

INFLUENCE DES MODES DE FERTILISATION SUR  
LES PERTES D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS DANS LES  
DRAINS AGRICOLES SOUS LE MAÏS-GRAIN,  
L'ORGE ET LE CANOLA



Les membres fondateurs de l'IRDA :

Québec 

- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Forêts
- Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation



*L'Union des  
producteurs  
agricoles*

ISBN-13 : 978-2-922851-57-1

ISBN-10 : 2-922851-57-5

Dépôt légal - Bibliothèque et archives du Québec, 2006

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Canada, 2006

©IRDA

# INFLUENCE DES MODES DE FERTILISATION SUR LES PERTES D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS DANS LES DRAINS AGRICOLES SOUS LE MAÏS-GRAIN, L'ORGE ET LE CANOLA

OBSERVATOIRE DE LA QUALITÉ DES SOLS DU QUÉBEC  
SITE DE SAINT-LAMBERT DE LAUZON

## Cahier no 6



INSTITUT DE RECHERCHE  
ET DE DÉVELOPPEMENT EN  
AGROENVIRONNEMENT

Préparé par :

**Marcel Giroux**, agr. M. Sc.  
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)  
Courriel : [marcel.giroux@irda.qc.ca](mailto:marcel.giroux@irda.qc.ca)

**Raynald Royer**, technicien agricole principal  
IRDA, Sainte-Foy

Juin 2006

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX, DES FIGURES ET DES ANNEXES .....	p. 3
RÉSUMÉ .....	p. 5
1. INTRODUCTION.....	p. 7
1.1 Problématiques associées aux pertes d'éléments nutritifs .....	p. 7
1.2 Voies de transport des éléments nutritifs.....	p. 8
1.3 Pertes des éléments nutritifs .....	p. 8
1.4 Influence des cultures sur les pertes d'éléments nutritifs .....	p. 10
1.5 Importance des facteurs hydrologiques sur les pertes d'éléments nutritifs.....	p. 11
1.6 Importance des types de sol et de leur richesse en phosphore .....	p. 12
2. BUTS ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE .....	p. 13
3. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE .....	p. 14
3.1 Description du protocole expérimental.....	p. 14
3.2 Collecte et mesure des eaux des drains souterrains .....	p. 15
3.3 Description de la méthodologie d'analyse des eaux .....	p. 16
3.4 Traitements statistiques .....	p. 18
4. RÉSULTATS – HAUTEURS DES LAMES D'EAU DRAINÉE.....	p. 19
4.1 Maïs-grain .....	p. 19
4.2 Orge.....	p. 20
4.3 Canola .....	p. 21
5. RÉSULTATS – CONCENTRATIONS ET CHARGES PERDUES AUX DRAINS .....	p. 22
5.1 Azote total dissous .....	p. 22
5.2 Azote nitrique.....	p. 25
5.3 Azote ammoniacal.....	p. 28
5.4 Azote organique dissous.....	p. 29
5.5 Phosphore total.....	p. 31
5.6 Phosphore particulaire.....	p. 34
5.7 Phosphore dissous .....	p. 37
5.8 Phosphore minéral réactif dissous .....	p. 38
5.9 Phosphore organique dissous .....	p. 39
5.10 Phosphore biodisponible .....	p. 40
5.11 Potassium dissous.....	p. 42
5.12 Calcium dissous.....	p. 45
5.13 Magnésium dissous .....	p. 46
5.14 Sodium dissous.....	p. 47
6. RÉSULTATS – DISTRIBUTION CENTILE DES CONCENTRATIONS .....	p. 48
6.1 Distribution centile des concentrations en azote.....	p. 48
6.2 Distribution centile des concentrations en phosphore.....	p. 58
6.3 Distribution centile des concentrations en potassium dissous .....	p. 63
6.4 Distribution centile des concentrations en calcium dissous .....	p. 63
6.5 Distribution centile des concentrations en magnésium dissous .....	p. 64
6.6 Distribution centile des concentrations en sodium dissous.....	p. 64
7. CONCLUSIONS.....	p. 65
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	p. 69
9. REMERCIEMENTS .....	p. 70
10. ANNEXES .....	p. 71
11. GLOSSAIRE.....	p. 84

## LISTE DES TABLEAUX, DES FIGURES ET DES ANNEXES

Tableau 3.1	Fiche descriptive du profil de sol de la série Le Bras utilisé.....	p. 14
Tableau 3.2	Description de la séquence culturale et des modes de fertilisation des parcelles .....	p. 15
Tableau 3.3	Analyse chimique du sol Le Bras au début (1997) et à la fin de l'expérience (2004).....	p. 15
Tableau 4.1	Hauteur annuelle de la lame d'eau drainée sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 19
Tableau 4.2	Hauteur de la lame d'eau drainée sous le maïs-grain selon les périodes et les modes de fertilisation. ....	p. 20
Tableau 4.3	Hauteur annuelle de la lame d'eau drainée sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 21
Tableau 4.4	Hauteur de la lame d'eau drainée sous l'orge selon les périodes et les modes de fertilisation.....	p. 21
Tableau 4.5	Hauteur annuelle de la lame d'eau drainée sous le canola selon les modes de fertilisation .....	p. 22
Tableau 4.6	Hauteur de la lame d'eau drainée sous le canola selon les périodes et les modes de fertilisation. ....	p. 22
Tableau 5.1	Charges moyennes annuelles d'azote perdu aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation ..	p. 23
Tableau 5.2	Concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 23
Tableau 5.3	Charges moyennes annuelles d'azote perdu aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 24
Tableau 5.4	Concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 24
Tableau 5.5	Charges moyennes annuelles d'azote perdu aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation .....	p. 25
Tableau 5.6	Concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 25
Tableau 5.7	Charges moyennes annuelles de phosphore perdu aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 31
Tableau 5.8	Concentrations moyennes annuelles pondérées de phosphore dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 32
Tableau 5.9	Charges moyennes annuelles de phosphore perdu aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation ....	p. 33
Tableau 5.10	Concentrations moyennes annuelles pondérées de phosphore dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 33
Tableau 5.11	Charges moyennes annuelles de phosphore perdu aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 34
Tableau 5.12	Concentrations moyennes annuelles pondérées de phosphore dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 34
Tableau 5.13	Charges moyennes annuelles de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 42
Tableau 5.14	Concentrations moyennes annuelles pondérées de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation .....	p. 43
Tableau 5.15	Charges moyennes annuelles de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation .....	p. 43
Tableau 5.16	Concentrations moyennes annuelles pondérées de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation .....	p. 44
Tableau 5.17	Charges moyennes annuelles de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 44
Tableau 5.18	Concentrations moyennes annuelles pondérées de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 45
Tableau 6.1	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation .....	p. 51
Tableau 6.2	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation .....	p. 53
Tableau 6.3	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation .....	p. 57
Tableau 7.1	Charges moyennes des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains selon les cultures, tous modes de fertilisation confondus.....	p. 66
Figure 1	Puits, système de mesure et d'échantillonnage des eaux des drains souterrains .....	p. 16
Figure 2	Diagramme représentant les fractions d'azote et de phosphore dosées dans les eaux des drains souterrains ..	p. 18
Figure 3	Pertes annuelles des formes d'azote aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation .....	p. 26
Figure 4	Pertes annuelles des formes d'azote aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 27
Figure 5	Pertes annuelles des formes d'azote aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation .....	p. 28
Figure 6	Pertes annuelles des formes de phosphore aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation .....	p. 35
Figure 7	Pertes annuelles des formes de phosphore aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation .....	p. 36
Figure 8	Pertes annuelles des formes de phosphore aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 37

Figure 9	Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 49
Figure 10	Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 50
Figure 11	Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 55
Figure 12	Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore et de magnésium dissous dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 56
Figure 13	Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore et de magnésium dissous dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 61
Figure 14	Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore et de magnésium dissous dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 62
Annexe 1	Quantités d'éléments nutritifs apportés dans les parcelles selon les années et les modes de fertilisation.....	p. 71
Annexe 2	Charges moyennes saisonnières d'azote perdu aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 72
Annexe 3	Concentrations moyennes pondérées saisonnière d'azote dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 72
Annexe 4	Charges saisonnières des éléments nutritifs perdus aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 73
Annexe 5	Concentrations moyennes pondérées saisonnières des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 73
Annexe 6	Charges saisonnières des éléments nutritifs perdus aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 74
Annexe 7	Concentrations moyennes pondérées saisonnières des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 74
Annexe 8	Charges moyennes saisonnières de phosphore perdu aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 75
Annexe 9	Concentrations moyennes pondérées saisonnière de phosphore dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 75
Annexe 10	Charges moyennes saisonnières de phosphore perdu aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 76
Annexe 11	Concentrations moyennes pondérées saisonnière de phosphore dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 76
Annexe 12	Charges moyennes saisonnières de phosphore perdu aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 77
Annexe 13	Concentrations moyennes pondérées saisonnière de phosphore dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 77
Annexe 14	Charges moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 78
Annexe 15	Concentrations moyennes pondérées saisonnière de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation.....	p. 78
Annexe 16	Charges moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 79
Annexe 17	Concentrations moyennes pondérées saisonnière de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation.....	p. 79
Annexe 18	Charges moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 80
Annexe 19	Concentrations moyennes pondérées saisonnière de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation.....	p. 80
Annexe 20	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les périodes.....	p. 81
Annexe 21	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous l'orge selon les périodes.....	p. 82
Annexe 22	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous le canola selon les périodes.....	p. 83

## RÉSUMÉ

La présente étude a pour objectif de mesurer les hauteurs de la lame d'eau drainée, les concentrations et les charges des éléments nutritifs perdus aux drains sous des champs en maïs-grain, en orge et en canola soumis à trois modalités de fertilisation (fumier de bovins, lisier de porcs et fumure minérale). La hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau drainée sous le maïs-grain a été de 34,25 cm, avec un minimum de 24,46 cm et un maximum de 46,53 cm. La hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau drainée sous l'orge a été de 38,24 cm, avec un minimum de 34,46 cm et un maximum de 42,80 cm. La hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau drainée sous le canola a été de 33,56 cm, avec un minimum de 29,27 cm et un maximum de 37,00 cm.

Les charges moyennes annuelles de N total dissous (NT) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 48,1 kg N/ha sous le maïs-grain, de 29,2 kg N/ha sous l'orge et de 30,2 kg N/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges de NT sont plus élevées sous le maïs-grain et semblables sous l'orge et le canola. Les charges moyennes annuelles de N-NO<sub>3</sub> perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 44,0 kg N-NO<sub>3</sub>/ha sous le maïs-grain, de 26,2 kg N-NO<sub>3</sub>/ha sous l'orge et de 29,3 kg N-NO<sub>3</sub>/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges de N-NO<sub>3</sub> sont plus élevées sous le maïs-grain et semblables pour l'orge et le canola. Les charges moyennes annuelles de N ammoniacal perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 292 g N-NH<sub>4</sub>/ha sous le maïs-grain, de 406 g N-NH<sub>4</sub>/ha sous l'orge et de 88 g N-NH<sub>4</sub>/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges en N-NH<sub>4</sub> sont plus élevées sous l'orge et plus faibles sous le canola. Les charges moyennes annuelles de N organique dissous (NOD) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 3,88 kg N/ha sous le maïs-grain, de 2,59 kg N/ha sous l'orge et de 1,83 kg N/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges en NOD sont plus élevées sous le maïs-grain.

Les charges moyennes annuelles de P total (PT) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 1237 g P/ha sous le maïs-grain, de 1447 g P/ha sous l'orge et de 841 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P particulaire (PP) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 1088 g P/ha sous le maïs-grain, de 1374 g P/ha sous l'orge et de 763 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 141 g P/ha sous le maïs-grain, de 184 g P/ha sous l'orge et de 77 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P réactif dissous (PRD) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 94 g P/ha sous le maïs-grain, de 124 g P/ha sous l'orge et de 44 g P/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges moyennes annuelles de P organique dissous (POD) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 47 g P/ha sous le maïs-grain, de 60 g P/ha sous l'orge et de 24 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P biodisponible (Pbio) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 472 g P/ha sous le maïs-grain, de 539 g P/ha sous l'orge et de 293 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation.

Les charges moyennes annuelles de K dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 12,0 kg K/ha sous le maïs-grain, de 12,1 kg K/ha sous l'orge et de 10,9 kg K/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le fumier de bovins, particulièrement sous le maïs-grain. Les charges moyennes annuelles de Ca dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 101,0 kg Ca/ha sous le maïs-grain, de 86,0 kg Ca/ha sous l'orge et de 80,0 kg Ca/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges moyennes annuelles de Mg dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 47,3 kg Mg/ha sous le maïs-grain, de 46,1 kg Mg/ha sous l'orge et de 42,1 kg Mg/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges moyennes annuelles de Na dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 47,4 kg Na/ha sous le maïs-grain, de 53,3 kg Na/ha sous l'orge et de 53,2 kg Na/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs.

Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le maïs-grain, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 10,4 mg N/L pour l'azote total, de 9,6 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour les nitrates, de 0,034 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour l'azote ammoniacal et de 0,43 mg N/L pour l'azote organique dissous. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous l'orge, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 6,8 mg N/L pour l'azote total, de 5,8 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour les nitrates, de 0,022 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour l'azote ammoniacal et de 0,53 mg N/L pour l'azote organique dissous. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le canola, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 5,8 mg N/L pour l'azote total, de 5,4 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour les nitrates, de 0,016 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour l'azote ammoniacal et de 0,42 mg N/L pour l'azote organique dissous.

Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le maïs-grain, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 104 ug P/L pour le P total, de 76 ug P/L pour le P particulaire, de 26 ug P/L pour le P dissous, de 16 ug P/L pour le P réactif dissous, de 8 ug P/L pour le P organique dissous et de 47 ug P/L pour le P biodisponible. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous l'orge, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 68 ug P/L pour le P total, de 38 ug P/L pour le P particulaire, de 28 ug P/L pour le P dissous, de 18 ug P/L pour le P réactif dissous, de 9 ug P/L pour le P organique dissous et de 33 ug P/L pour le P biodisponible. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le canola, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 48 ug P/L pour le P total, de 35 ug P/L pour le P particulaire, de 16 ug P/L pour le P dissous, de 9 ug P/L pour le P réactif dissous, de 7 ug P/L pour le P organique dissous et de 18 ug P/L pour le P biodisponible.

Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le maïs-grain, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 3,2 mg K/L pour le potassium dissous, de 31,6 mg Ca/L pour le calcium dissous, de 17,2 mg Mg/L pour le magnésium dissous et de 18,3 mg Na/L pour le sodium dissous. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous l'orge, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 3,3 mg K/L pour le potassium dissous, de 21,0 mg Ca/L pour le calcium dissous, de 11,2 mg Mg/L pour le magnésium dissous et de 11,6 mg Na/L pour le sodium dissous. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le canola, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 2,8 mg K/L pour le potassium dissous, de 28,0 mg Ca/L pour le calcium dissous, de 18,2 mg Mg/L pour le magnésium dissous et de 27,6 mg Na/L pour le sodium dissous.

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Problématiques associées aux pertes d'éléments nutritifs

La détermination des flux et des voies de transport des éléments nutritifs provenant des sols agricoles constitue actuellement un enjeu important en agroenvironnement. L'eutrophisation des plans d'eau par le phosphore, la contamination des nappes phréatiques par les nitrates, la présence d'ammonium dans l'eau des rivières sont des problèmes souvent rapportés qui sont reliés à ces flux. Les travaux sur la quantification des pertes des éléments nutritifs au niveau des fermes doivent se poursuivre pour établir la contribution réelle du secteur agricole à la qualité de l'eau, pour identifier les pratiques agricoles à risque et déterminer les zones vulnérables aux pertes. Cette étape est essentielle afin d'élaborer des stratégies de réduction des flux et mieux comprendre les relations entre les pratiques agricoles et les problématiques environnementales énoncées.

### 1.2 Voie de transport des éléments nutritifs

Les principales voies de transport des éléments nutritifs en dehors de la couche arable des sols agricoles sont l'écoulement matriciel vers les nappes ou les drains agricoles, l'écoulement hypodermique, l'écoulement préférentiel et le ruissellement de surface. La nature chimique des éléments, leur capacité d'adsorption ou de fixation aux particules de sol, les propriétés physiques et chimiques des sols, les pratiques agricoles, la topographie et le régime hydrique vont influencer l'intensité des pertes et les voies de transport des éléments. Ainsi les ions nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), chargés négativement ne se fixent pas aux particules de sol et sont perdus surtout par lessivage vers les nappes phréatiques ou vers les eaux de surface via le réseau de drainage souterrain. Les ions phosphates possèdent une très grande réactivité avec les minéraux du sol, particulièrement l'aluminium, le fer et le calcium. Les sols les retiennent fortement et possèdent une grande capacité de fixation et d'adsorption pour cet élément. La principale voie de transport pour le phosphore sera le ruissellement de surface en se liant aux particules de sol. On en retrouve également des quantités non négligeables dans les drains agricoles sous formes dissoutes ou liées aux particules de sol.

Les ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ) et sodium ( $\text{Na}^+$ ) peuvent être adsorbés sur le complexe d'échange cationique des sols ou présents sous forme ionique dans la solution du sol. On en retrouvera dans les eaux de ruissellement et de drainage sous formes dissoutes ou particulaires.

D'autres facteurs affectent également le transport des éléments nutritifs. Le type de culture, le mode de travail du sol, les doses et les types d'engrais, les périodes et les méthodes d'épandage sont des facteurs importants. La nature des sols, leur propriété hydrique, la topographie du terrain et les aspects hydrologiques du parcellaire déterminent la hauteur et la proportion de la lame d'eau drainée versus celle ruisselée ainsi que le mouvement de l'eau dans les sols. Ceci a également des incidences sur le lessivage, l'érosion et le transport des éléments nutritifs. Les drains agricoles ont été identifiés comme une source importante d'apport des éléments nutritifs vers les eaux de surface. On ne connaît que partiellement l'influence qu'exerce le réseau de drainage souterrain sur les pertes des éléments nutritifs pour les différentes cultures, spécialement en ce qui a trait à leur mode de fertilisation.

### 1.3 Perte des éléments nutritifs

Guertin et al. (2001) ont retrouvé 20 fois plus de nitrate dans l'eau des drains souterrains que dans l'eau de ruissellement de surface dans des parcelles cultivées en maïs-grain. Des résultats semblables ont été obtenus par Gangbazo et al. (1997) et par Pesant et al. (1997) qui ont établi que seulement 9 % de l'azote est perdu par ruissellement de surface contre 91 % par lessivage sous forme dissoute, principalement des nitrates. Ces pertes sont directement reliées à l'azote nitrique résiduel dans les sols en fin de saison et surviennent surtout à l'automne mais aussi au printemps. D'après plusieurs études menées au Québec, la teneur en nitrate dans le profil de sol après la récolte varie de très faible à très élevée, soit de 7 à 171 kg N-NO<sub>3</sub>/ha (Giroux et al. 2003). La nature de la culture, le coefficient d'utilisation de l'azote, les doses, les modes, les périodes d'application des engrais, le type de sol, la minéralisation de l'azote après la récolte sont les principaux facteurs qui vont affecter la teneur en nitrate résiduel des sols en fin de saison. Les concentrations en nitrate mesurées au Québec dans le réseau de drainage souterrain vont de 1 à 40 mg N-NO<sub>3</sub>/L selon les cultures (Giroux et al. 2003) et sont en relation avec le contenu en nitrate résiduel des sols après la récolte (Berrouard et al. 2001).

Dans une récente étude menée de 2000 à 2002 dans la région de Montréal, Ziadi et al. (2003) ont démontré que les nitrates résiduels à la récolte du maïs et leur mobilité dans le profil varient selon les conditions climatiques et la texture du sol. La présence de micropores dans les sols argileux permet une meilleure rétention de l'azote nitrique et rend ces sols moins vulnérables aux pertes de nitrate. La même étude a conclu qu'une classification texturale doit être prise en considération pour une gestion spécifique et précise de la fertilisation azotée du maïs-grain au Québec. Guertin et al. (1997) sont arrivés à une conclusion similaire après avoir mesuré le mouvement des nitrates et les quantités résiduelles dans le profil de sol au cours d'une étude comportant 27 champs de maïs-grain cultivé dans trois groupes texturaux de sol.

Le type d'engrais et la période d'épandage peuvent aussi affecter les reliquats d'azote nitrique et les pertes aux drains. Garand et al. (1997) ont trouvé que l'épandage de fumiers solides sur des sols argileux à l'automne est aussi efficace que celui de printemps. Ces auteurs suggèrent de ne pas appliquer les fumiers solides trop tôt à l'automne en sols sableux. N'Dayegamiye et al. (2004) ont trouvé que la libération des nitrates suite à l'épandage de divers engrais organiques à l'automne dépendait de leur rapport C/N. Les fumiers solides à faible rapport C/N produisent beaucoup de nitrate dans les sols à l'automne, ceux avec un rapport C/N > 20 en libèrent beaucoup moins. Même les engrais de ferme appliqués au printemps peuvent laisser des charges importantes de nitrate dans les sols à l'automne suite à une minéralisation tardive de l'azote (Giroux et al. 2002). Certaines cultures à cycle court, comme les céréales, sont sensibles à ce phénomène parce qu'elles sont moins aptes à valoriser les engrais de ferme dont la libération de l'azote se fait lentement. La libération de l'azote des fumiers n'est pas toujours synchronisée avec le cycle de développement physiologique des plantes. Il vaut mieux utiliser les fumiers sur des cultures à cycle long, comme le maïs, en complément avec une fumure minérale. Une complémentarité entre les engrais organiques et minéraux bien adaptée aux cultures à fertiliser et aux types d'engrais organiques à valoriser permet d'assurer une meilleure disponibilité en azote aux cultures et de réduire l'azote nitrique résiduel en fin de saison. Magnan (2005) a effectué une revue de littérature sur les épandages des engrais organiques et les risques environnementaux reliés aux pertes d'azote. Il a identifié plusieurs facteurs à considérer pour réduire les pertes.

- ❑ Promouvoir la valorisation des engrais organiques à rapport  $\text{NH}_4/\text{N}$  total élevé en période de croissance active des plantes.
- ❑ Utiliser des plantes de couverture pour valoriser les engrais organiques en post-récolte.
- ❑ Ne pas épandre sur des parcelles hydrologiquement actives.
- ❑ Optimiser les pratiques d'épandage selon les types de sol, la nature des engrais et les cultures.
- ❑ Appliquer des mesures de contrôle de l'érosion et de ruissellement.

Bien que moins élevées que celles en nitrate, les pertes d'azote ammoniacal représentent un problème important en agriculture. Des dépassements occasionnels du critère de toxicité chronique des eaux douces (entre 1 et 2 mg  $\text{N-NH}_4/\text{L}$  selon le pH et la température de l'eau) ou du critère pour le traitement de l'eau potable (0,5 mg  $\text{N-NH}_4/\text{L}$ ) sont parfois rapportés dans les ruisseaux et les rivières à forte vocation agricole. Les charges annuelles perdues varient généralement entre 1 et 4 kg  $\text{N-NH}_4/\text{ha}$  dans les eaux de ruissellement de surface et de quelques centaines de grammes dans les eaux de drainage souterrain. Les pertes d'azote ammoniacal se comparent à celles du phosphore par l'ampleur et les mécanismes de transport, principalement liés à l'érosion et au ruissellement. L'azote ammoniacal est rapidement nitrifié suivant l'incorporation des engrais dans les sols, sauf en sols froids. Les pertes sont donc plus susceptibles de survenir dans les jours qui suivent les épandages d'engrais de ferme. Les processus biologiques du sol contribuent également à produire de l'azote ammoniacal. Les températures du sol près du point de congélation ont comme effet de ralentir la nitrification, provoquant ainsi une augmentation de la teneur en ammonium des sols, suite à la minéralisation des résidus de culture et des engrais organiques. On retrouvera donc davantage d'ammonium dans les sols tard à l'automne, en hiver et tôt au printemps. Ceci pourrait expliquer en partie l'accroissement des concentrations en azote ammoniacal observé dans l'eau des rivières en hiver.

Le risque de pertes d'azote ammoniacal et de phosphore est relié directement aux doses d'engrais de ferme laissés en surface en périodes et en zones propices au ruissellement. Les propriétés hydriques des sols, leur vulnérabilité à l'érosion et au ruissellement, leur humidité au moment des épandages et les précipitations qui suivent immédiatement les apports influencent l'ampleur des pertes d'azote ammoniacal et de phosphore. Toutes les mesures pour réduire l'érosion et le ruissellement vont donc avoir un effet sur les pertes de ces éléments nutritifs. Une des mesures les plus efficaces demeure l'incorporation des engrais aux sols immédiatement après l'épandage. La teneur en argile des sols et sa capacité d'échange cationique sont aussi des paramètres importants à considérer pour la mobilité et le transport de l'azote ammoniacal. Les argiles peuvent adsorber ou fixer entre leurs feuillettes les ions  $\text{NH}_4$ . Chatigny et al. (2004) ont démontré que le tiers de l'azote des lisiers était fixé par les argiles le jour de l'application et que 20 % de cet azote était encore présent dans un sol argileux à l'automne mais seulement 2 % dans un loam sableux. Le type de sol joue donc un rôle important sur la mobilité et les pertes d'azote ammoniacal.

Pour le phosphore, la teneur en aluminium libre des sols est fortement reliée à leur capacité de fixation du P. Le phosphore et d'autres éléments nutritifs, normalement bien retenus par les sols comme l'ammonium et le potassium, peuvent malgré tout se retrouver en concentrations importantes dans les drains agricoles dans les heures suivant les applications de lisiers si le réseau

de drainage est actif au moment des épandages, particulièrement dans les sols avec une grande conductivité hydrique (Dean et Foran. 1991, HBA 1991).

Les résultats préliminaires de la qualité des eaux des drains souterrains mesurées au site de l'Observatoire de la qualité des sols de Saint-Lambert entre 1998 et 2000 indiquent des pertes sous prairies de 2,7 à 13,0 kg N-NO<sub>3</sub>/an selon les années et les modes de fertilisation (Giroux et al. 2002). Les pertes d'azote ammoniacal aux drains ont varié de 56 à 851 g N-NH<sub>4</sub>/ha selon les années et les modes de fertilisation. Les pertes d'ammonium aux drains sont généralement plus fortes avec les engrais de ferme (Giroux et al. 2002). Pour le phosphore dissous, les charges annuelles aux drains ont varié de 41,3 à 236,2 g P/ha selon les années et les modes de fertilisation. Les pertes de phosphore aux drains contribuent de façon significative aux pertes globales de la ferme. Elles sont généralement plus fortes avec les engrais de ferme qu'avec la fumure minérale. Il faut toutefois évaluer la biodisponibilité de ce phosphore pour connaître son impact réel sur le milieu aquatique (Michaud et Laverdière 2004).

