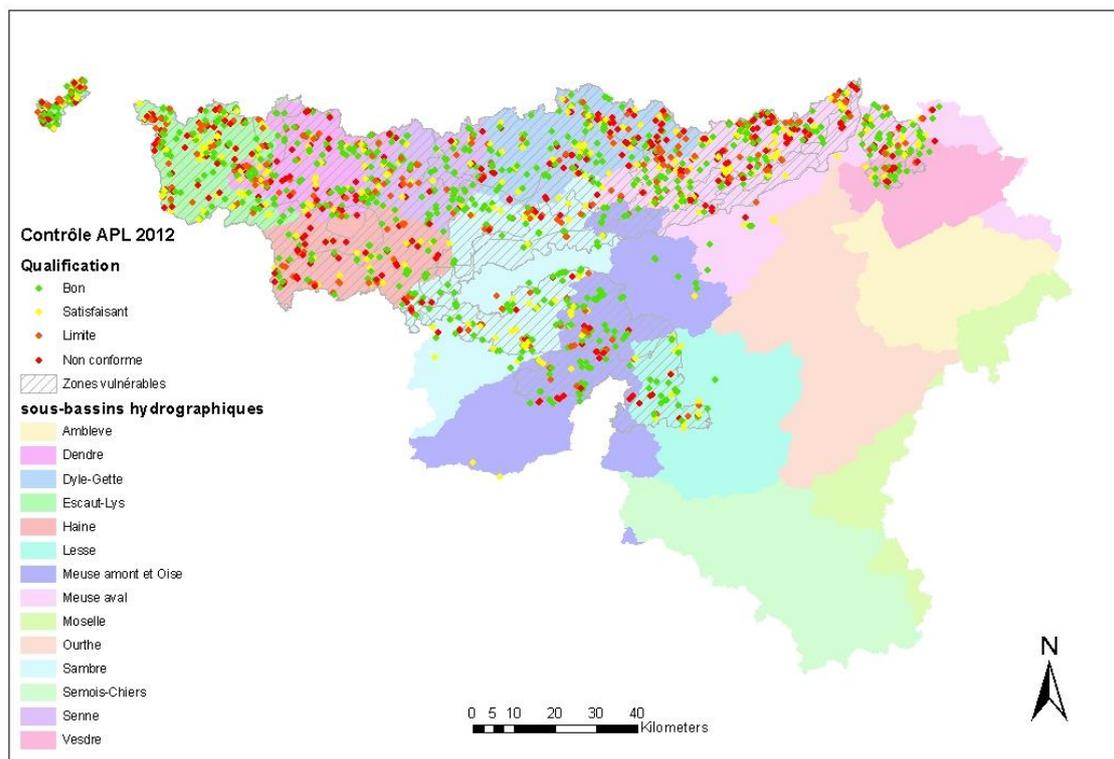
- Evaluation négative : 2 APL sur 3 sont non conformes au cours d'une même année
- Evaluation positive : 2 APL sur 3 sont conformes au cours d'une même année

Figure 3-1. Déroulement du programme d'observation.

## 2.3 Les résultats du contrôle 2012

### 2.3.1 Répartition spatiale des parcelles contrôlées

La figure 3-2 présente la répartition des parcelles contrôlées en 2012 en zone vulnérable de la région wallonne ainsi que leur conformité ou non. On voit que l'échantillonnage est réparti de manière homogène dans l'ensemble des zones vulnérables en région wallonne. Quelques parcelles contrôlées se trouvent hors zone vulnérable.



**Figure 3-2. Répartition et conformité des parcelles contrôlées en 2012.**

### 2.3.2 Distribution des échantillons

Le maïs (classe A4) est la classe de culture la plus souvent contrôlée en 2012 (figure 3-3), suivie par les céréales sans (classe A3) et avec CIPAN (classe A2), ces trois classes représentant plus de 75% des parcelles échantillonnées. La distribution des effectifs au sein des différentes classes est relativement constante depuis 2010. L'année 2009 se démarquait des autres années puisque 40% des parcelles sélectionnées étaient des prairies (classe A8) contre 10% maximum depuis.

**Tableau 3-1. Correspondance des classes de culture.**

Classe	Culture
A1	Betterave
A2	Céréale avec CIPAN
A3	Céréale sans CIPAN
A4	Maïs
A5	Pomme de terre
A6	Colza
A7	Légume
A8	Prairie
A0	Non-classé

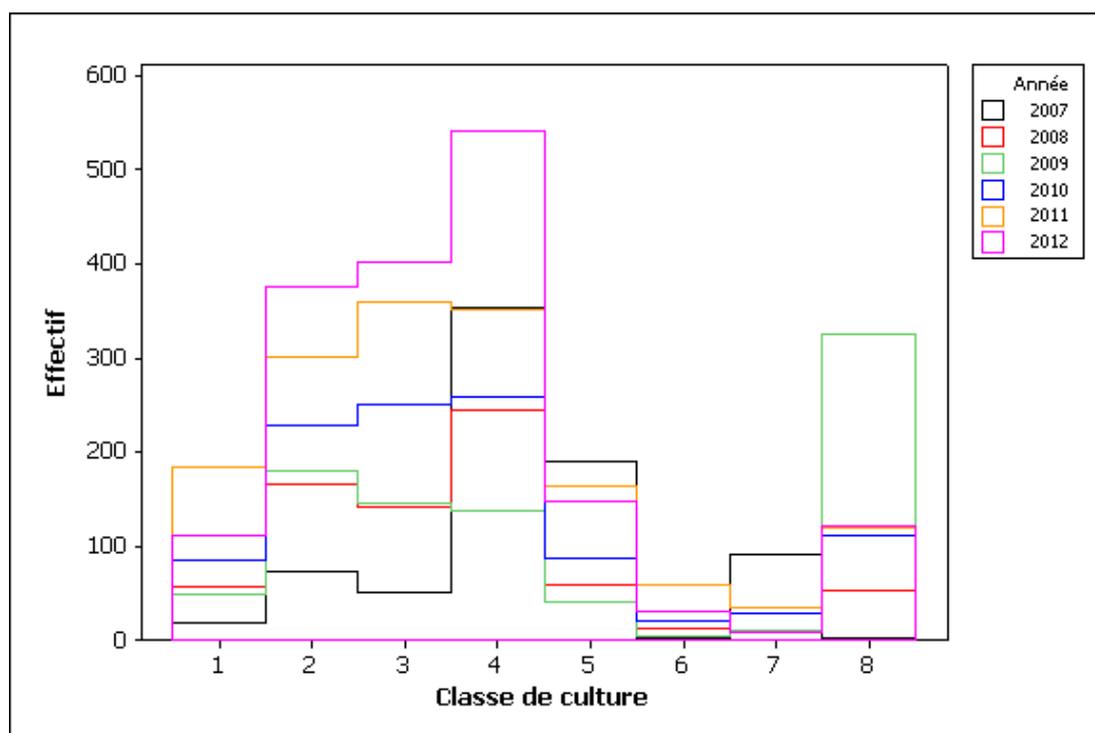


Figure 3-3. Distribution des cultures échantillonnées depuis 2007.

### 2.3.3 Résultat global

#### 1 Résultat 2012

Au cours de la campagne 2012, 1743 parcelles ont été contrôlées dans 581 exploitations entre le 15 octobre et le 19 décembre. Parmi ces 1743 parcelles :

- 363 sont qualifiées de non conformes (21% du total),
- 286 sont qualifiées de limites (16% du total),
- 319 sont qualifiées de satisfaisantes (18% du total),
- 775 sont qualifiées de bonnes (45% du total).

507 exploitations parmi les 581 contrôlées (soit un pourcentage de 87%) ont au moins 2 parcelles sur 3 conformes et n'entrent donc pas dans le programme d'observation.

En 2012, les exploitations agricoles qui ont fait l'objet d'un contrôle APL ont été choisies selon trois modes de sélection :

- les exploitations (410) sélectionnées de manière aléatoire,
- les exploitations (39) sélectionnées manuellement par l'administration selon un critère de suspicion de gestion déficiente de l'azote et
- les exploitations (132) en 'observation APL' (suite à une évaluation négative l'(les) année(s) précédente(s)).

On peut ainsi comparer les résultats (conformité ou non) par catégorie d'exploitation. En première approche et avec les réserves liées aux légères différences de distribution des classes de culture en fonction de la catégorie de l'exploitation, il apparaît, de façon assez surprenante, qu'en 2012, les résultats des exploitations en observation APL sont globalement moins bons que ceux observés dans les exploitations sélectionnées de manière aléatoire (figure 3-4). 84% des exploitations en 'observation APL' sont cependant déclarées conformes en 2012, alors que toutes celles-ci avaient été déclarées non conformes antérieurement. Ce constat amène donc à dire que les agriculteurs soumis au programme

d'observation APL ont amélioré leur gestion de l'azote par rapport aux années précédentes (ce qui est l'objectif du programme d'observation), sans pour autant atteindre les résultats des agriculteurs sélectionnés aléatoirement.

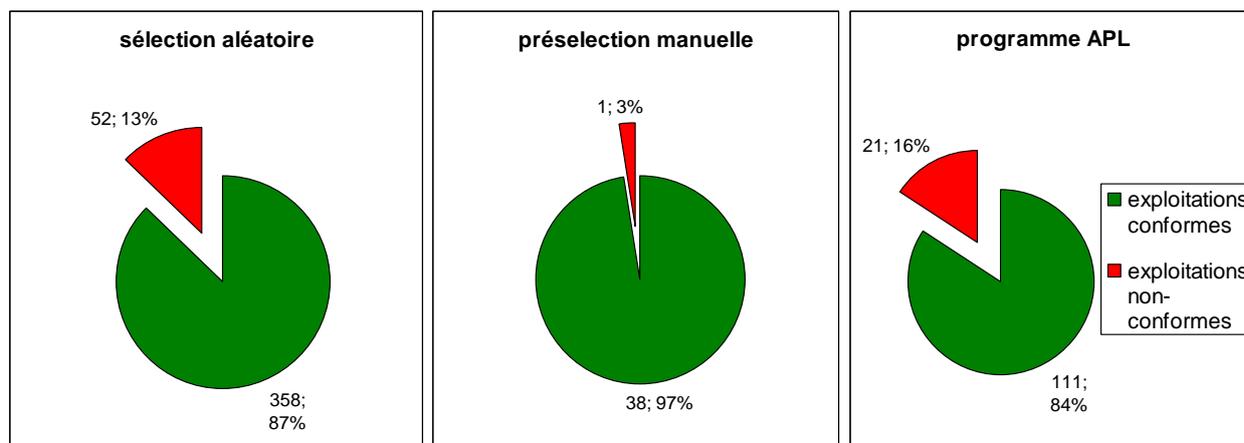


Figure 3-4. Distribution de la conformité de l'exploitation en fonction du mode de sélection.

## 2 Evolution par rapport aux années précédentes

Les résultats obtenus en 2012 sont comparés à ceux obtenus depuis 2008 (**tableau 3-2**). Les résultats obtenus cette année se rapprochent de ceux obtenus en 2009, alors que la distribution des échantillons était sensiblement différente (proportion de prairies plus importante en 2009, cf 0). En ce sens, les résultats de 2012 sont à comparer avec ceux de 2010 et 2011 et indiquent une amélioration des résultats en 2012, par rapport à ceux-ci, tout au moins en ce qui concerne les exploitations sélectionnées aléatoirement.

Dans les exploitations concernées par le programme d'observation APL, l'amélioration est moins nette, avec un pourcentage d'exploitations évaluées positivement sensiblement comparable aux deux années précédentes.

Tableau 3-2. Evolution des résultats globaux des contrôles de 2008 à 2012.

	2008	2009	2010	2011	2012
<b>Pourcentage d'exploitations avec une évaluation positive (au moins 2 parcelles sur 3 conformes)</b>	73%	89%	83%	80%	87%
dans les exploitations sélectionnées aléatoirement	/	90%	82%	80%	87%
dans les exploitations en observation APL	/	89%	86%	82%	84%
<b>Pourcentage de parcelles conformes</b>	68%	81%	75%	72%	79%
dans les exploitations sélectionnées aléatoirement	/	81%	74%	72%	80%
dans les exploitations en observation APL	/	84%	79%	73%	75%

## 2.3.4 Résultats par culture

### 1 Classe A1 (betterave)

La figure 3-5 et le tableau 3-3 illustrent la dispersion des résultats observés pour cette culture lors du contrôle 2012.

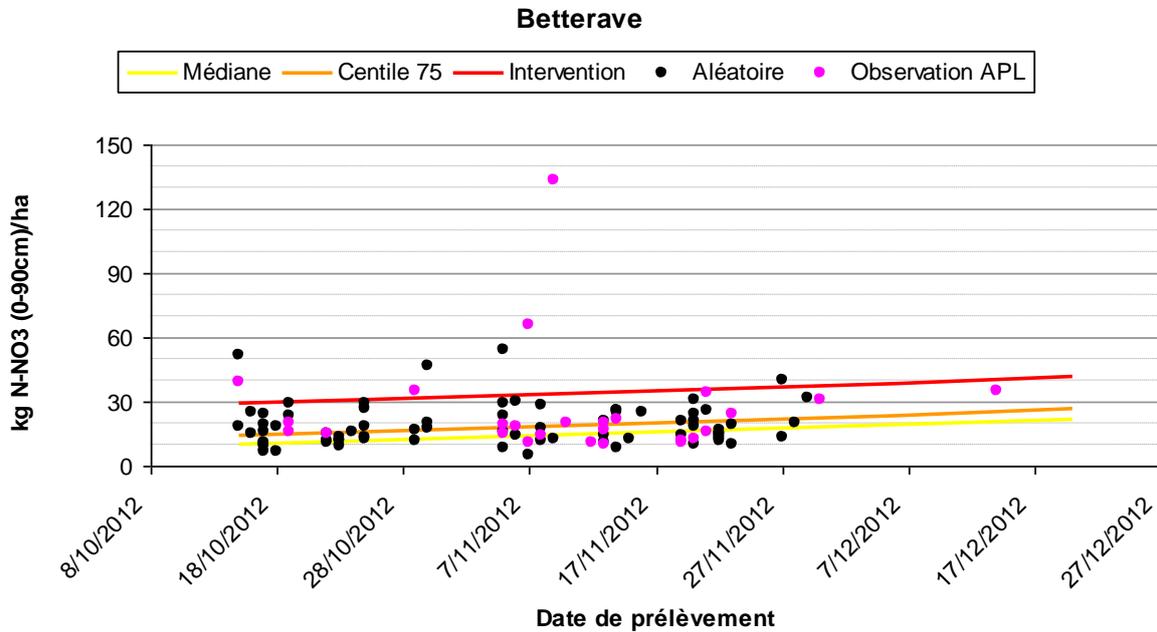


Figure 3-5. Résultats APL sur les parcelles de betterave contrôlées en 2012.

Tableau 3-3. Variabilité des APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles de betterave contrôlées en 2012.

