

Cahier n° 3

**BILAN DE TRANSFERT DES ÉLÉMENTS TRACES  
MÉTALLIQUES DANS UNE PRAIRIE ET UN CHAMP  
DE MAÏS-GRAIN FERTILISÉS AVEC DES ENGRAIS  
MINÉRAUX ET DES ENGRAIS DE FERME**



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 économique et régional et de la Recherche
- Ministère de l'Environnement

 *L'Union des  
producteurs  
agricoles*

# **BILAN DE TRANSFERT DES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES DANS UNE PRAIRIE ET UN CHAMP DE MAÏS-GRAIN FERTILISÉS AVEC DES ENGRAIS MINÉRAUX ET DES ENGRAIS DE FERME**

**SITE DE SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON**



Préparé par :

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

**Louise Deschênes**  
École polytechnique, Université de Montréal

**Raynald Chassé**  
Centre d'expertise en analyses environnementales du Québec

Janvier 2004



### **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

---

RÉSUMÉ .....	7
1. INTRODUCTION .....	9
2. OBJECTIFS .....	11
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES DE MESURE DES TRANSFERTS DES ÉTM .....	12
3.1 Collecte et mesure des eaux des drains souterrains .....	13
3.2 Collecte et mesure des eaux de ruissellement de surface .....	13
3.3 Exportation par les récoltes .....	13
3.4 Bilan des ÉTM .....	13
4. RÉSULTATS .....	14
4.1 Concentrations en ÉTM des engrais minéraux et organiques .....	14
4.2 Charges en ÉTM provenant des engrais minéraux et des engrais de ferme .....	15
<i>Prairie</i> .....	15
<i>Mais-grain</i> .....	16
4.3 Exportations en ETM par les récoltes .....	17
<i>Prairie</i> .....	17
<i>Mais-grain</i> .....	18
4.4 Concentrations et charges en ÉTM des eaux de drainage .....	18
<i>Prairie</i> .....	18
<i>Mais-grain</i> .....	21
4.5 Concentrations et charges en ÉTM des eaux de ruissellement .....	23
<i>Prairie</i> .....	23
<i>Mais-grain</i> .....	25
4.6 Bilan des ÉTM .....	26
<i>Prairie</i> .....	26
<i>Mais-grain</i> .....	27
4.7 Analyse des ÉTM des sols .....	28
<i>Prairie</i> .....	28
<i>Mais-grain</i> .....	29
5. CONCLUSIONS .....	32
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	33
7. REMERCIEMENTS .....	34

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 3.1	Caractéristiques physiques et chimiques des sols utilisés .....	12
Tableau 4.1	Concentration en ÉTM de divers engrais minéraux commerciaux .....	14
Tableau 4.2	Concentrations en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans la prairie.....	15
Tableau 4.3	Concentrations en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans le champ de maïs-grain .....	15
Tableau 4.4	Charges en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans la prairie .....	16
Tableau 4.5	Charges en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans le champ de maïs-grain.....	17
Tableau 4.6	Exportation des ÉTM par les récoltes de la prairie.....	17
Tableau 4.7	Exportation des ÉTM par la récolte du maïs-grain .....	18
Tableau 4.8	Concentrations moyennes pondérées des éléments totaux dans l'eau des drains souterrains de la prairie .....	19
Tableau 4.9	Charge des éléments totaux perdus dans l'eau des drains souterrains de la prairie .....	20
Tableau 4.10	Concentrations moyennes pondérées des éléments solubles dans l'eau des drains souterrains de la prairie .....	20
Tableau 4.11	Charge des éléments solubles perdus dans l'eau des drains souterrains de la prairie.....	21
Tableau 4.12	Concentrations moyennes pondérées des éléments totaux dans l'eau des drains souterrains du champ de maïs-grain.....	21
Tableau 4.13	Charge des éléments totaux perdus dans l'eau des drains souterrains du champ de maïs-grain.....	22
Tableau 4.14	Concentrations moyennes pondérées des éléments solubles dans l'eau des drains souterrains du champ de maïs-grain .....	22
Tableau 4.15	Charge des éléments solubles perdus dans l'eau des drains souterrains du champ de maïs-grain.....	23
Tableau 4.16	Concentration moyenne pondérée des éléments totaux ruisselés dans la prairie .....	24
Tableau 4.17	Charge des éléments totaux ruisselés dans la prairie.....	24
Tableau 4.18	Concentration moyenne pondérée des éléments solubles ruisselés dans la prairie.....	24
Tableau 4.19	Charge des éléments solubles ruisselés dans la prairie .....	24
Tableau 4.20	Concentration moyenne pondérée des éléments totaux ruisselés dans le maïs-grain .....	25
Tableau 4.21	Charge des éléments totaux ruisselés dans le maïs-grain.....	25
Tableau 4.22	Concentration moyenne pondérée des éléments solubles ruisselés dans le maïs-grain.....	26
Tableau 4.23	Charge des éléments solubles ruisselés dans le maïs-grain .....	26
Tableau 4.24	Bilan des éléments apportés et perdus dans la prairie selon les modes de fertilisation .....	27
Tableau 4.25	Bilan des éléments apportés et perdus dans le champ de maïs-grain selon les modes de fertilisation .....	28
Tableau 4.26	Teneur en ÉTM totaux des sols selon les modes de fertilisation de la prairie après 10 ans d'application d'engrais .....	29
Tableau 4.27	Teneur en ÉTM des sols extraits avec Mehlich-3 selon les modes de fertilisation de la prairie après 10 ans d'application d'engrais .....	29
Tableau 4.28	Teneur en ÉTM totaux des sols selon les modes de fertilisation du champ de maïs-grain après 10 ans d'application d'engrais .....	30
Tableau 4.29	Teneur en ÉTM des sols extraits avec Mehlich-3 selon les modes de fertilisation du champ de maïs-grain après 10 ans d'application d'engrais .....	30
Tableau 4.30	Classification des sols selon leur teneur en ÉTM mesurée avec la méthode Mehlich-3.....	31



## RÉSUMÉ

---

Une étude a été entreprise afin d'établir le bilan annuel des apports et des exportations des éléments traces métalliques (ÉTM) dans une prairie de luzerne-mil et un champ de maïs-grain fertilisés avec des engrais minéraux et des engrais de ferme. Les sites de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec, situés à Saint-Lambert de Lauzon près de Québec, ont été instrumentés de systèmes de captage des eaux de drainage souterrain et de ruissellement de surface. Ces parcelles sont en place depuis 10 ans. Ces deux cultures ont été fertilisées avec différentes sources d'engrais : fumure minérale, lisier de porcs à l'engraissement, fumier de bovins laitiers ou fumier de poulets. Les données agronomiques nécessaires à l'établissement des charges des ÉTM apportées par les engrais, celles exportées par les récoltes et celles perdues dans les eaux de drainage souterrain et de ruissellement de surface, ont été recueillies en 2002. L'analyse des teneurs en ÉTM totaux et labiles (Mehlich-3) des sols après 10 années d'application consécutives des engrais a été effectuée afin de mesurer les accumulations dans le profil de sol (0-80 cm) de la prairie et du champ de maïs-grain. Les analyses des ÉTM des engrais, des cultures et des eaux montrent que les parcelles fertilisées avec des engrais minéraux uniquement présentent un bilan déficitaire, ce qui signifie que les apports sont inférieurs aux exportations et qu'il n'y a aucune accumulation de ÉTM dans les sols. Pour les engrais de ferme, le bilan de plusieurs ÉTM est déficitaire ou près de l'équilibre, tant dans la prairie que dans le champ de maïs-grain. C'est le cas pour Ni, Pb, Co, Cr, et Cd, pour lesquels les analyses de sol ne montrent aucun signe d'accumulation. Par contre, le zinc et le cuivre ont un bilan excédentaire pour tous les traitements avec les engrais de ferme. Les teneurs de ces éléments dans le fumier de volailles et le lisier de porcs sont particulièrement élevées. Les bilans annuels du zinc et du cuivre avec le lisier de porcs appliqué à la dose annuelle de 50 t/ha dans le maïs-grain sont respectivement de 2957 g/ha pour le zinc et de 2137 g/ha pour le cuivre. Dans la prairie, le bilan annuel provenant d'une application de 25 t/ha de lisier de porcs est respectivement de 1781g/ha pour le zinc et de 1292 g/ha pour le cuivre. Les accumulations de ces éléments ont augmenté les teneurs en Zn et Cu labiles mesurées avec la méthode Mehlich-3 dans la couche arable. Les teneurs du cuivre et du zinc totaux des sols après 10 années de fertilisation sont cependant peu affectées par les apports des engrais de ferme. L'accroissement de la disponibilité du cuivre et du zinc dans les sols fertilisés avec les engrais de ferme se produit à un rythme proportionnellement plus rapide que celui de l'accroissement de la charge totale. Les effets d'applications répétées à long terme sont donc plus perceptibles pour la fraction labile. Des critères d'interprétation des teneurs en cuivre et en zinc mesurés avec la méthode Mehlich-3 dans les sols agricoles sont présentés. Ces critères ont permis d'établir que les sols initialement plutôt pauvres en Cu et Zn disponibles ont atteint un niveau riche après 10 années d'apport de lisier dans la prairie et le champ de maïs-grain. Afin de prévenir les accumulations excessives de cuivre et de zinc dans les sols, il est souhaitable de connaître leur teneur dans les engrais de ferme. Il faudrait aussi procéder occasionnellement à l'analyse des sols avec la méthode Mehlich-3 afin de suivre leur évolution. Des solutions alternatives devraient être envisagées pour réduire l'ajout de ces éléments dans les rations alimentaires afin de diminuer les rejets par les animaux et ainsi limiter les apports aux champs.