#### **1.4 Influence des cultures sur les pertes d'éléments nutritifs**

On connaît bien en agriculture l'importance des rotations sur la fertilité, la productivité et la qualité des sols. Mais les rotations ont également une dimension environnementale très importante qu'il faut considérer dans la valorisation des engrais de ferme. Les pertes de nitrate sont très variables selon les cultures. Les prairies de légumineuses ou de graminées fertilisées avec des engrais de ferme ou des engrais minéraux produisent des pertes de nitrate faibles, même en situation de fertilisation élevée. Les concentrations en nitrate dans les drains sous prairies se situent généralement entre 2 et 4 mg N-NO<sub>3</sub>/L. Leur présence dans les rotations contribue à améliorer la qualité environnementale de l'ensemble de la ferme. Le soya, très peu fertilisé à l'azote, perd également peu de nitrate et les concentrations dans l'eau des drains sont de l'ordre de 5 mg N-NO<sub>3</sub>/L. Les céréales à paille et le canola, modérément fertilisés à l'azote au Québec, produisent des pertes assez faibles. Les concentrations dans l'eau des drains pour ces cultures sont généralement de 7 à 8 mg N-NO<sub>3</sub>/L, inférieures au critère de qualité de 10 mg N-NO<sub>3</sub>/L. La pomme de terre et le maïs sont deux cultures produisant des pertes d'azote et des concentrations plus élevées dans les eaux de drainage souterrain, souvent entre 15 et 30 mg N-NO<sub>3</sub>/L, pouvant dépasser 40 mg N-NO<sub>3</sub>/L dans certains cas (Madramootoo et al. 1992, Rivest et Leduc 1998). Gasser et al. (2002) ont mesuré une charge moyenne annuelle lessivée de 91 kg N-NO<sub>3</sub>/ha dans des champs de pommes de terre fertilisés avec une fumure minérale et du lisier de porcs. Les concentrations en nitrate dans les eaux de drainage ont atteint 52 mg N-NO<sub>3</sub>/L et elles étaient plus élevées dans les champs sans rotation, intensément fertilisés à l'azote. Des puits ont été rapportés contaminés par les nitrates dans les régions de culture intensive de la pomme de terre (Giroux 1995). Les cultures se classent ainsi pour les pertes de nitrate :

prairies < soya < céréales = canola < maïs-grain < pomme de terre.

Le risque de perte de nitrate est relié à la dose d'azote appliquée sur les cultures (Guertin et al. 1997). Giroux et Tran (1995) ont démontré que les nitrates s'accumulent dans les sols cultivés en maïs proportionnellement aux doses appliquées, particulièrement lorsque les doses N dépassent le niveau optimal de fertilisation. Cependant, pour les cultures très exigeantes en azote, comme le maïs, la pomme de terre et les choux, il arrive que l'azote résiduel à l'automne soit élevé même pour des doses de N justifiées au plan économique. Le coefficient d'utilisation de l'azote des

engrais minéraux se situe généralement à près de 50 %. Certaines cultures fortement fertilisées à l'azote laissent donc dans les sols beaucoup de nitrate non utilisé par les plantes. Guertin et al. (1997) ont démontré que le maïs-grain fertilisé au-delà de 140 kg N/ha dans les sols argileux et de 100 kg N/ha dans les sols sableux laissait plusieurs dizaines de kg N-NO<sub>3</sub>/ha dans le profil de sol même si la dose économique optimale se situait à près de 160 kg N/ha. Il semble que le niveau économique des apports d'azote dépasse pour certaines cultures le seuil environnemental acceptable pour les rejets en nitrate. Le risque de perte de nitrate associé à la valorisation des engrais peut être grandement atténué par un bon choix de culture dans les rotations et une fertilisation azotée mieux raisonnée. Pour l'azote ammoniacal et le phosphore, on ne peut établir de lien aussi direct avec le type de culture, les doses appliquées et les pertes aux drains. Les prairies peuvent en perdre autant sinon plus que les cultures commerciales.

### **1.5 Importance des facteurs hydrologiques sur les pertes d'éléments nutritifs**

Dans une perspective de gestion des éléments nutritifs, prévenir la contamination de l'eau et optimiser la valeur fertilisante des engrais sont deux objectifs complémentaires qu'il faut viser. À cela s'ajoute un contrôle à long terme de l'enrichissement des sols, particulièrement pour le phosphore. Il faut en effet limiter les sources de phosphore, qu'elles proviennent du sol ou des engrais, afin de laisser moins d'emprise au facteur transport qui provoque leur mobilité. Concrètement, ces principes se traduisent par une régie d'épandage qui minimise la présence d'engrais de ferme en surface du sol pendant les périodes critiques d'activité hydrologique, de même que sur les portions les plus hydrologiquement actives du parcellaire (Giroux et al. 2003). La prévention des pertes demeure aussi tributaire d'un aménagement des terres et d'une gestion des sols minimisant la production de ruissellement et évacuant l'eau en douceur.

Le Québec connaît un bilan hydrique excédentaire. Sur environ un mètre de hauteur de précipitation en moyenne, entre 300 et 400 mm atteindront le réseau hydrographique, fournissant l'énergie pour prendre en charge et transporter sédiments, phosphore et azote tout au long de son parcours. À l'échelle du parcellaire, la répartition surface/souterraine de l'écoulement des eaux excédentaires est un processus important qui gouverne en grande partie l'exportation du phosphore et d'autres éléments par ruissellement ou par le réseau de drainage (Michaud et Laverdière 2004, Castillon 2005). En fait, plus le volume de ruissellement de surface est important, plus il est rapide et apte à prendre en charge et transporter les éléments à la surface du sol. La dominance des exportations de phosphore dans le ruissellement de surface s'explique notamment par le transport du P attaché aux sédiments suivant leur arrachement par les processus d'érosion ou suivant des épandages non incorporés d'engrais de ferme et d'engrais minéraux.

Les parcelles récemment instrumentées par l'équipe de l'Université McGill dans la région de Pike River constituent un des rares réseaux d'observation qui permette de quantifier la répartition surface/souterraine des exportations de nutriments hors des champs. Le suivi met en relief que, malgré de faibles contributions aux hauteurs totales d'eau exportée, le ruissellement de surface contribue à la plus grande partie des pertes de P en raison de concentrations élevées en P total. Les pertes aux drains constituent également une proportion assez importante des flux de P. Ces pertes se font surtout sous forme de P lié à des particules de sol (Enright et Madramootoo 2004). Les mesures du débit et de la qualité de l'eau du bassin versant de la rivière-aux-Brochets et du ruisseau-au-Castor (Michaud et al. 2002, Deslandes et al. 2002), supportent les mêmes

conclusions; la plus grande part des exportations de phosphore est associée aux matières en suspension transportées lors des crues à forte composante de ruissellement de surface.

## 1.6 Importance des types de sol et de leur richesse en phosphore

Aux Pays-Bas, l'écoulement du P par migration souterraine était identifié dans les années '80 comme un processus de transport important de phosphore dans des cas spécifiques d'apports élevés d'engrais à des sols fortement saturés en P (Breeuwsma et al. 1995). Bien que l'enrichissement du sol en phosphore puisse être relié aux migrations souterraines du P dans certaines études, il n'est pas nécessairement le facteur contrôlant. En effet, les exportations significatives de phosphore rapportées dans la littérature ne semblent pas tant refléter l'enrichissement en P de la couche arable mais plutôt les conditions d'écoulement au travers du profil de sol (Giroux et al. 2003). Conceptuellement, la migration souterraine du P dans les sols agricoles a été attribuée à trois cheminements hydrologiques, soit l'écoulement matriciel, l'écoulement préférentiel et le drainage souterrain. L'écoulement à travers la matrice du sol n'est pas toujours une voie d'entraînement significative du P dans le sol. Cependant, l'exportation matricielle de P vers la nappe ou les drains souterrains peut devenir importante dans des sites qui combinent de fortes richesses en P et une nappe d'eau peu profonde (Heathwaite et al. 2000). Les exportations de P par migration souterraine sont souvent associées aux écoulements préférentiels par la voie des macropores, des biopores et des fentes de retrait. Au Québec, Simard et al. (1995) ont documenté la migration du phosphore dans des sols surfertilisés de la région de Lotbinière. Ils ont obtenu des pertes importantes de phosphore total aux drains. La plus grande partie du phosphore perdu était sous forme particulaire. En France, Castillon (2005) a mesuré des pertes cumulées de phosphore total par drainage de 600 g à 4000 g P/ha selon les modalités de travail du sol et les conditions hydrologiques des sites, notamment la hauteur de la lame d'eau drainée. Les concentrations moyennes pondérées de P total ont varié de 66 à 306 µg P/L. L'auteur mentionne que la proportion du P dissous par rapport au P particulaire varie beaucoup selon les événements hydriques et les modalités de transfert. La contribution du P particulaire à l'eutrophisation va dépendre des états chimiques du P dans les particules de sol. La détermination du P biodisponible doit donc être effectuée et tenir compte autant de la fraction du P soluble réactif que de la biodisponibilité du P particulaire. Michaud et Laverdière (2004) sont arrivés aux mêmes conclusions dans une étude sur les formes de P présentes dans les eaux de ruissellement de surface.

L'aménagement d'un système de drainage souterrain est généralement considéré comme un facteur qui contribue à la mobilité du P dans le sol. Cependant, par son effet sur la réduction du volume de ruissellement de surface, le drainage souterrain atténue les exportations globales de phosphore vers l'écosystème aquatique. Une réduction des pertes de P de l'ordre de 5 kg/ha/an a été observée dans une culture de maïs suivant l'implantation du drainage souterrain dans la vallée du Mississippi (Bengtson et al. 1988). Sharpley et Withers (1994) ont mesuré des pertes de P dans le ruissellement de surface équivalent à 9 % des apports, alors que les exportations souterraines (drain et percolation) équivalaient à moins de 1 % des apports. Plusieurs études québécoises ont aussi documenté des concentrations et des charges de P aux drains. Beauchemin et al. (1998) ont caractérisé la qualité d'eau de drainage de 27 sites. Pour les 14 sites ayant démontré une concentration excédant le critère de qualité des écosystèmes aquatiques (30 µg/L), dix étaient des gleysols. Rivest et Leduc (1997) ont caractérisé les champs et les eaux de drainage de 80 champs en production de maïs en conditions printanière et automnale, sans pouvoir établir de lien entre la

richesse ou la saturation en P des sols et la concentration en P de l'eau dans les drains. Les dépassements observés du critère de qualité (30 µg P/L) n'ont pas pu être expliqués par les pratiques de fertilisation. Les auteurs concluent que le risque de migration souterraine est plutôt associé aux propriétés physiques du sol, notamment aux conductivités hydrauliques élevées et aux conditions propices aux écoulements préférentiels. Gangbazo et al. (1998) ont mesuré des charges annuelles aux drains de l'ordre de 80 g P/ha en parcelles expérimentales fertilisées avec un engrais minéral et du lisier de porcs appliqués en présemis incorporé et en postlevée incorporé, sans noter d'effets significatifs des traitements sur les exportations souterraines de P.

Compte tenu de l'importance des superficies drainées souterrainement au Québec et des caractéristiques physiques, chimiques et pédologiques des sols, le potentiel de migration des éléments nutritifs via le réseau de drainage souterrain doit être pris en compte dans le bilan global des pertes provenant du secteur agricole.

## 2 - BUT ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

---

Le but visé de cette étude est de présenter le suivi des mesures sur les hauteurs de la lame d'eau drainée, les concentrations et les charges des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains souterrains sous le maïs-grain, l'orge et le canola au site de l'Observatoire de la qualité des sols de Saint-Lambert de Lévis pour la période du 1<sup>er</sup> mai 1997 au 30 avril 2005. La hauteur de la lame d'eau drainée, de même que diverses fractions de l'azote, du phosphore et des cations K, Ca, Mg et Na ont été mesurées hebdomadairement dans les eaux des drains souterrains. Les charges perdues ont été cumulées sur une base annuelle et saisonnière. Le système cultural étudié comporte une rotation de 4 ans avec 2 années de maïs-grain, une année d'orge et une année de canola. Ce système a été soumis à divers modes de fertilisation : fumure minérale, fumier de bovins laitiers et lisier de porcs. L'étude porte sur quatre années de mesures des concentrations, des charges et de la hauteur de la lame d'eau drainée sous maïs-grain (deux années pour certains éléments). Pour l'orge, deux années de mesures des concentrations, des charges et de la hauteur de la lame d'eau drainée ont été réalisées. Pour le canola, deux années de mesures des concentrations et une année de mesures des charges et de la hauteur de la lame d'eau drainée ont été réalisées.

Les mesures des hauteurs de la lame d'eau drainée, des concentrations et des charges en éléments nutritifs ont également été déterminées par saison pour les trois modes de fertilisation et pour les trois cultures commerciales. Nous avons également établi le profil de distribution centile des concentrations de l'eau pour ces cultures selon les modes de fertilisation afin de fournir des valeurs de référence de qualité de l'eau aux drains.

### 3. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

#### 3.1 Description du protocole expérimental

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec sur un site expérimental situé à Saint-Lambert de Lévis, près de Québec. Le sol est un loam limoneux de la série Le Bras (tableau 3.1). Une rotation de quatre ans avec du maïs-grain (2 ans), de l'orge et du canola est mise en place dans ce champ. Le tableau 3.2 présente la séquence culturale et les modes de fertilisation des parcelles expérimentales. Le champ est divisé en trois parcelles correspondant aux trois modes de fertilisation : fumier de bovins laitiers, lisier de porcs et une fumure minérale. Chaque parcelle a une superficie de 0,125 ha. L'analyse des sols est présentée au tableau 3.3 pour 1997 et 2004, soit au début et à la fin de la présente étude. Les niveaux moyens en 2004 étaient de 3,53 % M.O., 0,16 % N total, 85 kg P/ha, 392 kg K/ha, 2377 kg Ca/ha, 238 kg Mg/ha, 32 kg Na/ha, 1083 mg Al/kg. La méthode Mehlich-3 a été utilisée pour déterminer la teneur en éléments disponibles dans les sols. Le pH à l'eau est de 6,19. La pente moyenne des parcelles est < 1 %.

Tableau 3.1 Fiche descriptive du profil de sol de la série Le Bras utilisé

Horizon	Prof. cm	Sable %	Limon %	Argile %	CEC me/100g
Apgj	0-25	17	63	20	11,55
Aeg	25-38	10	58	32	11,54
Bg	38-56	8	58	34	11,03
Cg1	56-90	5	64	31	8,54
Cg2	90 & +	18	56	26	15,93

Dans le maïs-grain, une dose moyenne annuelle de 150 kg N/ha, 75 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 78 kg K<sub>2</sub>O/ha a été appliquée dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale. Ces engrais ont été fractionnés à la plantation comme démarreur et en bandes en postlevée au stade 4-6 feuilles. Pour les engrais organiques, une dose de 274 kg N total/ha, 146 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 277 kg K<sub>2</sub>O/ha a été appliquée dans la parcelle fertilisée avec du fumier de bovins et de 281 kg N total/ha, 166 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 108 kg K<sub>2</sub>O/ha dans celle fertilisée avec du lisier de porcs. Ces doses incluent une fumure de démarrage N et P de 50 kg N/ha et 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Pour les engrais de ferme, des doses moyennes annuelles de 45 t/ha de fumier de bovins laitiers et de 50 m<sup>3</sup>/ha de lisier de porcs ont été appliquées. Le détail des applications annuelles des engrais est présenté à l'annexe 1. Les engrais organiques ont été appliqués en présemis et incorporé au sol avec un vibroculteur.

Dans l'orge, des doses moyennes annuelles de 76 kg N/ha, 67 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 53 kg K<sub>2</sub>O/ha ont été appliquées dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale. Pour les engrais de ferme, une dose de 222 kg N total/ha, 105 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 272 kg K<sub>2</sub>O/ha a été appliquée dans la parcelle fertilisée avec du fumier de bovins et de 142 kg N/ha, 65 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 65 kg K<sub>2</sub>O/ha dans celle fertilisée avec du lisier de porcs. Pour les engrais de ferme, des doses moyennes annuelles de 50 t/ha de fumier de bovins et de 50 m<sup>3</sup>/ha de lisier de porcs ont été appliquées. Les engrais minéraux ont été appliqués en bandes et incorporés au semis. Les engrais organiques ont été

appliqués en présemis et incorporés avec un vibroculteur. Les doses annuelles d'application de N, P et K sont présentées à l'annexe 1.

Dans le canola, des doses moyennes annuelles de 83 kg N/ha, 58 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 42 kg K<sub>2</sub>O/ha ont été appliquées dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale. Pour les engrais de ferme, une dose de 205 kg N total/ha, 98 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 303 kg K<sub>2</sub>O/ha a été appliquée dans la parcelle fertilisée avec du fumier de bovins et de 110 kg N total/ha, 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 59 kg K<sub>2</sub>O/ha dans celle fertilisée avec du lisier de porcs. Pour les engrais de ferme, des doses moyennes annuelles de 53 t/ha de fumier de bovins et de 50 m<sup>3</sup>/ha de lisier de porcs ont été appliquées. Les engrais minéraux ont été appliqués en bandes et incorporés au semis. Les engrais organiques ont été appliqués en présemis et incorporés avec un vibroculteur. Les doses annuelles d'application de N, P et K sont présentées à l'annexe 1.

Tableau 3.2. Description de la séquence culturale et des modes de fertilisation des parcelles

Traitements	Cultures / Année							
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Fumier de bovins	Canola printemps	Mais-grain	Mais-grain	Orge	Canola printemps	Mais-grain	Mais-grain	Orge
Lisier de porcs	Canola printemps	Mais-grain	Mais-grain	Orge	Canola printemps	Mais-grain	Mais-grain	Orge
Fumure minérale	Canola printemps	Mais-grain	Mais-grain	Orge	Canola printemps	Mais-grain	Mais-grain	Orge

Tableau 3.3 Analyse chimique du sol Le Bras au début (1997) et à la fin de l'expérience (2004)

Année	% N total	% M.O.	pH eau	% P/Al	Mehlich-3						
					P	K	Ca	Mg	Na	Al	
					kg / ha					mg/kg	
Fumure minérale	1997	0,134	2,71	5,71	2,9	74	150	1823	316	34	1154
	2004	0,130	2,66	6,58	3,7	94	155	2614	222	20	1148
Fumier bovins laitiers	1997	0,182	4,06	5,31	0,7	25	300	1521	186	25	1507
	2004	0,209	4,94	5,87	2,2	67	862	1803	231	27	1364
Lisier porcs	1997	0,135	2,72	5,82	2,2	45	148	1958	323	42	916
	2004	0,129	2,98	6,13	5,8	94	159	2713	262	49	736
Moyenne en 2004	0,156	3,53	6,19	3,9	85	392	2377	238	32	1083	

### 3.2 Collecte et mesure des eaux des drains souterrains

Chaque parcelle comporte trois lignes de drains souterrains espacées de 7 mètres, d'une longueur de 25 m à une profondeur d'environ 90 cm. Ces lignes de drains ont été installées en 1988, soit 9 ans avant le début de cette expérience. À l'automne 1996, les lignes d'une même parcelle ont été raccordées et conduites vers un puits où se trouvent des instruments de mesure du volume et des

échantillonneurs d'eau. La mesure du volume est réalisée à l'aide d'augets à bascule d'un litre reliés à un compteur électronique (figure 1). Une petite fraction de l'eau drainée est dirigée en continu par un tube de 0,5 mm de diamètre vers un contenant de 4 litres dans lequel sont prélevés des échantillons de 250 ml une fois par semaine. Ces échantillons sont envoyés au laboratoire agroenvironnemental de l'IRDA pour la détermination hebdomadaire des éléments nutritifs. Les charges perdues aux drains ont été calculées en multipliant le volume d'eau hebdomadaire par la teneur en éléments des échantillons. Les charges annuelles et saisonnières ont été établies en cumulant les charges hebdomadaires pour les périodes concernées. Les données présentées vont du 1<sup>er</sup> mai 1997 au 30 avril 2005. Les concentrations moyennes pondérées annuelles et saisonnières ont été établies en divisant la charge cumulée par le volume d'eau des périodes concernées.

La période dite estivale va du 1<sup>er</sup> mai au 31 août, la période dite automnale du 1<sup>er</sup> septembre au 30 novembre, la période dite hivernale du 1<sup>er</sup> décembre au 28 février et la période dite printanière du 1<sup>er</sup> mars au 30 avril. Ces périodes ont été définies pour tenir compte du cycle des plantes, du calendrier des activités agricoles sur le terrain et des périodes d'activités hydrologiques.

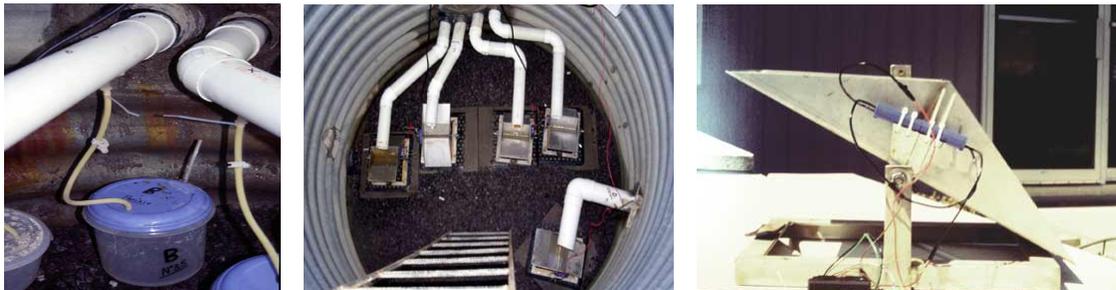


Figure 1 Puits, système de mesure et d'échantillonnage des eaux des drains souterrains

### 3.3 Description de la méthodologie d'analyse des eaux

Les échantillons d'eau sont conservés en chambre froide à 4 °C. Au moment de l'analyse, l'échantillon est centrifugé à 6700 trs/min (5000 g) pendant 10 minutes. La détermination de l'azote total (NT) dissous, incluant les fractions minérales et organiques dissoutes, a été effectuée dans le surnageant centrifugé. L'échantillon subit une digestion par ultraviolet en milieu acide, ce qui permet de transformer les formes d'azote organique dissous (NOD) en  $\text{NH}_4$  et le dosage se fait par colorimétrie sur Technicon. Pour les fractions de N minéral dissous (N min.), on procède directement au dosage des nitrates ( $\text{N-NO}_3$ ) par colorimétrie sur Technicon et de l'ammonium ( $\text{N-NH}_4$ ) sans digestion UV. La différence entre NT et le N min. donne le NOD.

Les éléments K, Ca, Mg et Na dans le surnageant sont dosés par spectrométrie d'émission optique au plasma sur un appareil Perkin Elmer Optima 4300. C'est donc la fraction dissoute de ces éléments qui est présentée dans cette étude.

La détermination du phosphore dissous (PD) est effectuée dans le surnageant centrifugé. L'échantillon subit une digestion par ultraviolet en milieu acide, ce qui permet de transformer les formes de P organique dissous (POD) en orthophosphate. Le dosage se fait par colorimétrie, tel que décrit précédemment, et inclut le P minéral réactif dissous (PRD) et le P organique dissous

(POD). Pour le P minéral réactif dissous (PRD), on procède directement au dosage du P par colorimétrie dans le surnageant centrifugé, sans traitement préalable. La différence entre PD et PRD donne le P organique dissous (POD).

Pour déterminer la teneur en P total (PT) incluant les formes de P particulaire (PP) et le P dissous (PD), l'échantillon d'eau non filtrée est digéré au persulfate de potassium en milieu acide à l'autoclave à 121 °C pendant 35 minutes dans le but de transformer les formes organiques et minérales du P en orthophosphate. Le digestat est ensuite dosé par colorimétrie automatisée sur Technicon AAI par la méthode au molybdate d'ammonium avec l'acide ascorbique comme agent réducteur. La différence entre le P total (PT) et le P dissous (PD) donne le P particulaire (PP).

Nous avons déterminé le P biodisponible (Pbio) dans une aliquote d'eau non filtrée de 3 ml extraite avec 27 ml d'une solution de NaOH 0,11N et agitée horizontalement pendant 17 heures (Sharpley et al. 1991). L'agitation est suivie d'une centrifugation à 10,000 rpm sur centrifugeuse IEC pendant 5 minutes. Le surnageant est dosé par colorimétrie sur Technicon et représente la fraction immédiatement disponible pour les algues dans un milieu aquatique.

Cette détermination a été réalisée dans 12 échantillons d'eau riche en P particulaire provenant de 4 répétitions de chacun des 3 modes de fertilisation des parcelles. Le Pbio représente la somme du phosphore minéral réactif dissous (DRP) plus la fraction biodisponible du P particulaire (BioPP). Pour connaître la fraction BioPP, nous avons appliqué la procédure décrite par Michaud et Laverdière (2004). Le BioPP et le coefficient de biodisponibilité du P particulaire (DPP) ont été calculés pour chaque échantillon par les équations suivantes :

$$(1) \quad DPP = (P_{bio} - PRD) / PP$$

$$(2) \quad BioPP = DPP \times PP$$

Si le coefficient DPP est près de 0, ceci signifie que le P particulaire est peu biodisponible; une valeur près de 1 signifie qu'il est très biodisponible. Connaissant la valeur moyenne de DPP, nous avons calculé les charges annuelles et les concentrations moyennes annuelles pondérées de P biodisponible en appliquant l'équation suivante à tous les échantillons d'eau recueillis aux drains sous prairies.

$$P_{bio} = PRD + (DPP \times PP)$$

Pour plus d'information sur les définitions des fractions de N et P traitées, sur les relations entre ces fractions et sur les abréviations utilisées dans ce document, veuillez consulter la figure 2 et le glossaire à la fin du document.

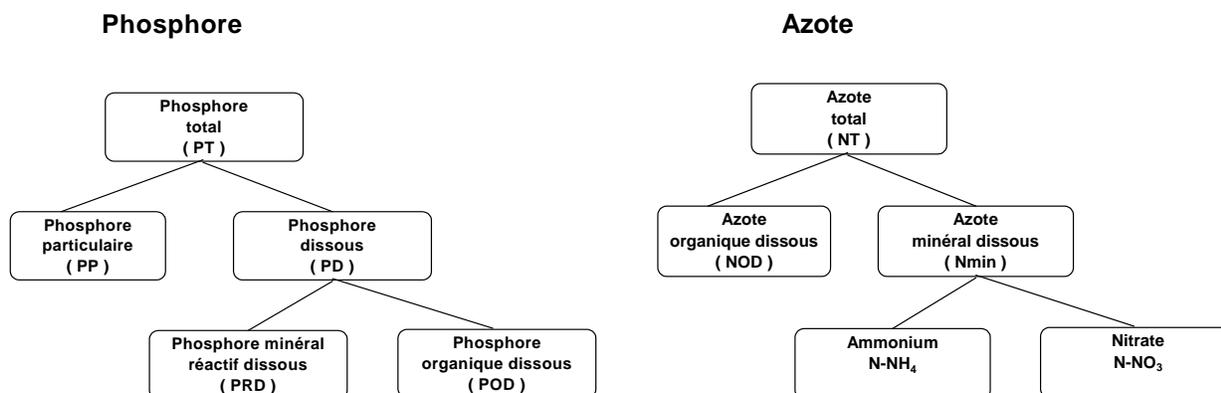


Figure 2 Diagramme représentant les fractions d'azote et de phosphore dosées dans les eaux des drains souterrains

### 3.4 Traitements statistiques

Sous maïs-grain, l'expérience a comporté quatre années de suivi des hauteurs de la lame d'eau drainée, des concentrations et des charges de NT, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, NOD, PD, PRD et POD. Pour PT, PP, P<sub>bio</sub>, K, Ca, Mg et Na, le suivi a porté sur deux années. Une analyse de variance a été effectuée pour déterminer le niveau de probabilité (p) de l'effet des modes de fertilisation et des années sur la hauteur de la lame d'eau drainée, les charges et les concentrations moyennes pondérées des différentes fractions des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains. Un niveau critique de probabilité de  $p = 0,1500$  a été retenu comme représentant un effet significatif, compte tenu du coefficient de variation élevé des mesures de concentration et de charge des éléments nutritifs dans l'eau des drains. Un traitement statistique a également été effectué par période afin de connaître les moments de l'année les plus propices aux pertes.