Variable	Origine	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Résultat total	aléatoire	75	18,82	9,68	5,00	12,05	16,00
	Progr. obs. APL	26	26,02	25,07	10,00	13,73	18,50
Variable	Origine	Q3	Maximum				
Résultat total	aléatoire	24,00	53,91				
	Progr. obs. APL	31,69	133,00				

Le tableau 3-3 synthétise les observations réalisées pour la culture de betterave. L'APL moyen est plus élevé dans les parcelles des exploitations en observation APL que dans les parcelles des exploitations sélectionnées de manière aléatoire ; les APL moyens sont cependant faibles en valeur absolue et ne sont cependant pas significativement différents (Test t – p-value = 0,165). On peut noter une valeur particulièrement élevée (133 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans une parcelle d'une exploitation en 'observation APL'.

## 2 Classe A2 (céréales avec CIPAN)

La figure 3-6 et le tableau 3-4 illustrent la dispersion des résultats observés pour cette classe de culture lors du contrôle 2012.

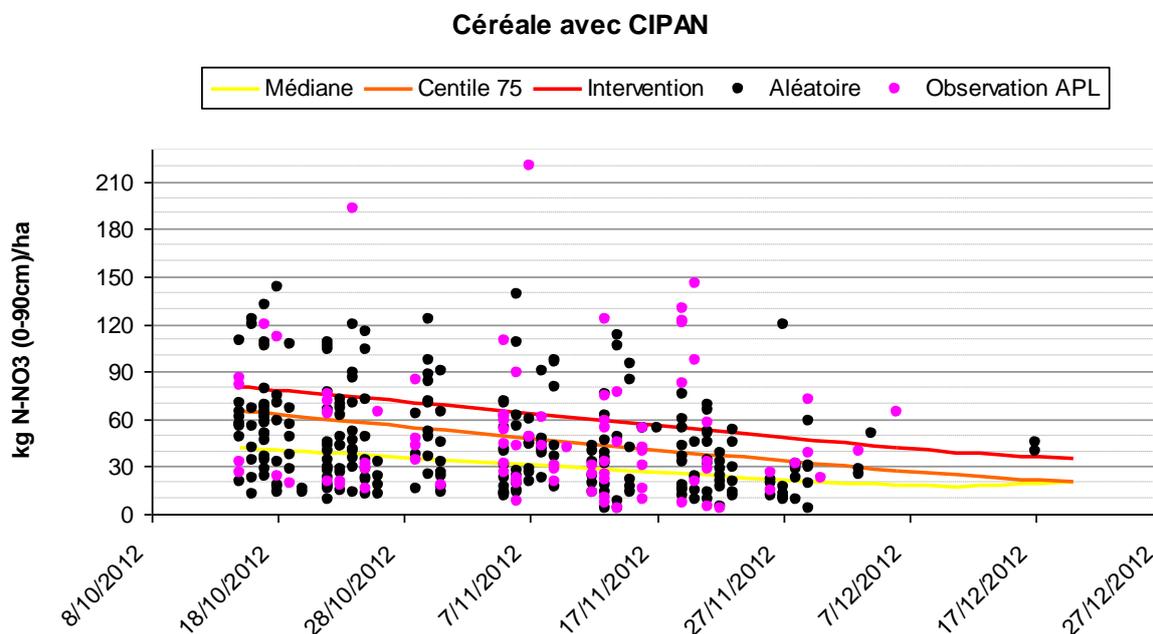


Figure 3-6. Résultats APL sur les parcelles de céréale avec CIPAN contrôlées en 2012.

Tableau 3-4. Variabilité des APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles de céréales avec CIPAN contrôlées en 2012.

Variable	Origine	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Résultat total	aléatoire	259	45,17	29,75	3,00	21,89	39,00
	Progr. obs. APL	92	50,22	39,97	3,00	22,19	39,66
Variable	Origine	Q3	Maximum				
Résultat total	aléatoire	62,28	143,07				
	Progr. obs. APL	64,00	220,00				

Le tableau 3-4 synthétise les observations réalisées pour la classe « céréales avec CIPAN ». La moyenne et la dispersion des résultats sont plus élevées dans les parcelles en « observation APL » que dans les parcelles « aléatoires ». La différence d'APL moyen n'est cependant pas significative, selon les conclusions du test t de Student (p-value = 0,270). On peut noter deux valeurs particulièrement élevées (> 180 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans deux parcelles d'exploitations en 'observation APL'.

### 3 Classe A3 (céréale sans CIPAN)

La figure 3-7 et le tableau 3-5 illustrent la dispersion des résultats observés pour cette classe de culture lors du contrôle 2012.

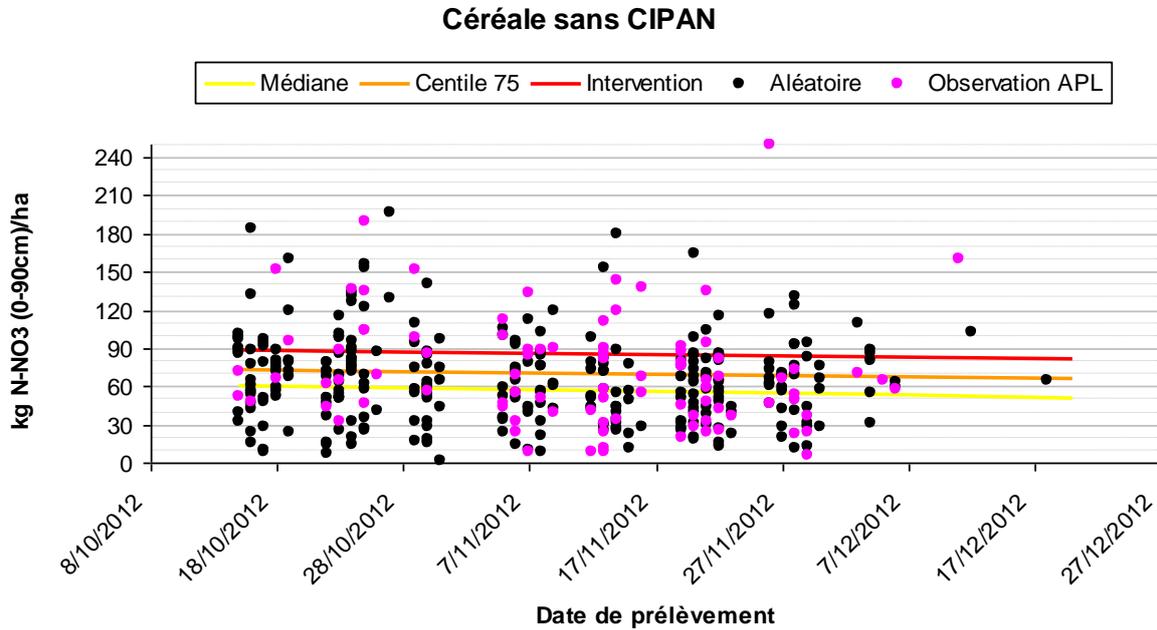


Figure 3-7. Résultats APL sur les parcelles de céréale sans CIPAN contrôlées en 2012.

Tableau 3-5. Variabilité des APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles de céréale sans CIPAN contrôlées en 2012.

Variable	Origine	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Résultat total	aléatoire	291	64,58	33,35	2,00	41,72	62,89
	Progr. obs. APL	92	70,51	42,77	5,00	41,25	65,01
Variable	Origine	Q3	Maximum				
Résultat total	aléatoire	82,00	197,26				
	Progr. obs. APL	89,78	250,00				

Le tableau 3-5 synthétise les observations réalisées pour la classe « céréales sans CIPAN ». Comme pour la classe « céréales avec CIPAN », la moyenne est plus élevée de ~ 5 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> dans les exploitations 'en observation APL'. La dispersion des résultats y est également plus importante. Le test t de Student renseigne que la différence d'APL moyen n'est pas significative (p-value = 0,225). On peut noter plusieurs valeurs particulièrement élevées (> 180 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans des parcelles d'exploitations en 'observation APL' et sélectionnées aléatoirement.

#### 4 Classe A4 (maïs)

La figure 3-8 et le tableau 3-6 illustrent la dispersion des résultats observés pour cette culture lors du contrôle 2012.

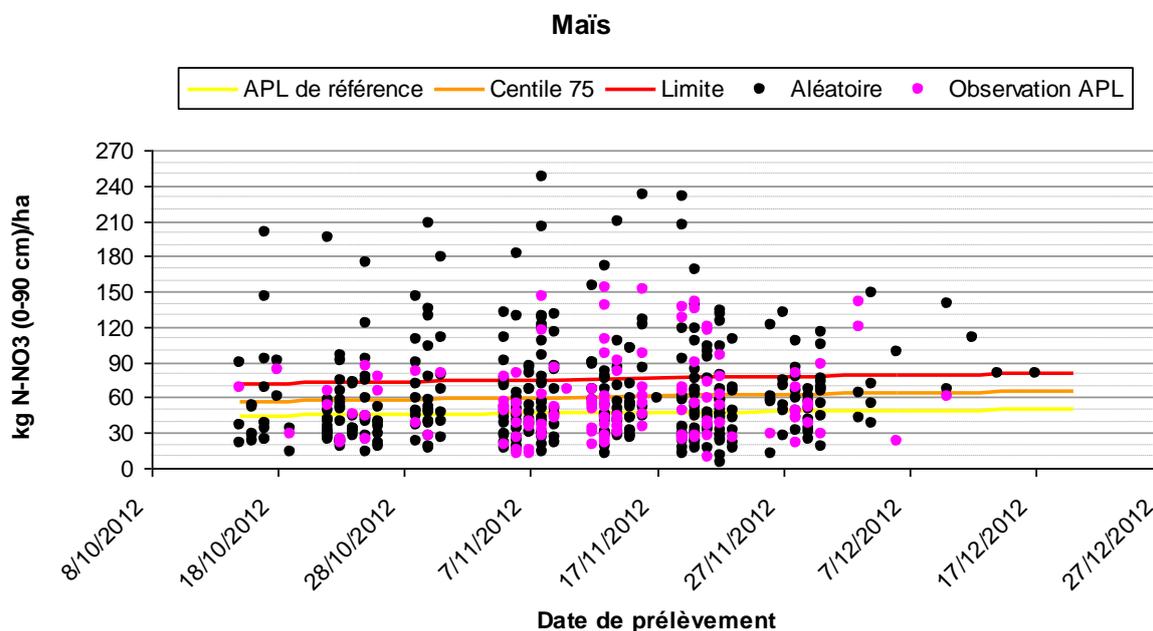


Figure 3-8. Résultats APL sur les parcelles de maïs contrôlées en 2012.

Tableau 3-6. Variabilité des APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles de maïs contrôlées en 2012.

Variable	Origine	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Résultat total	aléatoire	368	63,70	49,91	3,86	31,83	50,81
	Progr. obs. APL	129	56,84	33,67	9,00	31,50	48,92
Variable	Origine	Q3	Maximum				
Résultat total	aléatoire	77,00	523,16				
	Progr. obs. APL	71,18	152,80				

Le tableau 3-6 synthétise les observations réalisées pour la classe « maïs ». Contrairement aux autres classes de culture, la moyenne des APL est plus faible dans les parcelles des exploitations en observation APL que dans les parcelles des exploitations sélectionnées aléatoirement. La différence n'est cependant pas significative, selon les conclusions du test t de Student (p-value = 0,083). Il apparaît donc que les agriculteurs des exploitations en observation APL ont concentré leurs efforts en termes de gestion de l'azote sur leurs parcelles de maïs, au détriment des autres classes de culture.

A noter le maximum enregistré à 523 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> dans une parcelle d'une exploitation sélectionnée aléatoirement. Cette valeur est la plus élevée de toutes celles mesurées durant ce contrôle 2012.

## 5 Classe A5 (pomme de terre)

La figure 3-9 et le tableau 3-7 illustrent la dispersion des résultats observés pour cette culture lors du contrôle 2012.

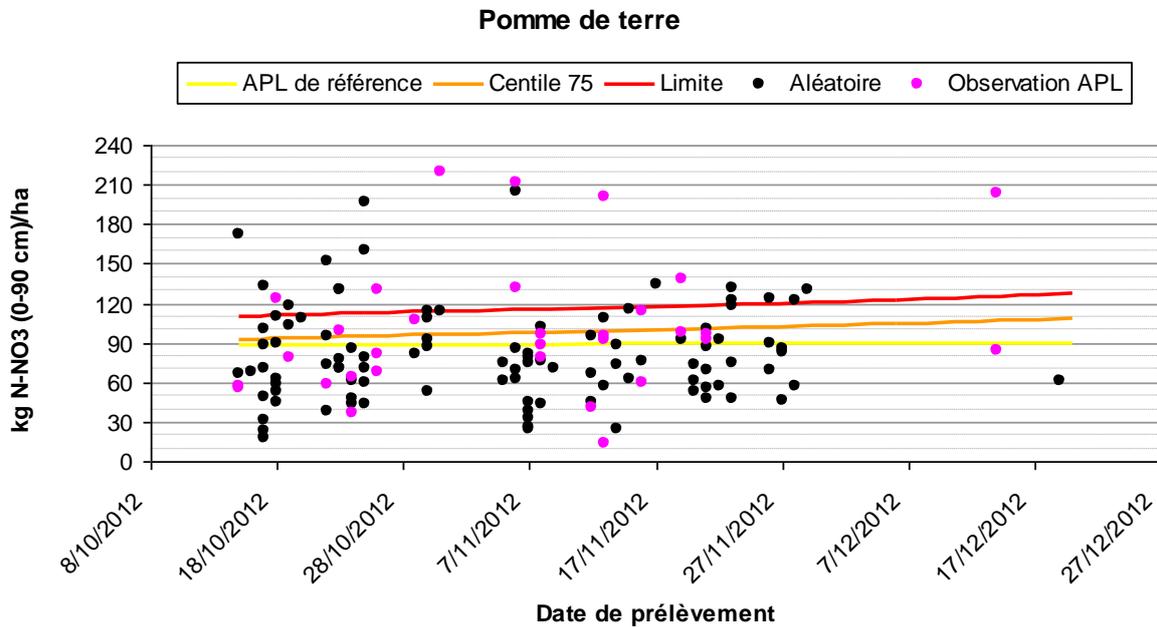


Figure 3-9. Résultats APL sur les parcelles de pomme de terre contrôlées en 2012.

Tableau 3-7. Variabilité des APL ( $\text{kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ) dans les parcelles de pomme de terre contrôlées en 2012.

Variable	Origine	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Résultat total	aléatoire	102	80,83	35,91	18,00	57,08	74,01
	Progr. obs. APL	31	100,33	51,05	13,80	63,98	92,66
Variable	Origine	Q3	Maximum				
Résultat total	aléatoire	101,23	205,00				
	Progr. obs. APL	123,09	219,02				

Le tableau 3-7 synthétise les observations réalisées pour la classe «pomme de terre ». La moyenne des APL est plus élevée dans les parcelles des exploitations en observation APL que dans les parcelles des exploitations sélectionnées aléatoirement, sans que cette différence ne soit significative, selon les conclusions du test t de Student ( $p\text{-value} = 0,054$ ). La dispersion des résultats, illustrée par l'écart type et la différence Q3-Q1, est plus élevée dans les exploitations en observation APL que dans les exploitations sélectionnées aléatoirement.

## 6 Classe A6 (colza)

La figure 3-10 et le tableau 3-8 illustrent la dispersion des résultats observés pour cette culture lors du contrôle 2012.

