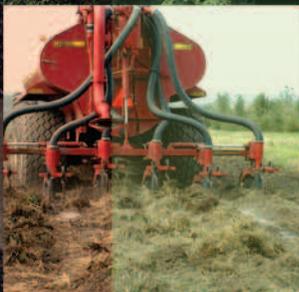
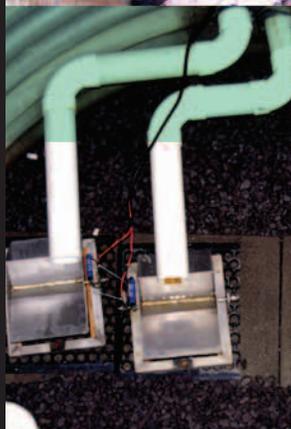


Cahier n° 5

**INFLUENCE DES MODES DE FERTILISATION SUR LES  
PERTES D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS DANS LES DRAINS  
AGRICILES SOUS PRAIRIES ET ORGE GRAINÉE**



**ir**da

INSTITUT DE RECHERCHE  
ET DE DÉVELOPPEMENT EN  
AGROENVIRONNEMENT

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 Parcs
- Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation

 **L'Union des  
producteurs  
agricoles**

ISBN-13 978-2-922851-55-7

ISBN-10 2-922851-55-9

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 PRAIRIES  
ET ORGE GRAINÉE**

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

**Cahier no 5**



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

**Mai 2006**



### Objectifs poursuivis

L'Observatoire de la qualité des sols est un réseau de sites protégés, établis et maintenus à long terme dans plusieurs régions agricoles du Québec. Ses objectifs sont de suivre l'évolution de la qualité des sols cultivés sous l'influence des activités agricoles incluant principalement les régies et les systèmes culturaux. L'étude consiste pour l'essentiel dans la prise régulière de mesures permettant d'évaluer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, les rendements, la qualité et la composition chimique des récoltes ainsi que l'effet sur l'environnement, notamment sur la qualité de l'eau.

La connaissance des changements des caractéristiques du milieu dans le temps permet de juger de la valeur et de la durabilité des systèmes agricoles et d'apporter au besoin les correctifs appropriés. C'est l'objectif poursuivi par ce projet.

### Diffusion des résultats

Les résultats de ces études sont publiés dans les cahiers de l'Observatoire de la qualité des sols agricoles du Québec. Il s'agit d'une collection de plusieurs numéros faisant état des changements survenus selon les traitements appliqués aux différents sites de l'Observatoire.

**Michel Rompré**

*Coordonnateur du réseau de l'Observatoire de la qualité de sols agricoles du Québec*



## TABLE DES MATIÈRES

---

### LISTE DES TABLEAUX, DES FIGURES ET DES ANNEXES

RÉSUMÉ .....	p. 7
1. INTRODUCTION .....	p. 8
1.1 Problématiques associées aux pertes d'éléments nutritifs .....	p. 8
1.2 Voies de transport des éléments nutritifs .....	p. 8
1.3 Pertes des éléments nutritifs .....	p. 9
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. BUT ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE .....	p. 13
3. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE .....	p. 13
3.1 Description du protocole expérimental .....	p. 13
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. 17
4. RÉSULTATS – HAUTEUR DES LAMES D'EAU DRAINÉE .....	p. 18
5. RÉSULTATS – CONCENTRATIONS ET CHARGES PERDUES AUX DRAINS .....	p. 20
5.1 Azote total dissous .....	p. 20
5.2 Azote nitrique .....	p. 21
5.3 Azote ammoniacal .....	p. 22
5.4 Azote organique dissous .....	p. 23
5.5 Phosphore total .....	p. 24
5.6 Phosphore particulaire .....	p. 25
5.7 Phosphore dissous .....	p. 26
5.8 Phosphore minéral réactif dissous .....	p. 26
5.9 Phosphore organique dissous .....	p. 27
5.10 Phosphore biodisponible .....	p. 28
5.11 Potassium dissous .....	p. 28
5.12 Calcium dissous .....	p. 30
5.13 Magnésium dissous .....	p. 30
5.14 Sodium dissous .....	p. 31
6. RÉSULTATS – DISTRIBUTION CENTILE DES CONCENTRATIONS .....	p. 31
6.1 Distribution centile des concentrations en azote .....	p. 31
6.2 Distribution centile des concentrations en phosphore .....	p. 35
6.3 Distribution centile des concentrations en potassium dissous .....	p. 41
6.4 Distribution centile des concentrations en calcium dissous .....	p. 41
6.5 Distribution centile des concentrations en magnésium dissous .....	p. 41
6.6 Distribution centile des concentrations en sodium dissous .....	p. 42
7. CONCLUSIONS .....	p. 42
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	p. 44
9. REMERCIEMENTS .....	p. 45
10. ANNEXES .....	p. 46
11. GLOSSAIRE .....	p. 57

## LISTE DES TABLEAUX, DES FIGURES ET DES ANNEXES

Tableau 3.1	Fiche descriptive du profil de sol de la série Le Bras.....	p. 13
Tableau 3.2	Description de la séquence culturale et des modes de fertilisation des parcelles .....	p. 14
Tableau 3.3	Analyse chimique du sol Le Bras au début (1996) et à la fin de l'expérience (2004) .....	p. 14
Tableau 4.1	Hauteur annuelle de la lame d'eau drainée sous prairies et orge grainée selon les modes de fertilisation et les années.....	p. 18
Tableau 4.2	Hauteur de la lame d'eau drainée sous prairies et orge grainée selon les périodes et les modes de fertilisation .....	p. 19
Tableau 5.1	Charges moyennes annuelles d'azote perdu aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 20
Tableau 5.2	Concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.....	p. 22
Tableau 5.3	Charges moyennes annuelles de phosphore perdu aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 24
Tableau 5.4	Concentrations moyennes annuelles pondérées de phosphore dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 25
Tableau 5.5	Charges moyennes annuelles de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.....	p. 29
Tableau 5.6	Concentrations moyennes annuelles pondérées de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 29
Tableau 6.1	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 37
Tableau 6.2	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous orge grainée selon les modes de fertilisation.....	p. 38
Figure 1.	Plan de drainage des parcelles .....	p. 15
Figure 2.	Puits, système de mesure et d'échantillonnage des eaux des drains souterrains .....	p. 15
Figure 3.	Diagramme représentant les fractions d'azote et de phosphore dosés dans les eaux des drains souterrains ....	p. 17
Figure 4.	Pertes annuelles des formes d'azote aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 21
Figure 5.	Pertes annuelles des formes de phosphore aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 26
Figure 6.	Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 33
Figure 7.	Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous orge grainée selon les modes de fertilisation .....	p. 34
Figure 8.	Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore et de magnésium dissous dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 39
Figure 9.	Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore, de magnésium et de sodium dissous dans l'eau des drains sous orge grainée selon les modes de fertilisation.....	p. 40
Annexe 1.	Quantités d'éléments nutritifs apportés dans les parcelles selon les années et les modes de fertilisation .....	p. 46
Annexe 2.	Charges moyennes saisonnières d'azote perdu aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 47
Annexe 3.	Concentrations moyennes pondérées saisonnières d'azote dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.....	p. 48
Annexe 4.	Charges saisonnières des éléments nutritifs perdus aux drains sous orge grainée selon les modes de fertilisation.....	p. 49
Annexe 5.	Concentrations moyennes pondérées saisonnières des éléments nutritifs perdus dans l'eau des drains sous orge grainée selon les modes de fertilisation .....	p. 50
Annexe 6.	Charges moyennes saisonnières du phosphore perdu aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.....	p. 51
Annexe 7.	Concentrations moyennes pondérées saisonnières de phosphore dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation .....	p. 52
Annexe 8.	Charges moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.....	p. 53
Annexe 9.	Concentrations moyennes pondérées saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.....	p. 54
Annexe 10.	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous prairies selon les périodes.....	p. 55
Annexe 11.	Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous orge grainée selon les périodes..	p. 56

## 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 prairies et en orge grainée soumis à quatre modalités de fertilisation (fumier de bovins, fumier de poulets, lisier de porcs et fumure minérale). Les hauteurs de la lame d'eau drainée ont été mesurées pour les quatre modes de fertilisation pendant six années pour les prairies et une année pour l'orge grainée. Dans les prairies, la hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau a été de 29,24 cm. Elle ne diffère pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,447$ ) mais très significativement selon les années ( $p < 0,0001$ ). Pour l'orge grainée, la hauteur annuelle de la lame d'eau drainée a été de 24,16 cm. Elle varie très peu entre les modes de fertilisation.

Dans les prairies, six années de mesures ont été effectuées pour le N total dissous, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub>, N organique dissous, P dissous, P minéral réactif dissous, P organique dissous et trois années pour P total, P particulaire, P biodisponible, K, Ca, Mg et Na dissous. Pour l'orge grainée, deux années de mesures des concentrations énumérées et une année de mesures des charges ont été effectuées.

Les drains souterrains constituent une voie d'évacuation assez importante pour certains éléments nutritifs sous prairies mais moins importante pour d'autres. Les pertes d'azote total dissous (NT) et de nitrate (N-NO<sub>3</sub>) sont faibles comparativement à celles généralement mesurées sous cultures commerciales. Les charges moyennes annuelles de NT aux drains ont varié de 4,7 à 10,4 kg N/ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de 1,81 à 3,71 mg N/L. Les charges moyennes annuelles de nitrate sont de 3,5 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec la fumure minérale, de 5,8 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le fumier de bovins, de 7,7 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le fumier de poulets et de 8,5 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le lisier de porcs. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de nitrate sont de 1,41 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour la fumure minérale, de 2,03 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de bovins laitiers, de 2,78 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de poulets et de 3,00 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le lisier de porcs. Les charges moyennes annuelles d'azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>) ont varié de 237 à 396 g N-NH<sub>4</sub>/ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de 0,08 à 0,13 mg N-NH<sub>4</sub>/L.

Les charges moyennes annuelles de phosphore total (PT) aux drains sous prairies ont varié de 437 à 1 249 g P/ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de PT ont varié de 159 à 489 µg P/L. Ces pertes importantes de P se produisent principalement sous forme particulaire mais également sous forme dissoute. Les charges moyennes annuelles de phosphore particulaire (PP) ont varié de 360 à 1 086 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les pertes tendent à être plus élevées avec le lisier de porcs. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de (PP) ont varié de 125 à 424 µg P/L selon les modes de fertilisation. Les pertes tendent à être plus élevées avec le lisier de porcs. Les charges moyennes annuelles de phosphore dissous (PD) perdu ont varié de 79 à 142 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les pertes sont plus faibles avec la fumure minérale comparativement aux fumures organiques. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PD ont varié de 29 à 52 µg P/L selon les modes de fertilisation. La fraction de P minéral réactif dissous (PRD) est plus élevée que la fraction de P organique dissous (POD). Les charges moyennes annuelles de P biodisponible (Pbio) perdu ont varié de 194 à 552 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Pbio ont varié de 80 à 219 µg P/L. Les coefficients de disponibilité du P particulaire (DPP) ont été de 0,322 dans la parcelle fertilisée avec la fumure minérale, de 0,357 avec le fumier de bovins, de 0,322 avec le fumier de poulets et de 0,401 avec le lisier de porcs.

Les charges moyennes annuelles de potassium (K) dissous perdu aux drains sous prairies ont varié de 1,9 à 3,9 kg K/ha selon les modes de fertilisation. Les pertes tendent à être plus élevées avec les fumiers de poulets et de bovins. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de K dissous ont varié de 0,85 à 1,60 mg K/L. Les charges moyennes annuelles de calcium (Ca) dissous perdu ont varié de 63 à 82 kg Ca/ha selon les modes de fertilisation. Les pertes tendent à être plus élevées avec les fumiers de poulets et de bovins. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Ca dissous ont varié de 22 à 28 mg Ca/L. Les charges moyennes annuelles de magnésium (Mg) dissous perdu ont varié de 32 à 42 kg Mg/ha selon les modes de fertilisation. Les pertes tendent à être plus élevées avec les fumiers de poulets et de bovins. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Mg dissous ont varié de 11 à 15 mg Mg/L selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de sodium (Na) dissous perdu ont varié de 15 à 35 kg Na/ha selon les modes de fertilisation. Les pertes tendent à être plus élevées avec les fumiers de poulets et de bovins. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Na dissous ont varié de 6 à 13 mg Na/L.

Les pertes d'azote total (NT) et de nitrate ( $\text{N-NO}_3$ ) perdus aux drains sous orge grainée sont plus élevées que sous prairies. Les charges annuelles de NT ont varié de 8,7 à 20,4 kg N/ha et celles en nitrate de 8,2 à 19,7 kg  $\text{N-NO}_3$ /ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées ont varié de 3,67 à 8,29 mg NT/L et de 3,45 à 8,02 mg  $\text{N-NO}_3$ /L. Les charges moyennes annuelles d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4$ ) ont varié de 23 à 34 g  $\text{N-NH}_4$ /ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de 0,009 à 0,014 mg  $\text{N-NH}_4$ /L.

Les charges annuelles de P total (PT) perdu aux drains sous orge grainée ont varié de 359 à 473 g P/ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de PT de 144 à 202  $\mu\text{g P/L}$ . Ces pertes se produisent principalement sous forme particulaire mais également sous forme dissoute. Les charges annuelles de P particulaire (PP) ont varié de 293 à 410 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PP ont varié de 118 à 174  $\mu\text{g P/L}$ . Les charges annuelles de P dissous (PD) perdu ont varié de 48 à 65 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PD ont varié de 20,1 à 27,2  $\mu\text{g P/L}$ . Les charges annuelles de K dissous ont varié de 1,9 à 5,0 kg K/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de K dissous ont varié de 0,75 à 2,05 mg K/L. Les charges annuelles de Ca dissous ont varié de 55 à 87 kg Ca/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Ca dissous ont varié de 23 à 35 mg Ca/L. Les charges annuelles de Mg dissous perdu ont varié de 32 à 51 kg Mg/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Mg dissous ont varié de 13,3 à 20,9 mg Mg/L. Les charges annuelles de Na dissous perdu ont varié de 15,6 à 45,3 kg Na/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Na dissous ont varié de 6,3 à 18,4 mg Na/L.

Les profils de distribution centile des concentrations des éléments nutritifs aux drains sous prairies et orge grainée ont été établis pour chaque élément nutritif, pour chaque mode de fertilisation, ainsi que pour tous les modes confondus. La valeur médiane des concentrations (centile 50) aux drains sous prairies, tous les modes de fertilisation confondus, a été de 2,59 mg NT/L, de 2,12 mg  $\text{N-NO}_3$ /L, de 0,031 mg  $\text{N-NH}_4$ /L, de 0,32 mg NOD/L, de 84  $\mu\text{g PT/L}$ , de 46  $\mu\text{g PP/L}$ , de 31  $\mu\text{g PD/L}$ , de 21  $\mu\text{g PRD/L}$ , de 9  $\mu\text{g POD/L}$ , de 42  $\mu\text{g Pbio/L}$ , de 1,23 mg K/L, de 26,7 mg Ca/L, de 15,4 mg Mg/L et de 8,9 mg Na/L. Les centiles des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous prairies et orge grainée ont également été établis sur une base saisonnière.

La valeur médiane des concentrations (centile 50) aux drains sous orge grainée, tous les modes de fertilisation confondus, a été de 5,21 mg NT/L, de 4,73 mg  $\text{N-NO}_3$ /L, de 0,015 mg  $\text{N-NH}_4$ /L, de 0,34 mg NOD/L, de 52  $\mu\text{g PT/L}$ , de 31  $\mu\text{g PP/L}$ , de 28  $\mu\text{g PD/L}$ , de 20  $\mu\text{g PRD/L}$ , de 8  $\mu\text{g POD/L}$ , de 24  $\mu\text{g Pbio/L}$ , de 1,90 mg K/L, de 30,5 mg Ca/L, de 19,2 mg Mg/L et de 14,2 mg Na/L.

## 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 et 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 d'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 pour 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 le lessivage à travers le profil de sol, l'écoulement hypodermique, l'écoulement préférentiel, l'écoulement matriciel 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. 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 dissoute ou liée 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 dissoute ou particulaire.

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, de même que 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 et 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'apports d'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 différentes fractions 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  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  (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 affecteront 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  $\text{N-NO}_3/\text{L}$  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 cultivés 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. Ndayegamiye 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 les utilisant en complément à 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 d'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 pour 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 au sol 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 feuillets 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 à l'automne dans un sol argileux 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 mesurée 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  $\text{N-NO}_3/\text{an}$  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  $\text{N-NH}_4/\text{ha}$  selon les années et les modes de fertilisation. Elles 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  $\text{P}/\text{ha}$  selon les années et les modes de fertilisation. Elles 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 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 de faibles pertes de nitrate, même en situation de fertilisation élevée. La concentration en nitrate dans les drains sous prairies se situe 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 en 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 des 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 pertes 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 pertes 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 régulation d'épandage minimisant la présence d'engrais de ferme en surface 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 les sédiments, le phosphore et l'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 permettent 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 important processus de transport du 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 l'écoulement hypodermique. L'écoulement à travers la matrice du sol n'est pas toujours une voie d'entraînement significative du P dans les sols. 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 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 contribuant 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 de l'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), 10 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, sans noter d'effet significatif des traitements sur les exportations souterraines de P.