## 1 - INTRODUCTION

---

Le sol est une matrice complexe composée de minéraux, de matières organiques, d'eau et d'air. Il représente un support et une source d'éléments nutritifs pour la végétation, la microflore (bactéries, champignons, etc.) et la microfaune (invertébrés, etc.). De plus, il est le lieu d'une activité biologique importante qui assure la décomposition de la matière organique et du recyclage des éléments nutritifs. La présence de contaminants, dont les éléments traces métalliques (ÉTM), dans un sol donne lieu à des interactions complexes avec la matrice qui sont contrôlées par de nombreux processus incluant les mécanismes de complexation, de précipitation, d'adsorption et de fixation par les fractions minérales ou organiques (McLean et Bledsoe, 1992). Ainsi, les ÉTM se retrouveront, dépendamment des interrelations qui existent entre ces processus en fonction du milieu environnant, en solution sous la forme d'ions libres ou de complexes organiques solubles. Ils peuvent être adsorbés ou fixés sur les sites d'échanges des constituants organiques et inorganiques du sol. Ils peuvent être complexés par la matière organique du sol ou encore précipités ou occlus avec les formes d'oxydes libres du sol. On en trouve également dans la structure minéralogique des minéraux primaires ou secondaires (Tisdale et al., 1985). La spéciation des métaux constitue un bon moyen pour établir la répartition des formes dans les divers compartiments du sol et ainsi mieux évaluer leur mobilité. Deux études ont évalué la spéciation du cuivre et du zinc suite aux apports répétés de lisiers de porcs aux sols (Quian et al., 2003; Royer et al., 2004). Il semble qu'à moyen terme, les charges de Cu et Zn apportées ont peu d'effet sur la fraction échangeable mais ont une incidence sur la fraction organique et celle des oxydes libres. Un accroissement de Cu et Zn labiles est également mesuré. À plus long terme, la fraction échangeable pourrait être affectée. Cette dernière fraction est en équilibre avec la solution du sol, ce qui contribuerait à accroître la mobilité de ces ÉTM dans les sols.

La mobilité des ÉTM dans un sol, et par conséquent leur biodisponibilité et leur toxicité potentielles, seront non seulement contrôlées par les propriétés physico-chimiques du sol et par la spéciation de ces éléments, mais aussi par la présence d'organismes vivants. Les communautés microbiennes, tout comme celles des organismes plus évolués comme les invertébrés et les plantes, changent les conditions environnementales et modifient la distribution des ÉTM dans les sols (Zagury *et al.*, 2002). Réciproquement, l'application excessive des ÉTM est susceptible de causer des effets directs ou indirects à plus ou moins long terme sur les organismes vivants et sur l'activité biologique des sols (Quilbé, 2002). La notion de biodisponibilité est définie comme l'aptitude d'un ÉTM de passer d'un compartiment quelconque du sol ou de la solution du sol vers les organismes de la pédoflore, et de la pédofaune et vers les plantes (Baize, 1997). Quilbé (2002) décrit certains mécanismes bio-physico-chimiques impliquant des relations entre le sol et les organismes vivants reliés à la biodisponibilité des ÉTM dans les sols. Il mentionne que la détermination des concentrations en ÉTM dans des organismes vivants du sol peut servir de bioindicateur mais qu'il est souvent difficile d'interpréter ces valeurs. On peut aussi utiliser des biomarqueurs moléculaires révélant une exposition à une substance chimique polluante. Les protéines de stress induites lors de l'exposition des organismes du sol aux ÉTM, comme par exemple la métallothionéine en présence de cadmium ou de mercure, sont des biomarqueurs d'exposition, de défense ou de dommage.

Depuis de nombreuses années, des engrais minéraux, des engrais de ferme, des matières résiduelles fertilisantes et des amendements calciques industriels sont déposés sur les sols afin d'être valorisés en agriculture. L'apport de ces engrais et amendements, parfois riches en ÉTM, en quantités importantes sur une même parcelle de sol, pourrait à long terme perturber l'équilibre dynamique des processus vitaux du sol non seulement en étant une source d'ÉTM mais aussi en modifiant potentiellement les caractéristiques bio-physico-chimiques du sol récepteur. Afin de prévenir de tels risques, des critères ont été établis pour caractériser les teneurs en ÉTM des matières résiduelles fertilisantes (MENV, 2002). On peut déterminer les charges en ÉTM totaux qui vont résulter des apports de MRF. Cette classification est la principale ligne de défense pour prévenir l'accumulation des ÉTM suite à la valorisation agricole des MRF au Québec. Un suivi analytique des sols peut également être réalisé. Une classification des teneurs en ÉTM totaux et disponibles (Mehlich-3) basée sur leur

distribution percentile dans les sols a été réalisée par Giroux et al. (1992). L'analyse des ÉTM des sols est toutefois rarement effectuée au Québec.

Les engrais de ferme ne sont soumis à aucun critère relativement à leur teneur en ÉTM. Certains engrais, comme les lisiers de porcs et les fumiers de volailles, sont reconnus pour être riches en cuivre et en zinc. Le bilan des ÉTM apportés, exportés et accumulés dans sols agricoles suite aux apports d'engrais de ferme est assez mal connu. Le transport des ÉTM par les drains agricoles et le ruissellement de surface vers les milieux aquatiques a fait l'objet de peu de mesures. Il n'est actuellement pas possible de déterminer ce qu'il advient de façon globale des ÉTM appliqués aux sols. D'après des études de longue durée réalisées au Québec, le cuivre et le zinc auraient tendance à s'accumuler dans la couche arable des sols (Tran et al., 1996) mais une certaine quantité migre vers les horizons inférieurs du profil de sol (Royer et al., 2004).

## 2 - OBJECTIFS

---

L'objectif de l'étude est de mesurer les transferts des ÉTM survenant dans les sols suite à l'application d'engrais minéraux et d'engrais de ferme et de dresser un bilan des apports, des exportations par les cultures et les pertes dans les eaux de ruissellement de surface et de drainage souterrain. Elle vise aussi à mesurer les accumulations des ÉTM totaux et disponibles dans les sols suite à des apports répétés d'engrais minéraux et d'engrais de ferme à long terme. L'étude porte sur les deux plus importantes productions végétales au Québec, soit les prairies et le maïs-grain.

Cette étude va permettre au secteur agricole de mieux connaître le bilan des apports en ÉTM avec les engrais de ferme et d'identifier les pratiques de fertilisation présentant des risques d'accumulation dans les sols ou de perte vers le milieu aquatique. On sait que les applications de certains types d'engrais de ferme augmentent à long terme les teneurs en cuivre et en zinc dans les sols (Tran et al., 1996). Cette étude va permettre de comprendre de façon plus globale ce qu'il advient des ÉTM apportés aux sols agricoles.