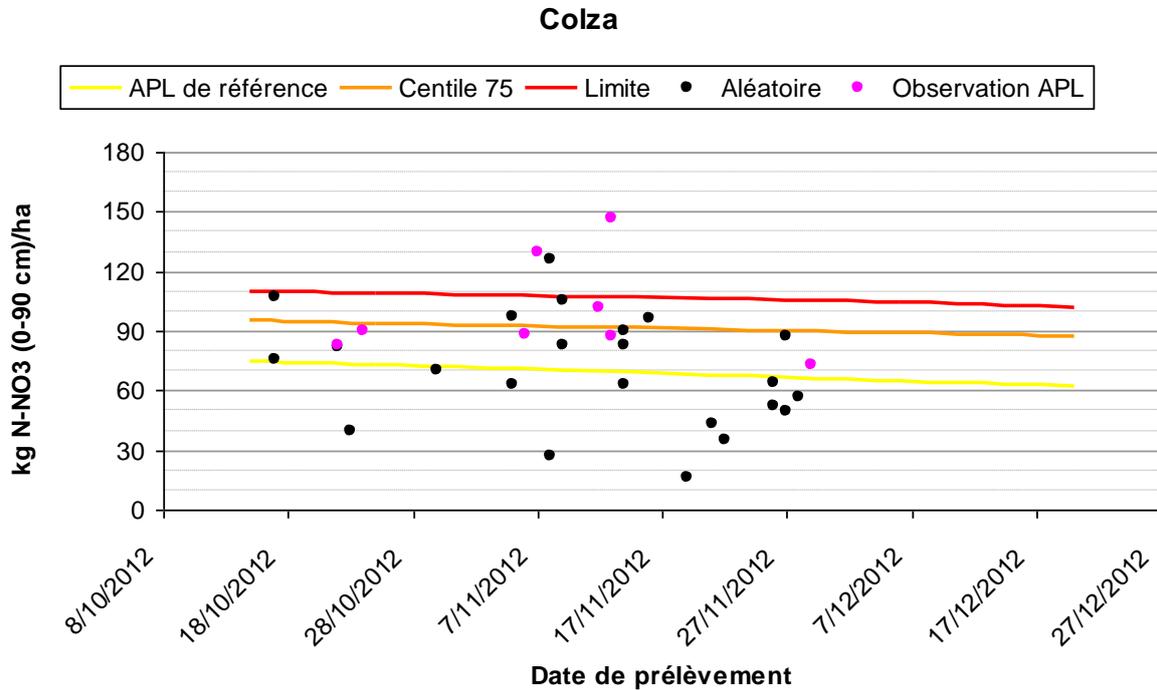


Figure 3-10. Résultats APL sur les parcelles de colza contrôlées en 2012.

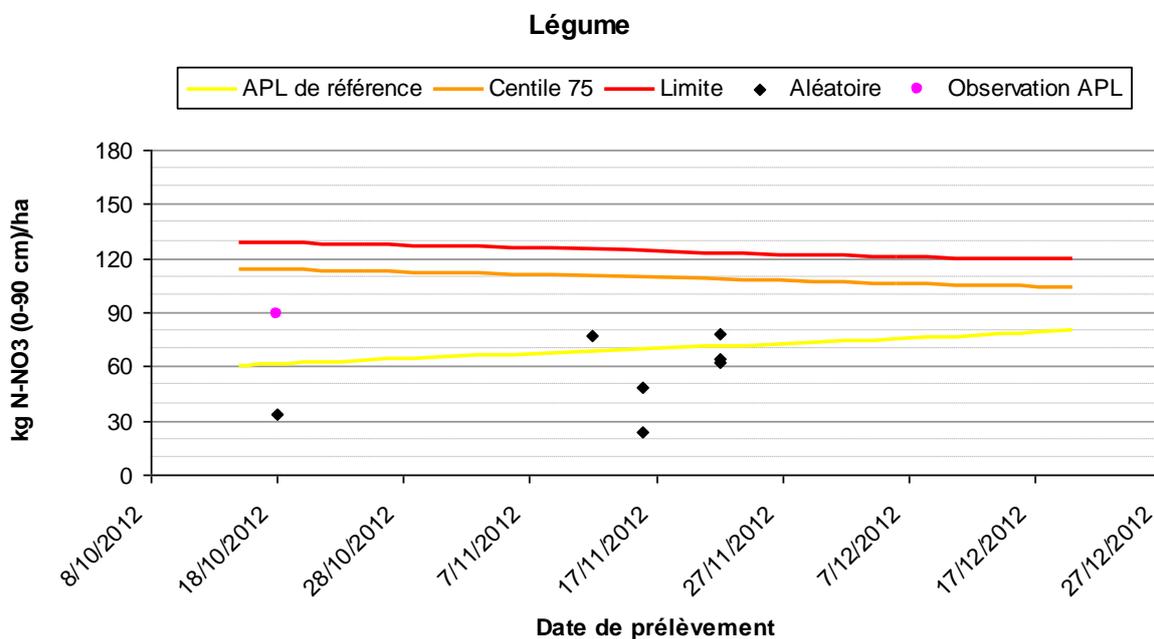
Tableau 3-8. Variabilité des APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles de colza contrôlées en 2012.

Variable	Origine	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Résultat total	aléatoire	23	70,07	27,85	15,91	49,24	70,00
	Progr. obs. APL	8	100,01	25,37	73,00	84,10	89,00
Variable	Origine	Q3	Maximum				
Résultat total	aléatoire	90,00	126,00				
	Progr. obs. APL	123,00	146,70				

Le tableau 3-8 synthétise les observations réalisées pour la classe « colza ». La moyenne des APL est plus élevée dans les parcelles des exploitations en observation APL que dans les parcelles des exploitations sélectionnées aléatoirement. Vu l'effectif réduit (8 observations) des parcelles de colza dans les exploitations en programme APL, il est hasardeux d'avancer d'autres interprétations.

7 *Classe A7 (légume)*

La figure 3-11 et le tableau 3-9 illustrent la dispersion des résultats observés pour cette culture lors du contrôle 2012.



**Figure 3-11. Résultats APL sur les parcelles de légume contrôlées en 2012.**

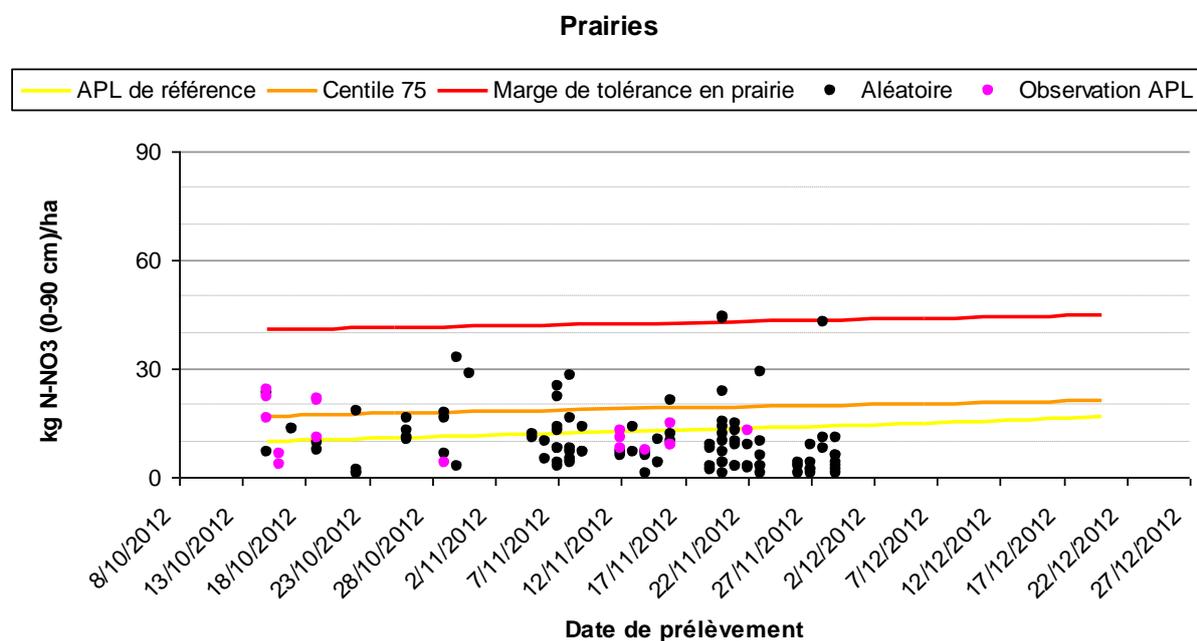
**Tableau 3-9. Variabilité des APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles de légume contrôlées en 2012.**

Variable	Origine	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3
Résultat total	aléatoire	8	74,8	58,3	24,0	37,5	63,3	77,5
	Progr. obs. APL	1	88,810	*	88,810	*	88,810	*
Variable	Origine	Maximum						
Résultat total	aléatoire	211,0						
	Progr. obs. APL	88,810						

Le tableau 3-9 synthétise les observations réalisées pour la classe «légumes». Vu l'effectif réduit des parcelles de légumes lors du contrôle 2012 et la gamme de cultures présentes dans cette classe, il est hasardeux d'avancer d'autres interprétations.

## 8 Classe A8 (prairie)

La figure 3-12 et le tableau 3-10 illustrent la dispersion des résultats observés pour cette culture lors du contrôle 2012.



**Figure 3-12. Résultats APL sur les prairies contrôlées en 2012.**

**Tableau 3-10. Variabilité des APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les prairies contrôlées en 2012.**

Variable	Origine	N	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
Résultat total	aléatoire	104	10,016	9,024	1,000	3,895	7,515
	Progr. obs. APL	17	12,64	6,49	3,42	7,63	11,00
Variable	Origine	Q3	Maximum				
Résultat total	aléatoire	13,000	44,470				
	Progr. obs. APL	18,79	24,04				

Le Tableau 3-10 synthétise les observations réalisées pour la classe «prairies». Les moyennes des APL sont proches dans les parcelles des exploitations en observation APL et dans celles des exploitations sélectionnées aléatoirement. La différence n'est d'ailleurs pas significative, selon les conclusions du test t de Student (p-value = 0,158). La dispersion des résultats est légèrement plus élevée dans les exploitations sélectionnées aléatoirement que dans les exploitations en observation APL. Les valeurs d'APL les plus élevées pour cette classe sont à trouver dans les exploitations sélectionnées aléatoirement.

### 2.3.5 Comparaison inter-annuelle des résultats

La campagne de contrôle 2012 dans les parcelles des exploitations agricoles des zones vulnérables est la cinquième du genre. Le tableau 3-11 présente l'évolution, depuis la première campagne en 2008, des effectifs, des APL moyens ainsi que des pourcentages de conformité des parcelles « aléatoires » pour les différentes classes de culture.

**Tableau 3-11. Evolution des effectifs, des APL moyens (en kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) et pourcentages de conformité pour les différentes classes de culture depuis 2008.**

		2008	2009	2010	2011	2012
<b>A1 betterave</b>	Effectif	57	34	68	142	75
	Moyenne	27	38	30	38	19
	Conformité	91%	76%	90%	74%	95%
<b>A2 Céréales avec CIPAN</b>	Effectif	166	122	174	229	259
	Moyenne	55	33	46	34	45
	Conformité	55%	71%	78%	76%	81%
<b>A3 Céréales sans CIPAN</b>	Effectif	141	101	184	291	291
	Moyenne	69	68	56	68	65
	Conformité	65%	62%	68%	74%	77%
<b>A4 Maïs</b>	Effectif	245	83	192	261	368
	Moyenne	67	56	92	128	64
	Conformité	65%	86%	58%	51%	73%
<b>A5 Pomme de terre</b>	Effectif	59	23	64	127	102
	Moyenne	91	89	71	108	81
	Conformité	80%	78%	80%	87%	83%
<b>A6 Colza</b>	Effectif	13	3	19	44	23
	Moyenne	77	68	66	68	70
	Conformité	85%	67%	68%	86%	96%
<b>A7 Légumes</b>	Effectif	8	11	21	24	8
	Moyenne	98	120	94	116	75
	Conformité	75%	73%	81%	50%	88%
<b>A8 Prairies</b>	Effectif	53	202	91	112	104
	Moyenne	15	17	22	22	10
	Conformité	96%	97%	92%	90%	98%

Pour la culture de **betterave (A1)**, on peut voir qu'un effet "année" se marque sur l'APL moyen (de 19 à 38 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). On peut remarquer une bonne corrélation entre l'APL moyen et la proportion de parcelles conformes lors des différentes campagnes de contrôles ; ceci peut s'expliquer par le fait que les APL de référence restent relativement constants chaque année pour cette classe de culture. Les résultats de 2012 sont les meilleurs obtenus depuis le début des contrôles, aussi bien en termes d'APL moyen (19 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) que de conformité (95%).

Pour les **céréales avec CIPAN (A2)**, on observe également une certaine variabilité interannuelle (APL moyen de 33 à 55 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). L'influence des conditions climatiques sur le développement des CIPAN se marque donc sur les APL moyens. L'année la plus mitigée pour cette classe A2 était l'année 2008, avec 55% de conformité et un APL moyen de 55 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>. En 2012, l'APL moyen était plus élevé qu'en 2011 mais la proportion de parcelles conformes était cependant la plus élevée depuis 2008; l'explication se trouve dans l'APL de référence plus élevé en 2012 que les autres années.

Dans les parcelles de **céréales sans CIPAN (A3)**, on peut voir que l'APL moyen reste relativement stable au fil des contrôles (de 65 à 69 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>), excepté une diminution en 2010 (56 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). On peut observer que le pourcentage de parcelles conformes présente globalement une tendance à la hausse depuis 2008, signe que la gestion de l'azote par les agriculteurs s'améliore pour

cette classe de culture. Les résultats (APL moyen et conformité) obtenus en 2012 sont en amélioration par rapport à ceux de 2011.

On observe dans les résultats des parcelles de **maïs (A4)** un effet "année" assez marqué (APL moyen de 56 à 128 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Cette variabilité interannuelle se marque également dans les proportions de parcelles conformes (si l'APL moyen est élevé, le pourcentage de parcelles conformes est faible et inversement). Les résultats des contrôles 2010 et 2011 étaient mauvais dans les parcelles de maïs (APL moyens supérieurs à 90 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>, taux de conformité inférieurs à 60%). Les résultats sont nettement meilleurs en 2012, signe des efforts réalisés par les agriculteurs dans le sens d'une meilleure gestion de l'azote sur leurs parcelles de maïs.

Les résultats dans les parcelles de **pomme de terre (A5)** montrent que la proportion de parcelles conformes reste stable au cours du temps, malgré une variabilité interannuelle de l'APL moyen parfois importante (de 71 à 108 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). L'évolution de l'APL moyen dans les parcelles contrôlées suit la même tendance que celle de l'APL de référence (valeurs faibles en 2010, élevées en 2011 et intermédiaires en 2008, 2009 et 2012). Ceci illustre le fait qu'il n'y a ni amélioration ni détérioration dans la gestion de l'azote par les agriculteurs au cours des années, même si l'APL moyen peut fortement varier d'une année à l'autre en fonction des conditions (climatiques notamment).