Au Québec, compte tenu de l'importance des superficies drainées souterrainement 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 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 prairies et orge grainée au site de l'Observatoire de la qualité des sols de Saint-Lambert de Lévis pour la période du 1er mai 1997 au 30 avril 2005. La hauteur de la lame d'eau drainée et diverses fractions de l'azote et 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 prairie de luzerne-fléole réimplantée tous les quatre ans avec de l'orge grainée. Ce système a été soumis à divers modes de fertilisation (fumure minérale, fumier de bovins laitiers, fumier de poulets et lisier de porcs). L'étude porte sur six années de mesures des concentrations, des charges et de la hauteur de la lame d'eau drainée sous prairies (trois années pour certains éléments). Sous orge grainée, 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 quatre modes de fertilisation sous prairies et orge grainée. 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 la 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 prairie de luzerne-fléole est réimplantée tous les quatre ans avec de l'orge grainée. Le tableau 3.2 présente la séquence culturale et les modes de fertilisation des parcelles expérimentales. Le champ est divisé en quatre parcelles correspondant aux quatre modes de fertilisation : fumier de bovins laitiers; fumier de poulets; lisier de porcs; et une fumure minérale. Chaque parcelle a une superficie de 0,22 ha. L'analyse des sols est présentée au tableau 3.3 pour 1996 et 2004, soit au début et à la fin de la présente étude. Les niveaux moyens en 2004 étaient de 3,30 % M.O., 0,15 % N total, 66 kg P/ha, 125 kg K/ha, 2419 kg Ca/ha, 256 kg Mg/ha, 31 kg Na/ha, 1217 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 de 1,5 %.

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

Horizon	Profondeur (cm)	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	CEC (me/100 g)
Apg	0-20	26	57	17	15,15
Aeg	20-28	17	59	24	12,12
Bg1	28-45	27	55	18	13,68
Bg2	45-85	26	52	22	10,23
Cg1	85-115	19	57	24	9,23
Cg2	115 et +	29	53	18	6,69

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

Traitements	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Fumure minérale	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole
Fumier de bovins	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole
Fumier de poulets	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole
Lisier de porcs	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole

Tableau 3.3. Analyse chimique du sol Le Bras au début (1996) 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	1996	0,140	2,62	6,09	1,6	43	152	1794	345	31	1260
	2004	0,136	2,90	5,98	1,8	47	137	1962	246	19	1210
Fumier bovins laitiers	1996	0,278	3,02	6,06	1,7	49	329	1917	260	34	1298
	2004	0,161	3,38	6,14	1,5	43	172	2218	267	24	1222
Fumier poulets	1996	0,144	3,17	6,10	4,1	114	188	2334	284	47	1280
	2004	0,160	3,57	6,24	3,7	101	92	2746	222	35	1227
Lisier porcs	1996	0,148	2,94	6,01	3,4	96	251	2119	338	48	1271
	2004	0,142	3,33	6,39	2,7	72	101	2748	289	45	1209
Moyenne en 2004		0,150	3,30	6,19	2,42	66	125	2419	256	31	1217

Dans les prairies, des doses moyennes annuelles de 23 kg N/ha, 25 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 69 kg K<sub>2</sub>O/ha ont été appliquées dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale, de 155 kg N/ha, 73 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 162 kg K<sub>2</sub>O/ha dans celle fertilisée avec du fumier de bovins, de 95 kg N/ha, 79 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 55 kg K<sub>2</sub>O/ha dans celle fertilisée avec du fumier de poulets et de 123 kg N/ha, 76 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 62 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 23 t/ha de fumier de bovins laitiers, de 4,0 t/ha de fumier de poulets et de 30 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. La fumure minérale a été appliquée à la volée en surface au printemps. Les engrais organiques ont été appliqués après la première coupe.

Dans l'orge grainée, des doses moyennes annuelles de 35 kg N/ha, 83 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 116 kg K<sub>2</sub>O/ha ont été appliquées dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale, de 108 kg N/ha, 47 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 150 kg K<sub>2</sub>O/ha dans celle fertilisée avec du fumier de bovins, de 113 kg N/ha, 78 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 80 kg K<sub>2</sub>O/ha dans celle fertilisée avec du fumier de poulets et de 63 kg N/ha, 28 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 29 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 25 t/ha de fumier de bovins, de 4,3 t/ha de fumier de poulets et de 30 m<sup>3</sup>/ha de lisier de porcs ont été appliquées. Les engrais minéraux et organiques ont été appliqués à la volée et incorporés avec un vibroculteur en présemis. Les doses annuelles d'application de N, P et K sont présentées à l'annexe 1.

### 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 80 m à une profondeur de 90 cm (Figure 1). Ces lignes de drains ont été installées en 1990, soit 7 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 2). 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 1er 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 1er mai au 31 août, celle dite automnale du 1er septembre au 30 novembre, la période dite hivernale du 1er décembre au 28 février et la période printanière du 1er 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.

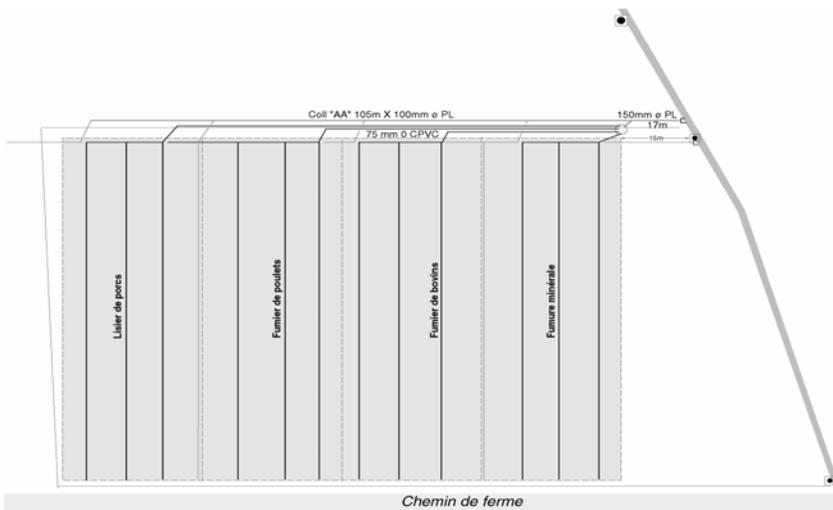


Figure 1. Plan de drainage des parcelles.

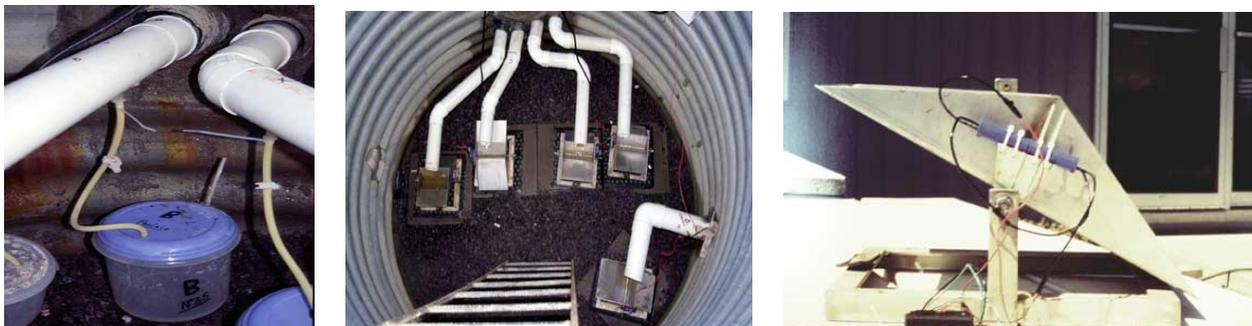


Figure 2. Puits, système de mesure et d'échantillonnage des eaux des drains souterrains.

### 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 minérale et organique dissoutes a été effectuée dans le surnageant centrifugé. L'échantillon subit une digestion par ultraviolet en milieu acide, cela 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 (Nmin), on procède directement au dosage des nitrates ( $\text{N-NO}_3$ ) et de l'ammonium ( $\text{N-NH}_4$ ) par colorimétrie sur Technicon sans digestion UV. La différence entre NT et le Nmin donne le NOD.

Les éléments K, Ca, Mg et Na dans le surnageant sont dosés par spectrométrie d'émission 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) de même que 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 AAII 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 16 échantillons d'eau riche en P particulaire provenant de 4 répétitions de chacun des 4 modes de fertilisation des parcelles sous prairies. 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 :

$$(1) \quad \text{DPP} = (\text{Pbio} - \text{PRD})/\text{PP}$$
$$(2) \quad \text{BioPP} = \text{DPP} \times \text{PP}$$

Si le coefficient DPP est près de 0, cela signifie que le P particulaire est peu biodisponible; une valeur de 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 :

$$\text{Pbio} = \text{PRD} + (\text{DPP} \times \text{PP})$$

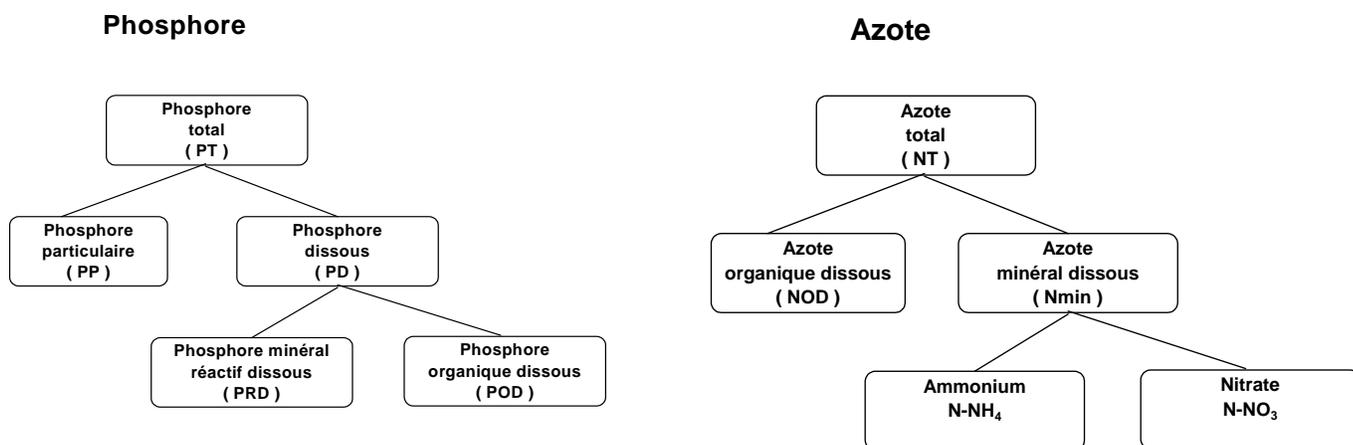


Figure 3 Diagramme représentant les fractions d'azote et de phosphore dosés dans les eaux des drains souterrains

Pour plus d'information sur les définitions des fractions de N et P traitées, sur les relations entre ces fractions et les abréviations utilisées dans ce document, veuillez consulter le glossaire à la fin du document et la figure 3.

### 3.4 Traitements statistiques

L'expérience a comporté six années de suivi sous prairies 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 trois 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 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. Un niveau critique de probabilité de p=0,150 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.

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

Un profil de distribution centile des concentrations des différentes fractions des éléments nutritifs a été établi pour chacun des modes de fertilisation pour les prairies et l'orge grainée. Le centile des concentrations des éléments nutritifs a aussi été établi par période pour ces cultures.

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

Dans les prairies, la hauteur moyenne de la lame d'eau drainée annuellement a été de 29,24 cm, soit 27,92 cm dans la parcelle fertilisée avec la fumure minérale, 29,12 cm dans celle avec le fumier de poulets, 29,58 cm dans celle au lisier de porcs et 30,37 cm dans celle au fumier de bovins (Tableau 4.1). Les hauteurs moyennes annuelles ne diffèrent pas significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,447$ ) mais elles diffèrent très significativement selon les années ( $p < 0,0001$ ). La hauteur minimale annuelle a été de 16,25 cm et la hauteur maximale annuelle a été de 47,47 cm. Chaque centimètre d'eau drainée correspond à un volume de 100 000 litres/ha. Un volume annuel moyen d'eau drainée de 2924 m<sup>3</sup>/ha (minimum de 1625 m<sup>3</sup>/ha et maximum de 4747 m<sup>3</sup>/ha) a donc été mesuré.

La hauteur moyenne d'eau drainée sous prairies a été de 12,67 cm à la période printanière, de 5,22 cm à la période estivale, de 8,20 cm à la période automnale et de 3,16 cm à la 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 a pas de différence significative de la lame d'eau drainée entre les modes de fertilisation pour une même période ( $p = 0,953$ ) (Tableau 4.2).

Pour l'orge grainée, la hauteur annuelle de la lame d'eau drainée a été de 23,67 cm dans la parcelle fertilisée avec la fumure minérale, de 24,54 cm dans celle avec le fumier de poulets, de 24,96 cm dans celle au lisier de porcs et de 23,48 cm dans celle au fumier de bovins (Tableau 4.1). La hauteur diffère très peu entre les modes de fertilisation. Elle a été de 11,72 cm à la période printanière, de 1,89 cm à la période estivale, de 9,42 cm à la période automnale et de 1,14 cm à la période hivernale, pour un total annuel de 24,16 cm, soit 2416 m<sup>3</sup>/ha (Tableau 4.2).

Tableau 4.1. Hauteur annuelle de la lame d'eau drainée sous prairies et orge grainée selon les modes de fertilisation et les années.

	Prairie ( 6 ans )		Orge grainée ( 1 an )
Prairie ( 6 ans )	Hauteur ( cm )		
Fumure minérale	27,92 a	Min.: 19,4 Max.: 39,6	23,67
Fumier bovins	30,37 a	Min.: 19,5 Max.: 40,8	23,48
Fumier poulets	29,12 a	Min.: 18,0 Max.: 47,5	24,54
Lisier porcs	29,58 a	Min.: 16,3 Max.: 44,8	24,96
Moyenne :	29,24		24,16
p > F modes	0,4466		
p > F années	< 0,0001		
C.V. %	39,63		

Tableau 4.2. Hauteur de la lame d'eau drainée sous prairies et orge grainée selon les périodes et les modes de fertilisation.

		Prairie ( 6 ans )	Orge grainée ( 1 an )
Période		Hauteur (cm)	
Fumure minérale	Estivale	4,89	1,83
	Automnale	8,27	9,81
	Hivernale	2,96	1,25
	Printanière	11,81	10,78
Fumier bovins	Estivale	5,65	2,22
	Automnale	8,40	8,92
	Hivernale	3,04	0,89
	Printanière	13,29	11,44
Fumier poulets	Estivale	5,03	1,50
	Automnale	8,06	10,26
	Hivernale	3,18	1,30
	Printanière	12,85	11,48
Lisier porcs	Estivale	5,31	1,99
	Automnale	8,06	8,68
	Hivernale	3,47	1,13
	Printanière	12,74	13,17

$p > F$  modes 0,9525  
 $p > F$  périodes < 0,0001  
 $p > F$  modes x périodes 1,0000

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

### 5.1 Azote total dissous

Les charges moyennes annuelles d'azote total (NT) dissous perdu aux drains sous prairies sont respectivement de 4,7 kg N/ha avec la fumure minérale, de 7,6 kg N/ha avec le fumier de bovins, de 9,6 kg N/ha avec le fumier de poulets et de 10,4 kg N/ha avec le lisier de porcs (Tableau 5.1). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p < 0,0001$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Elles sont plus élevées avec les fumures organiques qu'avec la fumure minérale. Les pertes de N total dissous demeurent faibles sous prairies, même si les modes de fertilisation exercent un effet significatif.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NT aux drains sous prairies sont de 1,81 mg N/L pour la fumure minérale, de 2,63 mg N/L pour le fumier de bovins, de 3,64 mg N/L pour le fumier de poulets et de 3,71 mg N/L pour le lisier de porcs (Tableau 5.2). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p < 0,0001$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Elles sont plus élevées avec les engrais organiques mais demeurent basses pour tous les modes de fertilisation.

Les valeurs de NT sous prairies 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 ( $p = 0,001$ ) (Annexes 2 et 3). Celles-ci sont plus élevées pour la période printanière.

Les charges annuelles de NT perdu aux drains sous orge grainée sont de 8,7 kg N/ha avec la fumure minérale, de 10,8 kg N/ha avec le fumier de bovins, de 20,4 kg N/ha avec le fumier de poulets et de 15,9 kg N/ha avec le lisier de porcs (Annexe 4). Elles demeurent relativement faibles sous orge grainée mais sont plus élevées que celles sous prairies. Les modes de fertilisation semblent exercer un effet mais comme ces résultats ne portent que sur une année, il n'est pas possible de le démontrer statistiquement.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NT aux drains sous orge grainée sont de 3,67 mg N/L pour la fumure minérale, de 4,60 mg N/L pour le fumier de bovins, de 8,29 mg N/L pour le fumier de poulets et de 6,38 mg N/L pour le lisier de porcs (Annexe 5). Elles sont plus élevées que celles mesurées sous prairies.

Les charges de NT perdu sous orge grainée sont plus élevées à l'automne, particulièrement pour le fumier de poulets. Les charges printanières sont également assez importantes, particulièrement pour le fumier de poulets et le lisier de porcs. Les concentrations moyennes pondérées saisonnières sont plus élevées à l'automne pour toutes les fumures.