### 3 - MATÉRIEL ET MÉTHODES DE MESURE DES TRANSFERTS DES ÉTM

Cette étude s'est déroulée en 2002 sur les deux sites de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec à Saint-Lambert de Lauzon. Des parcelles expérimentales sont en place dans ces champs depuis 10 ans et sont soumises à divers modes de fertilisation (Berrouard et al., 2001). Nous avons choisi ces sites parce qu'ils sont instrumentés de systèmes de captage des eaux de drainage souterrain et de ruissellement de surface et que les données agronomiques nécessaires au suivi des ÉTM sont connues. Le tableau 3.1 présente les caractéristiques physiques et chimiques des parcelles expérimentales. Il s'agit d'établir le bilan annuel des apports et des exportations des ÉTM pour deux cultures, les prairies et le maïs-grain, selon des modes de fertilisation avec des engrais minéraux et des engrais de ferme. Un suivi analytique des ÉTM totaux et disponibles mesurés avec la méthode Mehlich-3 a également été effectué afin de mesurer les accumulations dans les sols agricoles après 10 ans de cultures selon les divers modes de fertilisation.

Le premier site est une prairie de luzerne-mil, constituée de quatre parcelles de 2240 m<sup>2</sup>. Chaque parcelle reçoit une fertilisation différente, soit une fumure minérale, du fumier de bovins laitiers, du fumier de poulets et du lisier de porcs à l'engraissement. Ce lisier provient du fond d'une fosse; il est donc plus concentré en certains ÉTM, cuivre et zinc notamment. Les engrais sont appliqués en juin après la première coupe de foin de la prairie. Le second site est un champ de maïs-grain, constitué de trois parcelles de 1200 m<sup>2</sup>. Chaque parcelle reçoit une fumure différente, soit une fumure minérale, du lisier de porcs ou du fumier de bovins laitiers. L'épandage des engrais se fait au printemps en pré-semis incorporé. Une quantité d'azote minéral de 50 kg/ha est appliquée comme fumure de démarrage au semis dans toutes les parcelles. Les engrais appliqués ont été analysés pour leur teneur en éléments nutritifs et en ÉTM. Une calibration précise des doses d'épandage est effectuée pour chaque parcelle de sorte qu'il est possible d'établir les charges de ÉTM appliqués par hectare. La texture du sol correspond à un loam limono-argileux de la série Le Bras. Le travail du sol est effectué par un labour conventionnel à 20 cm de profondeur à l'automne et complété par un passage de herbes à disque et d'un vibroculteur au printemps. La description des propriétés physiques et chimiques est faite au tableau 3.1.

La précipitation moyenne annuelle mesurée à la station d'Environnement Canada de Scott, située la plus près, à 7 km du site expérimental, est de 1126 mm pour la précipitation totale, dont 252 mm sous forme solide. Pour l'année 2002, les précipitations pendant la période de mesure du ruissellement, allant du début avril à la fin novembre, ont été de 652 mm, valeur près de la normale de 682 mm malgré un été particulièrement sec. Elles ont provoqué peu de ruissellement. Durant cette période, les précipitations ont été de faible intensité et de récurrence inférieure à 2 ans. La période de la fonte des neiges est celle qui a produit le plus de ruissellement. Globalement, le ruissellement de 2002 a été faible.

**Tableau 3.1 - Caractéristiques physiques et chimiques des sols des parcelles**

Description des types de fumure	Superficies des parcelles				Mehlich-3			
		Pente (%)	M.O. (%)	pH	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Al (mg/kg)	P/Al (%)
<b>Prairie</b>								
Fumure minérale	2240	2,8	2,64	6,15	21	63	1286	1,63
Fumier de bovins laitiers	2240	2,5	3,07	6,20	17	81	1277	1,33
Fumier de poulets	2240	1,8	3,29	6,28	46	64	1286	3,58
Lisier de porcs	2240	1,1	2,99	6,49	33	64	1237	2,67
<b>Maïs-grain</b>								
Fumure minérale	1200	0,7	2,70	6,66	33	82	1184	2,79
Fumier de bovins laitiers	1200	0,5	4,48	5,98	25	331	1390	1,80
Lisier de porcs	1200	0,7	2,61	6,97	31	92	781	3,97

### **3.1 - Collecte et mesure des eaux des drains souterrains**

Chaque parcelle comporte deux lignes de drains souterrains espacées de 7 mètres. Les lignes sont conduites vers des puits où se trouvent des instruments de mesure du volume et des échantillonneurs d'eau. La mesure du volume des eaux de drainage est réalisée à l'aide d'augets à bascule d'un litre reliés à un compteur électronique. 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 500 ml une fois par semaine. Ces échantillons sont envoyés au laboratoire d'analyse des sols et des eaux de l'IRDA pour leur détermination hebdomadaire en ÉTM totaux et solubles. La charge des ÉTM perdus aux drains est calculée en multipliant le volume d'eau hebdomadaire par la teneur en ÉTM des échantillons. Les charges annuelles et saisonnières sont établies en cumulant les charges hebdomadaires pour la saison ou l'année. Les données présentées vont du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2002.

### **3.2 - Collecte et mesure des eaux de ruissellement de surface**

Une équipe de recherche du Département des sols et génie agroalimentaire de l'Université Laval (Goulet et al., 2003) a procédé à l'instrumentation des parcelles pour la mesure des eaux de ruissellement. La parcelle fertilisée au fumier de bovins dans le champ de maïs-grain n'a pas été instrumentée pour la mesure des eaux de ruissellement. Grâce à leurs installations, nous avons pu recueillir des échantillons des eaux de surface pour analyser les ÉTM ruisselés. Chaque parcelle est entourée d'une petite digue en terre de 15 cm, pour éviter l'arrivée d'eau de l'extérieur des parcelles. À l'exutoire de chaque parcelle, des installations de captage et de mesure des eaux de ruissellement sont en place dans un cabanon isolé. Ces instruments comprennent une trappe à sédiment munie d'un déversoir triangulaire de 10 degrés d'angle. Une sonde ultrasonique mesure en continu la hauteur de l'eau dans le réservoir et envoie le signal à un ordinateur qui convertit ces données en volume d'eau ruisselée. Un signal est également envoyé à un système électronique d'échantillonnage qui procède au prélèvement des eaux proportionnellement au débit ruisselé. Les échantillons sont conservés à 4°C avant leur analyse pour les ÉTM solubles et totaux. La période de mesure pour le ruissellement va du 15 mars au 15 novembre. Certaines difficultés de fonctionnement du système de mesure du ruissellement en début de saison nous amènent à fournir un estimé de la lame de ruissellement de 4 cm pour la prairie et de 6 cm pour le maïs-grain. Il n'est pas possible de la préciser davantage pour chacune des parcelles.

### **3.3 - Exportation par les récoltes**

Pour la prairie, deux coupes de foin sont effectuées annuellement. Pour chacune des coupes, une détermination du rendement est effectuée en récoltant à l'aide d'une fourragère une superficie de 20 m<sup>2</sup>. La quantité de matière sèche produite par hectare pour chacune des coupes est établie et un échantillon est envoyé au laboratoire pour la détermination de la teneur en ÉTM totaux des fourrages. Une calcination suivie de la reprise des cendres à l'acide chlorhydrique permet la mise en solution des ÉTM qui sont dosés au plasma Perkin Elmer modèle 4300 DV. Les exportations par les récoltes sont mesurées en multipliant le rendement par la teneur en ÉTM de la récolte. Pour le maïs-grain, la superficie totale de chaque parcelle est récoltée par une moissonneuse-batteuse commerciale et le rendement en grains est rapporté sur une base de matière sèche. Les grains sont analysés pour leur teneur en ÉTM par calcination et reprise des cendres. Les exportations par les grains sont calculées en multipliant le rendement par la teneur en ÉTM des grains. Nous avons également mesuré le rendement des tiges et leur teneur en ÉTM pour établir la quantité qui retourne aux sols lors du battage.

### **3.4 - Bilan des ÉTM**

Le bilan est établi par différence entre les entrées (apport par les engrais) et les sorties (exportation par les récoltes, pertes aux drains et pertes dans les eaux de ruissellement). Une valeur positive est associée à une accumulation dans les sols. Une compilation du bilan des ÉTM a été faite pour chacune des parcelles des deux champs.