Pour l'orge, deux années de suivi des concentrations de NT, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, NOD, PD, PRD et POD, de la hauteur de la lame d'eau drainée et des charges annuelles perdues. Pour PT, PP, P<sub>bio</sub>, K, Ca, Mg et Na, le suivi a porté sur une année. Un traitement statistique des charges et des concentrations moyennes pondérées a également été effectué par période afin de connaître les moments de l'année les plus propices aux pertes.

Pour le canola, deux années de suivi des concentrations des éléments ont été réalisées mais une seule année pour la hauteur de la lame d'eau drainée et les charges annuelles perdues. Il n'est donc pas possible d'effectuer une analyse de variance des résultats, ni de déterminer les variations annuelles et saisonnières de ces paramètres dans l'eau des drains.

Un profil de distribution centile des concentrations des différentes fractions des éléments nutritifs a été établi pour chacun des modes de fertilisation pour le maïs-grain, l'orge et le canola. Le centile des concentrations des éléments nutritifs a aussi été établi par période pour ces cultures.

## 4. RÉSULTATS - HAUTEUR DES LAMES D'EAU DRAINÉES

### 4.1 Maïs-grain

La hauteur moyenne de la lame d'eau drainée annuellement dans le maïs-grain a été de 34,25 cm, soit 34,11 cm dans la parcelle fertilisée avec la fumure minérale, 33,94 cm dans celle au fumier de bovins et 34,69 cm dans celle au lisier de porcs (tableau 4.1). Les hauteurs moyennes annuelles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,9322$ ) mais elles diffèrent très significativement selon les années ( $p = 0,0012$ ). La hauteur minimale annuelle a été de 24,46 cm et la hauteur maximale annuelle a été de 46,53 cm. Chaque centimètre d'eau drainée correspond à un volume de 100 000 litres/ha. Un volume annuel moyen d'eau drainée de 3425 m<sup>3</sup>/ha (minimum de 2446 m<sup>3</sup>/ha et maximum de 4653 m<sup>3</sup>/ha) a donc été mesuré.

La hauteur moyenne d'eau drainée a été de 18,40 cm en période printanière, de 4,28 cm en période estivale, de 8,36 cm en période automnale et de 3,21 cm en période hivernale. Pour les dates correspondant à ces périodes, il faut se référer à la section sur la collecte et la mesure des eaux des drains. Il y a une différence très significative dans la hauteur d'eau drainée entre les périodes ( $p < 0,0001$ ), mais il n'y en a pas entre les modes de fertilisation pour une même période ( $p = 0,9816$ ) (tableau 4.2).

Tableau 4.1 Hauteur annuelle de la lame d'eau drainée sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

Modes	Maïs-grain ( 4 ans )	
	Hauteur ( cm )	
Fumure minérale	34,11 a	Min.: 25,44 Max.: 46,53
Fumier bovins	33,94 a	Min.: 24,46 Max.: 39,66
Lisier porcs	34,69 a	Min.: 25,40 Max.: 46,39

Moyenne :	34,25
p>F Modes	0,9322
p>F Années	0,0012
C.V. %	8,55

Tableau 4.2 Hauteur de la lame d'eau drainée sous le maïs-grain selon les périodes et les modes de fertilisation.

		Mais-grain ( 4 ans )
		Hauteur cm
Période		
Fumure minérale	Estivale	4,31
	Automnale	7,93
	Hivernale	3,31
	Printanière	18,56
Fumier bovins	Estivale	4,61
	Automnale	9,01
	Hivernale	2,92
	Printanière	17,40
Lisier porcs	Estivale	3,93
	Automnale	8,13
	Hivernale	3,41
	Printanière	19,23

p>F Modes	0,9816
p>F Périodes	<0,0001
p>F Modes x périodes	0,9685

## 4.2 Orge

La hauteur moyenne de la lame d'eau drainée annuellement dans l'orge a été de 38,24 cm, soit 38,19 cm dans la parcelle fertilisée avec la fumure minérale, 36,95 cm dans celle au fumier de bovins et 39,58 cm dans celle au lisier de porcs (tableau 4.3). Les hauteurs moyennes annuelles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,2096$ ) mais elles diffèrent significativement selon les années ( $p < 0,0230$ ). La hauteur minimale annuelle a été de 34,46 cm et la hauteur maximale annuelle a été de 42,80 cm. Un volume annuel moyen d'eau drainée de 3824 m<sup>3</sup>/ha (minimum de 3446 m<sup>3</sup>/ha et maximum de 4280 m<sup>3</sup>/ha) a été mesuré.

La hauteur moyenne d'eau drainée a été de 22,59 cm en période printanière, de 5,98 cm en période estivale, de 7,16 cm en période automnale et de 2,50 cm en période hivernale. Pour les dates correspondant à ces périodes, il faut se référer à la section sur la collecte et la mesure des eaux des drains. Il y a une différence très significative dans la hauteur d'eau drainée entre les périodes ( $p < 0,0001$ ), mais il n'y en a pas entre les modes de fertilisation pour une même période ( $p = 0,7641$ ) (tableau 4.4).

Tableau 4.3 Hauteur annuelle de la lame d'eau drainée sous l'orge selon les modes de fertilisation

		Orge ( 2 ans )	
Modes	Hauteur ( cm )		
Fumure minérale	38,19 a	Min, : 36,31	Max, : 40,06
Fumier bovins	36,95 a	Min, : 34,46	Max, : 39,44
Lisier porcs	39,58 a	Min, : 36,35	Max, : 42,80
Moyenne :	38,24		
p>F Modes	0,2096		
p>F Années	0,0230		
C.V. %	2,49		

Tableau 4.4 Hauteur de la lame d'eau drainée sous l'orge selon les périodes et les modes de fertilisation.

		orge ( 2 ans )	
		Période	Hauteur cm
Fumure minérale	Estivale		6,26
	Automnale		6,67
	Hivernale		2,17
	Printanière		23,10
Fumier bovins	Estivale		5,80
	Automnale		7,05
	Hivernale		2,44
	Printanière		21,65
Lisier porcs	Estivale		5,88
	Automnale		7,77
	Hivernale		2,89
	Printanière		23,03
p>F Modes		0,7641	
p>F Périodes		<0,0001	
p>F Modes x périodes		0,9760	

### 4.3 Canola

La hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau drainée dans le canola a été de 33,56 cm, soit 37,00 cm dans la parcelle fertilisée avec la fumure minérale, 29,27 cm dans celle au fumier de bovins et 34,40 cm dans celle au lisier de porcs (tableau 4.5).

La hauteur d'eau drainée a été de 18,32 cm en période printanière, de 3,53 cm en période estivale, de 10,66 cm en période automnale et de 1,06 cm en période hivernale (tableau 4.6).

Tableau 4.5 Hauteur annuelle de la lame d'eau drainée sous le canola selon les modes de fertilisation

		Canola ( 1 an )
Modes	Hauteur ( cm )	
Fumure minérale	37,00	
Fumier bovins	29,27	
Lisier porcs	34,40	
Moyenne :	33,56	

Tableau 4.6 Hauteur de la lame d'eau drainée sous le canola selon les périodes et les modes de fertilisation.

		Canola ( 1 an )
		Hauteur cm
		Période
Fumure minérale	Estivale	3,96
	Automnale	12,08
	Hivernale	1,30
	Printanière	19,67
Fumier bovins	Estivale	3,44
	Automnale	8,65
	Hivernale	1,04
	Printanière	16,15
Lisier porcs	Estivale	3,19
	Automnale	11,25
	Hivernale	0,83
	Printanière	19,14

## 5. RÉSULTATS- CONCENTRATIONS ET CHARGES PERDUES AUX DRAINS

### 5.1 Azote total dissous

#### 5.1.1 Maïs-grain

Les charges moyennes annuelles d'azote total (NT) dissous perdu aux drains sous maïs-grain sont respectivement de 34,6 kg N/ha avec la fumure minérale, de 42,5 kg N/ha avec le fumier de bovins et de 64,5 kg N/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.1). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0103$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Elles sont plus élevées avec les fumures organiques, particulièrement avec le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NT aux drains sont respectivement de 10,94 mg N/L pour la fumure minérale, de 13,44 mg N/L pour le fumier de bovins et de 20,46 mg

N/L pour le lisier de porcs (tableau 5.2). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,1011$ ) et les années ( $p = 0,0105$ ). Elles sont plus élevées avec les engrais organiques, particulièrement avec le lisier de porcs.

Les valeurs de NT ont été significativement différentes entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0021$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p < 0,0001$ ) (annexes 2 et 3). Les pertes de NT surviennent surtout au printemps et à l'automne. Les concentrations NT sont plus faibles pendant la période printanière.

Tableau 5.1 Charges moyennes annuelles d'azote perdu aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

	4 ans							
	N-NH <sub>4</sub> g/ha		N-NO <sub>3</sub> kg/ha		NOD kg/ha		NT dissous kg/ha	
Fumure minérale	282 ab	Min.: 173 Max.: 518	30,9 b	Min.: 18 Max.: 48	3,39 ab	Min.: 1.25 Max.: 6.37	35 b	Min.: 19 Max.: 54
Fumier bovins	214 b	Min.: 102 Max.: 392	40,0 ab	Min.: 25 Max.: 56	2,31 b	Min.: 1.05 Max.: 3.70	43 ab	Min.: 27 Max.: 60
Lisier porcs	380 a	Min.: 104 Max.: 709	61,2 a	Min.: 34 Max.: 105	5,95 a	Min.: 3.27 Max.: 9.84	65 a	Min.: 37 Max.: 110
p>F Modes	0,1021		0,0471		0,0558		0,0365	
p>F Années	0,0056		0,0214		0,1244		0,0150	
C.V. %	30,97		29,34		43,76		26,54	

Tableau 5.2 Concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

	4 ans			
	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT dissous
	mg/L			
Fumure minérale	0,079 a	12,66 a	1,12 ab	10,94 a
Fumier bovins	0,060 a	9,75 a	0,73 b	13,44 a
Lisier porcs	0,101 a	19,03 a	1,71 a	20,46 a
p>F Modes	0,1306	0,1178	0,0436	0,1011
p>F Années	0,0365	0,0150	0,0277	0,0105
C.V. %	29,94	38,93	35,57	35,59

### 5.1.2 Orge

Les charges moyennes annuelles d'azote total (NT) dissous perdu aux drains sous l'orge sont respectivement de 21,0 kg N/ha avec la fumure minérale, de 24,5 kg N/ha avec le fumier de bovins et de 41,4 kg N/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.3). Elles sont significativement

différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0078$ ), mais ne le sont pas entre les années ( $p = 0,4824$ ). Elles sont plus élevées avec le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NT sont respectivement de 5,53 mg N/L pour la fumure minérale, de 6,45 mg N/L pour le fumier de bovins et de 10,39 mg N/L pour le lisier de porcs (tableau 5.4). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,0077$ ) et les années ( $p = 0,0969$ ). Elles sont plus élevées avec le lisier de porcs.

Les valeurs de NT ont été significativement différentes entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0001$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,0251$ ) (annexes 4 et 5). Celles-ci sont plus élevées pour la période estivale.

Tableau 5.3 Charges moyennes annuelles d'azote perdu aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

	2 ans							
	N-NH <sub>4</sub> g/ha		N-NO <sub>3</sub> kg/ha		NOD kg/ha		NT dissous kg/ha	
Fumure minérale	296 b	Min.: 77 Max.: 514	18,7 b	Min.: 17 Max.: 20	2.02 a	Min.: 1.43 Max.: 2.61	21,0 b	Min.: 20 Max.: 22
Fumier bovins	219 b	Min.: 112 Max.: 326	20,7 b	Min.: 20 Max.: 21	2.89 a	Min.: 1.70 Max.: 4.08	23,8 b	Min.: 23 Max.: 25
Lisier porcs	703 a	Min.: 467 Max.: 940	37,0 a	Min.: 37 Max.: 37	2.87 a	Min.: 2.39 Max.: 3.34	40,9 a	Min.: 40 Max.: 42
p>F Modes	0,0672		0,0088		0,3754		0,0078	
p>F Années	0,0434		0,5342		0,0770		0,4824	
C.V. %	24,34		5,27		20,95		4,73	

Tableau 5.4 Concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

	2 ans			
	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT dissous
	mg/L			
Fumure minérale	0,075 b	4,93 b	0,53 a	5,53 b
Fumier bovins	0,058 b	5,63 b	0,76 a	6,45 b
Lisier porcs	0,174 a	9,42 a	0,72 a	10,39 a
p>F Modes	0,0504	0,0022	0,4224	0,0077
p>F Années	0,0380	0,0132	0,1345	0,0969
C.V. %	20,10	2,43	22,75	4,33

### 5.1.3 Canola

Les charges annuelles d'azote total (NT) dissous perdu aux drains sous le canola sont respectivement de 24,0 kg N/ha avec la fumure minérale, de 31,4 kg N/ha avec le fumier de

bovins et de 35,0 kg N/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.5). Les mesures des charges n'ont été effectuées que pour l'année 2001. Elles sont plus élevées avec les fumures organiques qu'avec la fumure minérale.

Les concentrations annuelles pondérées de NT sont respectivement de 6,50 mg N/L pour la fumure minérale, de 10,74 mg N/L pour le fumier de bovins et de 10,17 mg N/L pour le lisier de porcs (tableau 5.6). Elles sont plus élevées avec les engrais organiques qu'avec la fumure minérale. Les valeurs des concentrations et des charges de NT entre les périodes de l'année tendent à être plus élevées en période printanière (annexes 6 et 7).

Tableau 5.5 Charges moyennes annuelles d'azote perdu aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation

	1 an			
	N-NH <sub>4</sub> g/ha	N-NO <sub>3</sub> kg/ha	NOD kg/ha	NT dissous kg/ha
Fumure minérale	49	22,54	1,45	24,04
Fumier bovins	68	29,72	1,64	31,42
Lisier porcs	146	32,55	2,39	35,00

Tableau 5.6 Concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

	1 an			
	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT dissous
mg/L				
Fumure minérale	0,013	6,09	0,39	6,50
Fumier bovins	0,023	10,16	0,56	10,74
Lisier porcs	0,042	9,46	0,69	10,17

## 5.2 Azote nitrique

### 5.2.1 Maïs-grain

Les charges moyennes annuelles de nitrate (N-NO<sub>3</sub>) perdu aux drains sous maïs-grain sont respectivement de 30,9 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec la fumure minérale, de 40,0 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le fumier de bovins et de 61,2 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.1). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation (p = 0,0089) et les années (p = 0,0002). Elles demeurent dans l'ensemble assez élevées pour tous les modes de fertilisation, spécialement pour le lisier de porcs. Les nitrates constituent la plus importante fraction de l'azote total dissous perdu, soit 89,3 % pour la fumure minérale, 94,1 % pour le fumier de bovins et de 94,9 % pour le lisier de porcs. La figure 3 présente les pertes moyennes annuelles d'azote aux

drains sous maïs-grain selon les modes de fertilisation et les formes sous lesquelles cet azote est perdu.

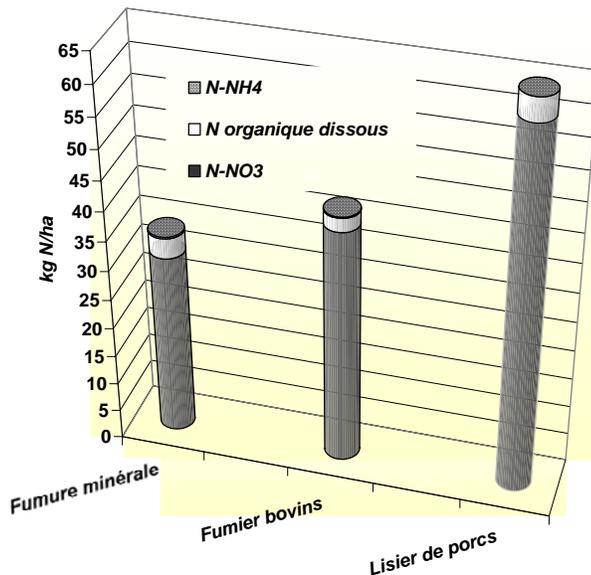


Figure 3 Pertes annuelles des formes d'azote aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de nitrate sont respectivement de 12,66 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour la fumure minérale, de 9,75 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de bovins laitiers et de 19,03 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le lisier de porcs (tableau 5.2). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,1178$ ) et les années ( $p = 0,0150$ ). Elles sont près du critère maximal pour la potabilité de l'eau qui est de 10 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour la fumure minérale et le fumier de bovins et deux fois plus élevées pour le lisier de porcs.

Les nitrates mesurés ont été significativement différents entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0042$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p < 0,0001$ ) (annexes 2 et 3). Les pertes surviennent particulièrement à l'automne et au printemps. Les concentrations printanières sont plus faibles mais les volumes d'eau drainés sont plus élevés.

### 5.2.2 Orge

Les charges moyennes annuelles de nitrate (N-NO<sub>3</sub>) perdu aux drains sous l'orge sont respectivement de 18,7 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec la fumure minérale, de 20,7 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le fumier de bovins et de 37,0 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.3). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0088$ ), mais ne le sont pas entre les années ( $p = 0,5342$ ). Elles demeurent dans l'ensemble modérées pour tous les modes de fertilisation mais plus élevées avec le lisier de porcs. Les nitrates constituent la plus importante fraction de l'azote total dissous perdu, soit 90,5 % pour la fumure minérale, 87,5 % pour le fumier de bovins et 90,2 % pour le lisier de porcs. La figure 4 présente les pertes moyennes

annuelles d'azote aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation et les formes sous lesquelles cet azote est perdu.

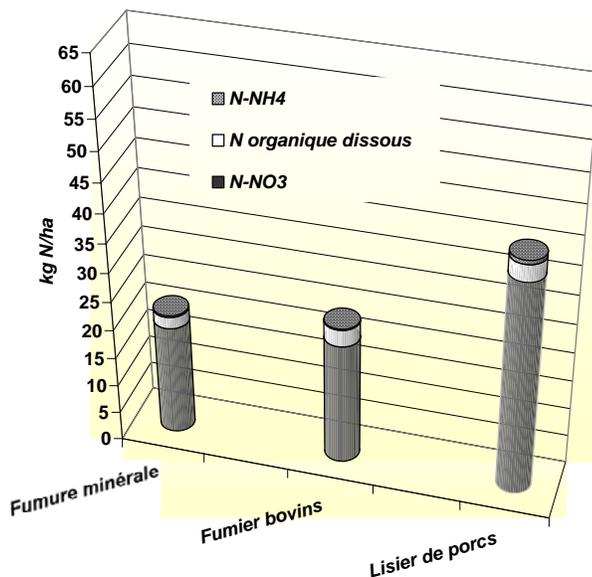


Figure 4 Pertes annuelles des formes d'azote aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de nitrate sont respectivement de 4,93 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour la fumure minérale, de 5,63 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de bovins laitiers et de 9,42 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le lisier de porcs (tableau 5.4). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0022$ ) et les années ( $p = 0,0132$ ). Elles sont en bas du critère de potabilité de l'eau qui est de 10 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour la fumure minérale et le fumier de bovins et près du critère pour le lisier de porcs.

Les nitrates mesurés ont été significativement différents entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0066$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,0731$ ) (annexes 4 et 5). Les charges perdues sont plus élevées au printemps. Des pertes estivales appréciables ont également été mesurées.

### 5.2.3 Canola

Les charges annuelles de nitrate (N-NO<sub>3</sub>) perdu aux drains sous le canola sont respectivement de 22,5 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec la fumure minérale, de 29,7 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le fumier de bovins et de 32,6 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.5). Elles demeurent dans l'ensemble modérées et semblables à celles de l'orge pour tous les modes de fertilisation. Les nitrates constituent la plus importante fraction de l'azote total dissous perdu, soit 76,1 % pour la fumure minérale, 96,9 % pour le fumier de bovins et 94,3 % pour le lisier de porcs. La figure 5 présente les pertes annuelles d'azote aux drains sous canola selon les modes de fertilisation et les formes sous lesquelles cet azote est perdu.

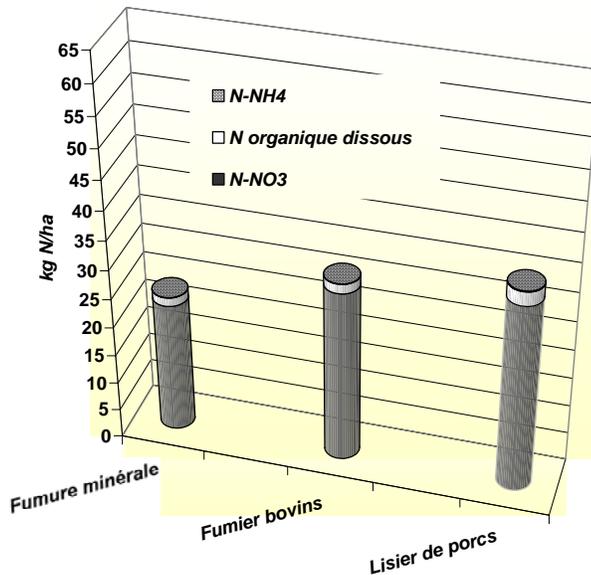


Figure 5 Pertes annuelles des formes d'azote aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation

Les concentrations annuelles pondérées de nitrate aux drains sont respectivement de 6,09 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour la fumure minérale, de 10,16 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de bovins laitiers et de 9,46 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le lisier de porcs (tableau 5.6). Elles sont nettement en bas du critère de potabilité de l'eau avec la fumure minérale et près du critère pour les fumures organiques. Ceci démontre que le canola contribue modérément aux pertes de nitrate dans les eaux. Les charges se produisent au printemps et à l'automne (annexes 6 et 7).

### 5.3 Azote ammoniacal

#### 5.3.1 Maïs-grain

Les charges moyennes annuelles d'azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>) perdu aux drains sous maïs-grain sont de 282 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour la fumure minérale, de 213 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour le fumier de bovins et de 380 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.1). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0807$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Les pertes d'azote ammoniacal constituent une très faible fraction de l'azote total dissous perdu aux drains. Elles représentent 0,82 % des pertes totales d'azote pour la fumure minérale, 0,50 % pour le fumier de bovins et 0,59 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote ammoniacal aux drains sont de 0,079 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour la fumure minérale, de 0,060 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour le fumier de bovins et de 0,101 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour le lisier de porcs (tableau 5.2). Elles sont statistiquement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,1306$ ) et les années ( $p = 0,0365$ ).

L'azote ammoniacal mesuré a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0002$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,2751$ ) (annexes 2 et 3). Les charges sont nettement plus élevées

pour la période printanière. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale.

### **5.3.2 Orge**

Les charges moyennes annuelles d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4$ ) perdu aux drains sous l'orge sont de 296 g  $\text{N-NH}_4/\text{ha}$  pour la fumure minérale, de 219 g  $\text{N-NH}_4/\text{ha}$  pour le fumier de bovins et de 703 g  $\text{N-NH}_4/\text{ha}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.3). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0672$ ) et les années ( $p = 0,0434$ ). Les pertes d'azote ammoniacal constituent une très faible fraction de l'azote total dissous perdu aux drains. Elles représentent 1,41 % des pertes totales d'azote pour la fumure minérale, 0,91 % pour le fumier de bovins et 1,71 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote ammoniacal aux drains sont de 0,075 mg  $\text{N-NH}_4/\text{L}$  pour la fumure minérale, de 0,058 mg  $\text{N-NH}_4/\text{L}$  pour le fumier de bovins et de 0,174 mg  $\text{N-NH}_4/\text{L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.4). Elles sont statistiquement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0504$ ) et les années ( $p = 0,0380$ ).

L'azote ammoniacal mesuré a été significativement différent entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0025$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,0005$ ) (annexes 4 et 5). Les pertes sont survenues pendant les périodes estivales et printanières. Les concentrations moyennes pondérées saisonnières ont été plus élevées en période estivale.

### **5.3.3 Canola**

Les charges annuelles d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4$ ) perdu aux drains sous canola sont de 49 g  $\text{N-NH}_4/\text{ha}$  pour la fumure minérale, de 68 g  $\text{N-NH}_4/\text{ha}$  pour le fumier de bovins et de 146 g  $\text{N-NH}_4/\text{ha}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.5). Les pertes d'azote ammoniacal constituent une très faible fraction de l'azote total dissous perdu aux drains. Elles représentent 0,20 % des pertes totales d'azote pour la fumure minérale, 0,22 % pour le fumier de bovins et 0,42 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations annuelles pondérées d'azote ammoniacal aux drains sont de 0,013 mg  $\text{N-NH}_4/\text{L}$  pour la fumure minérale, de 0,023 mg  $\text{N-NH}_4/\text{L}$  pour le fumier de bovins et de 0,042 mg  $\text{N-NH}_4/\text{L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.6).

Les charges de l'azote ammoniacal mesuré ont été plus élevées en période printanière pour le lisier de porcs et en période automnale pour les autres modes (annexes 6 et 7). Les concentrations sont plus élevées en période printanière pour le lisier de porcs, en période estivale pour le fumier de bovins et en période automnale pour la fumure minérale.

## **5.4 Azote organique dissous**

### **5.4.1 Maïs-grain**

Les charges moyennes annuelles d'azote organique dissous (NOD) perdu aux drains sous maïs-grain sont de 3,4 kg N/ha pour la fumure minérale, de 2,3 kg N/ha pour le fumier de bovins et de

6,0 kg N/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.1). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0558$ ) et les années ( $p = 0,1244$ ). Les pertes d'azote organique dissous représentent 9,8 % de l'azote total dissous perdu aux drains pour la fumure minérale, 5,4 % pour le fumier de bovins et 9,3 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NOD sont de 1,12 mg N/L pour la fumure minérale, de 0,73 mg N/L pour le fumier de bovins et de 1,71 mg N/L pour le lisier de porcs (tableau 5.2). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0436$ ) et les années ( $p = 0,0277$ ).

Les mesures de NOD ont été significativement différentes entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0011$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,1089$ ) (annexes 2 et 3). Les charges sont souvent plus élevées en période printanière. Les concentrations sont plus élevées en période estivale.

#### **5.4.2 Orge**

Les charges moyennes annuelles d'azote organique dissous (NOD) perdu aux drains sous l'orge sont de 2,02 kg N/ha pour la fumure minérale, de 2,89 kg N/ha pour le fumier de bovins et de 2,87 kg N/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.3). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,3754$ ) mais le sont entre les années ( $p = 0,0770$ ). Les pertes d'azote organique dissous représentent 9,6 % de l'azote total dissous perdu pour la fumure minérale, 12,0 % pour le fumier de bovins et 7,0 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NOD sont de 0,53 mg N/L pour la fumure minérale, de 0,76 mg N/L pour le fumier de bovins et de 0,72 mg N/L pour le lisier de porcs (tableau 5.4). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,4224$ ) mais diffèrent entre les années ( $p = 0,1345$ ).

Les mesures de NOD ont été significativement différentes entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0028$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,0769$ ) (annexes 4 et 5). Les charges sont plus élevées pour la période printanière pour tous les modes de fertilisation.

