



**Subvention pour la mise en place d'un suivi lysimétrique afin de
vérifier la pertinence des normes d'épandage et Azote
Potentiellement Lessivable (APL) de référence du Programme de
Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en Région Wallonne**

RAPPORT FINAL

Période 1^{er} mars 2003 au 28 février 2005

Ce document doit être mentionné comme suit :

Fonder N., Vandenberghe C., Xanthoulis D., Marcoen J.M. 2005
Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique dans le cadre du
Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture. Rapport final.
Convention Région wallonne DGA n°3523/1.
Période du 1^{er} mars 2003 au 28 février 2005.
Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. Belgique.
106p.

Le Comité d'Accompagnement est composé de :

- Un représentant du Ministre de l'Agriculture et de la ruralité ;
- Marc Thirion, représentant de la Direction Générale de l'Agriculture ;
- Dimitri Wouez, représentant de l'asbl Nitrawal ;
- Jean Marie Marcoen, promoteur et Christophe Vandenberghe, ingénieur, GRENeRA - FUSAGx;
- Dimitri Xanthoulis, promoteur, président de l'asbl Epuvaleau et Mme Nathalie Fonder, ingénieur, de l'asbl EPUVALEAU ;
- René Bernaerdt, Directeur et Benoît Heens, ingénieur, des services Agricoles de la Province de Liège sont invités en tant que experts.

Résumé

En 1991, le Conseil de la Communauté Economique Européenne émet une directive (91/676/CEE) dont l'objectif est de réduire la pollution des eaux provoquée ou induite par le nitrate d'origine agricole. Les états membres sont tenus d'évaluer la vulnérabilité de leurs eaux vis-à-vis de la pollution par les nitrates d'origine agricole et de désigner des zones vulnérables pour lesquelles un plan d'action doit être mis en œuvre.

La Région Wallonne s'est mise en règle face à ces exigences par l'élaboration, suivie de l'application en 2002, du Plan de Gestion Durable de l'Azote (PGDA). Ce PGDA fixe, notamment, les normes en matières d'épandage d'azote minéral et organique. L'application de ces normes devrait stabiliser la concentration en nitrate des eaux (de surface et souterraines). Cette stabilisation attendue dans les eaux est suivie par le « Survey Nitrate ». Les agriculteurs qui souhaitent déroger aux normes en vigueur doivent se soumettre à un suivi de leurs terres et se conformer à certaines règles de bonnes pratiques agricoles. Des mesures de reliquats azotés sont prises sur les terres et comparées à des valeurs de références. Ce réseau de référence est le « Survey Surface Agricole ». L'approche lysimétrique a été retenue afin de quantifier la lixiviation du nitrate sous la zone racinaire. Les lysimètres constituent un outil de suivi et ont pour objectif de confirmer la pertinence des normes d'épandage ainsi que le code de bonnes pratiques agricoles proposé, qui ont pour objectif la préservation de la qualité des eaux. La quantification est obtenue grâce aux bilans de fertilisation azotée et hydrologique.

Abstract

In 1991, the European Council voted the directive 91/676/CEE. Its goal is to reduce water pollution by nitrate induced from agriculture uses. The member states of EU are obliged to assess the vulnerability of their waters towards nitrate pollution and to identify the vulnerable zones, where an action plan must be organized.

The Walloon Government transposed the European Nitrate Directive in the Walloon law and initiated on October 10th, 2002 the Sustainable Management Program of Nitrogen in Agriculture (in French, PGDA). In particular, this management program determines norms for mineral and organic spreading. In pursuance of these new norms, the nitrate concentration in waters (surface and groundwater reservoirs) should be stabilized. The «Nitrate Survey» monitors the expected stabilization. Farmers have the opportunity to depart from the norms on conditions of regular control of their lands and application of a “code of agricultural good practices”. Nitrogen residues in their soils are measured during autumn and compared to reference values. The reference network is the “Agricultural Surfaces Survey”. The lysimetric technique approach was selected to quantify the nitrate lixiviation under the root zone. Lysimeters can be used as monitoring tools and intend to confirm the pertinence of the spreading norms and to verify that the “code of good practices” will achieve the result of water quality preservation. The quantification is obtained by means of water and nitrogen fertilization balances. The time forecast of the nitrate leaching within the soil solution, indicates the delay that will be needed to observe the stabilization of nitrate concentration in deep groundwater reservoirs.

TABLE DES MATIÈRES

RESUME.....	1
ABSTRACT	1
TABLE DES MATIÈRES	2
LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET GRAPHIQUES	4
1 INTRODUCTION.....	5
1.1 OBJECTIFS	6
1.2 TACHES SPECIFIQUE DE LA SUBVENTION	7
1.3 PLANNING	8
1.4 RESUME DES ACTIVITES PAR PERIODES.....	9
1.4.1 <i>Première période : 0-6 mois (Mars 2003 –Sept 2003)</i>	9
1.4.2 <i>Deuxième période : 6-12 mois (Oct 2003- février 2004)</i>	9
1.4.3 <i>Activités de la troisième période : 12-18 mois (Mars 2004 – Sept 2004)</i>	10
1.4.4 <i>Activités de la quatrième période : 18-24 mois (Oct 2004 –février 2005)</i>	10
2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	12
2.1 LA LEGISLATION.....	12
2.1.1 <i>La Directive Européenne</i>	12
2.1.2 <i>Le PGDA en Région Wallonne</i>	15
2.2 LA PROBLEMATIQUE DU NITRATE.....	16
2.2.1 <i>Le cycle de l’azote</i>	16
2.2.2 <i>La problématique du « Nitrate »</i>	20
2.3 RAPPELS HYDROLOGIQUES.....	21
2.3.1 <i>Introduction</i>	21
2.3.2 <i>Mouvement d’eau dans le sol</i>	22
2.3.3 <i>Mouvement de l’azote dans le sol</i>	24
2.3.4 <i>Mouvement d’eau et d’azote dans une nappe</i>	27
2.4 LA TECHNIQUE LYSIMETRIQUE	28
2.4.1 <i>Définition</i>	28
2.4.2 <i>Rappel</i>	28
2.4.3 <i>Historique</i>	28
2.4.4 <i>Principe</i>	29
2.4.5 <i>Les différents types, avantages et inconvénients</i>	33
3 MATERIEL ET METHODE.....	38
3.1 APPLICATION IN SITU DE LA TECHNIQUE LYSIMETRIQUE	38
3.2 CRITERES DE CHOIX DES SYSTEMES IMPLANTES	38
3.3 DESCRIPTION DES SITES RETENUS.....	40
3.3.1 <i>Critères de choix</i>	40
3.3.2 <i>Description des sites</i>	41
3.3.3 <i>Localisation et Caractérisation pédologique</i>	41
3.4 METHODOLOGIE DE MISE EN ŒUVRE	49
3.4.1 <i>Construction</i>	49
3.4.2 <i>Installation du système remanié</i>	51
3.4.3 <i>Installation du système non remanié</i>	52
3.4.4 <i>Installation des chambres de visites</i>	53

Table de matières (suite)

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET GRAPHIQUES

Figure 1 : Le cycle de l'azote	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : Courbes $K-\Psi$ et $\Psi - \Theta$	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3 : Schéma des différents composants du lessivage.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 4 : schéma de principe d'un lysimètre	30
Figure 5 : schéma de la répartition de l'eau dans le sol et le sous-sol	32
Figure 6 : schéma lysimètre ouvert et de la plaque de tôle placée dans le sol	34
Figure 7 : schéma d'assemblage d'un capteur de solution équipé d'une bougie poreuse.....	36
Figure 8: Localisation des parcelles PL1 et PL3 de Mr Pirlot sur fond de carte des sols de la Belgique	45
Figure 9: Localisation de la parcelle Sole4 de Mr Pirlot sur fond de carte des sols de la Belgique	46
Figure 10: Localisation des parcelles de Mr Seutin : Bovenistier, Petit Pont et Chemin de Fer sur fond de carte des sols de la Belgique.	47
Figure 11 : Schéma du système lysimétrique en sol remanié	50
Figure 12 : Schéma du système lysimétrique en sol non remanié	51
Graphique 1 : relevé piézométrique mensuel de la nappe par rapport au lysimètre, parcelle PL3.	Erreur ! Signet non défini.
Graphique 2 : teneur en nitrate dans le lysimètre de la parcelle PL3 et dans les drains des parcelles avoisinantes	Erreur ! Signet non défini.

Tableau : Erreur ! Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

1 Introduction

Ce rapport finalise l'étude réalisée pour la « **Mise en place d'un suivi lysimétrique afin de vérifier la pertinence des normes d'épandage et Azote Potentiellement Lessivable (APL) de référence du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en Région Wallonne** », allouée par le Ministère de la Région wallonne à l'asbl Epuvaleur, en partenariat avec GRENeRA, pour une période de deux ans (mars 2003- mars 2005).

Cette subvention s'inscrit dans le cadre d'une agriculture durable, soucieuse de la fertilité du sol et minimisant le risque environnemental.

Le Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en agriculture wallonne a fixé des normes en matière d'épandage d'azote minéral et organique. Le respect de ces normes devrait stabiliser la concentration en nitrate des eaux (de surface et souterraines) en dessous de la norme de potabilité fixée par l'OMS. L'accompagnement des agriculteurs dans ces nouvelles démarches est réalisé par Nitrawal créée en 2000 à l'initiative des Ministres de l'Environnement et de l'Agriculture de la Région wallonne. Nitrawal est composé d'une quinzaine d'agents spécialistes de la gestion de l'azote, répartis dans 4 centres d'action régionaux et un centre de coordination situé à Gembloux, de 2 cellules d'appui scientifique (ECOP, laboratoire d'Ecologie des Prairies de l'UCL et GRENeRA, Groupe de Recherche Environnement et Ressources Azotées de la FUSAGx), et de 2 partenaires qui assurent le relais auprès des secteurs d'activité de l'eau (AQUAWAL, Association Régionale Wallonne de l'Eau regroupant les principaux producteurs, distributeurs et épurateurs d'eau) et de l'agriculture (FWA, la Fédération wallonne de l'Agriculture).

Cette stabilisation attendue de la concentration en nitrate des eaux sera suivie, au travers du « Survey nitrate », par la DGRNE et Aquawal. Ce Survey Nitrate est constitué de plusieurs centaines de points répartis dans les eaux de surface (rivières) et souterraines.

Les agriculteurs qui souhaitent déroger aux normes d'épandage d'azote organique fixées par le PGDA, entrent en Démarche Qualité. Chez ceux-ci, cinq parcelles sont échantillonnées chaque année en vue d'en établir le profil de concentration en azote nitrique. Les résultats sont comparés à des valeurs d'azote potentiellement lessivable (APL) de référence (en termes de fertilisation raisonnée) établies annuellement par GRENeRA (FUSAGx) et ECOP (UCL), les deux membres scientifiques de Nitrawal. Ces références sont construites sur base de mesures réalisées annuellement dans un ensemble de points représentatifs appelé Survey Surfaces Agricoles (SSA). Vingt-cinq exploitations agricoles constituent actuellement ce SSA dans lequel deux cents parcelles sont suivies annuellement en termes de reliquat azoté (Vandenberghe et al, 2004).

Cette étude tente de vérifier l'adéquation de ces valeurs de référence avec l'objectif de préservation de la qualité des eaux.

Par ailleurs, le rapport final de la convention « Programme Action Hesbaye » (Dautrebande, 1996) a clairement montré qu'à côté de l'agriculture, les secteurs industriel et domestique avaient également un impact sur la qualité des eaux souterraines. Des améliorations sont également en cours dans la gestion des eaux résiduaires issues de ces deux

secteurs (traitement tertiaire). Le « Survey nitrate », tel qu'il sera réalisé, présentera une vue d'ensemble de l'état (en terme de concentration en nitrate) des eaux souterraines mais ne permettra pas de distinguer l'impact d'une politique environnementale mise en place dans l'un ou l'autre secteur d'activité (Dautrebande, 1996).

De plus, le contexte géo-pédologique de certaines régions (en particulier la Hesbaye) est tel que les résultats du Programme de Gestion Durable de l'Azote ne seront mesurables que dans une dizaine d'années ou plus. Le transit des ions lixiviés dans la zone non saturée (entre sol superficiel et domaine des eaux souterraines proprement dites) constitue la véritable « inconnue » du système.

1.1 Objectifs

L'asbl Epuvaleur en collaboration avec la cellule d'appui scientifique GRENeRA a mené une étude scientifique avec mise en place de sites lysimétriques de plein champ, sous pratiques agricoles réelles, afin de :

- évaluer dans le cadre d'une rotation, la pertinence des APL de référence dans le souci de protection des eaux souterraines ;
- confirmer les normes d'épandage adoptées par le PGDA ;
- et aider, le cas échéant, Nitrawal à établir des propositions de modification du programme de gestion de l'azote établi.

Dans le cadre d'une première collaboration GRENeRA/Epuvaleur¹, il a été montré que des fluctuations annuelles du climat (température et pluviométrie) avaient un impact sur le reliquat azoté en début de période de drainage. Cet impact a nécessairement des répercussions sur la qualité des eaux qui percolent vers les nappes phréatiques. Ces sites lysimétriques en seront également un outil de mesures et de suivi.

¹ Étude des résidus azotés dans le sol dans le cadre de cultures maraîchères irriguées sur le site de Hesbaye Frost (Geer), D. Xanthoulis, Ph. Dumont, 2002

1.2 Tâches spécifiques de la subvention

Les tâches spécifiques du projet sont :

1. établissement du protocole expérimental en concertation avec deux exploitations agricoles à identifier et GRENeRA ;
2. installation de 3 lysimètres dans chacune des deux exploitations identifiées précédemment ;
3. suivi des percolats : volume, analyse de la teneur en nitrate et commentaire des résultats dans la perspective de leur utilisation dans le cadre du PGDA ;
4. suivi des précipitations et de différents paramètres climatiques ;
5. collecte des données de rendements obtenus sur les différentes parcelles suivies ;
6. rapports semestriels et final.

Le planning de la page suivante présente la répartition de ces tâches sur la durée de la subvention.

1.3 Planning

Tâches	Année 2003												Année 2004												2005	
Mois	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02		
Installation																										
Prélèvements																										
Ech. modélisation																										
Ttmt résultats																										
Rapport																										
Bibliographie																										

Protocole/Installation : le premier lysimètre a été installé en avril 2003 et le sixième au mois d'août 2003.

Prélèvements : les échantillons ont été prélevés dès les premiers écoulements observés (juin 2003) et durant toute la période de drainage (jusqu'aux mois d'avril et mai, en général pour la Belgique) ; Dans le cadre de cette étude, l'échantillonnage s'arrêtera avec la fin de la quatrième période, soit à la fin du mois de février 2005.

Echantillonnage pour définir les paramètres du **modèle mathématique**, dès le printemps et durant la saison culturale.

Traitements et interprétations des résultats : peu après la phase de démarrage, les résultats sont traités et interprétés en continu, de manière à adapter en permanence la pertinence et la fréquence des prélèvements.

Rapports : les rapports sont remis semestriellement ; le rapport final clôture cette première subvention.

Etude bibliographique : continue, adaptée aux difficultés techniques rencontrées, à l'interprétation des résultats obtenus, à de nouvelles possibilités d'investigation, etc..

1.4 Résumé des activités par périodes

Les activités menées lors des 24 mois de la subvention ont fait l'objet de quatre rapports semestriels. Les étapes principales en étaient les suivantes.

1.4.1 Première période : 0-6 mois (Mars 2003 –Sept 2003)

La première étape au démarrage de la subvention a été une étude bibliographique sur la lysimétrie en général, le principe de base et les différents systèmes utilisés. Des sites lysimétriques, toujours à l'étude ou non par des programmes de recherche en France, ont été visités.

Cette recherche par le biais de la littérature a permis de faire le point sur les différents systèmes lysimétriques, leurs nécessités en matière de conception et de fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients inhérents. De par les impositions de la subvention, les objectifs de recherche, les limites techniques et financières, deux systèmes lysimétriques ont été retenus, un système « remanié » et un système « non remanié ». Il a été décidé que trois lysimètres seraient installés en système sol remanié, et les trois autres en système sol non remanié. Tous sont installés en plein champ, dits *in situ*, sous conditions agricoles réelles et sans gêne pour les cultivateurs. Le premier rapport intermédiaire détaille les systèmes remaniés et non remanié choisis, les critères de choix qui ont orienté cette décision et les impositions techniques à mettre en œuvre pour un fonctionnement et une saisie de résultats optimaux. Les étapes de la construction et de l'installation des cuves lysimétriques sont exposées.

Les critères de sélection des sites ont été de faire partie des fermes de référence suivies par GRENeRA en Hesbaye ; faire partie du réseau d'irrigation géré par le CMH (Centre Maraîcher de Hesbaye) ; être représentatif de la région d'un point de vue pédologique ; et avoir l'accord des fermiers pour la réalisation et le suivi de telles installations sur leurs terres. Une localisation topographique et une caractérisation pédologique ont été effectuées pour chaque parcelle.

1.4.2 Deuxième période : 6-12 mois (Oct 2003- février 2004)

La deuxième période a été consacrée à la mise au point de la méthodologie d'échantillonnage, aux prélèvements proprement dits, à la résolution de problèmes techniques et études annexes, aux analyses, aux premiers traitements et interprétations des résultats.

Les problèmes techniques rencontrés ont été des intrusions d'eau dans les chambres de visites, soit par le fond, soit par le haut de ces dernières, soit encore par débordement des bidons de récolte à l'intérieur de celle-ci. Des produits d'étanchéité ont été appliqués sur les fonds des chambres de visite présentant une porosité. Des ré-hausses ont été ajoutées aux chambres existantes lorsque le dénivelé du terrain induisait des entrées d'eau de ruissellement par le couvercle. Afin d'éviter le débordement des bidons de récolte, la fréquence des prélèvements a été augmentée (jusqu'à devenir quotidienne) et plusieurs bidons ont été placés en série dans la chambre de visite, reliés par un by-pass. La quantité d'eau récoltée dans les bidons de deux sites étant supérieure aux capacités de drainage des sols de ces sites, mis en relation avec les données de pluviométrie, un réseau de piézomètres a été installé afin de connaître le niveau piézométrique d'une éventuelle remontée temporaire de nappe. Installés sur deux sites, les

niveaux piézométriques ont été relevés une fois par semaine (parfois deux fois) en période hivernale. Ils ont été retirés au printemps pour l'un de ces sites afin de permettre le semis de la culture suivante; et à l'été pour la seconde parcelle afin de permettre la moisson du froment. Des sondes TDR ont été installées afin de comprendre pourquoi certains sites percolaient et d'autres pas. Les pluviomètres sont relevés hebdomadairement.

Des échantillons d'eau issue des drains de parcelles alentours des sites lysimétriques sont mesurés une fois par mois, uniquement et immédiatement lors du prélèvement par les kits de terrain et ne sont pas acheminés vers un laboratoire d'analyses.

1.4.3 Activités de la troisième période : 12-18 mois (Mars 2004 – Sept 2004)

La récolte des échantillons s'est poursuivie durant la troisième période. La fréquence de prélèvements et analyse est devenue hebdomadaire en période estivale. Les lysimètres ont cessé de donner de l'eau de percolation dans le courant du mois de juin. La période de drainage suivante a débuté au mois d'août. Un test sur la conservation des échantillons a été mené. L'objectif était d'observer une éventuelle évolution des teneurs en ions nitrate dans les bidons de récolte placés dans les chambres de visite au cours du temps. Ceci afin de valider la fréquence hebdomadaire des relevés, prélèvements et mesures.

La méthodologie mise en œuvre a été dédoubler le bidon de récolte dans une chambre de visite. Le premier bidon récoltant les eaux en provenance du lysimètre et le second servant à y transvaser le surplus et le laisser sur place jour après jour. Un échantillonnage quotidien, à la même heure, a été appliqué pour les deux bidons. La température étant un facteur déterminant dans une dégradation potentielle des ions nitrate avec le temps, cet essai s'est déroulé du 3 au 10 mai 2004. Cette semaine a été retenue car une percolation avait toujours lieu et les températures recommencent à être plus élevées que durant l'hiver.

Les échantillons sont analysés par le BEAGx, le laboratoire Epuvaleau et par l'appareil de mesure de terrain (nitratecheck). Il n'y a pas de corrélations entre méthode de mesures. Il semble que le kit de terrain évalue systématiquement les mesures à la hausse, ainsi que le laboratoire d'Epuvaleau dans une moindre proportion, par rapport au laboratoire de référence du BEAGx.

Les résultats montrent que les variations qui peuvent se produire durant une semaine ne sont pas détectables par la méthodologie employée. Les variations de dégradation du nitrate ne sont pas supérieures aux variations induites par le soin de prélèvements et la précision du laboratoire (20%). Les concentrations sont faibles et leurs variations plus difficiles à mesurer.

L'écart mesuré entre les mesures quotidiennes et la mesure hebdomadaire est inférieur à la précision de 20% annoncée par le laboratoire d'analyse.

Suite à cet essai, la fréquence de prélèvement hebdomadaire a été maintenue.

1.4.4 Activités de la quatrième période : 18-24 mois (Oct 2004 –février 2005)

La récolte des échantillons s'est poursuivie durant la quatrième et dernière période prévue par la subvention. La fréquence de prélèvements et analyse est hebdomadaire.

Un lysimètre ne présentait toujours aucune eau de percolation au début du mois de novembre et un second s'était tari suite à un tassement du sol par le passage d'engins lourds lors de la récolte d'automne. Une mise à saturation a été réalisée par la technique de remontée capillaire pour ces deux lysimètres.

Les deux lysimètres dont le bord supérieur capte la nappe, de forte remontée hivernale, ont été fermés à l'aide de vannes. Le suivi hebdomadaire des piézomètres, localisés dans une proximité immédiate, permet de connaître en permanence la hauteur de la nappe et permettra la réouverture des exutoires lors de sa descente.

2 Etude bibliographique

2.1 La législation

2.1.1 La Directive européenne

En bref

La Directive Européenne Nitrate (Directive 91/676 CE) a pour objectif de prévenir ou limiter la pollution des eaux par le nitrate d'origine agricole à une concentration maximum de 50 mg NO₃⁻/l. Les états membres sont tenus d'évaluer la vulnérabilité de leurs eaux vis à vis de la pollution par les nitrates et de désigner des zones vulnérables pour lesquelles un plan d'action doit être mis en œuvre. Cette directive oblige tous les états membres de l'Union Européenne à mettre en œuvre différentes mesures de protection contre les excès en nitrate. Le but de cette directive est d'agir en faveur de la santé publique et de la qualité de l'eau des nappes, des eaux souterraines, des rivières, des lacs et des eaux côtières.
(doc source Europa : portail web de l'Union européenne)

Acte

Directive **91/676/CEE** du Conseil, du 12 décembre 1991, concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles [Journal officiel L 375 du 31.12.1991] .

Date d'entrée en vigueur : 20.12.1993

Objectif

Réduire ou prévenir la pollution directe et indirecte des eaux par le nitrate provenant de l'agriculture.

Synthèse

La pollution de l'eau par le nitrate a été favorisée par la mise en place de méthodes de production agricole intensives, qui s'est traduite par une utilisation accrue des engrais chimiques et par une concentration plus grande du cheptel sur des étendues plus réduites.

La pollution des eaux par le nitrate pose des problèmes à tous les pays de la Communauté. Les sources de pollution par le nitrate sont diffuses (rejet en multiples points difficiles à localiser) et les principaux pollueurs, les exploitations agricoles, sont sensibles aux éléments qui ont des répercussions sur la viabilité économique de leur exploitation.

Dans les années 80, on a observé une dégradation continue de la situation (autour de 1 mg/l d'accroissement de concentration en nitrate en moyenne chaque année dans les eaux) du fait du développement des élevages hors-sol (poulets, porcs) dans des zones déjà saturées et des cultures intensives utilisant les désherbages chimiques et la sur-fertilisation.

Lors de la conférence ministérielle de Francfort de 1988, un examen de la législation relative à la protection de l'eau a été effectué. Les participants ont souligné la nécessité d'améliorer la législation, ce qui a abouti à l'adoption de la directive sur les eaux urbaines résiduelles et de la directive "nitrate".

Les États membres définissent sur leur territoire :

- les eaux de surface et souterraines touchées par la pollution ou susceptibles de l'être, sur la base d'une procédure et de critères énumérés par la directive;
- les zones vulnérables qui contribuent à la pollution.

Les États membres établissent, pour les agriculteurs, des codes volontaires de bonne pratique agricole.

Des programmes d'action applicables aux zones vulnérables sont élaborés et appliqués par les États membres. Ils comportent obligatoirement les mesures répertoriées dans les codes de bonne conduite, ainsi que des mesures visant à :

- Limiter l'épandage sur les sols de tout engrais contenant de l'azote;
- Fixer des limites pour l'épandage d'effluents d'élevage.

La directive autorise les États membres à compléter ou renforcer les programmes d'action afin d'atteindre les objectifs de la directive.

Les États membres surveillent la qualité des eaux et appliquent à cette fin des méthodes de mesure de référence standardisées pour les dosages de composés azotés.

La directive établit des dispositions relatives à l'adaptation des annexes au progrès scientifique et technique.

Des rapports sont établis et présentés régulièrement à la Commission par les États membres sur l'application de la présente directive.

Rapports d'application

Rapport COM(97)473 final

Rapport de la Commission au Conseil et au Parlement en 1997, sur la mise en œuvre de la directive 91/676/CEE du Conseil, concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. Selon la Commission, seuls 4 États membres avaient rempli leurs obligations de transposition, 4 ans après l'expiration du délai prévu par la directive (20 décembre 1993) . Il s'agissait du Danemark, de l'Espagne, de la France et du Luxembourg. La plupart des États membres ont mis en place des codes de bonne pratique agricole, toutefois, la Commission estime important d'examiner une nouvelle fois leur contenu et d'évaluer la cohérence des codes applicables à des régions possédant des caractéristiques similaires.

La directive "nitrate" prévoit la possibilité, pour les États membres d'être exemptés de l'obligation de désigner des zones vulnérables spécifiques, lorsque des programmes d'action sont créés au plan national. Certains États membres ont eu recours à cette dérogation (Danemark, Allemagne, Luxembourg, Pays-Bas et Autriche).

À la date du rapport (1997), la plupart des pays n'avaient pas désigné les zones vulnérables, conformément à la directive (Belgique, Grèce, Espagne, Portugal, Finlande et Royaume-Uni). L'instauration de programmes d'action en faveur des zones vulnérables constitue l'élément essentiel de la directive "nitrate", puisqu'ils devaient imposer des mesures de restriction obligatoires aux activités des agriculteurs. Les programmes d'action auraient dû commencer le 20 décembre 1995. Dans les faits, seuls le Danemark, l'Allemagne, le Luxembourg, l'Autriche et la Suède ont notifié leur programme d'action à la Commission au 30 juillet 1997. La Commission estime qu'il est trop tôt pour déterminer l'impact réel de la directive sur la

pollution par les nitrates en raison de la transposition tardive et parfois incomplète de cette directive. Par conséquent, aucune révision de la directive n'est prévue à la suite de la présentation du rapport.

Rapport COM (2002) 407 final

Rapport de la Commission, du 17 juillet 2002, sur la mise en œuvre de la directive 91/676/CEE du Conseil concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir des sources agricoles. Synthèse des rapports établis par les États membres pour l'année 2000.

Tous les États membres ont transposé la directive, créé un réseau de surveillance, établi un code de bonnes pratiques et désigné les zones vulnérables (exception faite de l'Irlande). Ces réseaux de surveillance montrent que plus de 20% des eaux souterraines de l'Union et entre 30 et 40% des lacs et rivières présentent des concentrations trop hautes en nitrates. L'azote d'origine agricole représente de 50 à 80% des apports en nitrates dans les eaux européennes.

Les effets de l'application de la directive ne seront atteints que dans quelques années, mais dans certaines régions, des résultats positifs commencent à être observés.

Bien que le rapport estime que la directive est de toute actualité et ne doit pas être réformée, des actions en vue d'améliorer l'application sont souhaitables:

- Réaliser des études sur le rapport coût/efficacité des mesures préventives;
- Renforcer les contrôles sur le terrain et prévoir des sanctions pour ceux qui ne respectent pas la directive.

La coordination en vue d'une application commune des directives sur l'eau s'avère nécessaire, entre autres dans les domaines suivants:

- L'harmonisation des points de prélèvement, des réseaux, des paramètres et des contrôles de la qualité de l'eau;
- L'évaluation des versements de nutriments dans l'eau ainsi que l'indication de leur origine;
- Le développement des modèles qui font le lien entre les effets sur l'environnement et les causes.

2.1.2 Le PGDA en Région Wallonne

La mise en œuvre de cette directive est assurée en Wallonie par le PGDA (Programme de Gestion Durable de l'Azote), transcrit dans l'arrêté du gouvernement Wallon du 10 octobre 2002 (Moniteur Belge du 29-11-02).

Ce programme définit de nouvelles règles concernant les quantités de fertilisants à épandre, les périodes et conditions d'épandage ainsi que les modalités de stockage des effluents d'élevage.

Quatre zones vulnérables ont été désignées, où les capacités d'épandage autorisées sont moindres. La détermination de ces zones se base sur l'étude de l'évolution de la contamination des eaux par le nitrate dans le temps. Elle se base aussi sur le rapport entre cette contamination et les pratiques agricoles de la région. La nature vulnérable d'une zone est principalement déterminée par la géologie de son sous-sol, souvent très perméable et donc peu protégé. Cinq des ces zones ont été désignées et couvrent 18% de la superficie totale de la Wallonie. L'eau captée dans ces zones représente plus du quart des volumes d'eau prélevés en eaux souterraines pour la distribution publique. En Région Wallonne, 80% de l'eau de distribution provient des nappes souterraines et 20% des cours d'eau et des lacs de barrages (see DGRNE).

Les quantités épandables d'azote contenu dans les matières organiques sont établies distinctement pour les terres arables et pour les prairies. Les normes sont fixées avec des valeurs à respecter annuellement, mais également en moyenne au cours de trois années consécutives.

La capacité d'épandage des exploitations (exprimées en kg d'azote organique) est calculée en fonction des surfaces (et leur localisation) sous labour et en prairies. Le taux de liaison au sol est défini et traduit le rapport entre la charge en azote organique de l'exploitation (effluents d'élevage, boues, compost, ...) et la capacité d'épandage. Le PGDA impose que chaque exploitation dispose de superficies en suffisance pour épandre les fertilisants organiques en minimisant le risque pour l'environnement. L'utilisation des fertilisants organiques a notamment pour fonction d'assurer la fertilité à long terme du sol, son maintien en humus, sa résistance à l'érosion. Dans l'optique d'une agriculture durable, les agriculteurs doivent rechercher un équilibre entre l'élevage, les cultures et les prairies. Ce rapport (taux de liaison au sol) doit être maintenu inférieur à un. Dans le cas contraire, l'agriculteur doit rétablir l'équilibre soit, par l'exportation de matières organiques excédentaires (via la conclusion de contrat de valorisation), soit en s'engageant en « démarche qualité », qui lui permet de bénéficier de valeurs d'épandage dérogatoires, pour autant qu'il suive un plan de gestion de l'azote, encadré par Nitrawal (réalisation de profils azotés, tenue d'une comptabilité de l'azote, couverture du sol en hiver, fertilisation raisonnée, gestion des pâturages, ...).

En plus des obligations de liaisons au sol de l'exploitation, des quantités maximales d'azote, organique et minéral, doivent être respectées au niveau de chaque parcelle. Chaque année, la quantité maximale d'azote organique pouvant être épandue est de 210 kg par hectare ; et chaque année également, la quantité maximale d'azote organique et minéral est plafonnée en fonction de la culture, ayant son importance pour le respect du bilan portant sur trois années consécutives.

Ces normes maximales sont complétées par un ensemble de valeurs de référence pour le calcul, tel que la composition azotée moyenne des effluents d'élevage, la production annuelle d'azote par catégorie d'animale, ... La législation prévoit la possibilité de justifier, au cas par cas, des références différentes moyennant le respect des procédures et d'analyses réalisées dans l'exploitation.

L'épandage de toute matière organique contenant de l'azote est interdite sur sol enneigé, saturé en eau, à moins de 4 mètres d'une eau de surface, ainsi qu'avant, pendant et après cultures pures de légumineuses. De plus, les matières organiques à action rapide (lisiers, purins, effluents de volailles) sont interdites d'épandage sur sols gelés et terres nues (sauf s'il y a incorporation le jour même). L'épandage des fertilisants doit respecter un calendrier d'épandage. Le respect des périodes d'épandage est obligatoire si l'exploitation dispose des capacités de stockage réglementaires.

(doc source Nitrawal, 2004)

2.2 La problématique du nitrate

2.2.1 Le cycle de l'azote

L'azote est un élément majeur à la base de toute forme de vie, tel que l'oxygène, l'hydrogène et le carbone. L'azote se trouve dans l'alimentation sous forme de molécules complexes, comme les protéines ; les végétaux trouvent l'azote dans le sol et dans l'air. L'azote est présent dans la nature sous différentes formes et assemblages moléculaires. Il peut être gazeux, minéral ou organique. Dans le sol, l'azote se trouve soit dans les composés organiques qui constituent plus de 90% de l'azote du sol, soit sous forme minérale (NO_3^- , NH_4^+). Les différents engrais organiques et minéraux contiennent de l'azote sous des formes et des proportions différentes. La forme la plus facilement assimilable par les plantes est minérale, et sont les ions nitrate NO_3^- et ammonium NH_4^+ (Nitrawal, 2004).

L'azote n'est pas inerte dans la biosphère. Un atome initialement dans la matière organique du sol peut être minéralisé, changer d'état d'oxydation, être prélevé par la végétation, lessivé en profondeur ou encore s'échapper dans l'atmosphère. Inversement, un atome présent dans l'atmosphère peut être fixé dans le sol, etc. C'est ce qu'on appelle le cycle de l'azote, schématisé par la figure 1. Dans les écosystèmes agricoles, seule une partie de ce cycle nous intéresse : les processus qui régissent les gains d'azote dans l'écosystème sol-plante, ceux qui causent des pertes et occasionnent des changements de formes (Felix, 2003).

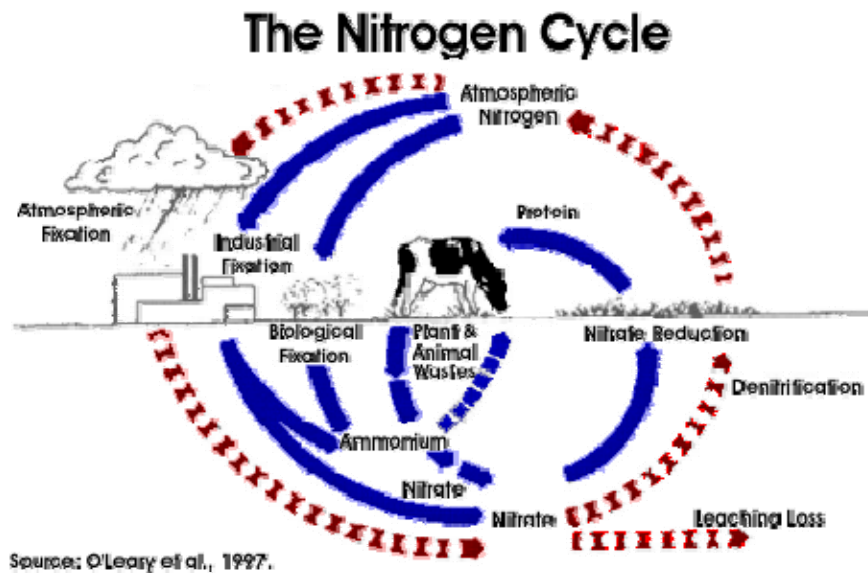


Figure 1 : Le cycle de l'azote (see : US Environmental Protection Agency, AG101 Environmental impacts from nitrates)

Trois types de mécanismes peuvent être distingués dans le cycle de l'azote par rapport à l'écosystème sol- plante. Il s'agit respectivement des mécanismes d'apports dans l'écosystème, de pertes et de transformation au sein de celui-ci.

L'apport d'azote dans l'écosystème sol- plante se fait de différentes manières, dont les principales sont : la fixation biologique, le dépôt lors de précipitations et par interventions de l'homme (Gego, 1991).

- La fixation biologique correspond à la fixation par des micro-organismes de l'azote atmosphérique. Le plus connu de ces micro-organismes est le *Rhizobium* qui se développe dans les nodules des légumineuses.
- Les précipitations peuvent contenir de l'azote sous forme nitrique ou ammoniacale. La forme nitrique est obtenue par combinaison de molécules d'eau et d'oxyde nitreux, lesquels sont des résidus de la combustion des fuels. Les précipitations industrielles en sont plus chargées que les précipitations des zones champêtres. On estime que les quantités d'azote ainsi apportées au niveau du sol sont comprises entre 5 et 20 kg/ha.an.
- L'homme accroît le contenu azoté du sol par le biais des engrais, organiques ou minéraux. Cette composante a une très grande importance dans l'étude des écosystèmes agricoles.