Les résultats en **colza (A6)** montrent une augmentation de l'APL moyen de 10 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> entre 2011 et 2012, sans impact sur le pourcentage de parcelles conformes ; le pourcentage calculé en 2012 est même le plus élevé de ceux rencontrés depuis le début des contrôles en 2008. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'APL de référence était élevé en 2012 pour cette classe de culture. L'effectif des observations étant réduit pour la classe A6 lors des différents contrôles, une comparaison plus poussée des résultats n'a pas de sens.

Les résultats pour la classe **légumes (A7)** montrent une certaine variabilité interannuelle (APL moyen de 94 à 120 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Il semble que les résultats de 2012 soient particulièrement bons (APL moyen le plus faible et pourcentage de parcelles conformes le plus élevé). Cependant, vu le faible effectif des observations et la gamme de cultures présentes dans cette classe, une comparaison plus poussée de résultats n'a pas de sens.

Enfin, dans la classe **prairies (A8)**, après une hausse des APL moyens entre 2008 et 2011 et dans le même temps, une baisse du pourcentage de conformité des parcelles contrôlées, on observe une amélioration des résultats lors du contrôle 2012. L'APL moyen est très faible en 2012 (10 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) et la proportion de parcelles conformes très élevée (98%).

### 2.3.6 Conclusion

En 2012, de manière générale, les meilleurs résultats en termes de moyennes APL par culture sont observés dans les exploitations sélectionnées aléatoirement par rapport à ceux observés dans les exploitations en observation APL ; seuls les résultats de la classe de culture A4 (maïs) sont meilleurs dans les exploitations en observation APL. Il apparaît que les APL moyens dans les exploitations entrées dans le programme d'observation sont tirés vers le haut par quelques résultats particulièrement élevés.

En matière de conformité, les résultats obtenus en 2012 sont bons. La tendance de 2011 à 2012 indique une amélioration des résultats pour toutes les classes de culture, à l'exception de la classe « pomme de terre » où une légère diminution est observée. L'amélioration est particulièrement marquée par les classes de cultures « betterave », « maïs » et « prairies », pour lesquelles une diminution de l'APL moyen est également observée, marquant une amélioration dans la gestion de l'azote par une majorité d'agriculteurs.

### 2.3.7 Résultats en fonction des caractéristiques de la parcelle

Chaque parcelle contrôlée au cours de cette campagne 2012 présente des caractéristiques qui lui sont propres. Il est donc possible d'interpréter les résultats obtenus en fonction d'un certain nombre de ces caractéristiques pour en évaluer l'influence sur le caractère conforme ou non de la parcelle. Nous en avons retenu six :

1. la culture
2. la région agricole
3. la présence d'une CIPAN
4. l'échantillonneur
5. la taille des parcelles
6. le bassin hydrographique

#### 1 La culture

Les différentes cultures sont regroupées en huit classes en fonction de l'itinéraire cultural tel que présenté ci-dessus. Le tableau 3-12 rappelle le pourcentage de conformité des parcelles contrôlées en fonction de la classe de culture lors de la campagne de contrôle en 2012.

**Tableau 3-12. Pourcentage de parcelles contrôlées conformes et APL moyen en fonction de la classe de culture en 2012.**

Culture	Nb parcelles conformes	Nb total de parcelles	Proportion conformité	APL moyen
<b>A1 - Betterave</b>	<b>103</b>	<b>112</b>	<b>92%</b>	<b>22</b>
<b>A2 - Céréale avec CIPAN</b>	<b>297</b>	<b>377</b>	<b>79%</b>	<b>47</b>
<b>A3 - Céréale sans CIPAN</b>	<b>303</b>	<b>402</b>	<b>75%</b>	<b>65</b>
<b>A4 - Maïs</b>	<b>403</b>	<b>543</b>	<b>74%</b>	<b>61</b>
<b>A5 - Pomme de terre</b>	<b>120</b>	<b>148</b>	<b>81%</b>	<b>86</b>
<b>A6 - Colza</b>	<b>27</b>	<b>31</b>	<b>87%</b>	<b>78</b>
<b>A7 - Légume</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>89%</b>	<b>76</b>
<b>A8 - Prairie</b>	<b>119</b>	<b>121</b>	<b>98%</b>	<b>10</b>
<b>Total</b>	<b>1380</b>	<b>1743</b>	<b>79%</b>	<b>55</b>

On voit dans ce tableau que la classe « prairie » (A8) a logiquement obtenu, comme les autres années depuis le début du contrôle en 2008, le pourcentage de conformité le plus élevé, avec 98% de parcelles conformes, suivie par la betterave (A1) (92%). Par contre, les classes de cultures les moins favorables pour la conformité de la parcelle sont cette année le maïs (A4), avec 74% de parcelles contrôlées conformes et les céréales sans CIPAN (A3) (75% de parcelles conformes).

Il convient également de déterminer si le caractère conforme ou non de la parcelle est lié à la culture en place sur la parcelle. Pour cela, un test  $\chi^2$  d'indépendance a été réalisé sur les résultats de conformité des parcelles en fonction de la culture. Il s'agit d'un test statistique qui permet de contrôler l'indépendance d'un caractère vis-à-vis d'un autre (ici la conformité de la parcelle vis-à-vis de la classe de culture), par comparaison d'une valeur  $\chi^2_{\text{obs}}$  calculée à partir de fréquences théoriques attendues avec une valeur  $\chi^2$  trouvée dans des tables, avec un niveau de probabilité  $\alpha$  donné.

Le test  $\chi^2$  d'indépendance conclut à la non-indépendance des caractères « classe de culture » et « conformité de la parcelle » ( $P = 0,000$ ).

On conclut donc que le caractère conforme ou non de la parcelle dépend de la classe de culture (en considérant un risque de première espèce  $\alpha = 0,001$ , degré très hautement significatif). Cette conclusion (dépendance de la conformité d'une parcelle vis-à-vis de la culture en place) avait déjà été mise en évidence au cours des campagnes de contrôle précédentes.

## 2 *La région agricole*

Les parcelles échantillonnées dans les exploitations contrôlées en 2012 se situaient dans 7 régions agricoles. Le tableau 3-13 présente la proportion de conformité des parcelles contrôlées ainsi que l'APL moyen en fonction de la région agricole en 2012.

**Tableau 3-13. Proportion de parcelles contrôlées conformes et APL moyen en fonction de la région agricole dans les exploitations contrôlées en 2012.**

Région agricole	Nb parcelles conformes	Nb total de parcelles	Proportion conformité	APL moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )
<b>Condroz</b>	<b>165</b>	<b>188</b>	<b>88%</b>	<b>47</b>
<b>Fagne</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>100%</b>	<b>35</b>
<b>Famenne</b>	<b>68</b>	<b>86</b>	<b>79%</b>	<b>45</b>
<b>Ardenne</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>100%</b>	<b>27</b>
<b>Région herbagère (Liège)</b>	<b>104</b>	<b>127</b>	<b>82%</b>	<b>49</b>
<b>Région limoneuse</b>	<b>868</b>	<b>1126</b>	<b>77%</b>	<b>58</b>
<b>Région sablo-limoneuse</b>	<b>166</b>	<b>207</b>	<b>80%</b>	<b>58</b>
<b>Total</b>	<b>1380</b>	<b>1743</b>	<b>79%</b>	<b>55</b>

La majorité des parcelles contrôlées en 2012 se situent dans la région limoneuse (près de 2/3 des parcelles). 100% des parcelles contrôlées en Fagne et en Ardenne étaient conformes mais l'effectif était cependant trop faible pour avancer une quelconque analyse. Les pourcentages de parcelles conformes selon les régions agricoles variaient de 77% (région limoneuses) à 88% (Condroz). Par rapport au contrôle 2011, les résultats se sont améliorés pour toutes les régions agricoles, mis à part la région sablo-limoneuse où le résultat était stable. L'amélioration est notable pour la région herbagère liégeoise (de 67% à 82% de conformité) et dans le Condroz (de 74% à 88% de conformité). L'amélioration des résultats en maïs apporte certainement une partie d'explication.

Le test  $\chi^2$  d'indépendance conclut à la non-indépendance des caractères « région agricole » et « conformité de la parcelle » (P = 0,017).

On peut donc conclure que le caractère conforme ou non de la parcelle dépend de la région agricole dans laquelle elle se situe (en considérant un risque de première espèce  $\alpha = 0,05$ , degré significatif). La non-indépendance de la conformité des parcelles contrôlées vis-à-vis de la région agricole dans laquelle elles se situent avait été mise en évidence, à des degrés divers, au cours de certaines campagnes passées (en 2008 et 2010 mais pas en 2009 et 2011).

## 3 *La présence d'une CIPAN*

L'influence de la présence ou non d'une CIPAN après la culture principale a également été testée. Le tableau 3-14 présente la proportion de conformité des parcelles contrôlées en fonction de la présence ou non d'une CIPAN en 2012.

**Tableau 3-14. Proportion de parcelles contrôlées conformes en fonction de la présence d'une CIPAN en 2012.**

CIPAN après céréale	Nb parcelles conformes	Nb total de parcelles	Proportion conformité	APL moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )
<b>Présence</b>	<b>210</b>	<b>259</b>	<b>81%</b>	<b>45</b>
<b>Absence</b>	<b>224</b>	<b>291</b>	<b>77%</b>	<b>65</b>
<b>Total</b>	<b>434</b>	<b>550</b>	<b>79%</b>	<b>55</b>

On peut voir que le semis d'une CIPAN après la céréale a permis d'augmenter le pourcentage de conformité et de diminuer l'APL moyen. Le test  $\chi^2$  d'indépendance conclut cependant à l'indépendance des caractères « présence d'une CIPAN après céréale » et « conformité de la parcelle » ( $P = 0,244$ ).

On conclut que, dans le cadre du contrôle 2012, le fait d'avoir implanté une CIPAN après céréale a permis de réduire l'APL moyen sur ces parcelles mais n'a eu qu'une influence limitée sur le caractère conforme ou non de la parcelle en raison de la différenciation des 2 classes « céréales avec CIPAN » et « céréales sans CIPAN » utilisées pour l'établissement des APL de référence. La réorganisation en 2013 des classes C2 et C3 modifiera certainement cette approche.

Le tableau 3-14 nous renseigne également que sur les 550 parcelles de céréales contrôlées en 2012, 291 n'étaient pas suivies d'une CIPAN. Parmi ces 291 parcelles, 72 étaient suivies par une culture de printemps. Au final, 78% ( $259/(259+72)$ ) des parcelles emblavées en céréales et suivies l'année suivante d'une culture de printemps ont été couvertes par une CIPAN. Etant donné que :

- l'échantillonnage parmi les parcelles de céréales est aléatoire et simple,
- dans ce cas, la fréquence relative de l'échantillon est un estimateur du maximum de vraisemblance de la proportion correspondante de la population (Dagnelie, 1998),

on peut considérer que la proportion de parcelles de céréales suivies d'une CIPAN en région wallonne s'élève à 78%, avec un intervalle de confiance égal à 4,4% pour un niveau de probabilité  $\alpha = 0,05$ . Cette valeur de 78% est conforme à celle obtenue en 2011 (81%) et montre que l'implantation d'une CIPAN est une pratique reconnue par les agriculteurs pour réduire les pertes de nitrate vers les eaux souterraines.

Par ailleurs, le PGDA prévoit que 75% des surfaces récoltées avant le 1<sup>er</sup> septembre et suivies l'année suivante d'une culture de printemps doivent être couvertes par des CIPAN implantées avant le 15 septembre. On peut donc estimer, d'après l'échantillonnage réalisé dans les parcelles de céréale pour le contrôle 2012, que cette proportion de 75% de couverture a été respectée en région wallonne cette année.

#### **4 L'échantillonneur**

A l'occasion du contrôle 2012, il a été possible de comparer les résultats obtenus au sein d'un même laboratoire d'analyses en fonction des échantillonneurs qui ont prélevé les carottes de sol dans les parcelles. Le tableau 3-15 présente les pourcentages de conformité des parcelles échantillonnées lors du contrôle 2012 en fonction des échantillonneurs au sein des différents laboratoires.

**Tableau 3-15. Pourcentage de parcelles conformes par échantillonneur.**

	CARAH (Ath)	CPAR (La Hulpe)	OPA (Ciney)	SPAA (Tinlot)
<b>Echantillonneur 1</b>	<b>67%</b>	<b>73%</b>	<b>88%</b>	<b>73%</b>
<b>Echantillonneur 2</b>	<b>58%</b>	<b>84%</b>	<b>86%</b>	<b>80%</b>
<b>Echantillonneur 3</b>	<b>71%</b>	<b>78%</b>	<b>93%</b>	<b>71%</b>
<b>Echantillonneur 4</b>	<b>81%</b>	<b>76%</b>	<b>86%</b>	<b>82%</b>
<b>Echantillonneur 5</b>	<b>79%</b>			
<b>Echantillonneur 6</b>	<b>80%</b>			
<b>Echantillonneur 7</b>	<b>88%</b>			

Un test d'indépendance a été réalisé afin de détecter d'éventuelles différences de conformité des parcelles entre échantillonneurs d'un même laboratoire. Il en ressort que le caractère conforme ou non d'une parcelle est indépendant de l'échantillonneur pour tous les laboratoires avec un risque de première espèce  $\alpha = 0,05$ . Ce test statistique n'a donc pas décelé d'anomalie dans les résultats du contrôle 2012 en fonction des échantillonneurs des différents laboratoires.

### 5 *La taille de la parcelle*

La superficie moyenne des parcelles contrôlées en 2012 s'élevait à 3,4 ha, valeur comparable à celle observée lors du contrôle 2011 (3,3ha en moyenne). Les superficies des parcelles contrôlées en 2010 sont comprises entre 0,5 ha (valeur min) et 16ha (valeur max).

Afin de tester la dépendance de la conformité d'une parcelle par rapport à sa taille, les parcelles contrôlées dans les exploitations sélectionnées de manière aléatoire en 2012 ont été réunies en 5 groupes en fonction de leur superficie. Les résultats sont repris dans le tableau 3-16.

**Tableau 3-16. Pourcentage de parcelles conformes en fonction de la taille de la parcelle dans les exploitations contrôlées en 2012.**

Taille parcelle	Nb parcelles conformes	Nb total de parcelles	Proportion conformité	APL moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )
<1 ha	50	58	86%	48
1 à 3 ha	723	947	76%	58
3 à 5 ha	319	397	80%	54
5 à 8 ha	183	216	85%	54
> 8 ha	105	125	84%	52
Total	1380	1743	79%	55

On observe que les parcelles de 1 à 3 ha obtiennent de moins bons résultats, tandis que les meilleurs résultats sont obtenus pour les parcelles dont la superficie ne dépassait pas 1 ha. Le test  $\chi^2$  d'indépendance conclut à la non-indépendance des caractères « taille de la parcelle » et « conformité de la parcelle » ( $P = 0,014$ ) avec un degré de signification  $\alpha = 0,05$ .

On peut donc en conclure que le caractère conforme ou non d'une parcelle n'était pas, en 2012, indépendant de sa superficie, avec un degré de signification significatif ( $\alpha = 0,05$ ) mais pas hautement significatif ( $\alpha = 0,01$ ). Cet enseignement avait déjà été mis en évidence à des degrés divers au cours des contrôles 2010 et 2011.