Tableau 5.1. Charges moyennes annuelles d'azote perdu aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

	6 ans							
	N-NH <sub>4</sub> (g/ha)	N-NO <sub>3</sub> (kg/ha)		NOD (kg/ha)		NT dissous (kg/ha)		
Fumure minérale	237 a	Min.: 56 Max.: 489	3,5 c	Min.: 0,7 Max.: 7,4	0,9 a	Min.: 0,5 Max.: 1,1	4,7 c	Min.: 2,15 Max.: 8,33
Fumier bovins	396 a	Min.: 138 Max.: 851	5,8 b	Min.: 1,9 Max.: 12,3	1,3 a	Min.: 0,9 Max.: 1,8	7,6 b	Min.: 3,83 Max.: 13,71
Fumier poulets	349 a	Min.: 115 Max.: 877	7,7 a	Min.: 3,6 Max.: 12,3	1,6 a	Min.: 1,2 Max.: 1,9	9,6 a	Min.: 6,0 Max.: 14,4
Lisier porcs	320 a	Min.: 118 Max.: 772	8,5 a	Min.: 3,8 Max.: 13,0	1,6 a	Min.: 1,0 Max.: 2,6	10,4 a	Min.: 5,2 Max.: 15,6
p > F modes	0,2310	< 0,0001		0,0034	< 0,0001			
p > F années	0,0003	< 0,0001		0,0590	< 0,0001			
C.V. %	39,63	16,83		22,76	13,33			

## 5.2 Azote nitrique

Les charges moyennes annuelles de nitrate ( $\text{N-NO}_3$ ) perdu aux drains sous prairies sont de 3,5 kg  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  avec la fumure minérale, de 5,8 kg  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  avec le fumier de bovins, de 7,7 kg  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  avec le fumier de poulets et de 8,5 kg  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  avec le lisier de porcs (Tableau 5.1). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p < 0,0001$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Dans l'ensemble, elles demeurent faibles pour tous les modes de fertilisation. Les nitrates constituent la plus importante fraction de l'azote total perdu, soit 76,1 % pour la fumure minérale, 77,0 % pour le fumier de bovins, 80,1 % pour le fumier de poulets et de 81,7 % pour le lisier de porcs. La figure 4 présente les pertes moyennes annuelles d'azote aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation et les formes sous lesquelles cet azote est perdu.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de nitrate aux drains sous prairies sont de 1,41 mg  $\text{N-NO}_3/\text{L}$  pour la fumure minérale, de 2,03 mg  $\text{N-NO}_3/\text{L}$  pour le fumier de bovins laitiers, de 2,78 mg  $\text{N-NO}_3/\text{L}$  pour le fumier de poulets et de 3,00 mg  $\text{N-NO}_3/\text{L}$  pour le lisier de porcs (Tableau 5.2). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p < 0,0001$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Elles sont nettement en bas du critère de potabilité de l'eau qui est de 10 mg  $\text{N-NO}_3/\text{L}$ . Ceci démontre que les prairies contribuent très peu aux pertes de nitrate dans les champs peu importe le mode de fertilisation.

Les nitrates mesurés sous prairies ont été significativement différents entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p < 0,0001$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées ( $p = 0,013$ ) (Annexes 2 et 3). Celles-ci sont plus élevées pour la période printanière.

Les charges annuelles de nitrate perdu aux drains sous orge grainée sont de 8,2 kg  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  avec la fumure minérale, de 10,0 kg  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  avec le fumier de bovins, de 19,7 kg  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  avec le fumier de poulets et de 14,6 kg  $\text{N-NO}_3/\text{ha}$  avec le lisier de porcs (Annexe 4). Elles sont plus élevées que celles sous prairies. Les pertes de nitrate constituent la plus importante fraction de l'azote total dissous perdu aux drains, soit 94,0 % des pertes totales d'azote pour la fumure minérale, 92,2 % pour le fumier de bovins, 96,7 % pour le fumier de poulets et 91,6 % pour le lisier de porcs.

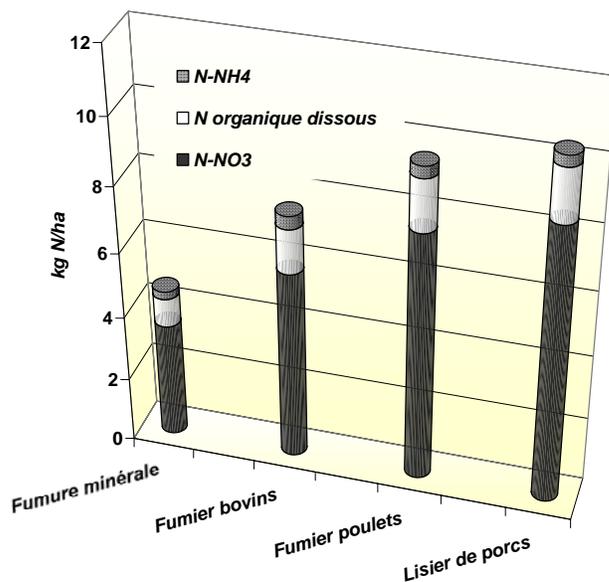


Figure 4. Pertes annuelles des formes d'azote aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de nitrate aux drains sous orge grainée sont de 3,45 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour la fumure minérale, de 4,24 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de bovins laitiers, de 8,02 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de poulets et de 5,85 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le lisier de porcs (Annexe 5). Elles sont en bas du critère de potabilité de l'eau mais plus élevées que celles mesurées sous prairies.

Les charges saisonnières de nitrate sous orge grainée ont été différentes selon les périodes. Les concentrations moyennes pondérées saisonnières les plus élevées ont été mesurées à la période automnale et les moins élevées à la période hivernale.

**Tableau 5.2. Concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.**

	6 ans			
	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT dissous
	(mg/L)			
Fumure minérale	0,08 a	1,41 c	0,32 b	1,81 c
Fumier bovins	0,13 a	2,03 b	0,47 ab	2,63 b
Fumier poulets	0,13 a	2,78 a	0,73 a	3,64 a
Lisier porcs	0,12 a	3,00 a	0,59 ab	3,71 a
p > F modes	0,2022	< 0,0001	0,0643	< 0,0001
p > F années	0,0001	< 0,0001	0,1560	< 0,0001
C.V. %	38,52	15,02	47,40	13,86

### 5.3 Azote ammoniacal

Les charges moyennes annuelles d'azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>) perdu aux drains sous prairies sont de 237 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour la fumure minérale, de 320 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour le lisier de porcs, de 349 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour le fumier de poulets et de 396 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour le fumier de bovins (Tableau 5.1). Elles ne sont pas significativement différentes entre les modes de fertilisation (p = 0,231) mais elles diffèrent significativement entre les années (p = 0,0003). Les pertes d'azote ammoniacal constituent la plus faible fraction de l'azote total dissous perdu aux drains. Elles représentent 3,1 % des pertes totales d'azote pour le lisier de porcs, 3,6 % pour le fumier de poulets, 5,1 % pour la fumure minérale et 5,2 % pour le fumier de bovins. Ces pertes représentent malgré tout une contribution assez importante vers les milieux aquatiques, compte tenu de leur grande vulnérabilité à cette forme d'azote.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote ammoniacal aux drains sous prairies sont de 0,08 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour la fumure minérale, de 0,12 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour le lisier de porcs (Tableau 5.2), de 0,13 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour le fumier de poulets et de 0,13 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour le fumier de bovins. Elles ne sont pas statistiquement différentes entre les modes de fertilisation (p = 0,202) mais elles le sont entre les années (p = 0,0001).

L'azote ammoniacal mesuré sous prairies 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 (p < 0,0001) (Annexes 2 et 3). Celles-ci sont nettement plus élevées pour la période printanière. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale mais il est plus important pour les parcelles avec les fumures organiques. L'ammonification des

matières organiques provenant du sol et des engrais de ferme apportés pendant l'année contribue à accroître les pertes d'ammonium, particulièrement au printemps.

Les charges annuelles d'azote ammoniacal perdu aux drains sous orge grainée sont de 33,4 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour la fumure minérale, de 22,8 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour le lisier de porcs, de 33,4 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour le fumier de poulets et de 33,6 g N-NH<sub>4</sub>/ha pour le fumier de bovins (Annexe 4). Elles sont faibles pour tous les modes de fertilisation. Les pertes d'azote ammoniacal constituent la plus faible fraction de l'azote total dissous perdu aux drains. Elles représentent 0,14 % des pertes totales d'azote pour le lisier de porcs, 0,16 % pour le fumier de poulets, 0,38 % pour la fumure minérale et 0,31 % pour le fumier de bovins.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées d'azote ammoniacal aux drains sous orge grainée sont de 0,014 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour la fumure minérale, de 0,009 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour le lisier de porcs, de 0,014 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour le fumier de poulets et de 0,014 mg N-NH<sub>4</sub>/L pour le fumier de bovins (Annexe 5). Elles diffèrent peu entre les modes de fertilisation.

Les charges et les concentrations moyennes pondérées saisonnières d'azote ammoniacal mesuré sous orge grainée sont différentes entre les périodes de l'année; elles sont plus élevées à la période automnale.

#### 5.4 Azote organique dissous

Les charges moyennes annuelles d'azote organique dissous (NOD) perdu aux drains sous prairies sont de 0,87 kg N/ha pour la fumure minérale, de 1,34 kg N/ha pour le fumier de bovins, de 1,56 kg N/ha pour le fumier de poulets et de 1,60 kg N/ha pour le lisier de porcs (Tableau 5.1). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,003$ ) et les années ( $p = 0,059$ ). La prairie fertilisée avec la fumure minérale perd moins de NOD que celles fertilisées avec les engrais de ferme. Les pertes d'azote organique dissous représentent 15,3 % de l'azote total perdu aux drains pour le lisier, 16,2 % pour le fumier de poulets, 17,8 % pour le fumier de bovins et 18,8 % pour la fumure minérale.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NOD aux drains sous prairies sont de 0,32 mg N/L pour la fumure minérale, de 0,47 mg N/L pour le fumier de bovins, de 0,59 mg N/L pour le lisier de porcs et de 0,73 pour le fumier de poulets (Tableau 5.2). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,064$ ) mais pas entre les années ( $p = 0,156$ ).

Les mesures de NOD sous prairies 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 ( $p = 0,0079$ ) (Annexes 2 et 3). Celles-ci sont nettement plus élevées pour la période printanière. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale mais il est plus important pour les parcelles avec les fumures organiques.

Les charges annuelles de NOD perdu aux drains sous orge grainée sont de 0,48 kg N/ha pour la fumure minérale, de 0,80 kg N/ha pour le fumier de bovins, de 0,65 kg N/ha pour le fumier de poulets et de 1,31 kg N/ha pour le lisier de porcs (Annexe 4). Les pertes de NOD représentent 8,2 % des pertes totales d'azote dissous pour le lisier, 3,2 % pour le fumier de poulets, 7,4 % pour le fumier de bovins et 5,5 % pour la fumure minérale.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de NOD aux drains sous orge grainée sont de 0,20 mg N/L pour la fumure minérale, de 0,34 mg N/L pour le fumier de bovins, de 0,53 mg N/L pour le lisier de porcs et de 0,26 pour le fumier de poulets (Annexe 5).

Les charges de NOD mesuré sous orge grainée ont été différentes entre les périodes de l'année. Elles sont plus élevées en périodes automnale et printanière. Les concentrations moyennes pondérées saisonnières tendent à être plus basses à la période hivernale. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation.

## 5.5 Phosphore total

Les charges moyennes annuelles de phosphore total (PT) perdu aux drains sous prairies sont de 437 g P/ha pour le fumier de bovins, de 567 g P/ha pour la fumure minérale, de 702 g P/ha pour le fumier de poulets et de 1249 g P/ha pour le lisier de porcs (Tableau 5.3). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,054$ ) et les années ( $p = 0,021$ ). Ces charges sont relativement importantes et seraient associées à des écoulements préférentiels aux drains.

Les concentrations moyennes pondérées de PT aux drains sous prairies sont de 159  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins, de 210  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 269  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de poulets et de 489  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (Tableau 5.4). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,030$ ) et les années ( $p = 0,029$ ).

Les mesures de PT sous prairies ont été significativement différentes entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,002$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées ( $p < 0,0001$ ) (Annexes 6 et 7). Celles-ci sont plus faibles à la période hivernale.

Les charges moyennes annuelles de PT perdu aux drains sous orge grainée sont de 473 g P/ha pour le fumier de bovins, de 446 g P/ha pour la fumure minérale, de 385 g P/ha pour le fumier de poulets et de 359 g P/ha pour le lisier de porcs (Annexe 4). Elles diffèrent peu entre les modes de fertilisation. Ces charges sont relativement importantes et montrent que les écoulements préférentiels aux drains peuvent contribuer de façon appréciable aux pertes de phosphore. Les concentrations moyennes pondérées de PT aux drains sous orge grainée sont de 202  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins, de 189  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 157  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de poulets et de 144  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (Annexe 5). Les charges de PT sous orge grainée ont été différentes entre les périodes de l'année. Celles-ci sont plus importantes à la période printanière suivie de la période automnale. En ce qui concerne les concentrations moyennes saisonnières pondérées de PT, elles sont plus élevées à la période printanière. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation.

Tableau 5.3. Charges moyennes annuelles de phosphore perdu aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

	6 ans						3 ans					
	PD		PRD		POD		PP		PT		Pbio	
	(g/ha)											
Fumure minérale	79 b	Min.: 45 Max.: 138	52 b	Min.: 29 Max.: 80	28 b	Min.: 16 Max.: 58	485 ab	Min.: 242 Max.: 870	567 b	Min.: 297 Max.: 921	214 b	Min.: 127 Max.: 324
Fumier bovins	142 a	Min.: 100 Max.: 236	93 a	Min.: 61 Max.: 160	49 a	Min.: 27 Max.: 76	360 b	Min.: 192 Max.: 495	437 b	Min.: 322 Max.: 596	194 b	Min.: 171 Max.: 237
Fumier poulets	134 a	Min.: 76 Max.: 172	88 ab	Min.: 58 Max.: 116	46 a	Min.: 18 Max.: 83	565 ab	Min.: 253 Max.: 996	702 ab	Min.: 392 Max.: 1094	276 ab	Min.: 196 Max.: 383
Lisier porcs	139 a	Min.: 87 Max.: 183	94 a	Min.: 68 Max.: 130	45 a	Min.: 19 Max.: 74	1086 a	Min.: 622 Max.: 2011	1249 a	Min.: 763 Max.: 2177	552 a	Min.: 359 Max.: 936
$p > F$ modes	0,0146		0,0544		0,0229		0,0835		0,0536		0,0650	
$p > F$ années	0,0650		0,4583		0,0003		0,0201		0,0216		0,0521	
C.V. %	26,62		33,82		27,38		46,47		39,07		42,96	

Tableau 5.4. Concentrations moyennes annuelles pondérées de phosphore dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

	6 ans			3 ans		
	PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio
	(µg/L)					
Fumure minérale	29 b	19 b	10 b	181 b	210 b	80 b
Fumier bovins	51 a	34 ab	17 a	125 b	159 b	74 b
Fumier poulets	50 a	33 ab	17 a	214 ab	269 b	109 b
Lisier porcs	52 a	36 a	16 a	424 a	489 a	219 a
p > F modes	0,0358	0,0917	0,0548	0,0488	0,0303	0,0629
p > F années	0,0037	0,0069	0,0007	0,0259	0,0287	0,0266
C.V. %	31,34	38,37	32,67	43,60	36,38	38,50

## 5.6 Phosphore particulaire

Les charges moyennes annuelles de phosphore particulaire (PP) perdu aux drains sous prairies sont de 360 g P/ha pour le fumier de bovins, de 485 g P/ha pour la fumure minérale, de 565 g P/ha pour le fumier de poulets et de 1086 g P/ha pour le lisier de porcs (Tableau 5.3). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,084$ ) et les années ( $p = 0,020$ ). Le PP constitue la plus forte fraction des pertes totales de P aux drains. Il représente 80,5 % des pertes totales pour le fumier de poulets, 82,4 % pour le fumier de bovins, 85,6 pour la fumure minérale et 86,9 % pour le lisier de porcs. La figure 5 présente les pertes moyennes annuelles de phosphore aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation et les formes sous lesquelles ce phosphore est perdu.

Les concentrations moyennes pondérées de PP aux drains sous prairies sont de 125 µg P/L pour le fumier de bovins, de 181 µg P/L pour la fumure minérale, de 214 µg P/L pour le fumier de poulets et de 424 µg P/L pour le lisier de porcs (Tableau 5.4). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,049$ ) et les années ( $p = 0,026$ ).

Le PP mesuré sous prairies a été significativement différent entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,112$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées ( $p = 0,094$ ) (Annexes 6 et 7). Celles-ci sont plus faibles en période hivernale. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale, mais il est plus important pour les parcelles avec le lisier de porcs.

Les charges moyennes annuelles de PP perdu aux drains sous orge grainée sont de 410 g P/ha pour le fumier de bovins, de 399 g P/ha pour la fumure minérale, de 331 g P/ha pour le fumier de poulets et de 293 g P/ha pour le lisier de porcs (Annexe 4). Les pertes de PP constituent la fraction la plus importante des pertes totales de P aux drains. Elles représentent 86,0 % des pertes totales pour le fumier de poulets, 86,7 % pour le fumier de bovins, 89,5 % pour la fumure minérale et 81,6 % pour le lisier de porcs.

Les concentrations moyennes pondérées de PP aux drains sous orge grainée sont de 174 µg P/L pour le fumier de bovins, de 168 µg P/L pour la fumure minérale, de 135 µg P/L pour le fumier de poulets et de 118 µg P/L pour le lisier de porcs. Les charges et les concentrations moyennes pondérées saisonnières de PP sont plus élevées à la période printanière.

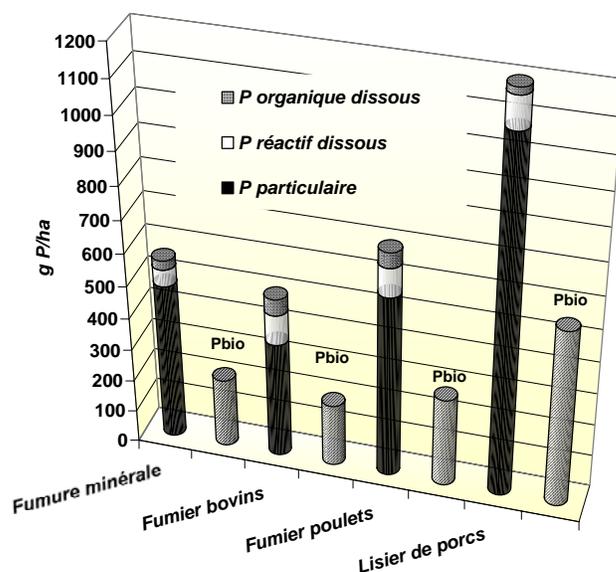


Figure 5. Pertes annuelles des formes de phosphore aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

## 5.7 Phosphore dissous

Les charges moyennes annuelles de phosphore dissous (PD) perdu aux drains sous prairies sont de 79 g P/ha pour la fumure minérale, de 134 g P/ha pour le fumier de poulets, de 139 g P/ha pour le lisier de porcs et de 142 g P/ha pour le fumier de bovins (Tableau 5.3). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,015$ ) et les années ( $p = 0,065$ ).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PD sous prairies sont de 29  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 50  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de poulets, de 51  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 52  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (Tableau 5.4). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,036$ ) et les années ( $p = 0,004$ ). La parcelle avec la fumure minérale présente des concentrations moins élevées que celles avec les engrais de ferme.