Les pertes d'azote par l'écosystème sol- plante se font sous l'effet des processus de lessivage, d'érosion, de volatilisation, de nitrification et bien sûr lors de la récolte des cultures (Gego, 1991).

- Le lessivage atteint presque exclusivement les nitrates qui sont solubles dans l'eau et ne sont pas adsorbés par les particules minérales solides du sol.
- La volatilisation correspond à l'émanation d'ammoniac au niveau de la surface du sol. Ce processus n'est appréciable que si l'ion ammonium NH_4^+ s'y trouve en grande quantité.

- La dénitrification correspond à la réduction des ions NO_3^- en N_2 ou NO_2 , gaz qui s'échappent du sol. Ce processus est opéré par les bactéries dénitrifiantes en conditions d'anaérobiose. Les quantités dénitrifiées annuellement dans les écosystèmes agricoles varient de 0 à 30 kg/ha.an.
- Les exportations d'azote par la récolte des cultures constituent une composante essentielle du cycle de l'azote dans le sol pour les écosystèmes agricoles.

En termes d'ordre de grandeur, les transformations subies par l'azote dans le sol et les plantes sont beaucoup plus importantes que les processus d'apports et de pertes. Les processus les plus intéressants sont la décomposition de la matière organique, la minéralisation, l'immobilisation, la nitrification et le prélèvement racinaire (Gego, 1991).

- La décomposition de la matière organique, la minéralisation et l'immobilisation : les substances azotées organiques, sous l'action de divers organismes décomposeurs (invertébrés, champignons, bactéries) sont progressivement dégradées. Ce catabolisme peut aboutir à la libération de NH_4^+ dans le sol, à l'incorporation dans les micro-organismes de composés azotés simples, et à la formation de composés organiques stables, c'est-à-dire plus résistants à l'action des micro-organismes que ne l'étaient les composés de base. Les microorganismes dégradent la matière organique du sol pour en tirer de l'énergie. Du NH_4^+ est libéré au cours de cette dégradation, c'est la minéralisation. D'autre part, pour synthétiser leurs constituants les microorganismes prélèvent du NH_4^+ provenant de la solution du sol, c'est l'immobilisation. Immobilisation et minéralisation se déroulent conjointement dans le sol. Les quantités immobilisées pourraient valoir de 30 à 50 % de la quantité minérale. On appelle minéralisation nette la différence entre la minéralisation et l'immobilisation. Dans les sols limoneux, l'ordre de grandeur de la minéralisation nette vaut entre 120 et 200 kg/ha.
- La nitrification correspond à l'oxydation de NH_4^+ en NO_3^- . Ce processus se déroule en deux étapes appelées nitritation (NH_4^+ en NO_2^-) et nitratisation (NO_2^- en NO_3^-). Il est le résultat de l'activité de bactéries dont les plus connues sont respectivement *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*.
- Les racines des végétaux prélèvent par absorption l'azote dont ils ont besoin sous les formes minérales (NO_3^- et/ou NH_4^+). Ils l'incorporent dans des produits de synthèse tels que la chlorophylle, les acides aminés, les protéines, les acides nucléiques, etc. Une partie de l'azote contenu dans les plantes sera exportée lors de la récolte, l'autre sera restituée au sol sous forme de résidus organiques qui pourront être reminéralisés ou entreront dans la constitution de la matière organique stable du sol.

La durée de subsistance de l'azote dans les différentes matières azotées du sol est très variable. On suppose que plus de la moitié des résidus frais sont décomposés après quelques mois. Par contre, Les matières organiques stables, tels que les acides humiques peuvent subsister pendant des dizaines, voire des centaines ou des milliers d'années (Gego, 1991).

Le processus de minéralisation, terme final de la dégradation de la matière organique résulte de l'action de microorganismes dont l'intensité est sous la dépendance de plusieurs facteurs, parmi lesquels la quantité et la qualité du substrat disponible, la teneur en eau du sol, la température et le pH (Gego, 1991).

- La quantité d'azote organique contenu dans le sol dépend de sa teneur en humus et sa qualité est caractérisée par le rapport C/N.

- Aux teneurs en eau trop faibles ou au contraire trop élevée, correspond une réduction de l'activité des organismes minéralisateurs. La teneur en eau idéale est proche de la capacité de rétention au champ (teneur en eau à laquelle le sol se stabilise après le ressuyage consécutif à une précipitation importante). Il semble que la minéralisation soit également influencée par les cycles « assèchement-humification ». A chaque ré-humification correspond un pic de minéralisation dont l'importance est liée à la durée et à la rigueur de l'assèchement précédent. L'assèchement provoque la mort de nombreux microorganismes et les cellules mortes accumulées servent de substrat préférentiel riche en azote, pour les bactéries survivantes dont la croissance est stimulée.
- Dans la gamme des températures rencontrées dans nos régions, la minéralisation s'intensifie lorsque la température augmente.

La dénitrification est le processus par lequel certaines bactéries, en l'absence d'oxygène, réduisent les ions NO_3^- en N_2O ou N_2 . Les plus répandues de ces bactéries sont *Pseudomonas* et *Clostridium*. Les différents facteurs influençant l'intensité de la dénitrification sont la température, la teneur en eau, la teneur en nitrate du sol et la présence de plantes (Gego, 1991).

- La dénitrification est très faible lorsque la température est inférieure à 10°C et augmente ensuite rapidement avec celle-ci jusqu'à des valeurs de 50°C (bactéries mésophiles).
- La dénitrification s'intensifie au fur et à mesure que l'oxygène se raréfie dans le sol, c'est-à-dire aussi au fur et à mesure que sa teneur en eau augmente, le maximum étant atteint lors de la saturation du sol.
- Il semble que la présence de plantes ait une incidence favorable sur la dénitrification. Les organismes dénitrifiants sont hétérotrophes, ils ont besoin de carbone organique pour se développer. La rhizosphère est plus riche en composés organiques facilement utilisables (exsudats, racines, etc.) que le sol nu. De plus, les racines consomment de l'oxygène en respirant, ce qui favorise les conditions anaérobies.

Différents modèles mathématiques (Canter, 1997) tentent d'intégrer les différents processus qui déterminent le devenir de l'azote minéral dans le sol. L'objectif est de quantifier l'intensité de ces processus au moyen de systèmes d'équations qui permettront de connaître l'évolution dans le temps du contenu azoté du sol. La modélisation conceptuelle essaie d'expliquer tous les processus modélisés, se présente sous une forme complexe, nécessitent des mesures très spécifiques pour le contrôle de leur validité et sont surtout utilisés comme outils de recherche. La modélisation empirique décrit les processus modélisés et est généralement plus simple que la conceptuelle. Entre les deux, tous les intermédiaires existent. Il est commun de construire des modèles sur base de nombreuses hypothèses simplificatrices quant au caractère insignifiant de certains phénomènes. Au cours de la procédure de mise au point, le modélisateur a toujours le loisir de simplifier davantage son modèle ou au contraire, de le sophistiquer s'il s'aperçoit que les hypothèses qu'il a posées sont abusives.

Il existe deux façons de considérer le prélèvement d'azote par les plantes dans un modèle. La première approche, dite microscopique, le prélèvement est quantifié au niveau de chaque centimètre de racine, en fonction de paramètres tels que le rayon des racines, la résistance au transfert des ions vers les vaisseaux conducteurs, ... On déduit ensuite le prélèvement total en fonction de la quantité des racines présentes dans le sol. La seconde approche, dite macroscopique, calcule directement le prélèvement du système racinaire considéré dans son

ensemble, par une relation basée sur la cinétique de Michaëlis-Menten modifiée telle que : le prélèvement quotidien maximum évolue de jour en jour en fonction des besoins de la culture ; le prélèvement est réparti dans le sol en fonction de la profondeur colonisée par les racines et par la répartition elle-même des racines dans cette profondeur.

Quelque soit le type d'approche choisi, la prise en compte du prélèvement racinaire pour des périodes assez longues, accroît sensiblement le niveau de complexité du modèle puisque elle implique la modélisation de la croissance de la culture, de son systèmes racinaires, de la biomasse aérienne, etc.

Une fois encore, la modélisation de la croissance des végétaux peut être abordée de différentes façons. Les modèles les plus simples considèrent l'ensemble des processus de croissance et de développement sous la dépendance de la température uniquement. Dans les modèles les plus complexes, la croissance est quantifiée par le biais de l'activité photosynthétique du feuillage, laquelle est sous la dépendance du rayonnement solaire et de la surface foliaire (Canter, 1997).

Gego (1991) émet les commentaires suivant à propos de la modélisation : « La conception de modèles, quoique difficile est une discipline riche d'enseignements. Le modélisateur doit synthétiser et allier des connaissances acquises dans des domaines très différents. Comprendre d'abord le fonctionnement du système modélisé d'un point de vue chimique, physique et biologique et ensuite traduire ce fonctionnement en termes mathématiques. Un modèle ne fait jamais l'unanimité, trop simple aux yeux de certains, et trop compliqué pour d'autres. Beaucoup de modèles ont été créés, peu d'entre eux ont été confrontés à des mesures réelles. (...) On se rend compte du manque de compréhension des systèmes complexes et des limites de la modélisation dont l'élément le plus restrictif est la très grande variabilité spatiale du milieu naturel que la plupart des modèles négligent. La modélisation mathématique n'est pas un outil miracle, il n'existe pas de modèle qui simule de manière réaliste toutes les situations existantes ; toutefois, elle reste l'outil le plus performant pour l'étude de systèmes complexes, tel le cycle de l'azote, et il est donc important de continuer à la développer. »

2.2.2 La problématique du « Nitrate »

Le nitrate est présent naturellement dans le sol et dans l'eau. Il provient de la décomposition des plantes, des cadavres d'animaux et de leurs excréments. Un peu de nitrate provient de l'atmosphère. Il est nécessaire à la croissance des plantes. Il est utile pour fertiliser les sols et produire notre alimentation.

Le nitrate est également produit par les activités humaines : les rejets d'eaux usées domestiques et industrielles, et l'utilisation des engrais agricoles. Ces sources peuvent présenter des excès qui sont à l'origine de pollutions. De trop fortes doses d'épandage ou à de mauvaises périodes, présentent certains risques : certaines fleurs de nos campagnes ne résistent pas à un excès de nitrate et leur disparition risque d'entraîner celle de certains oiseaux et insectes ; le nitrate non utilisé par les plantes descend dans le sol et contamine progressivement les eaux de surface et souterraines. En quantité suffisante dans l'eau et en présence d'ions phosphates, il contribue au phénomène d'eutrophisation (développement d'algues favorisé, grande consommation d'oxygène dans l'eau au détriment des plantes et des poissons qui entraîne leur mort) (Nitrawal, 2004). Pour assurer la potabilité d'une eau, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande de ne pas dépasser une teneur

maximale de 50 mg de nitrate par litre. Cette norme a été reprise par la directive européenne 80/778 relative à la qualité de l'eau, et reprise dans le droit wallon par l'arrêté de l'Exécutif du 20 juillet 1989, relatif à la qualité de l'eau distribuée par le réseau.

Actuellement, une partie des eaux usées domestiques est collectée par les égouts et amenées à des stations d'épuration. Par application de la législation européenne, pour 2009 au plus tard, toutes eaux usées domestiques devront être épurées. Les industries sont d'ores et déjà soumises à des règles très strictes pour les déversements et leurs déchets. Dans cette logique de régulation des pollutions par le nitrate, l'agriculture, troisième source de production anthropiques de nitrate, est également soumise à une législation spécifique appelée PGDA en Région Wallonne (Nitrawal, 2004).

Le réservoir principal de l'azote à l'échelle planétaire est constitué par l'azote atmosphérique. Ce réservoir atmosphérique n'est que difficilement accessible et ne l'est significativement que sur les continents. La fixation biologique par les bactéries libres et symbiotiques dans les sols terrestres est évaluée à $125 \cdot 10^{12}$ g/an. L'activité humaine ou fixation industrielle, et fixation non intentionnelle liée aux combustions à hautes températures accroît ce chiffre de plus de 50%. Dans l'océan, la fixation d'azote moléculaire est très limitée. La dénitrification (processus anaérobie par lequel les nitrates sont transformés en azote moléculaire) contre balance en partie la fixation d'azote atmosphérique. Sur terre au contraire, la fixation d'azote atmosphérique, accrue par l'activité humaine, l'emporte sur la dénitrification et il en résulte un enrichissement général des eaux de surface et donc un transport accru d'azote vers l'océan et les eaux souterraines (Billen, 1991). Une partie de l'augmentation des teneurs en nitrate des eaux de surface et souterraines est certes à trouver dans l'accroissement de l'utilisation des engrais azotés, mais seulement lorsque cet accroissement est en discordance par rapport aux besoins de plus en plus élevés des cultures. Cette utilisation croissante provient de la désintégration de l'agriculture en nouveaux systèmes agricoles spécialisés : grandes cultures d'un nombre très limité d'espèces, horticulture intensive, élevage avec sol, élevage hors sol, etc. dont les besoins spécifiques étaient mal connus. De grandes diversités existent en fonction des régions naturelles, avec leur climat et leur sol, en fonction des systèmes agricoles, avec leurs spéculations, leurs techniques de production, la technicité de leurs chefs d'entreprise (Falisse, 1991).

2.3 Rappels hydrologiques

2.3.1 Introduction

La présence constante et croissante de polluants dans les grandes réserves d'eaux de surface, la découverte de produits toxiques dans d'innombrables sites d'enfouissement des déchets dans les pays industrialisés et la pollution des aquifères témoignent clairement de la nécessité d'une gestion efficace des eaux souterraines à l'échelle mondiale. La pollution des eaux souterraines présente trois caractéristiques principales (UNESCO, 1986) :

- C'est un processus lent. Le taux d'infiltration est plus ou moins faible suivant le type de profil que le polluant doit traverser ;
- C'est un processus stable. L'aquifère reste pollué à cause de la lenteur de l'écoulement des eaux souterraines. La durée de renouvellement peut monter jusqu'à plus de 5000 ans ;
- C'est un phénomène local.

Cela signifie que lorsque les premiers signes de pollution d'un aquifère apparaissent, il est fort probable que le phénomène prendra de l'ampleur ; la propagation et la concentration augmenteront. Nous considérons trop souvent à tort, que le pouvoir d'épuration d'un sol est sans limite. L'agriculture est un exemple de pollution diffuse où ces limites sont atteintes et même dépassées. Les agglomérations et zones résidentielles sont un exemple de pollution semi-diffuse et les zones industrielles en sont un de pollution ponctuelle (De Backer, 1991).

2.3.2 Mouvement d'eau dans le sol

Pour se mouvoir dans le sol, l'azote nitrique a besoin d'eau. Pour décrire le transport d'azote dans un profil de sol saturé et/ou insaturé, dans des conditions de flux transitoires, il faut d'abord résoudre les différentes équations qui règlent le mouvement de l'eau dans un sol. L'écoulement dans les milieux poreux complexes est généralement décrit en terme de vecteur de vitesse d'écoulement macroscopique qui représente la vitesse moyenne globale des vitesses microscopiques dans le volume total de sol. La configuration détaillée de l'écoulement est donc ignorée et l'élément sol est traité comme un milieu uniforme et comme si l'écoulement était réparti sur toute la section, espaces solides et liquides inclus.

La loi décrivant le déplacement de l'eau en milieu saturé est connue sous le nom de loi de Darcy (1856).

$$q = -K \frac{\Delta H}{L} \quad q = \text{débit d'eau par unité de surface (m/s)}$$

$$\Delta H = \text{perte de charge hydraulique (m)}$$

$$L = \text{longueur de la colonne (m)}$$

Cette loi indique que l'écoulement de l'eau à travers un sol se fait dans la direction de la force motrice et est proportionnelle au gradient hydraulique $\left(\frac{\Delta H}{L}\right)$ agissant sur le liquide.

La généralisation de la loi prend une forme différentielle.

$$q = -K \nabla H \quad (1)$$

$$q = -K \frac{dH}{dx} \text{ pour un système unidimensionnel.}$$

Le terme K est appelé conductivité hydraulique. Il est appelé perméabilité lorsqu'on se trouve en milieu saturé. Ses unités sont des m/s .

En général, on considère la perméabilité comme une constante dans un sol. En réalité, beaucoup de sols présentent divers processus chimiques, biologiques et physiques qui peuvent agir sur cette valeur.

En milieu insaturé, on généralise la loi de Darcy. La force motrice qui dans un sol saturé est un gradient de pressions positives sera dans le cas présent un gradient de pressions inférieures à la pression atmosphérique appelé également succion (ψ). La relation entre la succion et la teneur en eau (Θ) est décrite par la courbe caractéristique d'humidité (Figure 2). L'eau se déplacera depuis l'endroit dans le sol où elle est le moins retenue vers celui où elle est le plus retenue. On exprime cela par une extension de la loi de Darcy en milieu insaturé.

$$q = -K(\Psi) \cdot \nabla H \quad (2) \quad \text{avec} \quad K(\Psi) = \text{conductivité hydraulique à la succion } \psi ,$$

$\nabla H = \nabla (\Psi - Z) =$ gradient de charge hydraulique,
où Ψ = succion de l'eau du sol et Z = terme gravitaire

Pour obtenir l'équation générale de l'écoulement et tenir compte aussi bien des processus d'écoulements permanents que transitoires il faut passer par l'équation de continuité (conservation de la masse dans un volume de contrôle, cfr BEAR et al, 1987)

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = -\nabla q \quad \text{ou} \quad \frac{\delta \Theta}{\delta t} = -\frac{\delta q_x}{\delta x} \text{ pour un système unidimensionnel} \quad (3)$$

qui est en fait une expression mathématique de la conservation de la matière, l'eau dans le cas présent. Toute variation de la teneur en eau (Θ) dans un intervalle de temps (δt) dans un petit élément de volume de côté (δx) correspond à un débit d'entrée différent de celui de sortie.

En introduisant (2) dans (3), on trouve la relation de Richards :

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = -\nabla (K(\Psi) \cdot \nabla (\Psi - Z)) = -\nabla (K(\Psi) \nabla \Psi) + \frac{\delta K}{\delta Z} \quad (4)$$

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = -\frac{\delta}{\delta x} \left(K \frac{\delta \Psi}{\delta x} \right) - \frac{\delta}{\delta y} \left(K \frac{\delta \Psi}{\delta y} \right) - \frac{\delta}{\delta z} \left(K \frac{\delta \Psi}{\delta z} \right) + \frac{\delta K}{\delta Z}$$

Par analogie aux équations de diffusion et de conduction de la chaleur, il est parfois utile de représenter ces équations sous une autre forme.

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta Z} \left[D^{**}(\Theta) \frac{\delta \Theta}{\delta Z} \right] + \frac{\delta K(\Theta)}{\delta Z} \quad (5)$$

avec $D^*(\Theta) \frac{K(\Theta)}{c(\Theta)}$ où $c(\Theta)$ = capacité spécifique de rétention en eau

= pente de la courbe caractéristique en humidité

$$= \frac{d\Theta}{d\Psi}$$

D^* = diffusivité = quotient entre le flux et le gradient de teneur en eau du sol.

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = D^* \frac{\delta^2 \Theta}{\delta Z^2} + \frac{\delta K}{\delta Z} \text{ pour de petits intervalles}$$

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = D^*(\Theta) \nabla^2 \Theta \text{ dans un système à trois dimensions}$$

En plus, la gamme de variation de la « diffusivité » est plus réduite que celle de la conductivité. Ce qui est un avantage quand on connaît la difficulté de faire des mesures précises de conductivité hydraulique.

(doc sources : Bear, 1987 ; Dautrebande, 1983 ; Dautrebande, 2003 ; Hillel, 1984 ; Tychon, 1991)

2.3.3 Mouvement de l'azote dans le sol

L'ion nitrate NO_3^- est chargé négativement. On considère que la plupart des sols de nos régions repoussent les ions négatifs, ou anions. En effet, nos sols de cultures possèdent une fraction plus ou moins importante d'argiles. Les surfaces argileuses sont chargées négativement et repoussent dès lors les anions, dont les ions nitrates. On considère que l'ion NO_3^- n'est pas adsorbé par nos sols et s'y déplace librement.

Le mouvement de tout ion dissous présent dans la solution du sol, comme l'est l'ion NO_3^- , est gouverné par deux mécanismes schématisés par la Figure 3 :

- La convection, où l'ion est emporté avec la masse d'eau qui se déplace dans le sol (mouvement Piston),
- La diffusion du NO_3^- dans la solution du sol.

Du fait que nous travaillons dans un sol et non dans une conduite d'eau, de multiples chemins peuvent être parcourus par l'eau pour traverser un volume de sol. Cela entraîne une dispersion de la réponse à un apport instantané d'une solution placée au sommet d'une colonne. Ce mécanisme est appelé dispersion hydrodynamique.

L'équation de conservation du NO_3 s'écrit :

$$\frac{\delta (\Theta C_{\text{NO}_3})}{\delta t} + \Phi_N = - \frac{\delta q_{\text{NO}_3}}{\delta Z} \quad (6)$$

avec Φ_N = terme source ou puits décrivant la transformation, disparition ou production de NO_3 par des processus physiques, chimiques, biologiques

C_{NO_3} = concentration en NO_3 dans la solution du sol (mole/m³ de solution)

q_{NO_3} = flux de NO_3 (mole/m² s)

Le flux de NO_3 dans un sol est exprimé par :

$$q_{\text{NO}_3} = - \Theta D \underbrace{\frac{\delta C_{\text{NO}_3}}{\delta Z}}_{\substack{\text{Dispersion} \\ \text{diffusion}}} + \underbrace{q_w C_{\text{NO}_3}}_{\text{Convection}} \quad (7)$$

avec q_w = flux d'eau (m/s)

D = coefficient de diffusion et dispersion effectif (m^2/s)

Si en pratique, D est considéré comme une constante, en réalité D dépend de la vitesse d'écoulement et tend à croître avec le flux.

En combinant (6) et (7), on trouve l'équation de convection – dispersion

$$\frac{\delta (\Theta C_{NO_3})}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta Z} \left(\Theta D \frac{\delta C_{NO_3}}{\delta Z} \right) - \frac{\delta}{\delta Z} (q_w C_{NO_3}) - \Phi_N \quad (8)$$

ou

$$\frac{\delta C_{NO_3}}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C_{NO_3}}{\delta Z^2} - V \frac{\delta C_{NO_3}}{\delta Z} - \left(\frac{C_{NO_3} \Phi_w + \Phi_N}{\Theta} \right) \quad (9)$$

avec $V = \frac{q_w}{\Theta}$ = vitesse moyenne réelle de l'eau dans les pores du sol.

L'équation de convection – dispersion suppose qu'à un endroit donné, l'eau se déplace à une vitesse V et que la concentration en eau du sol a une valeur unique et moyenne dans les pores contenus dans le volume de sol considéré comme homogène.

Cette hypothèse ne s'écarte pas trop de la réalité dans un sol remanié ou dans les sols sableux, sans structure. Cependant, pour des sols à structure bien développée, l'utilisation de ce modèle peut mener à de très grosses approximations. Dans un milieu structuré de la sorte, le sol comprend des zones où l'eau est quasi stagnante mais reste accessible aux ions NO_3 et d'autres par diffusion où le mouvement d'eau peut être beaucoup plus rapide que la vitesse moyenne de l'eau.

Cela signifie que le lessivage sera moins important pour les ions NO_3^- présents dans la solution du sol (avant la pluie) que pour les ions NO_3^- provenant de la surface et transportés par les eaux pluviales.

On peut exprimer mathématiquement ces deux zones à l'intérieur d'un sol par une division de l'espace poreux (Θ) en phase mobile (Θ_m) dans laquelle le soluté se déplace par convection et dispersion, et une phase immobile (Θ_i) qui échange des solutés avec la phase mobile par un processus de diffusion. Si l'on ne considère pas de terme source ou puits, on peut écrire :

$$\Theta_m \frac{\delta C_m}{\delta t} + \Theta_i \frac{\delta C_i}{\delta t} = D_m \Theta_m \frac{\delta^2 C_m}{\delta Z^2} - q_w \frac{\delta C_m}{\delta Z} \quad (10)$$

$$\Theta_i \frac{\delta C_i}{\delta t} = \alpha (C_m - C_i)$$

avec C_m et C_i = concentrations des phases mobiles et immobiles

α = coefficient de transfert de masse

Ce modèle requiert des mesures détaillées, parfois longues et difficiles, du transport pour l'estimation des différents paramètres entrant dans le système d'équation. La difficulté, voire

l'impossibilité matérielle de certaines de ces mesures, conduit à faire une estimation de certains paramètres par ajustement, ce qui augmente le temps de calcul.

Ce genre d'argument a poussé certaines personnes à développer des modèles simplifiés qui fournissent une explication plus grossière du phénomène mais qui par contre nécessitent un minimum d'informations caractérisant les propriétés du sol.

Le modèle Piston, mentionné plus haut, propose un déplacement de soluté à la vitesse moyenne de l'eau du sol $\left(\frac{q_w}{\Theta} \right)$ pendant la période d'étude. Ainsi, par apport d'un volume d'eau par unité de surface (d), le nitrate va être déplacé d'une distance $\frac{d}{\Theta}$.

Une simplification supplémentaire peut encore être apportée si l'on ne considère plus l'équation différentielle de Richards pour décrire le déplacement d'eau. A la place, on propose une approche « en cascade ». Il y aura transfert d'eau vers les couches sous-jacentes (définies par leurs épaisseurs et caractéristiques de percolation) lorsque la teneur en eau de la couche est comprise entre la saturation (Θ_{sat}) et la capacité au champ (Θ_{cc}). La quantité d'eau que l'on peut accumuler dans une couche est :

$$STOCK = (\Theta_{sat} - \Theta_{cc}) * d \quad \text{avec } d = \text{épaisseur de la couche}$$

Toute quantité d'eau ajoutée à la couche de sol lorsqu'elle a déjà atteint la saturation déplace l'eau vers la couche suivante. Par contre, si l'eau apportée ne suffit pas à atteindre la capacité au champ, aucun déplacement d'eau en profondeur ne sera possible. Entre les deux, c'est à dire entre la saturation et la capacité au champ, une partie (définie par calage) de l'eau contenue dans le stock se déplacera à chaque pas de temps vers l'horizon inférieur jusqu'à ce que la couche revienne à la capacité au champ.

Ces modèles sont très largement utilisés sur le terrain car il est souvent difficile de connaître tous les paramètres indispensables à une description précise dans un système beaucoup moins bien contrôlé qu'en laboratoire (conditions climatiques, hétérogénéité verticale et horizontale des sols, difficulté des mesures de teneurs en eau, etc.).

Ce dernier modèle peut être couplé à un modèle azoté. Dans ce cas, la quantité d'azote se déplaçant vers l'horizon inférieur est obtenue par :

$$q_{NO3-} = q_w \cdot C_{NO3-}$$

Cette relation surestime généralement le déplacement azoté et certains auteurs ont usé d'artifices en créant dans la solution du sol une phase mobile et une phase immobile. Seule la phase mobile pourrait entraîner les ions nitrate vers le bas, limitant ainsi le déplacement azoté. Le rapport entre ces deux phases est choisi en ajustant les résultats du modèle sur les mesures.

$$\text{Addiscott par exemple, propose :} \quad \begin{aligned} w_{mobile} &= d (\Theta_{0.05} - \Theta_2) \\ w_{immobile} &= d \left(\Theta_2 - \frac{1}{2} \Theta_{15} \right) \end{aligned}$$

avec Θ_x = la teneur à la succion x (bar)

(doc sources Canter, 1997 ; Tychon, 1991 et Haynes, 1986)

Un modèle d'application simple, connu de longue date, se base sur l'équation de Gouy-Chapman. Il renseigne sur les capacités d'échange, l'état de floculation ou de peptisation du complexe adsorbant en fonction de la distance entre les particules argileuses, de la concentration en sels dissous dans l'eau de recharge et de la valence des ions dans la solution.

$$n_+ = n_0 \left(\coth . 0.16 . z . \sqrt{C_0} . x \right)^2$$

avec, n_+ = concentration cationique à la distance x ,
 n_0 = concentration ionique de la solution du sol,
 C_0 = concentration molaire = n_0/N (Nbre d'Avogadro),
 X = distance en Angström par rapport à la surface d'argile,
 Z = valence cationique

Il existe aussi des modèles de transfert par conversion, diffusion et dispersion avec ou sans adsorption ou biodégradation en milieu poreux homogène et saturé ou à teneur en eau constante. Ils tentent de prévoir la réponse du système de recharge à une variation de concentration et même sur une base comparative qui tient compte à la fois du temps de transfert et du temps de séjour.

2.3.4 Mouvement d'eau et d'azote dans une nappe

En milieu saturé, la relation de Richards (4) se simplifie. Dans un écoulement permanent, c'est-à-dire quand la vitesse de l'eau en un point donné de la nappe est constante dans le temps, la loi de Darcy est utilisée. Strictement, cette loi s'applique en milieu homogène et isotrope, là où le substratum est horizontal et le régime d'écoulement laminaire.

En milieu insaturé, on travaille généralement dans un système unidimensionnel, l'eau se déplaçant en principe verticalement vers le bas du profil. En zone saturée, c'est-à-dire dans les nappes d'eau, le mouvement d'eau est réglé par un gradient de charge hydraulique entre deux points, égal à la différence des niveaux piézométriques entre ces deux points divisés par la distance les séparant.

Le gradient hydraulique pour les nappes d'eau libre est la dérivée de la fonction de la courbe matérialisant la surface piézométrique.

Le mouvement d'eau dans les nappes est généralement modélisé dans un système à deux dimensions (au moins). Il est nécessaire de tenir compte de la variabilité spatiale du sous-sol dans lequel se trouve la nappe.

Pour une étude réalisée sur une zone où les reliquats azotés varient d'un endroit à l'autre du bassin, les différents apports en solutés fournis à la nappe seront également variables.

Cette hétérogénéité des milieux et des apports dans l'espace peut être exprimée dans des modèles maillés. Enfin, le mouvement de soluté est réglé par les mêmes processus de convection-diffusion-dispersion que dans un sol insaturé (Castagny, 1967).

2.4 La technique lysimétrique

2.4.1 Définition

L'étymologie du terme lysimètre se trouve dans les deux racines grecques, « lysis » qui signifie dissolution, destruction d'éléments organiques et « metron » mesure.

Le lysimètre est une cuve étanche dans laquelle un sol, ou une terre², est mis à l'étude. La face supérieure de cette cuve est exposée à l'action des agents atmosphériques, alors que les faces latérales empêchent tout échange avec l'extérieur. La face inférieure, drainée, permet à l'expérimentateur de déterminer les caractéristiques de la solution évacuée par drainage. Ce modèle réduit de la réalité est caractérisé par la nature du sol ou de la terre qui l'emplit, le régime climatique auquel il est soumis, l'occupation de sa surface et les traitements qui y sont appliqués. Cette méthode réalise un bilan entrées – sorties des composés minéraux ou organiques sur une colonne verticale de sol dont le volume est parfaitement connu. Le fait qu'il s'agisse d'un modèle implique qu'il puisse être comparé à une certaine réalité, c'est à dire que l'on définit les critères qui permettront de transférer les résultats du lysimètre à la réalité (Muller, 1990).

2.4.2 Rappel

En agronomie, la lysimétrie est l'une des méthodes qui permette d'affiner le bilan des entrées et des sorties par voie de lixiviation. Pour cette raison, elle s'intègre naturellement dans les études relatives à la prospection des systèmes de production végétale. Les bilans de matières sont indispensables à la compréhension et la gestion des agro-systèmes, non seulement dans une optique de productivité et de durabilité, mais aussi de respect de l'environnement. Dans le contexte des défis actuels, le double souci de *bonne pratique agricole* et de *protection de l'environnement* a conduit à reconsidérer et valoriser les résultats des travaux utilisant la méthodologie des lysimètres. Si la lysimétrie a des limites, liées au coût et à la durée des expérimentations, elle apparaît comme une technique précieuse pour l'analyse systémique, car elle permet d'évaluer les conséquences d'effets cumulatifs et leurs éventuelles dérives progressives au cours du temps. Les dispositifs lysimétriques sont lourds et coûteux ; ils ne trouvent justification, tant pour leur création ou leur maintien, que grâce à une bonne valorisation de leurs résultats (Ignazi, 1990).

Nous nous intéressons spécifiquement aux dispositifs lysimétriques et résultats enregistrés qui permettent de disposer de références sur le comportement de l'azote en général et du nitrate en particulier, dans différentes conditions de sols, climats et cultures.

2.4.3 Historique

L'histoire du lysimètre s'étend sur une période d'environ 300 ans. L'une des premières investigations dans le domaine a été entreprise en France en 1688 par De La Hire, mathématicien et météorologue de Louis XIV. Un siècle plus tard, Maurice en Suisse et

² Le sol est le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent. La terre dans le sens pédologique désigne la couche meuble de l'espace naturel où poussent les plantes (Lozet et Mathieu, 1990).

Dalton en Angleterre mènent indépendamment des expérimentations (1796). Le premier lysimètre à sol non remanié est attribué à Lawes et Gilbert en 1870 en Angleterre. Les lysimètres sont ensuite développés avec de grandes variations de taille, comme 40m² de sol en place par Sanborn en 1888 au Missouri. Von Seelhorst équipe en Allemagne (1906) les lysimètres d'équipements de pesage. En 1937 dans l'Ohio (USA) apparaissent les dispositifs automatiques d'enregistrement et permettent de mesurer les principaux composants du cycle hydrologique (percolation, évapotranspiration, précipitation, ruissellement). A l'origine, les lysimètres sont utilisés pour faire des recherches sur les débits et les volumes d'eau percolés. Ensuite, ils sont utilisés pour l'étude d'évapotranspiration et les bilans de l'eau (évapotranspiromètres de Thornthwaite), qui développent tous les systèmes lysimétrique pesables (pesables mécaniques, pesables électroniques, hydrauliques et flottants, FAO, 1986). Cette dernière décennie a vu leur utilité avec un regain d'intérêt dans la recherche et l'étude qualitative et quantitative des percolats en profondeur ; des bilans, non plus de l'eau, mais d'éléments minéraux ainsi que des transferts de substances et micro-polluants organiques.

La Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux a mis en place dans le passé (projets IRSIA dans les années 1970-1980) deux lysimètres pesables de 2 m de diamètre sur 2 m de haut dans le but d'étude des percolats et de consommation en eau des plantes.

2.4.4 Principe

Les dispositifs de mesure doivent satisfaire deux exigences : permettre des mesures fiables de la lixiviation³, avec une perturbation minimale de sol et pouvoir être installés en parcelles cultivées sans gêne notable pour les pratiques agricoles, car un des impératifs de la lysimétrie est la longue durée. Le principe de base, la réalisation d'un bilan, implique préalablement l'imposition d'hypothèses simplificatrices dont le bien fondé devra être vérifié (volatilisation de l'ammoniac, dénitrification ou des fixations microbiennes de l'azote, etc.). La loi de conservation de masse, loi extrêmement générale, est appliquée aux transferts de matières dans le sol. Le bilan exprime la variation du stock d'eau du sol pendant l'intervalle de temps considéré, en mm de hauteur d'eau, $\Delta Q = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}}$. Cette relation peut s'appliquer aussi bien aux flux d'eau qu'aux flux de minéraux ou toute autre substance. Si l'on considère le bilan hydrique,

le flux d'eau entrant sera $Q_e = P - ETR$
(P est la pluviosité et ETR l'évapotranspiration réelle)

et le flux sortant $Q_s = D$ (D est le drainage).

La variation du stock d'eau peut être évaluée par rapport à une valeur de référence. En effet, il a été constaté qu'à la fin de chaque période d'observation au cours de laquelle un drainage a été mesuré, le stock d'eau du sol reprend une valeur constante qui correspond à une humidité du sol tendant à égaliser la rétention au champ. Cette valeur est choisie comme référence (Castagny, 1963). Dans le cas d'un fertilisant, par exemple, la même relation sera utilisée avec comme intrants, les engrais minéraux et organiques et comme sorties, ETR sera remplacé par l'exportation par la culture et le drainage par les quantités d'éléments lessivés.

³ En hydrologie, on parle d'infiltration lorsqu'il y a pénétration d'eau dans la partie supérieure du sol ; de percolation lorsqu'il y a des transferts d'eau sous la zone racinaire ; de lessivage lorsque ces transferts sous la zone racinaire contiennent des matières en solutions.