#### **5.4.3 Canola**

Les charges annuelles d'azote organique dissous (NOD) perdu aux drains sous canola sont de 1,45 kg N/ha pour la fumure minérale, de 1,64 kg N/ha pour le fumier de bovins et de 2,39 kg N/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.5). Les pertes d'azote organique dissous représentent 6,3 % de l'azote total dissous pour la fumure minérale, 5,1 % pour le fumier de bovins et 7,1 % pour la fumure minérale.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NOD aux drains sont de 0,39 mg N/L pour la fumure minérale, de 0,56 mg N/L pour le fumier de bovins et de 0,69 mg N/L pour le lisier de porcs (tableau 5.6).

Les charges de NOD sont souvent plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation (annexes 6 et 7).

## 5.5 Phosphore total

### 5.5.1 Mais-grain

Les charges moyennes annuelles de phosphore total (PT) perdu aux drains sous maïs-grain sont de 1560 g P/ha pour la fumure minérale, de 876 g P/ha pour le fumier de bovins et de 1271 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.7). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,5109$ ) mais le sont entre les années ( $p = 0,1371$ ). Ces charges sont relativement importantes et seraient associées à des écoulements préférentiels aux drains.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PT sont de 401  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 280  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 342  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.8). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,3946$ ) et les années ( $p = 0,5689$ ).

Les mesures de PT ont été significativement différentes entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0230$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p < 0,6198$ ) (annexes 8 et 9). Les charges sont perdues principalement en période printanière.

Tableau 5.7 Charges moyennes annuelles de phosphore perdu aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

	4 ans						2 ans					
	PD		PRD		POD		PP		PT		Pbio	
	g/ha											
Fumure minérale	127 b	Min.: 85 Max.: 209	82 ab	Min.: 36 Max.: 156	45 a	Min.: 19 Max.: 60	1413 a	Min.: 647 Max.: 2179	1560 a	Min.: 732 Max.: 2388	593 a	Min.: 287 Max.: 900
Fumier bovins	109 b	Min.: 55 Max.: 162	68 b	Min.: 35 Max.: 119	40 a	Min.: 20 Max.: 56	768 a	Min.: 694 Max.: 841	876 a	Min.: 749 Max.: 1003	300 a	Min.: 237 Max.: 363
Lisier porcs	186 a	Min.: 96 Max.: 277	133 a	Min.: 47 Max.: 219	52 a	Min.: 25 Max.: 91	1084 a	Min.: 662 Max.: 1506	1271 a	Min.: 758 Max.: 1784	523 a	Min.: 302 Max.: 744
p>F Modes	0,0124		0,0711		0,5217		0,5348		0,5109		0,3932	
p>F Années	0,0024		0,0140		0,0458		0,1700		0,1371		0,1096	
C.V. %	18,17		35,24		30,92		44,97		40,18		36,97	

Tableau 5.8 Concentrations moyennes annuelles pondérées de phosphore dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

	4 ans			2 ans		
	PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
µg/L						
Fumure minérale	36 b	23 ab	13 a	362 a	401 a	153 a
Fumier bovins	31 b	19 b	12 a	248 a	280 a	95 a
Lisier porcs	52 a	37 a	15 a	293 a	342 a	140 a
p>F Modes	0,0070	0,0792	0,5002	0,6086	0,3946	0,3245
p>F Années	0,0289	0,0697	0,0560	0,4937	0,5689	0,2535
C.V. %	15,44	34,94	30,22	33,51	28,86	23,31

### 5.5.2 Orge

Les charges moyennes annuelles de phosphore total (PT) perdu aux drains sous l'orge sont de 1556 g P/ha pour la fumure minérale, de 1672 g P/ha pour le fumier de bovins et de 1112 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.9). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,7220$ ) mais le sont entre les années ( $p = 0,0655$ ). Ces charges sont relativement importantes et seraient associées à des écoulements préférentiels aux drains.

Les concentrations moyennes pondérées de PT sont de 402 µg P/L pour la fumure minérale, de 427 µg P/L pour le fumier de bovins et de 261 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.10). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,6680$ ) mais diffèrent selon les années ( $p = 0,0788$ ).

Les mesures de PT ont été significativement différentes entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0098$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,2770$ ) (annexes 10 et 11). Les charges sont plus élevées en période printanière.

Tableau 5.9 Charges moyennes annuelles de phosphore perdu aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

	2 ans											
	PD		PRD		POD		PP		PT		Pbio	
	g/ha											
Fumure minérale	159 a	Min.: 119 Max.: 199	111 a	Min.: 78 Max.: 144	46 a	Min.: 36 Max.: 56	1509 a	Min.: 1126 Max.: 1892	1556 a	Min.: 1020 Max.: 2092	605 a	Min.: 422 Max.: 789
Fumier bovins	187 a	Min.: 154 Max.: 221	102 a	Min.: 94 Max.: 109	86 a	Min.: 45 Max.: 127	1614 a	Min.: 289 Max.: 2939	1672 a	Min.: 183 Max.: 3160	538 a	Min.: 128 Max.: 948
Lisier porcs	205 a	Min.: 118 Max.: 292	159 a	Min.: 93 Max.: 224	46 a	Min.: 25 Max.: 68	999 a	Min.: 139 Max.: 1859	1112 a	Min.: 72 Max.: 2151	473 a	Min.: 73 Max.: 872
p>F Modes	0,6151		0,5876		0,3242		0,6721		0,7220		0,7877	
p>F Années	0,0865		0,2877		0,1195		0,0878		0,0655		0,0462	
C.V. %	22,46		41,73		37,82		48,48		46,58		33,53	

Tableau 5.10 Concentrations moyennes annuelles pondérées de phosphore dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

	2 ans					
	PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
	µg/L					
Fumure minérale	41 a	29 a	12 a	391 a	402 a	157 a
Fumier bovins	50 a	28 a	23 a	415 a	427 a	139 a
Lisier porcs	50 a	39 a	11 a	236 a	261 a	112 a
p>F Modes	0,5968	0,6617	0,2728	0,6236	0,6680	0,6825
p>F Années	0,1020	0,3862	0,1395	0,1062	0,0788	0,0543
C.V. %	19,17	38,82	35,83	50,85	49,38	34,21

### 5.5.3 Canola

Les charges annuelles de phosphore total (PT) perdu aux drains sous le canola sont de 1063 g P/ha pour la fumure minérale, de 809 g P/ha pour le fumier de bovins et de 650 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.11). Ces charges sont relativement importantes et seraient associées à des écoulements préférentiels aux drains.

Les concentrations moyennes pondérées de PT sont de 287 µg P/L pour la fumure minérale, de 277 µg P/L pour le fumier de bovins et de 189 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.12). Les charges et les concentrations sont plus élevées en période printanière (annexes 12 et 13).

Tableau 5.11 Charges moyennes annuelles de phosphore perdu aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation

	1 an					
	PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
	g/ha					
Fumure minérale	81	46	35	982	1063	381
Fumier bovins	81	42	39	729	809	253
Lisier porcs	70	43	28	579	650	245

Tableau 5.12 Concentrations moyennes annuelles pondérées de phosphore dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

	1 an					
	PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
	µg/L					
Fumure minérale	21,80	12,40	9,40	265	287	103
Fumier bovins	27,60	14,20	13,30	249	277	87
Lisier porcs	20,50	12,40	8,10	168	189	71

## 5.6 Phosphore particulaire

### 5.6.1 Maïs-grain

Les charges moyennes annuelles de phosphore particulaire (PP) perdu aux drains sous maïs-grain sont de 1413 g P/ha pour la fumure minérale, de 768 g P/ha pour le fumier de bovins et de 1084 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.7). Elle ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,5348$ ) et les années ( $p = 0,1700$ ). Le PP constitue la plus forte fraction des pertes totales de P aux drains. Il représente 90,6 % des pertes totales pour la fumure minérale, 87,7 % pour le fumier de bovins et 85,3 % pour le lisier de porcs. La figure 6 présente les pertes moyennes annuelles de phosphore aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation et les formes sous lesquelles ce phosphore est perdu.

Les concentrations moyennes pondérées de PP sont de 362 µg P/L pour la fumure minérale, de 248 µg P/L pour le fumier de bovins et de 293 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.8). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,6086$ ) et les années ( $p = 0,4937$ ).

Le PP mesuré sous maïs-grain a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0432$ ) mais pas pour les concentrations moyennes

pondérées saisonnières ( $p = 0,6191$ ) (annexes 8 et 9). Les charges printanières sont plus élevées pour tous les modes de fertilisation.

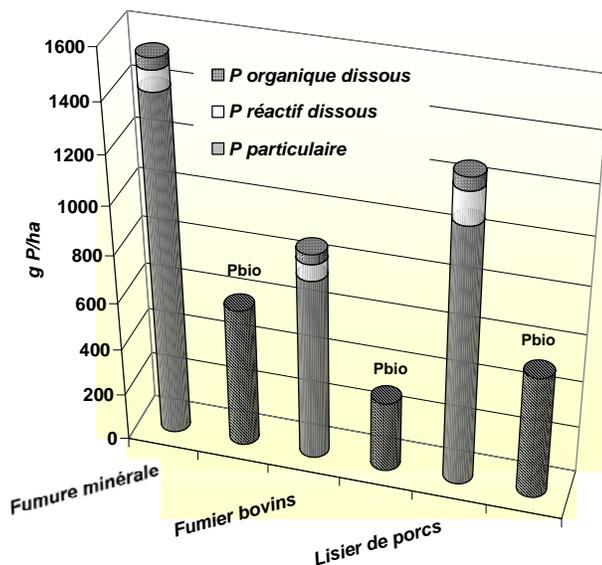


Figure 6 Pertes annuelles des formes de phosphore aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

### 5.6.2 Orge

Les charges moyennes annuelles de phosphore particulaire (PP) perdu aux drains sous l'orge sont de 1509 g P/ha pour la fumure minérale, de 1614 g P/ha pour le fumier de bovins et de 999 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.9). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,6721$ ) mais elles le sont entre les années ( $p = 0,0878$ ). Le PP constitue la plus forte fraction des pertes totales de P aux drains. Il représente 97,0 % pour la fumure minérale, 96,5 % pour le fumier de bovins et 89,8 % pour le lisier de porcs. La figure 7 présente les pertes moyennes annuelles de phosphore aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation et les formes sous lesquelles ce phosphore est perdu.

Les concentrations moyennes pondérées de PP sont de 391  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 415  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 236  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.10). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,6236$ ) mais elles diffèrent entre les années ( $p = 0,1062$ ).

Le PP mesuré sous l'orge a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0047$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,3859$ ) (annexes 10 et 11). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

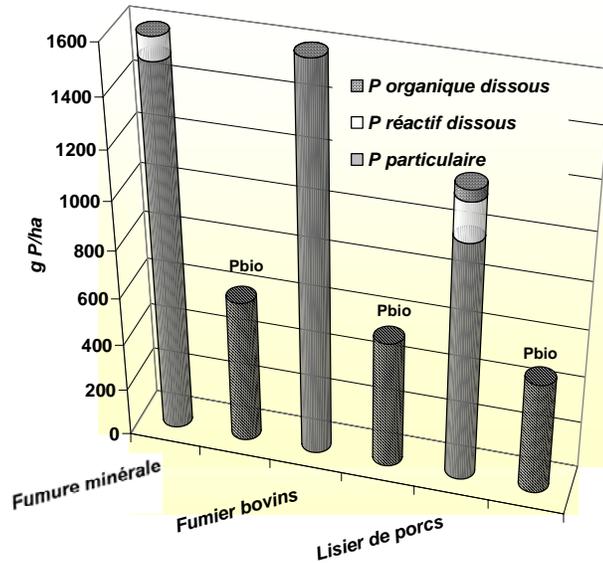


Figure 7 Pertes annuelles des formes de phosphore aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

### 5.6.3 Canola

Les charges annuelles de phosphore particulaire (PP) perdu aux drains sous canola sont de 982 g P/ha pour la fumure minérale, de 729 g P/ha pour le fumier de bovins et de 579 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.11). Le PP constitue la plus forte fraction des pertes totales de P aux drains. Il représente 92,4 % des pertes totales de P pour la fumure minérale, 90,1 % pour le fumier de bovins et 89,1 % pour le lisier de porcs. La figure 8 présente les pertes moyennes annuelles de phosphore aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation et les formes sous lesquelles ce phosphore est perdu.

Les concentrations moyennes pondérées de PP aux drains sont de 265 µg P/L pour la fumure minérale, de 249 µg P/L pour le fumier de bovins et de 168 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.12).

Les charges de PP sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation (annexes 12 et 13).

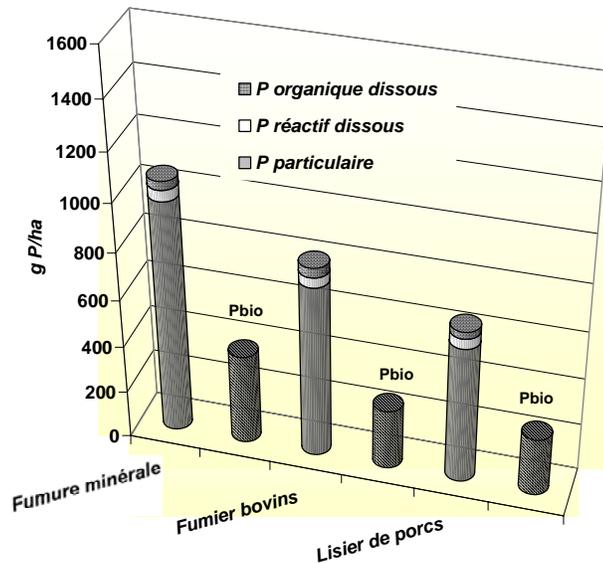


Figure 8 Pertes annuelles des formes de phosphore aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation

## 5.7 Phosphore dissous

### 5.7.1 Maïs-grain

Les charges moyennes annuelles de phosphore dissous (PD) perdu aux drains sous maïs-grain sont de 127 g P/ha pour la fumure minérale, de 109 g P/ha pour le fumier de bovins et de 186 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.7). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0124$ ) et les années ( $p = 0,0024$ ).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PD sont de 36  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 31  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 52  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.8). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0070$ ) et les années ( $p = 0,0289$ ).

Les mesures de PD ont été significativement différentes entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0001$ ) et pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,1390$ ) (annexes 8 et 9). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

### 5.7.2 Orge

Les charges moyennes annuelles de phosphore dissous (PD) perdu aux drains sous l'orge sont de 159 g P/ha pour la fumure minérale, de 187 g P/ha pour le fumier de bovins et de 205 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.9). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,6151$ ) mais le sont entre les années ( $p = 0,0865$ ).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PD sont de 41  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 50  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 50  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (tableau

5.10). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,5968$ ) mais diffèrent selon les années ( $p = 0,1020$ ).

Les mesures de PD ont été significativement différentes entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0001$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,2365$ ) (annexes 10 et 11). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

### **5.7.3 Canola**

Les charges moyennes annuelles de phosphore dissous (PD) perdu aux drains sous le canola sont de 81 g P/ha pour la fumure minérale, de 81 g P/ha pour le fumier de bovins et de 70 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.11).

Les concentrations moyennes pondérées de PD sont de 22  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 28  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 21  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.12). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation (annexes 12 et 13).

## **5.8 Phosphore minéral réactif dissous**

### **5.8.1 Maïs-grain**

Les charges moyennes annuelles de phosphore minéral réactif dissous (PRD) perdu aux drains sous maïs-grain sont de 82 g P/ha pour la fumure minérale, de 68 g P/ha pour le fumier de bovins et de 133 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.7). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0711$ ) et les années ( $p = 0,0140$ ). Les pertes de PRD représentent 64,5 % du phosphore dissous pour la fumure minérale, 62,4 % pour le fumier de bovins et 71,5 % pour le lisier de porcs. Le PRD constitue la plus forte proportion du P dissous aux drains.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PRD sont de 23  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 19  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 37  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.8). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0792$ ) et les années ( $p = 0,0697$ ).

Le PRD a été significativement différent entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0001$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,0729$ ) (annexes 8 et 9). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

### **5.8.2 Orge**

Les charges moyennes annuelles de phosphore minéral réactif dissous (PRD) perdu aux drains sous l'orge sont de 111 g P/ha pour la fumure minérale, de 102 g P/ha pour le fumier de bovins et de 159 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.9). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,5876$ ) ni entre les années ( $p = 0,2877$ ). Les pertes de PRD représentent 69,8 % du phosphore dissous perdu pour la fumure minérale, 54,5 % pour le fumier de bovins et 77,6 % pour le lisier de porcs. Le PRD constitue la principale fraction du P dissous perdu aux drains.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PRD sont de 29 µg P/L pour la fumure minérale, de 28 µg P/L pour le fumier de bovins et de 39 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.10). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,6617$ ) ni entre les années ( $p = 0,3862$ ).

Le PRD a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0004$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,1952$ ) (annexes 10 et 11). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

### **5.8.3 Canola**

Les charges annuelles de phosphore minéral réactif dissous (PRD) perdu aux drains sous le canola sont de 46 g P/ha pour la fumure minérale, de 42 g P/ha pour le fumier de bovins et de 43 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.11). Les pertes de PRD représentent 56,8 % du phosphore dissous perdu pour la fumure minérale, 51,9 % pour le fumier de bovins et 61,4 % pour le lisier de porcs. La fraction du PRD constitue la plus forte proportion du P dissous perdu.

Les concentrations annuelles pondérées de PRD sont de 12 µg P/L pour la fumure minérale, de 14 µg P/L pour le fumier de bovins et de 12 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.12).

Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation (annexes 12 et 13).

## **5.9 Phosphore organique dissous**

### **5.9.1 Maïs-grain**

Les charges moyennes annuelles de phosphore organique dissous (POD) perdu aux drains sous maïs-grain sont de 45 g P/ha pour la fumure minérale, de 40 g P/ha pour le fumier de bovins et de 52 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.7). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,5217$ ) mais le sont entre les années ( $p = 0,0458$ ). Les pertes de POD représentent 35,4 % du phosphore dissous perdu pour la fumure minérale, 36,7 % pour le fumier de bovins et 28,0 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de POD aux drains sont de 13 µg P/L pour la fumure minérale, de 12 µg P/L pour le fumier de bovins et de 15 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.8). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,5002$ ) mais diffèrent entre les années ( $p = 0,0560$ ).

Le POD a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0001$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,3333$ ) (annexes 8 et 9). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

## 5.9.2 Orge

Les charges moyennes annuelles de phosphore organique dissous (POD) perdu aux drains sous l'orge sont de 46 g P/ha pour la fumure minérale, de 86 g P/ha pour le fumier de bovins et de 46 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.9). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,3242$ ) mais diffèrent entre les années ( $p = 0,1195$ ). Les pertes de POD représentent 30,7 % du phosphore dissous perdu pour la fumure minérale, 46,0 % pour le fumier de bovins et 22,4 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de POD sont de 12  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 23  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 11  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.10). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,2728$ ) mais diffèrent entre les années ( $p = 0,1395$ ).

Le POD a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0073$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,5243$ ) (annexes 10 et 11). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

## 5.9.3 Canola

Les charges annuelles de phosphore organique dissous (POD) perdu aux drains sous le canola sont de 35 g P/ha pour la fumure minérale, de 39 g P/ha pour le fumier de bovins et de 28 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.11). Les pertes de POD représentent 43,2 % du phosphore dissous perdu pour la fumure minérale, 48,1 % pour le fumier de bovins et 40 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations annuelles pondérées de POD sont de 9  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 13  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 8  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (tableau 5.12)

Les charges tendent à être plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation (annexes 12 et 13).

## 5.10 Phosphore biodisponible

### 5.10.1 Maïs- grain

Nous avons déterminé le P biodisponible ( $P_{\text{bio}}$ ) avec une extraction au NaOH 0,11 N dans 12 échantillons d'eau provenant de 4 répétitions de chacun des 3 modes de fertilisation des parcelles. Le coefficient de biodisponibilité du P particulaire (DPP) et le P particulaire biodisponible (BioPP) ont été déterminés pour chaque échantillon par les équations suivantes :

$$\text{DPP} = (\text{P}_{\text{Bio}} - \text{PRD})/\text{PP}$$
$$\text{BioPP} = \text{DPP} \times \text{PP}$$

Les coefficients moyens de biodisponibilité du P particulaire mesuré dans l'eau des drains sous maïs-grain ont été de 0,341 dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale, de 0,290 dans celle avec du fumier de bovins et de 0,348 dans celle avec du lisier de porcs. Il n'y a pas de

différence significative entre les parcelles ( $p = 0,2059$ ). Cela signifie que le P particulaire aux drains est modérément biodisponible dans une proportion moyenne de 33 %, peu importe les modes de fertilisation.

Le P<sub>bio</sub> a été déterminé dans tous les échantillons d'eau en cumulant le PRD avec le BioPP. Les charges moyennes annuelles de P<sub>bio</sub> perdu aux drains sous maïs-grain sont de 593 g P/ha pour la fumure minérale, de 300 g P/ha pour le fumier de bovins et de 523 g P/ha pour le lisier de porcs. Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,3932$ ) mais le sont entre les années ( $p = 0,1096$ ) (tableau 5.7). Les concentrations moyennes annuelles pondérées de P<sub>bio</sub> sont de 153 µg P/L pour la fumure minérale, de 95 µg P/L pour le fumier de bovins et de 140 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.8). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,3245$ ) et les années ( $p = 0,2535$ ).

Le P<sub>bio</sub> a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0125$ ) mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,6841$ ) (annexes 8 et 9). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

La figure 6 présente la fraction biodisponible par rapport aux autres fractions du P dans les eaux. La proportion de P biodisponible par rapport au P total est de 38,0 % pour la fumure minérale, de 34,2 % pour le fumier de bovins et de 41,1 % pour le lisier de porcs. Michaud et Laverdière (2004) soulignent l'importance de considérer la biodisponibilité du P pour prédire adéquatement l'impact des eaux de ruissellement sur les écosystèmes aquatiques. Le même constat s'applique également aux eaux des drains souterrains.

### **5.10.2 - Orge**

Les charges moyennes annuelles de P<sub>bio</sub> perdu aux drains sous l'orge sont de 605 g P/ha pour la fumure minérale, de 538 g P/ha pour le fumier de bovins et de 473 g P/ha pour le lisier de porcs. Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,7877$ ) mais le sont entre les années ( $p = 0,0462$ ) (tableau 5.9).

La figure 7 présente la fraction biodisponible par rapport aux autres fractions du P dans les eaux. La proportion de P biodisponible par rapport au P total est de 38,9 % pour la fumure minérale, de 32,2 % pour le fumier de bovins et de 42,5 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de P<sub>bio</sub> sont de 157 µg P/L pour la fumure minérale, de 139 µg P/L pour le fumier de bovins et de 112 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.10). Elles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,6825$ ) mais elles diffèrent entre les années ( $p = 0,0543$ ).

Le P<sub>bio</sub> a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0020$ ), mais pas pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,2998$ ) (annexes 10 et 11).

### 5.10.3 - Canola

Les charges annuelles de P<sub>bio</sub> perdu aux drains sous le canola sont de 381 g P/ha pour la fumure minérale, de 253 g P/ha pour le fumier de bovins et de 245 g P/ha pour le lisier de porcs (tableau 5.11). La figure 8 présente la fraction biodisponible par rapport aux autres fractions du P dans les eaux. La proportion de P biodisponible par rapport au P total est de 35,8 % pour la fumure minérale, de 31,3 % pour le fumier de bovins et de 37,7 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations annuelles pondérées de P<sub>bio</sub> sont de 103 µg P/L pour la fumure minérale, de 87 µg P/L pour le fumier de bovins et de 71 µg P/L pour le lisier de porcs (tableau 5.12).

Les pertes de P<sub>bio</sub> sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation (annexes 12 et 13).

## 5.11 Potassium dissous

### 5.11.1 Maïs-grain

Les charges moyennes annuelles de potassium dissous (K) perdu aux drains sous maïs-grain sont de 9,9 kg K/ha avec la fumure minérale, de 15,8 kg K/ha avec le fumier de bovins et de 10,3 kg K/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.13). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0732$ ) et les années ( $p = 0,0372$ ). Les pertes sont significativement plus élevées pour le fumier de bovins.

Tableau 5.13 Charges moyennes annuelles de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

	2 ans							
	K		Ca		Mg		Na	
	kg/ha							
Fumure minérale	9,88 b	Min.: 7.8 Max.: 12.0	91 b	Min.: 73 Max.: 110	46 ab	Min.: 33 Max.: 58	51 ab	Min.: 32 Max.: 71
Fumier bovins	15,78 a	Min.: 12.0 Max.: 19.5	66 b	Min.: 59 Max.: 74	33 b	Min.: 29 Max.: 37	19 b	Min.: 15 Max.: 22
Lisier porcs	10,29 b	Min.: 8.0 Max.: 12.5	146 a	Min.: 140 Max.: 153	63 a	Min.: 54 Max.: 71	71 a	Min.: 52 Max.: 91
p>F Modes	0,0732		0,0274		0,0750		0,1015	
p>F Années	0,0372		0,1122		0,0769		0,1133	
C.V. %	10,93		9,56		12,91		26,83	

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de K dissous sont respectivement de 2,82 mg K/L pour la fumure minérale, de 4,93 mg K/L pour le fumier de bovins et de 2,93 mg K/L pour le lisier de porcs (tableau 5.14). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,0141$ ) mais ne diffèrent pas entre les années ( $p = 0,1928$ ). Les concentrations en potassium sont plus élevées avec le fumier de bovins. Cet engrais organique apporte beaucoup de K et a enrichi le sol (tableau 3.3).

Le K dissous a été significativement différent entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0001$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,1125$ ) (annexes 14 et 15). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

Tableau 5.14 Concentrations moyennes annuelles pondérées de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

	2 ans			
	K	Ca	Mg	Na
	mg/L			
Fumure minérale	2,82 b	26,1 a	12,8 ab	13,9 a
Fumier bovins	4,93 a	21,4 a	10,5 b	5,9 b
Lisier porcs	2,93 b	43,9 a	18,3 a	20,1 a
p>F Modes	0,0141	0,1420	0,1012	0,0184
p>F Années	0,1928	0,1908	0,1997	0,7988
C.V. %	5,64	22,46	13,83	10,36

### 5.11.2 Orge

Les charges annuelles de potassium dissous (K) perdu aux drains sous l'orge sont respectivement de 9,9 kg K/ha avec la fumure minérale, de 14,4 kg K/ha avec le fumier de bovins et de 12,1 kg K/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.15).

Tableau 5.15 Charges moyennes annuelles de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

	1 an			
	K	Ca	Mg	Na
	kg/ha			
Fumure minérale	9,9	81	43	64
Fumier bovins	14,4	44	26	21
Lisier porcs	12,1	132	68	105

Les concentrations annuelles pondérées de K dissous sont respectivement de 2,46 mg K/L pour la fumure minérale, de 3,64 mg K/L pour le fumier de bovins et de 2,83 mg K/L pour le lisier de porcs (tableau 5.16). Les charges tendent à être plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation (annexes 16 et 17).

Tableau 5.16 Concentrations moyennes annuelles pondérées de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

	1 an			
	K	Ca	Mg	Na
	mg/L			
Fumure minérale	2,46	20,12	10,74	15,76
Fumier bovins	3,64	11,18	6,48	5,29
Lisier porcs	2,83	30,95	15,84	24,54

### 5.11.3 Canola

Les charges annuelles de potassium dissous (K) perdu aux drains sous le canola sont respectivement de 11,5 kg K/ha avec la fumure minérale, de 11,3 kg K/ha avec le fumier de bovins et de 10,0 kg K/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.17).