## 4 - RÉSULTATS

### 4.1 - Concentrations en ÉTM des engrais minéraux et organiques

Les concentrations en ÉTM de divers engrais minéraux commerciaux ont été déterminées en laboratoire (Tableau 4.1). Les engrais azotés de synthèse urée et nitrate d'ammonium contiennent très peu de ÉTM. Le mode de fabrication de ces engrais à partir du gaz naturel, de l'azote de l'air et du gaz carbonique (pour l'urée) explique ces faibles teneurs. Pour les engrais potassiques (chlorure de potassium et sul-po-mag), les teneurs en ÉTM sont également très faibles. Ces deux engrais proviennent de dépôts miniers d'une grande pureté. Les engrais phosphatés, superphosphate triple (0-46-0) et le phosphate bi-ammoniacal (18-46-0), sont par contre nettement plus enrichis en la plupart des ÉTM. Le phosphore provient de dépôts miniers d'apatite traitée avec des acides pour en faire des engrais minéraux. Certains de ces dépôts sont reconnus pour être riches en certains ÉTM, dont le cadmium. Il existe des critères définis par l'Agence canadienne d'inspection des aliments relativement à la concentration maximale admissible de certains ÉTM, dans les engrais. Dans le cas présent, tous les engrais minéraux respectent les concentrations maximales admissibles. Quelques ÉTM ne font pas partie de la liste de l'Agence canadienne d'inspection des aliments. Pour apprécier les teneurs en ces éléments, nous avons référé aux critères provisoires du ministère de l'Environnement du Québec pour les matières résiduelles fertilisantes (MENV, 2002). Pour tous les ÉTM mesurés, les engrais minéraux respectent le critère de qualité C1, c'est-à-dire qu'ils ne représentent pas de risque d'accumulation à long terme dans les sols pour des usages normaux.

**Tableau 4.1 - Concentration en ÉTM de divers engrais minéraux commerciaux**

Engrais	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Nitrate d'ammonium	0,0	6,2	1,4	0,35	0,00	0,17	0,00	0,14
Urée	12,3	1,1	2,8	0,35	0,00	0,34	0,00	0,65
Phosphate bi-ammoniacal	5,9	356	67,1	12,06	3,72	86,6	3,18	0,40
Superphosphate triple	7,3	253	66,5	15,26	6,00	76,9	4,25	5,61
Chlorure de potassium	1,7	1,4	1,0	0,22	0,00	0,20	0,00	0,21
Sul-po-mag	0,2	9,3	1,6	0,29	0,02	0,30	0,00	0,04

Les tableaux 4.2 et 4.3 présentent les concentrations en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans la prairie et le champ de maïs-grain. Pour les engrais de ferme, il n'y a actuellement pas de critères à respecter pour les ÉTM. Selon les critères provisoires pour les matières résiduelles fertilisantes du MENV (2002), les fumiers de bovins laitiers utilisés dans la prairie et dans le champ de maïs-grain sont de catégorie C1 pour tous les ÉTM mesurés. Le fumier de poulets est de catégorie C1 pour tous les éléments, sauf pour le cuivre qui est de catégorie C2. Le lisier de porcs à l'engraissement est de catégorie C1 pour tous les éléments, sauf le cuivre et le zinc qui sont de catégorie C2. Ces derniers éléments présentent donc une problématique particulière avec certains engrais de ferme, soit le fumier de poulets ou le lisier de porcs.



**Tableau 4.2 - Concentrations en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans la prairie**

Formule des engrais	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Urée	12,3	1,1	2,8	0,35	0,00	0,34	0,00	0,65
Phosphate bi-ammoniacal	5,9	356	67,1	12,1	3,72	86,6	3,18	0,40
Chlorure de potassium	1,7	1,4	1,0	0,22	0,00	0,20	0,00	0,21
Analyses des éléments totaux (base sèche) (mg/kg)								
Fumier de bovins laitiers	73	244	283	10,2	0,34	12,8	1,6	0,28
Fumier de poulets	117	433	340	12,0	0,50	11,4	2,8	0,58
Lisier de porcs	420	341	660	11,7	0,45	6,5	1,8	0,1

**Tableau 4.3 - Concentrations en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans le champ de maïs-grain**

Fumure minérale	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Nitrate d'ammonium	0,0	6,2	1,4	0,35	0,00	0,17	0,00	0,14
Phosphate bi-ammoniacal	5,9	356	67,1	12,1	3,72	86,6	3,18	0,40
Analyses des éléments totaux (base sèche) (mg/kg)								
Fumier de bovins laitiers	69	197	195	8,6	0,23	9,4	3,0	0,00
Lisier de porcs	491	390	758	11,8	0,53	6,4	1,8	0,00

## 4.2 - Charges en ÉTM provenant des engrais minéraux et des engrais de ferme

Les tableaux 4.4 et 4.5 présentent les charges en ÉTM qui ont résulté de l'application des engrais minéraux et organiques dans la prairie et dans le champ de maïs-grain. Pour la prairie, une dose annuelle de 265 kg/ha d'un engrais de formulation 10-17-31, fabriqué avec de l'urée, du phosphate bi-ammoniacal et du chlorure de potassium, a été appliquée. Pour le champ de maïs, une dose de 239 kg/ha d'un engrais 21-36-0, formulé avec du nitrate d'ammonium et du phosphate bi-ammoniacal, a été appliquée comme fumure de démarrage au semis. Une dose supplémentaire de 239 kg/ha d'urée a été appliquée au stade 4 à 6 feuilles. Ces engrais composés ont été mélangés à l'IRDA à partir des engrais simples décrits antérieurement. En tenant compte de la proportion relative de chacun des engrais simples dans les mélanges, il a été possible d'établir les charges en ÉTM qui ont résulté de ces applications.

Pour établir les charges en ÉTM provenant des engrais de ferme, nous avons multiplié la teneur des éléments dans les engrais par la dose d'application. Cette dose a été mesurée en trois répétitions au champ par la technique des quadras (1 m<sup>2</sup>) pour les fumiers solides. Pour les lisiers, une calibration vitesse-dose basée sur le débit connu de la rampe d'épandage a été établie. Pour la prairie, les doses d'épandage ont été de 30t/ha de lisier de porcs, de 16,5 t/ha de fumiers de bovins laitiers et de 3,4 t/ha de fumier de poulets. Dans le maïs-grain, les doses appliquées ont été de 47 t/ha pour le fumier de bovins laitiers et de 50 t/ha pour le lisier de porcs.

### *Prairie*

Dans la prairie, les charges en ÉTM appliquées au sol ont varié selon les modes de fertilisation. Elles sont nettement plus faibles dans le traitement avec la fumure minérale et généralement plus élevées dans le traitement avec le lisier de porcs (Tableau 4.4). Pour le cadmium, les charges sont minimales, variant de 0,39 g/ha, avec la fumure minérale, à 1,54 g/ha avec le lisier de porcs. Pour le plomb les charges varient entre 0 et 1,26 g/ha et de 0,33 à 6,03 g/ha pour le cobalt. Ces trois éléments ne posent pas de problème d'apport significatif provenant de la fertilisation avec les engrais minéraux ou les engrais de ferme. On est très en-dessous des maxima admissibles en terme de charge maximale cumulative appliquée au sol. Le nickel et le chrome montrent

des charges pouvant atteindre 40 g/ha avec les engrais de ferme. Les charges mesurées sont également bien en-dessous des maxima permis. En multipliant la charge annuelle par 45 ans, on obtient une charge cumulative de 1,8 kg/ha de nickel pour un maximum admissible de 36 kg/ha. Les lisiers pourraient apporter sur 45 ans, 5 % de la charge maximale admissible de Ni.