En pédologie, on parle de lixiviation pour définir la migration d'anions, cations ou de petites molécules solubles ; et de lessivage pour l'entraînement mécanique de fines particules du sol.

Schéma de principe d'un lysimètre. La loi de conservation des masses appliquée à la lysimétrie.

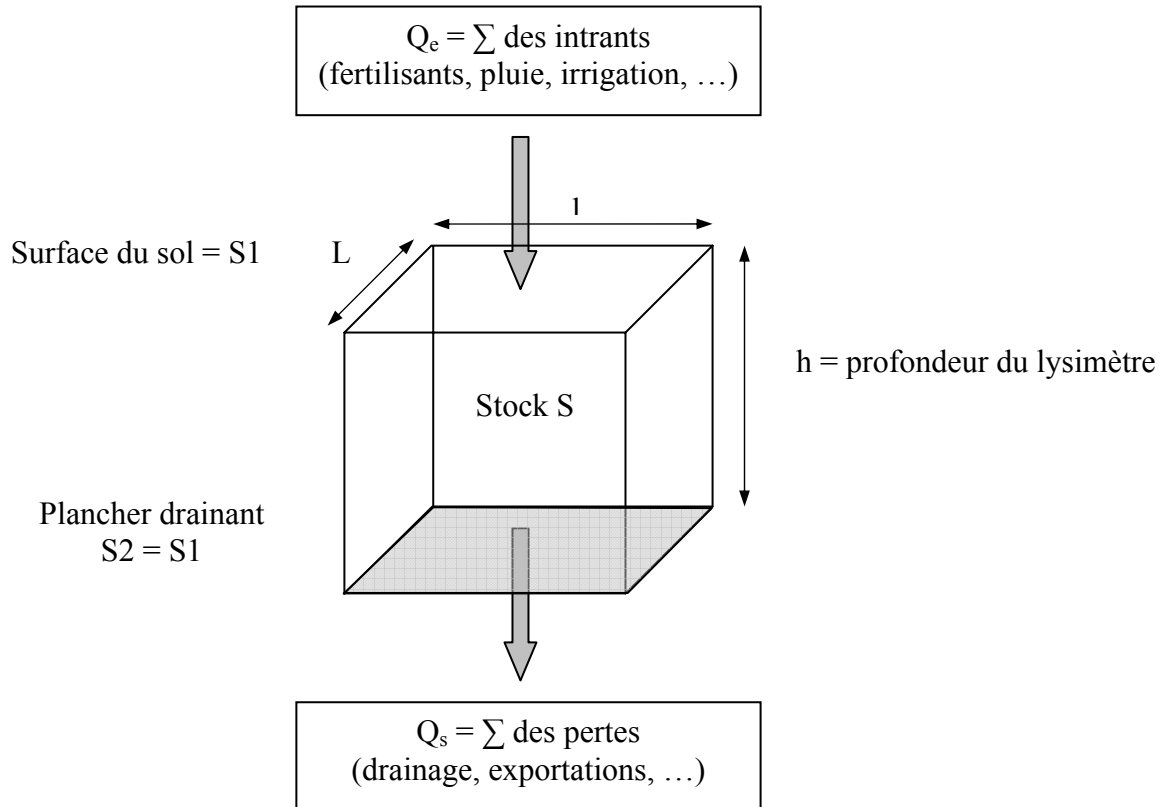


Figure 4 : schéma de principe d'un lysimètre

Dans les divers modèles de lysimètres, il y a des solutions techniques variées pour déterminer et mesurer les différents termes de l'équation du bilan hydrique. En fonction de la façon dont les variations de teneur en eau sont mesurées, on classe les lysimètres en deux grandes catégories : pesables et non pesables (ou volumétriques). La différence fondamentale est que les lysimètres non pesables permettent de déterminer l'évapotranspiration pour un certain laps de temps en défalquant l'eau de drainage recueillie de l'eau totale apportée, alors que dans le cas des systèmes pesables on peut déterminer les deux termes (ETR et D) en même temps et de façon indépendante. Nous ne nous intéresserons cependant pas aux lysimètres pesables (systèmes pesables, hydrauliques et flottants), développés pour l'étude de l'évapotranspiration des cultures. Ces systèmes ont des mécanismes de pesage compliqués et onéreux, en plus d'une application limitée. Nous ne nous intéresserons pas non plus à la gamme des lysimètres non pesables développés pour la détermination de l'évapotranspiration avec saturation régulière ou permanente en eau de la colonne de sol (lysimètres à drainage sans nappe d'eau, à compensation avec nappe d'eau à niveau constant, à compensation avec nappe de surface ou types spéciaux à drainage).

Dans toute mesure de lysimétrie, deux paramètres sont fondamentaux :

- le volume d'eau drainée à la base du lysimètre, exprimé en litres, couramment en m^3/ha ou mm. La surface du lysimètre étant connue, la quantité d'eau drainée (D) au cours d'une période donnée est connue par la relation $D = \text{vol d'eau récupéré à la base du lysimètre (l)} / \text{la surface du lysimètre (m}^2\text{)}$
- la concentration des eaux qui percolent (C). Dans le cas de l'azote, C est exprimée en mg/l d'azote élémentaire N, qui traduit des enjeux agronomique et économique, ou d'azote nitrique NO_3^- , pour traduire la potabilité de l'eau.

Les dispositifs lysimétriques non pesables, réalisables actuellement, que l'on peut classer en trois types, ne peuvent répondre simultanément à ces deux paramètres, mais permettent la mesure d'au moins l'un des deux paramètres nécessaires pour calculer les quantités lessivées. A l'échelle de site localisé à une parcelle, les mesures peuvent être faites à partir des trois types de lysimètres suivants :

- systèmes fermés, en général à sol reconstitué ;
- systèmes ouverts (ou Ebermayer), en sol non remanié ;
- bougies poreuses, en sol non remanié.

Les deux derniers types ne permettent que la mesure de concentration de la solution qui percole et pas de mesures quantitatives.

Le système des bougies poreuses aspire l'eau du sol à travers des collecteurs poreux et sont qualifiés de *systèmes à succion contrôlée*. Les systèmes ouverts et fermés ont soit un système annexe de drainage à succion contrôlée, soit sont à *drainage libre* (ou encore à tension nulle, pression nulle ou drainage total), le lysimètre est drainé librement à la pression atmosphérique.

Le lysimètre isole un volume de terre ou de sol, entre la surface et une profondeur donnée, et comporte à sa base un système de récupération des eaux. De par sa construction, le lysimètre rompt, au niveau du plancher de drainage, le lien capillaire de la solution du sol avec le niveau sous-jacent, ce qui entraîne deux conséquences :

- premièrement, cette rupture provoque des perturbations non négligeables de la dynamique de l'eau ;
- deuxièmement, seule l'eau gravitaire, qui occupe des pores de diamètre théorique compris entre 8 et 30 microns, peut être accessible sans assistance au drainage. Or cette fraction de l'eau n'est que temporairement présente, lorsque le sol atteint la capacité au champ. La mise sous pression, à la base de la colonne de sol d'une partie de l'eau capillaire (diamètres des pores compris entre 0,2 et 8 microns), provoque un écoulement lorsque cette force devient supérieure à la force de capillarité du matériau constituant la base du monolithe de sol. Il constitue la majeure partie du volume d'eau recueilli à la base du lysimètre. C'est l'eau de drainage, qui correspond à l'eau gravitaire et à une partie de l'eau capillaire. Si le transfert de l'eau dans la zone d'exploration par les racines s'effectue verticalement, le modèle lysimétrique peut être utilisé sans restriction pour établir un bilan de matière. Des discontinuités dans la structure du sol (semelle de labour, ...) et dans le sous-sol (horizon imperméable, ...) peuvent provoquer des écoulements latéraux et compliquer l'interprétations des données.

La présence de la cavité du lysimètre modifie donc la circulation de l'eau dans le sol. En effet, à la base de la colonne de terre, ou de sol, la porosité du matériau est à saturation, ce

qui n'est pas, dans la majorité des cas, la situation normale des sols cultivés et bien drainés. La conséquence de cette situation peuvent être, par suite des variations de conductivité hydraulique, des modifications de délais entre l'humectation du sol en surface et sa percolation en profondeur, plus longs lorsque le sol est sec, plus courts lorsqu'il est saturé à la base du lysimètre. Elle peut être aussi cause de modifications des teneurs en nitrate, soit par dénitrification dans la zone saturée, soit par des modifications des échanges entre les phases « mobile » et « immobile » de la solution du sol par suite des variations des temps de percolation. En ce qui concerne les risques de dénitrification, des données de l'INRA suggèrent que ces phénomènes sont négligeables (Comifer, 1996).

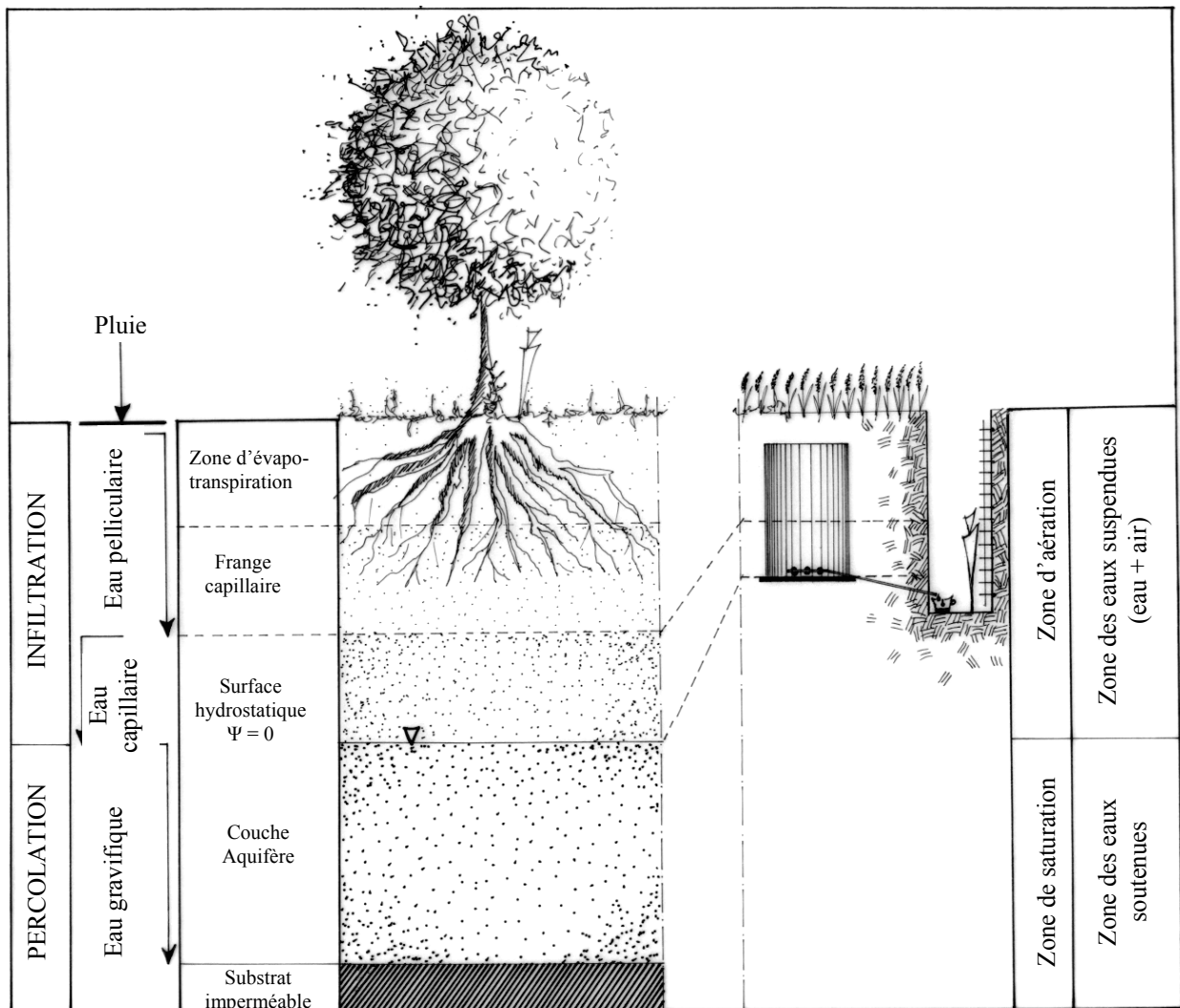


Figure 5 : schéma de la répartition de l'eau dans le sol et le sous-sol (inspiré de Castany, 1967)

La profondeur de la cuve a une influence importante sur le rendement. L'expérimentation a montré que les effets du drainage de fond sont limités à partir de 1m. L'épaisseur ainsi conservée pour la zone d'aération a comme conséquence importante de réduire l'effet de l'évaporation sur la zone de saturation ; le drainage peut y être assimilé à

l'infiltration efficace (Castagny, 1967). La littérature mentionne qu'un lysimètre à une profondeur de 1,5m à 2m reproduit le profil normal de tension de l'eau du sol à la profondeur de 1m. La tension zéro se situe beaucoup plus bas dans le lysimètre plus profond et n'a donc que peu ou pas du tout d'effet dans la tranche de sol allant de zéro à 1m de profondeur. Quand il n'y a pas de contrôle de succion, la profondeur du lysimètre doit permettre à la frange capillaire de rester en dessous de la profondeur maximale d'enracinement, aussi il faut des profondeurs plus importantes dans un sol à texture fine que dans un sol à texture grossière (FAO, 1986).

2.4.5 Les différents types, avantages et inconvénients

Toutes les installations qui permettent la récolte d'eau en profondeur, présentent des avantages et des inconvénients qu'il est utile de connaître pour l'interprétation rationnelle des résultats des mesures (Castagny, 1967).

1. Les lysimètres fermés, à sol reconstitué ou remanié. La cuve lysimétrique de dimension choisie est remplie des couches successives de sol. C'est le type le plus fréquemment utilisé car le plus facile à réaliser. Le remplissage de la cuve est effectué dans l'eau ou à sec par couches successives de 5 à 20 cm d'épaisseur. Chaque couche est tassée pour reconstituer la densité apparente du sol d'origine.

Avantages : Le volume du sol étant parfaitement défini, ils sont les seuls dispositifs permettant la mesure directe et simultanée des volumes et des concentrations des solutions qui percolent au travers du lysimètre. Le calcul des bilans hydriques et minéraux, prenant en compte les postes d'entrée (pluie, engrais, produits phytosanitaires) et de sortie (exportation par les récoltes, perte par drainage) et facile à établir. Ils extraient l'eau gravitaire non liée et la fraction la plus disponible de l'eau capillaire représentative, du point de vue chimique, de l'eau drainée vers les nappes. Les lysimètres fermés, avec sol reconstitué, permettent d'avoir des sols différents sur un même site.

Inconvénients : Les inconvénients majeurs sont la lourdeur de la mise en œuvre, l'impossibilité de la réalisation dans des sols caillouteux, ainsi que leur inclusion dans un parcelle sans gêne permanente aux pratiques agricoles. Le régime hydrodynamique est perturbé par le remaniement des sols et la présence du plancher drainant. Malgré les précautions prises lors de la mise en place des matériaux, le problème de la reconstitution du profil initial se pose. Il est nécessaire d'attendre plus ou moins longtemps pour permettre aux matériaux de se remettre à l'équilibre. Le coût et la lourdeur de la mise en place ne permettent que des répétitions et des traitements en nombre restreint. Leur usage est réservé à des situations bien identifiées où les objectifs scientifiques que l'on se propose d'atteindre sont pensés avec une extrême rigueur.

Quelles que soient les précautions prises à la construction des lysimètres fermés remaniés, celle-ci engendre un remaniement et une hétérogénéisation du sol en place. Toutefois, après un certain temps, le terrain reprend sa texture primitive. Batisse et Turc ont montré qu'après 2 ou 3 ans, le sol avait atteint sa densité apparente initiale. En outre, si dans son ensemble nous pouvons considérer un volume étendu de sol comme homogène, dans le

détail, la plupart des structures sont hétérogènes. Il est possible de remédier au remaniement par la construction de lysimètres monolithiques (non remaniés) et de diminuer l'influence de l'hétérogénéité par l'augmentation du volume des installations ou du nombre de répétitions. Les résultats obtenus par diverses installations montrent qu'en fait l'influence du remaniement est faible devant les variations des autres facteurs. Une autre influence non négligeable est la présence de parois latérales, qui favorisent l'infiltration. L'augmentation de la section réduit considérablement cette cause d'erreur. La comparaison des mesures montre que les résultats sont valables à partir d'une section de 1m^2 , et précis pour 4m^2 (Castagny, 1967).

2. Les lysimètres ouverts sont de conception plus récente, développé à partir de années 1980 en France (Comifer, 1996). Ils sont constitués uniquement de la plaque de fond, sans parois latérales. La plaque drainante est enfoncée latéralement dans le sous-sol à partir d'une fosse creusée préalablement, qui sera utilisée pour la collecte des eaux de drainage. Il en existe plusieurs types. Les *lysimètres ouverts à tension* sont équipés d'une plaque drainante pouvant être mise en dépression. Ils se rapprochent des bougies poreuses par leur mode de fonctionnement. Les *lysimètres ouverts sans tension* sont équipés d'une plaque drainante à écoulement gravitaire et fonctionnent comme les lysimètres fermés.

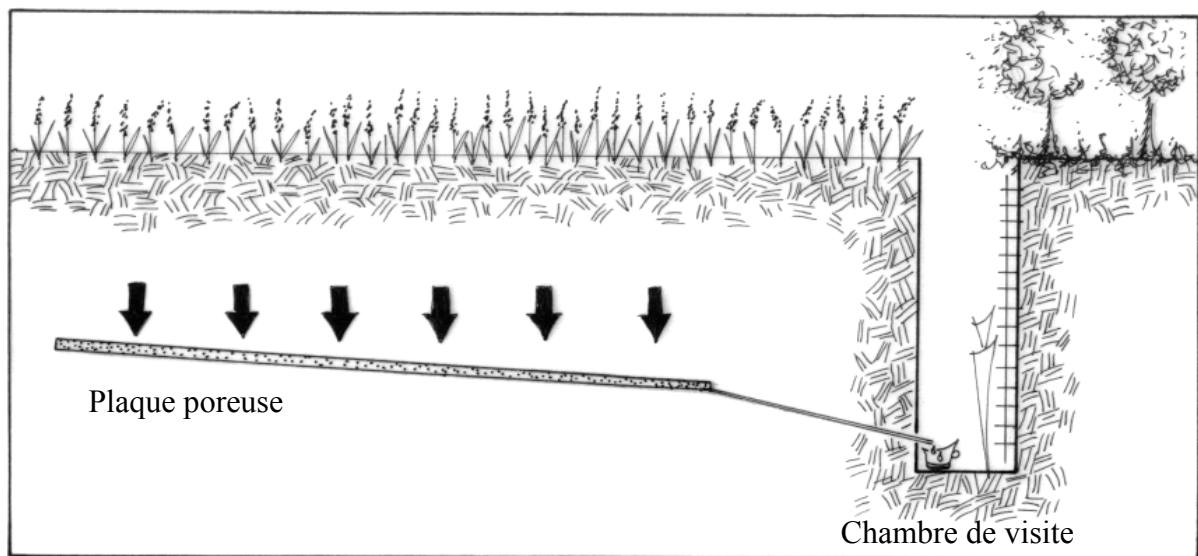


Figure 6 : schéma lysimètre ouvert et de la plaque de tôle placée dans le sol

Avantages : Ils peuvent être installés en parcelle cultivée sans trop perturber les pratiques agricoles. En principe, leur construction est moins coûteuse que celle des lysimètres fermés. Leur mise en place conserve mieux la structure du sol et perturbe peu le sol et le sous-sol.

Inconvénients : une incertitude subsiste dans la mesure des volumes drainés et des quantités lessivées car on ne peut être assuré de la concordance exacte des surfaces de la plaque drainante et de la surface de sol concerné. Les bilans établis sont souvent sujets à caution. Comme seule la concentration de la solution est directement accessible à la mesure, la

question est posée de savoir s'il n'est pas possible d'obtenir la même information avec un système moins coûteux et plus facile à mettre en œuvre (Muller, 1990). En agronomie, ils présentent trop d'incertitudes que pour établir un bilan direct. Leur développement est concurrencé par le système des bougies poreuses, qui fournissent les mêmes informations sur la concentration, avec un coût plus faible.

L'utilisation d'un système ouvert est fondé sur l'hypothèse que seuls les transferts verticaux se produisent, dans des conditions identiques à celles du sol avoisinant. Or le risque d'écoulements latéraux n'est pas à écarter, car il peut être dû à la présence d'eau saturée au fond de la case ou aux écoulements préférentiels dus à la structure du substrat pédogéologique (sol limoneux à argileux à forte capacité de rétention, discontinuité dans la structure du sol et du sous sol, ...). Il peut à la fois se traduire par une sous ou une sur-estimation du volume d'eau drainé.

L'expérience a montré (Darthout, 1994) que pour des précipitations normales, les circulations latérales de l'eau au-dessus de la plaque prédominent et que les quantités d'eau recueillies représentent une part très faible (10%) par rapport aux quantités totales escomptées. Bouthier A. et Bonifet J-P. mentionnent quant à eux, un volume total d'eau de percolation de l'ordre de 70% du bilan « Pluie- ETP » calculé pendant les périodes de drainage.

L'absence d'eau sur l'appareil est due en fait, aux phénomènes de capillarité. La plaque métallique interrompt la continuité du film capillaire. Cette rupture et la présence d'air s'opposent à la circulation verticale de l'eau dans le sol, laquelle est déviée, en quelque sorte siphonnée, latéralement où son écoulement est plus facile (Castagny, 1967). Si le dispositif est perfectionné en surmontant la plaque d'une couronne de graviers de quelques décimètres d'épaisseur et de 1m de hauteur, et en disposant un lit de graviers sur le fond, l'eau d'infiltration peut être recueillie. La couronne de graviers coupe le siphonage latéral par capillarité ... mais le dispositif devient un lysimètre fermé rudimentaire.

3. Les bougies poreuses sont formées d'une cupule cylindrique creuse, généralement collée à un tube en PVC fermé hermétiquement par un bouchon par lequel passent un ou deux tubes capillaires. La cupule est composée d'un matériau poreux, céramique en général, supposé inerte chimiquement. L'extraction de la solution de sol s'effectue par application d'une dépression à l'intérieur de la bougie poreuse initialement vidée de son contenu. La dépression est créée par un pompe à main ou électrique, lorsque le nombre d'extracteurs est important. Les bougies poreuses peuvent être utilisées dans des sols à des états hydriques compris entre la saturation et des tensions voisines de 0,1 bar. La gamme de dépression la plus couramment utilisée est comprise entre 0,3 et 0,87 bar. Pour un prélèvement dans la zone non saturée, il est nécessaire d'appliquer dans la bougie poreuse, une dépression supérieure à la tension du sol pour que le gradient de charge créé entraîne un écoulement du sol vers le capteur. Pour de faibles profondeurs, quelques mètres, le pompage peut être effectué par aspiration. Pour des profondeurs ou des distances supérieures à 10 mètres, la solution est refoulée dans le capillaire de vidange par une mise sous pression progressive de la bougie. Pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale de répartitions des flux dans le sol, il est nécessaire sur un site donné, d'installer un nombre de six capteurs au minimum afin de pouvoir calculer une valeur moyenne instantanée de la concentration ayant une signification statistique. La mise en place de la bougie doit être faite avec un maximum de soin, le contact sol-bougie étant assuré par une pâte composée à partir des matériaux

provenant de l'emplacement de la bougie et d'eau, que l'on injecte dans le trou légèrement surdimensionné juste avant la mise en place du capteur. L'implantation horizontale évite les écoulements préférentiels et n'engendre pas de gênes aux pratiques culturales. Dans les milieux où le risque de colmatage de la bougie est faible, elle peut rester en place et fonctionner de nombreuses années.

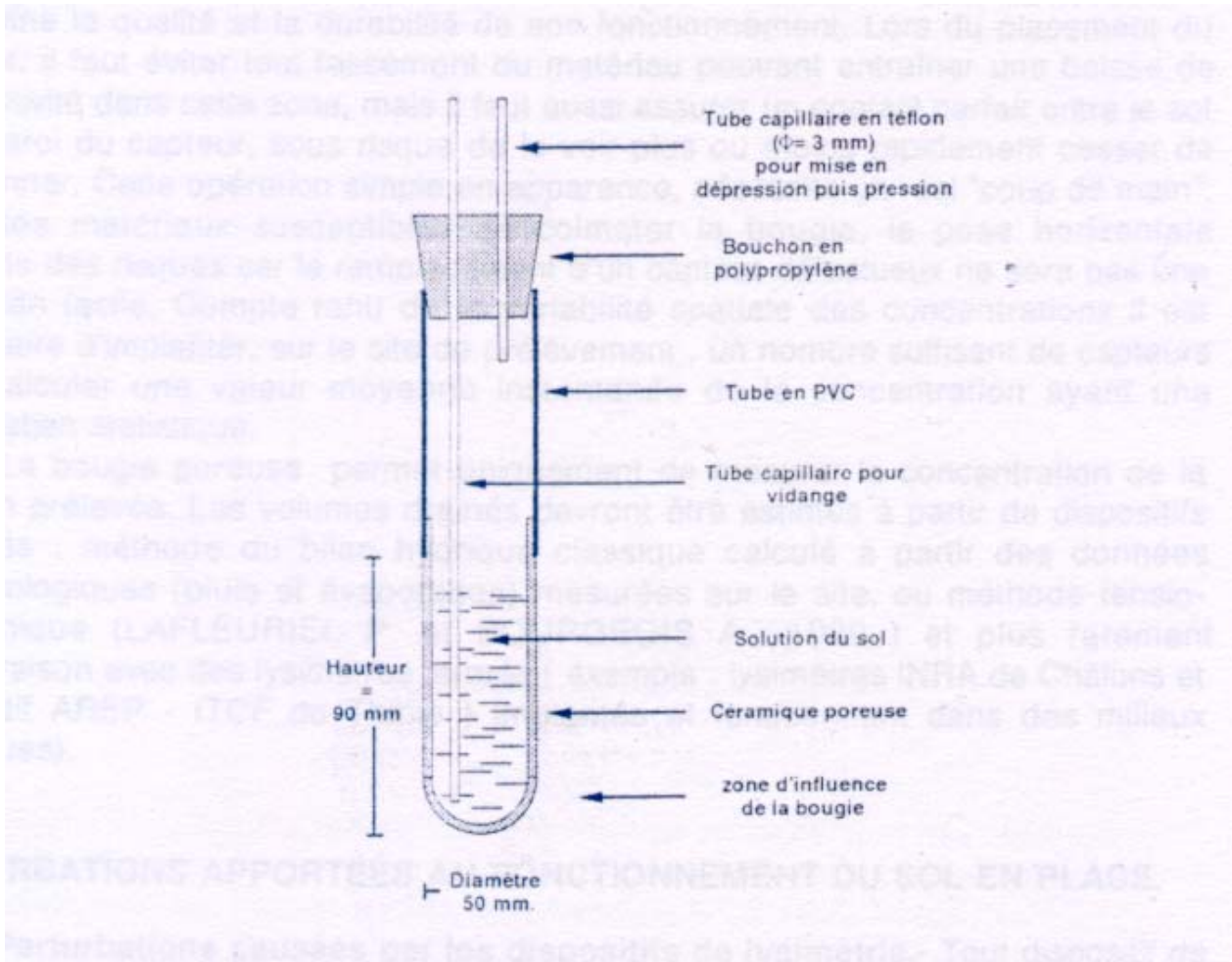


Figure 7 : schéma d'assemblage d'un capteur de solution équipé d'une bougie poreuse

Avantages : la mise en œuvre est simple, répandue pour les recherches sur la qualité des eaux et sur l'environnement. La perturbation au site est minimale et n'engendre pratiquement pas de gêne aux façons culturales.

Inconvénients : Le soin apporté à la mise en place détermine la qualité et la durabilité de son fonctionnement. Il faut éviter lors du placement, tout tassement du matériau pouvant entraîner une baisse de conductivité dans cette zone, mais il faut aussi assurer un contact parfait entre le sol et la paroi du capteur, sous risque de le voir cesser de fonctionner plus ou moins rapidement. Cette opération simple en apparence nécessite un réel coup de main.

L'implantation peut être verticale mais présente le risque non négligeable d'écoulements verticaux le long de la canne et l'impossibilité de la conserver en place longtemps sur le site sans gêner les façons culturales.

La pose horizontale dans des matériaux susceptibles de colmater la bougie présente des risques car le remplacement d'un capteur défectueux n'est pas une opération facile.

Ce système permet uniquement de mesurer la concentration de la solution prélevée. Les volumes drainés doivent être estimés à partir de dispositifs associés (bilan hydrique classique, méthode tensio-neutronique, lysimètres fermés, ...).

A l'évaluation des pertes par lessivage et des mesures associées pour estimer les volumes drainés, s'ajoutent les questions résultant de la spécificité du capteur. La succion exercée par la bougie induit un assèchement dans son voisinage. Les perturbations peuvent être considérées comme négligeables sous certaines conditions (Comifer, 1996).

Ce type de capteur pose le problème de la représentativité des solutions extraites, par modification de la chimie du soluté par effet de tri moléculaire ou ionique.

La technique de prélèvement soulève des problèmes méthodologiques liés aux interactions chimiques entre les parois de la céramique poreuse et le sol, aux conditions de mise en place et à la méconnaissance des aspects hydrauliques de prélèvement.

La séquence des prélèvements nécessite successivement la mise en dépression, puis en pression de l'ensemble des capteurs, et il est nécessaire de disposer en permanence, sur site, d'une source d'énergie électrique suffisante.

3 Matériel et méthode

3.1 *Application in situ de la technique lysimétrique*

Pour obtenir des taux d'évapotranspiration fiables, Chang (FAO, 1986) a mis l'accent sur quatre nécessités en matière de conception et de fonctionnement :

1. Le lysimètre doit être grand et profond pour réduire les effets de bordure et éviter de limiter le développement des racines ;
2. Les conditions physiques dans le lysimètre doivent être comparables à celles qui existent à l'extérieur ;
3. La hauteur des plantes, leur densité et leur disposition doivent être les mêmes à l'intérieur et à l'extérieur du lysimètre ;
4. Une surface tampon (anneau de garde) doit entourer le lysimètre.

Une autre étude critique des défauts des lysimètres permet de dégager quelques normes pour leur construction, telles que : la cuve lysimétrique doit avoir au moins 1m² de section et 1m de profondeur ; l'installation du dispositif doit respecter les conditions naturelles du milieu (surface du sol, couverture végétale); dans le cas de petites cuves, il est recommandé d'en construire plusieurs (Castagny, 1967).

3.2 *Critères de choix des systèmes implantés*

Avant que la mise en œuvre ne soit décidée, nous avons effectué une visite de différentes installations existantes en France, de façon à tenir compte des caractéristiques des différents dispositifs, de leur contraintes de mise en œuvre et de maintenance, de la différence des objectifs poursuivis, des avantages et inconvénients reconnus, ... en bref, exploiter l'expérience acquise précédemment par d'autres équipes de recherche et ne pas verser dans des travers connus. Nous y avons pris conscience de la lourdeur des installations et des limites rencontrées par les systèmes totalement fermés (travaux culturels manuels, gêne dans les pratiques agricoles du fermier) ou totalement ouverts (nécessité de mesures annexes pour établir un bilan hydrique, peu d'eau récoltée). La consultation de la littérature et d'autres expérimentations (Comifer, 1996) nous ont rapportés des systèmes fermés, avec des cases de faible profondeur qui induisent, principalement, une modification de la tension et du régime hydrique ; des systèmes avec fosses ouvertes annexes en plein champ qui gênent les pratiques culturales ; des systèmes peu durables dans le temps qui ne permettent pas un suivi à long terme ; ...

Suite à l'analyse des avantages et inconvénients de chaque système, notre choix s'est orienté vers un système semi-fermé. C'est le seul qui réponde à l'exigence fondamentale de la lysimétrie de mesurer simultanément la solution de drainage et sa concentration dans un volume parfaitement défini. Ce système permanent permet une étude aussi complète que possible et sert de référence pour un milieu pédo-climatique donné, à un niveau régional pertinent. Par les mesures qui peuvent être obtenues, on peut apprécier l'impact sur le milieu des pratiques agricoles mises en œuvre, tel que défini par les objectifs de la subvention octroyée pour la recherche.

Après compilation des données de réalisations pratiques et des paramètres à respecter d'un point de vue lysimétrique, nous avons choisi d'installer trois lysimètres en système semi-fermé non remanié et trois en système semi-fermé remanié. La cuve lysimétrique est circulaire, de 1 m² de section (1,13 m de diamètre), en inox de 5mm d'épaisseur, pour une hauteur de 1,5 m. Elle est placée verticalement à 50 cm sous la surface du sol, d'où l'appellation « semi-fermé », en plein champ, à l'extérieur des tournières. Le plancher drainant, situé à 2m de profondeur, évacue les eaux récoltées par le biais d'un tuyau vers un bidon de récolte en polyéthylène, placé dans une chambre de visite construite en bordure du champ.

Le respect des différents paramètres a justifié le choix de ce type de système selon les impératifs suivants :

1. *Le nombre de répétitions dans le cas de systèmes fermés.* La subvention prévoit la construction de six lysimètres. Le choix des sites représentatifs de la région est explicité ci-après.
2. *La taille.* Il est recommandé de construire des lysimètre grands et profonds. Afin de respecter des impératifs financiers, de réalisation technique et de validité de résultats, nous avons choisi des lysimètres de 1 m² de section et 1,5 m de profondeur.
3. *La forme* L'expérience française nous a rapporté que l'enfoncement à la verticale de cuves lysimétriques carrées, dans le cas de l'obtention du système non remanié, rencontrait des problèmes de fendillements et cassures aux soudures des coins, les bords finissant ensuite par s'écarter. Afin de ne pas rencontrer ces mêmes problèmes et de mieux répartir les forces nécessaires à l'enfoncement, nous avons opté pour la section de 1 m² de forme **circulaire**. La tôle inox rectangulaire de (1,5 X 3,55) m a été cintrée circulairement, avec un rayon de 56 cm sur 1,5 m de haut. Le bord de la tôle au bas du cylindre a été biseauté pour faciliter la pénétration dans le sol.
4. *Les conditions intérieures et extérieures du lysimètre semblables.* Afin de ne pas gêner les pratiques agricoles, et avoir exactement les mêmes pratiques au-dessus du lysimètre que dans le reste du champ, notre originalité est de placer les lysimètres à **50 cm sous la surface du sol**. De ce fait, le fermier n'est pas gêné lors du passage de ses machines, les pratiques agricoles sont réalisées sans entrave et nous sommes en réelles conditions *in situ*. De plus, le plancher drainant du lysimètre, profond de 1,5m, se trouve dès lors à 2m de profondeur, ce qui améliore fortement la dynamique de l'eau (interruption de la continuité du film capillaire, etc. cfr paragraphes précédents). Par contre, nous savons que le fait de ne pas fermer le système sur les 50 premiers cm de sol induit une inconnue dans les variations du stock hydrique du sol dans cette couche..
5. *L'existence d'une surface tampon.* Le lysimètre est positionné en plein champ, hors des zones de tournières, fourrières, décalé par rapport aux lignes de pneumatiques, à une distance acceptable (30 à 40m) de la chambre de visite. Celle-ci est construite en bordure du champ, et contient le bidon de récolte des eaux.

6. *Les effets bords de la cuve.* La cuve et son plancher sont construits, pour une question de longévité dans le temps et de résistance à l'enfoncement, en inox (qualité 304) de 5 mm d'épaisseur. Les effets de bords, sur la dynamique de l'eau, peuvent être considéré comme négligeable par rapport à la section choisie de 1 m², selon la littérature (cfr paragraphes précédents).
7. *Remanié et non remanié.* Les quatre arguments suivants :
- six répétitions pour une même région,
 - la littérature qui mentionne que le sol a repris sa densité apparente d'origine après seulement deux années dans les systèmes remaniés,
 - une réduction de la lourdeur de la mise en œuvre
 - et des coûts d'installation des systèmes non remaniés,
- nous ont fait opter pour le placement de trois lysimètres en système remanié et trois en système non remanié. Ce choix permettra de répartir le risque de dysfonctionnement entre deux systèmes et d'en établir d'éventuelles comparaisons.