Tableau 5.17 Charges moyennes annuelles de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation

	1 an			
	K	Ca	Mg	Na
	kg/ha			
Fumure minérale	11,5	84,7	47,5	66,1
Fumier bovins	11,3	48,6	24,0	16,7
Lisier porcs	10,0	105,4	53,5	75,4

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de K dissous aux drains sont respectivement de 3,10 mg K/L pour la fumure minérale, de 3,87 mg K/L pour le fumier de bovins et de 2,89 mg K/L pour le lisier de porcs (tableau 5.18).

Tableau 5.18 Concentrations moyennes annuelles pondérées de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

	1 an			
	K	Ca	Mg	Na
	mg/L			
Fumure minérale	3,10	22,9	12,9	17,9
Fumier bovins	3,87	16,6	8,2	5,7
Lisier porcs	2,89	30,6	15,5	21,9

Les charges de K sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation (annexes 18 et 19).

## 5.12 Calcium dissous

### 5.12.1 Maïs-grain

Les charges moyennes annuelles de calcium dissous (Ca) perdu aux drains sous maïs-grain sont respectivement de 91 kg Ca/ha avec la fumure minérale, de 66 kg Ca/ha avec le fumier de bovins et de 146 kg Ca/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.13). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0274$ ) et les années ( $p = 0,1122$ ).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Ca dissous sont respectivement de 26 mg Ca/L pour la fumure minérale, de 21 mg Ca/L pour le fumier de bovins et de 44 mg Ca/L pour le lisier de porcs (tableau 5.14). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,1420$ ) mais pas selon les années ( $p = 0,1908$ ).

Le Ca dissous a été significativement différent entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0001$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,0016$ ) (annexes 14 et 15). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

### 5.12.2 Orge

Les charges moyennes annuelles de calcium dissous (Ca) perdu aux drains sous l'orge sont respectivement de 81 kg Ca/ha avec la fumure minérale, de 44 kg Ca/ha avec le fumier de bovins et de 132 kg Ca/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.15).

Les concentrations annuelles pondérées de Ca dissous aux drains sont respectivement de 20 mg Ca/L pour la fumure minérale, de 11 mg Ca/L pour le fumier de bovins, et de 31 mg Ca/L pour le lisier de porcs (tableau 5.16).

### **5.12.3 Canola**

Les charges moyennes annuelles de calcium dissous (Ca) perdu aux drains sous le canola sont respectivement de 85 kg Ca/ha avec la fumure minérale, de 49 kg Ca/ha avec le fumier de bovins et de 105 kg Ca/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.17).

Les concentrations annuelles pondérées de Ca dissous sont respectivement de 23 mg Ca/L pour la fumure minérale, de 17 mg Ca/L pour le fumier de bovins et de 31 mg Ca/L pour le lisier de porcs (tableau 5.18).

## **5.13 Magnésium dissous**

### **5.13.1 Maïs-grain**

Les charges moyennes annuelles de magnésium dissous (Mg) perdu aux drains sous maïs-grain sont respectivement de 46 kg Mg/ha avec la fumure minérale, de 33 kg Mg/ha avec le fumier de bovins et de 63 kg Mg/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.13). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,0750$ ) et les années ( $p = 0,0769$ ). Elles sont plus élevées pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Mg dissous sont respectivement de 13 mg Mg/L pour la fumure minérale, de 11 mg Mg/L pour le fumier de bovins et de 18 mg Mg/L pour le lisier de porcs (tableau 5.14). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,1012$ ) mais pas selon les années ( $p = 0,1997$ ). Les concentrations sont plus élevées avec le lisier de porcs.

Le Mg dissous a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0001$ ) et pour les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,0031$ ) (annexes 14 et 15). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

### **5.13.2 Orge**

Les charges moyennes annuelles de magnésium dissous (Mg) perdu aux drains sous l'orge sont respectivement de 43 kg Mg/ha avec la fumure minérale, de 26 kg Mg/ha avec le fumier de bovins et de 68 kg Mg/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.15).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Mg dissous sont respectivement de 11 mg Mg/L pour la fumure minérale, de 6 mg Mg/L pour le fumier de bovins et de 16 mg Mg/L pour le lisier de porcs (tableau 5.16).

### **5.13.3 Canola**

Les charges moyennes annuelles de magnésium dissous (Mg) perdu aux drains sous canola sont respectivement de 48 kg Mg/ha avec la fumure minérale, de 24 kg Mg/ha avec le fumier de bovins et de 54 kg Mg/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.17).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Mg dissous sont respectivement de 13 mg Mg/L pour la fumure minérale, de 8 mg Mg/L pour le fumier de bovins et de 16 mg Mg/L pour le lisier de porcs (tableau 5.18).

## **5.14 Sodium dissous**

### **5.14.1 Mais-grain**

Les charges moyennes annuelles de sodium dissous (Na) perdu aux drains sous maïs-grain sont respectivement de 51 kg Na/ha avec la fumure minérale, de 19 kg Na/ha avec le fumier de bovins et de 71 kg Na/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.13). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,1015$ ) et les années ( $p = 0,1133$ ). Les pertes de Na sont plus élevées avec le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Na dissous sont respectivement de 13,9 mg Na/L pour la fumure minérale, de 5,9 mg Na/L pour le fumier de bovins et de 20,1 mg Na/L pour le lisier de porcs (tableau 5.14). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,0184$ ) mais pas entre les années ( $p = 0,7988$ ). Les concentrations de Na dissous sont plus élevées avec le lisier de porcs.

Les charges moyennes saisonnières moyennes de Na dissous ont été significativement différentes entre les périodes de l'année ( $p < 0,0001$ ) et les concentrations moyennes pondérées saisonnières ( $p = 0,0004$ ) (annexes 14 et 15). Les charges sont plus élevées en période printanière pour tous les modes de fertilisation.

### **5.14.2 Orge**

Les charges moyennes annuelles de sodium dissous (Na) perdu aux drains sous l'orge sont respectivement de 64 kg Na/ha avec la fumure minérale, de 21 kg Na/ha avec le fumier de bovins et de 105 kg Na/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.15).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Na dissous sont respectivement de 15,8 mg Na/L pour la fumure minérale, de 5,3 mg Na/L pour le fumier de bovins et de 24,5 mg Na/L pour le lisier de porcs (tableau 5.16).

### **5.14.3 Canola**

Les charges moyennes annuelles de sodium dissous (Na) perdu aux drains sous le canola sont respectivement de 66 kg Na/ha avec la fumure minérale, de 17 kg Na/ha avec le fumier de bovins et de 75 kg Na/ha avec le lisier de porcs (tableau 5.17).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Na dissous sont respectivement de 17,9 mg Na/L pour la fumure minérale, de 5,7 mg Na/L pour le fumier de bovins et de 21,9 mg Na/L pour le lisier de porcs (tableau 5.18).

## 6. RÉSULTATS - DISTRIBUTION CENTILE DES CONCENTRATIONS

Nous avons établi la courbe de distribution en rang centile des concentrations des éléments nutritifs mesurées dans les drains sous le maïs-grain, l'orge et le canola pour chaque mode de fertilisation et pour tous les modes confondus. Chacune des concentrations hebdomadaires, mesurées pendant quatre ans pour le maïs-grain et deux ans pour l'orge et le canola, a servi à établir ces courbes. Elles ont permis d'établir trois valeurs de référence importantes. La première est la concentration associée au niveau 25 % de la distribution (concentration centile 25). La seconde est la concentration médiane, associée au niveau 50 % de la distribution (concentration centile 50) et la troisième est la concentration associée au niveau 90 % de la distribution (concentration centile 90). Ces trois valeurs sont utiles pour interpréter des résultats de concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains de ces cultures en fournissant des valeurs de référence associées à la fréquence de ces concentrations.

### 6.1 Distribution centile des concentrations en azote

#### 6.1.1 Maïs-grain

Pour quatre années de mesures, la concentration centile 25 en azote total dissous (NT) dans l'eau des drains sous maïs-grain, tous modes de fertilisation confondus, a été de 6,66 mg N/L. La concentration centile 50 a été de 10,35 mg N/L et la concentration centile 90 a été de 27,23 mg N/L (tableau 6.1). Il y a des différences entre les modes de fertilisation. La fumure minérale montre une concentration médiane plus basse que celle obtenue avec les fumures organiques (figure 9). Les parcelles fertilisées au lisier de porcs montrent une distribution centile plus élevée en NT dans les drains. La concentration centile médiane en NT diffère entre les périodes. Elle est plus élevée en périodes automnales et estivales (annexe 20).

Les nitrates représentent la principale forme d'azote dans l'eau des drains sous le maïs-grain. La concentration centile 25 en nitrate a été de 6,17 mg N-NO<sub>3</sub>/L, la concentration centile 50 a été de 9,57 mg N-NO<sub>3</sub>/L et la concentration centile 90 a été de 25,53 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. La fertilisation avec le lisier de porcs montre une courbe de distribution des teneurs en nitrate plus élevée que celle obtenue avec les autres modes de fertilisation (figure 9). Ces teneurs demeurent relativement élevées pour tous les modes de fertilisation. Le maïs-grain peut donc être associé à des rejets en nitrate assez élevés dans les drains. La concentration centile médiane en N-NO<sub>3</sub> diffère entre les périodes. Elle est plus élevée en périodes automnales et estivales (annexe 20).

L'azote ammoniacal représente une forme peu abondante dans l'eau des drains sous maïs-grain. La concentration centile 25 en ammonium a été de 0,013 mg N-NH<sub>4</sub>/L, la concentration centile 50 a été de 0,034 mg N-NH<sub>4</sub>/L et la concentration centile 90 a été de 0,155 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (figure 9). Les concentrations médianes en ammonium demeurent généralement faibles pour tous les modes de fertilisation. Cependant, des concentrations élevées sont mesurées sur environ 10 % des échantillons d'eau. Ces concentrations élevées ne sont pas toujours associées à des volumes importants d'eau drainée et surviennent parfois en période estivale (annexe 20).

L'azote organique dissous (NOD) représente une forme d'azote relativement peu abondante dans l'eau des drains. La concentration centile 25 en NOD a été de 0,14 mg N/L, la concentration

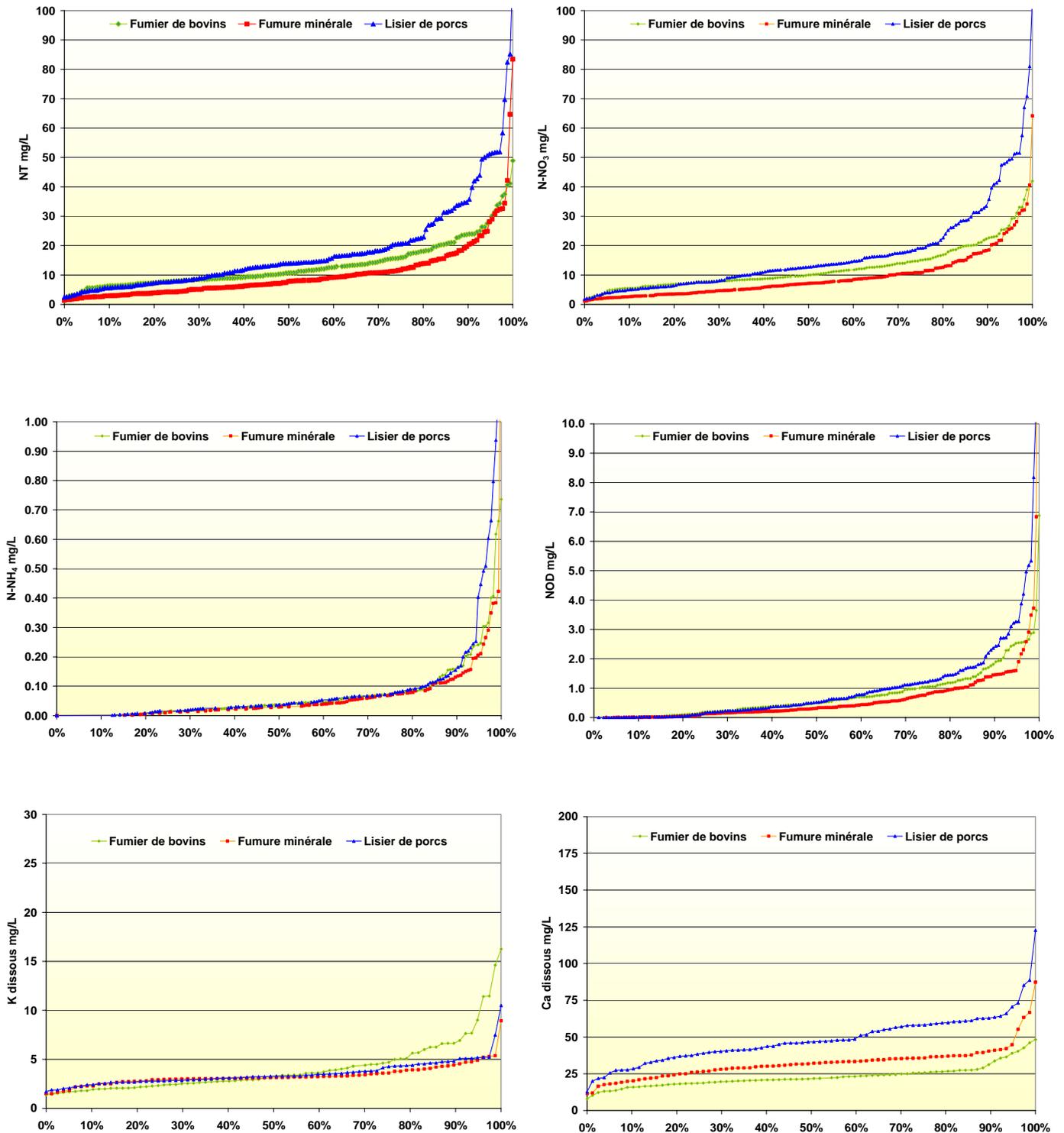


Figure 9 Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

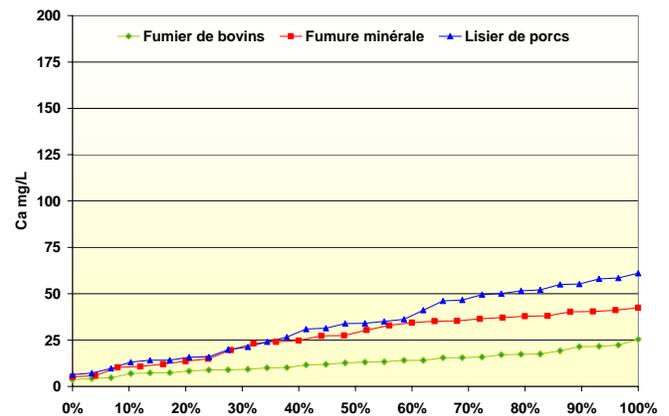
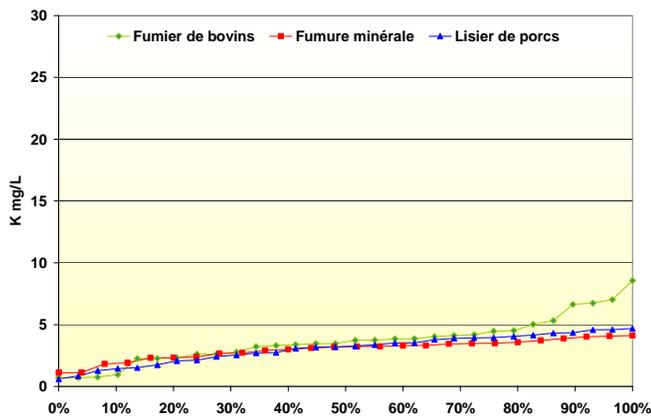
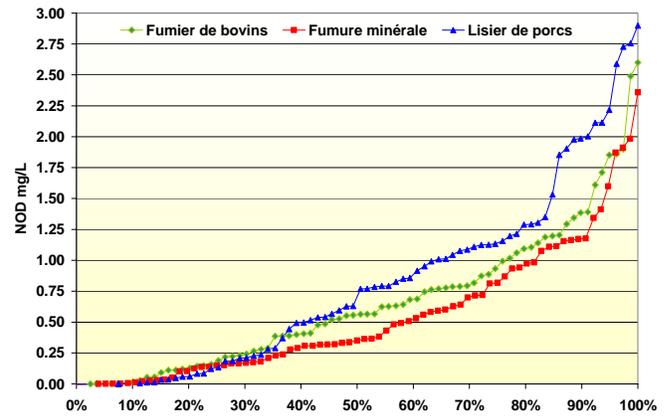
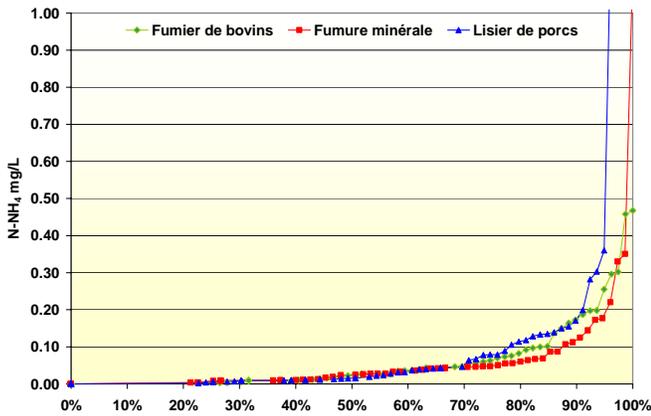
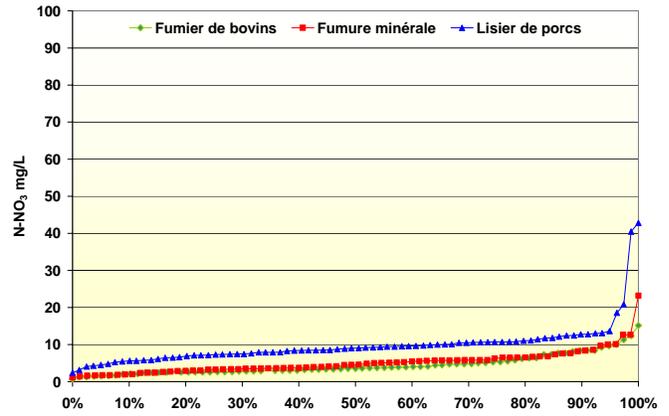
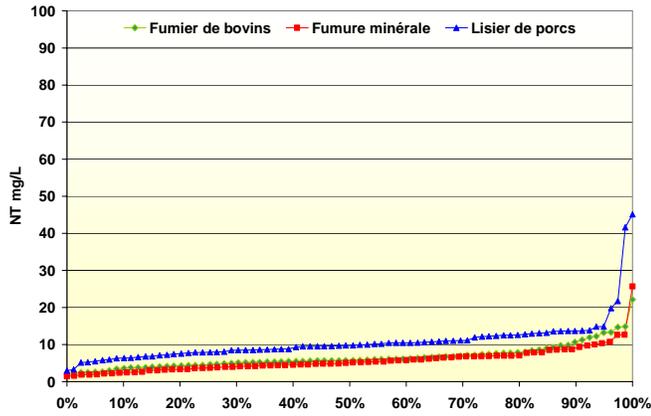


Figure 10 Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

centile 50 a été de 0,43 mg N/L et la concentration centile 90 a été de 1,76 mg N/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il y a des différences entre les modes de fertilisation (figure 9). La fumure minérale montre une concentration médiane de NOD inférieure aux autres fumures organiques. Les sols et les engrais contribuent à fournir de l'azote organique aux drains. Les concentrations médianes en NOD sont plus élevées en période automnale (annexe 20).

Tableau 6.1 Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

	Centile	Fumure minérale	Fumier de bovins	Lisier de porcs	Toutes fumures
N-NH <sub>4</sub> mg/L	25	0,010	0,014	0,015	0,013
	50	0,029	0,037	0,037	0,034
	90	0,132	0,160	0,160	0,155
N-NO <sub>3</sub> mg/L	25	3,97	7,57	7,57	6,17
	50	7,14	10,04	12,72	9,57
	90	18,35	22,50	34,1	25,53
NT mg/L	25	4,24	7,98	7,93	6,66
	50	7,83	10,75	13,97	10,35
	90	20,1	23,80	35,20	27,23
NOD mg/L	25	0,13	0,19	0,17	0,14
	50	0,32	0,50	0,52	0,43
	90	1,45	1,85	2,40	1,76
PRD µg/L	25	6	4	10	6
	50	16	10	22	16
	90	36	40	57	46
PD µg/L	25	12	10	21	13
	50	26	19	37	26
	90	58	63	79	71
POD µg/L	25	3	4	6	4
	50	8	8	10	8
	90	28	26	38	30
Pbio µg/L	25	18	30	29	25
	50	46	45	49	47
	90	215	165	185	190
PP µg/L	25	33	27	24	28
	50	80	85	58	76
	90	550	375	400	456
PT µg/L	25	58	49	55	54
	50	102	132	104	104
	90	590	450	445	535
K dissous mg/L	25	2,9	2,3	2,8	2,7
	50	3,1	3,2	3,3	3,2
	90	4,4	6,7	4,8	5,2
Ca dissous mg/L	25	26,4	18,6	38,5	22,3
	50	32,0	21,6	46,6	31,6
	90	40,7	32,4	63,2	58,0
Mg dissous mg/L	25	14,5	10,5	20,2	12,4
	50	18,5	12,9	25,5	17,2
	90	23,7	16,1	32,0	29,6
Na dissous mg/L	25	15,0	6,1	23,8	9,22
	50	27,3	8,4	33,8	18,3
	90	51,5	11,3	57,4	50,5

### 6.1.2 Orge

Pour deux années de mesures, la concentration centile 25 en azote total dissous (NT) dans l'eau des drains sous l'orge, tous modes de fertilisation confondus, a été de 4,85 mg N/L. La concentration centile 50 a été de 6,80 mg N/L et la concentration centile 90 a été de 12,60 mg N/L (tableau 6.2). Il y a des différences entre les modes de fertilisation. Le lisier de porcs montre une concentration médiane plus élevée que les autres fumures (figure 10). Les parcelles fertilisées au lisier de porcs montrent une distribution centile plus élevée en NT dans les drains. La concentration médiane en NT diffère entre les périodes. Elle est plus élevée en périodes automnales et estivales (annexe 20).

Les nitrates représentent la principale forme d'azote dans l'eau des drains sous l'orge. La concentration centile 25 en nitrate a été de 4,02 mg N-NO<sub>3</sub>/L, la concentration centile 50 a été de 5,84 mg N-NO<sub>3</sub>/L et la concentration centile 90 a été de 11,07 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. La fertilisation avec le lisier de porcs montre une concentration médiane en nitrate plus élevée que celle obtenue avec les autres modes de fertilisation (figure 10). Ces teneurs demeurent relativement faibles pour tous les modes de fertilisation. L'orge peut donc être associé à des rejets modérés en nitrate dans les drains. La concentration médiane en N-NO<sub>3</sub> diffère entre les périodes. Elle est plus élevée en périodes automnales et estivales (annexe 21).

L'azote ammoniacal représente une forme peu abondante dans l'eau des drains sous l'orge. La concentration centile 25 en ammonium a été de 0,004 mg N-NH<sub>4</sub>/L, la concentration centile 50 a été de 0,022 mg N-NH<sub>4</sub>/L et la concentration centile 90 a été de 0,168 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (figure 10). La concentration médiane en ammonium demeure généralement faible pour tous les modes de fertilisation. Cependant, des concentrations élevées sont mesurées sur environ 10 % des échantillons d'eau. Ces concentrations élevées ne sont pas toujours associées à des volumes importants d'eau drainée et surviennent parfois en période estivale (annexe 21).

L'azote organique dissous (NOD) représente une forme d'azote relativement peu abondante dans l'eau des drains. La concentration centile 25 en NOD a été de 0,15 mg N/L, la concentration centile 50 a été de 0,53 mg N/L et la concentration centile 90 a été de 1,60 mg N/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il y a des différences entre les modes de fertilisation (figure 10). La fumure minérale montre une concentration médiane de NOD inférieure aux fumures organiques alors que le lisier de porcs montre les concentrations les plus élevées. Les sols et les engrais contribuent à fournir de l'azote organique aux drains. La concentration médiane en NOD est plus faible en période hivernale (annexe 21).

Tableau 6.2 Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

	Centile	Fumure minérale	Fumier de bovins	Lisier de porcs	Toutes fumures
N-NH <sub>4</sub> mg/L	25	0,000	0,000	0,010	0,004
	50	0,030	0,020	0,020	0,022
	90	0,120	0,180	0,180	0,168
N-NO <sub>3</sub> mg/L	25	3,26	2,56	7,25	4,02
	50	4,54	3,54	9,05	5,84
	90	8,20	8,41	12,76	11,07
NT mg/L	25	3,70	4,60	7,90	4,85
	50	5,10	5,74	9,77	6,80
	90	9,20	10,80	13,70	12,60
NOD mg/L	25	0,15	0,18	0,13	0,15
	50	0,35	0,56	0,70	0,53
	90	1,17	1,39	2,00	1,60
PRD µg/L	25	8	8	9	9
	50	16	14	25	18
	90	35	49	66	54
PD µg/L	25	14	17	15	15
	50	23	27	35	28
	90	55	70	82	69
POD µg/L	25	3	4	4	4
	50	8	9	9	9
	90	21	29	29	28
Pbio µg/L	25	15	13	17	15
	50	30	31	34	33
	90	250	236	225	235
PP µg/L	25	20	16	15	13
	50	44	46	32	38
	90	617	680	580	567
PT µg/L	25	32	37	37	36
	50	72	71	56	68
	90	680	750	508	660
K dissous mg/L	25	2,4	2,6	2,3	2,4
	50	3,2	3,5	3,3	3,3
	90	3,9	6,7	4,4	4,6
Ca dissous mg/L	25	14,8	8,9	16,0	12,3
	50	28,0	12,8	33,9	21,0
	90	40,3	21,5	56,0	49,0
Mg dissous mg/L	25	8,0	4,3	7,7	6,16
	50	17,0	6,8	16,8	11,2
	90	22,9	12,4	31,0	26,0
Na dissous mg/L	25	12,5	2,4	8,6	4,3
	50	24,0	5,2	24,0	11,6
	90	43,6	11,8	55,4	46,2

### 6.1.3 Canola

Pour deux années de mesures, la concentration centile 25 en azote total dissous (NT) dans l'eau des drains sous le canola, tous modes de fertilisation confondus, a été de 4,03 mg N/L. La concentration centile 50 a été de 5,77 mg N/L et la concentration centile 90 a été de 10,86 mg N/L (tableau 6.3). Il y a des différences entre les modes de fertilisation. La fumure minérale montre une concentration médiane plus faible que les fumures organiques (figure 11). La concentration médiane en NT diffère entre les périodes. Elle est plus élevée en périodes automnales et estivales (annexe 22).

Les nitrates représentent la principale forme d'azote dans l'eau des drains sous le canola. La concentration centile 25 en nitrate a été de 3,59 mg N-NO<sub>3</sub>/L, la concentration centile 50 a été de 5,39 mg N-NO<sub>3</sub>/L et la concentration centile 90 a été de 10,20 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. La fumure minérale montre une concentration médiane en nitrate plus faible que celle obtenue avec les autres modes de fertilisation (figure 11). Ces teneurs demeurent relativement faibles pour tous les modes de fertilisation. Le canola peut donc être associé à des rejets modérés en nitrate dans les drains. La concentration médiane en N-NO<sub>3</sub> diffère entre les périodes. Elle est plus élevée en périodes automnales et estivales (annexe 22).