Le PD sous prairies 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 ( $p = 0,021$ ) (Annexes 6 et 7). Celles-ci sont élevées pour les périodes printanière et automnale mais surviennent également en été et, à un niveau moindre, en hiver. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale, mais il est plus important pour les parcelles avec les engrais organiques.

Les charges annuelles de PD perdu aux drains sous orge grainée sont de 48 g P/ha pour la fumure minérale, de 54 g P/ha pour le fumier de poulets, de 65 g P/ha pour le lisier de porcs et de 64 g P/ha pour le fumier de bovins (Annexe 4). Elle sont relativement semblables entre les modes de fertilisation.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PD sous orge grainée sont de 20,1  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 22,0  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de poulets, de 27,2  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 26,2  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (Annexe 5).

Les charges saisonnières et les concentrations moyennes pondérées saisonnières de PD sous orge grainée sont moins élevées à la période hivernale. Cette fraction se divise en deux, le P minéral réactif dissous et le P organique dissous.

## 5.8 Phosphore minéral réactif dissous

Les charges moyennes annuelles de phosphore minéral réactif dissous (PRD) perdu aux drains sous prairies sont de 52 g P/ha pour la fumure minérale, de 88 g P/ha pour le fumier de poulets, de 93 g P/ha pour le fumier de bovins et de 94 g P/ha pour le lisier de porcs (Tableau 5.3). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,054$ ) mais non

significativement différentes entre les années ( $p = 0,458$ ). Les pertes de PRD représentent 65,1 % du phosphore dissous perdu pour la fumure minérale, 65,2 % pour le fumier de bovins, 65,9 % pour le fumier de poulets et 67,5 % pour le lisier de porcs. La fraction du PRD constitue la plus forte proportion du P dissous perdu.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PRD aux drains sous prairies sont de 19  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 33  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de poulets, de 34  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 36  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs (Tableau 5.4). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,092$ ) et les années ( $p = 0,007$ ). La fumure minérale donne des concentrations moins élevées que les modes de fertilisation avec les engrais organiques.

Le PRD sous prairies 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 ( $p = 0,036$ ) (Annexes 6 et 7). Celles-ci sont élevées pour les périodes printanière et automnale. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale, mais il est plus important pour les parcelles avec les engrais organiques.

Les charges annuelles de PRD perdu aux drains sous orge grainée sont de 31 g P/ha pour la fumure minérale, de 34 g P/ha pour le fumier de poulets, de 41 g P/ha pour le fumier de bovins et de 39 g P/ha pour le lisier de porcs. Les pertes de PRD représentent 64,6 % du phosphore dissous perdu pour la fumure minérale, 64,1 % pour le fumier de bovins, 63,0 % pour le fumier de poulets et 60,0 % pour le lisier de porcs (Annexe 4). La fraction du PRD constitue la plus forte proportion du P dissous perdu.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PRD sous orge grainée sont de 13,2  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 13,9  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de poulets, de 17,6  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins et de 15,6  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs. Les charges et les concentrations moyennes pondérées saisonnières de PRD sont plus faibles à la période hivernale.

## 5.9 Phosphore organique dissous

Les charges moyennes annuelles de phosphore organique dissous (POD) perdu aux drains sous prairies sont de 28 g P/ha pour la fumure minérale, de 45 g P/ha pour le lisier de porcs, de 46 g P/ha pour le fumier de poulets et de 49 g P/ha pour le fumier de bovins (Tableau 5.3). Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,023$ ) et les années ( $p = 0,0003$ ). Les pertes de POD représentent 32,5 % du phosphore dissous perdu pour le lisier de porcs, 34,1 % pour le fumier de poulets, 34,8 % pour le fumier de bovins et 34,9 % pour la fumure minérale.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de POD aux drains sous prairies sont de 10  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 16  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs, de 17  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de poulets et de 17  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins (Tableau 5.4). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,055$ ) et les années ( $p = 0,0007$ ). La fumure minérale donne des concentrations moins élevées que les modes de fertilisation avec les engrais organiques.

Le POD 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 ( $p = 0,003$ ) (Annexes 6 et 7). Celles-ci sont élevées pour les périodes printanière et automnale. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale, mais il est plus important pour les parcelles avec les engrais organiques.

Les charges moyennes annuelles de POD perdu aux drains sous orge grainée sont de 16 g P/ha pour la fumure minérale, de 26 g P/ha pour le lisier de porcs, de 20 g P/ha pour le fumier de poulets et de 23 g P/ha pour le fumier de bovins (Annexe 4). Les pertes de POD représentent 40,0 % du phosphore dissous perdu pour le lisier de porcs, 37,0 % pour le fumier de poulets, 35,9 % pour le fumier de bovins et 35,4 % pour la fumure minérale.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de POD aux drains sous orge grainée sont de 6,8  $\mu\text{g P/L}$  pour la fumure minérale, de 10,6  $\mu\text{g P/L}$  pour le lisier de porcs, de 8,0  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de poulets et de 9,6  $\mu\text{g P/L}$  pour le fumier de bovins (Annexe 5). Les charges et les concentrations moyennes pondérées saisonnières de POD ont été différentes entre les périodes pour l'orge grainée. Elles sont plus basses à la période hivernale.

## 5.10 Phosphore biodisponible

Nous avons déterminé le P biodisponible (Pbio) avec une extraction au NaOH 0,11 N dans 16 échantillons d'eau provenant de 4 répétitions de chacun des 4 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 :

$$\begin{aligned} \text{DPP} &= (\text{Pbio} - \text{PRD})/\text{PP} \\ \text{BioPP} &= \text{DPP} \times \text{PP} \end{aligned}$$

Les coefficients moyens de biodisponibilité du P particulaire mesuré dans l'eau des drains sous prairies ont été de 0,324 (écart-type 0,047) dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale, de 0,357 (écart-type 0,086) dans celle avec du fumier de bovins, de 0,322 (écart-type 0,041) dans celle avec du fumier de poulets et de 0,401 (écart-type 0,087) dans celle avec du lisier de porcs. Il n'y a pas de différence significative entre les parcelles ( $p = 0,417$ ). Ceci signifie que le P particulaire est modérément biodisponible dans une proportion moyenne d'environ 35 %.

Le Pbio a été déterminé pour tous les échantillons d'eau en cumulant le PRD avec le BioPP. Les concentrations moyennes pondérées et les charges moyennes annuelles et saisonnières de Pbio sous prairies ont ainsi été calculées. Les charges moyennes annuelles de Pbio perdu aux drains sous prairies sont de 214 g P/ha pour la fumure minérale, de 276 g P/ha pour le fumier de poulets, de 194 g P/ha pour le fumier de bovins et de 552 g P/ha pour le lisier de porcs. Elles sont significativement différentes entre les modes de fertilisation ( $p = 0,065$ ) et les années ( $p = 0,052$ ). Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Pbio sont de 80 µg P/L pour la fumure minérale, de 109 µg P/L pour le fumier de poulets, de 74 µg P/L pour le fumier de bovins et de 219 µg P/L pour le lisier de porcs (Tableau 5.4). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,063$ ) et les années ( $p = 0,027$ ). Le lisier de porcs présente des charges et des concentrations de Pbio plus élevées que les autres modes de fertilisation.

Le Pbio sous prairies a été significativement différent entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,011$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées ( $p = 0,001$ ) (Annexes 6 et 7).

La concentration de phosphore total aux drains n'est pas représentative du risque réel que peuvent représenter les pertes pour le milieu aquatique. La figure 4 présente la fraction biodisponible par rapport aux autres fractions de P dans les eaux. La proportion de P biodisponible par rapport au P total est de 37,7 % pour la fumure minérale, de 44,4 % pour le fumier de bovins, de 39,3 % pour le fumier de poulets et de 44,2 % 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.

## 5.11 Potassium dissous

Les charges moyennes annuelles de potassium dissous (K) perdu aux drains sous prairies sont de 2,0 kg K/ha avec le lisier de porcs, de 2,7 kg K/ha avec la fumure minérale, de 2,8 kg K/ha avec le fumier de bovins et de 3,9 kg K/ha avec le fumier de poulets (Tableau 5.5). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,052$ ) mais ne diffèrent pas entre les années ( $p = 0,88$ ). Les pertes de K demeurent faibles sous prairies, peu importe le mode de fertilisation. Les prélèvements élevés de potassium par les récoltes et la teneur modérée du sol en K peuvent expliquer ces résultats.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de K dissous aux drains sous prairies sont de 0,85 mg K/L pour le lisier de porcs, de 1,02 mg K/L pour la fumure minérale, de 1,11 mg K/L pour le fumier de bovins et de 1,60 mg K/L pour le fumier de poulets (Tableau 5.6). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,074$ ) et les années ( $p = 0,015$ ). Les concentrations en potassium sont faibles pour tous les modes de fertilisation.

Le K dissous sous prairies a été significativement différent entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0024$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées ( $p = 0,038$ ) (Annexes 8 et 9). Celles-ci sont plus faibles à la période hivernale pour tous les modes de fertilisation. Les charges ( $p = 0,27$ ) et les concentrations moyennes saisonnières ( $p = 0,61$ ) de K ne sont pas significativement différentes selon les modes de fertilisation pour une même période.

Les charges moyennes annuelles de K dissous perdu aux drains sous orge grainée sont de 1,9 kg K/ha avec le lisier de porcs, de 3,2 kg K/ha avec la fumure minérale, de 3,4 kg K/ha avec le fumier de bovins et de 5,0 kg K/ha avec le fumier de poulets (Annexe

4). Les pertes de K demeurent faibles sous orge grainée. Les apports relativement modérés de K et la teneur moyenne en K du sol dans la couche arable et plus en profondeur peuvent expliquer ces résultats.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de K dissous aux drains sous orge grainée sont de 0,75 mg K/L pour le lisier de porcs, de 1,36 mg K/L pour la fumure minérale, de 1,43 mg K/L pour le fumier de bovins et de 2,05 mg K/L pour le fumier de poulets (Annexe 5). Les charges saisonnières de K dissous ont été différentes entre les périodes de l'année. Celles-ci sont plus élevées en périodes automnale et printanière.

Tableau 5.5. Charges moyennes annuelles de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous prairies selon le modes de fertilisation.

	3 ans							
	K		Ca		Mg		Na	
	(kg/ha)							
Fumure minérale	2,7 ab	Min.: 2,3 Max.: 3,1	63 b	Min.: 36 Max.: 83	32 b	Min.: 18 Max.: 39	21 bc	Min.: 12 Max.: 30
Fumier bovins	2,8 ab	Min.: 2,1 Max.: 3,5	82 a	Min.: 42 Max.: 106	42 a	Min.: 22 Max.: 59	27 ab	Min.: 15 Max.: 40
Fumier poulets	3,9 a	Min.: 3,4 Max.: 4,7	73 ab	Min.: 40 Max.: 93	39 ab	Min.: 21 Max.: 55	35 a	Min.: 18 Max.: 53
Lisier porcs	2,0 b	Min.: 1,4 Max.: 2,4	64 b	Min.: 33 Max.: 83	32 b	Min.: 15 Max.: 44	15 c	Min.: 7 Max.: 20
p > F modes	0,0519		0,0479		0,0453		0,0164	
p > F années	0,8824		< ,0001		< 0,0001		0,0024	
C.V. %	22,80		9,79		10,52		21,38	

Tableau 5.6. Concentrations moyennes annuelles pondérées de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

	3 ans			
	K	Ca	Mg	Na
	(mg/L)			
Fumure minérale	1,02 ab	22 b	11 b	7,7 bc
Fumier bovins	1,11 ab	28 a	15 a	9,3 b
Fumier poulets	1,60 a	28 a	15 a	13,2 a
Lisier porcs	0,85 b	24 b	12 b	5,5 c
p > F modes	0,0732	0,0077	0,0018	0,0061
p > F années	0,0149	0,0003	< 0,0001	0,0064
C.V. %	24,71	6,10	5,48	18,47

## 5.12 Calcium dissous

Les charges moyennes annuelles de calcium dissous (Ca) perdu aux drains sous prairies sont de 63 kg Ca/ha avec la fumure minérale, de 64 kg Ca/ha avec le lisier de porcs, de 73 kg Ca/ha avec le fumier de poulets et de 82 kg Ca/ha avec le fumier bovins (Tableau 5.5). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,048$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Les pertes de Ca dissous sont élevées sous prairies, peu importe le mode de fertilisation.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Ca dissous aux drains sous prairies sont de 22 mg Ca/L pour la fumure minérale, de 24 mg Ca/L pour le lisier de porcs, de 28 mg Ca/L pour le fumier de bovins et de 28 mg Ca/L pour le fumier de poulets (Tableau 5.6). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,008$ ) et les années ( $p = 0,0003$ ). Les concentrations en Ca dissous sont relativement élevées pour tous les modes de fertilisation.

Le Ca dissous a été significativement différent entre les périodes de l'année, tant pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,007$ ) que pour les concentrations moyennes pondérées ( $p = 0,039$ ) (Annexes 8 et 9). Celles-ci sont élevées pour les périodes printanière, estivale et automnale et moins élevées à la période hivernale. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale. Les charges ( $p = 0,72$ ) et les concentrations moyennes saisonnières ( $p = 0,79$ ) de Ca dissous ne sont pas significativement différentes selon les modes de fertilisation.

Les charges moyennes annuelles de Ca dissous perdu aux drains sous orge grainée sont de 55 kg Ca/ha avec la fumure minérale, de 65 kg Ca/ha avec le lisier de porcs, de 86 kg Ca/ha avec le fumier de poulets et de 71 kg Ca/ha avec le fumier de bovins (Annexe 4).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Ca dissous aux drains sous orge grainée sont de 23,1 mg Ca/L pour la fumure minérale, de 25,8 mg Ca/L pour le lisier de porcs, de 30,1 mg Ca/L pour le fumier de bovins et de 35,2 mg Ca/L pour le fumier de poulets (Annexe 5). Les concentrations en Ca dissous sont relativement élevées pour tous les modes de fertilisation, ce qui explique les charges importantes de Ca perdu. Les charges saisonnières de Ca dissous ont été différentes entre les périodes. Celles-ci sont plus élevées en périodes automnale et printanière.

## 5.13 Magnésium dissous

Les charges moyennes annuelles de magnésium dissous (Mg) perdu aux drains sous prairies sont de 32 kg Mg/ha avec la fumure minérale, de 32 kg Mg/ha avec le lisier de porcs, de 39 kg Mg/ha avec le fumier de poulets et de 42 kg Mg/ha avec le fumier bovins (Tableau 5.5). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,045$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Les pertes de Mg dissous sont relativement élevées sous prairies, peu importe le mode de fertilisation.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Mg dissous aux drains sous prairies sont de 11 mg Mg/L pour la fumure minérale, de 12 mg Mg/L pour le lisier de porcs, de 15 mg Mg/L pour le fumier de bovins et de 15 mg Mg/L pour le fumier de poulets (Tableau 5.6). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,002$ ) et les années ( $p < 0,0001$ ). Les concentrations en Mg dissous sont relativement élevées pour tous les modes de fertilisation.

Le Mg dissous a été significativement différent entre les périodes de l'année pour les charges moyennes saisonnières ( $p = 0,0007$ ) mais pas pour les concentrations moyennes saisonnières ( $p = 0,27$ ) (Annexes 8 et 9). Les charges sont élevées pour les périodes printanière, estivale et automnale et moins élevées à la période hivernale. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale. Les charges ( $p = 0,61$ ) et les concentrations moyennes saisonnières ( $p = 0,63$ ) de Mg dissous ne sont pas significativement différentes selon les modes de fertilisation.

Les charges moyennes annuelles de Mg dissous perdu aux drains sous orge grainée sont de 32 kg Mg/ha avec la fumure minérale, de 37 kg Ca/ha avec le lisier de porcs, de 51 kg Mg/ha avec le fumier de poulets et de 40 kg Mg/ha avec le fumier bovins (Annexe 4).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Mg dissous aux drains sous orge grainée sont de 13,3 mg Mg/L pour la fumure minérale, de 14,7 mg Mg/L pour le lisier de porcs, de 16,9 mg Mg/L pour le fumier de bovins et de 20,9 mg Mg/L pour le fumier de poulets (Annexe 5). Les charges de Mg dissous ont été différentes entre les périodes. Celles-ci sont plus élevées en périodes automnale et printanière.

## 5.14 Sodium dissous

Les charges moyennes annuelles de sodium dissous (Na) perdu aux drains sous prairies sont de 15 kg Na/ha avec le lisier de porcs, de 21 kg Na/ha avec la fumure minérale, de 27 kg Na/ha avec le fumier de bovins et de 35 kg Na/ha avec le fumier de poulets (Tableau 5.5). Elles diffèrent significativement entre les modes de fertilisation ( $p = 0,016$ ) et les années ( $p = 0,002$ ). Les pertes de Na sont élevées sous prairies, peu importe le mode de fertilisation.

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Na dissous aux drains sous prairies sont de 5,5 mg Na/L pour le lisier de porcs, de 7,7 mg Na/L pour la fumure minérale, de 9,3 mg Na/L pour le fumier de bovins et de 13,2 mg Na/L pour le fumier de poulets (Tableau 5.6). Elles sont significativement différentes selon les modes de fertilisation ( $p = 0,006$ ) et les années ( $p = 0,006$ ). Les concentrations de Na dissous sont relativement élevées pour tous les modes de fertilisation.