3.3 Description des sites retenus

3.3.1 Critères de choix

Six parcelles réparties dans deux exploitations agricoles ont été retenues pour l'implantation des lysimètres selon les critères suivants :

1. Faire partie des fermes de référence suivies par GRENeRA en Hesbaye.
2. Suite à l'excellente collaboration déjà réalisée par le passé⁴ avec les Services agricoles de la Province de Liège (Centre Maraîcher de Hesbaye, CMH), les sites doivent également être suivis par le CMH, au travers d'une convention. Ce dernier permet l'obtention de données supplémentaires, ainsi qu'un appui logistique et technique non négligeable. Le CMH contribue, notamment, à la gestion du périmètre irrigué utilisant les eaux usées de l'usine de congélation de légumes Hesbaye Frost, mais conseille aussi les fermiers ayant leur propre réseau d'irrigation, avec des eaux de pompage ou de bassin de récolte. Les sites font partie de réseaux d'irrigation (avec des eaux claires ou usées) géré par le CMH.
3. Les sites doivent être représentatifs de la région, d'un point de vue pédologique. Les parcelles potentielles ont été reportées sur la carte des sols de la Belgique ; une visite de terrain a été organisée avec un pédologue afin d'en vérifier la correspondance in situ.
4. Enfin, *last but not least*, avoir l'accord des fermiers pour la réalisation de telles installations, et leur suivi, sur leurs terres.

⁴ Projet INCO, financé par l'UE, « Sustainability and optimisation of treatments and use of wastewater in agriculture », 1998-2002.

3.3.2 Description des sites

Les six parcelles sur lesquelles les lysimètres ont été implantés sont des terres appartenant à Messieurs [REDACTED]. Afin d'éviter tous malentendus lors de prises d'informations et de renseignements par les différents intervenants, il a été convenu de nommer les sites selon les noms des parcelles utilisés par les agriculteurs et le CMH. Les parcelles de Monsieur [REDACTED] sont dénommées PL1, PL3 et Sole 4 ; et celles de Monsieur [REDACTED], Gros Thier Bovenistier, Grosse Pierre Petit Pont et Grosse Pierre Chemin de Fer.

3.3.3 Localisation et Caractérisation pédologique

Afin de déterminer les positions exactes des lysimètres dans les parcelles et de poursuivre la caractérisation des sites, une visite de terrain a été organisée en présence de Gilles Colinet (FUSAGx, dpt géopédologie). Ce dernier a brièvement caractérisé les sites d'un point de vue pédologique par sondage à la tarière, jusqu'à la profondeur de 2m. Ce diagnostic est confronté aux indications de la carte des sols de Belgique.

L'emplacement exact de chacun des sites est relevé au GPS et positionné sur les cartes pédologiques et topographiques.

PL1

La parcelle est localisée sur la planchette 119E de la carte des sols de Belgique.

Un lysimètre type non remanié a été installé en date du 17 avril 2003. Ce système a été le premier lysimètre installé.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 208 491 m y : 153 490 m

Le site est localisé sur un bas de pente de vallée très humide. Lors du sondage, le bruit caractéristique de succion témoin d'une teneur en eau élevée est audible (mars 2003). Le sondage révèle des colluvions grises, compactées et devenant brunes dès 45 cm de profondeur. A 90 cm de profondeur, on observe des taches d'oxydo-réduction, dans un horizon plus argileux qui pourrait être un horizon BT enfoui. Ce sondage n'est pas rattachable à un sigle de la carte des sols de Belgique de sol naturel. Il est conseillé de placer le site plus haut sur le versant. Le lysimètre a donc été positionné plus haut sur le versant comme suggéré.

PL3

La parcelle est localisée sur la planchette 119E de la carte des sols de Belgique.

Un lysimètre, type non remanié a été installé en date du 8 août 2003.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 208 847m y : 153 728m

Le site est localisé sur un bas de versant humide. Le sol est décrit Acp(c), soit un sol limoneux (A), à drainage modéré (c), sans développement de profil (p), avec un horizon BT enfoui [(c)] à une profondeur supérieure à 90cm.. Ce profil sur colluvions présente un caractère très humide.

En date du 08 Mars 2004, Warin (2004) ouvre une fosse pédologique dans cette parcelle et fait la description de profil suivante.

Conditions atmosphériques : Temps froid et sec

Occupation du sol : Résidus de phacélie

Topographie : Zone de transition entre le versant et la vallée

Drainage interne : Modéré (pseudo-gley à moins d'un mètre de profondeur)

Activité biologique : Moyenne

Pierrosité : Nulle

Classification des sols : NEOLUVISOL redoxique, issu de limon lœssique

- LA (0 à 32 cm) : Limon brun foncé (10 YR 4/3) – Frais – Teneur moyenne en matière organique – Racines fines et nombreuses – Réaction nulle avec HCl – Nette structure polyédrique subangulaire fine (2 mm) mélangée à une structure grumeleuse fine (4 mm) – Pores très nombreux, fins et très fins – Horizon meuble et peu plastique – Horizon poreux – Nombreux conduits de vers de terre – Limite nette (1 cm) et régulière.
- BT (32 à 50 cm) : Limon à limon argileux brun jaune foncé (10 YR 4/4) – Frais – Racines nombreuses et fines – Rares petites concrétions de Fe-Mn – Réaction nulle avec HCl – Structure prismatique moyenne (30 mm) très nette, associée à une sous-structure polyédrique fine à moyenne (10 mm) nette – Pores très nombreux, fins et très fins – Horizon peu compact et peu plastique – Horizon poreux – Revêtements épais organo-argileux (50 à 80 %) brun jaune foncé (10 YR 4/4) sur les agrégats – Nombreux conduits de vers de terre – Limite graduelle (5 cm) et régulière.
- BTg (50 à 80 cm) : Limon à limon argileux brun jaune foncé (10 YR 4/4) – Frais – Racines nombreuses et fines – Grandes taches d'oxydation rouges (2,5 Y 8/1) et de décoloration (5YR 5/8) – Rares petites concrétions de Fe-Mn – Réaction nulle avec HCl – Structure prismatique moyenne (30 mm) très nette, associée à une sous-structure polyédrique fine à moyenne (10 mm) nette – Pores très nombreux, fins et très fins – Horizon peu compact et peu plastique – Horizon poreux – Revêtements épais organo-argileux (50 à 80 %) brun jaune foncé (10 YR 4/4) sur les agrégats – Nombreux conduits de vers de terre – Limite graduelle (5 cm) et régulière.
- BCg (80 à 120 cm) : Limon brun jaune (10 YR 5/6) – Frais à Humide – Racines fines et très peu nombreuses – Taches d'oxydation rouges (2,5 Y 8/1) et de décoloration (5YR 5/8) – Rares petites concrétions de Fe-Mn – Réaction nulle avec HCl – Structure prismatique très peu nette (structure à tendance continue) – Pores très nombreux, fins et très fins – Horizon peu compact et peu plastique – Horizon poreux – Revêtements fin organo-argileux (<20 %) brun jaune foncé (10 YR 4/4) sur les agrégats – Conduits de vers de terre peu nombreux.

Sole 4

La parcelle est localisée sur la planchette 119E de la carte des sols de Belgique.

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

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 209 848m - y : 150 969m

Le site est localisé sur un plateau en légère pente.

Le sol est classé Aba(b)0, soit un sol limoneux (A), à drainage normal (b), à BT tacheté [(b)] et à horizon A épais (0).

Entre 0 et 60 cm, le limon est peu argileux. Au-delà, se trouve l'horizon BT qui présente des taches d'oxydo-réduction attribuées à des processus anciens. L'horizon C n'a pas été atteint lors du sondage. Ce type de profil témoigne d'une intensité relativement faible des processus érosifs car l'horizon A est bien préservé.

Gros Thier Bovenistier

La parcelle est localisée sur la planchette 120W de la carte des sols de Belgique.

Un lysimètre, type non remanié a été installé en date du 14 août 2003. Il s'agit du dernier lysimètre installé.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 216 558m y : 151 785m

Le site est en position sommitale d'un interfluve légèrement bombé. Le sondage effectué confirme le sigle de la carte des Sols de la Belgique (CSB), à savoir Aba. La première lettre A majuscule signifie qu'il s'agit d'un sol à texture limoneuse; la seconde lettre donne la classe de drainage, « normale » dans le cas du b minuscule; la troisième lettre indique le développement de profil; a minuscule correspond à un profil présentant un horizon BT (accumulation d'argile par lessivage vertical). Le sondage permet de préciser que le profil est légèrement tronqué par l'érosion; l'horizon de surface présente une teneur en argile plus élevée suite à l'incorporation de l'horizon BT par le labour. Le site présente donc les caractères typiques d'un sol de type Aba à horizon A mince (« terre-à-brique »).

En date du 10 mars 2004, Warin (2004) ouvre une fosse pédologique dans cette parcelle et fait la description de profil suivante.

Conditions atmosphériques : Ensoleillé

Occupation du sol : Sol nu

Topographie : Zone plane dans un fond de vallon

Drainage interne : drainage normal

Activité biologique : Moyenne

Pierrosité : Nulle

Classification des sols : COLLUVIOSOL limoneux

LA₁ (0 à 32 cm) : Limon brun foncé (10 YR 4/3) – Frais – Teneur moyenne en matière organique – Racines fines et nombreuses – Réaction nulle avec HCl – Très Nette structure grumeleuse fine (2 mm) mélangée à une structure polyédrique subangulaire (4 mm) – Pores très nombreux, fins et très fins – Horizon meuble et peu plastique – Horizon très poreux – Nombreux conduits de vers de terre – Limite nette (1 cm) et régulière.

LA₂ (32 à 40 cm) : Limon brun foncé (10 YR 4/3) – Frais – Teneur moyenne en matière organique – Racines fines et nombreuses – Réaction nulle avec HCl – Structure polyédrique subangulaire fine (4 mm) – Pores peu nombreux, fins et très fins – Horizon meuble et peu plastique – Horizon peu poreux – Nombreux conduits de vers de terre – Limite nette (1 cm) et régulière.

C₁ (40 à 95 cm) : Limon brun jaune foncé (10 YR 4/4) – Frais – Racines nombreuses et fines – Grandes – Rares petites concrétions de Fe-Mn – Réaction nulle avec HCl – Structure fine à moyenne (10 mm) peu nette – Pores très nombreux, fins et très fins –

Horizon peu compact et peu plastique – Horizon poreux – Revêtements mince organo-argileux (<20 %) brun jaune foncé (10 YR 4/4) sur les agrégats – Nombreux conduits de vers de terre – Limite graduelle (5 cm) et régulière.

C₂ (95 à 120 cm) : Limon à limon argileux brun jaune foncé (10 YR 4/4) – Frais – Racines nombreuses et fines – Rares petites concrétions de Fe-Mn – Réaction nulle avec HCl – Structure continue – Pores nombreux, fins et très fins – Horizon peu compact et peu plastique – Horizon poreux — Nombreux conduits de vers de terre

Grosse Pierre Chemin de Fer :

La parcelle est localisée sur la planchette 120W de la carte des sols de Belgique.

Un lysimètre, type remanié a été installé en date du 4 juillet 2003.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 217 654m y : 152 254m

Le site est localisé au milieu d'un versant en pente douce. L'horizon 0-30 cm est limoneux, facile à sonder et friable. L'horizon 30-70 cm correspond au BT. En dessous, le matériau est plus limoneux et moins argileux que le BT; il s'agit de l'horizon C (« ergéron. » selon l'ancienne nomenclature). Ce profil présente les traces des processus érosifs par le caractère colluvial de l'horizon de surface et la faible profondeur d'apparition de l'horizon C. Selon la légende CSB, ce profil devrait être classé en Abp(c) ou en AbB. Dans les deux cas, il s'agit de situations de versant intermédiaires entre les sols typiques de plateau et les sols sur colluvions.

Grosse Pierre Petit Pont

La parcelle est localisée sur la planchette 120W de la carte des sols de Belgique.

Un lysimètre, type remanié a été installé en date du 27 mai 2003

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 217 394m y : 151 768m

Ce lysimètre était le premier système remanié installé.

Le site est localisé en bas d'un versant rectiligne. Le sol est classé comme Abp, soit un sol limoneux à drainage normal et sans développement de profil (p). Le sol est très friable, présente peu de structure, le matériau est très homogène sur toute la profondeur du sondage. Ce sol sur colluvions limoneuses est tout à fait représentatif des sols de dépressions sèches.

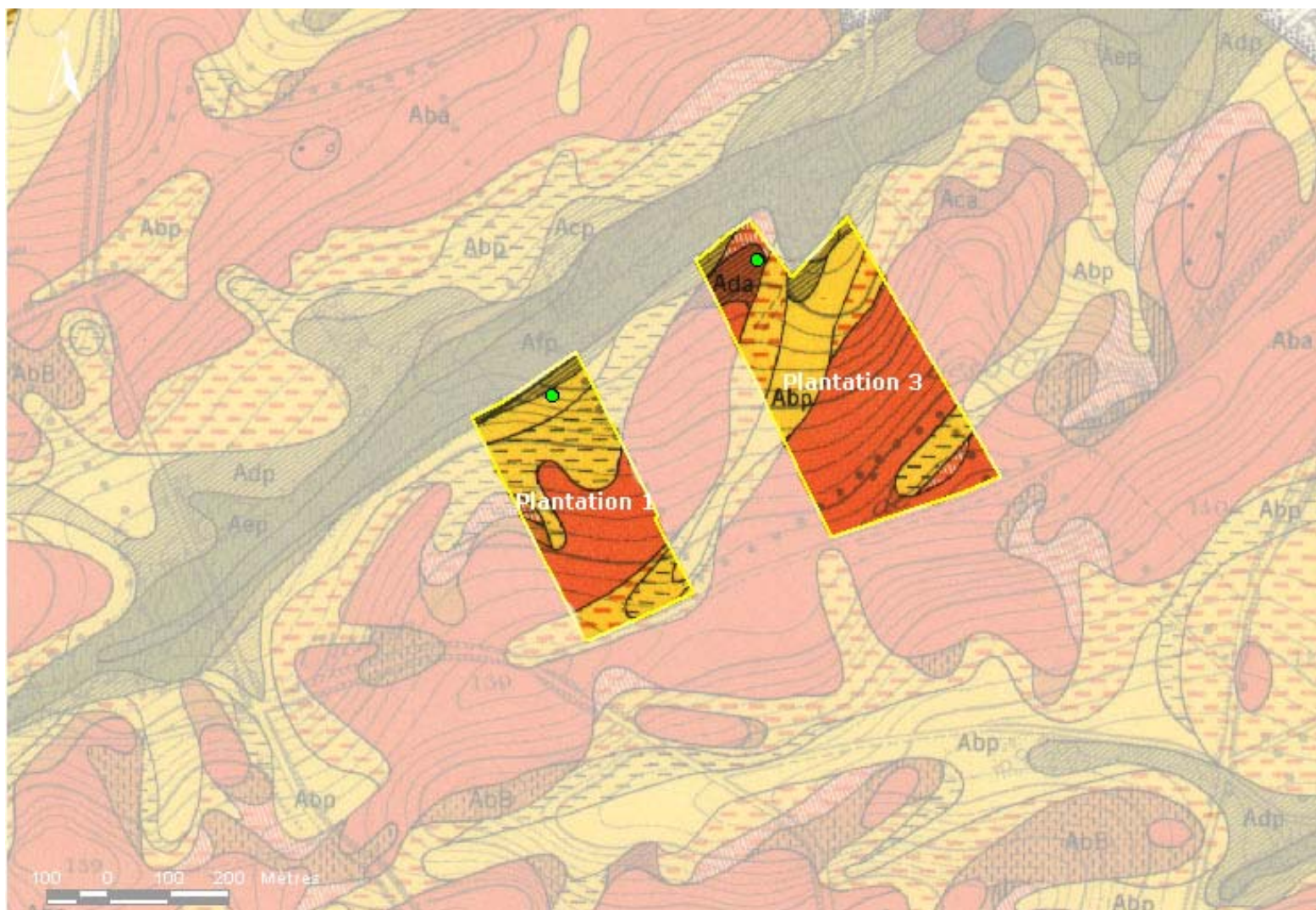


Figure 8: Localisation des parcelles PL1 et PL3 de Mr [redacted] sur fond de carte des sols de la Belgique

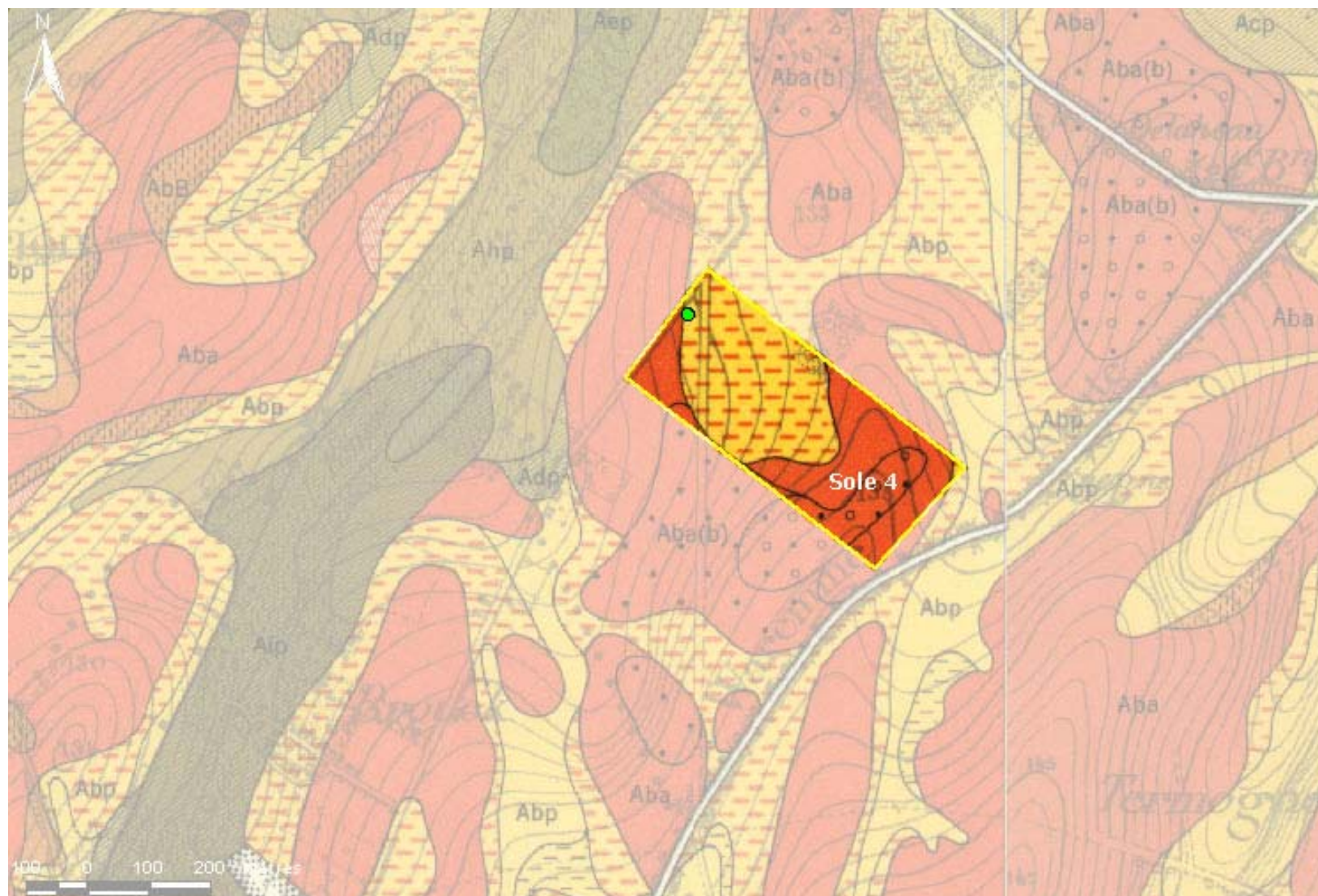


Figure 9: Localisation de la parcelle Sole4 de Mr [redacted] sur fond de carte des sols de la Belgique

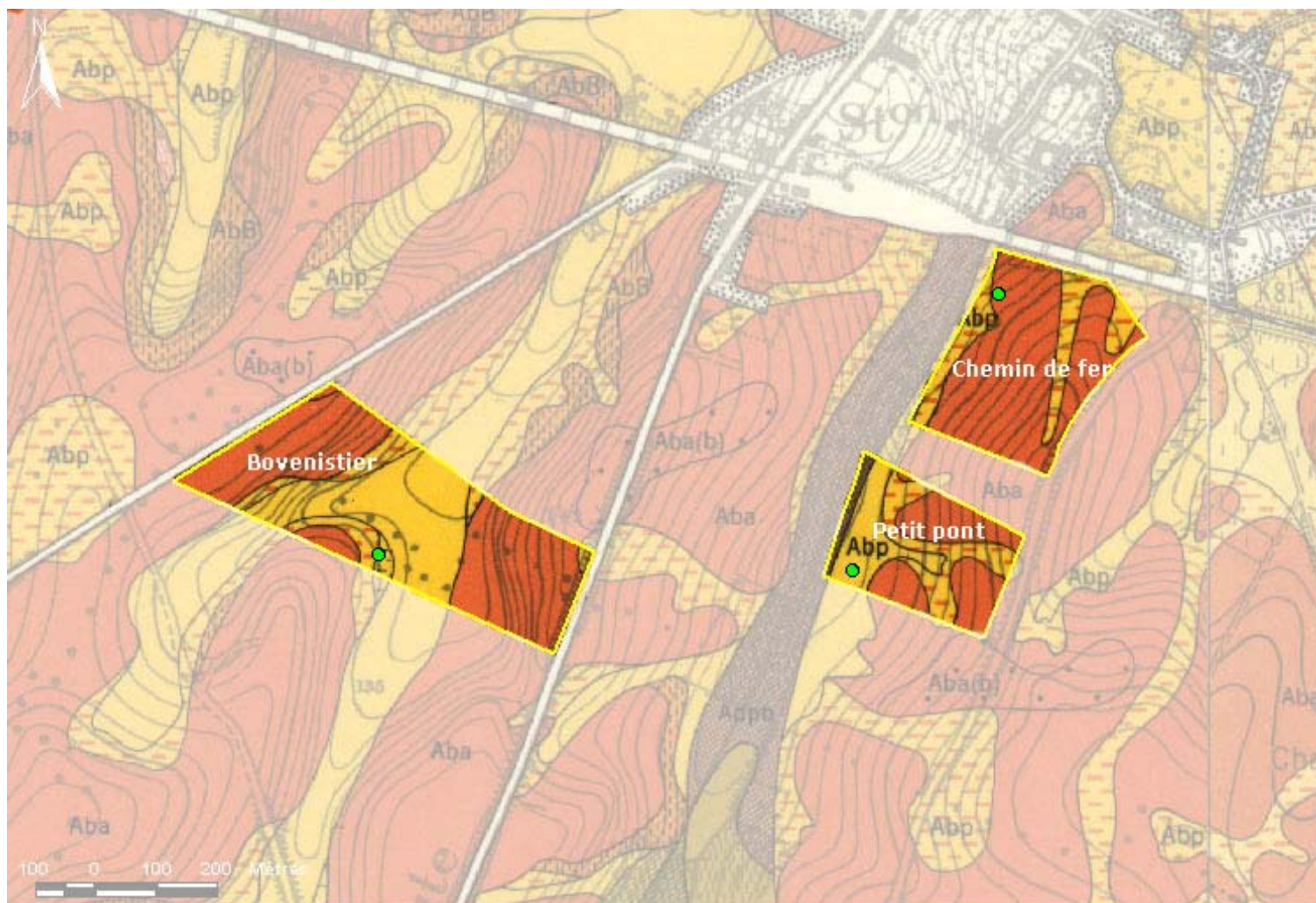








Figure 10: Localisation des parcelles de Mr [redacted] : Bovenistier, Petit Pont et Chemin de Fer sur fond de carte des sols de la Belgique.

Légende de la carte des sols de Belgique

Sols des plateaux et des pentes












Sols limoneux

Sols limoneux profonds

	Sols limoneux à horizon B textural
	Sols limoneux à horizon B textural tacheté.
	Sols limoneux faiblement gleyifiés à horizon B textural.
	Sols limoneux modérément gleyifiés à horizon B textural.
	Phase à horizon A épais.
	Phase à horizon A mince.

Sols des vallées et des dépressions

Sols sur matériaux limoneux

	Sols sur limon.		Sols fortement gleyifiés à horizon réduit sur matériaux limoneux.
	Sols faiblement gleyifiés sur limon.		Sols très fortement gleyifiés à horizon réduit sur matériaux limoneux.
	Sols modérément gleyifiés sur limon.		Sols réduits sur matériaux limoneux.
	Sols fortement gleyifiés sur matériaux limoneux.		Phase profonde.
	Sols très fortement gleyifiés sur matériaux limoneux.		Phase à horizon B textural enfoui à profondeur moyenne.
			Phase à horizon B textural enfoui à faible profondeur.

3.4 Méthodologie de mise en œuvre

Les cuves lysimétriques ont été préparées en atelier et placées en champ en collaboration avec le Centre Maraîcher de Hesbaye (Services Agricoles de la Province de Liège).

3.4.1 Construction

Les plans des systèmes sont présentés aux pages suivantes.

Plan des systèmes remaniés

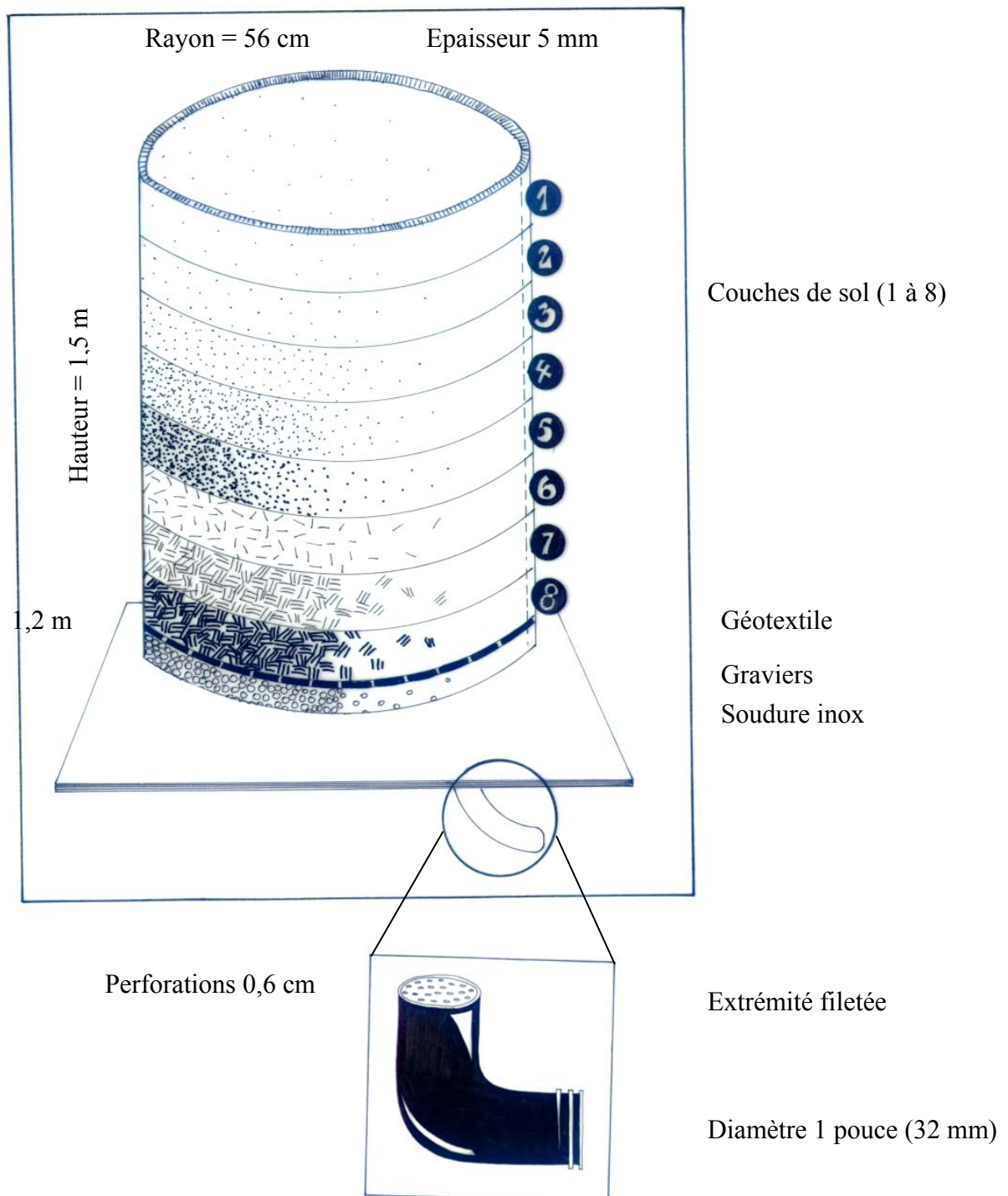


Figure 11 : Schéma du système lysimétrique en sol remanié

Plan des systèmes non remaniés

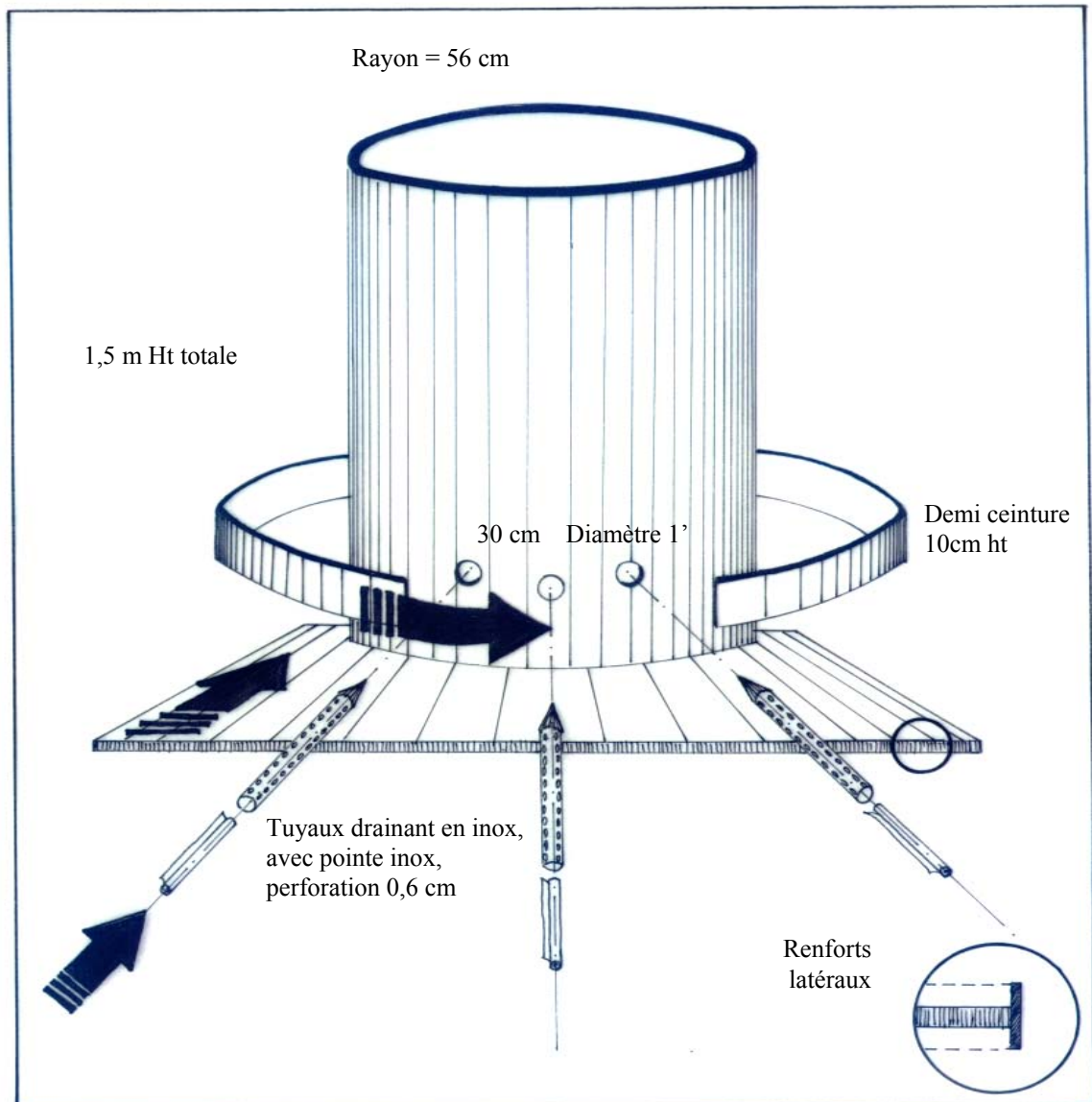


Figure 12 : Schéma du système lysimétrique en sol non remanié

3.4.2 Installation du système remanié

Les photos présentées à l'annexe I montrent la réalisation pratique des chambres de visite et de l'installation des lysimètres remaniés et non remaniés.

- A l'emplacement retenu pour placer le lysimètre, une pelle hydraulique retire les deux premiers horizons de surface (0-20 et 20-50 cm) et les dépose en deux tas distincts (annexe, photo 1)

- Une fosse carrée de 2,5 mètres de côté est creusée, de 20 en 20 cm, jusqu'à la profondeur de 2m
- Chaque couche de sol successivement extraite est mise en tas séparés et numérotés (de 1 à 8)
- Le fond de la fosse est lissé, avec une légère déclivité en direction de la chambre de visite
- Le lysimètre, pris avec le bras de la pelle hydraulique, est déposé dans le fond de la fosse, l'exutoire est dans la direction de la chambre de visite
- Une couche de 5 cm de graviers est posée dans le fond du lysimètre
- Par-dessus les graviers, un géotextile, dont la surface est identique à celle du lysimètre, est posé (annexe, photo 2)
- Le lysimètre est rempli manuellement couche par couche, en respectant l'ordre des couches séparées lors du creusement
- Chaque couche est tassée par piétinement (annexe, photo 3)
- La tranchée est creusée, à la pelle hydraulique, depuis le lysimètre jusqu'à la chambre de visite. Des mesures au théodolite permettent le respect d'une pente de 1% minimum
- L'horizon de surface est séparé des horizons de profondeur
- Un tuyau en polyéthylène, semblable à ceux utilisés pour la distribution d'eau potable, est raccordé à l'exutoire du lysimètre et posé à plat dans le fond de la tranchée (annexe, photo 4)
- La chambre de visite est percée, par l'extérieur, à la hauteur d'arrivée du tuyau (annexe, photo 5). A l'intérieur de la chambre, le bidon de récolte est placé sous l'exutoire
- La tranchée est rebouchée (annexe, photo 6)
- La fosse autour du lysimètre est rebouchée également
- L'horizon de surface est replacé par-dessus la fosse et la tranchée
- Un thermomètre est placé dans la chambre de visite ; une jupe plastique est posée par-dessus le bidon et le tuyau d'arrivée d'eau, afin d'éviter l'intrusion de polluants (particules, insectes, ...) dans le bidon de récolte
- Le nom du site est peint sur le couvercle de la chambre, le couvercle est fermé et cadenassé.