L'azote ammoniacal représente une forme peu abondante dans l'eau des drains sous le canola. La concentration centile 25 en ammonium a été de 0,004 mg N-NH<sub>4</sub>/L, la concentration centile 50 a été de 0,016 mg N-NH<sub>4</sub>/L et la concentration centile 90 a été de 0,084 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (figure 11). La concentration médiane en ammonium demeure généralement faible pour tous les modes de fertilisation. Cependant, des concentrations élevées sont mesurées sur environ 5 % des échantillons d'eau. Ces concentrations surviennent surtout en période automnale (annexe 22).

L'azote organique dissous (NOD) représente une forme d'azote relativement peu abondante dans l'eau des drains. La concentration centile 25 en NOD a été de 0,20 mg N/L, la concentration centile 50 a été de 0,42 mg N/L et la concentration centile 90 a été de 1,14 mg N/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a des différences entre les modes de fertilisation (figure 11). La fumure minérale montre une concentration médiane de NOD inférieure aux fumures organiques. Les sols et les engrais contribuent à fournir de l'azote organique aux drains. La concentration médiane en NOD est semblable entre les périodes (annexe 22).

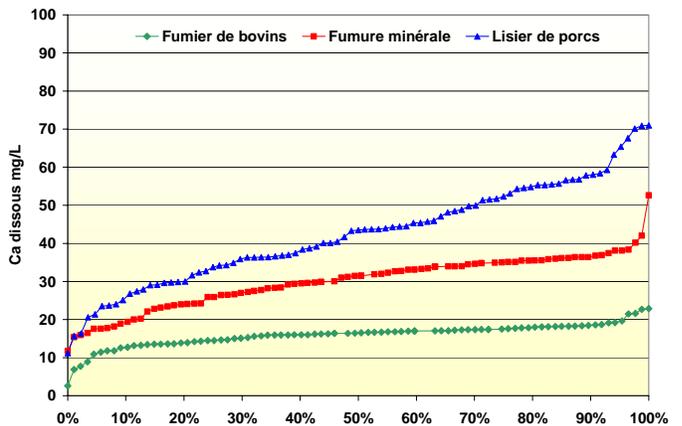
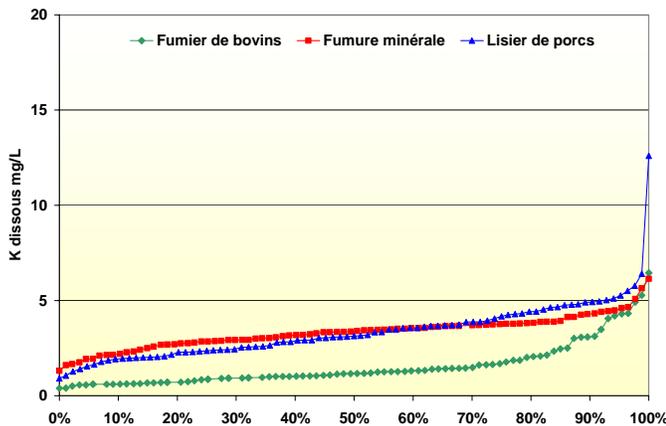
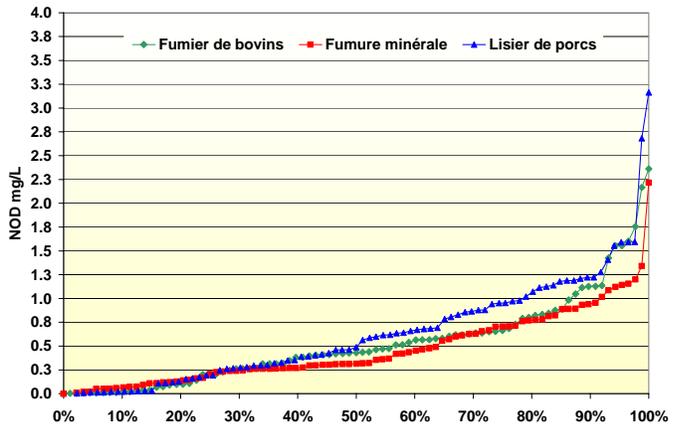
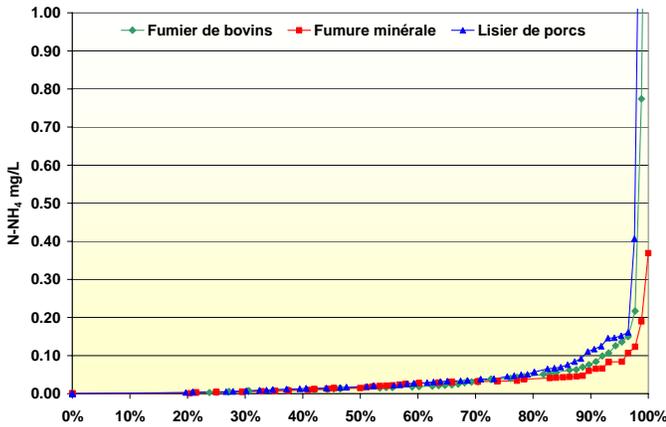
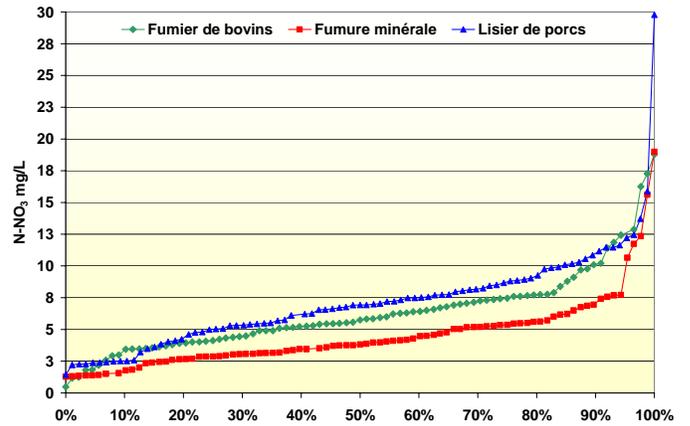
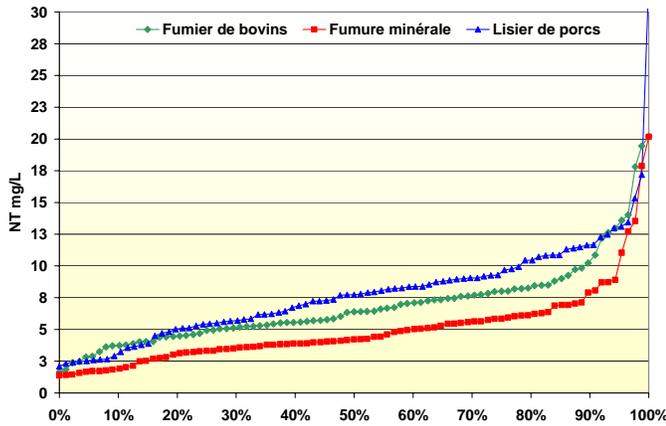


Figure 11 Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

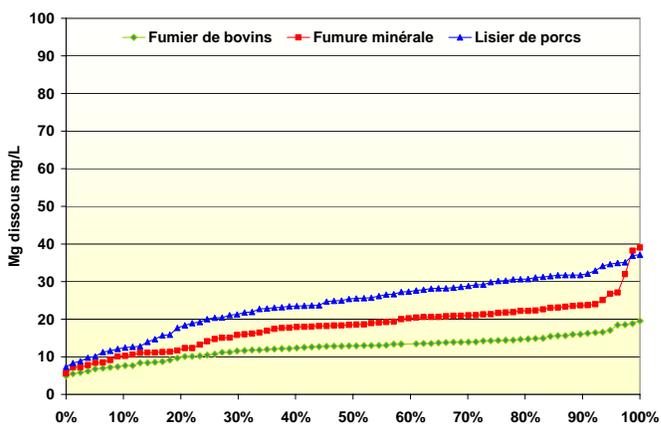
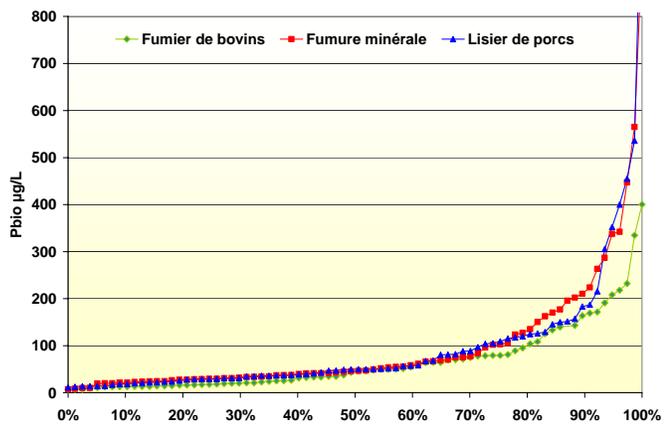
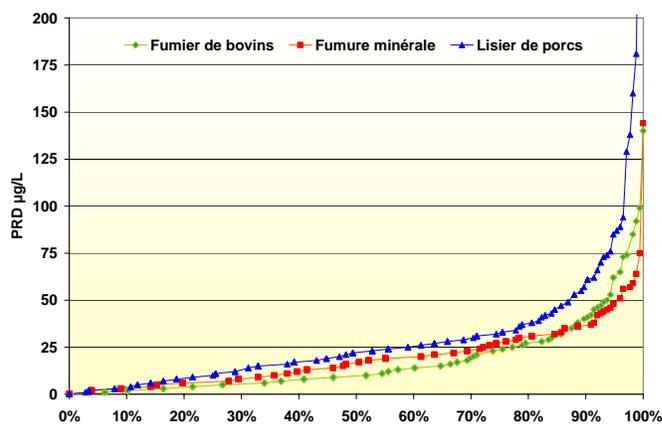
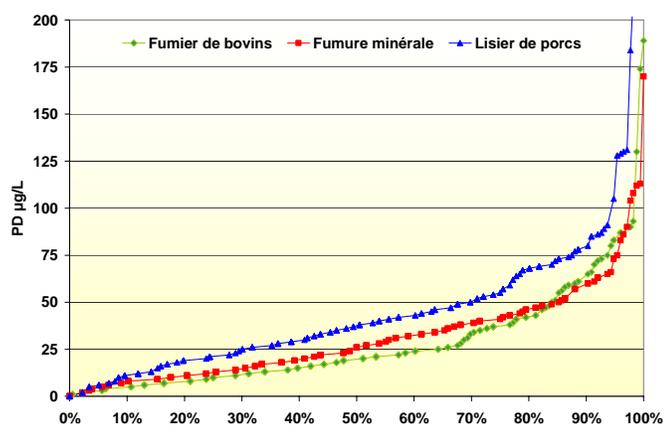
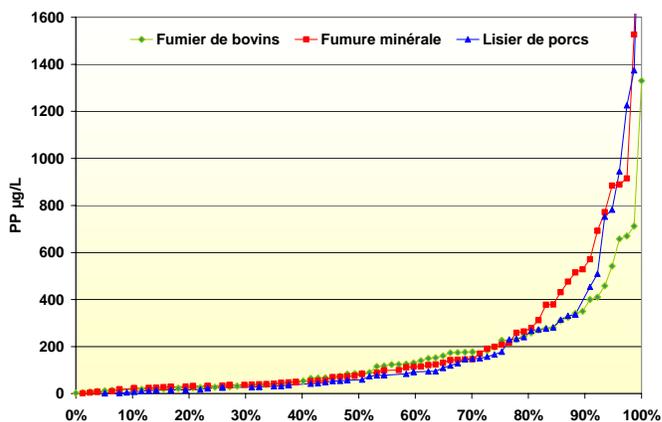
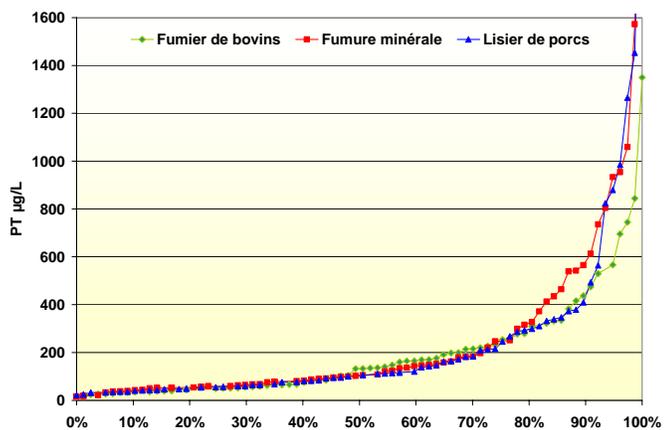


Figure 12 Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore et de magnésium dissous dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

Tableau 6.3 Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

	Centile	Fumure minérale	Fumier de bovins	Lisier de porcs	Toutes fumures
N-NH <sub>4</sub> mg/L	25	0,004	0,004	0,004	0,004
	50	0,015	0,014	0,018	0,016
	90	0,062	0,080	0,114	0,084
N-NO <sub>3</sub> mg/L	25	2,87	4,12	5,01	3,59
	50	3,82	5,75	6,93	5,39
	90	7,10	10,14	11,00	10,20
NT mg/L	25	3,32	4,93	5,42	4,03
	50	4,22	6,39	7,73	5,77
	90	8,00	10,50	11,65	10,86
NOD mg/L	25	0,21	0,21	0,19	0,20
	50	0,31	0,43	0,49	0,42
	90	0,95	1,13	1,22	1,14
PRD µg/L	25	3	4	4	3,7
	50	9	8	10	9
	90	21	25	109	37
PD µg/L	25	8	9	9	9
	50	15	15	21	16
	90	36	50	110	58
POD µg/L	25	4	5	5	4
	50	6	7	7	7
	90	17	24	23	22
Pbio µg/L	25	13	10	10	11
	50	18	19	18	18
	90	138	115	120	122
PP µg/L	25	18	21	17	19
	50	44	37	30	35
	90	350	305	220	310
PT µg/L	25	32	31	26	30
	50	51	51	35	48
	90	400	355	250	360
K dissous mg/L	25	2,8	0,9	2,4	1,5
	50	3,4	1,2	3,1	2,8
	90	4,3	3,1	4,9	4,4
Ca dissous mg/L	25	26,0	14,0	34,0	17,2
	50	31,0	16,0	44,0	28,2
	90	36,0	18,0	58,0	49,9
Mg dissous mg/L	25	16,0	9,0	20,0	11,0
	50	21,0	10,0	29,0	17,5
	90	27,0	13,0	39,0	35,1
Na dissous mg/L	25	22,0	7,0	30,2	10,3
	50	41,4	9,1	44,3	27,6
	90	64,5	12,8	60,2	59,9

## 6.2 Distribution centile des concentrations en phosphore

### 6.2.1 Maïs-grain

Pour deux années de mesures du P total (PT) dans le maïs-grain, la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 54 µg P/L, la concentration centile 50 a été de 104 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 535 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 12). Les concentrations de PT sont particulièrement élevées pour près de 20 % des échantillons d'eau analysés. Le maïs-grain peut fournir des concentrations importantes en PT dans l'eau des drains, peu importe les modes de fertilisation. Les concentrations centiles médianes en PT sont plus élevées en périodes automnales et printanières (annexe 20).

Le P particulaire (PP) représente la principale forme de phosphore dans l'eau des drains. La concentration centile 25 en PP dans l'eau des drains agricoles mesurée pendant deux ans a été de 28 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 76 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 456 µg P/L, tous modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 12). Les teneurs en PP sont élevées pour près de 20 % des échantillons. Le centile 90 des concentrations de PP varie de 375 à 550 µg P/L selon les modes de fertilisation. Aux champs, des épisodes de faibles concentrations alternent avec des périodes de fortes concentrations en lien avec les écoulements préférentiels de PP vers les drains. Les concentrations médianes de PP sont plus élevées en période printanière et plus faibles en période hivernale (annexe 20).

Pour quatre années de mesures du P dissous (PD), la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 13 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 26 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 71 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation (figure 12). Le lisier de porcs montre une courbe de concentration centile plus élevée que les autres modes. Les teneurs en PD sont élevées pour 20 % des échantillons d'eau analysés pour tous les modes de fertilisation. Le centile 90 des concentrations de PD a varié de 58 à 179 µg P/L. Une fraction relativement modérée de P est entraînée vers les drains sous forme dissoute. Les concentrations centiles de PD sont plus faibles en période hivernale (annexe 20).

La concentration centile 25 en P minéral réactif dissous (PRD) mesuré pendant quatre ans a été de 6 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 16 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 46 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (figure 12). Les teneurs en PRD sont élevées pour 10 % des échantillons. La fraction organique dissoute est moins importante que la fraction minérale réactive. On peut la mesurer par différence entre PD et PRD. Les concentrations centiles en PRD sont semblables entre les périodes (annexe 20).

La concentration centile 25 en P organique dissous (POD) mesuré pendant deux années a été de 4 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 8 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 30 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation. Les concentrations médianes en POD sont semblables entre les périodes (annexe 20).

Pour deux années, la concentration centile 25 en P biodisponible (Pbio) dans l'eau des drains a été de 25 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 47 µg P/L et la concentration centile 90 a été

de 190 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 12). Les teneurs en P<sub>bio</sub> sont élevées pour 10 % des échantillons d'eau analysés pour tous les modes de fertilisation. Les concentrations médianes de P<sub>bio</sub> sont plus faibles en période hivernale (annexe 20).

### 6.2.2 Orge

Pour deux années de mesures du P total (PT) dans l'orge, la concentration centile 25 dans l'eau des drains agricoles a été de 36 µg P/L, la concentration centile 50 a été de 68 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 660 µg P/L, tous modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 13). Les concentrations en PT sont élevées pour 20 % des échantillons d'eau analysés. Les concentrations centiles en PT sont plus basses en période hivernale (annexe 21).

Le P particulaire (PP) représente la principale forme de phosphore dans l'eau des drains. La concentration centile 25 en PP dans l'eau des drains agricoles mesurée pendant deux ans a été de 13 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 38 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 567 µg P/L, tous modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 13). Les teneurs en PP sont élevées pour près de 20 % des échantillons. Le centile 90 des concentrations de PP varie de 580 à 680 µg P/L selon les modes de fertilisation. Les concentrations centiles en PP sont plus faibles en période hivernale (annexe 21).

Pour deux années de mesures du P dissous (PD), la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 15 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 28 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 69 µg P/L, tous modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (figure 13). Les teneurs en PD sont élevées pour près de 20 % des échantillons d'eau analysés pour tous les modes de fertilisation. Le centile 90 des concentrations de PD varie de 55 à 82 µg P/L. Les concentrations centiles de PD sont plus faibles en période hivernale (annexe 21).

La concentration centile 25 en P minéral réactif dissous (PRD) mesuré pour deux années a été de 9 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 18 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 54 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (figure 13). Les teneurs en PRD sont élevées pour 20 % des échantillons. Les concentrations centiles en PRD sont plus faibles en période hivernale (annexe 21).

La concentration centile 25 en P organique dissous (POD) mesuré pendant deux années a été de 4 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 9 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 28 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation. Les concentrations médianes en POD sont semblables entre les périodes (annexe 21). Pour deux années, la concentration centile 25 en P biodisponible (P<sub>bio</sub>) dans l'eau des drains a été de 15 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 33 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 235 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 13). Les teneurs en P<sub>bio</sub> sont élevées pour 20 % des échantillons d'eau analysés pour tous les modes de fertilisation, particulièrement pour le lisier de porcs. Les concentrations centiles de P<sub>bio</sub> sont plus faibles en période hivernale (annexe 21).

### 6.2.3 Canola

Pour une année de mesures du P total (PT) dans le canola, la concentration centile 25 dans l'eau des drains agricoles a été de 30 µg P/L, la concentration centile 50 a été de 48 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 360 µg P/L, tous modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a peu de différences entre la concentration médiane du P total selon les modes de fertilisation (figure 14). Ces concentrations sont particulièrement élevées pour 20 % des échantillons d'eau analysés. Les concentrations centiles en PT sont plus élevées en périodes automnales et printanières (annexe 22).

Le P particulaire (PP) représente la principale forme de phosphore dans l'eau des drains. La concentration centile 25 en PP mesurée pendant une année a été de 19 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 35 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 310 µg P/L, tous modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a peu de différences entre la concentration médiane selon les modes de fertilisation (figure 14). Les teneurs en PP sont élevées pour près de 20 % des échantillons. Le centile 90 des concentrations de PP varie de 220 à 350 µg P/L selon les modes de fertilisation. Les concentrations centiles en PP sont plus élevées en périodes automnales et printanières (annexe 22).

Pour deux années de mesures du P dissous (PD), la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 9 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 16 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 58 µg P/L, tous modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation (figure 14). Le lisier de porcs montre une courbe plus élevée de distribution des teneurs en PD que celle des autres modes. Les teneurs en PD sont élevées pour 20 % des échantillons d'eau analysés pour tous les modes de fertilisation. Le centile 90 des concentrations de PD varie de 36 à 110 µg P/L. Les concentrations centiles de PD sont plus élevées en période estivale (annexe 22).

La concentration centile 25 en P minéral réactif dissous (PRD) mesuré pendant deux années a été de 4 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 9 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 37 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation (figure 14). Le lisier de porcs montre une courbe plus élevée de distribution des teneurs en PRD que celle des autres modes. Les concentrations médianes en PRD sont plus élevées en période estivale (annexe 22).

La concentration centile 25 en P organique dissous (POD) mesuré pendant deux années a été de 4 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 7 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 22 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation. Les concentrations médianes en POD sont semblables entre les périodes (annexe 22).

Pour une année de mesures, la concentration centile 25 en P biodisponible dans l'eau des drains a été de 11 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 18 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 122 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 14). Les teneurs en P<sub>bio</sub> sont élevées pour 20 % des échantillons d'eau analysés pour tous les modes de fertilisation. Les concentrations médianes de P<sub>bio</sub> sont plus élevées en périodes printanières et automnales (annexe 22)

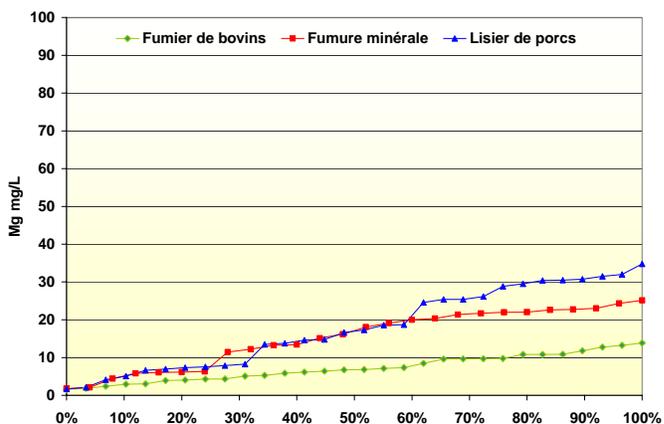
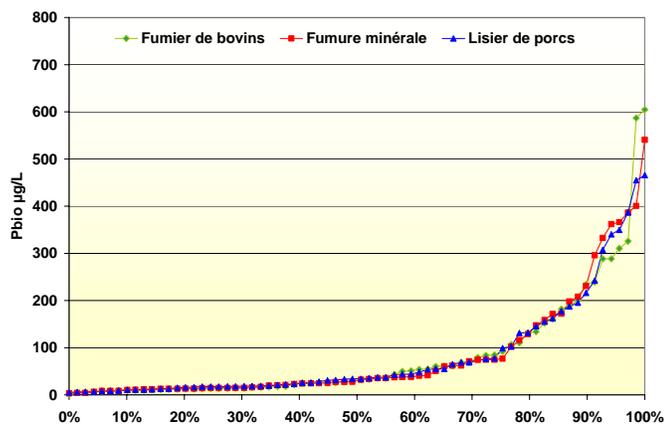
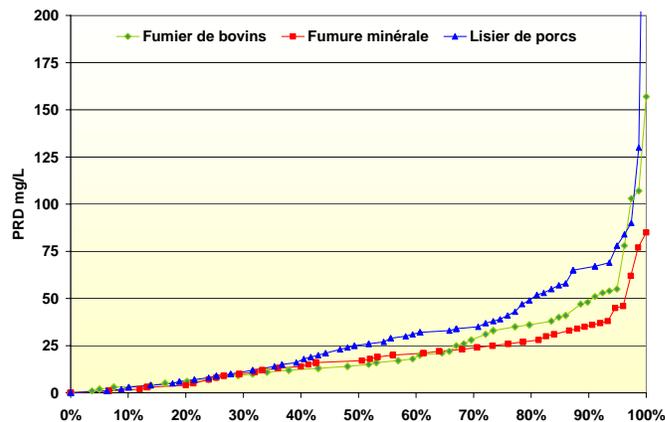
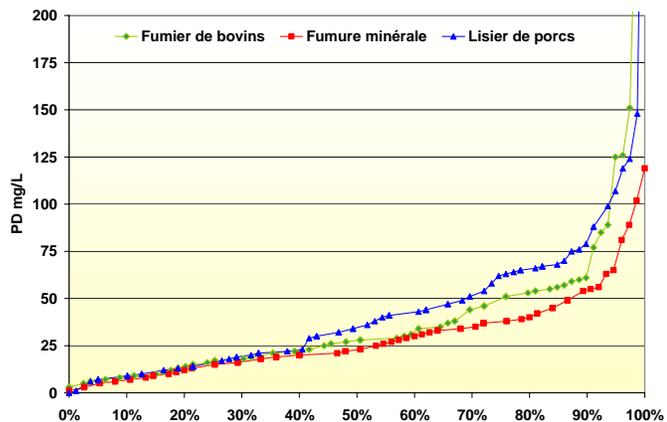
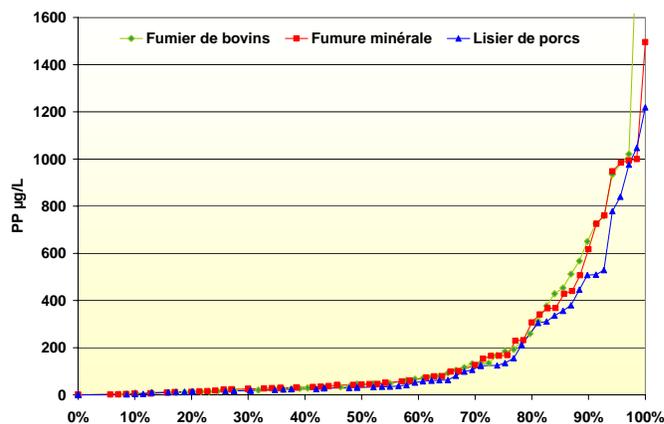
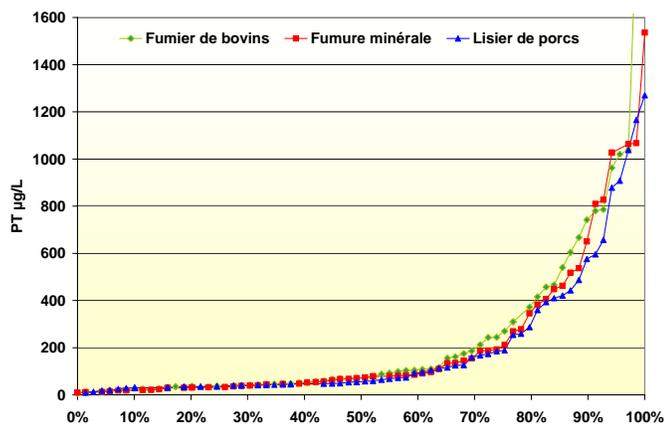