Les charges moyennes saisonnières de Na dissous sous prairies ont été significativement différentes entre les périodes de l'année ( $p = 0,0007$ ) mais pas pour les concentrations moyennes saisonnières ( $p = 0,38$ ) (Annexes 8 et 9). Les charges sont élevées pour les périodes printanière, estivale et automnale et moins élevées à la période hivernale. Ce phénomène est observable pour tous les modes de fertilisation, y compris la fumure minérale. Les charges ( $p = 0,08$ ) et les concentrations moyennes saisonnières ( $p = 0,07$ ) de Na dissous sont significativement différentes selon les modes de fertilisation. Le fumier de poulets produit des charges et des concentrations moyennes saisonnières plus élevées que les autres modes de fertilisation.

Les charges moyennes annuelles de Na dissous perdu aux drains sous orge grainée sont de 16 kg Na/ha avec le lisier de porcs, de 23 kg Na/ha avec la fumure minérale, de 25 kg Na/ha avec le fumier de bovins et de 45 kg Na/ha avec le fumier de poulets (Annexe 4).

Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Na dissous aux drains sous orge grainée sont de 6,3 mg Na/L pour le lisier de porcs, de 9,5 mg Na/L pour la fumure minérale, de 10,7 mg Na/L pour le fumier de bovins et de 18,4 mg Na/L pour le fumier de poulets (Annexe 5). Les charges de Na dissous ont été différentes entre les périodes. Celles-ci sont plus élevées en périodes automnale et printanière.

## 6. RÉSULTATS - DISTRIBUTION CENTILE DES CONCENTRATIONS

---

Nous avons établi la courbe de distribution en rang centile des concentrations des éléments nutritifs mesurés dans les drains sous prairies et sous orge grainée pour chaque mode de fertilisation. Chacune des concentrations hebdomadaires mesurées pendant six ans pour la prairie et deux ans pour l'orge grainée 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 (centile 25). La seconde est la concentration médiane, associée au niveau 50 % de la distribution (centile 50). La troisième est la concentration associée au niveau 90 % de la distribution (centile 90). Ces trois valeurs sont utiles pour interpréter des résultats de concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains pour ces cultures en fournissant des valeurs de référence associées à la fréquence de ces concentrations.

### 6.1 Distribution centile des concentrations en azote

Dans les prairies, pour six années de mesures, tous les modes confondus, la concentration centile 25 en azote total dissous dans l'eau des drains agricoles a été de 1,50 mg N/L, la concentration centile 50 a été de 2,59 mg N/L et la concentration 90 a été de 5,94 mg N/L (Tableau 6.1). Il y a des différences entre les modes de fertilisation. La fumure minérale montre une courbe de distribution des concentrations plus basse que celles obtenues avec les fumures organiques (Figure 6). Les parcelles fertilisées au lisier de porcs et au fumier de poulets montrent une distribution centile plus élevée en NT dans les drains. Ces teneurs demeurent cependant faibles pour tous les modes de fertilisation. Les prairies produisent globalement de faibles concentrations en NT dans les drains, peu importe les modes de fertilisation. Les concentrations centiles en NT diffèrent peu entre les périodes (Annexe 10).

Les nitrates représentent la principale forme d'azote dans l'eau des drains sous prairies. La concentration centile 25 en nitrate a été de 0,95 mg N-NO<sub>3</sub>/L, la concentration centile 50 a été de 2,12 mg N-NO<sub>3</sub>/L et la concentration centile 90 a été de 5,27 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. La fumure minérale montre une courbe de distribution des teneurs en nitrate plus basse que celles obtenues avec les fumures

organiques (Figure 6). Les deux modes de fertilisation qui montrent une distribution des concentrations plus élevée en nitrate sont le lisier de porcs et le fumier de poulets. Ces teneurs demeurent cependant faibles pour tous les modes de fertilisation. Les prairies sont donc associées à de faibles rejets en nitrate dans les drains. Les concentrations centiles en  $N-NO_3$  diffèrent peu entre les périodes (Annexe 10).

L'azote ammoniacal représente généralement une forme d'azote peu abondante dans l'eau des drains sous prairies. La concentration centile 25 en ammonium a été de 0,012 mg  $N-NH_4/L$ , la concentration centile 50 a été de 0,031 mg  $N-NH_4/L$  et la concentration centile 90 a été de 0,19 mg  $N-NH_4/L$  pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation (Figure 6). La fumure minérale montre une courbe de distribution des teneurs en ammonium plus basse que celles obtenues avec les fumures organiques. Les concentrations en ammonium demeurent généralement faibles pour tous les modes de fertilisation. Cependant, des concentrations élevées sont mesurées dans environ 10 % des échantillons d'eau. Ces concentrations élevées ne sont pas toujours associées à des volumes importants d'eau drainée. Les concentrations centiles en  $N-NH_4$  sont plus élevées en périodes estivale et printanière (Annexe 10).

L'azote organique dissous représente une forme d'azote relativement peu abondante dans l'eau des drains sous prairies. La concentration centile 25 en NOD a été de 0,15 mg N/L, la concentration centile 50 a été de 0,32 mg N/L et la concentration centile 90 a été de 0,92 mg N/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.1). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (Figure 6). Les sols et les engrais contribuent à fournir de l'azote organique aux drains. Les concentrations centiles en NOD sont plus faibles à la période hivernale (Annexe 10).

Dans l'orge grainée, pour deux années de mesures, la concentration centile 25 en NT dans l'eau des drains agricoles a été de 3,77 mg N/L, la concentration centile 50 a été de 5,21 mg N/L et la concentration 90 a été de 9,63 mg N/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.2). La fumure minérale montre une courbe de distribution des concentrations plus basse que celles obtenues avec les fumures organiques (Figure 7). Les teneurs NT demeurent cependant faibles pour tous les modes de fertilisation qui n'excèdent que très rarement 10 mg N/L. Les concentrations centiles en NT diffèrent entre les périodes. Elles sont plus élevées à la période automnale (Annexe 11).

Les nitrates représentent la principale forme d'azote dans l'eau des drains sous orge grainée. La concentration centile 25 en nitrate a été de 3,36 mg  $N-NO_3/L$ , la concentration centile 50 a été de 4,73 mg  $N-NO_3/L$  et la concentration centile 90 a été de 9,00 mg  $N-NO_3/L$  pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.2). La fumure minérale montre une courbe de distribution des teneurs en nitrate plus basse que celles obtenues avec les fumures organiques (Figure 7). Ces teneurs demeurent faibles pour tous les modes de fertilisation. L'orge grainée est donc associée à de faibles pertes en nitrate dans les drains, quoique plus élevées que celles sous prairies. Les concentrations centiles en  $N-NO_3$  diffèrent entre les périodes. Elles sont plus élevées à la période automnale (Annexe 11).

L'azote ammoniacal représente une forme d'azote très peu abondante dans l'eau des drains sous orge grainée. La concentration centile 25 en ammonium a été de 0,002 mg  $N-NH_4/L$ , la concentration centile 50 a été de 0,015 mg  $N-NH_4/L$  et la concentration centile 90 a été de 0,070 mg  $N-NH_4/L$  pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.2). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (Figure 7). Les concentrations de  $N-NH_4$  sont faibles pour tous les modes de fertilisation, sauf dans de rares échantillons. Les concentrations centiles de  $N-NH_4$  sont plus faibles à la période printanière (Annexe 11).

L'azote organique dissous représente une forme d'azote relativement peu abondante dans l'eau des drains sous orge grainée. La concentration centile 25 en NOD a été de 0,15 mg N/L, la concentration centile 50 a été de 0,34 mg N/L et la concentration centile 90 a été de 0,97 mg N/L pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.2). La fumure minérale montre une courbe de distribution des teneurs en NOD plus basse que celles obtenues avec les fumures organiques (Figure 7). Les concentrations centiles de NOD sont plus faibles en périodes printanière et hivernale (Annexe 11).

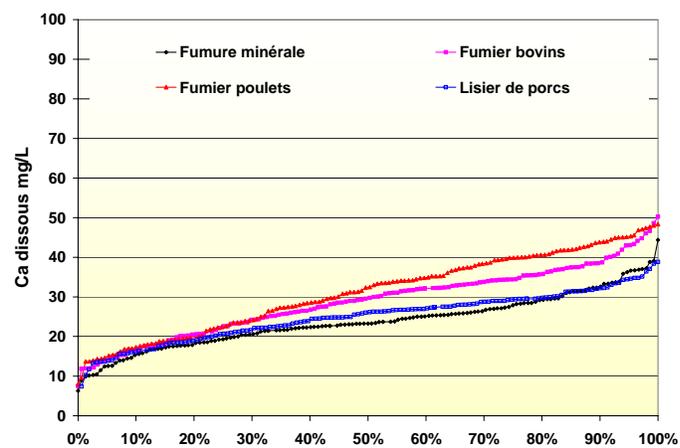
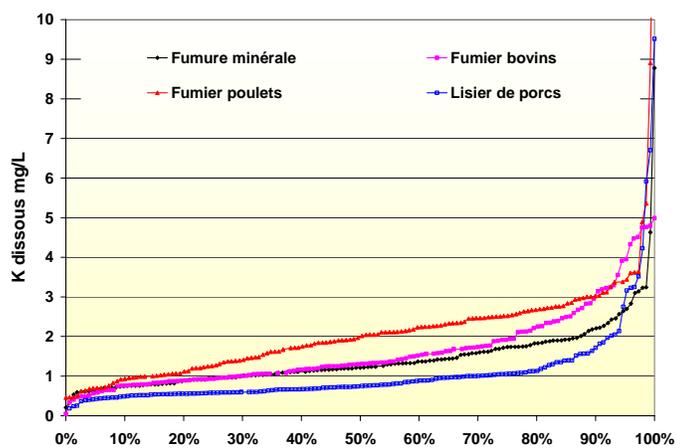
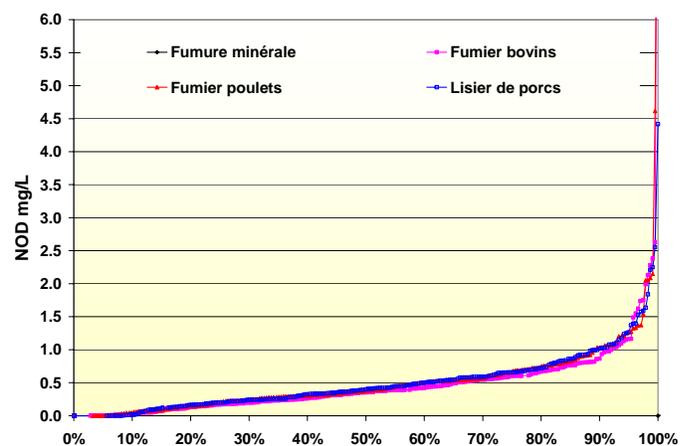
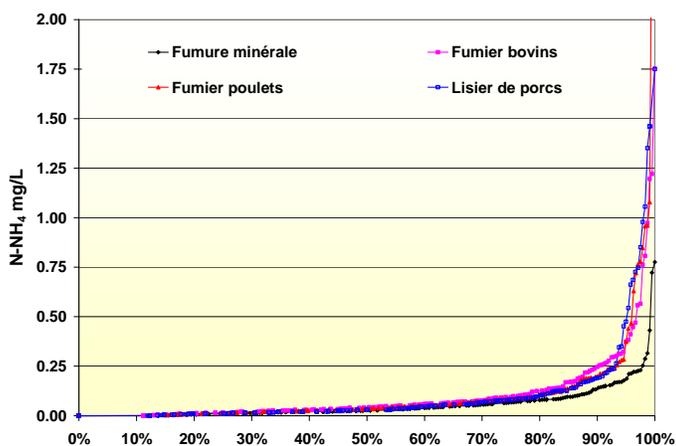
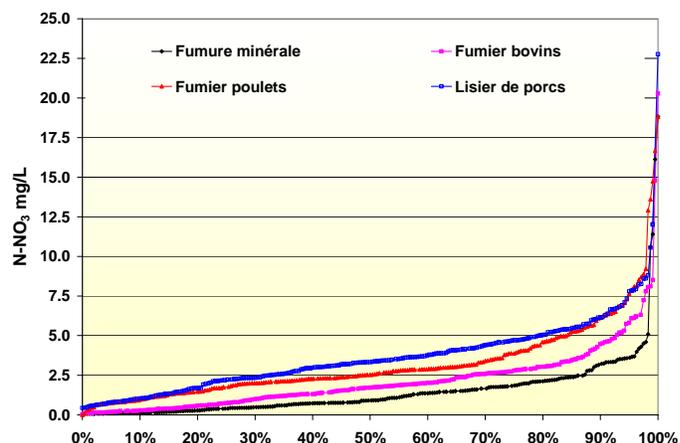
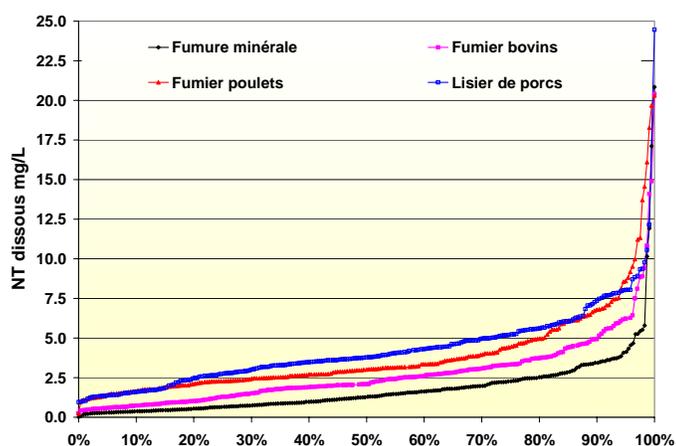


Figure 6. Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

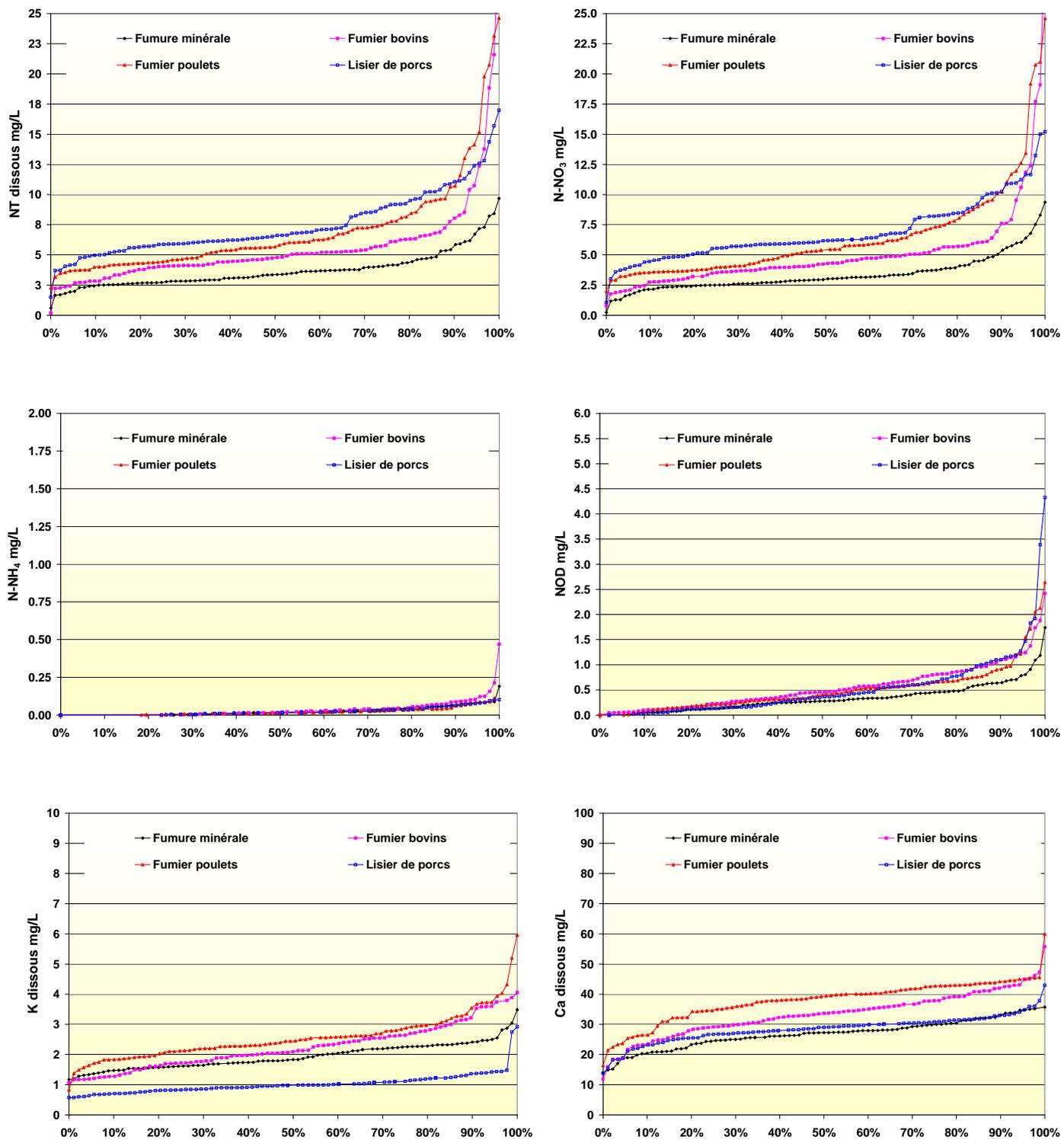


Figure 7. Courbe de distribution centile des concentrations d'azote, de potassium et de calcium dissous dans l'eau des drains sous orge grainée selon les modes de fertilisation.