Pour le zinc, les charges ont varié de 7,18 g/ha avec la fumure minérale à 2285 g/ha avec le lisier de porcs. En multipliant par 45 ans la charge en zinc du lisier de porcs, on obtient une charge cumulative de 102,8 kg/ha pour un maximum admissible de 370 kg/ha. Les apports de lisier pourraient apporter 27,8 % de la charge maximale admissible de zinc. Rappelons qu'il s'agit d'un lisier de porcs à l'engraisement provenant du fond d'une fosse, très riche en cuivre et en zinc. Il est peu probable qu'une telle charge de Cu et Zn soit appliquée annuellement. Pour le manganèse, les charges ont varié de 37 g/ha, avec la fumure minérale, à 1180 g/ha avec le lisier de porcs. Il n'y a pas de critères pour cet élément mais les lisiers en apportent des quantités appréciables. Pour le cuivre, les charges ont varié de 0,85 g/ha, avec la fumure minérale, à 1451 g/ha avec le lisier de porcs.

**Tableau 4.4 - Charges en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans la prairie**

	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Ni (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)
Fumure minérale (265 kg 10-17-31)	0,85	37	7,18	1,30	0,39	9,07	0,33	0,08
Fumier de bovins laitiers (16,5 t/ha)	212	706	818	30	0,98	37	4,55	0,81
Fumier de poulets (3,4 t/ha)	252	934	733	26	1,08	25	6,03	1,26
Lisier de porcs (30 t/ha)	1451	1180	2285	40	1,54	22	5,38	0,00

### *Mais-grain*

Il existe une différence importante entre les charges des ÉTM apportées par les engrais minéraux et celles apportées par les engrais de ferme dans le champ de maïs-grain (Tableau 4.5). Elles sont les moins élevées avec la fumure minérale et les plus élevées avec les engrais de ferme. Les charges de cadmium appliquées au sol sont faibles, variant de 0,70 g/ha avec la fumure minérale à 2,08 g/ha avec le fumier de bovins laitiers. Elles sont également très faibles, inférieures à 1 g/ha pour le plomb. Elles varient entre 0,6 et 24,05 g/ha pour le cobalt, entre 2,3 et 70 g/ha pour le nickel et entre 16 et 82 g/ha pour le chrome. Pour le cuivre, les charges appliquées varient entre 3,69 g/ha avec la fumure minérale et 2295 g/ha avec le lisier de porcs. Pour le zinc, les charges varient entre 13,20 g/ha avec l'engrais minéral et 3548 g/ha avec le lisier de porcs. En multipliant par 45 ans la charge annuelle de 3548 g/ha, on obtient une charge cumulative de 159,7 kg/ha pour un maximum admissible de 370 kg/ha durant cette période. Les lisiers pourraient apporter, en 45 ans, 43,1% de la charge cumulative de zinc admissible. Ceci est toutefois peu probable si on tient compte du fait qu'il s'agit d'un lisier de fond de fosse avec des teneurs supérieures à la moyenne. Pour le manganèse, les charges ont varié de 67 g/ha, avec la fumure minérale, à 1848 g/ha avec le lisier de porcs. Il n'y a pas de critères pour la charge admissible de cet élément.

Les pratiques de fertilisation avec les engrais minéraux n'ont pas provoqué d'apport important d'aucun des ÉTM mesurés. Avec les engrais de ferme, les applications de cuivre, de zinc et de manganèse peuvent représenter des charges appréciables, particulièrement avec les lisiers de porcs. Pour les autres éléments mesurés, il ne semble pas y avoir de problématiques de charges importantes appliquées. Le lisier utilisé provenait du fond d'une fosse à lisier de porcs à l'engraisement et avait des teneurs en cuivre et en zinc supérieures à la moyenne à cause de sa teneur élevée en matière sèche. Dans le cas du fumier de poulets, la concentration en Zn et Cu est élevée mais les doses appliquées ont été faibles (3,4 t/ha), compte tenu de leur teneur élevée en éléments nutritifs. Des doses plus élevées fourniraient des apports de zinc et cuivre nettement plus importants.

**Tableau 4.5 - Charges en ÉTM des engrais minéraux et organiques appliqués dans le champ de maïs-grain**

	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Ni (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)
Fumier de bovins (47 t/ha)	556	1581	1569	69	1,82	76	23,82	0,00
+ 191 kg 27-18-0/ha	0,42	26,30	4,99	0,91	0,27	6,24	0,23	0,05
<b>TOTAL FUMIER</b>	<b>557</b>	<b>1607</b>	<b>1574</b>	<b>70</b>	<b>2,08</b>	<b>82</b>	<b>24,05</b>	<b>0,05</b>
Lisier de porcs (50 t/ha)	2294	1822	3543	55	2,48	30	8,16	0,00
+ 191 kg 27-18-0/ha	0,42	26,30	4,99	0,91	0,27	6,24	0,23	0,05
<b>TOTAL LISIER</b>	<b>2295</b>	<b>1848</b>	<b>3548</b>	<b>56</b>	<b>2,75</b>	<b>36</b>	<b>8,39</b>	<b>0,05</b>
Fumure minérale	3,69	67,1	13,2	2,35	0,70	16,3	0,60	0,22

### 4.3 - Exportations en ÉTM par les récoltes

#### *Prairie*

Afin de mesurer les teneurs en ÉTM dans le foin et calculer les exportations par les récoltes selon les modes de fertilisation, nous avons mesuré les rendements de deux coupes de foin et procédé aux analyses de ÉTM de chacune des coupes. Les exportations sont établies en multipliant le rendement de chacune des coupes par la teneur en ÉTM respective et en cumulant les deux coupes. Le tableau 4.6 présente les exportations des ÉTM par les récoltes obtenues pour le total des deux coupes. Elles ont varié selon les modes de fertilisation entre 0,40 et 1,24 g/ha pour le plomb, entre 3,06 et 9,25 g/ha pour le cobalt, de 1,34 à 1,80 g/ha pour le chrome, de 0,34 à 1,03 g/ha pour le cadmium, de 6,00 à 10,24 g/ha pour le nickel, de 125 à 224 g/ha pour le zinc, de 231 à 271 g/ha pour le manganèse et de 74 à 121 g/ha pour le cuivre. Pour plusieurs ÉTM (Co, Cr, Zn et Cu), les exportations par les prairies sont plus élevées dans les traitements recevant du fumier de poulets et du lisier de porcs comparativement à ceux recevant des engrais minéraux uniquement. La parcelle fertilisée avec du fumier de bovins laitiers prélève généralement moins de ÉTM que celle fertilisée au lisier de porcs ou au fumier de poulets. Les exportations pour le fumier de bovins se comparent souvent à celles mesurées avec les engrais minéraux.

Pour le cobalt, le chrome et le nickel, les exportations par les récoltes de foin sont inférieures à 10 g/ha; elles sont même inférieures à 1 g/ha pour le plomb et le cadmium. Le faible niveau des exportations fait en sorte que ces éléments présentent peu de risque d'accumulation dans la chaîne alimentaire, particulièrement pour le bétail qui va consommer ces fourrages. Pour le cadmium, les exportations sont faibles mais plus élevées dans le traitement avec la fumure minérale. Ce traitement a reçu du phosphore provenant des engrais minéraux. Les engrais minéraux phosphatés montrent des teneurs plus élevées en cadmium sans dépasser le critère admissible. Les traitements avec les engrais de ferme, particulièrement le lisier de porcs, ont exporté plus de cuivre et de zinc que le traitement avec la fumure minérale seule. Rappelons que le lisier de porcs était particulièrement riche en ces éléments. L'effet semble davantage attribuable à la production accrue de foin avec les engrais de ferme mais les exportations de Cu et Zn par tonne de foin sont également affectées.

**Tableau 4.6 - Exportation des ÉTM par les récoltes de la prairie**

Traitements	Masse sèche (t/ha)	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Ni (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)
Fumure minérale	5,82	74	263	125	10,24	1,03	1,34	3,06	0,40
Fumier de bovins	7,78	115	231	174	6,39	0,34	1,79	5,88	1,24
Fumier de poulets	8,19	119	259	219	6,00	0,56	1,80	9,25	0,86
Lisier de porcs	8,71	121	271	224	8,82	0,59	1,63	6,23	0,41

## Mais-grain

Pour le maïs-grain, les concentrations en ÉTM présents dans les grains ont été mesurées. À partir de ces concentrations, nous avons établi les exportations par hectare en multipliant la concentration en ÉTM des grains par le rendement à l'hectare pour chacun des traitements de fertilisation (Tableau 4.7). Ces exportations sont très faibles pour la majorité des éléments, à l'exception du zinc, du manganèse et du cuivre. Les charges sont peu affectées par les traitements de fertilisation. Elles varient de 0,3 à 0,6 g/ha pour le plomb, de 0,4 à 0,6 g/ha pour le cobalt, de 0,6 à 0,8 g/ha pour le chrome, de 1,6 à 1,9 pour le nickel, de 71 à 113 g/ha pour le zinc, de 21 à 27 g/ha pour le manganèse et de 20 à 24 g/ha pour le cuivre. Elles sont inférieures à la limite de détection pour le cadmium. Ces charges des ÉTM exportés par la récolte de maïs-grain demeurent faibles par rapport à celles mesurées pour la prairie.