Figure 13 Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore et de magnésium dissous dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

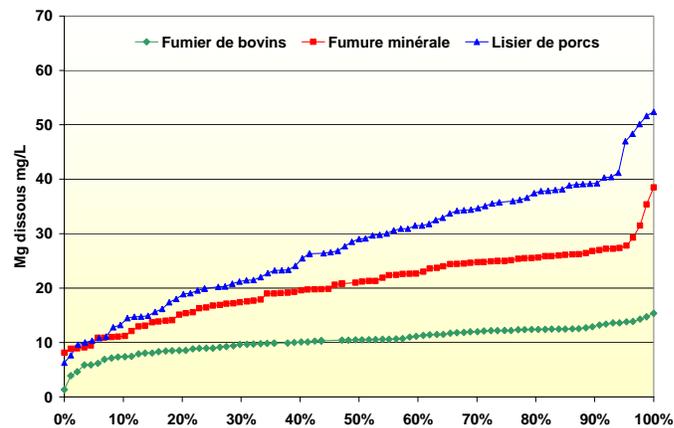
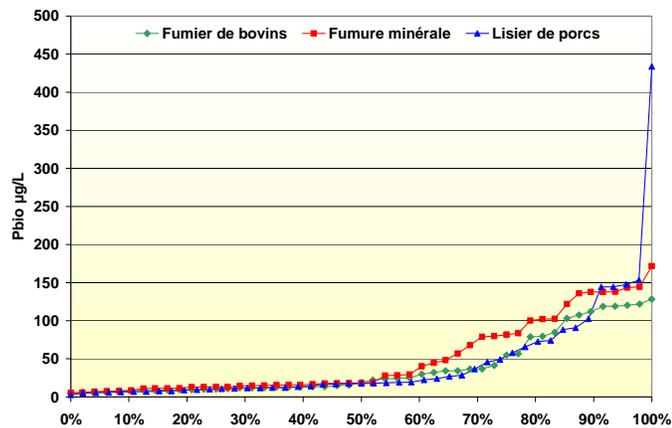
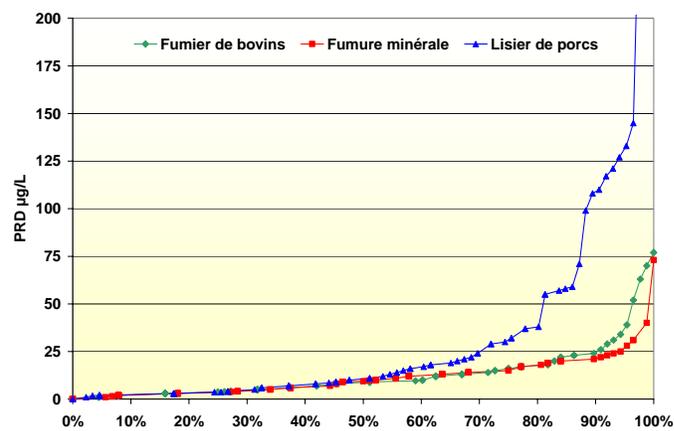
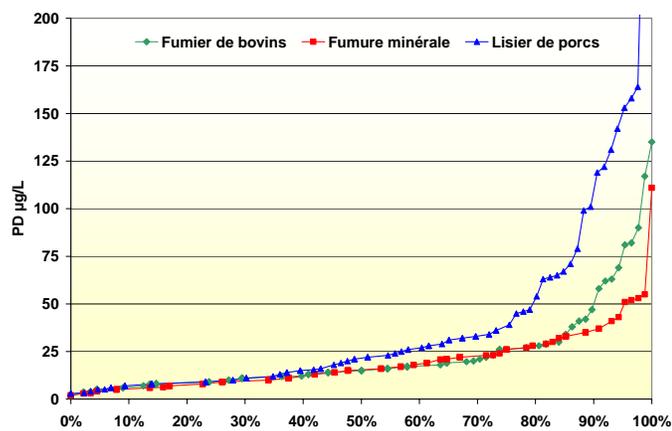
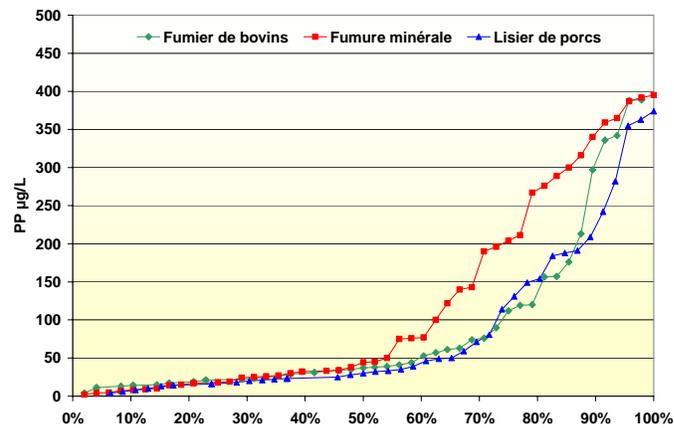
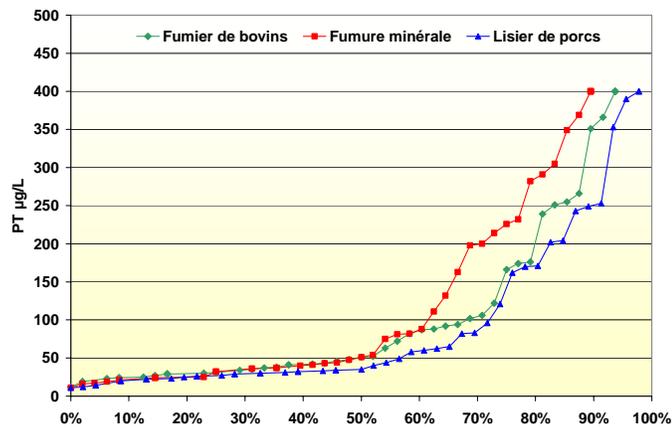


Figure 14 Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore et de magnésium dissous dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

## **6.3 Distribution centile des concentrations en potassium dissous**

### **6.3.1 Mais-grain**

Pour quatre années de mesures du K dissous dans le maïs-grain, la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 2,7 mg K/L, la concentration centile 50 a été de 3,2 mg K/L et la concentration centile 90 a été de 5,2 mg K/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 9). Les concentrations de K demeurent relativement faibles pour tous les modes de fertilisation. Les concentrations centiles médianes en K sont semblables entre les périodes (annexe 20).

### **6.3.2 Orge**

Pour une année de mesures du K dissous dans l'orge, la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 2,4 mg K/L, la concentration centile 50 a été de 3,3 mg K/L et la concentration centile 90 a été de 4,6 mg K/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il n'y a pas de différence appréciable entre les modes de fertilisation (figure 10). Les concentrations centiles médianes en K sont semblables entre les périodes (annexe 21).

### **6.3.3 Canola**

Pour deux années de mesures du K dissous dans le canola, la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 1,5 mg K/L, la concentration centile 50 a été de 2,8 mg K/L et la concentration centile 90 a été de 4,4 mg K/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation (figure 11). Les concentrations médianes tendent à être plus faibles avec le fumier de bovins. Les concentrations médianes en K sont semblables entre les périodes (annexe 22).

## **6.4 Distribution centile des concentrations en calcium dissous**

### **6.4.1 Maïs-grain**

Pour quatre années de mesures du Ca dissous dans le maïs-grain, la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 22,3 mg Ca/L, la concentration centile 50 a été de 31,6 mg Ca/L et la concentration centile 90 a été de 58,0 mg Ca/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations en Ca sont plus élevées avec le lisier de porcs (figure 9). Les concentrations centiles en Ca sont plus basses en période printanière et plus élevées en période estivale (annexe 20).

### **6.4.2 – Orge**

Pour une année de mesures du Ca dissous dans l'orge, la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 12,3 mg Ca/L, la concentration centile 50 a été de 21,0 mg Ca/L et la concentration centile 90 a été de 49,0 mg Ca/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations en Ca tendent à être plus faibles avec les fumiers de bovins (figure 10). Les concentrations centiles en Ca sont plus basses en période printanière (annexe 21).

### **6.4.3 Canola**

Pour une année de mesures dans le canola, la concentration centile 25 dans l'eau des drains a été de 17,2 mg Ca/L, la concentration centile 50 a été de 28,2 mg Ca/L et la concentration centile 90 a été de 49,9 mg Ca/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations en Ca tendent à être plus élevées avec le lisier de porcs et plus faibles avec le fumier de bovins (figure 11). Le canola peut perdre d'importantes quantités de Ca dans les drains, surtout avec le lisier de porcs. Les concentrations centiles en Ca sont plus basses en période printanière.

## **6.5 Distribution centile des concentrations en magnésium dissous**

### **6.5.1 Maïs-grain**

Pour quatre années de mesures du Mg dissous dans le maïs-grain, la concentration centile 25 dans l'eau des drains agricoles a été de 12,4 mg Mg/L, la concentration centile 50 a été de 17,2 mg Mg/L et la concentration centile 90 a été de 29,6 mg Mg/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il y a des différences entre les modes de fertilisation (figure 12). Les concentrations en Mg sont plus élevées avec le lisier de porcs et plus faibles avec le fumier de bovins. Les concentrations centiles en Mg sont plus faibles en périodes printanières et automnales (annexe 20).

### **6.5.2 Orge**

Pour une année de mesures du Mg dissous dans l'orge, la concentration centile 25 dans l'eau des drains agricoles a été de 6,2 mg Mg/L, la concentration centile 50 a été de 11,2 mg Mg/L et la concentration centile 90 a été de 26,0 mg Mg/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations de Mg sont plus faibles avec le fumier de bovins (figure 13). Les concentrations centiles en Mg sont plus faibles en période printanière (annexe 21).

### **6.5.3 Canola**

Pour une année de mesures du Mg dissous dans le canola, la concentration centile 25 dans l'eau des drains agricoles a été de 11,0 mg Mg/L, la concentration centile 50 a été de 17,5 mg Mg/L et la concentration centile 90 a été de 35,1 mg Mg/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a des différences entre les modes de fertilisation. Les concentrations médianes sont plus faibles avec le fumier de bovins (figure 14). Les concentrations médianes en Mg sont plus faibles en périodes printanières et automnales (annexe 22).

## **6.6 Distribution centile des concentrations en sodium dissous**

### **6.6.1 Maïs-grain**

Pour quatre années de mesures du Na dissous dans le maïs-grain, la concentration centile 25 dans l'eau des drains agricoles a été de 9,2 mg Na/L, la concentration centile 50 a été de 18,3 mg Na/L et la concentration centile 90 a été de 50,5 mg Na/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations en Na dissous sont plus faibles pour le fumier de bovins. Les concentrations centiles en Na sont plus faibles en période printanière (annexe 20).

### 6.6.2 Orge

Pour une année de mesures du Na dissous dans l'orge, la concentration centile 25 dans l'eau des drains agricoles a été de 4,3 mg Na/L, la concentration centile 50 a été de 11,6 mg Na/L et la concentration centile 90 a été de 46,2 mg Na/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations en Na dissous sont plus faibles avec le fumier de bovins. Les concentrations centiles en Na sont plus faibles en période printanière (annexe 21).

### 6.6.3 Canola

Pour une année de mesures du Na dissous dans le canola, la concentration centile 25 dans l'eau des drains agricoles a été de 10,3 mg Na/L, la concentration centile 50 a été de 27,6 mg Na/L et la concentration centile 90 a été de 59,9 mg Na/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.3). Il y a des différences très appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations en Na dissous sont plus faibles avec le fumier de bovins. Les concentrations médianes en Na sont plus faibles en période printanière (annexe 22).

## 7. CONCLUSIONS

La présente étude a permis de préciser les hauteurs de la lame d'eau drainée, les concentrations et les charges des éléments perdus aux drains sous le maïs-grain, l'orge et le canola. La hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau drainée sous le maïs-grain a été de 34,25 cm, avec un minimum de 24,46 cm et un maximum de 46,53 cm. La hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau drainée sous l'orge a été de 38,24 cm, avec un minimum de 34,46 cm et un maximum de 42,80 cm. La hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau drainée sous le canola a été de 33,56 cm, avec un minimum de 29,27 cm et un maximum de 37,00 cm.

Les charges moyennes annuelles de N total dissous (NT) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 48,1 kg N/ha sous le maïs-grain, de 29,2 kg N/ha sous l'orge et de 30,2 kg N/ha sous le canola (tableau 7.1). Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges de NT sont plus élevées sous le maïs-grain et semblables sous l'orge et le canola. Les charges moyennes annuelles de N-NO<sub>3</sub> perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 44,0 kg N-NO<sub>3</sub>/ha sous le maïs-grain, de 26,2 kg N-NO<sub>3</sub>/ha sous l'orge et de 29,3 kg N-NO<sub>3</sub>/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges de N-NO<sub>3</sub> sont plus élevées sous le maïs-grain et semblables pour l'orge et le canola. Les charges moyennes annuelles de N ammoniacal perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 292 g N-NH<sub>4</sub>/ha sous le maïs-grain, de 406 g N-NH<sub>4</sub>/ha sous l'orge et de 88 g N-NH<sub>4</sub>/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de

Tableau 7.1 Charges moyennes des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains selon les cultures, tous modes de fertilisation confondus

	Maïs	Orge	Canola	Prairie *
N-NH <sub>4</sub> g/ha	292	406	88	318
N-NO <sub>3</sub> kg/ha	44,0	25,7	28,7	6,0
NOD kg/ha	3,88	2,59	1,83	1,27
NT dissous kg/ha	47,7	28,7	30,0	7,6
PD g/ha	141	184	77	120
PRD g/ha	94	124	44	80
POD g/ha	47	60	33	40
PP g/ha	1088	1374	763	644
PT g/ha	1237	1447	841	751
Pbio g/ha	472	539	293	320
K dissous kg/ha	12,0	12,1	10,9	2,5
Ca dissous kg/ha	101,3	85,7	79,6	69,4
Mg dissous kg/ha	47,1	45,7	41,7	35,2
Na dissous kg/ha	47,3	63,3	52,7	20,8

\* : Données provenant du Cahier de l'Observatoire de la qualité des sols ( No.5 )

porcs. Les charges en  $N-NH_4$  sont plus élevées sous l'orge et plus faibles sous le canola. Les charges moyennes annuelles de N organique dissous (NOD) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 3,88 kg N/ha sous le maïs-grain, de 2,59 kg N/ha sous l'orge et de 1,83 kg N/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges en NOD sont plus élevées sous le maïs-grain.

Les charges moyennes annuelles de P total (PT) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 1237 g P/ha sous le maïs-grain, de 1447 g P/ha sous l'orge et de 841 g P/ha sous le canola (tableau 7.1). Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P particulaire (PP) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 1088 g P/ha sous le maïs-grain, de 1374 g P/ha sous l'orge et de 763 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 141 g P/ha sous le maïs-grain, de 184 g P/ha sous l'orge et de 77 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P réactif dissous (PRD) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 94 g P/ha sous le maïs-grain, de 124 g P/ha sous l'orge et de 44 g P/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P organique dissous (POD) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 47 g P/ha sous le maïs-grain, de 60 g P/ha sous l'orge et de 24 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de P biodisponible (Pbio) perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 472 g P/ha sous le maïs-grain, de 539 g P/ha sous l'orge et de 293 g P/ha sous le canola. Elles varient peu selon les modes de fertilisation.

Les charges moyennes annuelles de K dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 12,0 kg K/ha sous le maïs-grain, de 12,1 kg K/ha sous l'orge et de 10,9 kg K/ha sous le canola (tableau 7.1). Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le fumier de bovins sous le maïs-grain. Les charges moyennes annuelles de Ca dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 101,0 kg Ca/ha sous le maïs-grain, de 86,0 kg Ca/ha sous l'orge et de 80,0 kg Ca/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges moyennes annuelles de Mg dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 47,3 kg Mg/ha sous le maïs-grain, de 46,1 kg Mg/ha sous l'orge et de 42,1 kg Mg/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges moyennes annuelles de Na dissous perdu aux drains, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 47,4 kg Na/ha sous le maïs-grain, de 53,3 kg Na/ha sous l'orge et de 53,2 kg Na/ha sous le canola. Elles varient selon les modes de fertilisation et elles sont plus élevées avec le lisier de porcs.

Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le maïs-grain, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 10,4 mg N/L pour l'azote total, de 9,6 mg  $N-NO_3$ /L pour les nitrates, de 0,034 mg  $N-NH_4$ /L pour l'azote ammoniacal et de 0,43 mg N/L pour l'azote organique dissous. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous l'orge, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 6,8 mg N/L pour l'azote total, de 5,8 mg  $N-NO_3$ /L pour les nitrates, de 0,022 mg  $N-NH_4$ /L pour l'azote ammoniacal et de 0,53 mg N/L pour l'azote organique dissous. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le canola, tous modes de fertilisation

confondus, ont été de 5,8 mg N/L pour l'azote total, de 5,4 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour les nitrates, de 0,016 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour l'azote ammoniacal et de 0,42 mg N/L pour l'azote organique dissous.

Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le maïs-grain, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 104 ug P/L pour le P total, de 76 ug P/L pour le P particulaire, de 26 ug P/L pour le P dissous, de 16 ug P/L pour le P réactif dissous de 8 ug P/L pour le P organique dissous et de 47 ug P/L pour le P biodisponible. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous l'orge, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 68 ug P/L pour le P total, de 38 ug P/L pour le P particulaire, de 28 ug P/L pour le P dissous, de 18 ug P/L pour le P réactif dissous, de 9 ug P/L pour le P organique dissous et de 33 ug P/L pour le P biodisponible. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le canola, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 48 ug P/L pour le P total, de 35 ug P/L pour le P particulaire, de 16 ug P/L pour le P dissous, de 9 ug P/L pour le P réactif dissous, de 7 ug P/L pour le P organique dissous et de 18 ug P/L pour le P biodisponible.

Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le maïs-grain, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 3,2 mg K/L pour le potassium dissous, de 31,6 mg Ca/L pour le calcium dissous, de 17,2 mg Mg/L pour le magnésium dissous et de 18,3 mg Na/L pour le sodium dissous. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous l'orge, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 3,3 mg K/L pour le potassium dissous, de 21,0 mg Ca/L pour le calcium dissous, de 11,2 mg Mg/L pour le magnésium dissous et de 11,6 mg Na/L pour le sodium dissous. Les concentrations médianes dans l'eau des drains sous le canola, tous modes de fertilisation confondus, ont été de 2,8 mg K/L pour le potassium dissous, de 28,0 mg Ca/L pour le calcium dissous, de 18,2 mg Mg/L pour le magnésium dissous et de 27,6 mg Na/L pour le sodium dissous.

## 8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Beauchemin, S., R.R. Simard and D. Cluis. 1998. Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.* 27 : 721-728.
- Bengston, R.L., C.E. Carter, H.F. Morris and S.A. Bartkiewics. 1988. The influence of subsurface drainage practices on nitrogen and phosphorus losses in a warm humid climate. *Trans. ASAE* 31 : 729-733.
- Berrouard, A., M. Giroux et M. Blackburn. 2001. Effets comparatifs de différentes cultures et modes de fertilisation sur la teneur en nitrates dans les sols en fin de culture et dans les eaux de drainage souterrain. *Agrosol* 12 (2) : 64-73.
- Breeuwsma, A., J.G.A. Reijerinfet and O.F. Schoumans. 1995. Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate in areas of intensive livestock farming. In K. Steele (ed), *Animal Waste and the Land-Water Interface*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, p. 239-251.
- Castillon, P. 2005. Le phosphore : source, flux et rôles pour la production végétale et l'eutrophisation. *INRA Prod. Anim.* 18(3) : 153-158
- Chatigny, M.H., D. Angers, T. Morvan and C. Pomar. 2004. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with N<sup>15</sup>. *Soil Sci. Am. J.* 68 : 637-643.
- Dean, D.M. and M.E. Foran. 1991. The effect of farm liquid waste application on receiving water quality. Final report. Ontario Ministry of the Environment. 88 p.
- Deslandes, J., A. Michaud et F. Bonn. 2002. Développement et validation d'indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin versant de la rivière-aux-Brochets. *Agrosol* 13 (2) : 111-123.
- Enright, P. and C. A. Madramootoo. 2004. Phosphorus losses in surface runoff and subsurface drainage waters on two agricultural fields in Quebec. *Proceeding of the eight international drainage symposium*. Publié par ASAS MI, USA. p. 160-700.
- Gangbazo, G., A.R. Pesant et G. M. Barnett. 1997. Effets de l'épandage des engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porcs sur l'eau, le sol et les cultures. Direction des écosystèmes aquatiques. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec.
- Gangbazo, G., D. Côté et G.M. Barnett. 1998. Effets de l'épandage du lisier de porc en pré-semis et en post-levée de lisier sur l'eau, le sol et le maïs-grain. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des écosystèmes aquatiques.
- Garand, M-J., R.R. Simard, C. Hamel, A.F. Mackenzie et G. Tremblay. 1997. Détermination de la valeur fertilisante des engrais de ferme en fonction de leur utilisation sur le maïs-grain et les céréales selon les systèmes culturaux. Rapport de recherche 69 p. Entente auxiliaire Canada-Québec pour un environnement durable en agriculture.
- Gasser, M.O., M.R. Laverdière, R. Lagacé and J. Caron. 2002. Impact of potato-cereal rotations and slurry applications on nitrate leaching and nitrogen balance in sandy soils. *Can. J. Soil Sci.* 82 : 1469-1479.
- Giroux, I. 1995. Contamination de l'eau souterraine par les pesticides et les nitrates dans les régions de culture de pommes de terre. Rapport ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. 47 p.
- Giroux, M., et T.S. Tran. 1995. Effet des doses et des modes d'apport des engrais azotés sur le rendement et la qualité du maïs-ensilage et sur les reliquats de nitrates dans les sols. *Agrosol* 8(1) : 3-11.
- Giroux, M., P. Enright, L. Vézina, R. Royer et A. Berrouard. 2002. Concentrations et charges d'azote et de phosphore perdues dans les drains souterrains selon les cultures et les modes de fertilisation. *Cahier de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec*. IRDA . 31 p.
- Giroux, M., A.R. Michaud, C. Côté et N. Ziadi. 2003. Stratégie de réduction à la ferme des risques environnementaux liés à la fertilisation avec des engrais de ferme. *Compte-rendu du Colloque en agroenvironnement*. IRDA. p. 73-99.
- Guertin, S., G.M. Barnett, M. Giroux, A.F. Mackenzie, A. Pesant et L.E. Parent. 1997. Évaluation des besoins NPK dans la culture de maïs selon les caractéristiques du sol et des systèmes culturaux. Rapport final. Entente Canada-Québec pour un environnement durable.

- Guertin, S.P., G.M. Barnett, M. Giroux, A.F. Mackenzie, A. Pesant et L.E. Parent. 2001. Effet de pratiques culturales dans la culture de maïs en terrain vallonné, sur les risques de contamination des eaux de ruissellement et de drainage. *Agrosol* 11(2) : 107-113.
- HBA experts-conseil. 1991. Impact des périodes d'épandage du lisier de porcs. Rapport final. Programme de recherche en conservation du sol et de l'eau. 63 p.
- Heatwhite, A.L., P. Haygarth and R. Dils. 2000. Pathways of phosphorus transport, In A.N. Sharpley, Ed. *Agriculture and phosphorus management: the Chesapeake bay*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Madramootoo, C.A., K.A. Wiyo and P. Enright. 1992. Nutrient losses through tile drains from two potato field. *Applied engineering in agriculture*. 8(5) : 639-646.
- Magnan, J. 2005. Épandage post-récolte des engrais organiques et risques environnementaux reliés aux pertes d'azote. *Revue de littérature préparée pour l'Ordre des agronomes du Québec*. 72 p.
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2002. Description du système de transfert du phosphore dans le bassin-versant du ruisseau-au-Castor. *Agrosol* 13 (2) : 124-139.
- Michaud, A.R., and M.R. Laverdière. 2004. Crooping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Can. J. Soil Sci.* 84 : 295-305.
- Ndayegamiye, A., M. Giroux et R. Royer. 2004. Épandage d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : coefficient d'efficacité et nitrates dans le sol. *Agrosol* 15(2) : 97-106.
- Pesant, A.R., M. Perron, G.M. Barnett, A. Bélanger et G. Gangbazo. 1997. Effet de la période et du type de travail primaire du sol sur la perte d'azote et de phosphore dans les eaux de surface et de drainage dans les cultures du maïs-grain et de l'orge. Entente auxiliaire Canada-Québec.
- Rivest, R. et P. Leduc. 1998. Évaluation du risque de pollution diffuse associée au phosphore des sols classés excessivement riches. *MAPAQ et Société d'agriculture du comté de Saint-Hyacinthe*.
- Sharpley, A.N., W. Troeger and S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agriculture runoff. *J. Environ. Qual.* 20 : 235-238.
- Sharpley, A.N. and P.A. Withers. 1994. The environmentally sound management of agricultural phosphorus. *Fertilizer Res.* 39 : 133-146.
- Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo and S. Beauchemin. 1995. Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.* 13 : 211-215.
- Ziadi, N., M.C. Nolin, A.N. Cambouris et R.R. Simard. 2003. Calibrage des besoins en azote de groupes homogènes de sol dans la production de maïs-grain. Rapport final PPF1. 44 p.

## 9. REMERCIEMENTS

---

Je tiens à remercier M. Luc Vézina du MAPAQ pour avoir élaboré et supervisé ce projet dans sa phase initiale. Je désire également mentionner la collaboration de M. Jacques Desjardins pour avoir procédé au raccordement des drains et à l'installation du puits et à M. Raynald Royer pour avoir installé les équipements de mesure, procédé à l'échantillonnage périodique des eaux et réalisé la compilation des données. Je tiens aussi à remercier l'équipe du laboratoire d'analyse des eaux de l'IRDA, particulièrement Mme Carole Dion, MM. Gérard Fortin et Michel Paradis pour la qualité des analyses effectuées. Mes remerciements vont aussi à Mme Claudine Jomphe pour la mise en page et la présentation du texte.