Plus que jamais, la présence de l'agriculteur est (au moins) utile pour indiquer à l'échantillonneur les inévitables zones de redoublement à éviter lors de l'échantillonnage.

## 6 Le bassin hydrographique

Les parcelles échantillonnées lors du contrôle 2012 se trouvaient dans 10 bassins hydrographiques. Le tableau 3-17 présente le pourcentage de conformité des parcelles contrôlées en fonction du bassin hydrographique en 2012.

**Tableau 3-17. Pourcentage de conformité des parcelles contrôlées en fonction du bassin hydrographique lors du contrôle 2012.**

Bassin hydrographique	Nb parcelles conformes	Nb total de parcelles	Proportion conformité	APL moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )
Dendre	153	194	79%	58
Dyle – Gette	156	210	74%	60
Escaut – Lys	242	322	75%	61
Haine	87	120	73%	62
Lesse	41	46	89%	38
Meuse amont et Oise	103	124	83%	42
Meuse aval	294	377	78%	58
Sambre	148	170	87%	49
Senne	124	138	90%	46
Vesdre	32	42	76%	52
Total	1380	1743	79%	55

Les résultats du contrôle 2012 montrent que les résultats obtenus dans les bassins hydrographiques Dyle-Gette, Escaut-Lys et Haine sont les moins bons, aussi bien au niveau du pourcentage de conformité que de l'APL moyen, malgré une amélioration par rapport à 2011 pour les deux derniers. En revanche, les résultats obtenus dans les bassins de la Senne et de la Lesse sont les meilleurs cette année.

Le test  $\chi^2$  d'indépendance conclut à la non-indépendance des caractères « bassin hydrographique » et « conformité de la parcelle », avec un degré de signification très hautement significatif ( $P = 0,000$ ).

On peut donc conclure que le caractère conforme ou non de la parcelle n'est pas indépendant du bassin hydrographique dans lequel elle se situe (en considérant un risque de première espèce  $\alpha = 0,001$ ), tout comme cela avait été observé en 2010 et 2011.

## **2.4 APL moyen par région agricole entre 2008 et 2012**

### **2.4.1 Introduction**

Le paragraphe précédent a développé une analyse de conformité des résultats selon différents critères (culture, région, taille de parcelle, ...). Cette analyse a permis de comparer la performance (en matière de gestion de l'azote) des exploitations contrôlées par rapport au Survey Surfaces Agricoles (exploitations de référence).

Il convient également de pouvoir évaluer l'impact global (risque) des APL observés sur l'environnement (qualité de l'eau). L'objectif est d'estimer un APL moyen par région agricole en extrapolant les résultats observés dans les parcelles contrôlées à l'ensemble de la région agricole considérée. Cette extrapolation nécessite la connaissance de la part de chaque culture dans le paysage de chaque région agricole. Le §2.4.2 détaille la répartition des cultures et des prairies dans les différentes régions agricoles, le §Annexe 3.2.4.3 synthétise les APL moyens observés dans les parcelles de culture et de prairie lors du contrôle 2012 et le §Annexe 3.2.4.4 présente le résultat de l'extrapolation des APL obtenus lors du contrôle 2012 à l'ensemble de la région agricole. Enfin, le §2.4.5 compare les résultats de 2012 par rapport aux résultats des années précédentes.

### **2.4.2 Répartition des cultures dans le paysage agricole**

Les données disponibles en 2012<sup>7</sup> permettent d'avoir une vue d'ensemble de la part de chaque classe de culture et prairie (au sens du PGDA) dans la SAU de chaque région agricole en zone vulnérable (tableau 3-18).

A titre d'exemple, la région sablo-limoneuse compte 257.984 ha dont 94% (242.942 ha) sont occupés par des cultures susceptibles de subir un contrôle APL. Cependant, pour une classe de culture donnée dans une région agricole donnée, il se peut que l'effectif de parcelles contrôlées soit trop faible (inférieur à 5 parcelles) et par conséquent non représentatif. C'est par exemple le cas du colza et des légumes dans la région sablo-limoneuse. Dans ce cas, la superficie des parcelles de colza et de légumes est déduite et la part de la SAU pour laquelle des mesures d'APL ont été réalisées est recalculée.

Les superficies occupées par des classes de cultures susceptibles de subir un contrôle APL et présentant un nombre suffisant de mesures APL représentent de 88 à 97% de la SAU selon les régions (tableau 3-18). L'extrapolation d'APL à l'échelle des différentes régions agricoles peut donc être jugée représentative.

---

<sup>7</sup>Enquête agricole de mai 2012 - Direction générale Statistique et Information économique  
[http://statbel.fgov.be/fr/binaries/DBREF-L05-2012-TAB-A-FR\\_V3\\_tcm326-226799.xls](http://statbel.fgov.be/fr/binaries/DBREF-L05-2012-TAB-A-FR_V3_tcm326-226799.xls)

**Tableau 3-18. Superficie des cultures et prairie par région agricole en 2012.**

	Région sablo-limoneuse	Région limoneuse	Région herbagère liégeoise	Condroz	Famenne
Betterave	14.272	34.490	385	7.620	457
céréales	54.538	116.658	1.850	45.561	8.780
chicorées	680	3.944	32	413	0
maïs	58.482	36.030	4.406	10.762	5.506
pdt	20.349	25.900	155	3.130	107
colza	768	2.498	35	7.205	1.077
légumes	14.886	12.057	219	1.863	166
prairie	78.966	63.528	47.476	46.095	42.757
SAU déclarée	257.984	308.449	55.153	126.573	59.953
SAU comptabilisée dans les classes APL	242.942	295.105	54.558	122.648	58.851
% / SAU déclarée	94%	96%	99%	97%	98%
SAU comptabilisée dans les classes APL avec mesures d'APL	227.289	295.105	53.765	117.655	57.043
% / SAU déclarée	88%	96%	97%	93%	95%

**Tableau 3-19. Superficie des cultures et prairie par province en 2010.**

Occupation du sol	province de Liège	province de Namur	province du Brabant wallon	province du Hainaut	province du Luxembourg
betterave	13.795	13.249	13.996	30.006	414
céréales	37.067	51.860	31.217	72.581	15.205
colza	279	4.009	100	704	145
fourrages	121	663	61	249	860
légumes	2.299	2.373	1.093	3.245	8
lin	1.581	1.784	755	2.778	5
maïs	5.190	9.682	4.264	22.845	4.227
pomme de terre	744	869	1.276	9.549	678
prairie	100.384	76.272	11.081	76.326	117.027
SAU	163.363	163.664	64.586	221.349	139.780
SAU 'APL'	161.460	160.762	63.843	218.283	138.570

Les céréales peuvent être suivies d'une CIPAN. La superficie de céréales suivies de CIPAN par région agricole est estimée à partir de la proportion de parcelles de céréales suivies de CIPAN lors du contrôle 2012 (tableau 3-20).

Les proportions estimées de superficies de céréales suivies d'une CIPAN sont faibles en Famenne et dans le Condroz mais il faut savoir que la majorité des parcelles de céréales sans CIPAN (classe A3) dans ces deux régions sont suivies d'une culture d'hiver (froment, escourgeon, colza) et donc non-concernées par le semis d'une CIPAN.

**Tableau 3-20. Proportion de CIPAN par région agricole lors du contrôle 2012.**

	Condroz	Famenne	Herbagère liégeoise	Limoneuse	Sablo-limoneuse
Nb de parcelles de céréale avec CIPAN en 2012	19	9	4	301	43
Nb de parcelles de céréale contrôlées en 2012	86	34	12	554	90
Proportion estimée de superficie de céréale avec CIPAN	22%	26%	33%	54%	48%

En région limoneuse et sablo-limoneuse, compte tenu des superficies cultivées (tableau 3-18) et de la part de CIPAN après céréales (tableau 3-20), on peut déduire que celles-ci représentent respectivement 20% et 10% de la SAU.

### 2.4.3 APL moyen dans les parcelles contrôlées

Le tableau 3-21 synthétise les APL mesurés dans les principales régions agricoles situées en zone vulnérable. L'effectif étant trop faible pour la Fagne (6 parcelles) et l'Ardenne (3 parcelles), il n'a évidemment pas été possible de calculer un APL moyen pour ces régions.

Pour rappel, seules les classes de culture présentant un effectif d'au moins 5 parcelles contrôlées dans la région considérée sont prises en compte pour le calcul de l'APL moyen par région.

**Tableau 3-21. APL moyen (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) dans les parcelles contrôlées en 2012.**

	<b>Culture</b>	<b>Effectif</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart type</b>
<b>CONDROZ</b>		<b>188</b>		
	Betterave	10	14	5
	Céréales avec CIPAN	19	45	24
	Céréales sans CIPAN	67	45	33
	Maïs	50	63	49
	Colza	19	65	25
	Prairies	18	4	4
<b>FAMENNE</b>		<b>86</b>		
	Céréales avec CIPAN	9	33	20
	Céréales sans CIPAN	25	46	37
	Maïs	30	68	48
	Prairies	18	8	7
<b>REGION HERBAGERE</b>		<b>127</b>		
	Céréales sans CIPAN	8	62	29
	Maïs	78	63	38
	Prairies	31	11	5
<b>REGION LIMONEUSE</b>		<b>1126</b>		
	Betterave	86	23	21
	Céréales avec CIPAN	301	47	33
	Céréales sans CIPAN	253	72	35
	Maïs	305	61	39
	Pomme de terre	118	88	43
	Colza	9	96	24
	Légumes	8	76	59
	Prairies	46	14	11
<b>REGION SABLO-LIMONEUSE</b>		<b>207</b>		
	Betterave	13	19	13
	Céréales avec CIPAN	43	49	30
	Céréales sans CIPAN	47	68	35
	Maïs	76	60	66
	Pomme de terre	21	81	26
	Prairies	6	4	2

On peut voir dans le tableau 3-21 que les APL moyens "cultures" établis en région herbagère liégeoise et en Famenne se limitent aux classes de cultures "céréales" et "maïs" en raison de l'effectif insuffisant pour les autres classes de culture. La classe de cultures "pommes de terre" n'est en revanche rencontrée que dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse. Toutes les classes de cultures sont représentées en région limoneuse.

#### 2.4.4 Extrapolation à la région agricole

En tenant compte des résultats présentés ci-dessus pour les cultures (tableau 3-18 à tableau 3-21), il est possible de calculer une valeur moyenne d'APL "culture" et une valeur moyenne d'APL "prairie" pour chacune des cinq principales régions agricoles situées en zone vulnérable (figure 3-13). La figure 3-13 renseigne également le rapport culture / prairie pour chaque région agricole.

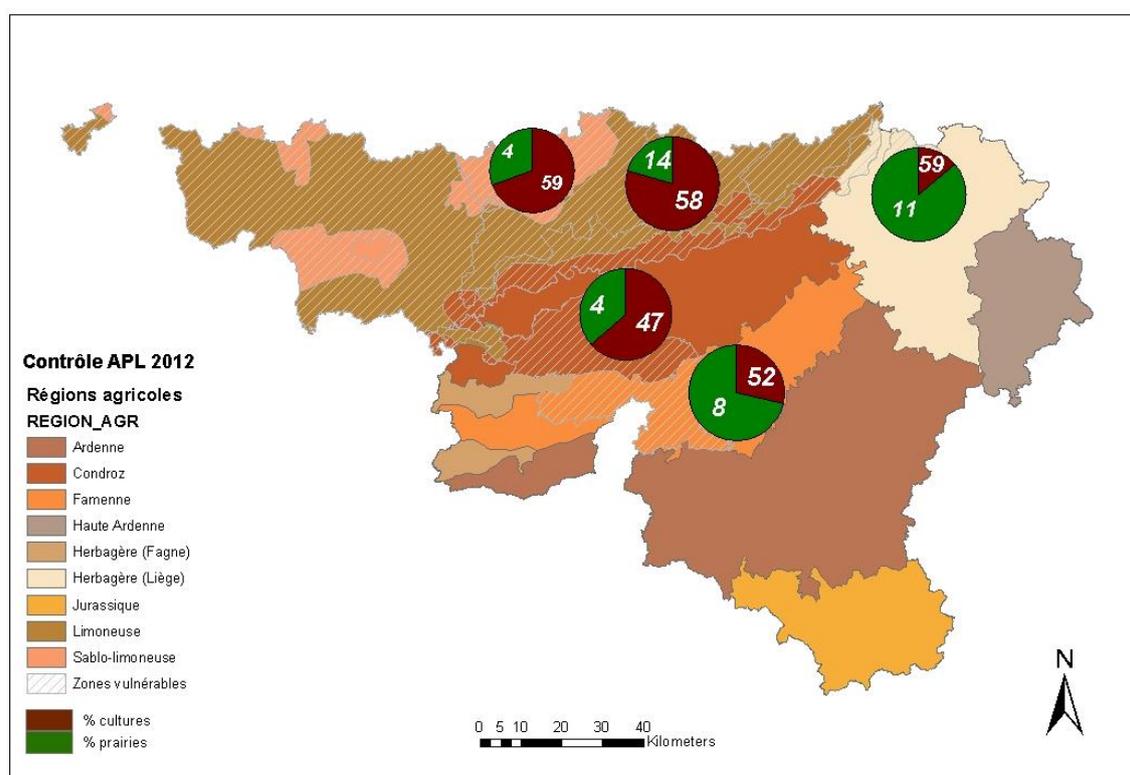


Figure 3-13. APL moyens en culture (sur 90 cm) et prairie (sur 30 cm) par région agricole.

Les APL moyens "culture" les plus élevés sont observés en Région herbagère liégeoise et en région sablo-limoneuse. Ceci peut s'expliquer par le fait que seule les classe de culture "maïs" et "céréales sans CIPAN" présentaient un effectif suffisant pour le calcul de l'APL moyen dans la région herbagère liégeoise et que les résultats en maïs et pomme de terre étaient élevés en région sablo-limoneuse, ces deux classes de cultures représentant une part importante de l'assolement dans cette région.

En revanche, l'APL moyen "culture" le plus faible est observé dans le Condroz. Ceci peut s'expliquer par le fait que les APL mesurés dans les parcelles de céréales et de maïs y sont corrects, ces deux cultures étant dominantes dans l'assolement.

Il faut également tenir compte de la proportion de prairies dans chaque région afin d'avoir une vue globale de la quantité de nitrate qui risque d'être lixiviee à l'échelle de la région agricole. Il est ainsi possible de calculer un APL moyen total en extrapolant les résultats obtenus en prairie pour la couche

0–30 cm aux couches 30–60 cm et 60–90 cm. Pour ce faire, la base de données du Survey Surfaces Agricoles est mise à profit. Les observations faites entre 2002 et 2004 montrent que le reliquat azoté mesuré sur une épaisseur de 90 cm (somme des trois couches) correspond approximativement au double du reliquat azoté observé dans la première couche (0-30 cm). Ce coefficient sera donc adopté pour extrapoler jusqu'à 90 cm les résultats obtenus lors du contrôle 2012 dans la première couche (0–30 cm).

Les APL moyens totaux par région agricole sont repris dans le tableau 3-22.