## 6.2 Distribution centile des concentrations en phosphore

Dans les prairies, pour trois années de mesures, la concentration centile 25 en phosphore total dans l'eau des drains agricoles a été de 46 µg P/L, la concentration centile 50 a été de 84 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 364 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 8). La fumure minérale et le fumier de bovins montrent une courbe de distribution des concentrations plus basse que celles du fumier de poulets et du lisier de porcs. Les concentrations en PT sont particulièrement élevées pour 10 % des échantillons d'eau analysés. Les prairies peuvent donc fournir des concentrations importantes en PT dans l'eau des drains, peu importe les modes de fertilisation. Les concentrations centiles en PT sont plus élevées en périodes automnale et printanière (Annexe 10).

Le P particulaire représente la principale forme de phosphore dans l'eau des drains sous prairies. La concentration centile 25 en PP dans l'eau des drains agricoles mesurée pendant trois ans a été de 20 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 46 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 298 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 8). La fumure minérale et le fumier de bovins montrent une courbe de distribution des teneurs en PP plus basse que celles avec le fumier de poulets et le lisier de porcs. Les teneurs en PP sont élevées pour près de 10 % des échantillons. Le centile 90 des concentrations de PP varie de 209 à 495 µg P/L selon les modes de fertilisation. Au champ, des épisodes de faibles concentrations alternent avec des périodes de fortes concentrations qui sont liées aux événements de précipitations qui saturent les sols en eau en surface, produisant un écoulement préférentiel de PP vers les drains. Les concentrations centiles en PP sont plus élevées en périodes automnale et printanière (Annexe 10).

Pour six années de mesures, la concentration centile 25 en P dissous dans l'eau des drains agricoles sous prairies a été de 19 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 31 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 105 µg P/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation (Figure 8). La fumure minérale montre une courbe de distribution des teneurs en PD plus basse que celles avec les fumures organiques. Les teneurs en PD sont élevées pour 10 % des échantillons d'eau analysés pour tous les modes de fertilisation. Le centile 90 des concentrations de PD varie de 62 à 140 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 à la période hivernale (Annexe 10).

La concentration centile 25 en P minéral réactif dissous mesuré pendant six ans sous prairies a été de 12 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 21 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 82 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 8). La fumure minérale montre une courbe de distribution des teneurs en PRD plus basse que celles mesurées avec les fumures organiques. 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 plus faibles à la période hivernale (Annexe 10).

La concentration centile 25 en P organique dissous (POD) mesuré pendant six ans sous prairies a été de 5 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 6.1). Il n'y a pas de différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations médianes en POD sont plus basse en période hivernale (annexe 10).

Pour trois années de mesures, la concentration centile 25 en P biodisponible dans l'eau des drains agricoles sous prairies a été de 23 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 42 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 161 µg P/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation (Figure 8). Le mode avec lisier de porcs montre une courbe de distribution des teneurs en Pbio plus élevée que celles des autres modes de fertilisation. Les teneurs en Pbio sont élevées pour 10 % des échantillons d'eau analysés pour tous les modes de fertilisation, particulièrement pour le lisier de porcs. Les concentrations centiles de Pbio sont plus faibles à la période hivernale (Annexe 10).

Dans l'orge grainée, les concentrations des éléments nutritifs ont été mesurées pendant deux ans. La concentration centile 25 PT a été de 34 µg P/L, la concentration centile 50 a été de 52 µg P/L et la concentration 90 a été de 230 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 9). Les concentrations en PT sont élevées pour 10 % des échantillons. L'orge grainée peut donc fournir des concentrations importantes en PT dans l'eau des drains, peu importe les modes de fertilisation. Les concentrations centiles en PT sont plus faibles à la période hivernale (Annexe 11).

Le PP représente la principale forme de phosphore dans l'eau des drains sous orge grainée. La concentration centile 25 en PP dans l'eau des drains agricoles a été de 18 µg P/L, la concentration centile 50 a été de 31 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 192 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.2). Il y a assez peu de différences entre les modes de fertilisation (Figure 9). Les concentrations en PP sont élevées pour près de 10 % des échantillons. Les concentrations centiles en PP sont plus élevées en périodes printanière et automnale (Annexe 11).

La concentration centile 25 % en PD dans l'eau des drains sous orge grainée a été de 16 µgP/L, la concentration centile 50 % a été de 28 µg P/L et la concentration centile 90 % a été de 66 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.2). Il y a des différences assez importantes entre les modes de fertilisation (Figure 9). La fumure minérale montre une courbe de distribution des teneurs en PD plus basse que celles obtenues avec les modes de fertilisation organique. Les concentrations en PD sont élevées pour 10 % des échantillons. Les concentrations centiles en PD sont plus élevées à la période estivale (Annexe 11).

La concentration centile 25 en PRD dans l'eau des drains sous orge grainée a été de 9 µg P/L, la concentration centile 50 a été de 20 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 49 µg P/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.2). La fumure minérale montre une courbe de distribution des teneurs en PRD plus basse que celles mesurées avec les fumures organiques (Figure 9). Les concentrations en PRD sont élevées pour 10 % des échantillons. Les concentrations centiles en PRD sont plus élevées à la période estivale (Annexe 11).

La concentration centile 25 en P organique dissous (POD) mesuré pendant deux ans sous orge grainée a été de 6 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 8 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 17 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (tableau 6.2). Il n'y a pas de différences appréciable entre les modes de fertilisation. Les concentrations médianes en POD sont plus élevées en période estivale (annexe 11).

Pour deux années de mesures, la concentration centile 25 en P biodisponible dans l'eau des drains agricoles sous orge grainée a été de 14 µgP/L, la concentration centile 50 a été de 24 µg P/L et la concentration centile 90 a été de 88 µg P/L pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.2). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les modes avec lisier de porcs et fumier de bovins montrent des teneurs en Pbio plus élevées. Les concentrations centiles de Pbio sont plus faibles à la période hivernale (Annexe 11).

**Tableau 6.1. Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.**

	Centile	Fumure minérale	Fumier de bovins	Fumier de poulets	Lisier de porcs	Toutes les fumures
<b>N-NH<sub>4</sub></b> (mg/L)	25	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
	50	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
	90	0,14	0,25	0,20	0,19	0,19
<b>N-NO<sub>3</sub></b> (mg/L)	25	0,40	0,73	1,74	2,22	0,95
	50	0,91	1,72	2,54	3,33	2,12
	90	3,22	4,47	6,16	6,15	5,27
<b>NOD</b> (mg/L)	25	0,09	0,17	0,21	0,20	0,15
	50	0,20	0,35	0,38	0,40	0,32
	90	0,58	0,86	1,03	1,02	0,92
<b>NT</b> (mg/L)	25	0,66	1,29	2,28	2,75	1,50
	50	1,29	2,09	3,01	3,78	2,59
	90	3,44	4,93	6,79	7,34	5,94
<b>PRD</b> (µg/L)	25	10	14	14	14	12
	50	16	24	24	24	21
	90	44	109	89	86	82
<b>PD</b> (µg/L)	25	15	21	21	23	19
	50	26	37	32	36	31
	90	62	140	108	106	105
<b>Pbio</b> (µg/L)	25	17	30	20	30	23
	50	30	45	36	66	42
	90	110	125	150	256	161
<b>PP</b> (µg/L)	25	20	19	20	27	20
	50	40	46	41	64	46
	90	244	209	315	495	298
<b>PT</b> (µg/L)	25	39	48	44	60	46
	50	65	82	77	136	84
	90	282	270	360	590	364
<b>K dissous</b> (mg/L)	25	0,95	0,93	1,26	0,58	0,83
	50	1,21	1,31	2,02	0,75	1,23
	90	2,21	3,14	3,03	1,71	2,73
<b>Ca dissous</b> (mg/L)	25	19,3	22,5	22,5	20,6	20,7
	50	23,3	29,7	32,5	26,1	26,7
	90	32,6	38,6	43,9	32,2	38,8
<b>Mg dissous</b> (mg/L)	25	9,9	10,6	11,8	9,5	10,3
	50	13,7	16,8	19,7	14,9	15,4
	90	20,2	23,6	28,4	20,2	24,1
<b>Na dissous</b> (mg/L)	25	5,80	6,30	8,10	4,40	5,90
	50	9,60	11,50	16,20	6,40	8,90
	90	16,50	16,20	30,00	8,70	20,50

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

	Centile	Fumure minérale	Fumier de bovins	Fumier de poulets	Lisier de porcs	Toutes les fumures
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	25	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	50	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
	90	0,07	0,09	0,06	0,06	0,07
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	25	2,51	3,55	3,98	5,55	3,36
	50	3,02	4,30	5,43	6,18	4,73
	90	5,40	7,59	10,20	10,25	9,00
NOD (mg/L)	25	0,13	0,22	0,20	0,13	0,15
	50	0,28	0,45	0,40	0,35	0,34
	90	0,64	1,08	0,91	1,10	0,97
NT (mg/L)	25	2,71	4,05	4,45	5,88	3,77
	50	3,38	4,79	5,66	6,61	5,21
	90	5,86	8,03	10,72	11,06	9,63
PRD (µg/L)	25	7	16	7	10	9
	50	16	29	21	21	20
	90	26	66	61	47	49
PD (µg/L)	25	12	24	14	17	16
	50	22	40	28	29	28
	90	40	86	72	64	66
PP (µg/L)	25	21	26	16	15	18
	50	31	47	29	30	31
	90	173	220	115	192	192
PT (µg/L)	25	33	42	31	34	34
	50	49	83	40	56	52
	90	260	160	225	225	230
K dissous (mg/L)	25	1,61	1,72	2,13	0,82	1,28
	50	1,83	2,09	2,45	0,99	1,90
	90	2,41	3,53	3,58	1,37	2,96
Ca dissous (mg/L)	25	24,5	29,1	34,8	26,7	26,8
	50	27,2	33,7	39,4	29,0	30,5
	90	33,1	42,3	44,2	33,0	42,0
Mg dissous (mg/L)	25	13,8	17,2	19,8	15,9	16,0
	50	17,1	20,9	25,1	18,6	19,2
	90	21,0	25,0	29,8	21,6	27,6
Na dissous (mg/L)	25	0,1	0,1	0,1	0,1	8,4
	50	5,2	6,7	12,0	4,4	14,2
	90	17,2	16,1	28,8	8,5	26,1

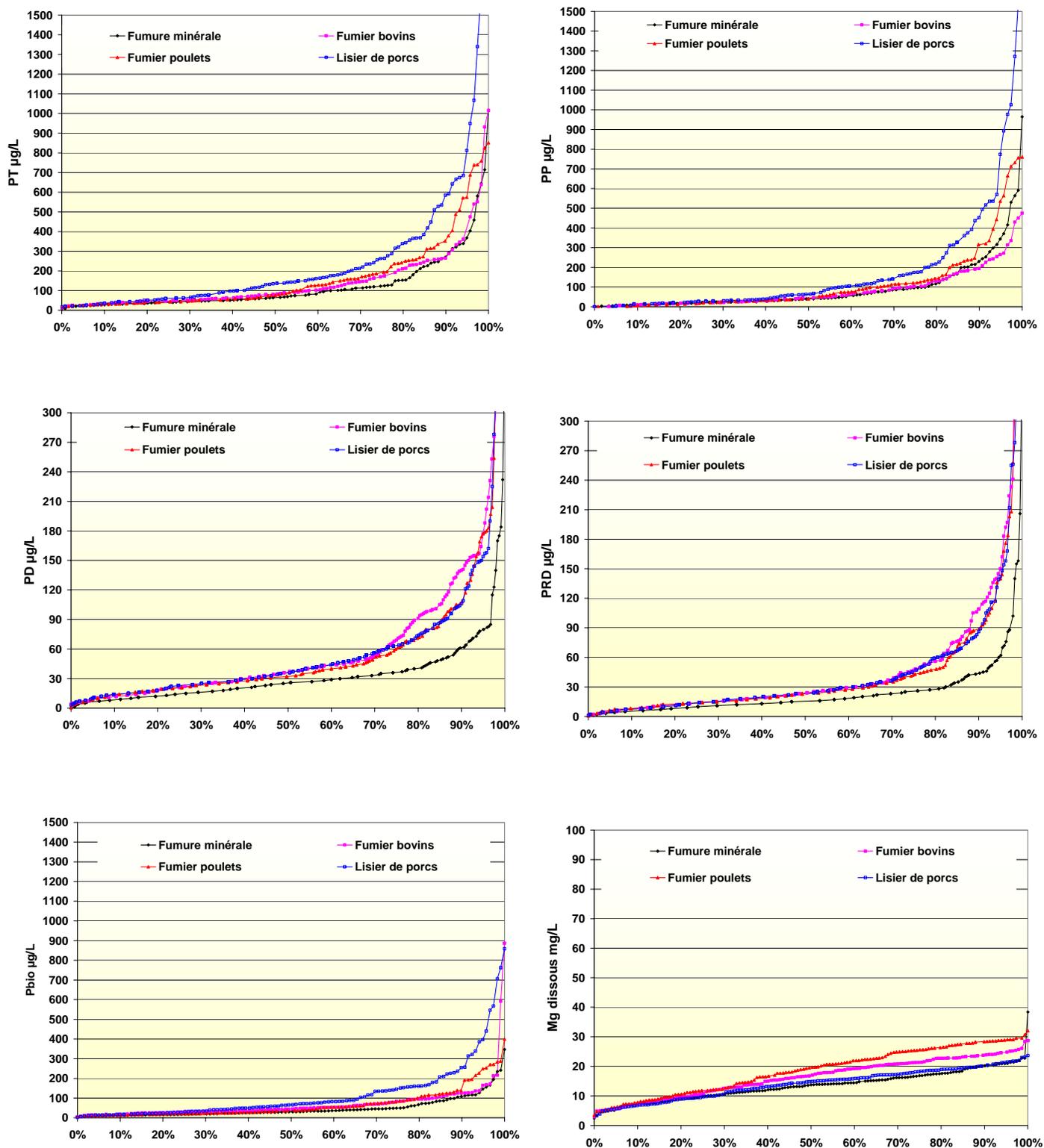


Figure 8. Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore et de magnésium dissous dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

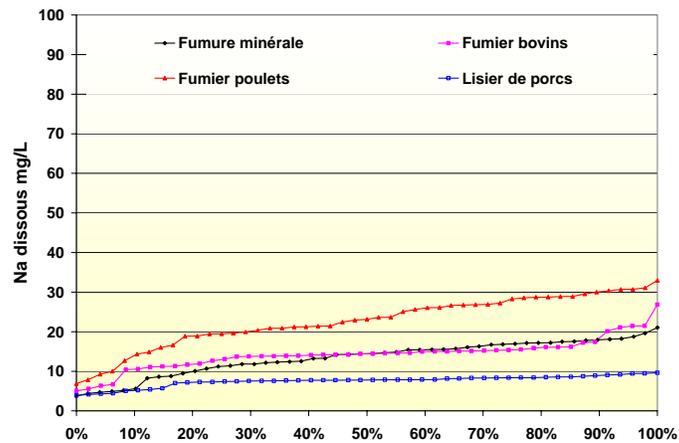
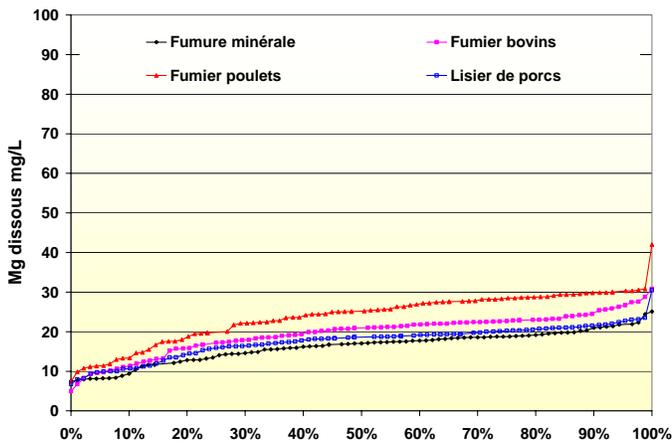
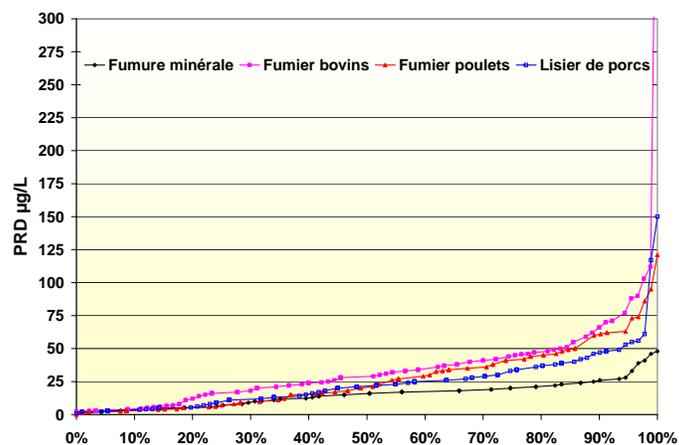
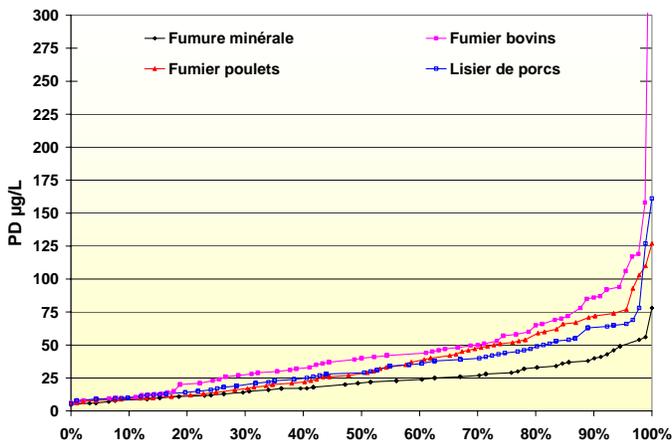
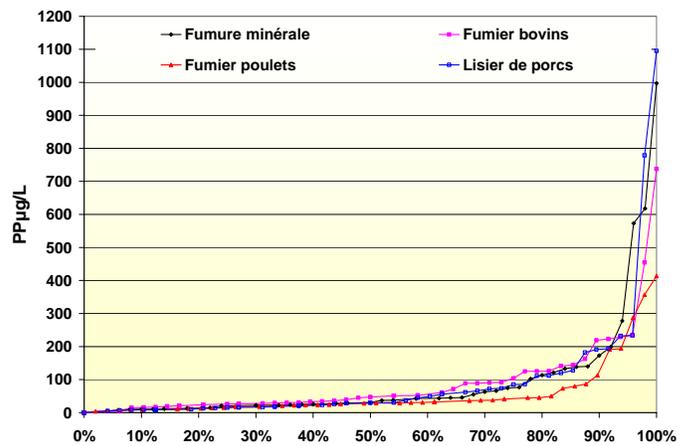
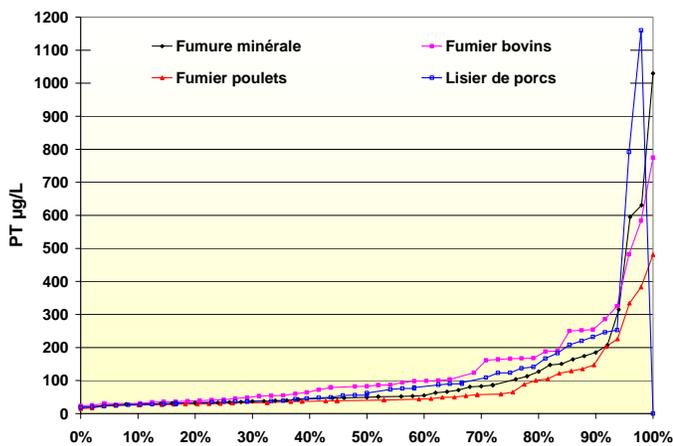


Figure 9 . Courbe de distribution centile des concentrations de phosphore, de magnésium et de sodium dissous dans l'eau des drains sous orge grainée selon les modes de fertilisation.