## 10. ANNEXES

Annexe 1 Quantités d'éléments nutritifs apportés dans les parcelles selon les années et les modes de fertilisation

	Doses kg/ha	Années	Cultures	Formule engrais			Apport		
				N %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	K <sub>2</sub> O %	N-tot kg/ha	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/ha	K <sub>2</sub> O kg/ha
Fumure minérale	355	1997	Canola	22	20	14	78	71	50
	190	1998	Mais-grain	18	15	25	34	29	48
	155			0	0	60	0	0	93
	250			46	0	0	115	0	0
	155	1999	Mais-grain	0	0	60	0	0	93
	215			18	46	0	39	99	0
	240			46	0	0	110	0	0
	350	2000	Orge	22	17	16	77	60	56
	315	2001	Canola	28	14	11	88	44	35
	240	2002	Mais-grain	21	36	0	50	86	0
	210			46	0	0	97	0	0
	240	2003	Mais-grain	21	36	0	50	86	0
	210			46	0	0	97	0	0
500	2004	Orge	15	15	10	75	75	50	
Fumier bovins	159	1998	Mais-grain	25	31	0	40	49	0
	106			46	0	0	49	0	0
	239	1999	Mais-grain	25	21	0	60	50	0
	191	2002	Mais-grain	27	18	0	52	34	0
	191	2003	Mais-grain	27	18	0	52	34	0
Lisier porcs	159	1998	Mais-grain	25	31	0	40	49	0
	106			46	0	0	49	0	0
	317	1999	Mais-grain	17	17	21	54	54	67
	105			21	0	0	22	0	0
	191	2002	Mais-grain	27	18	0	52	34	0
191	2003	Mais-grain	27	18	0	52	34	0	

	Doses t/ha	Années	Cultures	Analyse			Apport		
				N total kg/t	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/t	K <sub>2</sub> O kg/t	N-tot kg/ha	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/ha	K <sub>2</sub> O kg/ha
Fumier bovins	45	1997	Canola	3,48	1,72	5,94	157	77	267
	45	1998	Mais-grain	3,67	2,47	4,21	165	111	190
	45	1999		5,39	1,92	7,06	243	87	318
	60	2000	Orge	4,40	2,22	5,45	264	133	327
	60	2001	Canola	4,24	1,99	5,66	254	119	340
	47	2002	Mais-grain	4,91	2,39	6,02	231	112	283
	44	2003		5,82	2,43	7,26	256	107	319
	39	2004	Orge	4,64	1,97	5,56	181	77	217
Lisier porcs	50	1997	Canola	1,81	1,15	0,86	91	57	43
	50	1998	Mais-grain	3,02	1,40	1,28	151	70	64
	50	1999		2,81	1,15	1,21	140	57	61
	50	2000	Orge	2,47	1,31	1,15	124	65	58
	50	2001	Canola	2,6	1,27	1,50	130	63	75
	50	2002	Mais-grain	9,47	4,45	5,07	474	222	254
	50	2003		3,14	2,95	1,09	157	148	55
	50	2004	Orge	3,19	1,30	1,44	160	65	72

Annexe 2 Charges moyennes saisonnières d'azote perdu aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

		4 ans				
		Période	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT
			mg/L			
Fumure minérale	Estivale	0,080	13,36	3,25	16,71	
	Automnale	0,062	16,36	0,84	17,26	
	Hivernale	0,033	11,07	0,29	11,41	
	Printanière	0,062	6,64	0,80	7,53	
Fumier bovins	Estivale	0,080	21,59	1,60	23,26	
	Automnale	0,062	16,92	1,06	18,04	
	Hivernale	0,032	13,27	0,44	13,73	
	Printanière	0,062	8,68	0,39	9,12	
Lisier porcs	Estivale	0,077	26,93	2,09	28,99	
	Automnale	0,076	28,62	1,79	29,95	
	Hivernale	0,053	19,91	1,94	20,84	
	Printanière	0,130	14,01	1,61	15,48	
	p>F Modes	0,5693	0,0666	0,2710	0,0539	
	p>F Périodes	0,2751	<0,0001	0,1089	<0,0001	
	p>F Modes x périodes	0,9102	0,4222	0,6746	0,6078	

Annexe 3 Concentrations moyennes pondérées saisonnière d'azote dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

		2 ans				
		Période	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT
			g/ha	kg/ha		
Fumure minérale	Estivale	169	5,14	0,44	5,74	
	Automnale	18	3,76	0,34	4,12	
	Hivernale	13	0,94	0,11	1,06	
	Printanière	96	8,85	1,15	10,09	
Fumier bovins	Estivale	72	5,22	0,69	5,98	
	Automnale	27	3,95	0,47	4,45	
	Hivernale	4	1,41	0,16	1,57	
	Printanière	115	10,11	1,58	11,81	
Lisier porcs	Estivale	466	9,87	0,46	11,10	
	Automnale	58	7,55	0,56	8,17	
	Hivernale	12	1,87	0,18	2,06	
	Printanière	167	17,75	1,67	19,29	
	p>F Modes	0,1483	0,2306	0,2071	0,3714	
	p>F Périodes	0,0025	0,0066	0,0028	<0,0001	
	p>F Modes x périodes	0,0654	0,8363	0,8040	0,5040	

Annexe 4 Charges saisonnières des éléments nutritifs perdus aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

		2 ans				
		Période	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT
			mg/L			
Fumure minérale	Estivale	0,222	7,31	0,62	8,14	
	Automnale	0,027	5,91	0,50	6,43	
	Hivernale	0,048	4,72	0,43	5,19	
	Printanière	0,044	3,75	0,5	4,30	
Fumier bovins	Estivale	0,131	8,62	1,06	9,80	
	Automnale	0,039	5,59	0,69	6,32	
	Hivernale	0,018	5,78	0,62	6,41	
	Printanière	0,051	4,75	0,72	5,52	
Lisier porcs	Estivale	0,862	14,15	0,79	17,49	
	Automnale	0,074	9,92	0,70	10,69	
	Hivernale	0,030	7,41	0,57	8,01	
	Printanière	0,075	7,64	0,73	8,45	
p>F Modes		0,1114	0,1567	0,4978	0,1187	
p>F Périodes		0,0005	0,0731	0,0769	0,0251	
p>F Modes x périodes		0,0076	0,8832	0,8383	0,6883	

Annexe 5 Concentrations moyennes pondérées saisonnières des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

		1 an				
		Période	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT
			g/ha	kg/ha		
Fumure minérale	Estivale	6,1	3,6	0,236	3,8	
	Automnale	41,6	6,2	0,352	6,6	
	Hivernale	0,4	0,4	0,034	0,5	
	Printanière	0,4	12,3	0,825	13,2	
Fumier bovins	Estivale	22,2	2,5	0,323	2,8	
	Automnale	26,8	6,4	0,304	6,8	
	Hivernale	1,0	0,7	0,023	0,7	
	Printanière	17,8	20,1	0,990	21,1	
Lisier porcs	Estivale	1,4	1,8	0,090	2,0	
	Automnale	32,0	11,3	1,435	12,8	
	Hivernale	0,4	0,6	0,021	0,6	
	Printanière	112,0	18,9	0,841	19,7	

Annexe 6 Charges saisonnières des éléments nutritifs perdus aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation

		1 an			
		N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT
		mg/L			
Période	Estivale	0,015	9,01	0,60	9,62
	Automnale	0,034	5,16	0,29	5,49
Fumure minérale	Hivernale	0,003	3,22	0,26	3,48
	Printanière	0,000	6,27	0,42	6,69
Période	Estivale	0,065	7,21	0,94	8,22
	Automnale	0,031	7,45	0,35	7,83
Fumier bovins	Hivernale	0,009	6,80	0,22	7,03
	Printanière	0,011	12,45	0,61	13,07
Période	Estivale	0,004	5,73	0,28	6,10
	Automnale	0,028	10,03	1,28	11,33
Lisier porcs	Hivernale	0,005	7,19	0,25	7,45
	Printanière	0,059	9,85	0,44	10,29

Annexe 7 Concentrations moyennes pondérées saisonnières des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

		4 ans			2 ans		
		PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
		g/ha					
Période	Estivale	14	10	3	174	194	74
	Automnale	34	18	16	167	192	78
Fumure minérale	Hivernale	11	7	4	165	178	67
	Printanière	68	47	22	907	997	375
Période	Estivale	16	11	5	190	216	72
	Automnale	20	13	8	126	144	52
Fumier bovins	Hivernale	5	2	2	103	108	33
	Printanière	68	42	26	349	408	143
Période	Estivale	19	14	5	208	237	94
	Automnale	38	20	18	209	241	101
Lisier porcs	Hivernale	16	9	7	146	164	65
	Printanière	113	90	23	521	629	263

p>F Modes	0,1204	0,1355	0,6565	0,5634	0,5433	0,4174
p>F Périodes	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0432	0,0230	0,0125
p>F Modes x périodes	0,4703	0,2718	0,8299	0,7363	0,7263	0,6657

Annexe 8 Charges moyennes saisonnières de phosphore perdu aux drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

		4 ans			2 ans		
		PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
Période		µg/L					
Fumure minérale	Estivale	30,4	23,7	6,7	407	440	162
	Automnale	39,7	20,9	18,8	232	266	107
	Hivernale	29,5	17,7	11,8	294	323	123
	Printanière	35,9	24,4	11,4	396	438	166
Fumier bovins	Estivale	27,7	19,1	8,6	474	509	160
	Automnale	22,8	14,9	7,9	203	229	81
	Hivernale	14,3	7,0	7,3	214	228	71
	Printanière	38,2	23,9	14,4	208	243	85
Lisier porcs	Estivale	48,4	36,2	12,1	517	568	217
	Automnale	49,0	25,8	23,2	310	357	148
	Hivernale	37,0	21,0	16,0	264	306	123
	Printanière	59,6	47,9	11,7	231	281	118
p>F Modes		0,0293	0,0603	0,3057	0,9228	0,8914	0,6931
p>F Périodes		0,1390	0,0729	0,3333	0,6191	0,6198	0,6841
p>F Modes x périodes		0,9184	0,8934	0,6423	0,9957	0,9955	0,9963

Annexe 9 Concentrations moyennes pondérées saisonnière de phosphore dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

		2 ans			2 ans		
		PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
Période		g/ha					
Fumure minérale	Estivale	21,9	15,9	6,0	243	255	94
	Automnale	21,4	11,9	7,3	173	185	72
	Hivernale	10,2	6,4	3,9	33	35	16
	Printanière	105,6	76,8	28,7	1061	1080	424
Fumier bovins	Estivale	20,8	14,2	6,5	501	508	151
	Automnale	19,5	11,7	7,8	212	223	72
	Hivernale	5,6	3,3	2,3	96	96	30
	Printanière	141,6	72,5	69,1	805	846	285
Lisier porcs	Estivale	53,6	43,8	9,8	204	229	92
	Automnale	28,8	22,1	6,7	212	234	95
	Hivernale	12,4	8,2	4,2	57	62	27
	Printanière	110,1	84,6	25,5	525	587	260
p>F Modes		0,7060	0,5877	0,4792	0,6717	0,7220	0,8021
p>F Périodes		0,0001	0,0004	0,0073	0,0047	0,0098	0,0020
p>F Modes x périodes		0,6832	0,9562	0,3519	0,6610	0,8315	0,7256

Annexe 10 Charges moyennes saisonnières de phosphore perdu aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

Période		2 ans			1 an		
		PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
µg/L							
Fumure minérale	Estivale	3,6	25,9	10,0	298	310	115
	Automnale	30,5	16,2	10,7	244	260	101
	Hivernale	46,9	27,1	19,8	136	138	66
	Printanière	46,5	33,8	12,7	462	474	186
Fumier bovins	Estivale	42,0	29,6	12,1	671	677	203
	Automnale	29,0	17,4	11,55	324	340	109
	Hivernale	22,8	13,4	9,4	386	387	122
	Printanière	64,8	33,9	31,0	357	373	127
Lisier porcs	Estivale	103,4	87,0	16,5	266	295	119
	Automnale	34,3	26,6	8,15	255	280	114
	Hivernale	45,1	25,5	19,6	183	178	81
	Printanière	48,8	37,5	11,3	236	264	116
p>F Modes		0,4166	0,3314	0,8581	0,6041	0,6060	0,7363
p>F Périodes		0,2365	0,1952	0,5243	0,3859	0,2770	0,2998
p>F Modes x périodes		0,3432	0,4827	0,4343	0,5857	0,5473	0,6242

Annexe 11 Concentrations moyennes pondérées saisonnière de phosphore dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

Période		2 ans			1 an		
		PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
µg/L							
Fumure minérale	Estivale	3,6	25,9	10,0	298	310	115
	Automnale	30,5	16,2	10,7	244	260	101
	Hivernale	46,9	27,1	19,8	136	138	66
	Printanière	46,5	33,8	12,7	462	474	186
Fumier bovins	Estivale	42,0	29,6	12,1	671	677	203
	Automnale	29,0	17,4	11,55	324	340	109
	Hivernale	22,8	13,4	9,4	386	387	122
	Printanière	64,8	33,9	31,0	357	373	127
Lisier porcs	Estivale	103,4	87,0	16,5	266	295	119
	Automnale	34,3	26,6	8,15	255	280	114
	Hivernale	45,1	25,5	19,6	183	178	81
	Printanière	48,8	37,5	11,3	236	264	116
p>F Modes		0,4166	0,3314	0,8581	0,6041	0,6060	0,7363
p>F Périodes		0,2365	0,1952	0,5243	0,3859	0,2770	0,2998
p>F Modes x périodes		0,3432	0,4827	0,4343	0,5857	0,5473	0,6242

Annexe 12 Charges moyennes saisonnières de phosphore perdu aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation

		2 ans			1 an		
		PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
Période		g/ha					
Fumure minérale	Estivale	19,5	12,2	7,3	102	82	40
	Automnale	22,5	11,4	11,1	300	277	106
	Hivernale	1,2	0,5	0,7	6,6	5,3	2,3
	Printanière	37,6	21,9	15,7	655	617	232
Fumier bovins	Estivale	19,1	11,0	7,9	53	34	21
	Automnale	14,6	7,1	7,5	148	133	46
	Hivernale	1,1	0,6	0,5	6,7	5,6	2,2
	Printanière	45,9	22,9	23,0	602	556	184
Lisier porcs	Estivale	6,0	4,0	2,0	14,5	8,5	7,0
	Automnale	15,9	9,0	6,9	153	137	57
	Hivernale	0,8	0,3	0,5	3,9	3,1	1,4
	Printanière	47,8	29,4	18,3	478	431	179

Annexe 13 Concentrations moyennes pondérées saisonnière de phosphore dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

		2 ans			1 an		
		PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
Période		µg/L					
Fumure minérale	Estivale	49,4	30,9	18,5	208	258	102
	Automnale	18,6	9,5	9,2	230	248	88
	Hivernale	9,1	3,7	5,4	41	50	18
	Printanière	19,1	11,1	8,0	314	333	118
Fumier bovins	Estivale	55,5	32,0	22,9	100	155	62
	Automnale	16,9	8,2	8,7	154	171	53
	Hivernale	10,7	5,5	5,2	54	65	21
	Printanière	28,4	14,2	14,2	344	373	114
Lisier porcs	Estivale	18,8	12,6	6,2	27	46	22
	Automnale	14,1	8,0	6,2	122	136	51
	Hivernale	10,0	5,5	6,1	37	47	17
	Printanière	25,0	14,2	9,6	225	250	94

Annexe 14 Charges moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous maïs-grain selon les modes de fertilisation

		2 ans			
		K	Ca	Mg	Na
		dissous kg/ha			
Période					
Fumure minérale	Estivale	1,94	20,0	10,5	14,1
	Automnale	2,11	16,4	9,2	11,5
	Hivernale	0,87	6,7	4,1	6,4
	Printanière	4,98	48,1	22,1	19,5
Fumier bovins	Estivale	3,74	17,6	8,2	4,9
	Automnale	3,16	15,4	7,7	4,4
	Hivernale	0,81	5,6	3,2	2,1
	Printanière	8,08	27,9	13,4	7,3
Lisier porcs	Estivale	2,00	31,6	14,0	17,4
	Automnale	2,21	26,7	12,3	14,0
	Hivernale	0,86	9,0	4,8	7,1
	Printanière	5,22	78,8	31,6	33,0
p>F Modes		0,1635	0,0786	0,0762	0,1015
p>F Périodes		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
p>F Modes x périodes		0,4641	0,0575	0,0764	0,0005

Annexe 15 Concentrations moyennes pondérées saisonnière de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les modes de fertilisation

		2 ans			
		K	Ca	Mg	Na
		dissous mg/L			
Période					
Fumure minérale	Estivale	3,4	35,2	18,4	25,2
	Automnale	3,5	30,5	16,9	19,7
	Hivernale	3,0	28,9	17,2	25,3
	Printanière	2,4	22,9	10,4	9,0
Fumier bovins	Estivale	6,8	32,0	14,5	8,2
	Automnale	4,8	26,5	13,3	7,5
	Hivernale	2,4	21,6	12,7	8,5
	Printanière	4,8	16,6	8,0	4,3
Lisier porcs	Estivale	3,4	56,6	24,9	30,8
	Automnale	3,7	53,6	24,4	26,1
	Hivernale	2,8	43,5	23,0	30,0
	Printanière	2,5	38,7	15,3	15,6
p>F Modes		0,1705	0,1218	0,1078	0,0195
p>F Périodes		0,1125	0,0016	0,0031	0,0004
p>F Modes x périodes		0,3505	0,8578	0,9656	0,1825

Annexe 16 Charges moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

Période		1 an			
		K	Ca	Mg	Na
		dissous kg/ha			
Fumure minérale	Estivale	2,9	31,7	17,2	25,8
	Automnale	2,5	20,1	11,4	16,8
	Hivernale	0,5	2,8	1,4	1,7
	Printanière	4,0	26,1	13,1	19,2
Fumier bovins	Estivale	2,9	15,1	8,7	7,4
	Automnale	2,4	9,1	5,2	4,2
	Hivernale	0,4	4,1	2,9	2,5
	Printanière	8,8	15,8	8,8	6,8
Lisier porcs	Estivale	3,1	42,2	21,4	31,6
	Automnale	2,8	29,8	15,1	23,2
	Hivernale	1,6	22,6	14,5	22,9
	Printanière	4,6	37,9	16,8	27,4

Annexe 17 Concentrations moyennes pondérées saisonnière de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous l'orge selon les modes de fertilisation

Période		1 an			
		K	Ca	Mg	Na
		dissous mg/L			
Fumure minérale	Estivale	3,4	37,5	20,3	30,4
	Automnale	3,4	27,2	15,4	22,8
	Hivernale	1,9	10,3	5,3	6,4
	Printanière	1,9	12,1	6,1	8,9
Fumier bovins	Estivale	3,8	20,0	11,4	9,8
	Automnale	3,6	14,1	8,06	6,5
	Hivernale	1,6	16,3	11,8	9,9
	Printanière	3,8	6,9	3,8	3,0
Lisier porcs	Estivale	4,0	53,2	27,0	39,9
	Automnale	3,3	35,1	17,7	27,3
	Hivernale	3,8	54,2	35,1	55,0
	Printanière	2,1	17,1	7,5	12,3

Annexe 18 Charges moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous le canola selon les modes de fertilisation

		1 an			
		K	Ca	Mg	Na
		dissous kg/ha			
Période					
Fumure minérale	Estivale	1,35	12,75	7,94	14,31
	Automnale	3,64	29,36	16,99	23,50
	Hivernale	0,39	4,19	2,85	5,62
	Printanière	6,09	38,40	19,77	22,62
Fumier bovins	Estivale	0,92	5,54	3,24	2,77
	Automnale	2,52	14,41	7,67	5,72
	Hivernale	0,13	1,78	1,19	0,94
	Printanière	7,75	26,82	11,93	7,23
Lisier porcs	Estivale	1,22	15,94	9,82	16,16
	Automnale	2,70	37,44	19,36	27,26
	Hivernale	0,22	3,40	2,17	3,73
	Printanière	5,81	48,63	22,13	27,26

Annexe 19 Concentrations moyennes pondérées saisonnière de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous le canola selon les modes de fertilisation

		1 an			
		K	Ca	Mg	Na
		dissous mg/L			
Période					
Fumure minérale	Estivale	3,4	32,2	20,1	36,2
	Automnale	3,0	24,3	14,1	19,5
	Hivernale	3,0	32,3	21,3	43,3
	Printanière	3,1	19,5	10,1	11,5
Fumier bovins	Estivale	2,7	16,1	9,4	8,1
	Automnale	2,9	16,7	8,9	6,6
	Hivernale	1,2	17,2	11,5	9,1
	Printanière	4,8	16,6	7,4	4,5
Lisier porcs	Estivale	3,8	50,0	30,8	50,7
	Automnale	2,4	33,3	17,2	24,2
	Hivernale	2,7	40,9	26,1	44,9
	Printanière	3,0	35,4	11,6	14,8

Annexe 20 Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous le maïs-grain selon les périodes

	Centile	Période			
		Estivale	Automnale	Hivernale	Printanière
N-NH <sub>4</sub> mg/L	25	0,008	0,010	0,008	0,018
	50	0,031	0,038	0,027	0,038
	90	0,206	0,156	0,090	0,158
N-NO <sub>3</sub> mg/L	25	5,13	8,53	6,54	5,25
	50	9,19	11,55	8,62	7,77
	90	28,20	25,34	20,50	21,14
NOD mg/L	25	0,18	0,3	0,08	0,03
	50	0,40	0,83	0,26	0,27
	90	2,30	1,80	1,06	1,47
NT mg/L	25	5,69	9,16	6,73	5,92
	50	9,98	12,57	8,89	8,30
	90	31,50	26,60	21,40	23,36
PRD µg/L	25	10	3	5	8
	50	19	9	12	19
	90	54	40	34	47
PD µg/L	25	17	9	12	18
	50	27	22	22	33
	90	75	85	55	65
POD µg/L	25	4	4	4	5
	50	8	8	7	10
	90	23	58	26	22
Pbio µg/L	25	28	29	16	29
	50	46	50	31	70
	90	195	232	140	169
PP µg/L	25	32	32	15	27
	50	74	75	30	100
	90	410	571	325	378
PT µg/L	25	60	58	35	62
	50	104	138	55	143
	90	535	613	390	435
K dissous mg/L	25	3,1	2,8	2,5	2,2
	50	3,7	3,1	3,0	2,8
	90	5,6	5,6	3,3	5,1
Ca dissous mg/L	25	26,5	24,0	21,8	19,1
	50	35,6	28,4	32,7	24,9
	90	61,0	57,8	55,0	46,1
Mg dissous mg/L	25	14,8	12,0	13,1	9,0
	50	19,5	15,4	20,1	12,1
	90	31,0	29,2	30,6	21,3
Na dissous mg/L	25	10,4	8,3	11,0	5,9
	50	27,0	15,2	31,0	9,8
	90	57,3	37,3	47,0	40,1

Annexe 21 Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous l'orge selon les périodes

	Centile	Période			
		Estivale	Automnale	Hivernale	Printanière
N-NH <sub>4</sub> mg/L	25	0,009	0,003	0,004	0,000
	50	0,042	0,023	0,009	0,027
	90	0,340	0,134	0,088	0,136
N-NO <sub>3</sub> mg/L	25	3,90	4,30	4,80	3,70
	50	6,30	7,10	5,80	5,50
	90	13,00	10,9	10,50	12,30
NOD mg/L	25	0,00	0,28	0,04	0,18
	50	0,63	0,68	0,27	0,54
	90	1,88	1,36	1,00	1,20
NT mg/L	25	4,66	5,61	5,06	4,35
	50	6,91	7,55	5,99	6,08
	90	14,75	11,05	10,80	12,60
PRD µg/L	25	6	15	1	9
	50	21	27	7	18
	90	53	70	21	46
PD µg/L	25	9	24	9	16
	50	26	37	16	28
	90	80	88	42	64
POD µg/L	25	6	2	4	4
	50	10	6	8	9
	90	24	33	28	21
Pbio µg/L	25	25	22	9	13
	50	44	60	13	30
	90	260	300	38	362
PP µg/L	25	13	34	11	17
	50	48	78	19	33
	90	745	590	54	976
PT µg/L	25	49	46	24	35
	50	104	103	37	59
	90	700	796	84	1027
K dissous mg/L	25	3,1	3,2	0,0	1,1
	50	3,4	3,9	3,5	2,1
	90	4,4	5,0	3,7	4,0
Ca dissous mg/L	25	14,6	21,3	20,1	7,2
	50	27,5	34,4	35,2	10,0
	90	43,6	56,2	40,1	23,6
Mg dissous mg/L	25	11,0	7,9	9,6	2,9
	50	19,0	15,2	22,0	5,1
	90	31,0	25,1	28,0	13,3
Na dissous mg/L	25	8,2	9,6	11,2	0,7
	50	21,5	19,0	41,3	2,5
	90	44,6	52,2	55,0	20,5

Annexe 22 Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous le canola selon les périodes

	Centile	Période			
		Estivale	Automnale	Hivernale	Printanière
N-NH <sub>4</sub> mg/L	25	0,003	0,013	0,000	0,000
	50	0,014	0,033	0,013	0,005
	90	0,070	0,110	0,042	0,044
N-NO <sub>3</sub> mg/L	25	3,49	3,92	2,55	5,50
	50	5,06	6,20	4,80	7,50
	90	7,72	11,50	7,58	11,7
NOD mg/L	25	3,89	4,42	2,70	5,80
	50	5,55	6,88	4,90	8,00
	90	8,30	12,25	8,30	11,90
NT mg/L	25	0,28	0,24	0,09	0,08
	50	0,44	0,56	0,26	0,32
	90	1,14	1,14	0,88	1,21
PRD µg/L	25	7	4	3	2
	50	14	6	5	6
	90	66	30	23	26
PD µg/L	25	15	7	8	8
	50	23	12	10	11
	90	94	39	30	50
POD µg/L	25	4	2	4	5
	50	10	5	6	7
	90	26	13	10	22
Pbio µg/L	25	11	13	9	11
	50	18	30	13	57
	90	103	130	43	144
PP µg/L	25	10	30	22	26
	50	23	75	26	119
	90	180	360	120	370
PT µg/L	25	25	38	31	30
	50	38	85	36	166
	90	260	380	125	400
K dissous mg/L	25	1,6	1,4	1,3	1,5
	50	3,0	2,4	3,2	2,4
	90	4,7	4,0	3,8	5,0
Ca dissous mg/L	25	16,8	17,3	18,2	16,6
	50	30,0	27,3	35,5	21,4
	90	54,4	41,0	54,0	35,0
Mg dissous mg/L	25	11,9	10,4	12,8	10,0
	50	20,8	15,4	25,2	12,0
	90	36,1	28,0	37,6	22,5
Na dissous mg/L	25	11,9	9,8	12,2	8,5
	50	41,0	25,2	48,4	12,4
	90	62,6	44,8	65,0	45,0

## 11. GLOSSAIRE

---

**Azote total dissous (NT)** : Total de l'azote soluble présent sous formes minérale et organique.

**Azote minéral (Nmin)** : Total de l'azote minéral soluble présent sous formes nitrique et ammoniacale.

**Nitrate (N-NO<sub>3</sub>)** : Forme nitrique de l'azote minéral soluble.

**Ammonium (N-NH<sub>4</sub>)** : Forme ammoniacale de l'azote minéral soluble.

**Azote organique dissous (NOD)** : Total des formes d'azote organique soluble.

**Phosphore total (PT)** : Total des formes de phosphore particulaire et dissous.

**Phosphore particulaire (PP)** : Phosphore non soluble présent dans les particules de sol.

**Phosphore dissous (PD)** : Phosphore soluble présent dans l'eau sous formes organique et minérale.

**Phosphore minéral réactif dissous (PRD)** : Fraction du phosphore dissous sous forme d'orthophosphate soluble.

**Phosphore organique dissous (POD)** : Fraction du phosphore dissous présent dans la matière organique soluble.

**Phosphore biodisponible (Pbio)** : Fraction du phosphore immédiatement disponible pour la croissance des algues dans le milieu aquatique. Cette fraction correspond au phosphore réactif dissous (PRD) plus une fraction du P particulaire (PP).

**Phosphore particulaire biodisponible (BioPP)** : Fraction biodisponible qui provient du P particulaire (PP).