3.4.3 Installation du système non remanié

- A l'emplacement retenu pour placer le lysimètre, une pelle hydraulique enlève les deux premiers horizons de surface (0-20 et 20-50 cm) une surface carrée de 2 m de côté et les dépose en tas distincts
- La cuve lysimétrique sans fond est posée à cet emplacement (annexe, photo 7)
- Une plaque en tôle acier de 2cm d'épaisseur, renforcée de poutrelles acier, est posée sur la cuve
- La pelle hydraulique exerce une poussée verticale sur cette plaque avec son bras de grue (annexe, photo 8)
- La cuve lysimétrique s'enfonce verticalement dans le sol
- Lorsque la poussée du bras de grue n'est plus suffisante, le sol est partiellement dégagé autour de la cuve lysimétrique afin de réduire la résistance due au frottement
- Lorsque la cuve est enfoncée à la profondeur souhaitée, la plaque acier est retirée

- Le monolithe de sol enfermé dans la cuve lysimétrique est dégagé sur les $\frac{3}{4}$ de son pourtour et une vingtaine de cm plus bas que le bas de la cuve ; il est étançonné
- La plaque carrée (1,25 m) qui servira de fond, en inox (qualité 304) de 5mm d'épaisseur, est posée horizontalement 5cm sous le bas de la cuve
- Elle est poussée horizontalement avec le bac de la grue sous le cylindre lysimétrique. Le monolithe de sol est dégagé sur $\frac{1}{4}$ de son pourtour (annexe, photo 9)
- Deux demi-ceintures du même matériau, cintrées au même diamètre, sont soudées faisant le joint entre la cuve cylindrique verticale et la plaque de fond horizontale (annexe, photo 10)
- Lors de l'installation du premier lysimètre ces soudures ont été réalisées sur site ; au vu des inconvénients rencontrés (eau dans le fond de la fosse, nécessité d'un groupe électrogène puissant, de matériel de soudure de terrain, problème d'ensoleillement qui gêne le soudeur, ...) les deux lysimètres suivants ont été sanglés (plaque de fond et cuve ensemble), extraits hors de la fosse avec la grue, acheminés et soudés en atelier
- Trois pré-trous sont réalisés à la tarière pour le placement des tuyaux drainant, pré-perforés au diamètre des tuyaux, dans la cuve lysimétrique (annexe, photo 10)
- Les trois tuyaux drainant sont enfoncés dans le monolithe de sol, un géotextile est enroulé à l'intérieur et leurs bords extérieurs sont soudés à la cuve lysimétrique
- Les trois tuyaux sont raccordés entre eux en un seul exutoire (annexe, photo 11)
- Le lysimètre est replacé verticalement dans la fosse, en respectant la profondeur de – 50cm sous la surface, avec son exutoire en direction de la chambre de visite (annexe, photo 12)
- La tranchée est creusée, à la pelle hydraulique, depuis le lysimètre jusqu'à la chambre de visite, avec une pente de 1% minimum
- La méthodologie suivie est alors identique à celle adoptée dans le cas du placement de lysimètre en système remanié

3.4.4 Installation des chambres de visites

- Les emplacements des chambres de visite ont également été creusés à la pelle hydraulique
- Leur profondeur a été déterminée par le choix des sites exacts de l'implantation des lysimètres, en fonction de la distance du lysimètre par rapport à la chambre et des pentes naturelles du terrain et d'écoulement à respecter
- La pelle hydraulique creuse une fosse de la profondeur requise pour la chambre installée (annexe, photo 13)
- Le fond est lissé et mis à l'horizontale
- Une bâche plastique est posée dans le fond (annexe, photo 14)
- Un premier anneau en béton préfabriqué (diamètre intérieur 90cm, épaisseur des bords 8 cm, hauteur de 90cm) est posé, des armatures ont été ajoutées et fixées à sa base
- Une couche de 10cm de béton est coulée dans le fond (annexe, photo 15)
- Un joint d'étanchéité est mis sur le bord supérieur (photo 16)
- L'anneau suivant (même caractéristiques, hauteur 90 ou 60cm) est posé par-dessus
- L'opération est répétée jusqu'à l'obtention des hauteurs requises (annexe, photo 17)
- Les hauteurs installées ont été 2,70m (3 anneaux de 90cm), 2,40 (2 anneaux de 90cm et un de 60cm), 2,10m (1 anneau de 90cm et 2 de 60cm) et 1,50m (1 anneau de 90cm et 1 de 60cm)

- Un joint de mousse est collé au bord supérieur, pour réaliser une étanchéité lors de la fermeture du couvercle (annexe, photo 18)
- Le couvercle est en tôle acier, enduit d'une peinture anti rouille, renforcé à l'intérieur de contre-forts (en cas du passage d'engins agricoles par-dessus) et muni d'un système de fixation et de fermeture
- Le couvercle est posé, fixé et fermé avec un cadenas

1 Intro

2 Biblio

3 Matériel et méthode

3.1 Application in situ de la technique lysimétrique

3.2 Critères de choix des systèmes implantés

3.3 Description des sites retenus

3.4 Méthodologie de mise en œuvre

Figure 1

Figure 2

Figure 3

Figure 4

Figure 5

Figure 6

Figure 7

Figure 8

Figure 9

Figure 10

Figure 11

Figure 12

TABLE DES MATIERES (suite)

3.5	METHODOLOGIE DES PRELEVEMENTS / ACQUISITION DES DONNEES.....	55
3.5.1	<i>Méthodologie des prélèvements</i>	55
3.5.2	<i>Opérateurs</i>	55
3.5.3	<i>Analyses</i>	56
4	RESULTATS	58
4.1	ETUDES PONCTUELLES	58
4.1.1	<i>Relevés piézométriques</i>	58
4.1.2	<i>Echantillonnage dans les drains alentours</i>	59
4.1.3	<i>Essai fréquence d'échantillonnage</i>	62
4.2	CARACTERISATION CLIMATOLOGIQUE	64
4.3	RESULTATS PAR PARCELLES	68
4.3.1	<i>Sole 4</i>	68
4.3.2	<i>Grosse Pierre Chemin de fer</i>	71
4.3.3	<i>PL1</i>	74
4.3.4	<i>PL3</i>	77
4.3.5	<i>Gros Thier Bovenistier</i>	80
4.3.6	<i>Grosse Pierre Petit Pont</i>	83
5	SYNTHESE GRAPHIQUE, BILANS ET DISCUSSION	86
5.1	GRAPHIQUE DE SYNTHESES PAR PARCELLE	86
5.2	BILAN HYDROLOGIQUE	94
5.3	BILAN AZOTE	97
6	CONCLUSION	101
7	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	104
8	BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE	105
9	ANNEXES	107

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET GRAPHIQUES

Figure 1 : Le cycle de l'azote	18
Figure 2 : Courbes $K - \Psi$ et $\Psi - \Theta$	23
Figure 3 : Schéma des différents composants du lessivage.....	25
Figure 4 : schéma de principe d'un lysimètre.....	31
Figure 5 : schéma de la répartition de l'eau dans le sol et le sous-sol	33
Figure 6 : schéma lysimètre ouvert et de la plaque de tôle placée dans le sol	35
Figure 7 : schéma d'assemblage d'un capteur de solution équipé d'une bougie poreuse.....	37
Figure 8: Localisation des parcelles PL1 et PL3 de Mr Pirlot sur fond de carte des sols de la Belgique	46
Figure 9: Localisation de la parcelle Sole4 de Mr Pirlot sur fond de carte des sols de la Belgique	47
Figure 10: Localisation des parcelles de Mr Seutin : Bovenistier, Petit Pont et Chemin de Fer sur fond de carte des sols de la Belgique.	48
Figure 11 : Schéma du système lysimétrique en sol remanié.....	51
Figure 12 : Schéma du système lysimétrique en sol non remanié	52
Figure 13 : Plan topographique avec la localisation des lysimètre des parcelles PL3 et PL1 des exutoires des drains où sont prélevés les échantillons d'eau.	60
Figure 14: Pluie, Evapotranspiration et déficit hydrique par décade, de septembre 2003 à février 2005 (station IRM de Ernage)	67
Graphique 1 : Parcelle PL3, relevé piézométrique mensuel, niveau de la nappe par rapport au lysimètre.....	58
Graphique 2 : Teneur en nitrate dans le lysimètre de la parcelle PL3 et dans les drains des parcelles avoisinantes	61
Graphique 3 : Synthèse des mesures et observations, parcelle sole 4.....	88
Graphique 4 : Synthèse des mesures et observations, parcelle Chemin de fer	89
Graphique 5 : Synthèse des mesures et observations, parcelle PL1.....	90
Graphique 6 : Synthèse des mesures et observations, parcelle PL3.....	91
Graphique 7 : Synthèse des mesures et observations, parcelle Bovenistier.....	92
Graphique 8 : Synthèse des mesures et observations, parcelle Petit Pont.....	93
Tableau 1 : résultats d'analyses menées dans les eaux de drainage.....	59
Tableau 2 : Essai fréquence d'échantillonnage, mesures observées.	63
Tableau 3 : données climatologiques de la station IRM de Uccle	66
Tableau 4 : Observations mensuelles, parcelle sole 4.....	70
Tableau 5 : Observations mensuelles, parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer.....	72
Tableau 6 : Observations mensuelles, parcelle PL1	75
Tableau 7 : Observations mensuelles, parcelle PL3.....	78
Tableau 8 : Observations mensuelles, parcelle Gros Thier Bovenistier	81
Tableau 9 : Observations mensuelles, parcelle Grosse Pierre Petit Pont	85
Tableau 10 : Pluviométrie, drainage potentiel et volumes récoltés par parcelles	94
Tableau 11 : Bilan azoté de la parcelle Chemin de Fer.....	97
Tableau 12 : Bilan azoté de la parcelle sole 4	98

3.5 Méthodologie des prélèvements / Acquisition des données

3.5.1 Méthodologie des prélèvements

La méthodologie d'acquisition des données se fait pour chaque passage sur les sites, en remplissant une fiche reprenant les renseignements suivants :

- la localisation de la parcelle, le type de culture en place et le stade de développement ;
- un relever les pluviomètres : quatre pluviomètres sont placés à proximité des six parcelles où sont installés les lysimètres. Les emplacements ont été choisis selon une exposition minimale aux dommages et dégradations extérieures, sans gêne pour le fermier, hors des zones d'influence de grands arbres et proches des sites lysimétriques ;
- les hauteurs piézométriques pour les parcelles où un réseau de piézomètres est installé ;
- les températures extrêmes atteintes dans les chambres de visite ;
- le volume d'eau récoltée dans les bidons ;
- le pH, la conductivité électrique (CE) et la teneur en nitrate de l'eau présente dans les bidons de récolte.

Le technicien prélève les quantités d'eau nécessaires aux analyses de laboratoire et les place dans un frigo maintenu à 4°C durant le transport. Enfin, il assure l'entretien des sites (nettoyage, fauche, entretien des cadenas et peintures, etc.).

Cette fiche est remplie lors de chaque visite et présentée en annexe II. Une fiche est remplie par site lysimétrique, même si tous les paramètres n'y sont pas mesurés, même si elle est dès lors incomplètement remplie. Chaque passage sur chaque site est de la sorte répertorié et conservé.

Dès l'ouverture de la chambre de visite, la température minimale et maximale est relevée. Le bidon de récolte est sorti de la chambre de visite et le contenu est versé dans une colonne à pied afin de mesurer la quantité d'eau percolée. Deux fioles sont prélevées ; l'une est étiquetée, indiquant la date et la parcelle, et immédiatement placée dans le frigo-box (connecté en permanence à l'allume-cigare du véhicule de service) ; la seconde sert à mesurer sur site le pH, CE et teneur en nitrate avec des appareillages de terrain. Cette dernière est ensuite également mise dans le frigo box.

Les sites sont suivis hebdomadairement depuis leur installation pour assurer le relevé pluviométrique, piézométrique et l'échantillonnage des lysimètres.

3.5.2 Opérateurs

La récolte des échantillons et les mesures de paramètres physiques sont entièrement assurées par le personnel cadre, technique et ouvrier d'Epuvaleur.

Les analyses de terrain sont réalisées par ce même personnel.

Les analyses de laboratoire sont réalisées par le BEAGx et/ou par le laboratoire d'Epuvaleur lorsque le dépôt des échantillons ne peut s'y faire le jour même des prélèvements, ou lors de congés.

3.5.3 Analyses

De retour à Gembloux, la première fiole est portée au BEAGx directement ou dès le lendemain, avec dans ce cas une conservation dans le frigo du laboratoire Epuvaleau.

Les mesures de pH, CE et teneur en nitrate sont effectuées dans la deuxième fiole par le laboratoire Epuvaleau, également à l'aide de kits de laboratoire.

Les méthodes de mesures et d'analyses sont les suivantes :

- Les pluviomètres sont du type «Hellmann», posés à 1m de hauteur, hors de zones d'influence d'arbres.
- Les piézomètres ont été creusés jusque 2m de profondeur, à la tarière et gainés par des tuyaux en PVC incisés tous les 10 cm. Les niveaux sont relevés à l'aide d'un flotteur à ruban gradué. Un relevé topographique des sites a été réalisé.
- Les kits de terrain mesurent le pH et la Conductivité Electrique.
- Le kit de terrain, système « Nitracheck », mesure la teneur en nitrate par méthode colorimétrique.
- Le laboratoire Epuvaleau mesure également la teneur en nitrate par méthode colorimétrique.
- Le BEAGx analyse la teneur en nitrate par méthode Zambelli.

pH mètre et conductimètre :

Le pHmètre et conductimètre de terrain utilisé est l'appareil de mesure multiparamètres portable « Sension 156 » de la société Hach. La mesure est électrochimique.

Un témoin signale la nécessité de calibrer l'appareil. Le calibrage est effectué par le laboratoire Epuvaleau.

L'appareil résiste à des températures comprises entre -10 et 110 °C.

La plage de mesure du pH est de 2.0 à 19.99. La température est automatique prise en compte lors de l'affichage de la mesure.

La conductivité est mesurée en $\mu\text{S}/\text{cm}$, la plage de mesures déterminée est de 0 à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'électrode est calibrée avec des solutions étalons de NaCl.

Nitracheck :

Le Nitracheck 404 est un boîtier de lecture mis au point par la société française « Challenge Agriculture ». Une bandelette réactive « Nitra-test » de la société Merk est introduite dans le boîtier Nitracheck avant toute mesure, afin de calibrer l'appareil en fonction du lot des bandelettes et de la température. Le mode opératoire doit respecter un timing très strict. La bandelette réactive est trempée trois secondes dans la solution à analyser. Elle est égouttée pendant 5 secondes et laissée au repos durant une minute. Durant les 10 dernières secondes, elle doit être introduite dans la fente de lecture du boîtier Nitracheck. La mesure de la concentration est donnée en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$. Trois mesures consécutives sont répétées pour chaque solution à analyser. Si un écart supérieur à 10% est observé entre les mesures obtenues, le mode opératoire est recommencé. Les bandelettes réactives comprennent deux zones réactives : l'une sert à déterminer la teneur de la solution à analyser en NO_3^- et la seconde signale des interférences, dues à la présence de nitrites par exemple, en changeant de

coloration. Dans le cas où la seconde zone réactive réagit, la mesure donnée par le Nitratecheck n'est pas valide et la solution doit être analysée par un laboratoire.

Le Nitratecheck a une gamme de lecture de 5 à 500 mg NO₃⁻ /l.

Le laboratoire Epuvaleur :

La mesure de la concentration en nitrate d'une solution est réalisée par le laboratoire Epuvaleur par la méthode « Test'N tube Vials » de la société Hach. La gamme de lecture est de 0.2 à 30.0 ml/l N-NO₃. La mesure préalable au Nitratecheck permet de déterminer si une dilution est nécessaire.

Les ions nitrate réagissent au 2,6-diméthylphénol dans une solution contenant de l'acide sulfurique et phosphorique en 4-nitro-2,6-diméthylphénol. Les mesures sont prises par méthode colorimétrique dans les 5 minutes à 370 nm. Un blanco est mesuré en parallèle.

Le BEAGx :

La mesure de la concentration en nitrate d'une solution est réalisée par le laboratoire BEAGx par la méthode Zambelli pour le dosage des nitrites et ensuite par la méthode au 2-6-xylénol pour le dosage du nitrate.

L'acide sulfanilique en milieu chlorhydrique, en présence d'ammonium et de phénol, forme avec les ions NO₂⁻ un complexe coloré jaune dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en nitrites. La lecture se fait au spectromètre à la longueur d'onde de 435 nm, en tenant compte de la valeur lue pour le témoin, et en se reportant à une courbe d'étalonnage.

Le nitrate en présence de composés phénolés et d'acide sulfurique se transforme en dérivés nitrés du phénol, extractibles par le toluène, et donnant en milieu alcalin une coloration jaune susceptible d'un dosage colorimétrique. La lecture se fait au spectromètre à la longueur d'onde de 432 nm, en construisant une courbe d'étalonnage préalable.

4 Résultats

4.1 Etudes ponctuelles

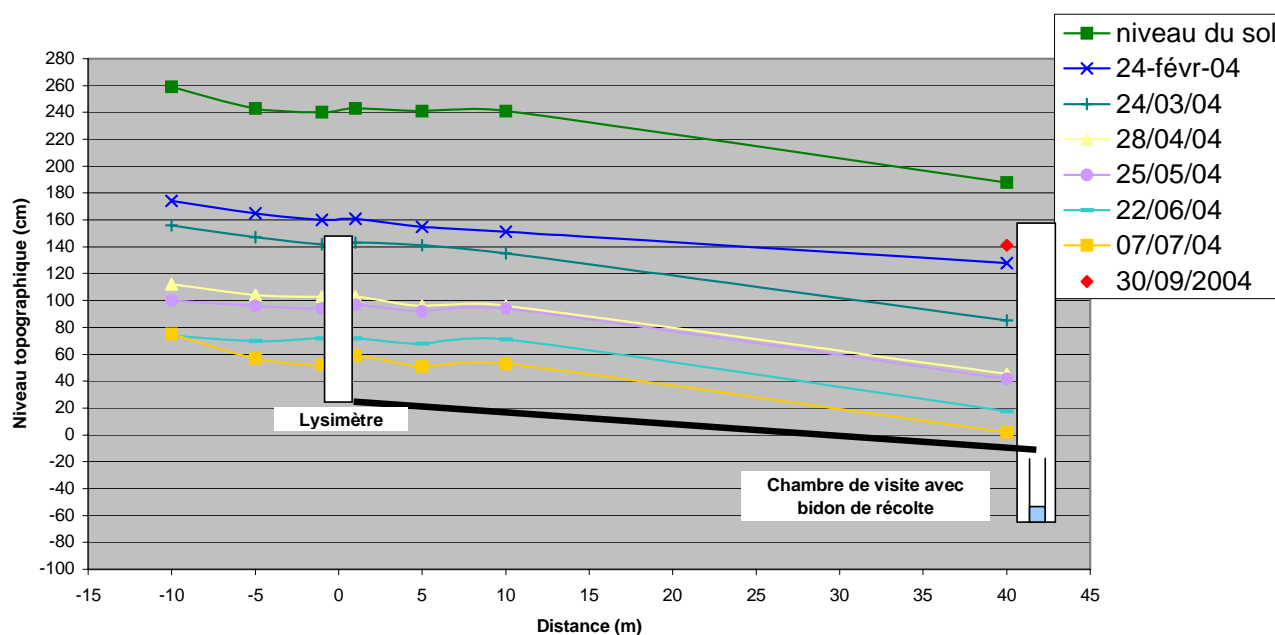
4.1.1 Relevés piézométriques

Dès le mois de janvier 2004, la quantité d'eau de percolation récoltée à l'exutoire de deux lysimètres est supérieure à la pluviométrie. L'hypothèse d'une remontée de la nappe à la surface durant l'hivernage est émise. Afin de la vérifier et de contrôler le niveau de la nappe dans les environs proches des lysimètres PL1 et PL3, un réseau piézométrique a été installé. Le dispositif adopté comporte un piézomètre à 2, 5 et 10 mètres, selon deux axes perpendiculaires par rapport au centre du lysimètre. Les piézomètres sont relevés jusqu'à la récolte du froment au mois d'août 2004 pour la parcelle PL3 et enlevés au printemps pour permettre le semis de betteraves à la parcelle PL1.

Le graphique suivant présente les résultats des fluctuations de la nappe de la parcelle PL3. Le niveau théorique de la nappe montre clairement qu'au mois de février, elle se situe au-dessus de la limite supérieure du lysimètre installé. La nappe est donc partiellement captée par le lysimètre à cet endroit. Ce phénomène explique les quantités d'eau récoltées supérieures à la pluviométrie mesurée, constituées d'eaux de percolation mais aussi de drainage.

Le constat de cet aléa d'installation sur site montre que les mesures initialement prévues par les lysimètres PL1 et PL3 sont perturbées.

Le graphique 1 ci-après illustre la hauteur de la nappe par rapport au lysimètre.



Graphique 1 : Parcelle PL3, relevé piézométrique mensuel, niveau de la nappe par rapport au lysimètre.

4.1.2 Echantillonnage dans les drains alentours

Suite au fonctionnement hybride entre percolation et drainage des lysimètres installés sur les parcelles PL1 et PL3, à titre comparatif, des analyses de teneur en nitrate dans les eaux évacuées par divers réseaux de drainage de parcelles localisées dans les alentours proches de ce site sont réalisées une fois par mois (tableau 1). Les drains ont été recherchés pour leur proximité aux parcelles PL1 et PL3, mais aussi pour leur position sur de sols de même classe pédologique, présentant les mêmes caractéristiques de comportement.

La figure 13 présentée ci-après localise sur fond topographique, la parcelle PL3 avec le lysimètre (L) et les six exutoires de drains où sont prélevées les eaux.

D'autres exutoires ont été recherchés : soit, ils ne débitaient pas lors des passages pour prélèvements et analyses ; soit, ils n'étaient pas dégagés et étaient inaccessibles. Nous nous sommes dès lors cantonnés aux drains débitant régulièrement et les plus proches du site lysimétrique de la parcelle PL3, numérotés de 1 à 6 dans le tableau ci-dessous et sur la figure 13.

Tableau 1 : résultats d'analyses menées dans les eaux de drainage

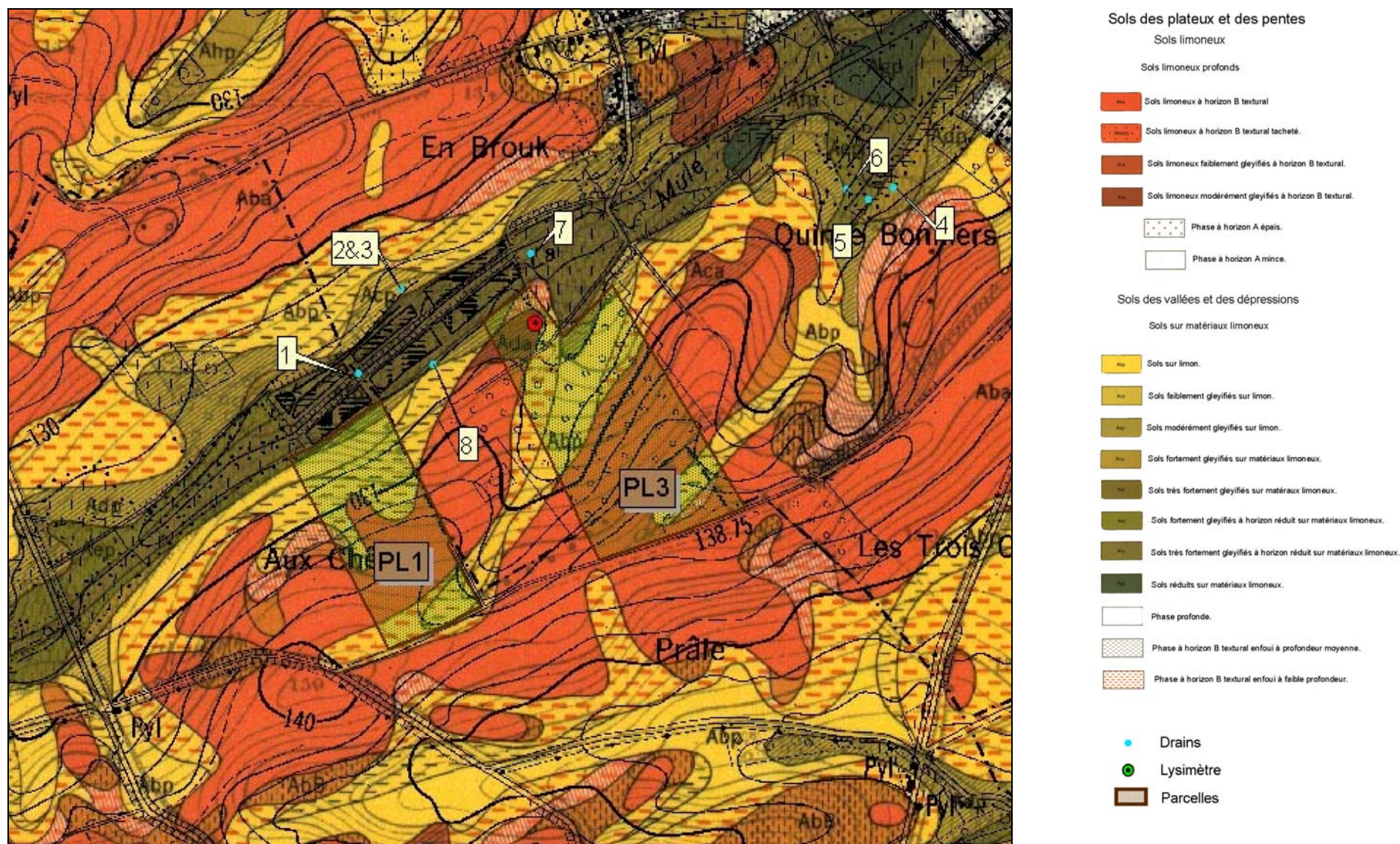
Date	27/01/04			17/02/04			09/03/04		
N° drain	pH	CE μS/cm	NO ₃ ⁻ mg/l	pH	CE μS/cm	NO ₃ ⁻ mg/l	pH	CE μS/cm	NO ₃ ⁻ mg/l
1	7.2	657	25	6.7	631	41	7.1	635	33
2	7.2	558	7	6.9	565	14	7.2	566	10
3	7.1	693	17	7	689	41	7.2	572	10
4	7.2	682	28	7.2	678	46	7.1	690	34
5	7.2	632	27	6.9	630	41	7.1	630	27
6	7.2	582	12	7.2	580	17	7.1	583	13
7(PL3)	7.3	568	3	7,2	540	<5	7,4	540	<5
8(PL1)	7.2	619	25	7.2	624	30	7,2	624	30

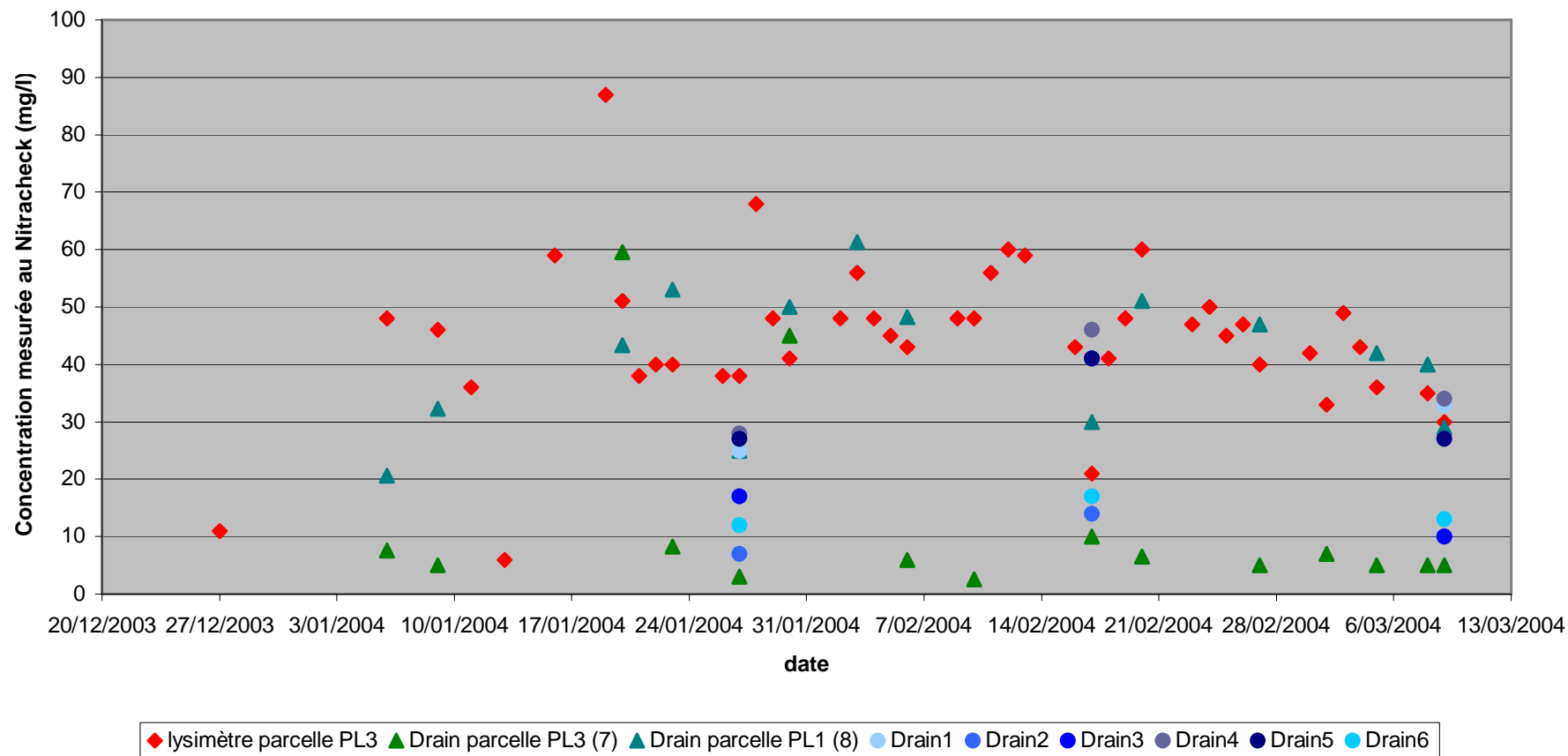
D'une manière globale, par le passage régulier à ces différents endroits, il est constaté que les drains qui débitent depuis longtemps ont des concentrations faibles en nitrate. A l'inverse, les drains qui débitent plus ponctuellement, ou qui ont commencé plus tardivement et présentent des concentrations plus élevées. Ces mesures n'ont pu débuter plus tôt car plusieurs de ces drains ne débitaient pas.

Le graphique 2 présente l'évolution des teneurs en nitrate observées dans le lysimètre de la parcelle PL3, et des drains alentours. Comme les lysimètres PL1 et PL3 percolent sous une dynamique de percolation associée à du drainage, les mesures de concentration en nitrate dans les drains, ont permis la comparaison avec des mesures observées dans le cas d'une dynamique de drainage pure, observations de concentration dans les drains.

Les teneurs en nitrate observées dans les eaux qui percolent dans le lysimètre sont représentées par les points rouges. La teneur moyenne est de l'ordre de 45-50 mg NO₃⁻/l. Les teneurs observées dans les eaux issues du réseau de drainage des parcelles PL1 et PL3 sont représentées graphiquement par les triangles, dans les tons verts. Le drain issu de la parcelle PL1 débite depuis moins longtemps que celui de la PL3, et les valeurs observées y sont plus élevées, avec un maximum à 60 mg NO₃⁻/l. Les teneurs mesurées dans les drains 1 à 6 (localisés par rapport au lysimètre sur le plan ci-après) sont représentés par les ronds dans les tons de bleu. La valeur maximale relevée est de 46 mg NO₃⁻/l, les teneurs sont globalement inférieures à 30 mg NO₃⁻/l.

Figure 13 : Plan topographique avec la localisation des lysimètres des parcelles PL3 et PL1 des exutoires des drains où sont prélevés les échantillons d'eau.





Graphique 2 : Teneur en nitrate dans le lysimètre de la parcelle PL3 et dans les drains des parcelles avoisinantes

4.1.3 Essai fréquence d'échantillonnage

Un essai a été réalisé afin de déterminer l'impact de la fréquence d'échantillonnage sur les résultats.

L'objectif était d'observer une éventuelle évolution des teneurs en ions nitrate dans les bidons de récolte placés dans les chambres de visite au cours du temps.

Ceci afin de valider la fréquence hebdomadaire des relevés, prélèvements et mesures.

La méthodologie mise en œuvre a été dédoubler le bidon de récolte dans la chambre de visite. Le premier bidon récoltant les eaux en provenance du lysimètre et le second servant à y transvaser le surplus et le laisser sur place jour après jour.

Un échantillonnage quotidien, à la même heure, a été effectué pour les deux bidons, soit

Jour 1	lundi	prélèvement de l'eau présente dans le bidon de récolte 1 Le surplus est transvasé dans le bidon 2
Jour 2	mardi	Prélèvement dans le bidon 2 Prélèvement dans le bidon de récolte 1 Le surplus transvasé dans le bidon 2
Jour 3	mercredi	Prélèvement dans le bidon 2 Prélèvement dans le bidon de récolte 1 Le surplus transvasé dans le bidon 2

...

Ce mode opératoire est répété jusqu'au vendredi. La dernière mesure de cet essai est prise le lundi, après le week-end.

La température étant un facteur déterminant dans une dégradation potentielle des ions nitrate avec le temps, cet essai s'est déroulé du 3 au 10 mai 2004. Cette semaine a été retenue car une percolation avait toujours lieu et les températures recommencent à être plus élevées que durant l'hiver.

Les prélèvements ont lieu durant la matinée, immédiatement placés dans un frigo box maintenu à une température de 4°C, les échantillons sont apportés au laboratoire d'analyse au plus tard en début d'après midi. Un accord avait été pris préalablement avec le laboratoire pour que, dans ces conditions, les échantillons soient analysés l'après midi même.

Les échantillons sont analysés par le BEAGx, le laboratoire Epuvaleur et par l'appareil de mesure de terrain (nitratecheck).

Aucun problème n'a été rencontré lors du déroulement de cet essai.

Le tableau 2 de la page suivante synthétise les résultats obtenus.

La mesure observée lors du prélèvement hebdomadaire de la semaine suivant cet essai est mentionnée, pour information.

Tableau 2 : Essai fréquence d'échantillonnage, mesures observées.

Paramètres	Bidons	Lu	Ma	Me	Je	Ve	Lu	Me
		03/05	04/05	05/05	06/05	07/05	10/05	19/05
Teneur NO₃⁻ (mg/l) BEAGx	1	30	28	26	34	32	30	24
	2	-	34	24	34	34	36	-
Epuvaleur	1	37	37	36	34	37	35	22
	2	-	37	36	36	37	38	-
Nitratecheck	1	37	37	37	45	40	41	27
	2	-	35	37	46	41	45	-
pH	1	7.9	8.1	8.0	8.0	8.1	8.0	8.1
	2	-	8.0	8.1	8.0	8.3	8.2	-
CE (µS/cm)	1	997	988	959	446	878	886	652
	2	-	995	898	849	834	746	-
Quantité d'eau récoltée (l)	1	2.8	0.6	0.5	0.3	0.3	0.8	3.3
Précipitations (mm)		0	5	1.5	0	0	27	0
Quantité NO₃⁻ (mg) BEAGx	1	84	17	13	10	10	24	79

La température observée dans la chambre était de 10°C durant toute la semaine.

Une pluviométrie de 9 mm a été observée la semaine précédant l'essai.

Le vendredi 30 avril précédent l'essai, 3.3 litres ont été récoltés dans le bidon. Les 2.8 litres mesurés le lundi 3 mai intègrent l'eau percolée durant le week-end.

La conductivité mesurée le jeudi 6 mai pour l'eau du bidon 1 est inexplicée.

Il n'y a pas de corrélations entre les méthodes de mesure. Il semble que le kit de terrain sur-évalue systématiquement les mesures, ainsi que le laboratoire d'Epuvaleur dans une moindre proportion, par rapport au laboratoire de référence du BEAGx.

Ces résultats montrent que les variations qui peuvent se produire durant une semaine ne sont pas détectables par la méthodologie employée. Les variations de dégradation du nitrate ne sont pas supérieures aux variations induites par le soin de prélèvements et la précision du laboratoire (20%). Les concentrations sont faibles et leurs variations plus difficiles à mesurer.

La teneur en nitrate moyenne dans le bidon 1 du lundi au vendredi (calculée par la quantité totale mesurée –teneur*volume quotidien- et divisée par le volume d'eau total récolté pour la semaine) est de 30 mg NO₃⁻/l. Cette même valeur est mesurée le lundi suivant à l'exutoire du lysimètre. L'eau restée la semaine dans le bidon a une concentration de 36 mg NO₃⁻/l. L'écart mesuré correspond à la précision de 20% annoncée par le laboratoire d'analyse BEAGx.

Suite à cet essai, la fréquence de prélèvement hebdomadaire a été maintenue.

4.2 Caractérisation climatologique

Les lysimètres ont été installés durant le printemps et l'été 2003.

La récolte de percolats pour la première saison de drainage a débuté au mois de septembre 2003 et s'est achevée autour du mois de juillet 2004.

La seconde saison de drainage a repris dès le mois de septembre 2004 et est toujours en cours actuellement (février 2005).

L'IRM renseigne dans son bilan climatologique annuel pour 2003 que le printemps 2003 a commencé par une extrême douceur, avec des températures moyennes quasi constamment supérieures aux valeurs normales¹. Cette douceur remarquable est principalement due aux nombreuses journées largement ensoleillées en mars et avril. Comme l'hiver 2002-2003, le printemps a connu un excès d'ensoleillement par rapport à la normale saisonnière. Le cumul saisonnier des précipitations fut « normal ». Cette quantité de précipitations est cependant tombée en un nombre de jours relativement faible.

L'été 2003 a été particulièrement chaud grâce à des températures moyennes en excès pratiquement durant toute la saison : 8 jours seulement eurent une température journalière en dessous de leur valeur normale. On notera aussi la vague de chaleur remarquable qui a touché le pays au début du mois d'août. Selon les régions, elle commença le 31 juillet ou le 1er août et se termina le 13 de ce mois (dernier jour où l'on dépassa les 25 °C dans la plupart des régions). Durant cette période, on releva durant quatre journées des températures au moins égales à 37 °C dans 22 stations du réseau climatologique et les pics de température furent remarquables. La quantité de pluie a été tout à fait normale en juillet et déficitaire en juin et en août, avec de longues périodes sans précipitations notables. Le nombre de jours avec des précipitations mesurables a de nouveau été inférieur à la normale saisonnière. Les trois mois de l'été ont été très ensoleillés.