### 6.3 Distribution centile des concentrations en potassium dissous

Dans les prairies, pour trois années de mesures, la concentration centile 25 en K dissous dans l'eau des drains agricoles a été de 0,83 mg K/L, la concentration centile 50 a été de 1,23 mg K/L et la concentration 90 a été de 2,73 mg K/L pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.1). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation (Figure 6). Les concentrations tendent à être plus élevées avec le fumier de poulets. Elles demeurent cependant faibles pour tous les modes de fertilisation. La teneur relativement faible en K échangeable des sols, les prélèvements importants de potassium par les récoltes et des apports modérés peuvent expliquer ces faibles concentrations dans l'eau des drains. Les concentrations centiles en K sont semblables entre les périodes (Annexe 10).

Dans l'orge grainée, pour deux années de mesures, la concentration centile 25 en K dissous dans l'eau des drains agricoles a été de 1,28 mg K/L, la concentration centile 50 a été de 1,90 mg K/L et la concentration centile 90 a été de 2,96 mg K/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.2). Il y a des différences appréciables entre les modes de fertilisation. Les concentrations sont faibles pour tous les modes de fertilisation, particulièrement pour le lisier de porcs (Figure 7). Les concentrations centiles en K sont plus élevées à la période estivale (Annexe 11).

### 6.4 Distribution centile des concentrations en calcium dissous

Dans les prairies, pour trois années de mesures, la concentration centile 25 en Ca dissous dans l'eau des drains a été de 20,7 mg Ca/L, la concentration centile 50 a été de 26,7 mg Ca/L et la concentration centile 90 a été de 38,8 mg Ca/L pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.1). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation mais les concentrations en Ca tendent à être plus élevées avec les fumiers de bovins et de poulets (Figure 6). Les prairies peuvent perdre des quantités importantes de Ca dans les drains, surtout avec les fumiers de bovins et de poulets. Les concentrations centiles en Ca sont plus basses à la période printanière.

Dans l'orge grainée, pour deux années de mesures, la concentration centile 25 en Ca dissous dans l'eau des drains a été de 26,8 mg Ca/L, la concentration centile 50 a été de 30,5 mg Ca/L et la concentration centile 90 a été de 42,0 mg Ca/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.2). Les concentrations en calcium sont élevées pour tous les modes de fertilisation (Figure 7). Elles sont comparables à celles mesurées sous prairies. Les concentrations centiles en Ca sont semblables entre les périodes (Annexe 11).

### 6.5 Distribution centile des concentrations en magnésium dissous

Dans les prairies, pour trois années de mesures, la concentration centile 25 en Mg dissous dans l'eau des drains agricoles a été de 10,3 mg Mg/L, la concentration centile 50 a été de 15,4 mg Mg/L et la concentration 90 a été de 24,1 mg Mg/L pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.1). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (Figure 8). Les concentrations centiles en Mg sont plus faibles à la période printanière (Annexe 10).

Dans l'orge grainée, pour deux années de mesures, la concentration centile 25 en Mg dissous dans l'eau des drains a été de 16,0 mg Mg/L, la concentration centile 50 a été de 19,2 mg Mg/L et la concentration 90 a été de 27,6 mg Mg/L pour tous les modes de fertilisation (Tableau 6.2). Il y a peu de différences entre les modes de fertilisation (Figure 9). Les concentrations centiles en Mg sont semblables entre les périodes (Annexe 11).

## 6.6 Distribution centile des concentrations en sodium dissous

Dans les prairies, pour trois années de mesures, la concentration centile 25 en Na dissous dans l'eau des drains agricoles a été de 5,9 mg Na/L, la concentration centile 50 a été de 8,9 mg Na/L et la concentration 90 a été de 20,5 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 élevées pour le fumier de poulets et plus faibles pour le lisier de porcs. Les concentrations centiles en Na sont plus faibles à la période printanière (Annexe 10).

Dans l'orge grainée, pour deux années de mesures, la concentration centile 25 en Na dissous dans l'eau des drains agricoles a été de 8,4 mg Na/L, la concentration centile 50 a été de 14,2 mg Na/L et la concentration 90 a été de 26,1 mg Na/L pour tous les modes de fertilisation confondus (Tableau 6.2). Elles varient selon les modes de fertilisation (Figure 9). Les concentrations en Na dissous sont plus élevées pour le fumier de poulets et plus faibles pour le lisier de porcs. Les concentrations centiles en Na sont semblables entre les périodes (Annexe 11).

## 7. CONCLUSIONS

---

La présente étude a permis de préciser les hauteurs de la lame d'eau drainée, les concentrations et les charges des éléments nutritifs perdus aux drains sous prairies et orge grainée. La hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau drainée sous prairies mesurée pendant six ans a été de 29,24 cm avec un minimum de 16,25 cm et un maximum de 47,47 cm. Pour l'orge grainée, une seule année de mesures a été réalisée en 2001. La hauteur annuelle de la lame d'eau drainée a été 24,16 cm.

Les charges moyennes annuelles de N total dissous perdu aux drains sous prairies ont varié de 4,7 à 10,4 kg N/ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de 1,81 à 3,71 mg N/L. Les charges moyennes annuelles de nitrate sont de 3,5 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec la fumure minérale, de 5,8 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le fumier de bovins, de 7,7 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le fumier de poulets et de 8,5 kg N-NO<sub>3</sub>/ha avec le lisier de porcs. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de nitrate sont de 1,41 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour la fumure minérale, de 2,03 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de bovins laitiers, de 2,78 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le fumier de poulets et de 3,00 mg N-NO<sub>3</sub>/L pour le lisier de porcs.

Les charges moyennes annuelles de N-NH<sub>4</sub> perdu aux drains sous prairies ont varié de 237 à 396 g N-NH<sub>4</sub>/ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de 0,08 à 0,13 mg N-NH<sub>4</sub>/L. Bien que généralement assez faibles, les concentrations de N-NH<sub>4</sub> peuvent être importantes dans certains échantillons, pouvant même exceptionnellement dépasser le critère pour le traitement de l'eau, qui est de 0,5 mg N-NH<sub>4</sub>/L, et même dans certains cas le seuil de toxicité chronique des eaux de surface qui se situe entre 1 et 2 mg N-NH<sub>4</sub>/L selon la température de l'eau et son pH.

Les charges moyennes annuelles de P total perdu aux drains sous prairies ont varié de 437 à 1249 g P/ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de PT de 159 à 489 µg P/L. Ces pertes se produisent sous formes particulaire et dissoute. La forme particulaire représente la fraction la plus importante. Les charges moyennes annuelles de PP ont varié de 360 à 1086 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les pertes tendent à être plus élevées avec le lisier de porcs. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PP ont varié de 125 à 424 µg P/L selon les modes de fertilisation. Les fortes concentrations de PT mesurées dans certains échantillons d'eau proviennent principalement de la fraction particulaire.

Les charges moyennes annuelles de P dissous perdu aux drains sous prairies ont varié de 79 à 142 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les pertes tendent à être plus faibles avec la fumure minérale comparativement à celles avec les fumures organiques. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PD ont varié de 29 à 52 µg P/L selon les modes de fertilisation.

Les charges moyennes annuelles de P biodisponible perdu aux drains sous prairies ont varié de 194 à 552 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Pbio ont varié de 80 à 219 µg P/L selon les modes de fertilisation. Les coefficients moyens de biodisponibilité du P particulaire mesuré dans l'eau des drains sous prairies ont été de

0,324 dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale, de 0,357 avec le fumier de bovins, de 0,322 avec le fumier de poulets et de 0,401 avec le lisier de porcs.

Les charges moyennes annuelles de K dissous perdu aux drains sous prairies ont varié de 2,0 à 3,9 kg K/ha selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de Ca dissous ont varié de 63 à 82 kg Ca/ha selon les modes de fertilisation. Les charges moyennes annuelles de Mg dissous ont varié de 32 à 42 kg Mg/ha. Les charges moyennes annuelles de Na dissous ont varié de 15 à 35 kg Na/ha.

Les pertes d'azote total (NT) et de nitrate (N-NO<sub>3</sub>) aux drains sous orge grainée sont plus élevées que celles sous prairies. Les charges annuelles de NT ont varié de 8,70 à 20,35 kg N/ha et celles en nitrate de 8,20 à 19,70 kg N-NO<sub>3</sub>/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées ont varié de 3,67 à 8,29 mg NT/L et de 3,45 à 8,02 mg N-NO<sub>3</sub>/L. Les charges moyennes annuelles de N-NH<sub>4</sub> ont varié de 23 à 34 g/ha selon les modes de fertilisation et les concentrations moyennes annuelles pondérées de 0,009 à 0,014 mg N-NH<sub>4</sub>/L.

Les charges annuelles de PT perdu aux drains sous orge grainée ont varié de 359 à 473g P/ha, selon les modes de fertilisation, et les concentrations moyennes annuelles pondérées de 144 à 202 µg P/L. Ces pertes se produisent principalement sous forme particulaire mais aussi sous forme dissoute. Les charges annuelles de PP ont varié de 293 à 410 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PP ont varié de 118 à 174 µg P/L.

Les charges annuelles de PD perdu aux drains sous orge grainée ont varié de 48 à 65 g P/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de PD ont varié de 20,1 à 27,2 µg P/L.

Les charges annuelles de K dissous perdu aux drains sous orge grainée ont varié de 1,9 à 5,0 kg K/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de K dissous ont varié de 0,75 à 2,05 mg K/L. Les charges annuelles de Ca dissous ont varié de 55 à 87 kg Ca/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Ca dissous ont varié de 23 à 35 mg Ca/L. Les charges annuelles de Mg dissous ont varié de 32 à 51 kg Mg/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Mg dissous ont varié de 13,3 à 20,9 mg Mg/L. Les charges annuelles de Na dissous ont varié de 16 à 45 kg Na/ha selon les modes de fertilisation. Les concentrations moyennes annuelles pondérées de Na dissous ont varié de 6,3 à 18,4 mg Na/L.

Un profil de distribution centile des concentrations des éléments nutritifs aux drains sous prairies et orge grainée a été effectué par mode de fertilisation. La valeur médiane des concentrations (centile 50) aux drains sous prairies, tous les modes de fertilisation confondus, a été de 2,59 mg NT/L, de 2,12 mg N-NO<sub>3</sub>/L, de 0,031 mg N-NH<sub>4</sub>/L, de 0,32 mg NOD/L, de 84 µg PT/L, de 46 µg PP/L, de 31 µg PD/L, de 21 µg PRD/L, de 9 µg POD/L, de 42 µg Pbio/L, de 1,23 mg K/L, de 26,7 mg Ca/L, de 15,4 mg Mg/L et de 8,9 mg Na/L.

La valeur médiane des concentrations (centile 50) aux drains, pour tous les modes de fertilisation confondus sous orge grainée, a été de 5,21 mg NT/L, de 4,73 mg N-NO<sub>3</sub>/L, de 0,015 mg N-NH<sub>4</sub>/L, de 0,34 mg NOD/L, de 52 µg PT/L, de 31 µg PP/L, de 28 µg PD/L, de 20 µg PRD/L, de 8 µg POD/L, de 24 µg Pbio/L de 1,90 mg K/L, de 30,5 mg Ca/L, de 19,2 mg Mg/L et de 14,2 mg Na/L. La distribution centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous prairies et orge grainée a également été établie pour chaque période de l'année afin de préciser, s'il y a lieu, les moments les plus propices aux pertes.

## 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.
- Breeuwsmma, 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  $N^{15}$ . *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 mesures, procédé à l'échantillonnage périodique des eaux et réalisé la compilation des données. Je tiens aussi à remercier l'équipe du Laboratoire agroenvironnemental de l'IRDA, particulièrement Mme Carole Dion, MM. Gérard Fortin et Michel Paradis pour la quantité et la qualité des analyses effectuées. Mes remerciements vont aussi à Mme Claudine Jomphe et M. Francis Desharnais 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	540	1997	Orge grainée	6	20	32	32	108	173
	350	1998	Prairie	7	12	32	25	42	112
	280	1999		10	17	31	28	48	87
	110			0	0	60	0	0	66
	280	2000		10	17	31	28	48	87
	110			34	0	0	37	0	0
	265	2001		Orge grainée	14	22	22	37	58
	265	2002	Prairie	10	17	31	27	45	82
	110			0	0	60	0	0	66
	265	2003		10	17	31	27	45	82
	110			0	0	60	0	0	66
	450	2004		10	10	25	45	45	113
	100			34	0	0	34	0	0
					Analyse			Apport	
	Doses (t/ha)	Années	Cultures	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	25	1997	Orge grainée	3,5	1,7	5,9	87	43	149
	25	1998	Prairie	5,0	2,3	6,5	125	58	163
	28	1999		8,0	4,0	5,8	223	112	163
	28	2000		9,5	4,1	10,1	265	114	284
	25	2001		Orge grainée	5,2	2,1	6,0	129	52
	17	2002	Prairie	4,9	3,1	6,0	81	51	99
	19	2003		5,7	2,6	6,6	108	50	126
	24	2004		5,4	2,3	5,8	130	56	139
Fumier poulets	5,0	1997	Orge grainée	28	19	20	142	97	102
	5,0	1998	Prairie	31	25	15	155	123	75
	3,8	1999		27	29	16	102	111	61
	3,8	2000		23	16	14	89	60	55
	3,5	2001		Orge grainée	24	17	17	84	60
	3,4	2002	Prairie	21	15	14	72	51	49
	4,1	2003		12	14	10	50	58	42
	3,6	2004		28	20	13	99	74	47
Lisier porcs	30	1997	Orge grainée	1,8	1,1	0,9	54	34	26
	30	1998	Prairie	2,6	4,0	1,5	78	119	46
	30	1999		2,9	1,4	1,4	86	43	42
	30	2000		3,7	1,8	1,6	111	55	49
	30	2001		Orge grainée	2,4	0,7	1,1	72	21
	30	2002	Prairie	9,3	5,3	4,9	279	158	148
	30	2003		2,8	1,3	1,4	83	40	42
	30	2004		3,4	1,4	1,4	101	42	43

**Annexe 2. Charges moyennes saisonnières d'azote perdu aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.**

	Période	6 ans			
		N-NH <sub>4</sub> (g/ha)	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT
<b>Fumure minérale</b>	Estivale	23	0,43	0,13	0,59
	Automnale	33	0,83	0,25	1,11
	Hivernale	10	0,28	0,05	0,34
	Printanière	171	2,01	0,44	2,62
<b>Fumier bovins</b>	Estivale	56	0,50	0,25	0,80
	Automnale	48	1,30	0,39	1,73
	Hivernale	14	0,51	0,11	0,64
	Printanière	278	3,52	0,61	4,41
<b>Fumier poulets</b>	Estivale	33	1,15	0,27	1,46
	Automnale	36	1,76	0,40	2,20
	Hivernale	13	0,69	0,13	0,84
	Printanière	267	4,06	0,75	5,08
<b>Lisier porcs</b>	Estivale	34	1,45	0,30	1,79
	Automnale	33	2,35	0,36	2,74
	Hivernale	12	0,91	0,15	1,07
	Printanière	241	3,80	0,80	4,84

<b>p &gt; F modes</b>	<b>0,6453</b>	<b>0,0083</b>	<b>0,1046</b>	<b>0,0076</b>
<b>p &gt; F périodes</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>
<b>p &gt; F modes x périodes</b>	<b>0,9855</b>	<b>0,7969</b>	<b>0,9776</b>	<b>0,8200</b>

Annexe 3. Concentrations moyennes pondérées saisonnières d'azote dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