**Tableau 3-22. APL moyen total par région agricole.**

Région agricole	APL moyen (kg N-NO <sub>3</sub> .ha <sup>-1</sup> )	Part de la SAU représentée dans l'APL moyen(%)
Région sablo-limoneuse	43	88%
Région limoneuse	52	96%
Région herbagère (Liège)	27	97%
Condroz	33	93%
Famenne	27	95%

On voit que la région herbagère liégeoise et la Famenne présentent les APL moyens les plus faibles (27 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Ces deux régions présentent les proportions de prairies les plus élevées. La région limoneuse présente quant à elle l'APL moyen le plus élevé (52 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) ; c'est dans cette région que l'APL moyen en prairie est le moins faible (14 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) et l'APL moyen en culture y est également assez élevé par rapport aux autres régions (58 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Ces valeurs restent cependant peu élevées en valeur absolue.

#### 2.4.5 Comparaison avec les années précédentes

Les APL moyens par région agricole calculés à partir des données de la campagne de contrôle 2012 peuvent être comparés avec ceux issus des campagnes des années précédentes (tableau 3-23).

De manière globale, les APL moyens ont fortement diminué dans toutes les régions agricoles par rapport à la campagne de contrôle 2011 (diminution de l'ordre de 20 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

L'APL moyen dans la région sablo-limoneuse en 2012 est faible, seul l'APL moyen de 2010 étant encore plus faible dans cette région. Une diminution importante par rapport à 2011 s'observe (- 22 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>).

L'APL moyen en région limoneuse est en forte baisse par rapport à celui de 2011 (- 22 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) et revient aux niveaux observés en 2008, 2009 et 2010 (~55 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>). Cet APL moyen en région limoneuse a un poids non-négligeable dans l'APL moyen total en région wallonne, étant donné que la SAU est maximale dans cette région par rapport aux autres régions agricoles.

En région herbagère liégeoise, l'APL moyen est en diminution depuis 2010 et affiche son niveau le plus bas depuis le début des campagnes de contrôles. Les efforts des agriculteurs en matière de gestion de l'azote sur leurs parcelles de maïs et leurs prairies se reflètent dans ce résultat.

Les APL moyens mesurés dans le Condroz et en Famenne sont également en baisse en 2012 et reviennent aux niveaux mesurés en 2008 et 2009 après une augmentation en 2010 et 2011.

**Tableau 3-23. Comparaison et moyenne des APL moyens (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) de 2008 à 2012.**

Région agricole	2008	2009	2010	2011	2012	2008-2012
Région sablo-limoneuse	46,1	50,7	41,0	64,7	43,4	49,2
Région limoneuse	53,5	52,9	57,2	72,8	52,3	57,7
Région herbagère	30,4	42,0	74,8	48,5	26,7	44,5
Condroz	36,4	29,0	46,9	45,7	32,8	38,2
Famenne	30,9	14,0	47,0	44,7	27,0	32,7

## **2.5 Conclusions**

Le contrôle des APL dans 5% des exploitations situées en zone vulnérable a montré que les résultats des exploitations en observation APL (84% d'exploitations conformes) étaient légèrement moins bons en 2012 que ceux observés dans les exploitations sélectionnées aléatoirement (87% d'exploitations conformes). Ceci montre que le niveau de performance atteint par la majorité des agriculteurs en région wallonne est tout à fait acceptable. On peut cependant affirmer que l'objectif du programme d'observation est atteint puisque une large majorité des exploitations en observation APL (84%) étaient conformes en 2012 alors qu'elles avaient toutes été non-conformes à au moins une reprise au cours des années précédentes. Ces agriculteurs ont donc, pour une majorité, amélioré leur gestion de l'azote.

Les résultats globaux (pourcentage d'exploitations évaluées positivement et pourcentage de parcelles conformes) du contrôle 2012 (87% d'exploitations conformes et 79% de parcelles conformes) sont meilleurs que ceux des années précédentes, excepté 2009 où le mode de sélection des exploitations était différent et les résultats moins représentatifs (cf. §2.3.2).

L'analyse des résultats par culture montre que les résultats en 2012 sont meilleurs que ceux en 2011, sauf pour la pomme de terre ; l'amélioration est particulièrement marquée pour les parcelles de maïs, de betterave et les prairies.

Un test  $\chi^2$  d'indépendance a été appliqué pour vérifier l'influence de certaines caractéristiques de la parcelle sur son caractère conforme ou non. Il en ressort que la spatialisation des résultats a partiellement influencé les conclusions de ce test. C'est ainsi que le caractère conforme ou non de la parcelle était dépendant de la classe de culture et du bassin hydrographique (avec un risque de première espèce  $\alpha = 0,001$ , degré très hautement significatif). La taille de la parcelle et la région agricole dans laquelle elle se situe ont également eu cette année une influence sur le caractère conforme ou non des parcelles (avec un risque de première espèce  $\alpha = 0,05$ , degré significatif).

L'échantillonnage au sein des classes A2 (céréales avec CIPAN) et A3 (céréales sans CIPAN) a montré que la proportion de 75% de couverture des surfaces récoltées avant le 1<sup>er</sup> septembre et suivies l'année suivante d'une culture de printemps a bien été respectée en région wallonne en 2012 (78% des surfaces couvertes).

Aucune anomalie n'a été mise en évidence dans la comparaison des résultats entre échantillonneurs au sein des différents laboratoires provinciaux.

L'extrapolation à l'échelle des régions agricoles des observations réalisées dans les exploitations contrôlées a mis en évidence des différences d'APL moyen entre régions agricoles, imputables en partie aux différences rencontrées dans les assolements. Les APL moyens sont en nette diminution en 2012 par rapport à 2010 et 2011, et cela pour toutes les régions agricoles. Cette diminution des APL moyens est à imputer à deux facteurs : les conditions climatiques favorables (cf. APL de référence

bas) mais aussi une amélioration dans la gestion globale de l'azote par les agriculteurs (cf. amélioration du pourcentage de conformité des exploitations).

### **3 Estimation de l'APL moyen dans les années nonante**

#### **3.1 Introduction**

Fin des années '80, la perception de la nécessité d'une gestion raisonnée de l'azote en vue de préserver la qualité des eaux se concrétise par l'adoption de la Directive Nitrate (réf. 91/676) en 1991.

Sa transposition en région wallonne se fera en deux étapes :

1. en 1996 : un code de bonnes pratiques agricoles, d'application volontaire et
2. en 2002 : le 1<sup>er</sup> Programme de Gestion Durable de l'Azote, d'application obligatoire.

Les premières observations d'APL en exploitation agricole sont réalisées à partir de cette époque par le CRAw et l'UCL.

L'estimation de l'APL moyen par région agricole (extrapolation sur base des observations APL et de la part de chaque culture dans le paysage de chaque région agricole) est réalisée sur base de ces observations (APL) et de l'enquête réalisée par l'Institut National de Statistiques (occupation du sol par région agricole).

#### **3.2 Observations APL**

En 1993, Guiot et al. (1994) réalisent 41 mesures d'APL entre la fin octobre et le début du mois de novembre.

Les tableau 3-24 à tableau 3-26 illustrent les observations réalisées.

**Tableau 3-24. Observations APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) après betterave et maïs en 1993.**

Couches de sol (cm)	Après betterave (moyenne de 8 champs)			Après maïs	
	Moyenne	Faible	Elevé	Champs 1	Champs 2
0-30	11	7	15	11	55
30-60	7	2	14	8	46
60-90	4	0	10	3	29
0-90	22	9	29	22	131

**Tableau 3-25. Observations APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) après pomme de terre et haricot en 1993.**

Couches de sol (cm)	Après pomme de terre (moyenne de 4 champs)			Après haricot		
	Moyenne	Faible	Elevé	Champs 1	Champs 2	Champs 3
0-30	52	27	85	67	31	59
30-60	20	5	25	20	77	75
60-90	22	8	35	11	24	46
0-90	94	40	145	98	132	180

**Tableau 3-26. Observations APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) après froment et escourgeon en 1993.**

Couches de sol (cm)	Après froment (moyenne de 13 champs)			Après escourgeon (moyenne de 4 champs)		
	Moyenne	Faible	Elevé	Moyenne	Faible	Elevé
0-30	32	22	62	26	4	39
30-60	12	5	18	7	3	19
60-90	5	0	14	4	2	7
0-90	49	27	94	37	9	65

En 1994, Goffart et al. (1995) réalisent quelques observations APL après récolte de betterave, maïs et de pomme de terre (tableau 3-27). Les auteurs signalent que les deux parcelles de maïs font l'objet d'apports fréquents et élevés d'amendements organiques.

**Tableau 3-27. Observations APL après betterave, pomme de terre et maïs en 1994.**

Culture	APL (0-150 cm)	Nombre d'observations
Betterave	14	3
Pomme de terre	124	3
Maïs	137	2

En 1995, Herman et al. (1996) réalisent une douzaine d'observations APL en région limoneuse, sablo-limoneuse et dans le Condroz à la mi-décembre (tableau 3-28).

**Tableau 3-28. Observations APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) après betterave, chicorée, colza, avoine et fève des marais en 1995.**

Culture	Betterave arrachée tard	Betterave arrachée tôt	Chicorée sans azote	Chicorée avec 50 kg N/ha	Colza	Avoine paille enfouie avec 30 kg N/ha	Fève des marais
Localisation	Thines Gembloux	Avernas Thynes	Gembloux	Gembloux Molembais	Gesves Fraire Piéton	Gembloux	Momalle
0-30 cm	17	30	20	20	78	43	26
30-60 cm	5	7	6	7	24	10	65
60-90 cm	3	3	4	5	5	2	41
Total	25	40	30	32	107	55	132

En 1997, dans le cadre du projet Prop'Eau-Sable (Lambert et al., 2002), près de 90 parcelles réparties dans 10 exploitations situées sur les sables du bruxellien ont été échantillonnées en novembre.

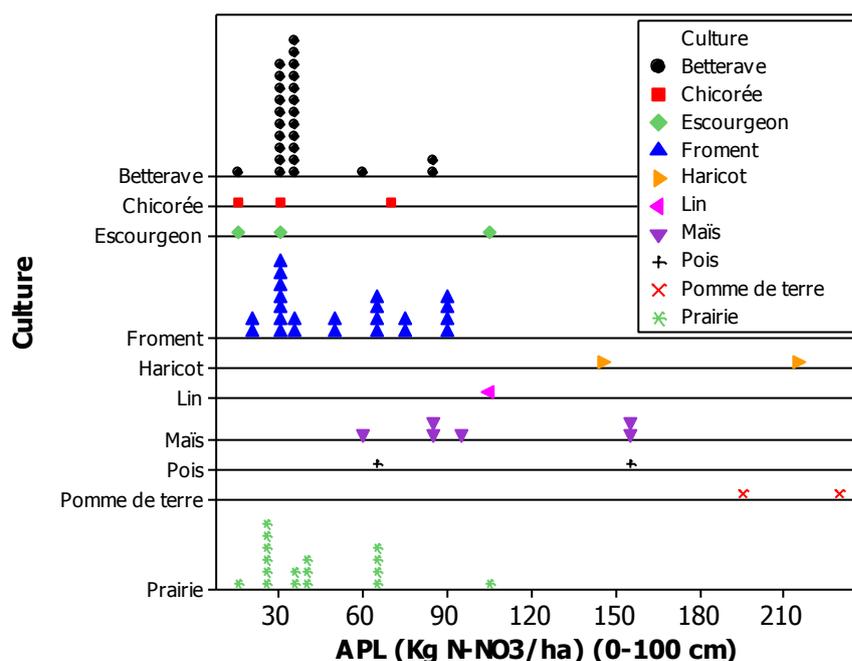


Figure 3-14. Distribution des mesures APL (Prop'Eau-Sable) en 1997.

Fin janvier 1998, Herman et al. (1998) réalisent une vingtaine de mesures de reliquat azoté dans le sol en région limoneuse, sablo-limoneuse et dans le Condroz (tableau 3-29). Réalisées en dehors de la période de mesure de l'APL (mi-octobre à mi-décembre), ces valeurs ne seront pas prises en considération pour l'établissement d'un APL moyen car une partie de l'azote nitrique a déjà quitté la zone d'observation (0-90) ; ces valeurs sont donc globalement inférieures aux mesures APL qui auraient pu être réalisées dans ces situations.

Tableau 3-29. Reliquat azoté après betterave, légumineuse, pomme de terre, chicorée, maïs et colza fin janvier 1998.

Culture	Betterave	Légumineuse	Pomme de terre	Chicorée	Maïs	Colza
Effectif	8	4	4	1	2	3
Localisation	Ittre Avernas Gbx (8)	Gbx (2) Marbais Thynes	Gbx Barry Nivelles Ligney	Gbx	Ittre Gbx	Havelange Pieton Fraire
0-30 cm	15	14	13	9	11	14
30-60 cm	29	45	36	23	14	28
60-90 cm	18	73	42	28	13	28
90-120 cm	6	38	32	25	10	15
120-150 cm	5	23	23	17	16	12
0-90 cm	62	132	91	60	38	70
0-150 cm	73	193	146	102	64	97
Extrêmes	41-76	152-258	105-211		61-67	57-127

### 3.3 Synthèse et interprétation

La figure 3-15 synthétise les observations APL ainsi réalisées entre 1993 et 1997 par le CRAw et l'UCL.

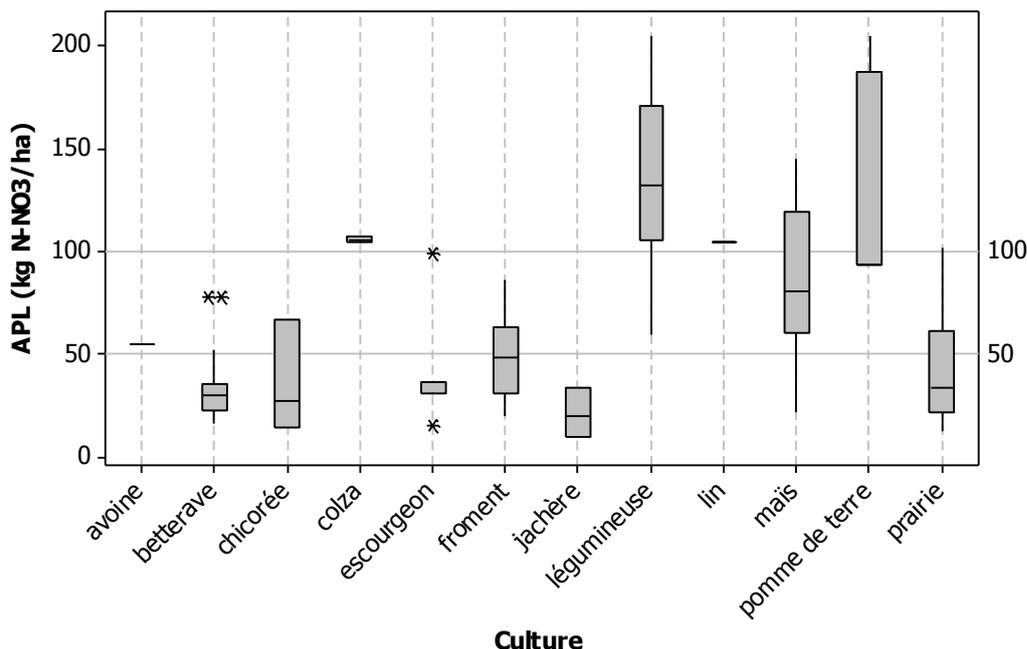


Figure 3-15. Distribution des mesures APL observées entre 1993 et 1997.