Les tiges de maïs sont retournées aux sols dans la culture du maïs-grain. Nous avons mesuré les charges en ÉTM présents dans les tiges et qui retournent aux sols à la récolte (Tableau 4.7). Elles sont généralement plus importantes que celles des grains, ce qui confirme la faible mobilité des ÉTM à l'intérieur des plants de maïs. Les charges en ÉTM contenus dans les tiges et retournés au sol varient de 1,1 à 2 g/ha pour le plomb, de 0,8 à 1,3 g/ha pour le cobalt, de 7,9 à 12,4 g/ha pour le chrome, de 0,2 à 0,3 g/ha pour le cadmium, de 5,2 à 8,2 g/ha pour le nickel, de 31 à 64 g/ha pour le zinc, de 90 à 176 g/ha pour le manganèse et de 23 à 35 g/ha pour le cuivre.

**Tableau 4.7 - Exportation des ÉTM par la récolte du maïs-grain**

Traitements	Masse sèche (t/ha)	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Ni (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)
Grains									
Fumier de bovins	5,80	20	27	100	1,7	0,0	0,8	0,5	0,6
Lisier de porcs	6,22	24	26	113	1,9	0,0	0,7	0,6	0,3
Fumure minérale	4,90	21	21	71	1,6	0,0	0,6	0,4	0,3
Tiges									
Fumier de bovins	3,16	23	90	40	5,2	0,2	7,9	0,8	1,1
Lisier de porcs	4,95	35	142	64	8,2	0,3	12,4	1,3	1,8
Fumure minérale	4,61	34	176	31	5,5	0,3	8,6	0,8	2,0

## 4.4 - Concentrations et charges en ÉTM des eaux de drainage

Le volume des eaux des drains agricoles a été mesuré à chaque semaine tout au long de l'année 2002 pour chacun des traitements de fertilisation dans la prairie et dans le champ de maïs-grain. Un échantillon de cette eau est prélevé en continu et envoyé à chaque semaine pour analyse au laboratoire de l'IRDA. La charge hebdomadaire est calculée en multipliant le volume d'eau de la semaine par la concentration respective en ÉTM. Les charges hebdomadaires sont par la suite cumulées pour chaque saison et pour toute l'année. Les concentrations moyennes pondérées pour chaque saison et pour l'année sont calculées en divisant la charge saisonnière et annuelle par le volume d'eau correspondant. Les ÉTM se retrouvent dans les eaux sous formes dissoutes ou particulaires. Nous avons procédé à l'analyse des ÉTM totaux des eaux et des formes dissoutes en séparant les formes respectives par centrifugation. La différence entre les teneurs en ÉTM totaux et solubles représente les formes particulaires, c'est-à-dire les ÉTM liés ou intégrés aux particules minérales ou organiques non dissoutes.

### Prairie

Le volume des eaux des drains souterrains a varié selon les traitements de 17,97 à 20,26 cm. Chaque cm d'eau drainée correspond à 100,000 litres/ha. Le tableau 4.8 présente les concentrations moyennes pondérées en ÉTM

totaux pour chaque saison et pour l'année dans les eaux des drains souterrains de la prairie. Pour plusieurs éléments, les concentrations estivales sont plus élevées. Par contre, les volumes drainés sont faibles en cette saison. Le printemps s'est montré la période la plus propice aux pertes de ÉTM. Près des deux tiers de l'eau a été évacuée aux drains à cette période (Tableau 4.9). En automne 2002, le volume de ruissellement a été anormalement faible pour cette saison suite à des conditions météorologiques particulièrement sèches. Les concentrations moyennes annuelles pondérées en ÉTM totaux sont plus élevées dans les eaux pour les parcelles fertilisées avec les engrais de ferme que dans celles fertilisées avec la fumure minérale pour les éléments Cu, Mn, Zn, Cd, Cr, Co et Pb. Les engrais de ferme favorisent la structuration et l'infiltration de l'eau dans les sols et contiennent plus de ÉTM que les engrais minéraux. Il est possible qu'ils favorisent aussi une plus grande perte en ÉTM totaux aux drains. On considère par contre qu'ils vont réduire les pertes par ruissellement en favorisant une meilleure infiltration de l'eau.

**Tableau 4.8 - Concentrations moyennes pondérées des éléments totaux dans l'eau des drains souterrains de la prairie**

Année 2002		Cu (µg/L)	Mn (µg/L)	Zn (µg/L)	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Co (µg/L)	Pb (µg/L)	Ni (µg/L)
Fumure minérale	Hiver	2,06	27,8	69,5	0,21	2,02	0,47	0,77	0,03
	Printemps	2,65	9,7	44,3	0,18	1,81	0,44	0,37	0,03
	Été	5,78	116,3	244,5	0,28	6,48	2,08	9,39	0,02
	Automne	1,75	3,1	10,1	0,06	0,33	0,08	0,03	0,05
	ANNUELLE	2,66	17,5	54,6	0,17	1,91	0,50	0,95	0,03
Fumier de bovins laitiers	Hiver	3,13	16,7	58,7	0,12	3,08	0,70	0,98	0,02
	Printemps	13,84	41,2	118,3	0,60	18,12	6,75	5,69	0,02
	Été	7,81	26,4	123,2	0,37	7,41	2,01	3,07	0,02
	Automne	3,27	6,9	5,8	0,07	1,37	0,08	0,20	0,03
	ANNUELLE	10,09	30,1	87,2	0,42	12,24	4,37	3,84	0,02
Fumier de poulets	Hiver	1,12	13,6	14,8	0,12	1,13	0,18	0,38	0,03
	Printemps	7,74	27,7	230,3	0,35	12,54	3,93	3,66	0,02
	Été	11,01	23,6	406,2	0,38	7,01	3,84	3,07	0,02
	Automne	2,66	3,8	5,5	0,06	0,72	0,08	0,13	0,04
	ANNUELLE	6,48	22,8	186,2	0,29	9,35	2,99	2,79	0,02
Lisier de porcs	Hiver	8,80	24,4	149,0	0,23	8,73	3,12	4,21	0,02
	Printemps	8,62	24,3	149,5	0,35	11,71	3,05	3,72	0,02
	Été	28,00	44,1	137,3	0,54	5,10	1,61	1,86	0,03
	Automne	3,65	5,7	6,0	0,10	1,23	0,09	0,19	0,04
	ANNUELLE	9,04	23,1	131,6	0,31	9,51	2,64	3,30	0,02

En ce qui concerne les charges en ÉTM totaux perdus aux drains, elles sont également plus faibles avec la fumure minérale qu'avec les engrais de ferme pour la plupart des éléments (Tableau 4.9). Elles ont varié de 4,44 à 32,97 g/ha pour le nickel, de 1,71 à 7,79 g/ha pour le plomb, de 0,89 à 8,86 g/ha pour le cobalt, de 3,43 à 24,81 g/ha pour le chrome, de 0,31 à 0,86 g/ha pour le cadmium, de 98,07 à 340 g/ha pour le zinc, de 31,44 à 61,02 g/ha pour le manganèse et de 4,78 à 20,45 g/ha pour le cuivre.