L'automne 2003 fut ensoleillé. Grâce aux valeurs excédentaires enregistrées lors des trois mois de la saison, l'excès de la durée d'ensoleillement est " très anormal ". En même temps, un déficit " très anormal " de la fréquence des précipitations a été observé. La quantité d'eau recueillie sur les trois mois fut déficitaire, mais reste " normale ". La température moyenne automnale est en excès par rapport à la normale, mais l'écart reste cependant " normal " pour la saison. La fraîcheur du mois d'octobre a équilibré les températures relativement élevées des mois de septembre et novembre. En octobre, la moyenne mensuelle des températures minimales a atteint une valeur "exceptionnellement" faible. Au cours de l'automne, la transition entre les conditions estivales et hivernales a été très brutale : le 20 septembre, les 30 °C étaient encore dépassés dans différentes régions du pays et, près d'un mois plus tard, le 24 octobre, des précipitations neigeuses tombaient sur une grande partie du territoire.

L'hiver 2003-2004 a offert des températures plus clémentes que la normale. Les précipitations ont été normales quant au nombre de jours de pluie, mais se sont avérées « très anormales » sur les quantités enregistrées.

La seule particularité climatique remarquable de l'année 2003 dans son ensemble fut l'excès de la température moyenne. Sa valeur annuelle est caractérisée de « très anormale ». Le total des

^a anormal = phénomène égalé ou dépassé en moyenne au moins une fois tous les 6 ans,
très anormal = phénomène égalé ou dépassé en moyenne au moins une fois tous les 10 ans,
exceptionnel = phénomène égalé ou dépassé en moyenne au moins une fois tous les 30 ans et
très exceptionnel = phénomène égalé ou dépassé en moyenne au moins une fois tous les 100 ans

précipitations est anormal et les valeurs annuelles de l'ensoleillement et de la fréquence des jours de précipitations sont quant à elles normales.

L'hiver 2003-2004 a été doux et pluvieux. L'excès « très anormal » des précipitations est dû au mois de janvier : les quantités pluviométriques relevées y furent particulièrement abondantes, avec un excès caractérisé de « très exceptionnel ». Au niveau des températures, l'hiver a été marqué par une alternance de périodes chaudes et froides, avec une période particulièrement douce en février.

Le printemps 2004 fut, tout comme l'hiver, relativement doux. En revanche, les précipitations ont été déficitaires et ce déficit saisonnier est caractérisé de « très anormal ».

L'été 2004 fut caractérisé par des excès « très anormaux » de la température et du total des précipitations. L'excès des températures fut particulièrement marqué durant deux périodes, l'une au début du mois de juin et l'autre de la mi-juillet à la mi-août. On n'a cependant plus atteint les valeurs remarquables qui avaient été observées au cours de l'été 2003. En août, un nombre de jours d'orage remarquable fut enregistré dans le pays.

L'automne 2004 fut très « anormalement » doux, et ce malgré que chacun des trois mois de la saison (septembre à novembre) ait été caractérisé de « normal ».

L'hiver 2004-2005

Le dernier mois de l'année 2004 n'a présenté aucune valeur remarquable. C'est le seul mois de l'année où une température moyenne a été inférieure à la normale. Le premier mois de l'année 2005 et deuxième mois de l'hiver météorologique fut caractérisé par un excès très anormal de la durée de l'insolation et par des valeurs normales du total des précipitations, de la température moyenne et de la vitesse moyenne du vent.

En résumé, l'année 2003 a été principalement marquée par des excès remarquables de la durée d'ensoleillement et de la température moyenne. Il faut retenir ensuite le nombre de jours de précipitations mesurables qui fut déficitaire. Le printemps fut très doux et l'été a connu une température record, en liaison avec plusieurs périodes chaudes avec peu ou pas de précipitations. Il en est résulté une humidité moyenne relativement basse au printemps et en été. Plus que les quantités de précipitations - globalement déficitaires, mais encore relativement normales -, ce sont les faibles fréquences de précipitations qui ont provoqué une impression générale de " sécheresse " au cours d'une grande partie de l'année.

L'année 2004 fut une année relativement chaude, comme c'est généralement le cas depuis la fin des années 1980. À l'exception d'un mois de janvier record au niveau des précipitations et d'un mois d'août très orageux, nous n'avons pas connu d'excès climatiques remarquables.

Durant le début de l'année 2004, les précipitations ont retrouvé une fréquence normale mais les quantités sont restées faibles. L'été a retrouvé une plus forte pluviométrie, malheureusement apportée le plus souvent sous forme d'orages.

Il ressort de ces généralités climatologiques, que ces essais ne se sont pas tenus dans des conditions optimales pour des mesures de drainage et de percolation durant la première année. Suite aux températures, à la fréquence et aux quantités de pluie observées, les sols de culture ont été en déficit hydrique par rapport à des conditions normales. La normalité ne revient qu'à l'aube de l'automne 2004.

Le tableau 3 et la figure 14 donnent les données climatologiques de température, précipitation, évapotranspiration et insolation pour la période de percolation des lysimètres (données de la station IRM de Uccle et Ernage, respectivement).

Tableau 3 : données climatologiques de la station IRM de Uccle

	Température (°C)	Précipitations (l/m ²)	Jours de précipitations	Insolation (heures)
<i>Eté 2003</i>				
JUIN 2003	19.3	34.4	8	258
JUILLET 2003	19.5	72.7	13	235
AOÛT 2003	20.4	44.4	8	244
Eté 2003	19.7	151.5	29	737
Caractéristiques	te	a	ta	ta
Normales	16.5	216.1	48	585
<i>Automne 2003</i>				
SEPTEMBRE 2003	15.3	31.0	12	208
OCTOBRE 2003	7.9	64.2	15	127
NOVEMBRE 2003	8.3	65.4	18	63
Automne 2003	10.5	160.6	45	398
Caractéristiques	n	n	n	ta
Normales	10.4	208.	50	325
<i>Hiver 2003-2004</i>				
DECEMBRE 2003	4.5	64.5	17	67
JANVIER 2004	3.2	153.8	24	33
FEVRIER 2004	5.0	48.8	14	56
Hiver 2004	4.2	267.1	55	156
Caractéristiques	a	ta	n	n
Normales	3.1	186.8	55	168
<i>Printemps 2004</i>				
MARS 2004	6.6	25.0	15	137
AVRIL 2004	11.1	37.2	15	143
MAI 2004	12.8	40.8	11	216
Printemps 2004	10.2	103.0	41	496
Caractéristiques	a	ta	n	n
Normales	9.1	168.3	50	477
<i>Eté 2004</i>				
JUIN 2004	16.3	78.4	18	200
JUILLET 2004	17.4	112.4	18	205
AOÛT 2004	18.9	122.7	21	159
Eté 2004	17.5	313.5	57	564
Caractéristiques	ta	ta	n	n
Normales	16.5	216.1	48	585
<i>Automne 2004</i>				
SEPTEMBRE 2004	15.8	82.9	13	173
OCTOBRE 2004	11.7	67.6	15	102
NOVEMBRE 2004	6.4	78.4	17	60
Automne 2004	11.3	228.9	45	335
Caractéristiques	ta	n	n	n
Normales	10.4	208.9	50	325
<i>Hiver 2005-2005</i>				
DECEMBRE 2004	2.9	65.7	17	51
JANVIER 2005	4.7	44.9	22	75
FEVRIER 2005	2.4	80.9	19	70
Hiver 2004-2005	3.3	191.5	58	197
Caractéristiques	n	n	n	a
Normales	3.1	186.8	55	168

n = normal,

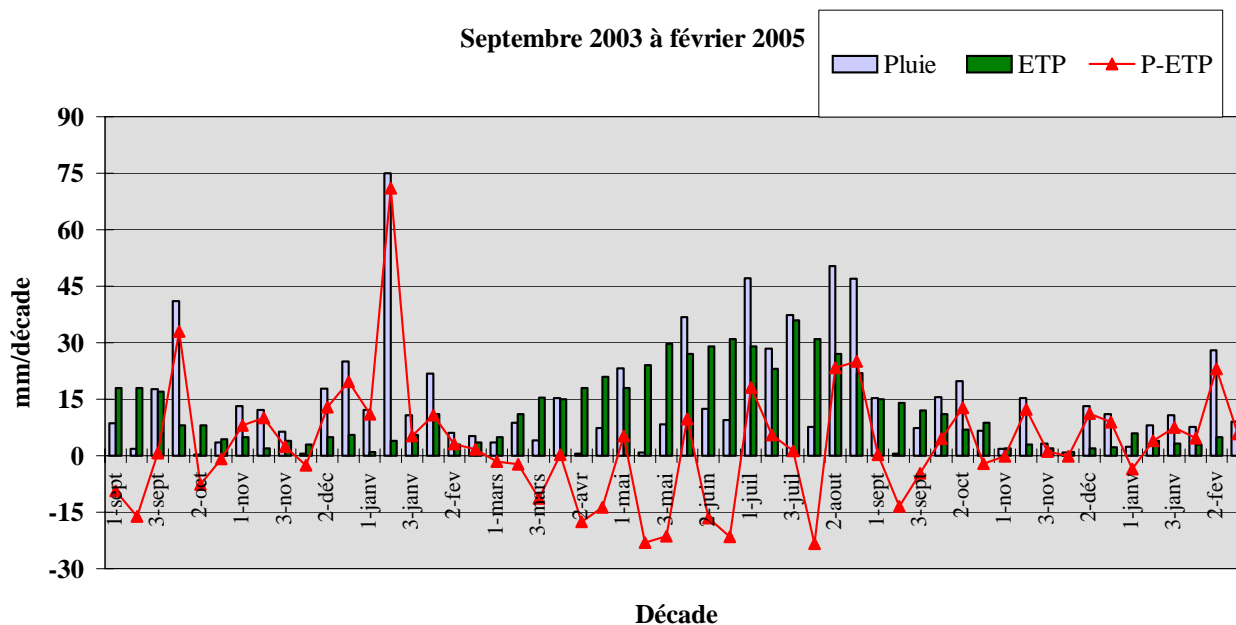
a = anormal, phénomène égalé ou dépassé en moyenne au moins une fois tous les 6 ans

ta = très anormal, phénomène égalé ou dépassé en moyenne au moins une fois tous les 10 ans

e = exceptionnel, phénomène égalé ou dépassé en moyenne au moins une fois tous les 30 ans

te = très exceptionnel, phénomène égalé ou dépassé en moyenne au moins une fois tous les 100 ans

Figure 14: Pluie, Evapotranspiration et déficit hydrique par décade, de septembre 2003 à février 2005 (station IRM de Ernage)



Cette figure montre la situation de déficit hydrique dans laquelle les lysimètres ont été installé et se trouvaient à l'automne 2003. L'hiver 2003-2004 n'a pas permis une humectation suffisante des sols que pour mettre les sols à saturation et permettre la percolation. L'importante pluviométrie de janvier est principalement emportée par ruissellement. Dès le printemps 2004, le déficit hydrique s'installe jusqu'à l'automne. L'hiver 2004-2005 permet modérément la ré humidification des sols.

4.3 Résultats par parcelles

4.3.1 Sole 4

La parcelle est localisée sur la planchette 119E de la carte des sols de Belgique.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 209 848m - y : 150 969m

Le lysimètre est de type remanié, installé en date du 8 août 2003, à la suite d'une culture de céréales. Une culture d'avoine est rapidement semée en couverture hivernale. Une culture de haricot est installée en avril 2004. Un froment d'hiver est semé à l'automne.

Le lysimètre a débité de l'eau de percolation au début du mois de février 2004, la percolation s'est interrompue durant les mois de mai, juin et juillet, pour reprendre dès le mois d'août. Cette seconde période de percolation se poursuit actuellement (mars 2005).

Calendrier cultural

2002 Betterave sucrière

Apports azotés :	organiques :	2,5t / 4 ha de déchet de laine (8.9 kg N/t)
		3 t /9 ha de fumier de poule (23 kg N/t)
		300 t/13,25 ha de fertigeer (1,91kg N/t)
26 mars 2002	minéral	90 Unités d'azote

2003 Froment

Août 2003 : Récolte

Rendements obtenus : 10.2 t/ha

8 août 2003 : Apport azoté N-org 28t/ha de compost de déchets verts (7.2 kg N / ha),

Travail du sol , déchaumage

Octobre 2003 : Semis d'une culture CIPAN (avoine),

2004 Haricots

Travail du sol, sans labour et semis

28 mai 2004 : Apport azoté N-min 58 UN

2 juin 2004 : Semis

10 août 2004 : Récolte

Rendement obtenu : 19.5 T/ha

20 août 2004 : Déchaumage

Travail du sol sans labour

Semis d'un froment d'hiver

2005 Froment

Profil de concentration en azote nitrique du sol en KgN-NO₃/ha (source GRENeRA)

Tableau 4 : parcelle sole 4, profils de concentration an azote nitrique du sol

	Horizons	0 – 30 cm	30 – 60 cm	60 – 90 cm	0 – 90 cm	0-90 cm
	Mois	Kg N-NO ₃ /ha				mg NO ₃ ⁻ /m ²
2002 Betteraves	Décembre	19	15	12	46	20
2003 Froment	8 août	41	16	4	61	27
	13 oct.	8	11	3	22	10
Avoine	6 nov.	14	41	10	65	29
	4 déc.	15	27	11	53	23
2004 haricots	1 oct.	77	37	23	137	61
	4 nov.	63	29	24	116	51
	3 déc.	46	17	37	100	44

Le monde agricole parle en matière de fertilisation azotée parle d'Unités d'azote (UN). 1 UN correspond à 1kg N-NO₃ / ha. Le tableau présente les valeurs pour l'azote nitrique, en kg/ha ou Unités. En matière d'environnement et de potabilité des eaux, les unités employées sont les mg d'ions nitrate par litre. A titre informatif et comparatif, la dernière colonne du tableau fait la conversion d'unités d'azote (kg N-NO₃/ha) en mg NO₃⁻/l, rapporté à la section de 1 m² du lysimètre.

La culture de betteraves en 2002 laisse un profil de sol pauvre en reliquats azotés. Le profil post-récolte du froment en 2003 montre une minéralisation de l'humus dans l'horizon de surface. La Culture Intercalaire Piège à Nitrates (CIPAN) installée ensuite permet une bonne récupération des reliquats azotés. Étonnamment, les profils de novembre et décembre 2003 présentent à nouveau des quantités supérieures au mois d'octobre. Une migration vers le bas du profil se marque entre le mois d'août et de novembre. La culture de haricots en 2004 laisse des reliquats azotés total plus importants. La diminution observée durant les mois d'automne est à mettre en relation avec la migration vers les couches inférieure. Une partie de l'azote nitrique entraîné par l'eau, quitte le profil (0-90 cm) vers les couches plus profondes (Destain JP, 2005. Communication personnelle).

Tableau récapitulatif des moyennes mensuelles

Tableau 5 : parcelle sole 4, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie (mm)	Volumes récoltés (l)	Ions nitrate percolés		Azote nitrique percolé
			(mg NO ₃ -/l)	(mg)	Kg N-NO ₃ /ha
Sept. 2003	31	0	-	-	-
Octobre	64	0	-	-	-
Novembre	65	0	-	-	-
Décembre	65	0	-	-	-

Janv. 2004	154	0	-	-	-
Février	49	35.6	65	2322	5
Mars	25	19.2	47	908	2
Avril	37	5.8	46	269	1
Mai	48	1	75	75	0
Juin	61	0.4	50	20	0
Juillet	132	0	-	-	-
Août	147	25	58	1450	3
Septembre	83	20.9	66	1388	3
Octobre	68	4.2	43	182	1
Novembre	78	15.2	60	915	2
Décembre	66	18.8	61	1153	3
Janv. 2005	45	29	49	1434	3
Février	81	69.3	57	3971	9
Total	1299	244.4	58	14088	32

La pluviométrie est donnée par le relevé IRM de la station de Uccle. Après consultation des données des stations IRM de Uccle et Ernage (comparées aux valeurs mesurées dans les pluviomètres placés sur les sites lysimétriques), il est apparu que les valeurs de la station de Uccle comme étant les plus proches des conditions réelles pour la période considérée. Les observations menées par les agriculteurs locaux durant les périodes d'irrigations ont permis de mettre en évidence le « vandalisme » régulier que subissent les pluviomètres placés sur les sites. Les volumes récoltés sont les quantités d'eau récoltées dans le bidon dans la chambre de visite, à l'exutoire du lysimètre. Les concentrations en nitrate sont données par les mesures du laboratoire BEAGx. La moyenne mensuelle est calculée par le passage en flux (quantité mensuelle par le volume récolté mensuel). Les quantités de nitrate sont le cumul mensuel des concentrations analysées par les volumes récoltés. La conversion en unités d'azote nitrique à l'hectare se fait par multiplication du facteur 0.2259 (rapport des poids moléculaires), ensuite multiplication par 10 000 pour passer du m² à l'ha, et division par 1 000 000 pour passer de mg en Kg.

L'observation de ces mesures montre que les volumes récoltés sur ces périodes de drainage correspondent à 20 % de la pluviométrie. La concentration moyenne d'ions nitrate percolé pour l'ensemble de la période est de 58 mg/l (quantité totale percolée par le volume total récolté), ce qui est supérieur à la norme de référence (50 mg NO₃⁻/l). Les quantités d'azote nitrique percolées, non récupérables par les cultures en surface, en phase de migration vers les réserves de profondeur ne sont pas trop importantes, mais restent non négligeables.

L'observation dans le temps de la teneur en nitrate qui percole à 2 m de profondeur est relativement constante. Aucun pic de concentration n'a été observé à la reprise de la seconde période de percolation, à l'automne 2004. Les profils en reliquats azotés montrent que la culture de haricots laisse des résidus azotés élevés. La fraction de l'horizon de surface sera partiellement récupérée par la culture de froment installée ensuite. Une migration et un enrichissement du profil en profondeur sont mis en évidence mais n'ont pas encore d'impact significatif à 2 m de profondeur en février 2005. Le reliquats azotés (mesures APL) varient avec une amplitude équivalente (variation de 30 %).

4.3.2 Grosse Pierre Chemin de fer

La parcelle est localisée sur la planchette 120W de la carte des sols de Belgique.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 217 654m y : 152 254m

Le lysimètre de type remanié a été installé le 4 juillet 2003, durant l'inter culture d'une succession de fèves des marais et choux frisés. Le sol est resté en sol nu durant l'hiver et a été semé ensuite des cultures d'épinards suivis de haricots. Un engrais vert a été enfouit fin de l'année 2004. Aucune eau de percolation n'a été récoltée durant l'hiver 2004 qui a suivi l'installation. Les premières eaux de percolation ont été récoltées, mi-septembre 2004 et se poursuivent actuellement (mars 2005).

Calendrier cultural

2002 Betteraves sucrières

Apport azoté N-organique 45t/ha de fumier de bovin
N-minéral 140U N

Labour en novembre

2003 fèves des marais / choux frisés

22 mars 2003 : Apport azoté N-min 65 UN

26 mars 2003 : Semis des fèves des marais

30 juin 2003 : Récolte des fèves

Rendement obtenu : 8,445 t/ha

8 juillet 2003 : labour/hersage

19 juillet 2003 Apport azoté N-min 105 UN

23 juillet 2003 : Semis des choux frisés

26 août 2003 : Apport azoté N-min 50 UN

10 novembre 2003 : Récolte des choux frisés

Rendements obtenus : 30,443 t/ha

Culture CIPAN de moutarde

10 novembre 2003 : labour d'hiver

2004 épinards / haricots

19 mars 2004 : Apport azoté N-min 80 UN

30 mars 2003 : Semis d'épinards

25 mai 2004 : Récolte d'épinards

Rendement obtenu : 16,7 t/ha

13 mai 2004 : Apport azoté N-min 80 UN

28 mai 2004 : déchaumage

5 juin 2004 : Hersage (rotative)

8 juin 2004 : Semis de haricots

11 août 2004 : Récolte

Rendements obtenus : 12 872 kg/ha

14 septembre 2004 / Semis d'une culture CIPAN de moutarde,

10 décembre 2004 : enfouissement / Labour d'hiver

2005 Chicorée

Profil de concentration en azote nitrique du sol en KgN-NO3/ha (source GRENeRA)

Tableau 6 : parcelle chemin de fer, profil de concentration en azote nitrique du sol.

	Horizons	0 – 30 cm	30 – 60 cm	60 – 90 cm	0 – 90 cm	0-90 cm
	Mois	Kg N-NO3/ha				mg NO ³ /m ²
2002 betterave	12 nov.	12	8	6	26	12
	4 déc.	12	12	7	31	14
2003 Fève/chx	18 mars	25	21	17	63	28
	18 juillet	60	28	14	102	45
	5 nov.	21	32	14	67	30
	3 déc.	32	50	28	110	49
2004 épinards haricot	2 oct.	71	36	32	139	62
	4 nov.	34	25	26	85	38
	3 déc.	59	15	19	93	41

La culture de betterave en 2002 laisse, sans surprise, un sol bien nettoyé pour ce qui est des résidus azotés. L'horizon de surface en post-récolte des fèves des marais en 2003 témoigne d'une minéralisation de surface, normale pour la saison. La culture de choux frisés a bien exploité les apports azotés, malgré un enrichissement de l'horizon intermédiaire, reflet d'une migration vers le bas du profil. La température du sol élevée à l'automne 2003 peut expliquer une re-minéralisation suite au labour, mais ne justifie pas une remontée de 50 Kg N-NO3/ha entre les mois de novembre et décembre.

L'automne 2004 indique un reliquat azoté important, témoin de la rotation épinards/haricots, et ce malgré une culture CIPAN de moutarde. L'effet de la culture CIPAN se marque entre les mois d'octobre et novembre, mais ne suffit pas ramener le profil à des valeurs en reliquats azotés acceptables et durables pour l'environnement (Destain JP, 2005. Communication personnelle). La capacité d'une culture dérobée à jouer le rôle de piège à nitrate dépend fortement de ses possibilités à se développer sous des températures froides (Giraud cité par Muller, 1996).

Tableau récapitulatif des moyennes mensuelles

Tableau 7 : parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie (mm)	Volumes récoltés (l)	Ions nitrate percolés		Azote nitrique percolé
			(mg NO3-/l)	(mg)	Kg N-NO3/ha
Sept. 2003	31	0	-	-	-
Octobre	64	0	-	-	-
Novembre	65	0	-	-	-

Décembre	65	0	-	-	-
Janv. 2004	154	0	-	-	-
Février	49	0	-	-	-
Mars	25	0	-	-	-
Avril	37	0	-	-	-
Mai	48	0	-	-	-
Juin	61	0	-	-	-
Juillet	132	0	-	-	-
Août	147	0	-	-	-
Septembre	83	2.9	76	217	1
Octobre	68	6.2	48	297	1
Novembre	78	18.1	54	599	1
Décembre	66	12.6	68	862	2
Janv. 2005	45	24,8	55	1366	3
Février	81	66.6	77	5109	12
Total	1299	131.2	64	8451	19

L'observation de ces mesures montre que les volumes récoltés sur la seconde période de drainage correspondent à 30 % de la pluviométrie de cette période. La concentration moyenne d'ions nitrate percolés pour l'ensemble de la période est de 64 mg/l (quantité totale percolée par le volume total récolté), ce qui est supérieur à la norme de référence (50 mg NO₃⁻/l). Les quantités d'azote nitrique percolées, non récupérables par les cultures en surface, en phase de migration vers les réserves de profondeur sont non négligeables et du même ordre de grandeur que les reliquats azotés (mesures APL).

4.3.3 PL1

Localisation

La parcelle est localisée sur la planchette 119E de la carte des sols de Belgique.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 208 491 m y : 153 490 m

Ce système a été le premier lysimètre installé. Les conditions étaient très humides, la fosse creusée pour l'installation coupait la nappe temporaire de surface et était inondée. Plusieurs drains, avec un bon débit, ont été sectionnés (et réparés) lors du creusement de la tranchée qui relie le lysimètre à la chambre de visite. Le fond de la chambre de visite était également inondé suite à la pression de la nappe et la porosité du béton posé dans le fond. Différents types de produits ont été utilisés pour finalement arriver à une étanchéité satisfaisante. Une ré-hausse a été ajoutée afin d'éviter les infiltrations d'eau par le couvercle.

Une culture de betterave a été implantée immédiatement en avril 2003. La parcelle a été semée d'une céréale dès l'automne 2003 et récoltée à l'été 2004.

Des percolats ont été récoltés dans le courant du mois de juin 2003 pour se tarir du mois d'août jusqu'au mois de janvier 2004. La percolation a eu lieu du mois de janvier 2004 au mois de mai 2004. Le bilan hydrologique a rapidement déterminé que le système percolait de l'eau en quantité nettement supérieure à la pluviométrie. Une remontée de nappe étant suspectée, un réseau de piézomètre a été installé (cfr § 4.1.1.). Le bord supérieur du lysimètre se situe effectivement sous le niveau de la nappe et/ou de sa frange capillaire durant l'hivernage. Le lysimètre se comporte à ces moments comme un drain. Afin d'obtenir des mesures reflétant au mieux la quantité réelle d'ions nitrate qui migrent sous les 2 m de profondeur, il a été décidé de fermer à l'aide d'une vanne l'exutoire du lysimètre. Des piézomètres permettent de suivre le niveau de la nappe. L'exutoire sera ré-ouvert lorsque la frange capillaire redescendra en dessous de 50 cm de profondeur, profondeur du bord supérieur du lysimètre.

Calendrier cultural

2001 Fèves des marais / épinards

2002 Froment

12 avril 2002 Apport azoté N min 60 Unités d'azote sur froment

4 mai 2002 80 Unités d'azote

2003 Betteraves

Apport azoté , N org : 2,5 t/ha de déchets de laine (8,9 kg d'N/t)

avril 2003 Semis

25 octobre 2003 Arrachage

2004 Froment

Travail du sol, sans labour et semis

28 octobre 2003 Semis

19 mars 2004 Apport azoté, N-Min 48UN

16 avril 2004 58 UN

18 mai 2004 87 UN

6-août 2004 Récolte (10700 Kg/ha)

13 septembre 2004 Semis d'avoine (culture CIPAN)

Pas d'apport de MO

2005 Haricots

Profil de concentration en azote nitrique du sol (source GRENeRA)

Tableau 8 : parcelle PL1, profil de concentration en azote nitrique du sol.

	Horizons	0 – 30 cm	30 – 60 cm	60 – 90 cm	0 – 90 cm	0-90 cm
	Mois	Kg N-NO3/ha				mg NO ₃ ⁻ /m ²
2002 Froment	Août	25	22	6	53	23
	Octobre	19	27	8	54	24
	Novembre	14	7	6	22	10
	Décembre	11	6	5	22	10
2003 Betterave	Mars	27	17	9	53	23
	5 nov	10	7	2	19	8
	4 déc.	14	13	5	32	14
2004 Froment	1 oct	26	22	7	55	24
	4 nov.	21	10	7	38	17
	3 déc.	2	10	6	18	8

Ce tableau montre que dans le cas d'une rotation céréales/betteraves en association avec des cultures CIPAN, les reliquats azotés laissés dans le sol sont très faibles, particulièrement dans le fond du profil (horizon 60-90 cm).

Tableau récapitulatif des moyennes mensuelles

Tableau 9 : parcelle PL1, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie (mm)	Volumes récoltés (litres)	Ions nitrate percolés		Azote nitrique percolé
			En concentration (mg NO ₃ -l)	En quantité (mg)	Kg N-NO ₃ /ha
Sept. 2003	31	0.1	29	3	0
Octobre	64	0.1	-	-	0
Novembre	65	0.3	27	7	0
Décembre	65	1	-	-	0
Janv. 2004	154	126.1	44	5375	3
Février	49	133.2	46	6293	4
Mars	25	155	35	5124	3
Avril	37	89.1	27	2412	2
Mai	48	17.6	19	353	0
Juin	61	0.4	11	5	0
Juillet	132	1	18	17	0
Août	147	0.1	-	-	-

Septembre	83	207.3	25	4574	3
Octobre	68	386.5	3	1031	1
Novembre	78	-	-	-	-
Décembre	66	-	-	-	-
Janv. 2005	45	-	-	-	-
Février	81	-	-	-	-
Total	1299	1116.6	23	25185	16

La pluviométrie est donnée par le relevé IRM de la station de Uccle. Les volumes récoltés sont les quantités d'eau récoltées dans le bidon dans la chambre de visite, sous l'exutoire du lysimètre. Les concentrations en nitrate sont données par les mesures du laboratoire BEAGx. La moyenne mensuelle est calculée par le passage en flux (volume récolté à la concentration analysée, rapportée au cumul mensuel). Les quantités de nitrate sont le cumul mensuel des concentrations analysées par les volumes récoltés. La conversion en unités d'azote nitrique à l'hectare se fait par multiplication du facteur 0.2259 (rapport des poids moléculaires), ensuite multiplication par un facteur (2832.95) pour passer du m² à l'ha, et division par 1 000 000 pour passer de mg en Kg. Le facteur de multiplication pour passer de l'échelle du mètre carré à l'hectare tient compte du diamètre de drainage réel du lysimètre, posé par hypothèse à 3.3 m² (cfr rapport intermédiaire, troisième période ; l'hypothèse de travail a été posée que la superficie sous l'influence de l'effet drainant réalisé par le lysimètre est supérieure à sa section de 1 m²).

La concentration moyenne observée pour l'ensemble de la période, calculée par la quantité totale de nitrate sur le volume total récolté est de 23 mg NO₃⁻/l. Ce chiffre donne une approximation globale, l'eau qui a percolé à cette profondeur a été prise dans une dynamique de percolation mais aussi de drainage. Il est du même ordre de grandeur que le reliquat azoté (mesure APL).

4.3.4 **PL3**

La parcelle est localisée sur la planchette 119E de la carte des sols de Belgique.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 208 847m y : 153 728m

Le lysimètre est de type non remanié, installé en date du 8 août 2003, à la suite d'une récolte de céréales. Une culture CIPAN (phacélie) a été rapidement semée. Début avril 2004, une culture de betteraves a été implantée.

Des percolats sont récoltés depuis le milieu du mois de décembre 2003, avec une diminution de quantité mais sans interruption durant les mois de l'été 2004.

Le même phénomène de quantité d'eau de percolation supérieure à la pluviométrie a été observé, tel qu'au lysimètre de la parcelle PL1. Un réseau de piézomètre a également permis de confirmer une remontée hivernale de la nappe en surface. Une vanne ferme l'exutoire du lysimètre tant que le niveau de la nappe est supérieur au niveau d'enfoncement du lysimètre (-50 cm).

Calendrier cultural

2001 Froment

2002 Fèves des marais / cerfeuil

25 avril 2002 Apport azoté : 52 Unités d'azote sur les fèves

2003 Froment

août 2003 Récolte

Rendement obtenu : 96 qx (9,6 T/ha)

21 août 2003 Apport azoté, N-org : fumier bovin pailleux (20T/ha à 2.03kg N/t)

Travail du sol déchaumage, sans labour

octobre 2003 Semis d'une culture CIPAN (phacélie)

Travail du sol, sans labour

2004 Betterave sucrière

2 avril 2004 Semis

17 mars 2004 Apport azoté, N-Min, 78 UN

16 septembre 2004 Récolte (77 T/ha)

14 octobre 2004 Semis direct de froment

2005 Froment

Profil de concentration en azote nitrique du sol en KgN-NO₃/ha (source GRENeRA)

Tableau 10 : parcelle PL3, profil de concentration en azote nitrique du sol.

	Horizons	0 – 30 cm	30 – 60 cm	60 – 90 cm	0 – 90 cm	0-90 cm
	Mois	Kg N-NO ₃ /ha				mg NO ₃ ⁻ /m ²
2002 Fèves cerfeuil	Novembre	16	13	10	39	17
	Décembre	7	9	8	24	11
2003 Froment	8 août	60	22	22	104	46
	13 oct.	26	52	19	97	43
	5 nov	33	19	27	79	35
	4 déc.	18	6	13	37	16
2004 Betteraves	15 mars	27	24	23	74	33
	10 oct.	8	4	7	19	8
	1 nov.	15	16	6	37	16
	1 déc.	9	9	9	27	12

Les cultures légumières de 2002 n'ont pas laissé de reliquats azotés dans le sol importants. Par contre et étonnamment pour une céréale, le froment cultivé en 2003 laisse un reliquat post-récolte surprenant. L'hypothèse est une mauvaise assimilation des apports azotés sous l'effet de la canicule de l'été 2003. La culture Intercalaire piège à nitrate (CIPAN) permet de nettoyer partiellement le profil, des diminutions progressives sont observées dans tous les horizons. La culture de betteraves en 2004 a bien utilisé ses apports azotés et laisse un profil de sol propre, faiblement chargé de résidus azotés.

Tableau récapitulatif des moyennes mensuelles

Tableau 11 : parcelle PL3, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie (mm)	Volumes récoltés (l)	Ions nitrate percolés		Azote nitrique percolé
			En concentration (mg NO ₃ -/l)	En quantité (mg)	En Kg N- NO ₃ /ha
Sept. 2003	31	0		-	
Octobre	64	0		-	-
Novembre	65	0		-	-
Décembre	65	13.8	12	166	0
Janv. 2004	154	484.1	38	18406	12
Février	49	411.6	36	14695	9
Mars	25	357.4	29	10279	7
Avril	37	56	25	1420	1
Mai	48	8.3	14	117	0

Juin	61	2.6	14	36	0
Juillet	132	1.4	17	23	0
Août	147	3.5	9	32	0
Septembre	83	4.1	12	56	0
Octobre	68	4.1	31	125	0
Novembre	78	15.3	63	962	1
Décembre	66	7.9	30	236	0
Janv. 2005	45	80.5	18	1476	1
Février	81	-	-	-	-
Total	1299	1450.3	33	48026	31

La concentration moyenne observée pour l'ensemble des deux périodes, calculée par la quantité totale de nitrate sur le volume total récolté est de 33 mg NO₃⁻/l. Ce chiffre donne une approximation globale puisque l'eau percole à cette profondeur partiellement sous une dynamique de percolation associée à du drainage. Il est légèrement inférieur au reliquat moyen mesuré (APL) sur cette période.

Aucun volume n'est récolté, l'exutoire est fermé, tant que la nappe est au-dessus du niveau d'enfoncement du lysimètre, pour la seconde saison de percolation à l'automne 2004. La diminution des teneurs en nitrate observées au cours du temps témoigne du lessivage du profil, tout en restant sous le seuil de la norme de potabilité. Une remontée de ces valeurs s'observe dès le mois d'octobre 2004. Les profils en reliquats azotés à l'automne sont faibles et montrent qu'une couverture hivernale, suivie de la rotation betteraves / céréales sont respectueuses de l'environnement.

Muller (1996) rapporte que des essais en France menés sur une rotation betterave-blé dans les années 1980 et 1990 avaient observés des concentrations moyennes de nitrate de 129 et 106 mg NO₃⁻/l. Ces mesures témoignent des changements effectifs dans la gestion de l'azote.

4.3.5 Gros Thier Bovenistier

La parcelle est localisée sur la planchette 120W de la carte des sols de Belgique.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 216 558m y : 151 785m

Le lysimètre de type non remanié a été le dernier installé, le 14 août 2003. Une culture de lin a rapidement été mise en place. Elle a été suivie d'une culture CIPAN (moutarde) et d'un labour d'hiver. La succession culturale de 2004 a été fèves des marais et choux frisés. Ces derniers seront récoltés à la fin du mois. Aucune eau de percolation n'a été récoltée jusqu'au mois de novembre 2004. Une remise à saturation par remontée capillaire a été réalisée. 200 litres d'eau claire ont été apportés par l'exutoire. Des eaux de percolation ont été récoltées dès la semaine suivante. Les échantillons sont analysés depuis janvier 2005. La percolation se poursuit actuellement (mars 2005).

Calendrier cultural

2001 **Froment**

2002 **épinards d'hiver / haricot**

Apports azotés	N-min :	72 UN
		72 UN
		72 UN

2003 **lin**

19 mars 2003 Semis du lin

début juillet 2003 Arrachage

Rendement estimatif de 6600 kg/ha

1 septembre 2003 Apport azoté , N-org Compost 40t/ha, 260 UN

septembre 2003 Culture CIPAN (moutarde)

28 novembre 2003 Labour d'hiver

2004 **fèves des marais**

14 avril 2004 Apport azoté ,N-min 30 UN

5 avril 2004 Semis

7 juillet 2004 Récolte

Rendement obtenu : 9.1 t/ha

2004 **Choux frisés**

28 juillet 2004 Apport azoté N-min 60 UN

début août 2004 Semis

8 septembre 2004 Apport azoté , N-min 80 UN

fin octobre 2004 Récolte

2005 **Fèves des marais**

Profil de concentration en azote nitrique du sol en KgN-NO₃/ha (source GRENeRA)

Tableau 12 : parcelle Gros Thier Bovenistier, concentration en azote nitrique du sol.