		6 ans			
Période		N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT
		(mg/L)			
Fumure minérale	Estivale	0,05	1,40	0,25	1,70
	Automnale	0,04	0,97	0,28	1,28
	Hivernale	0,02	0,93	0,17	1,12
	Printanière	0,13	2,03	0,43	2,59
Fumier bovins	Estivale	0,09	1,44	0,41	1,95
	Automnale	0,05	1,95	0,44	2,44
	Hivernale	0,04	1,65	0,39	2,07
	Printanière	0,21	2,99	0,52	3,72
Fumier poulets	Estivale	0,07	3,26	0,52	3,85
	Automnale	0,04	1,98	0,45	2,47
	Hivernale	0,03	2,26	0,42	2,71
	Printanière	0,20	3,42	0,65	4,27
Lisier porcs	Estivale	0,09	3,69	0,55	4,33
	Automnale	0,04	2,60	0,44	3,07
	Hivernale	0,02	2,69	0,39	3,09
	Printanière	0,18	3,48	0,74	4,40

p > F modes	0,3756	0,0014	0,0119	0,0006
p > F périodes	<0,0001	0,0126	0,0079	0,0010
p > F modes x périodes	0,9689	0,8681	0,9913	0,8782

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

	Période	N-NH <sub>4</sub> (g/ha)	N-NO <sub>3</sub>	NOD (kg/ha)	NT	PRD	POD	PD (g/ha)	PP	PT	K	Ca	Mg	Na
<b>Fumure minérale</b>	Estivale	1,1	0,7	0,07	0,8	2,7	2,3	5,0	11,2	16	0,4	5,6	3,6	2,6
	Automnale	16,9	4,6	0,16	4,8	11,4	5,0	16,4	116	132	1,5	23,6	13,9	9,9
	Hivernale	0,4	0,3	0,01	0,4	0,6	0,8	1,4	14,7	16	0,2	3,6	2,4	1,8
	Printanière	14,9	2,5	0,25	2,8	16,7	8,1	24,8	257	282	1,2	22,0	11,7	8,2
	<b>Annuelle</b>	<b>33,4</b>	<b>8,2</b>	<b>0,48</b>	<b>8,7</b>	<b>31</b>	<b>16</b>	<b>48</b>	<b>399</b>	<b>446</b>	<b>3,2</b>	<b>55</b>	<b>32</b>	<b>23</b>
<b>Fumier bovins</b>	Estivale	2,6	1,8	0,13	2,0	10,7	3,5	14,2	24,4	39	0,5	8,9	5,0	3,2
	Automnale	21,8	5,0	0,32	5,3	10,3	6,9	17,2	117	134	1,4	28,2	16,6	10,8
	Hivernale	1,1	0,3	0,02	0,3	0,4	0,7	1,2	3,4	5	0,1	3,2	2,0	1,3
	Printanière	8,0	2,8	0,33	3,2	19,9	11,3	31,3	265	296	1,3	30,5	15,9	9,9
	<b>Annuelle</b>	<b>33,6</b>	<b>10,0</b>	<b>0,80</b>	<b>10,8</b>	<b>41</b>	<b>22</b>	<b>64</b>	<b>410</b>	<b>473</b>	<b>3,4</b>	<b>71</b>	<b>40</b>	<b>25</b>
<b>Fumier poulets</b>	Estivale	2,1	1,6	0,08	1,7	3,6	2,5	6,1	10,4	16	0,5	8,5	5,4	5,1
	Automnale	26,4	9,1	0,41	9,5	11,9	6,8	18,7	74	93	2,6	38,4	23,7	21,0
	Hivernale	1,6	0,7	0,03	0,7	0,3	1,0	1,4	3,9	5	0,3	4,8	3,2	2,9
	Printanière	3,3	8,2	0,12	8,3	18,4	9,4	27,8	242	270	1,6	34,7	19,0	16,3
	<b>Annuelle</b>	<b>33,4</b>	<b>19,7</b>	<b>0,65</b>	<b>20,3</b>	<b>34</b>	<b>20</b>	<b>54</b>	<b>331</b>	<b>385</b>	<b>5,0</b>	<b>86</b>	<b>51</b>	<b>45</b>
<b>Lisier de porcs</b>	Estivale	2,7	1,4	0,09	1,5	5,5	2,7	8,2	19,1	27	0,2	6,4	3,9	1,7
	Automnale	14,3	6,7	0,29	7,0	9,7	7,7	17,4	70	87	0,8	24,8	14,1	6,1
	Hivernale	0,7	0,6	0,01	0,6	0,5	1,1	1,6	6,2	8	0,1	3,2	2,1	0,9
	Printanière	5,1	5,9	0,92	6,8	23,1	15,0	38,1	198	236	0,8	30,1	16,4	7,0
	<b>Annuelle</b>	<b>22,8</b>	<b>14,6</b>	<b>1,31</b>	<b>15,9</b>	<b>39</b>	<b>26</b>	<b>65</b>	<b>293</b>	<b>359</b>	<b>1,9</b>	<b>64</b>	<b>37</b>	<b>16</b>

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

	Période	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NOD	NT	PRD	POD	PD	PP	PT	K	Ca	Mg	Na
		(mg/l)				(µg/l)					(mg/l)			
<b>Fumure minérale</b>	Estivale	0,006	3,76	0,36	4,12	14,6	12,4	27,1	61	88	2,02	30,3	19,5	14,3
	Automnale	0,017	4,72	0,16	4,90	11,6	5,1	16,7	118	135	1,52	24,1	14,1	10,1
	Hivernale	0,004	2,71	0,09	2,81	4,7	6,5	11,2	118	129	1,60	28,7	19,1	14,5
	Printanière	0,014	2,34	0,23	2,58	15,5	7,5	23,0	239	262	1,09	20,4	10,9	7,6
	<b>Annuelle</b>	<b>0,014</b>	<b>3,45</b>	<b>0,20</b>	<b>3,67</b>	<b>13,2</b>	<b>6,8</b>	<b>20,1</b>	<b>168</b>	<b>189</b>	<b>1,36</b>	<b>23,1</b>	<b>13,3</b>	<b>9,5</b>
<b>Fumier bovins</b>	Estivale	0,011	8,26	0,60	8,86	48,2	16,0	64,2	110	174	2,44	40,2	22,7	14,4
	Automnale	0,024	5,58	0,36	5,96	11,5	7,7	19,2	131	150	1,54	31,6	18,7	12,1
	Hivernale	0,013	3,57	0,22	3,81	4,9	8,3	13,3	38	51	1,36	35,4	22,9	14,7
	Printanière	0,007	2,48	0,29	2,77	17,4	9,9	27,3	232	259	1,16	26,6	13,9	8,7
	<b>Annuelle</b>	<b>0,014</b>	<b>4,24</b>	<b>0,34</b>	<b>4,60</b>	<b>17,6</b>	<b>9,6</b>	<b>27,2</b>	<b>174</b>	<b>202</b>	<b>1,43</b>	<b>30,1</b>	<b>16,9</b>	<b>10,7</b>
<b>Fumier poulets</b>	Estivale	0,014	10,94	0,53	11,48	23,8	16,6	40,4	69	110	3,52	56,7	36,0	34,2
	Automnale	0,026	8,88	0,40	9,30	11,6	6,6	18,2	73	91	2,56	37,4	23,1	20,5
	Hivernale	0,012	5,49	0,24	5,74	2,7	7,7	10,4	30	40	2,10	37,2	24,6	22,0
	Printanière	0,003	7,15	0,11	7,26	16,0	8,2	24,2	211	235	1,39	30,3	16,5	14,2
	<b>Annuelle</b>	<b>0,014</b>	<b>8,02</b>	<b>0,26</b>	<b>8,29</b>	<b>13,9</b>	<b>8,0</b>	<b>22,0</b>	<b>135</b>	<b>157</b>	<b>2,05</b>	<b>35,2</b>	<b>20,9</b>	<b>18,4</b>
<b>Lisier de porcs</b>	Estivale	0,014	6,84	0,47	7,32	27,8	13,4	41,2	96	137	1,03	32,3	19,8	8,5
	Automnale	0,017	7,71	0,33	8,06	11,2	8,9	20,0	81	101	0,88	28,6	16,3	7,0
	Hivernale	0,006	5,68	0,07	5,75	4,6	9,5	14,0	55	69	0,74	28,1	19,1	8,0
	Printanière	0,004	4,48	0,70	5,19	17,6	11,4	29,0	151	180	0,62	22,9	12,5	5,3
	<b>Annuelle</b>	<b>0,009</b>	<b>5,85</b>	<b>0,53</b>	<b>6,38</b>	<b>15,6</b>	<b>10,6</b>	<b>26,2</b>	<b>118</b>	<b>144</b>	<b>0,75</b>	<b>25,8</b>	<b>14,7</b>	<b>6,3</b>

**Annexe 6. Charges moyennes saisonnières du phosphore perdu aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.**

Période	6 ans			3 ans			
	PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio	
	(g/ha)						
<b>Fumure minérale</b>	Estivale	13	8	4	131	152	55
	Automnale	26	18	8	78	100	50
	Hivernale	6	4	2	8	5	4
	Printanière	35	22	13	185	214	105
<b>Fumier bovins</b>	Estivale	22	14	7	115	130	54
	Automnale	39	25	14	86	108	54
	Hivernale	9	6	4	20	14	8
	Printanière	72	47	24	98	143	78
<b>Fumier poulets</b>	Estivale	19	14	6	167	194	71
	Automnale	30	21	9	109	154	76
	Hivernale	9	6	3	30	11	6
	Printanière	75	47	28	171	238	123
<b>Lisier porcs</b>	Estivale	32	24	8	477	527	228
	Automnale	34	25	10	135	171	100
	Hivernale	12	8	4	33	29	19
	Printanière	61	38	23	323	389	204

p > F modes	0,1214	0,1730	0,2416	0,0752	0,0641	0,1167
p > F périodes	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0112	0,0022	0,0115
p > F modes x périodes	0,6691	0,7642	0,7695	0,5994	0,6019	0,8148

Annexe 7. Concentrations moyennes pondérées saisonnières de phosphore dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

Période	6 ans			3 ans			
	PD	PRD	POD	PP	PT	Pbio	
	µg/L						
Fumure minérale	Estivale	27,5	21,2	6,6	163	189	70
	Automnale	33,0	23,3	9,7	121	141	65
	Hivernale	21,2	13,7	7,3	50	20	22
	Printanière	29,7	18,7	10,8	206	227	109
Fumier bovins	Estivale	51,5	39,0	12,3	125	145	63
	Automnale	47,2	31,3	15,5	132	166	69
	Hivernale	37,2	24,5	12,7	79	46	41
	Printanière	60,5	40,3	20,1	105	150	81
Fumier poulets	Estivale	45,8	36,5	9,3	187	223	85
	Automnale	34,5	23,7	10,8	197	266	117
	Hivernale	30,7	20,2	10,6	152	35	28
	Printanière	60,5	38,0	22,8	178	240	122
Lisier porcs	Estivale	60,2	47,7	12,5	441	508	226
	Automnale	44,3	31,7	12,7	249	313	168
	Hivernale	35,2	24,3	11,2	103	86	69
	Printanière	52,2	33,2	19,1	348	407	215
p > F modes	0,0184	0,0491	0,0607	0,0550	0,0202	0,0353	
p > F périodes	0,0212	0,0357	0,0028	0,0939	<0,0001	0,0013	
p > F modes x périodes	0,8824	0,9363	0,9213	0,5652	0,4311	0,5719	

Annexe 8. Charges moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous perdus aux drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

		3 ans			
		K	Ca	Mg	Na
Période		(kg/ha)			
Fumure minérale	Estivale	0,7	21,0	11,6	8,1
	Automnale	0,7	14,1	8,0	5,7
	Hivernale	0,2	4,3	2,7	2,2
	Printanière	1,0	23,3	9,4	5,0
Fumier bovins	Estivale	0,7	32,3	17,4	11,8
	Automnale	0,7	19,2	10,7	7,0
	Hivernale	0,1	4,7	3,2	2,1
	Printanière	1,3	25,3	10,4	5,6
Fumier poulets	Estivale	1,2	26,0	15,2	14,4
	Automnale	0,9	16,6	9,5	8,4
	Hivernale	0,4	6,5	4,3	4,1
	Printanière	1,4	24,3	10,5	8,0
Lisier porcs	Estivale	0,4	22,0	12,1	5,7
	Automnale	0,4	12,6	7,1	3,2
	Hivernale	0,1	5,3	3,6	1,4
	Printanière	1,0	24,4	9,4	4,7

p > F modes	0,2730	0,7270	0,6074	0,0768
p > F périodes	0,0024	0,0007	0,0007	0,0007
p > F modes x périodes	0,9959	0,9983	0,9972	0,9270

Annexe 9. Concentrations moyennes saisonnières de K, Ca, Mg et Na dissous dans l'eau des drains sous prairies selon les modes de fertilisation.

		3 ans			
		K	Ca	Mg	Na
Période		mg/L			
Fumure minérale	Estivale	1,1	27,1	15,2	10,7
	Automnale	1,1	22,1	12,7	9,1
	Hivernale	0,7	14,1	8,9	7,1
	Printanière	2,3	36,8	15,3	8,8
Fumier bovins	Estivale	0,9	34,3	18,8	12,6
	Automnale	1,0	27,5	15,4	10,2
	Hivernale	0,5	15,6	10,2	6,9
	Printanière	2,5	31,8	13,5	7,8
Fumier poulets	Estivale	1,6	33,5	19,7	18,4
	Automnale	1,5	27,7	16,0	14,0
	Hivernale	1,3	19,2	12,6	12,0
	Printanière	4,8	49,2	21,8	17,1
Lisier porcs	Estivale	0,6	27,6	15,3	7,1
	Automnale	0,8	23,8	13,1	6,0
	Hivernale	0,3	14,9	10,0	3,9
	Printanière	3,3	39,7	15,1	8,0

p > F modes	0,6073	0,7919	0,6266	0,0676
p > F périodes	0,0377	0,0393	0,2708	0,3813
p > F modes x périodes	0,9983	0,9991	0,9996	0,9988

**Annexe 10. Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous prairies selon les périodes.**

		<b>Période</b>			
<b>Centile</b>		<b>Estivale</b>	<b>Automnale</b>	<b>Hivernale</b>	<b>Printanière</b>
<b>N-NH<sub>4</sub></b> <b>(mg/L)</b>	25	0,017	0,008	0,008	0,026
	50	0,046	0,025	0,016	0,073
	90	0,297	0,093	0,071	0,295
<b>N-NO<sub>3</sub></b> <b>(mg/L)</b>	25	0,88	0,73	1,46	1,25
	50	2,05	1,95	2,54	2,02
	90	5,98	4,19	5,50	4,80
<b>NOD</b> <b>(mg/L)</b>	25	0,20	0,15	0,06	0,20
	50	0,38	0,33	0,19	0,43
	90	1,09	0,86	0,61	1,01
<b>NT</b> <b>(mg/L)</b>	25	1,42	1,24	1,77	1,88
	50	2,63	2,28	2,68	2,78
	90	6,91	4,80	5,96	5,54
<b>PRD</b> <b>(µg/L)</b>	25	13	13	8	13
	50	22	22	14	23
	90	136	80	45	77
<b>PD</b> <b>(µg/L)</b>	25	21	19	13	23
	50	35	32	24	36
	90	144	108	57	98
<b>Pbio</b> <b>(µg/L)</b>	25	19	32	14	28
	50	35	68	21	55
	90	135	220	56	191
<b>PP</b> <b>(µg/L)</b>	25	15	37	14	24
	50	40	96	23	62
	90	232	434	112	305
<b>PT</b> <b>(µg/L)</b>	25	44	63	33	60
	50	80	138	43	125
	90	312	520	145	370
<b>K dissous</b> <b>(mg/L)</b>	25	0,80	0,90	0,96	0,63
	50	1,20	1,62	1,47	0,97
	90	2,51	2,84	2,95	3,75
<b>Ca dissous</b> <b>(mg/L)</b>	25	25	22	23	14
	50	31	26	29	19
	90	42	38	38	30
<b>Mg dissous</b> <b>(mg/L)</b>	25	14	12	14	6
	50	18	15	18	8
	90	25	23	21	13
<b>Na dissous</b> <b>(mg/L)</b>	25	7	5	7	3
	50	10	9	14	5
	90	23	17	20	8

**Annexe 11. Centile des concentrations des éléments nutritifs dans l'eau des drains sous orge grainée selon les périodes.**

		Période			
		Centile	Estivale	Automnale	Hivernale
<b>N-NH<sub>4</sub></b> (mg/L)	25	0,008	0,002	0,003	0,000
	50	0,018	0,022	0,014	0,002
	90	0,057	0,076	0,080	0,022
<b>N-NO<sub>3</sub></b> (mg/L)	25	2,93	4,34	3,18	2,96
	50	3,77	5,80	4,40	4,00
	90	6,80	10,75	6,22	6,60
<b>NOD</b> (mg/L)	25	0,22	0,15	0,12	0,15
	50	0,41	0,39	0,24	0,30
	90	1,02	1,10	0,62	0,47
<b>NT</b> (mg/L)	25	3,34	4,78	3,66	3,08
	50	4,40	6,22	5,02	4,60
	90	7,28	11,10	6,40	7,00
<b>PRD</b> (µg/L)	25	17	10	3	7
	50	30	18	6	14
	90	62	40	32	23
<b>PD</b> (µg/L)	25	28	16	10	12
	50	45	24	12	21
	90	81	46	38	40
<b>PP</b> (µg/L)	25	14	26	22	18
	50	30	45	29	45
	90	122	220	164	300
<b>PT</b> (µg/L)	25	36	37	33	32
	50	60	63	40	60
	90	220	250	186	320
<b>K dissous</b> (mg/L)	25	1,39	1,29	1,16	1,15
	50	2,12	1,89	1,76	1,59
	90	3,20	2,65	2,68	2,25
<b>Ca dissous</b> (mg/L)	25	26	27	27	25
	50	32	29	31	27
	90	43	39	43	35
<b>Mg dissous</b> (mg/L)	25	17	15	18	11
	50	21	18	20	17
	90	28	25	29	23
<b>Na dissous</b> (mg/L)	25	9	9	8	7
	50	15	13	14	10
	90	27	23	27	20

## 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).