Le colza, les légumineuses, le maïs et la pomme de terre présentent des niveaux d'APL assez élevés. Pour ces cultures, les APL sont de l'ordre de 20 à 50 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> supérieurs à ceux observés lors du contrôle réalisé en 2012 (tableau 3-21). Avec les réserves liées à la taille des effectifs (moins d'une dizaine par culture dans les années '90), la gestion de l'azote s'est améliorée entre les années '90 et 2010.

Pour la betterave, les quelques 36 observations réalisées illustrent un niveau d'APL globalement équivalent à celui rencontrés autour des années 2010 lors du contrôle APL.

La dispersion (de 15 à 99 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) des résultats rencontrés après céréales (escourgeon et froment) témoigne de la diversité des situations (avec ou sans engrais de ferme, avec ou sans vesce ou moutarde).

Les valeurs suivantes sont retenues pour l'estimation de l'APL à une échelle provinciale.

Tableau 3-30. Reliquat azoté moyen (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) par occupation de sol pour les années nonante.

Occupation du sol	APL
Betterave	33
Céréales	49
Colza	107
Légumes	135
Lin	104
Maïs	87
Pomme de terre	127
Prairie	17

Il convient cependant d'observer que la valeur retenue (sur base des quelques observations réalisées à cette époque) pour les céréales est très vraisemblablement sous-estimée. En effet, à cette époque, le

semis de moutarde était quasiment inexistant, le semis de vesce était occasionnel et les épandages d'engrais de ferme ne précédaient pas spécialement le semis de ce couvert.

Pour mémoire (tableau 3-11), entre 2008 et 2012, l'APL moyen d'une céréale suivie d'une CIPAN est de 42 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> et l'APL moyen d'une céréale suivie d'une culture d'hiver est de 65 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>. Dès lors, en considérant que les pratiques culturales n'ont pas évolués pour ce dernier cas de figure et en doublant l'APL du premier cas de figure (apport régulier d'engrais de ferme sans CIPAN), l'APL moyen après céréale devrait se situer aux environs de 75 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> (au lieu des 49 kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup> mentionnés au tableau 3-30).

Par ailleurs, il convient également d'observer que la valeur retenue en prairie ne repose que sur une dizaine d'observations réalisées dans le Brabant wallon, à l'occasion de l'étude Prop'eau Sable.

### 3.4 Répartition des cultures dans le paysage agricole

Tableau 3-31. Superficie des cultures et prairie par région agricole en 1990.

Occupation	Condroz	Région herbagère	Région limoneuse	Région sablo-limoneuse
Betterave	12.074	570	60.876	29.568
Céréales	48.114	1.892	138.489	67.511
Chicorée	49	-	1.032	470
Colza	3.526	23	467	118
Légumes	3.896	116	7.675	11.394
Lin	1.383	38	5.436	1.776
Maïs	8.967	2.364	25.602	29.014
Pomme de terre	891	110	11.502	22.941
Prairie	54.427	55.201	71.539	87.606
SAU 'APL'	133.326	60.314	322.618	250.397
SAU	134.553	61.032	328.961	261.896
%SAU 'APL' / SAU	99%	99%	98%	96%

Le tableau 3-32 illustre la spécificité des provinces en termes de répartition des cultures dans la superficie agricole utile. Ainsi, la province du Luxembourg présente, en part de la SAU, cinq fois plus de prairie que la province du Brabant wallon ; les provinces du Hainaut, de Namur et de Liège étant intermédiaires à ces deux 'extrêmes'.

Il convient également de mentionner que la province de Liège devrait être scindée en deux entités distinctes :

- une partie limoneuse située au nord de la Meuse dont l'occupation du sol est similaire à ce qui est observé en Brabant wallon (peu de prairies)
- une partie située en Condroz, Famenne, région herbagère et Haute Ardenne dont l'occupation du sol est plus proche de ce qui est observé en province du Luxembourg

**Tableau 3-32. Superficie des cultures et prairie par province en 1990.**

Occupation du sol	Liège	Namur	Brabant wallon	Hainaut	Luxembourg
betterave	13.795	13.249	13.996	30.006	414
céréales	37.067	51.860	31.217	72.581	15.205
colza	279	4.009	100	704	145
fourrages	121	663	61	249	860
légumes	2.299	2.373	1.093	3.245	8
lin	1.581	1.784	755	2.778	5
maïs	5.190	9.682	4.264	22.845	4.227
pomme de terre	744	869	1.276	9.549	678
prairie	100.384	76.272	11.081	76.326	117.027
SAU	163.363	163.664	64.586	221.349	139.780
SAU 'APL'	161.460	160.762	63.843	218.283	138.570

### 3.5 Estimation de l'APL moyen

En prenant pour références les valeurs APL par culture du tableau 3-30, on obtient les résultats par région agricole repris au tableau 3-33.

**Tableau 3-33. APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) moyen par région agricole en 1990 (observations céréales non modifiées).**

	Condroz	région herbagère	région limoneuse	région sablo- limoneuse
APL moyen culture	59	127	56	70
APL moyen prairie	17	17	17	17
part de la SAU en culture	60%	10%	78%	67%
part de la SAU en prairie	40%	90%	22%	33%
APL moyen total	42	27	48	52

Par contre, si on affecte un APL moyen en céréale adapté compte tenu des hypothèses évoquées précédemment, l'APL moyen par région agricole augmente logiquement (tableau 3-34).

**Tableau 3-34. APL (kg N-NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>) moyen par région agricole en 1990 (hypothèses en céréales).**

	Condroz	région herbagère	région limoneuse	région sablo- limoneuse
APL moyen culture	75	127	71	81
APL moyen prairie	17	17	17	17
part de la SAU en culture	60%	10%	78%	67%
part de la SAU en prairie	40%	90%	22%	33%
APL moyen total	52	27	59	60

## 4 Estimation au cours des décennies précédentes

### 4.1 Introduction

Il devient malheureusement hasardeux d'estimer un APL moyen pour une période antérieure à 1990. Les raisons sont multiples :

- la mesure du reliquat azoté dans le sol a débuté fin des années septante ;
- certaines périodes de fertilisation ont évolués (jusque dans les années septante, il était conseillé d'apporter une première fraction d'azote lors du semis des céréales) ;
- même si l'on peut faire des hypothèses réalistes sur la fertilisation appliquée aux cultures (cf. Annexe 1.3, page 1-26), il n'est pas possible d'en estimer l'APL compte tenu de l'évolution variétale et des rendements (exportation d'azote).

En conséquence, les paragraphes suivants ne traiteront que de l'évolution de l'occupation du sol.

### 4.2 1980

Entre 1979 et 1982, un recensement des cultures dérochées<sup>8</sup> a été organisé dans le cadre d'une étude cartographique de l'agriculture belge (Anonyme, 1989). A l'échelle du royaume, 3,18% de la SAU était couverte par ces cultures. En région limoneuse et sablo-limoneuse, ces cultures occupent de l'ordre de 5% de la SAU.

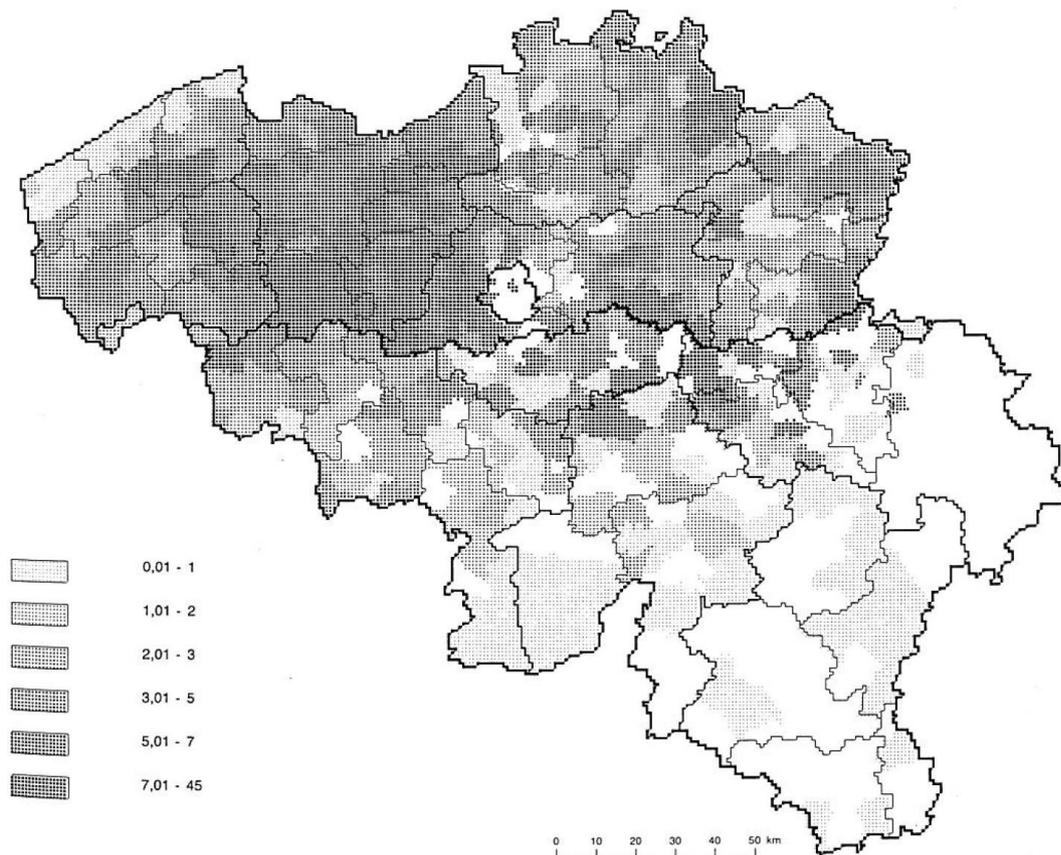


Figure 3-16. Part de la culture dérochée dans la SAU (période 1979-1982).

<sup>8</sup> navets, choux-navets, carottes fourragères, choux fourragers, plantes enfouies en vert.

En considérant que toutes les cultures dérobées sont des CIPAN (enfouies et récoltées comme fourrage), on constate que la part de la SAU occupée par ces couverts est deux à quatre fois inférieure à celle observée en 2012 (cf. § 2.4.2 page 3-165).

Le tableau 3-35 illustre la spécificité des provinces en termes de répartition des cultures dans la superficie agricole utile.

Les commentaires relatifs à la situation observée dans les années nonante (tableau 3-32) étaient déjà d'actualité dans les années quatre-vingt.

**Tableau 3-35. Superficie des cultures et prairie par province en 1980.**

Occupation du sol	Liège	Namur	Brabant wallon	Hainaut	Luxembourg	Total général
betterave	15.600	15.997	15.864	31.793	376	79.630
céréales	40.714	55.181	32.278	78.582	26.596	233.351
colza	10	126	4	131	2	273
fourrages	553	1.950	110	586	1.013	4.212
légumes	555	944	476	1.287	24	3.286
lin	136	989	285	1.417	61	2.887
maïs	4.783	7.499	3.278	17.945	3.674	37.180
pomme de terre	387	461	268	6.585	804	8.505
prairie	109.044	84.319	13.158	85.255	114.759	406.535
Total général	171.783	167.465	65.721	223.582	147.309	775.860

### 4.3 1960

Le tableau 3-36 illustre la spécificité des provinces en termes de répartition des cultures dans la superficie agricole utile.

Les commentaires relatifs à la situation observée dans les années nonante (tableau 3-32) étaient déjà d'actualité dans les années soixante.

L'évolution temporelle (1960 -2010) sera évoquée dans les discussions (paragraphe 5).

**Tableau 3-36. Superficie des cultures et prairie par province en 1960.**

Occupation du sol	Liège	Namur	Brabant wallon	Hainaut	Luxembourg	Total général
betterave	11.357	9.615	10.254	21.148	1.604	53.978
céréales	43.637	55.193	33.083	79.520	39.527	250.960
colza	4	6	17	9	-	36
fourrages	3.258	10.226	2.836	6.470	9.913	32.703
légumes	637	1.481	415	1.396	129	4.058
lin	1.701	2.056	1.775	4.501	29	10.062
maïs	45	130	63	753	32	1.023
pomme de terre	1.037	1.315	831	6.557	2.957	12.697
prairie	131.675	103.720	21.692	117.891	106.466	481.444
Total général	193.351	183.742	70.966	238.245	160.657	846.961

## 5 Discussion

---

Grâce au contrôle APL mis en place à partir de 2008 en zone vulnérable, il est possible d'évaluer le stock d'azote nitrique dans le sol à la parcelle mais également pour des territoires administratifs (province), pédoclimatiques (région agricole) ou hydrogéologiques (masse d'eau souterraine).

L'agrégation des données pour ces différents territoires est rendue possible grâce à un géoréférencement précis des résultats APL et des occupations de sol (PAC) qui peuvent être traités via des systèmes d'information géographique (SIG).

Cette opportunité n'est malheureusement pas présente pour des 'temps lointains'. Qui plus, certains territoires ont évolué suite au découpage du pays en trois régions (wallonne, flamande et bruxelloise). Ainsi, dans les années soixante, les régions limoneuse et sablo-limoneuse couvraient tant le territoire wallon, bruxellois que flamand. Il devient dès lors difficile d'observer l'évolution temporelle de la part des cultures à l'échelle des régions agricoles.

Les statistiques agricoles anciennes n'étant pas établies à l'échelle des masses d'eau, cette unité spatiale n'est pas non plus utilisable pour apprécier une évolution du paysage agricole.

Il ne reste dès lors que les provinces.

Entre les années nonante et les années autour de 2010, l'évolution de l'APL moyen montre une tendance à la hausse (de l'ordre de  $5 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ). Cette augmentation s'appuie entre autres sur quelques observations réalisées dans les années nonante après céréales dans des contextes très favorables (pas d'apport de matières organiques).

En corrigeant 'à dire d'experts' ces chiffres, la tendance s'inverse alors du même ordre de grandeur (diminution d'environ  $5 \text{ kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ ).

Le bienfondé de cette hypothèse 'baissière' est corroboré par la comparaison des reliquats azotés mesurés dans des parcelles de froment, fin janvier-début février, entre la fin des années nonante (tableau 3-29) et autour des années 2010 (Destain et al., 2008; Destain et al., 2010; Vancutsem et al., 2011, 2012). On observe une diminution de 10 à 20  $\text{kg N-NO}_3\text{.ha}^{-1}$ , signe que les pratiques de fertilisation azotée sont mieux adaptées.

Pour une période plus lointaine (années soixante à nonante), quelques indices laissent paraître que l'APL moyen devait vraisemblablement être encore plus élevé.

Au cours de cette période, on observe deux tendances importantes. La première est la diminution (~30%) des superficies couvertes de prairies. La conversion de ces prairies en terres cultivées a un impact sur l'APL :

- à court terme : la minéralisation de l'important stock de carbone organique va conduire à des APL élevés pendant trois à cinq ans ;
- à long terme : l'APL en prairie est toujours plus faible que l'APL moyen en culture, quelle que soit la rotation.