**Tableau 4.9 - Charge des éléments totaux perdus dans l'eau des drains souterrains de la prairie**

	Année 2002	Volume eaux (cm/ha)	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)	Ni (g/ha)
Fumure minérale	Hiver	1,77	0,36	4,9	12,3	0,04	0,36	0,08	0,14	0,37
	Printemps	12,11	3,21	11,7	53,6	0,22	2,20	0,54	0,44	2,84
	Été	1,20	0,69	13,9	29,2	0,03	0,77	0,25	1,12	1,02
	Automne	2,89	0,51	0,9	2,9	0,02	0,10	0,02	0,01	0,21
	TOTALE	17,97	4,78	31,4	98,1	0,31	3,43	0,89	1,71	4,44
Fumier de bovins laitiers	Hiver	1,47	0,46	2,4	8,6	0,02	0,45	0,10	0,14	0,48
	Printemps	12,48	17,28	51,4	147,7	0,75	22,63	8,43	7,11	30,39
	Été	1,43	1,12	3,8	17,6	0,05	1,06	0,29	0,44	1,35
	Automne	4,88	1,59	3,4	2,8	0,03	0,67	0,04	0,10	0,75
	TOTALE	20,26	20,45	61,0	176,8	0,86	24,81	8,86	7,79	32,97
Fumier de poulets	Hiver	2,28	0,25	3,1	3,4	0,03	0,26	0,04	0,09	0,23
	Printemps	12,69	9,82	35,2	292,2	0,44	15,91	4,99	4,65	18,42
	Été	1,07	1,18	2,5	43,4	0,04	0,75	0,41	0,33	1,11
	Automne	2,24	0,60	0,9	1,2	0,01	0,16	0,02	0,03	0,25
	TOTALE	18,27	11,84	41,6	340,3	0,53	17,08	5,46	5,09	20,00
Lisier de porcs	Hiver	3,84	3,38	9,4	57,2	0,09	3,35	1,20	1,62	4,73
	Printemps	11,72	10,10	28,5	175,2	0,41	13,72	3,57	4,36	16,16
	Été	0,94	2,63	4,2	12,9	0,05	0,48	0,15	0,17	0,73
	Automne	2,24	0,82	1,3	1,3	0,02	0,28	0,02	0,04	0,41
	TOTALE	18,74	16,93	43,3	246,7	0,58	17,83	4,94	6,19	22,04

Les concentrations et les charges en ÉTM solubles sont présentées aux tableaux 4.11 et 4.12. Les résultats comparatifs entre les charges en ÉTM totaux et solubles nous indiquent que les formes particulières représentent la principale source de pertes de ÉTM aux drains pour tous les éléments. Il apparaît aussi que l'apport d'engrais de ferme accroît les pertes aux drains des ÉTM solubles comparativement aux engrais minéraux, pour plusieurs éléments (Tableau 4.11).

**Tableau 4.10 - Concentrations moyennes pondérées des éléments solubles dans l'eau des drains souterrains de la prairie**

	Année 2002	Cu (µg/L)	Mn (µg/L)	Zn (µg/L)	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Co (µg/L)	Pb (µg/L)	Ni (µg/L)
Fumure minérale	Hiver	2,35	0,08	1,74	0,01	0,09	0,01	0,00	0,28
	Printemps	1,37	0,46	1,87	0,04	0,19	0,09	0,00	0,07
	Été	2,33	0,31	3,11	0,13	0,18	0,00	0,00	0,39
	Automne	1,76	0,93	1,88	0,04	0,11	0,09	0,00	0,15
	ANNUELLE	1,58	0,51	1,93	0,04	0,17	0,08	0,00	0,12
Fumier de bovins laitiers	Hiver	2,37	0,05	1,89	0,02	0,77	0,01	0,00	0,01
	Printemps	2,09	0,61	2,76	0,03	0,58	0,03	0,00	0,36
	Été	4,01	0,43	5,05	0,07	0,50	0,00	0,00	0,33
	Automne	3,31	2,84	2,33	0,03	0,67	0,10	0,01	0,73
	ANNUELLE	2,53	1,15	2,70	0,03	0,61	0,05	0,00	0,43
Fumier de poulets	Hiver	2,27	0,07	2,49	0,03	0,03	0,04	0,00	0,00
	Printemps	2,09	0,34	2,36	0,03	0,22	0,02	0,00	0,26
	Été	3,79	0,28	3,71	0,07	0,41	0,00	0,00	0,87
	Automne	3,15	2,56	2,42	0,04	0,54	0,15	0,20	0,84
	ANNUELLE	2,36	0,59	2,47	0,03	0,25	0,04	0,03	0,34
Lisier de porcs	Hiver	2,76	0,26	0,97	0,04	0,14	0,03	0,00	0,72
	Printemps	2,14	0,47	2,15	0,06	0,50	0,02	0,00	0,24
	Été	3,06	0,35	4,99	0,06	0,53	0,02	0,00	0,52
	Automne	3,51	3,56	3,10	0,02	0,60	0,16	0,00	0,39
	ANNUELLE	2,48	0,81	2,17	0,05	0,44	0,04	0,00	0,37

**Tableau 4.11 - Charge des éléments solubles perdus dans l'eau des drains souterrains de la prairie**

	Année 2002	Volume eaux (cm/ha)	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)	Ni (g/ha)
Fumure minérale	Hiver	1,60	0,38	0,01	0,28	0,00	0,02	0,00	0,00	0,05
	Printemps	12,09	1,66	0,56	2,26	0,05	0,23	0,11	0,00	0,08
	Été	0,99	0,23	0,03	0,31	0,01	0,02	0,00	0,00	0,04
	Automne	3,29	0,58	0,31	0,62	0,01	0,04	0,03	0,00	0,05
	TOTALE	17,97	2,84	0,91	3,46	0,07	0,30	0,15	0,00	0,21
Fumier de bovins laitiers	Hiver	1,38	0,33	0,01	0,26	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00
	Printemps	12,51	2,62	0,76	3,45	0,03	0,72	0,04	0,00	0,45
	Été	0,99	0,40	0,04	0,50	0,01	0,05	0,00	0,00	0,03
	Automne	5,38	1,78	1,53	1,25	0,01	0,36	0,06	0,00	0,40
	TOTALE	20,26	5,12	2,33	5,46	0,06	1,24	0,10	0,00	0,88
Fumier de poules	Hiver	2,09	0,47	0,01	0,52	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
	Printemps	12,75	2,66	0,44	3,01	0,04	0,28	0,03	0,00	0,33
	Été	1,23	0,47	0,03	0,46	0,01	0,05	0,00	0,00	0,11
	Automne	2,32	0,73	0,59	0,56	0,01	0,13	0,04	0,05	0,20
	TOTALE	18,39	4,34	1,08	4,55	0,06	0,47	0,07	0,05	0,63
Lisier de porcs	Hiver	3,75	1,03	0,10	0,36	0,01	0,05	0,01	0,00	0,27
	Printemps	11,75	2,51	0,55	2,53	0,06	0,59	0,02	0,00	0,28
	Été	0,91	0,28	0,03	0,45	0,01	0,05	0,00	0,00	0,05
	Automne	2,34	0,82	0,83	0,73	0,00	0,14	0,04	0,00	0,09
	TOTALE	18,74	4,64	1,52	4,07	0,09	0,83	0,07	0,00	0,69

### *Mais-grain*

Les tableaux 4.13 et 4.14 présentent les concentrations moyennes pondérées et les charges de ÉTM totaux perdus aux drains pour chaque saison et pour toute l'année dans le champ de maïs-grain. Le printemps a été la principale saison pour les pertes de ÉTM aux drains à cause des volumes d'eau plus importants évacués à cette période. Les charges annuelles des ÉTM totaux perdus aux drains agricoles en 2002 ont varié selon les modes de fertilisation de 90 à 187 g/ha pour le nickel, de 24 à 48 g/ha pour le plomb, de 27 à 58 g/ha pour le cobalt, de 62 à 130 g/ha pour le chrome, de 1,4 à 2,5 g/ha pour le cadmium, de 156 à 305 g/ha pour le zinc, de 1050 à 2938 g/ha pour le manganèse et de 51 à 106 g/ha pour le cuivre. La parcelle fertilisée au fumier de bovins a perdu plus de ÉTM que les autres.