	Horizons	0 – 30 cm	30 – 60 cm	60 – 90 cm	0 – 90 cm	0-90 cm
	Mois	Kg N-NO ₃ /ha				mg NO ₃ ⁻ /m ²
2002 épinard haricot	10 oct.	59	21	12	92	41
	12 nov.	18	15	12	45	20
	4 déc.	25	20	15	60	27
2003 lin	10 oct.	38	57	32	127	56
	5 nov.	15	21	22	58	26
	3 déc.	13	22	14	49	22
2004 Fève/chx	3 déc.	25	32	29	86	38

La succession culture épinards/haricots de 2002 laisse des reliquats azotés dans le sol relativement faibles, compte tenu des cultures semées. Le lin cultivé en 2003 est suivi fort heureusement d'une culture CIPAN, qui diminue notablement les quantités d'azote dans le profil. La rotation suivant de fèves des marais et choux frisés gère relativement bien l'azote, à moins que la réduction du reliquat azoté soit du à des pertes par lessivage (Destain JP, 2005. Communication personnelle).

Tableau récapitulatif des moyennes mensuelles

Tableau 13 : parcelle Gros Thier Bovenistier, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie (mm)	Volumes récoltés (l)	Ions nitrate percolés		Azote nitrique percolé
			(mg NO ₃ -/l)	(mg)	Kg N-NO ₃ /ha
Sept. 2003	31	0	-	-	-
Octobre	64	0	-	-	-
Novembre	65	0	-	-	-
Décembre	65	0	-	-	-
Janv. 2004	154	0	-	-	-
Février	49	0	-	-	-
Mars	25	0	-	-	-
Avril	37	0	-	-	-
Mai	48	0	-	-	-
Juin	61	0	-	-	-
Juillet	132	0	-	-	-
Août	147	0	-	-	-

Septembre	83	0	-	-	-
Octobre	68				
Novembre	78				
Décembre	66	5,9	44	260	1
Janv. 2005	45	24,0	53	1283	3
Février	81	57.3	83	4739	11
Total	1299	87.2	72	6282	14

Au mois de novembre 2004, aucune eau de percolation n'avait encore été récoltée depuis l'installation de ce lysimètre. Afin d'amorcer la percolation, une mise à saturation par remontée capillaire a été réalisée. Un réservoir posé sur le bord de la chambre de visite a injecté de l'eau par l'exutoire. L'eau remonte dans le lysimètre par le bas, progressivement, par étapes lentes et successives, par remontée capillaire et sur base du principe des vases communicants. 200 litres d'eau ont été injectés de la sorte. Le lysimètre est entré en phase de percolation depuis le mois de décembre. La récolte des eaux de percolation se poursuit actuellement (mars 2005). L'observation de ces mesures montre que les volumes récoltés sur cette période de drainage correspondent à 20 % de la pluviométrie de cette période. La concentration moyenne d'ions nitrate percolé pour l'ensemble de la période est de 72 mg/l (quantité totale percolée par le volume total récolté), ce qui est supérieur à la norme de référence (50 mg NO₃⁻/l). Les quantités d'azote nitrique percolées, non récupérables par les cultures en surface, en phase de migration vers les réserves de profondeur sont non négligeables. Les valeurs élevées mesurées correspondent sans doute aux valeurs importantes observées dans le profil de sol à l'automne 2003. La concentration en nitrate mesurée dans l'eau de percolation lysimétrique est du même ordre de grandeur que le reliquat azoté mesuré dans le sol (mesures APL) sur la même période.

4.3.6 Grosse Pierre Petit Pont

La parcelle est localisée sur la planchette 120 Wde la carte des sols de Belgique.

Les coordonnées (Lambert Belge) du lysimètre sont : x : 217 394m y : 151 768m

Le lysimètre de type remanié a été installé le 27 mai 2003, durant l'inter culture d'une succession d'épinards et haricots. Le sol est resté en sol nu durant l'hiver 2003-2004 et a été semé ensuite d'une culture de carottes. La terre a été labourée pour l'hiver. Aucune eau de percolation n'a été récoltée durant le premier hiver 2003-2004 suivant l'installation. Les premières eaux de percolation ont été récoltées, mi-septembre 2004. Elles se sont par la suite interrompues. L'hypothèse est un tassement du sol à cet endroit suite aux passages des camions lors de la récolte des carottes. Une mise à saturation par remontée capillaire a également été réalisée au mois de novembre. 500 litres d'eau claire ont été apportés par l'exutoire. Une percolation est observée depuis le mois de décembre et les échantillons sont analysés depuis le mois de janvier 2005. La percolation se poursuit actuellement (mars 2005).

Calendrier cultural

2000 Betteraves sucrières

2001 Chicorées

2002 Froment

15 août 2002

Semis épinard de printemps,

19 septembre 2002

Apport azoté, N-Min NPK 1331 kg/ha

2003 Epinards de printemps / haricots

18 mars 2003

Apport azoté, N-min Azote liquide 99 UN (254 l/ha-39%)

23 avril 2003

Fertiactyl gz 8l/ha

5 mai 2003

Apport azoté, N-min Nitrate d'ammoniaque 107 UN

23 mai 2003

Récolte (8500kg/ha)

2° culture Haricots

9 juillet 2003

Semis des haricots

16 septembre 2003

Récolte des haricots (16 224 kg/ha)

Octobre 2003

Déchaumage

Novembre 2003

Labour d'hiver

2004 Carottes

26 mars 2004

Apport azoté, N-min 65 UN

20 avril 2004

Semis

16 septembre 2004

Récolte (76.1 t/ha)

3 décembre 2004

Labour d'hiver

2005 Pommes de terre

Profil de concentration en azote nitrique du sol en KgN-NO₃/ha (source GRENeRA)

Tableau 14 : parcelle Grosse Pierre Petit Pont, concentration en azote nitrique dans le sol.

	Horizons	0 – 30	30 – 60	60 – 90	0 – 90	0-90
	Mois	cm	cm	cm	cm	cm
		Kg N-NO ₃ /ha				mg NO ₃ ⁻ /m ²
2002 froment	22 août	17	13	5	35	15
	4 oct.	51	28	9	88	39
	12 nov.	18	30	24	72	32
	4 déc.	23	31	31	85	38
2003 épinard haricot	18 mars	20	20	24	64	28
	16 juin	183	59	87	329	146
	10 oct.	82	64	25	171	76
	5 nov.	78	55	23	156	69
	3 déc.	64	79	35	178	79
2004 carottes	15 mars	19	19	71	109	49
	2 oct.	12	7	19	38	17
	4 nov.	25	9	12	46	20
	3 déc.	15	18	10	43	19

La culture de céréales en 2002 laisse un profil de sol normal en reliquats azotés fin août 2002. Les valeurs ensuite montrent une migration vers les horizons inférieurs du profil entre les mois d'octobre et décembre 2002. La culture d'épinard laisse de grandes quantités de reliquat azoté dans le sol. Le conseil de fumure établi après les mesures de reliquat azoté du mois de mars a été de 180 UN, le cultivateur en a épandu 206 UN. L'horizon de surface du profil du mois de juin 2003 témoigne de la minéralisation importante suite à la récolte des épinards et au travail du sol qui a suivi, avec enfouissement des résidus de culture. Les épinards sont une culture exigeante en azote, qui demande un fractionnement rigoureux. La sécheresse sévère de l'été 2003, accentue encore cette mauvaise exploitation des dernières fractions azotées apportées et laisse des reliquats plus importants dans les horizons inférieurs. La culture de haricots qui a suivi, culture fixatrice d'azote, a partiellement exploité cet azote disponible dans le sol et fait baisser la quantité totale dans le profil, sans le récupérer dans les horizons inférieurs. Il est probable que ce soit cette poche de nitrate qui soit actuellement récupérée (février 2005) dans les eaux de percolation du lysimètre, induisant des teneurs en nitrate élevées. L'inter culture laisse le sol nu, sans couverture hivernale. Le profil établi pour le conseil de fumure de la culture de carottes en 2004 montre la migration vers le bas du profil. Le conseil de fumure de 65 UN a été respecté. Le profil post-culture 2004 de carottes montre un profil lessivé, d'une part par les pertes par migration au cours de l'hiver 2003-2004 et d'autre part par exportation lors de la récolte des carottes (Destain JP, 2005. Communication personnelle).

Tableau récapitulatif des moyennes mensuelles

Tableau 15 : parcelle Grosse Pierre Petit Pont, observations mensuelles des volumes et concentration en nitrate.

Mois	Pluviométrie (mm)	Volumes récoltés (l)	Ions nitrate percolés		Azote nitrique percolé
			(mg NO ₃ -/l)	(mg)	Kg N-NO ₃ /ha
Sept. 2003	31	0	-	-	-
Octobre	64	0	-	-	-
Novembre	65	0	-	-	-
Décembre	65	0	-	-	-
Janv. 2004	154	0	-	-	-
Février	49	0	-	-	-
Mars	25	0	-	-	-
Avril	37	0	-	-	-
Mai	48	0	-	-	-
Juin	61	0	-	-	-
Juillet	132	0	-	-	-
Août	147	0	-	-	-
Septembre	83	0	-	-	-
Octobre	68	0,1	-	-	-
Novembre	78	0	-	-	-
Décembre	66	0,5	86	43	0
Janv. 2005	45	0,2	160	32	0
Février	81	42.5	245	10423	24
Total	1299	43.1	244	10498	24

L'observation de ces mesures montre que les volumes récoltés sur cette période de drainage correspondent à 10 % de la pluviométrie de cette période. La concentration moyenne d'ions nitrate percolé pour l'ensemble de la période est de 244 mg/l (quantité totale percolée par le volume total récolté), ce qui est nettement supérieur à la norme de référence (50 mg NO₃⁻/l). Cette valeur est du même ordre de grandeur que le reliquat azoté mesuré au cours de la période de lixiviation précédente.

Les quantités d'azote nitrique percolées, non récupérables par les cultures en surface, en phase de migration vers les réserves de profondeur sont non négligeables. Ce constat devrait être affiné car la période de percolation n'est pas achevée au terme de cette quatrième période de la subvention de recherche.

5 Synthèse graphique, bilans et discussion

5.1 Graphique de synthèses par parcelle

Les pages suivantes présentent un graphique de synthèse par parcelle. Les graphiques reprennent du mois de septembre 2003 à février 2005, les volumes d'eau percolée et récoltée (données cumulées) dans les lysimètres en parallèle avec le drainage potentiel ; les teneurs en nitrates mesurées dans cette eau de percolation ainsi que les mesures de reliquats azotés dans le sol en post-récolte.

Le graphique 3 présente une synthèse des mesures et observations pour la parcelle Sole 4. L'observation de ce graphique montre que la courbe des volumes récoltés suit la courbe de la pluviométrie mensuelle, dont est déduite l'évapotranspiration. Les courbes sont du même type mais sans corrélation directe entre la pluviométrie quotidienne ou hebdomadaire et les volumes récoltés hebdomadairement par percolation à 2 m de profondeur. Le phénomène « pluviométrie/percolation » n'est pas du type « impulsion/réponse » et explique le recours habituel aux modèles mathématiques, qui intègrent des paramètres tels que le ruissellement, l'interception, la redistribution dans le sol, l'état hydrique du sol, l'évaporation, etc. L'observation dans le temps de la teneur en nitrate qui percole à 2 m de profondeur est relativement constante. Aucun pic de concentration n'a été observé à la reprise de la seconde période de percolation, à l'automne 2004. Les profils en reliquats azotés montrent que la culture de haricots laisse des résidus azotés élevés. La fraction de l'horizon de surface sera partiellement récupérée par la culture de froment installée ensuite. Une migration et un enrichissement du profil en profondeur sont mis en évidence.

Le graphique 4 présente une synthèse des mesures et observations pour la parcelle Chemin de fer. La courbe des volumes récoltés montre que la percolation n'a débuté qu'à l'automne 2004, aucune eau de percolation n'a été récoltée durant la première saison de drainage qui a suivi l'installation du lysimètre en 2003. Les concentrations en nitrate mesurées dans les eaux de percolation, sont systématiquement supérieures à la norme de potabilité. Les profils en reliquats azotés montrent que la rotation épinards / haricots laisse des résidus azotés élevés dans le sol. La culture CIPAN de moutarde a un effet bénéfique mais non suffisant pour ramener le profil à des valeurs acceptables d'un point de vue environnemental.

Le graphique 5 présente une synthèse des mesures et observations pour la parcelle PL1. La courbe des volumes récoltés, supérieure à la courbe du drainage potentiel (P-ETP), illustre le dysfonctionnement dans la récolte des eaux de percolation du lysimètre. La remontée temporaire de la nappe au-dessus du niveau d'enfoncement du lysimètre induit la récolte d'eau à l'exutoire du lysimètre sous une dynamique de percolation associée à du drainage.

Aucun volume n'est récolté, l'exutoire est fermé, tant que la nappe est au-dessus du niveau d'enfoncement du lysimètre, pour la seconde saison de percolation en 2004. La diminution des teneurs en nitrate observées au cours du temps témoigne du lessivage du profil, tout en restant sous le seuil de la norme de potabilité. Les profils en reliquats azotés à l'automne montrent que la rotation des cultures de céréales et betteraves sont respectueuses de l'environnement. L'effet de la CIPAN d'avoine se marque par une réduction des reliquats azotés à tous les horizons du profil.

Bouthier (in Muller, 1996) donne cette interprétation en émettant que le maximum de concentration en nitrate atteint pour des faibles valeurs de percolation traduirait des transferts très rapides de nitrates liés aux premiers écoulements cheminant dans la porosité fissurale grossière. Le maximum de concentration correspondrait au stock d'azote minéral présent dans le sol au moment des premiers écoulements ; Il y aurait ensuite « vidange » progressive de l'azote du sol. La baisse plus ou moins rapide pourrait être liée à la minéralisation automnale et hivernale. La concentration minimum comprise entre 20 et 40 mg NO₃-/l signifiant qu'on a lessivé l'ensemble du stock d'azote minéral présent en automne et produit pendant la période de percolation. La ré-augmentation parfois observée en fin de période de percolation, correspondrait à une reprise de minéralisation non interceptée par un couvert.

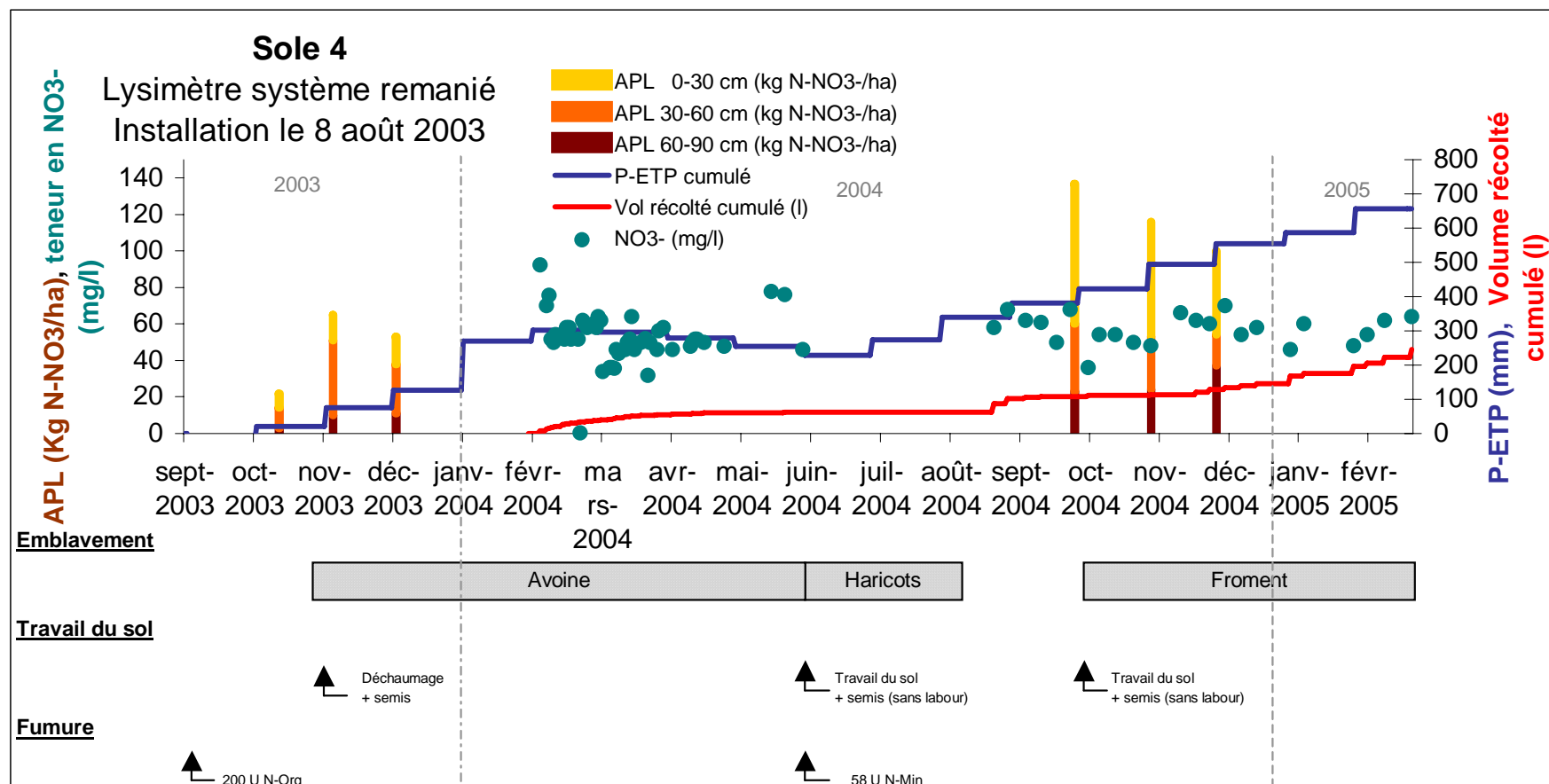
Le graphique 6 présente une synthèse des mesures et observations pour la parcelle PL3. Comme pour la parcelle précédente (PL1), la courbe des volumes récoltés, supérieure à la courbe du drainage potentiel (P-ETP), illustre le dysfonctionnement dans la récolte des eaux de percolation du lysimètre, ce dernier étant soumis à un effet drainant avec la remontée temporaire de la nappe en surface. Aucun volume n'est récolté, l'exutoire est fermé, tant que la nappe est au-dessus du niveau d'enfoncement du lysimètre, pour la seconde saison de percolation à l'automne 2004. La diminution des teneurs en nitrate observées au cours du temps témoigne du lessivage du profil, tout en restant sous le seuil de la norme de potabilité. Une remontée de ces valeurs s'observe dès le mois d'octobre 2004. Les profils en reliquats azotés à l'automne sont faibles et montrent qu'une couverture hivernale, suivie de la rotation betteraves / céréales sont respectueuses de l'environnement.

Guiraud (in Muler, 1996) rapporte que des essais en France sur une première cultures de blé font état d'un bilan azoté avec un CRU (Coefficient Réel d'Utilisation) de 60% et des pertes d'engrais par lixiviation qui sont négligeables l'année de l'apport. Après la récolte, durant la période interculturelle, les pertes atteignent 20 % de la quantité ajoutée, ce qui représente environ 40 kg / ha. La culture intercalaire conduit à une diminution de 60 % de ces pertes.

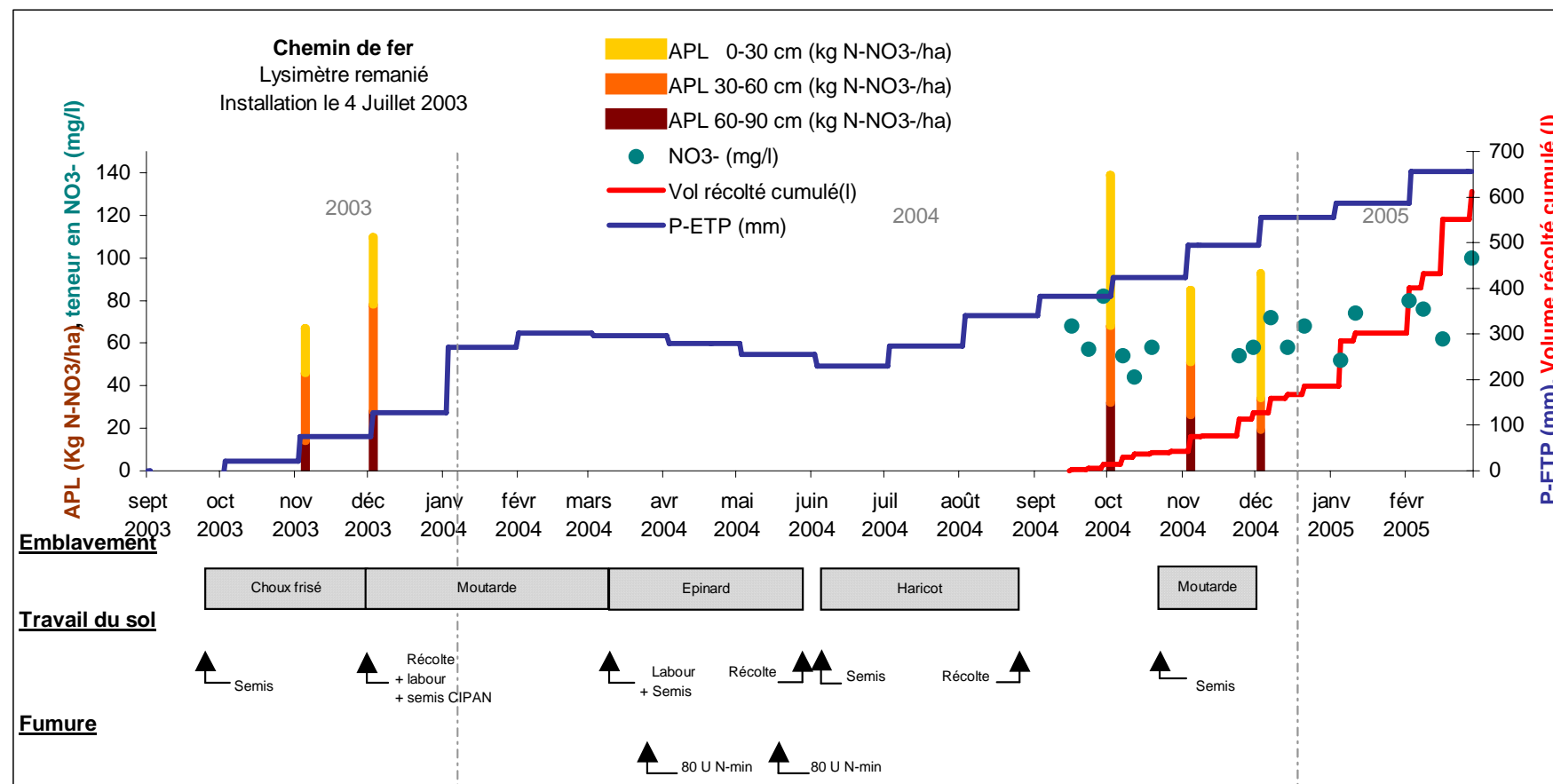
Le graphique 7 présente une synthèse des mesures et observations pour la parcelle Bovenistier. Il montre que ce lysimètre est en début de phase de percolation et présente des valeurs de concentration en nitrate très élevées. Le profil en reliquats azotés à l'hiver est moyennement élevé, avec peu de probabilité d'une récupération future par la culture suivante.

Le graphique 8 présente une synthèse des mesures et observations pour la parcelle Petit Pont. Il montre que ce lysimètre est en début de phase de percolation et présente des valeurs de concentration en nitrate très élevées. Le profil en reliquats azotés à l'automne après la culture de haricot est élevé. Le sol est laissé sans couverture hivernale. Le même profil après la culture de carottes est lessivé soit par migration, soit par exportation de la culture.

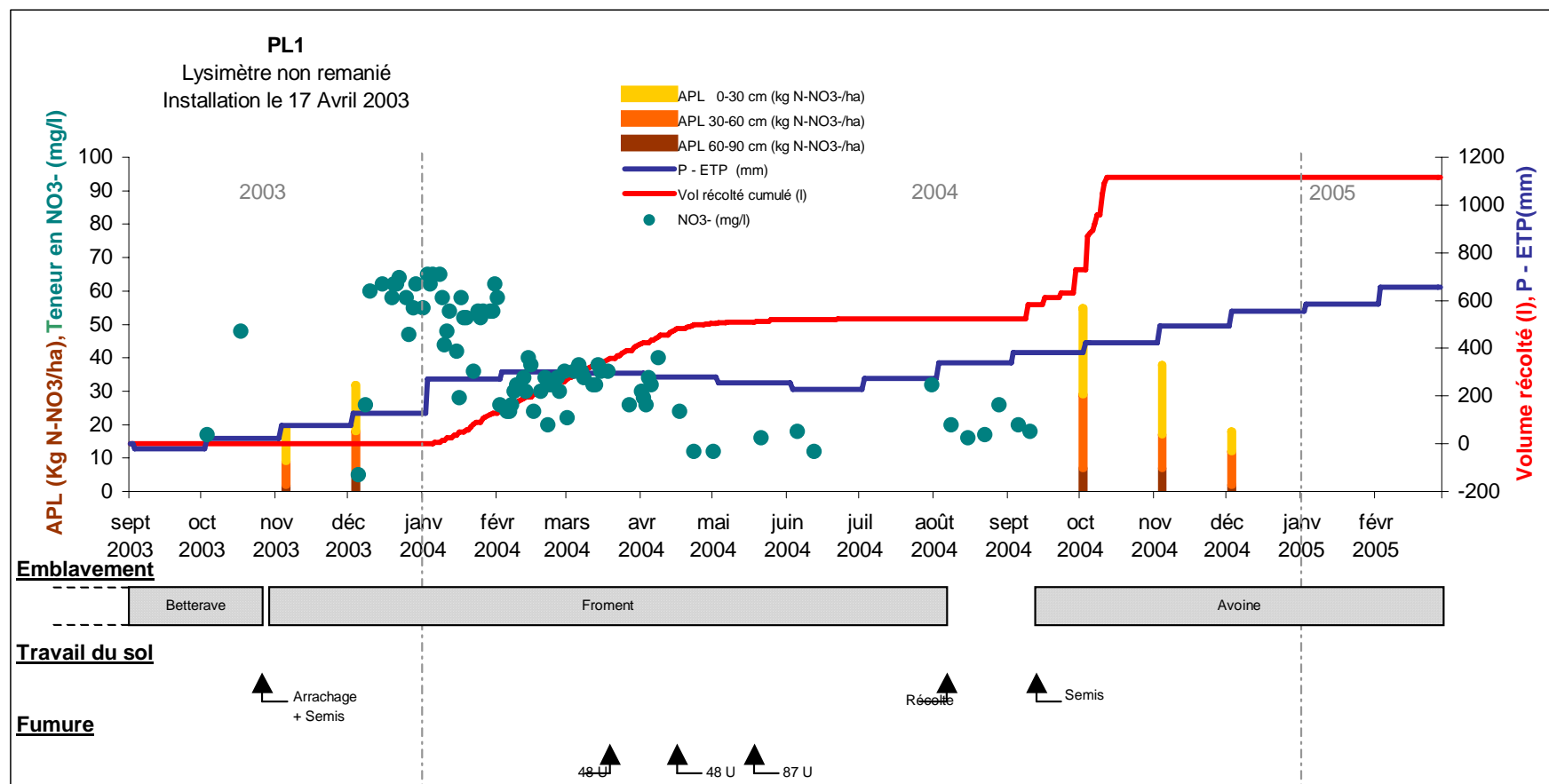
Graphique 3 : Synthèse des mesures et observations, parcelle sole 4.



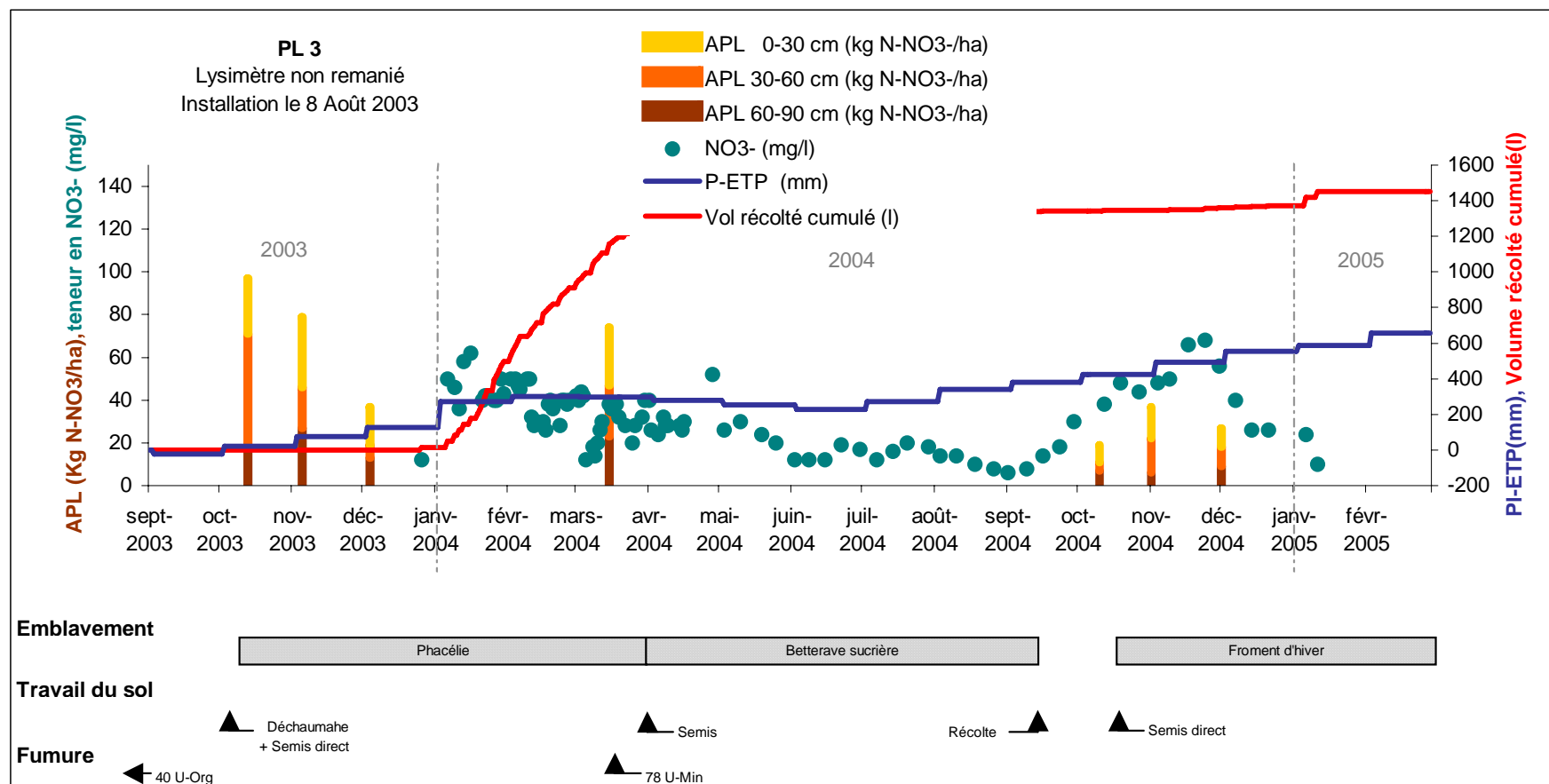
Graphique 4 : Synthèse des mesures et observations, parcelle Chemin de fer



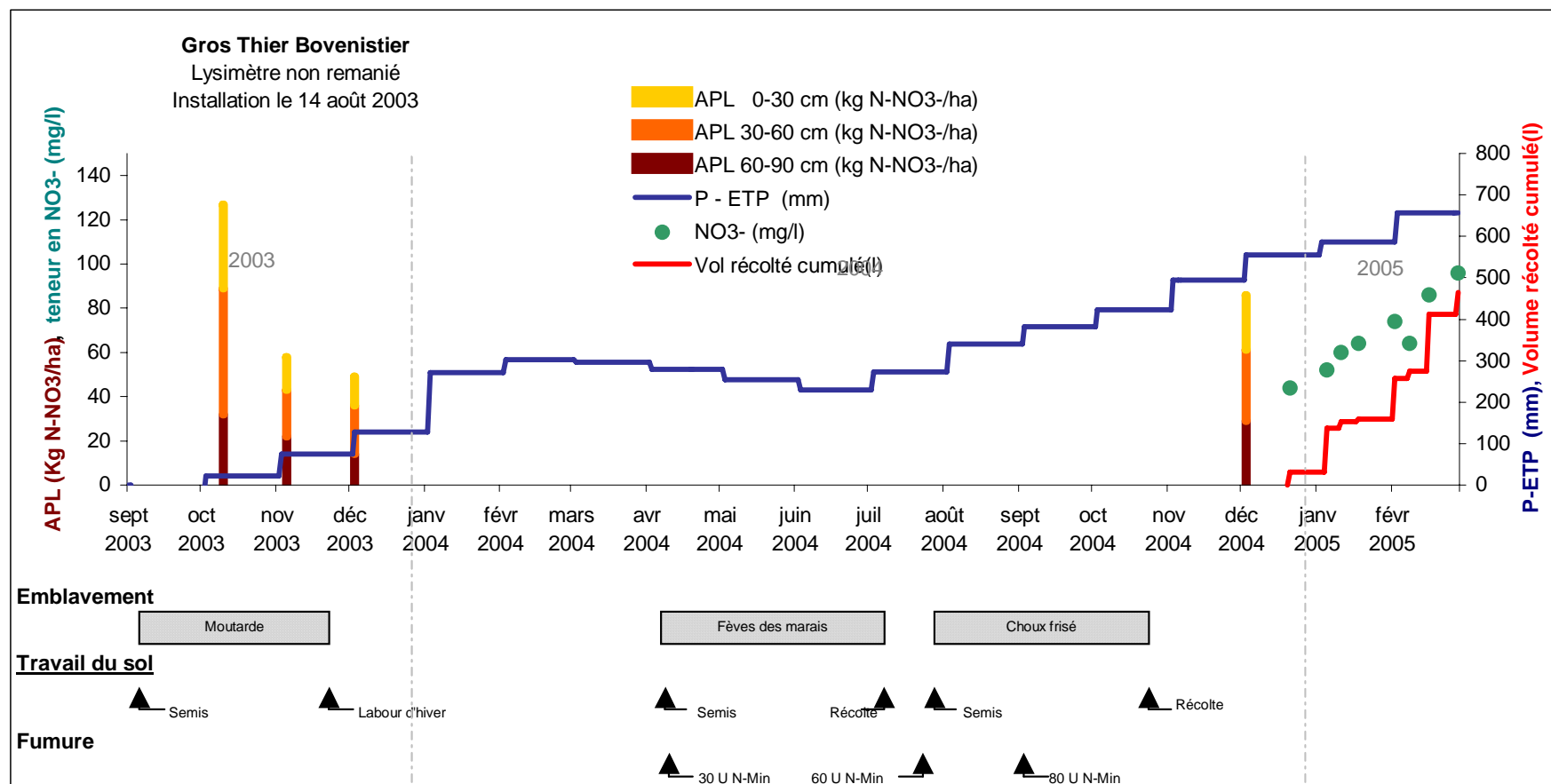
Graphique 5 : Synthèse des mesures et observations, parcelle PL1



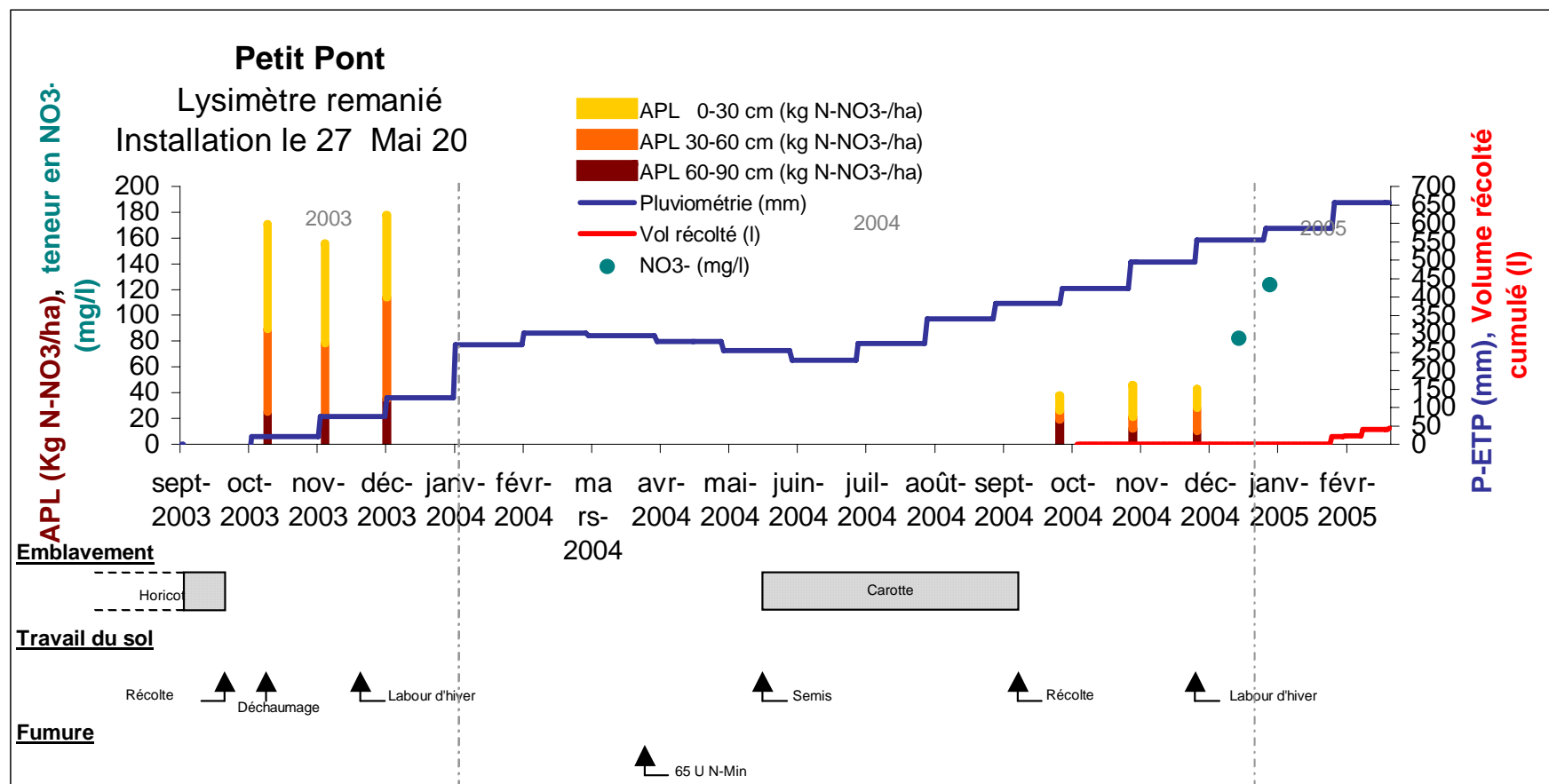
Graphique 6 : Synthèse des mesures et observations, parcelle PL3



Graphique 7 : Synthèse des mesures et observations, parcelle Bovenistier



Graphique 8 : Synthèse des mesures et observations, parcelle Petit Pont



5.2 Bilan Hydrologique

Le tableau 16 est la synthèse des volumes récoltés par parcelle. Le drainage potentiel est donné par la différence entre la pluviométrie (données IRM, Uccle) et l'évapotranspiration (IRM, Ernage). Ce calcul sommaire de drainage ne prend pas en compte les phénomènes tels que le ruissellement, les écoulements hypodermiques, le prélèvement par les cultures, la redistribution dans le sol, etc. La valeur est largement sur évaluée.