La seconde tendance est l'augmentation des emblavements en maïs. Pendant des décennies, la gestion de l'azote pour cette culture a vraisemblablement été la cause d'APL très régulièrement élevés :

- contrairement aux céréales, elle n'est pas négativement impactée par un excès d'azote ;
- elle est semée à partir de la fin avril, ce qui donne l'opportunité d'épandre des engrais de ferme au printemps sur terrain 'portant', voire (à cette époque) en hiver sur sol gelé.

De plus, le maïs va très régulièrement suivre une céréale après laquelle un épandage d'engrais de ferme aura également pu être réalisé (souvent sans CIPAN).

Il convient également de rappeler (Annexe 1) qu'entre 1950 et 1970, le cheptel porcin a très fortement augmenté (+60%) et qu'à cette époque, les capacités de stockage de lisier étaient souvent limitées, forçant les agriculteurs à *vidanger* régulièrement les citernes tous les 2-3 mois.

Dans le même ordre d'idée, entre 1960 et 1990, le cheptel bovin a également augmenté (+10%) en région wallonne (Annexe 1). A cette époque, le compostage et épandage en prairies n'était pas (peu) pratiqué, de sorte que l'épandage du fumier était essentiellement concentré en terre de culture avec l'impact que l'on peut aisément imaginer dans des exploitations principalement herbagères.

Cette augmentation de la disponibilité d'azote organique est également concomitante à un doublement de la consommation d'engrais azoté de synthèse (tableau 1-5).

Enfin, dans les années soixante et septante, il était d'usage d'apporter une première fraction d'azote lors du semis des céréales (Annexe 1). L'APL de la culture qui précédait devait donc être régulièrement augmenté de quelques dizaines d'unités.

Il convient cependant de mentionner qu'au cours de la période 1960-1990, la part du territoire occupé par le secteur agricole a régulièrement régressé (~10%) et que les rendements des cultures ont augmenté de 20 à 50%, exportant ainsi plus d'azote (en partie sous forme de protéines).

Il importe cependant de ne pas jeter l'opprobre sur ces agriculteurs. D'une part, parce qu'après la guerre (durant laquelle la famine a parfois régné), le mot d'ordre était de produire toujours plus et d'autre part, parce qu'à cette époque, les enjeux environnementaux, qu'ils soient liés au secteur de l'agriculture ou de l'industrie (sidérurgie, textile, ...) n'étaient pas perçus ou considérés.

## Annexe 4. Bibliographie

- Anonyme (1946). "La situation de l'agriculture en 1946," Ministère de l'Agriculture (Belgique). Administration des Services Economiques, Bruxelles.
- Anonyme (1953). "Recensement Général de l'Agriculture de 1950. Relevé des animaux," Institut National de Statistique, Bruxelles.
- Anonyme (1970). "Statistiques Agricoles," Institut National de Statistique, Bruxelles.
- Anonyme (1989). "Statistiques Agricoles. Etude cartographique de l'agriculture belge," Institut National de Statistique, Belgique.
- Anonyme (1991). "Statistiques Agricoles Provinciales," Ministère de l'Agriculture, Bruxelles.
- Anonyme (2012). "Evolution de l'économie agricole et horticole de la Wallonie 2010-2011," Service Public de Wallonie, Namur.
- Blomme, J. (1988). De economische ontwikkeling van belgische landbouw, 1880-1980. Een kwantitatieve en kwalitatieve analyse., Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.
- Bouquiaux, J.-M. (1995). "Evolution de l'agriculture belge et son impact sur le milieu depuis 1950," Ministère des Classes moyennes et de l'Agriculture, Institut Economique Agricole, Bruxelles.
- Brakel, J. (1957a). Est-il opportun d'augmenter ou de diminuer l'étendue réservée aux betteraves sucrières à la ferme de Montaigle (Commune de Falaën) ?, Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Brakel, J. (1957b). Plan de culture. Exploitation d'une ferme de 62 hectares situées dans l'entre-Sambre et Meuse à Montaigle (province de Namur). Spéculations animales importantes. Engraissement porcin., Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Bublout, G. (1957). "La production agricole belge. Etude économique séculaire. 1846-1955.," Institut de Recherches Economiques et Sociales, Louvain.
- Couvreur, L. (1973). Une exploitation agricole mixte en région limoneuse hennuyère. Aspects techniques et économiques. Travail de fin d'étude, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Crohain, A. (1955). Plan de culture d'une ferme de 29 hectares située dans la région d'Enghien, Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Crohain, A., and Rixhon, L. (1967). La valeur fertilisante pratique des feuilles et collets de betterave. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* **2**, 397-428.
- Crohain, A., and Rixhon, L. (1968). La valeur fertilisante pratique d'un engrais vert de vesce, d'une paille de céréale et d'écumes de sucrerie. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* **3**, 392-431.
- De Leenheer, L., and Van Ruymbeke, M. (1973). Les circonstances météorologiques comme facteur de la fertilité du sol en Belgique. Leur influence sur le rendement et l'alimentation (N, P, K) de la culture betteravière. *Pédologie* **XXIII**, 147-176.
- de Leval, J. (1970). Revue de la littérature relative aux problèmes du lisier de bovidés. *Revue de l'Agriculture* **6-7**, 909-927.
- Delhaye, R. J. (1971). Comportement de quelques variétés de colza d'hiver dans la région de Gembloux. *Revue de l'Agriculture* **5**, 685-693.
- Delhaye, R. J. (1972). Etude du comportement de sept variétés de maïs grain à Gembloux de 1969 à 1971. *Revue de l'Agriculture* **2**, 265-276.
- Deliège, R. (1952). Plan de la ferme du château de Creve-Coeur à Herve, Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Delvaux, M. (1975). Etude d'une exploitation familiale mixte de grande taille en région sablo-limoneuse. Travail de fin d'étude, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Despontin, D. (1971). Etude technico-économique d'une exploitation mixte en région limoneuse. Travail de fin d'étude, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Destain, J. P., Couvreur, L., Herman, J. L., Goffart, J. P., Reuter, V., Monfort, B., Bodson, B., Vandenberghe, C., Imbrecht, O., Lambert, R., and Vancutsem, F. (2008). La fumure azotée. In "Livre Blanc" (M. De Proft and **B. Bodson**, eds.), pp. 201. FUSAGx et CRA-W, Gembloux.

- Destain, J. P., Roisin, C., Vandenberghe, C., Marcoen, J. M., Monfort, B., Bodson, B., Seutin, B., and Vancutsem, F. (2010). La fumure azotée. In "Livre Blanc" (M. De Proft and B. Bodson, eds.), pp. 204. Gembloux Agro-Bio Tech et CRA-W, Gembloux.
- Dony, P. (1973). Etude technico-économique d'une exploitation agricole du Condroz. Travail de fin d'étude, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Forget, M. J. (1949). Evolution économique de l'agriculture belge au cours d'un siècle. *Revue de l'Agriculture* **10**, 847-884.
- Frankinet, M., and Rixhon, L. (1983). Céréales. Successions culturales et orientation en travail du sol. *Revue de l'Agriculture* **36**, 561-565.
- Goffart, J. P., Rouxhet, F., Couvreur, L., and Guiot, J. (1995). L'azote minéral dans le sol en 1994-1995. In "Fumure et Protection Phytosanitaire des Céréales. Conclusions des recherches effectuées en 1994" (F. d. S. A. d. G. e. C. d. R. A. d. I. E. (Gembloux), ed.), pp. 27-32, Gembloux.
- Guillaume, Y. (1961). Plan de gestion d'une exploitation ardennaise. Travail de fin d'étude, Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Guiot, J. (1969). Etude Préliminaire du dynamisme de l'azote minéral dans un sol limoneux profond. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* **4**, 260-271.
- Guiot, J. (1971). Evolution de l'azote minéral dans le sol et fumure azotée du blé d'hiver. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* **6**, 280-325.
- Guiot, J. (1973). La migration de l'azote dans le sol. In "Semaine d'étude Sol et Fertilisation", pp. 378-385. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Guiot, J., Rouxhet, F., Goffart, J. P., and Couvreur, L. (1994). Evolution de l'azote minéral dans le profil cultural en 1993-94. In "Fumure et Protection Phytosanitaire des Céréales. Conclusions des recherches effectuées en 1993" (F. d. S. A. d. G. e. C. d. R. A. d. I. E. (Gembloux), ed.), pp. 1-10, Gembloux.
- Guldentops, R. (1983). Importance des grandes cultures. Aperçu historique de l'évolution des grandes cultures en Belgique. *Revue de l'Agriculture* **36**, 483-492.
- Herman, J. L., Frankinet, M., Mééus-Verdinne, K., Goffart, J. P., Destain, J. P., Couvreur, L., and Grevy, L. (1998). L'azote minéral du sol en 1997-98 sous froment d'hiver. In "Fumure et Protection Phytosanitaire des Céréales. Conclusions des recherches effectuées en 1997" (F. d. S. A. d. G. e. C. d. R. A. d. I. E. (Gembloux), ed.), pp. 1-6, Gembloux.
- Herman, J. L., Rouxhet, F., Frankinet, M., Couvreur, L., and Guiot, J. (1996). Evolution de l'azote minéral dans le sol en 1995-96. In "Fumure et Protection Phytosanitaire des Céréales. Conclusions des recherches effectuées en 1995" (F. d. S. A. d. G. e. C. d. R. A. d. I. E. (Gembloux), ed.), Gembloux.
- Laloux, R. (1957). Essais de fumure au moyen de divers types d'engrais. *Bulletin de l'Institut agronomiques et des Stations de recherches de Gembloux* **15**, 339-352.
- Laloux, R. (1967). "Propos sur la fumure azotée du froment d'hiver. Indications concertant l'utilisation du C.C.C.," Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Laloux, R. (1968). "Desherbage, traitement au C.C.C. et fumure des céréales. Conclusions des recherches effectuées en 1967 sur le froment d'hiver et de printemps, l'orge d'hiver et de printemps," Centre de Recherches Agronomiques de l'Etat et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Laloux, R. (1969). "Desherbage, traitement au C.C.C. et fumure des céréales. Conclusions des recherches effectuées en 1968 sur le froment d'hiver et de printemps, l'orge d'hiver et de printemps," Centre de Recherches Agronomiques de l'Etat et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Laloux, R. (1971). "Fumure et protection phytosanitaire des céréales. Conclusions des recherches effectuées en 1970," Centre de Recherches Agronomiques de l'Etat et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Laloux, R. (1973). Une méthode de conduite de culture et de fractionnement de la fumure azotée en céréales. In "Semaine d'étude Sol et Fertilisation", pp. 507-515. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Laloux, R., Poelart, J., and Falisse, A. (1975). Fumure azotée des céréales. *Revue de l'Agriculture* **5**, 1173-1202.

- Lambert, R., Van Bol, V., Maljean, J. F., and Peeters, A. (2002). "Prop'Eau-Sable Projet-pilote pour la protection des eaux de la nappe des sables bruxellois." Université catholique de Louvain (Laboratoire d'Ecologie des Prairies - Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale), Louvain-la-Neuve.
- Ledent, J. F., and Pironnet, A.-M. (1982). Evolution de l'importance et de la répartition de maïs entre 1929 et 1980. *Revue de l'Agriculture* **35**, 1945-1964.
- Lequeut, E. (1970). Le maïs fourrager, le ray-grass d'Italie. Etude comparative des rendements, des coûts de production et des valeurs bromatologiques. Travail de fin d'étude, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Limbourg, P. (1959). Contribution à l'écologie herbagère du terroir de Focant-Martouzin. Travail de fin d'étude, Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Ministère de l'Agriculture (1967). Rapport technique sur la situation de l'agriculture et de l'horticulture en 1966. *Revue de l'Agriculture* **5**, 697-730.
- Muntz, M. A., and Girard, A.-C. (1888). "Les engrais. Alimentation des plantes. Fumiers," Bibliothèque de l'enseignement agricole, Paris.
- Muntz, M. A., and Girard, A.-C. (1889). "Les engrais. Engrais azotés - engrais phosphatés," Bibliothèque de l'enseignement agricole, Paris.
- Nutelet, R., and De Schrijver, J. (1983). Importance des grandes cultures. Superficies et régions de production des grandes cultures en Belgique. *Revue de l'Agriculture* **36**, 493-505.
- Nys, L. (1975). Fumure spéciale de la pomme de terre. *Revue de l'Agriculture* **5**, 1129-1242.
- Paduart, S. (1970). Réorganisation d'une ferme mixte du Hainaut agricole. Travail de fin d'étude, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- Rixhon, L. (1953). Plan de culture d'une exploitation d'une cinquantaine d'hectares dans la région de Gembloux, Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Rixhon, L., and Crohain, A. (1965). Régulateurs de croissance et techniques culturales. *Bulletin de l'Institut agronomiques et des Stations de recherches de Gembloux* **33**, 631-654.
- Roland, L. (1970). Influence de différents modes d'application de la fumure azotée. Contribution à l'étude sur le rendement et la qualité du grain de deux variétés de froment d'hiver au cours de l'année culturale 1968-1969. *Revue de l'Agriculture* **5**.
- Roussel, N., and Jardin, A. (1975). La fumure minérale des betteraves sucrières. *Revue de l'Agriculture* **5**, 1203-1228.
- Sohet, R. (1957). Plan de culture de la ferme de la Fontaine à Thisnes-les-Hainaut. Travail de fin d'étude., Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Thonon, A. (1975). Croissance de la productivité et progrès économique. Le cas de l'agriculture belge 1953-1972. *Revue de l'Agriculture* **2**, 249-284.
- Tournay, N. (1951). Famenne - Pays de Marche. Plan de culture d'une exploitation, Institut Agronomique de l'Etat, Gembloux.
- Vancutsem, F., Seutin, B., Destain, J. P., Roisin, C., Monfort, B., Vandenberghe, C., Marcoen, J. M., Escarnot, E., Lambert, R., De Toffoli, M., and Bodson, B. (2011). La fumure azotée. In "Livre Blanc" (M. De Proft and B. Bodson, eds.), pp. 209. Gembloux Agro-Bio Tech et CRA-W, Gembloux.
- Vancutsem, F., Seutin, B., Destain, J. P., Roisin, C., Monfort, B., Vandenberghe, C., Marcoen, J. M., Escarnot, E., Lambert, R., De Toffoli, M., and Bodson, B. (2012). La fumure azotée. In "Livre Blanc" (M. De Proft and B. Bodson, eds.). Gembloux Agro-Bio Tech et CRA-W, Gembloux.
- Vandenberghe, C., Benoit, J., and Marcoen, J. M. (2010). "Base de données des reliquats azotés de printemps 2010 dans les sols de Wallonie : aide pour un conseil de fertilisation idoine et évolution au cours de l'hiver 2009-2010. Dossier GRENeRA 10-04.." Université de Liège. Gembloux Agro-Bio Tech.
- Vandenberghe, C., and Marcoen, J. M. (2009). "Base de données des reliquats azotés de printemps 2009 dans les sols de Wallonie : aide pour un conseil de fertilisation idoine et évolution au cours de l'hiver 2008-2009. Dossier GRENeRA 09-06.." Université de Liège. Gembloux Agro-Bio Tech.
- Vanorlé, L. (1972). Etude agronomique et socio-économique d'une exploitation familiale mixte en région limoneuse. Travail de fin d'étude, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.