Tableau 16 : Pluviométrie, drainage potentiel et volumes récoltés par parcelles

Mois/Année	Pluio métrie (mm)	ETP	D = P-ETP	Volumes récoltés (l)					
				SOLE4	Ch Fer	Pt Pont	Bov.	PL1	PL3
2003									
Septembre	31	53	-22	0	0	0	0	0.1	0
Octobre	64	21	43	0	0	0	0	0.1	0
Novembre	65	11	54	0	0	0	0	0.3	0
Décembre	65	14	51	0	0	0	0	1	13.8
2004						0			
Janvier	154	11	143	0	0	0	0	126.1	484.1
Février	49	18	31	35.6	0	0	0	133.2	411.6
Mars	25	32	-7	19.2	0	0	0	155	357.4
Avril	37	54	-17	5.8	0	0	0	89.1	56
Mai	48	72	-24	1	0	0	0	17.6	8.3
Drainage I	538	286	252	61.6	0	0	0	522.5	1331.2
Juin	61	87	-26	0.4	0	0	0	0.4	2.6
Juillet	132	88	44	0	0	0	0	1	1.4
Août	147	80	67	25	0	0	0	0.1	3.5
Septembre	83	41	38	20.9	2.9	0	0	207.3	4.1
Octobre	68	27	41	4.2	6.2	0.1	0	386.5	4.1
Novembre	78	7	69	15.2	18.1	0	0	-	15.3
Décembre	66	5	59	18.8	12.6	0.5	5,9	-	7.9
2005									
Janvier	45	13	32	29	24,8	0,2	24,0	-	80.5
Février	81	11	70	69.3	66.6	42.5	57.3	-	-
Drainage II	568	184	376	182.4	131.2	43.3	87.2	593.9	115.4
Total 2003-2005	1106	470	628	244	131.2	43.3	87.2	1116.4	1446.6

Les deux saisons de drainage durant lesquelles une percolation est observée vont du mois de septembre 2003 au mois de mai 2004 pour la saison de drainage I, et du mois d'août 2004 au mois de février 2005 pour la saison de drainage II.

Le lysimètre de la parcelle SOLE 4 montre que les volumes récoltés par percolation correspondent à 25% du drainage potentiel pour la première saison de drainage et 50% pour la seconde saison observée.

La parcelle chemin de Fer présente un pourcentage légèrement inférieur (43%), pour la seconde période de drainage.

Malgré une mise en route plus récente, les volumes d'eau récoltée par percolation à la parcelle Bovenistier atteignent déjà 30 %. La saison de drainage est inachevée et la percolation se poursuit (mars 2005). Dans ces mêmes conditions, la parcelle Petit Pont arrive à une récolte d'eau de percolation égale à 15 % du drainage potentiel.

Les lysimètres des parcelles PL1 et PL3 ont recueilli de l'eau par percolation dès la première saison de drainage. Cependant, les quantités d'eau récoltées plus importantes que la pluviométrie illustre une dynamique de percolation mais aussi de drainage.

La parcelle PL1 a été cultivée par une céréale. Cette culture, combinée à un mois d'août pluvieux a permis une mise à saturation du sol rapide, qui n'a plus été en mesure d'absorber la remontée saisonnière de la nappe. Une vanne ferme l'exutoire du lysimètre de la parcelle PL1 depuis le mois d'octobre.

Par opposition, l'exutoire de la parcelle PL3 n'est fermé par une vanne que depuis le mois de janvier. Sur site, les parcelles sont concernées par la remontée de la même nappe en surface et sont inter distantes de 300 m. La vitesse de remontée plus lente sur la parcelle PL3 s'explique par la culture de betteraves, grande consommatrice en eau, menée durant l'année 2004. Le sol laissé après la culture de betteraves est plus asséché que par la culture de céréales de la parcelles PL1. Les céréales de la PL1 ont été récoltées dans la première quinzaine d'août et les betteraves de la PL3 ont été parmi les premières parcelles de betteraves récoltées, dans la première quinzaine de septembre.

Théoriquement, les volumes récoltés dans les lysimètres devraient être équivalents aux lames d'eau drainées. Les écarts observés sont explicables par :

- la sur-évaluation de la lame drainée,
- la « non maturité » des lysimètres,
- l'effet « drain » du sol remanié autour des lysimètres,
- l'éloignement des stations IRM, données de pluviométrie et ETP,
- le ruissellement, sans doute modéré de part la planéité des parcelles choisies,
- le calcul de l'ETP, qui ne tient pas compte du type de culture.

Pour pouvoir affiner le bilan hydrologique, il convient d'attendre encore une voire deux années, que le sol soit remis en place, de valider la pertinence du choix des stations météo et d'évaluer plus finement l'évapotranspiration.

Muller (1996) dans une synthèse d'essais par lysimétrie en France considère que 2 à 5 années sont nécessaires pour que le sol dans les lysimètres retrouve un comportement semblable aux conditions réelles. Les systèmes ouverts récupèrent entre 20 et 40 % du drainage potentiel, les systèmes fermés allant jusque 70 %, pour des lysimètres d'une profondeur de 1 m.

Il était attendu dès le départ, que l'enfoncement à 50 cm de profondeur de lysimètre de type fermé (afin d'être sans gêne pour les pratiques agricoles et en conditions réelles d'exploitation) jusque la profondeur totale de 2 m, occasionnerait un taux de récupération des eaux de percolation moins important. Ce phénomène est encore accentué pour ces premières années, par le remaniement important du sol autour des lysimètres lors de la mise en place. Par comparaison, les mesures observées dans les lysimètres installés dans le cadre de cette étude présentent des résultats encourageants, qui méritent d'être poursuivis.

Vanderheyden et Scokart (1997) ont tenté de quantifier les apports en nutriments issus de l'activités agricole pour les eaux de surface en Wallonie. On admet que 60% des pluies ruissellent et 50% aboutissent dans les eaux de surface. Ils considèrent que 25% des terres agricoles sont concernées par des pertes par érosion (particules de sol emportées par l'eau de ruissellement). Dans la proportion des différents types de pertes, ils notent que les pertes en azote dues au lessivage sous culture contribueraient pour 83% au total des pertes agricoles. Les pertes par excès (application de fumures supérieures aux normes en vigueur), run off (écoulement sur les chemins agricoles et épandage des lisiers) et par érosion n'interviendraient que pour 7%. Les 10% restant seraient imputables aux pertes directes (emploi d'engrais minéraux, d'engrais organique lors du pâturage, d'effluents d'élevage lors du stockage et écoulement des jus de silos).

En accordant à chaque type de pertes son écart-type, ils concluent que la valeur estimée par le modèle statistique utilisé, dont ils reconnaissent la sensibilité élevée au type de perte par lessivage, serait pour l'année 1994 en Belgique de 23 kg d'N /ha /an. La valeur moyenne des pertes par lessivage serait, pour la Wallonie, de 19 kg d'N /ha /an (écart-type de 1.6). La variabilité naturelle dans l'espace et le temps des différents paramètres utilisés, induit une imprécision admise de l'ordre de 20 à 30% dans l'estimation des pertes totales.

Depuis lors, la portion importante des pertes par lessivage a été reconnue et a justifié l'utilisation des systèmes lysimétriques de cette étude comme outil de suivi. Les pertes qui ont été observées in situ par la récolte des eaux de percolation dans les systèmes lysimétriques vont de 14 à 24 Kg d'N /ha et par saison de drainage. Quoique du même ordre de grandeur, confronter ces observations de terrain avec le modèle qui utilisait les données de l'année 1994 reste délicat, la gestion de l'azote ayant fortement évolué ces dix dernières années.

5.3 Bilan Azoté

Les lysimètres ont été installés de plein champs et sous conditions réelles d'exploitation afin de déterminer si les normes de fertilisation du PGDA entraîneront des eaux de percolation vers les nappes qui soient respectueuses des normes de potabilité (point de vue nitrate).

Le bilan azoté est approché pour les parcelles qui ont permis la récolte d'un plus grand nombre de mesures, soit la parcelle SOLE 4 qui a récolté des percolat dès la première saison de drainage et la parcelle Chemin de Fer qui a rapidement percolé dès la seconde saison de drainage. Ces deux sites lysimétriques ne sont pas concernés par la remontée de nappe en surface, ce qui nous assure la fiabilité des mesures observées.

Les tableaux 17 et 18 présentent le bilan azoté pour la parcelle chemin de Fer et sole 4, respectivement.

Tableau 17 : Bilan azoté de la parcelle Chemin de Fer

Année	ENTREE		KgN/ha	SORTIE +		KgN/ha	SOLDE
				Immobilisation			
2002 (Bett)	Stock initial	Estimé	40	Stock final	Mesuré	31	
	Importation	Mesuré	230	Exportation	Mesuré	112	
	Minéralisation	Estimé	90	Résidu culture	Estimé	130	
				Percolation	Non connu	-	
	Total		360	Total		273	
2003 (fève/ chx fr)	Stock initial	Mesuré	63	Stock final	Mesuré	110	
	Importation	Mesuré	288	Exportation	Mesuré	447	
	Minéralisation	Estimé	90	Résidu culture	Estimé	200	
				Percolation	Non connu	-	
	Total		441	Total		757	
2004 (ép/har)	Stock initial	Estimé	80	Stock final	Mesuré	93	
	Importation	Mesuré	170	Exportation	Mesuré	77	
	Minéralisation	Estimé	90	Résidu culture	Estimé	145	
				Percolation	Mesuré	19	
	Total		340	Total		315	

Les valeurs mesurées correspondent à des mesures de terrains ; les valeurs estimées ont été trouvées dans la bibliographie et les rapports d'autres essais expérimentaux des gestion de l'azote menés sur le périmètre (données des Services Agricoles de la Province de Liège, Waremme).

Les stocks initial et final correspondent au reliquat azoté mesuré avant l'implantation de la culture (qui permet le conseil de fumure adapté) et en post-récolte.

Les importations correspondent aux fertilisations apportées.

Les exportations sont la part d'azote comprise dans la culture exportée et non restituée au sol.

La minéralisation concerne une part du pool de l'azote qui est ré-organisé au sein du sol et relâché (Nitrawal, 2004).

Les résidus de culture sont la part du végétal cultivé qui n'est pas emporté par la récolte et qui est restitué au sol par enfouissement.

L'année 2002 montre un solde positif, soit que les apports azotés pour la culture de betterave ont été supérieurs aux sorties. L'année 2003 montre l'inverse, avec un solde négatif et des sorties plus importantes que les entrées, les exportations étant importantes. Il est à noter que pour ces deux années, aucune mesure de quantité percolée n'était réalisable. Une partie de ce solde a quitté ces jhorizons par percolation.

L'année 2004, où le bilan a pu être affiné par les données récoltées dans le cadre d'un doctorat sur ce site présente un surplus des inputs par rapport aux outputs. Il est intéressant et encourageant pour le bon fonctionnement du lysimètre de remarquer pour cette dernière année, que sur 25 unités d'azote (UN) en surplus en sortie mesurée et estimée, 19 UN sont récoltées par percolation, soit 76 %. Vanderheyden et Scokart (1997) mentionnent des estimations de pertes par lessivage à 80 % des pertes totales. La période de percolation n'est pas achevée et est toujours en cours, il est probable qu'à la fin de la période de percolation, ce pourcentage sera effectivement approché.

Tableau 18 : Bilan azoté de la parcelle sole 4

Année	ENTREE		KgN/ha	SORTIE + Immobilisation		KgN/ha	SOLDE
2002 (Bett)	Stock initial	Estimé	40	Stock final	Mesuré	46	
	Importation	Mesuré	146	Exportation	Mesuré	112	
	Minéralisation	Estimé	90	Résidu culture	Estimé	100	
				Percolation	Non connu	-	
	Total		276	Total		258	
2003 (from.)	Stock initial	Mesuré	46	Stock final	Mesuré	53	
	Importation	Mesuré	249	Exportation	Mesuré	194	
	Minéralisation	Estimé	90	Résidu culture	Estimé	21	
				Percolation	Mesuré	8	
	Total		385	Total		268	
2004 (har.)	Stock initial	Estimé	53	Stock final	Mesuré	100	
	Importation	Mesuré	136	Exportation	Mesuré	53	
	Minéralisation	Estimé	90	Résidu culture	Estimé	140	
				Percolation	Mesuré (09/04-02/05)	24	
	Total		279	Total		293	

Comme pour le tableau 17, les valeurs mesurées correspondent à des mesures de terrains ; les valeurs estimées ont été trouvées dans la bibliographie et les rapports d'autres essais

expérimentaux des gestion de l'azote menés sur le périmètre (données des Services Agricoles de la Province de Liège, Waremme). Les stocks initial et final correspondent au reliquat azoté mesuré avant l'implantation de la culture (qui permet le conseil de fumure adapté) et en post-récolte. Les importations correspondent aux fertilisations apportées. Les exportations sont la part d'azote comprise dans la culture exportée et non restituée au sol. La minéralisation concerne une part de l'azote contenu dans l'humus du sol qui est transformé en azote assimilable par les plantes (Nitrawal, 2004). Les résidus de culture sont la part du végétal cultivé qui n'est pas emporté par la récolte et qui est restitué au sol par enfouissement.

L'année 2002, montre un solde positif, sous la culture de betteraves, tel qu'à la parcelle précédente, avec des intrants supérieurs aux sorties. L'année 2003 affiche un bilan azoté qui témoigne de très faibles pertes azotées. Ce qui est mesuré comme pertes par percolation est très nettement inférieure à la perte totale estimée. L'importance du solde, partie non expliquée du bilan, réside en partie dans le fait que l'azote immobilisé par l'avoine, semé en inter culture après le froment, n'a pu être mesuré. D'autre part, il faut prendre en compte que l'on est dans la première phase de percolation du lysimètre qui a suivi son installation.

L'année 2004, où la parcelle a été cultivée de haricots, présente des entrées plus faibles que les sorties. Pourtant des pertes par percolations sont enregistrées. On peut supposer que les mesures concernent les horizons de surface, jusqu'à la profondeur de 90 cm (mesures APL) alors que les lysimètres récoltent l'eau de percolation à la profondeur de 2 m. La progression des ions nitrates dans ce type de sol étant estimée à 1m/an (Dautrebande, 1996), l'azote nitrique mesuré dans les eaux de percolation correspond sans doute au défaut de bilan azoté de l'année 2004.

Guiraud (in Muller, 1996) suppose que les mouvements d'eau ne suivent pas un déplacement de type écoulement piston. Le piston flow implique que l'eau qui arrive sur une couche de sol, chasse une partie de l'eau située dans cette couche, appelée l'eau mobile, qui migre alors vers la couche inférieure. Il émet la probabilité que le transport des nitrates se fasse en partie par des écoulements préférentiels à travers des macro pores. Il rapporte aussi que dans la succession interculturelle en sol nu, les pertes par lessivage sont élevées (18.7 % de l'apport). L'intervention de la culture dérobée diminue la valeur de ces pertes à 5.8 %. Environ 20 % de l'azote apporté sont toujours présents dans le sol deux ans après l'apport. Le bilan à l'azote marqué montre que dans leurs systèmes expérimentaux, il n'y a pas de pertes par dénitrification et que le lessivage de l'azote, dans les agrosystèmes cultivés, est la voie principale de pertes en éléments nutritifs.

Chapot (1993) rapporte que les cultures CIPAN contribuent à réduire la lixiviation de l'azote en diminuant le drainage et la teneur en nitrates de la solution du sol. Il a étudié le devenir de l'azote dans le sol par enfouissement d'une moutarde marquée à l'¹⁵N durant les sept années suivantes. Il constate que les pertes par dénitrification l'année suivant l'enfouissement sont négligeables et qu'il reste au terme de 7 années d'expérimentation 57% de l'azote marqué de la moutarde dans le sol. L'azote de la moutarde restant après la première culture, près des ¾ dans l'expérience, augmente le stock d'azote organique du sol en se répartissant entre des pools de stabilité croissante, puis se reminéralise avec des taux décroissant au cours du temps, supérieurs à ceux de l'humus (1.5 – 2 %) pendant les 7 années.

Il conclut en disant que si l'on veut optimiser la gestion de l'azote pendant la culture et l'interculture, il est nécessaire de connaître les cinétiques de reminéralisation des résidus

enfouis, à moyen et à long terme (CIPAN, pailles, etc.) et pour atteindre cet objectif, les lysimètres et le marquage ^{15}N sont des outils adaptés.

Ballif (1991) montre que les pertes en azote nitrique sont variables selon les conditions culturales. Ce que la plante n'a pas pris est organisé, lixivié ou relâché par dénitrification. Les lysimètres en sol cultivés par une rotation de betterave-blé ont une balance entre les entrées et les sorties, pour le bilan moyen de l'azote, avec un excédent en azote de $25 \pm 16\text{kg/ha}$ sur une case, et de $17 \pm 4\text{kg/ha}$ pour une autre, indiquant une réorganisation de l'azote dans le sol. Les pourcentage de pertes d'un apport ponctuel, mesuré par l'azote marqué, montre que la quantité annuelle lixiviée provenant de l'engrais est très faible (de 0.8 à 1%) alors que la quantité totale perdue varie de 38 à 65 kg N /ha, selon la culture. Il émet que l'azote lixivié provient essentiellement d'autres sources que l'engrais apporté. Le compartiment d'azote organique entretenu par la fumure azotée et facilement minéralisable en est la source principale (Denys, cité par Ballif in Muller, 1996).

Vanderheyden et Scokart (1997) estiment que les mesures réglementaires doivent dès lors se focaliser en priorité sur la réduction des pertes indirectes, si l'on souhaite une modification substantielle de la qualité de l'eau des réservoirs de profondeur. Toutefois, l'amélioration des installations de stockage des effluents n'a pas le seul objectif d'éviter des pertes directes mais également de réduire les pertes dues au lessivage grâce à l'épandage aux périodes adéquates. L'estimation quantitative des pertes et des réductions possibles reste cependant difficile et complexe.

6 Conclusion

Cette convention a permis l'étude de la percolation de l'azote nitrique en profondeur en conditions réelles (in situ), sur des terres agricoles par la technique lysimétrique. Une étude bibliographique a permis de dresser l'inventaire des techniques lysimétriques et leur mode de fonctionnement, de comprendre les bases du transfert de solutés dans les sols et de l'azote nitrique en particulier, partie intégrante du cycle complexe de l'azote. Le choix des systèmes lysimétriques s'est porté sur des systèmes semi-fermés, de types sol remaniés et sol non remaniés.

Le choix des sites et leur caractérisation sont exposés. Les conditions météorologiques ont montré que ces essais de percolation se déroulent, suite et durant, des périodes de sécheresse prolongée, fortement défavorables pour l'année 2003-2004. La situation se régularise lentement à l'automne 2004.

Ces conditions expliquent que sur les six lysimètres installés depuis l'été 2003, trois d'entre eux ont permis la récolte d'eau de percolation à 2 m de profondeur, sans distinction entre systèmes sol remaniés ou sol non remaniés durant la première saison de drainage (2003-2004). Tous les sites entrent en phase de percolation pour ce second hivernage (2004-2005), moyennant une mise à saturation par remontée capillaire pour deux d'entre eux. Deux lysimètres sont localisés en des endroits où une nappe, ou sa frange capillaire, remonte temporairement jusqu'à la surface durant l'hiver. Une vanne ferme leurs exutoires dès que le niveau de la nappe est supérieur au bord des lysimètres, afin de les empêcher de récolter des eaux par une dynamique de percolation en association à du drainage. Le niveau de la nappe est suivi par des piézomètres en place. Des études ponctuelles annexes suivent le niveau piézométrique de la nappe, ont analysé les teneurs en nitrate dans les drains avoisinants et ont justifié la fréquence hebdomadaire de l'échantillonnage.

Les sites lysimétriques non influencés par une remontée de nappe en surface, percolent entre 20 et 30% de la pluviométrie enregistrée. Aucune corrélation directe n'est possible entre la pluviométrie quotidienne ou hebdomadaire et les volumes récoltés hebdomadairement par percolation à 2 m de profondeur. Le phénomène « pluviométrie/percolation » n'est pas du type « impulsion/réponse » et explique le recours habituel aux modèles mathématiques, qui intègrent des paramètres tels que le ruissellement, l'interception, la redistribution dans le sol, l'état hydrique du sol, l'évaporation, etc.

A l'exception des deux lysimètres qui interceptent la nappe ou la frange capillaire, les quatre lysimètres installés présentent des eaux de percolation avec des teneurs en nitrate trop élevées par rapport à la norme de potabilité de l'eau.

Ces mesures correspondent à deux années pour certains sites et une première année pour d'autres, de récolte d'eau de percolation par la technique lysimétrique. La validité de cette technique repose sur un suivi sur de plus longues périodes, afin de permettre au sol de se remettre en place et de corrélérer les actions en surface avec les phénomènes observés à 2 m de profondeur. L'impact des nouvelles normes et pratiques agricoles doit également faire l'objet d'un suivi sur un plus long terme.

Les premières observations obtenues par ce suivi lysimétrique in situ en conditions réelles d'exploitation, permettent de dégager quelques grands points. Les rotations classiques betteraves – céréales donnent des eaux de percolation respectueuses de la norme. L'introduction d'une culture légumière dans cette rotation induit une augmentation des teneurs en nitrates migrant en profondeur. Une bonne gestion de la fertilisation et

l'implantation de cultures CIPAN permet d'atténuer le phénomène dans des proportions acceptables. Par contre, malgré l'implantation de culture CIPAN et une gestion fractionnée de l'azote, les rotations légumières successives de cultures fortement exigeantes en azote alternées avec d'autres fixatrices d'azote laissent des reliquats azotés dans le sol, inacceptables d'un point de vue environnemental et préjudiciable dans les zones qualifiées de vulnérable en matière de protection de nos eaux souterraines.

L'objectif de cette étude est également de contribuer à valider l'indicateur environnemental APL. Au terme des ces deux années, il apparaît en première approximation que l'APL (exprimé en kg N-NO₃/ha) correspond à la concentration (exprimée en mg NO₃⁻/l) de l'eau récoltée à l'exutoire du lysimètre.

Rappelons qu'il existe 3 classes d'itinéraires culturaux :

- la classe C1 avec un reliquat azoté attendu de l'ordre de 30 kg N-NO₃/ha,
- la classe C2 avec un reliquat azoté attendu de l'ordre de 60 kg N-NO₃/ha,
- la classe C3 avec un reliquat azoté attendu de l'ordre de 90 kg N-NO₃/ha ou plus.

Sur base de ce constat, qui devra encore être validé par une poursuite des mesures lysimétriques, il apparaît que les itinéraires de la classe C1 ont un itinéraire positif sur la qualité de l'eau et les itinéraires de la classe C3 ont un impact négatif sur la qualité de l'eau.

Au stade actuel des observations, l'APL semble donc être un bon indicateur environnemental. La confirmation de la pertinence des normes d'épandage ne peut être faite sur un délai de deux ans, puisque les rotations sont bien souvent plus longues avec des apports d'azote organique qui ne sont pas annuels. Il n'en reste pas moins que cet outil à moyen terme présente des perspectives encourageantes d'aide à la validation du PGDA.

En conclusion, les lysimètres installés ont rempli leur fonction d'outil de suivi, avec une utilisation ponctuelle ou sur de plus longues périodes. Les informations fournies par ce premier suivi lysimétrique coïncident et confirment la fiabilité et la pertinence des APL de références. Les valeurs mesurées en terme de lixiviation d'azote nitrique montrent la nécessité et la pertinence du PGDA et du code de bonnes pratiques agricoles. Ces valeurs qui peuvent être importantes, incitent à continuer les investigations et recherches en matière de gestion de l'azote et de nos sols.

Par ailleurs, il serait judicieux d'étendre ce réseau de surveillance à d'autres zones vulnérables définies par le PGDA. Une multiplication de lysimètres permettrait de suivre l'impact d'une plus large gamme de cultures et pratiques culturales et leurs effets sur différents types de sols pour les uns ; de se focaliser sur les cultures maraîchères qui sont plus souvent source de problèmes tels que les résultats l'ont démontré pour d'autres ; et de faire un suivi sur prairies également. L'outil lysimétrique s'intègre d'une part pour la validation de l'indicateur environnemental APL dans le cadre du Survey Surface Agricole et d'autre part, peut aussi être un appui au Survey Nitrate, par le suivi quantitatif et qualitatif des eaux qui percolent sous la zone racinaire.

Une demande de renouvellement de subvention a été introduite auprès du Ministère afin de poursuivre ces mesures dans le temps. Cette demande vise à poursuivre l'exploitation de ces outils afin d'affiner la relation APL – Azote lessivé et de confirmer la pertinence des APL de référence établis annuellement par la Structure d'encadrement Nitrawal.

7 Références bibliographiques

1. **Aboukhaled A., Alfaro J.F., Smith M.** (1986). Les Lysimètres. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n°39 . FAO Rome, 1986.
2. **Ballif J.L., Herre C.** 1991. 17 années de mesures lysimétriques en sol de craie non remanié. 1973-1974 à 1989-1990. Trvx. St. Agro. INRA. Châlon sur Marne. Publ. N°202.
3. **Bear J., Verruijt A.** (1987). Modeling groundwater flow and pollution. Ed reidel, Dordercht.
4. **Billen G.** (1991). Le rôle des milieux aquatiques dans le cycle global de l'azote. Actes du séminaire organisé à la FUL « Gestion de l'azote agricole et qualité des eaux », mai 1991.
5. **Canter L.W.** (1997). Nitrates in groundwater. CRC press LLC, USA. 263p.
6. **Castany G.** (1967). Traité pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris,. p.148-173.
7. **Chapot J-Y. et col.** *Incidence de l'introduction d'une culture intercalaire entre blé et maïs sur les flux d'azote et d'eau. Etude sur lysimètres pour deux types de sols.* INRA Colmar, 1993, 21p.
8. colloque organisé par le Comifer et l'Académie d'Agriculture de France. Avril 1995. 207p.
9. **Darthout R., Courtemanche P.** (1994). Description détaillée de l'installation des nouvelles cases lysimétriques. Document technique, INRA C.R. Orléans, Station de Science du sol, 1994, 10p.
10. **Dautrebande S.** (1983). Transfert d'humidité dans les sols. Notes de cours dispensés à la FUSAGx, partim Agro-hydrologie, 1^{ère} Ing TC. 115p.
11. **Dautrebande S.** (1996). Programme action – Hesbaye. Rapport scientifique. FUSAGx. 68 p.
12. **Dautrebande S.** (2003). Hydrologie générale. Compléments de physique du sol. Notes de cours dispensés à la FUSAGx. 110p.
13. **De Backer L.W. et al.** (1991). Contamination des eaux souterraines. Actes du séminaire organisé à la FUL « Gestion de l'azote agricole et qualité des eaux », mai 1991.
14. **Felix R.** (2003) Optimisation de l'irrigation et de la fertilisation azotée : stratégie limitant la pollution des nappes souterraines par les nitrates. Etude et conception d'un projet de recherche. FUSAGx. 30p.
15. **Gego E.** (1991). Modélisation de la dynamique de l'azote dans un sol. Actes du séminaire organisé à la FUL « Gestion de l'azote agricole et qualité des eaux », mai 1991.
16. **Haynes R.J.** (1986). Mineral nitrogen in the soil plant system. Academic press, London.
17. **Hillel D.** (1984). L'eau et le sol. Ed Cabay, Louvain-La-Neuve.
18. **IHD-WHO working group on Quality of water.** – OMS (1978). Water quality surveys. UNESCO, WHO, p148-178.
19. **Muller J.C.** (1996). Un point sur ... trente ans de lysimétrie en France (1960-1990). INRA, Comifer, 1996. 389p.
20. **Nitrawal.** (2004). Informations et conseils techniques pour la gestion durable de l'azote. 56p.

21. **Tychon B.** (1991). Modélisation du mouvement de l'eau et de l'azote nitrique dans un sol. Actes du séminaire organisé à la FUL « Gestion de l'azote agricole et qualité des eaux », mai 1991.
22. **UNESCO.** (1986). Pollution et protection des aquifères. Etude et rapport d'hydrologie 30. Projet 8.3 du programme Hydrologique International, 434p.
23. **Vandenberghe Ch., Marcoen J.M.** (2004). Transposition de la Directive Nitrate (CE) en Région Wallonne : azote potentiellement lessivable de références pour les sols cultivés en Région Wallonne. *Biotechnologie Agronomie Société Environnement (BASE)*. 2004 **8** (2), 111-118. Fac. Univ. Sc. Agr. Gembloux.
24. **Warin A.** et al. (2004). Développement d'un système harmonisé de surveillance de la qualité des terres agricoles en Région Wallonne anticipant la future directive européenne sur les sols. *Biotechnologie Agronomie Société Environnement (BASE)*. 2004 **8** (2), 69-82. Fac. Univ. Sc. Agr. Gembloux.

Sites Web consultés:

Europa, portail de l'Union européenne : http://www.europa.eu.int/index_fr.htm

US EPA (Environmental Protection Agency) : <http://www.epa.gov/>

Institut Royal Météo : <http://www.meteo.be/IRM-KMI/francais/index.php>

8 Bibliographie complémentaire

(sans référence directe dans le texte)

1. **Barriuso E. et col.** *Résidus d'atrazine et de pendiméthaline dans les sols : influence du mode de fertilisation.* Med. Fac. Landbouw. Rijksuniv., Gent 53/3b, 1988.
2. **Chapot J-Y. et col.** *Incidence de l'introduction d'engrais verts dans une rotation blé-maïs sur les flux d'azote et d'eau. Résultats obtenus sur cases lysimétriques et au champ.* INRA Colmar, 1988, 36p.
3. **Citeau L. et col.** *Nature des sols et nature des colloïdes circulant dans les eaux gravitaires : étude in situ.* C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes 332(2001) 657-663.
4. **Copin A. et col.** *Methodology for microlysimeters set up in semi-controlled or field conditions.* Pesticide/soil interactions. Cornejo J., Jamet P, coord, p 261-266. INRA, 2000.
5. **Deleu R. et Copin A.** *Analyse de résidus de pesticides par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. Application au dosage du carbofuran et de l'atrazine.* Bulletin de Recherches Agronomiques de Gembloux (1987) 22 (2). p121-132.
6. **Deleu R., Copin A. et col.** *Répartition de l'atrazine dans les sols après applications répétées. Cas d'une monoculture de maïs pour l'ensilage d'un verger.* Med. Fac. Landbouw. Rijksuniv., Gent 57/3b, 1992.
7. *Environment* 221 (1998) 159-169.

8. **Giraud G. et col.** Cases lysimétriques de Cadarache : minéralisation et organisation de l'azote dans un agro-système de la basse vallée de la Durance. Impact d'une culture dérobée.
9. **Griessbach E. et col.** *Assessment of pesticide mobility by packed soil columns and soil thin-layer chromatography.* Pesticide/soil interactions, Cornejo J., Jamet P, coord. p 49-55. INRA, 2000.
10. **Griessbach E.F.C. et col.** *Mobility of a silicone polyether studied by leaching experiments through disturbed and undisturbed soil columns.* The Science of the Total
11. **J.E. Delphin, Schenck C.** *Observation de longue durée des principaux paramètres intervenant dans le transfert de l'eau et des nitrates dans les sols cultivés en Alsace.* INRA Colmar, 1997, 28p.
12. **Semlali R.M. et col.** *Accumulation and redistribution of trace metals in soils affected by diffuse atmospheric deposition.* Pollution atmosphérique n°172, p545-556, oct-déc 2001.
13. **Simon J.C. et col.** *Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole : recherche d'indicateurs de fonctionnement.* Agronomie 20 (2000), p175-195.
14. **Taras M.J., Greenberg A.E. et col.** *Standard methods for the Examination of Water and Wastewater.* American Public Health Association. Thirteenth edition, 2000, p350-369.

Annexe I : Lysimètre système remanié



Photo 1 : Creusement de la fosse en séparant les horizons



Photo 2 : Lysimètre posé dans la fosse, fond avec graviers et géotextile



Photo 3 : Remplissage manuel couche par couche



Photo 4 : Lysimètre rempli, tranchée jusqu'à la chambre de visite



Photo 5 : Raccord au tuyau d'évacuation



Photo 6 : Rebouchage du chantier avec réparation de drains

Annexe I : Lysimètre système non remanié



Photo 7 : Dégagement et séparation des premiers horizons de sol ; poussée de la grue sur la plaque acier



Photo 8 : Cylindre enfoncé ; retrait de la plaque acier



Photo 9 : Dégagement du cylindre, enfoncement de la plaque de fond horizontalement à la grue



Photo 10 : Demi-ceinture pour le joint de soudure ; pré-trous pour les tuyaux drainant



Photo 11 : Joints de soudure cylindre et plaque ; soudure et raccords des tuyaux drainant



Photo 12 : Lysimètre replacé à la profondeur -50cm ; raccord au tuyau d'évacuation

Annexe I : Installation des chambres de visite



Photo 13 : Installation à la grue



Photo 14 : Fond bâché, anneau de base avec armatures



Photo 15 : Mortier de fond, pose de joint silicone



Photo 16 : Empilage des anneaux, joint d'étanchéité



Photo 17 : Empilage des anneaux à la grue



Photo 18 : Couvercle renforcé, joint de mousse pour l'étanchéité à la fermeture