**Tableau 4.12 - Concentrations moyennes pondérées des éléments totaux dans l'eau des drains souterrains du champ de maïs-grain**

	Année 2002	Cu (µg/L)	Mn (µg/L)	Zn (µg/L)	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Co (µg/L)	Pb (µg/L)	Ni (µg/L)
Fumier de bovins	Hiver	4,9	85	16	0,19	2,8	1,16	1,33	4,7
	Printemps	49,5	1282	145	1,17	62,4	27,86	23,57	88,1
	Été	81,5	1486	222	1,41	94,5	34,57	31,34	137,9
	Automne	15,0	1070	44	0,64	16,6	9,94	5,63	28,6
	ANNUELLE	44,6	1240	129	1,07	55,0	24,45	20,30	79,1
Lisier de porcs	Hiver	11,3	33	14	0,06	1,3	0,40	0,28	1,9
	Printemps	24,1	469	79	0,58	29,9	11,70	11,20	40,3
	Été	59,0	1084	217	1,54	82,9	32,09	34,02	105,7
	Automne	9,7	174	35	0,39	11,5	4,95	4,19	16,5
	ANNUELLE	23,6	449	79	0,60	29,5	11,60	11,23	39,6
Fumure minérale	Hiver	8,2	447	32	0,23	8,2	3,82	3,20	11,9
	Printemps	18,5	1265	55	0,59	22,7	10,60	8,90	33,4
	Été	60,5	1191	194	1,12	74,7	28,40	27,92	99,6
	Automne	6,4	134	21	0,30	5,4	2,77	1,86	9,3
	ANNUELLE	19,0	1090	58	0,57	23,0	10,39	8,90	33,4

**Tableau 4.13 - Charge des éléments totaux perdus dans l'eau des drains souterrains du champ de maïs-grain**

	Année 2002	Volume eaux (cm/ha)	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)	Ni (g/ha)
Fumier de bovins	Hiver	0,32	0,16	3	0,49	0,01	0,1	0,0	0,0	0,1
	Printemps	16,73	82,8	2144	241,9	1,95	104,3	46,6	39,4	147,5
	Été	1,90	15,5	283	42,3	0,27	18,0	6,6	6,0	26,3
	Automne	4,76	7,2	509	20,7	0,31	7,9	4,7	2,7	13,6
	TOTALE	23,70	105,6	2938	305,4	2,53	130	58	48	187
Lisier de porcs	Hiver	0,63	0,71	2	0,87	0,00	0,1	0,0	0,0	0,1
	Printemps	17,58	42,3	825	138,2	1,02	52,5	20,6	19,7	70,7
	Été	1,46	8,6	158	31,7	0,23	12,1	4,7	5,0	15,4
	Automne	3,68	3,6	64	12,9	0,14	4,2	1,8	1,5	6,1
	TOTALE	23,35	55,2	1050	183,7	1,39	69	27	26	92
Fumure minérale	Hiver	0,90	0,74	40	2,9	0,02	0,7	0,3	0,3	1,1
	Printemps	21,09	39,1	2668	116,0	1,24	47,9	22,4	18,8	70,3
	Été	1,53	9,3	182	29,7	0,17	11,4	4,3	4,3	15,2
	Automne	3,41	2,2	46	7,2	0,10	1,8	0,9	0,6	3,2
	TOTALE	26,93	51,3	2937	155,8	1,54	62	28	24	90

Les tableaux 4.15 et 4.16 présentent les concentrations moyennes pondérées et les charges de ÉTM solubles perdus dans les drains dans le champ de maïs-grain. Pour tous les ÉTM, la concentration des éléments solubles est très inférieure aux concentrations en éléments totaux. Ceci nous indique que les ÉTM sont perdus aux drains principalement sous formes particulaires. Ce phénomène a également été observé dans ces parcelles pour le phosphore. Les formes solubles représentent une faible partie des pertes des ÉTM aux drains. Elles sont peu affectées par les modes de fertilisation. Elles varient selon les traitements de 2,72 à 3,75 g/ha pour le nickel, de 0,00 à 0,01 g/ha pour le plomb, de 0,03 à 0,18 g/ha pour le cobalt, de 0,02 à 0,17 g/ha pour le chrome, de 0,66 à 0,74 g/ha pour le cadmium, de 6,48 à 8,88 g/ha pour le zinc, de 1,60 à 2,86 g/ha pour le manganèse et de 5,18 à 5,90 g/ha pour le cuivre.

**Tableau 4.14 - Concentrations moyennes pondérées des éléments solubles dans l'eau des drains souterrains du champ de maïs-grain**

	Année 2002	Cu (µg/L)	Mn (µg/L)	Zn (µg/L)	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Co (µg/L)	Pb (µg/L)	Ni (µg/L)
Fumier de bovins	Hiver	2,07	0,25	1,49	0,34	0,030	0,07	0,002	0,62
	Printemps	2,36	1,21	2,06	0,28	0,003	0,05	0,000	1,72
	Été	2,05	0,54	5,20	0,32	0,001	0,00	0,000	2,07
	Automne	1,64	0,76	4,18	0,42	0,026	0,18	0,004	0,96
	ANNUELLE	2,18	1,05	2,73	0,31	0,007	0,07	0,001	1,58
Lisier de porc	Hiver	5,76	0,66	5,64	0,21	0,000	0,00	0,000	0,54
	Printemps	2,34	0,77	2,74	0,34	0,023	0,00	0,000	1,35
	Été	2,58	0,43	8,43	0,19	0,000	0,02	0,000	1,01
	Automne	2,85	0,39	6,73	0,27	0,005	0,06	0,002	0,51
	ANNUELLE	2,53	0,69	3,80	0,32	0,018	0,01	0,000	1,17
Fumure minérale	Hiver	1,97	0,36	3,09	0,21	0,000	0,02	0,090	0,62
	Printemps	1,88	1,13	2,59	0,25	0,077	0,00	0,000	1,08
	Été	3,21	0,36	6,48	0,21	0,008	0,02	0,000	1,24
	Automne	2,46	1,13	4,96	0,22	0,020	0,07	0,004	0,59
	ANNUELLE	2,03	1,06	3,13	0,25	0,064	0,01	0,003	1,01



**Tableau 4.15 - Charges des éléments solubles perdus dans l'eau des drains souterrains du champ de maïs-grain**

	Année 2002	Volume eaux (cm/ha)	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)	Ni (g/ha)
Fumier de bovins	Hiver	0,32	0,07	0,01	0,05	0,01	0,00	0,00	0,02
	Printemps	16,73	3,94	2,03	3,45	0,47	0,00	0,09	2,88
	Été	1,90	0,39	0,10	0,99	0,06	0,00	0,00	0,39
	Automne	4,76	0,78	0,36	1,99	0,20	0,01	0,09	0,46
	TOTALE	23,70	5,18	2,50	6,48	0,74	0,02	0,18	3,75
Lisier de porcs	Hiver	0,63	0,36	0,04	0,36	0,01	0,00	0,00	0,03
	Printemps	17,58	4,11	1,35	4,82	0,60	0,04	0,00	2,36
	Été	1,46	0,38	0,06	1,23	0,03	0,00	0,00	0,15
	Automne	3,68	1,05	0,14	2,48	0,10	0,00	0,02	0,19
	TOTALE	23,35	5,90	1,60	8,88	0,74	0,04	0,02	2,73
Fumure minérale	Hiver	0,90	0,18	0,03	0,28	0,02	0,00	0,01	0,06
	Printemps	21,09	3,97	2,39	5,47	0,53	0,16	0,00	2,28
	Été	1,53	0,49	0,05	0,99	0,03	0,00	0,00	0,19
	Automne	3,41	0,84	0,39	1,69	0,08	0,01	0,02	0,20
	TOTALE	26,93	5,47	2,86	8,43	0,66	0,17	0,03	2,72

#### 4.5 - Concentrations et charges en ÉTM des eaux de ruissellement

Dans les eaux de ruissellement, nous avons établi les concentrations en ÉTM des eaux de ruissellement pour chacun des événements allant de la fonte des neiges, débutant le 15 mars, au gel du sol vers le 15 novembre 2002. Un échantillon d'eau proportionnel aux volumes des eaux ruisselées est recueilli pour chacun des événements survenus pendant cette période. Nous avons établi la concentration moyenne en ÉTM totaux et solubles des eaux de ruissellement correspondant à chacun des événements. Ces concentrations nous ont permis d'établir la concentration moyenne pondérée des eaux de ruissellement. La charge totale perdue est calculée en multipliant la concentration moyenne pondérée par l'épaisseur de la lame de ruissellement. Comme en 2002, on était à mettre au point un système de mesure du volume des eaux de ruissellement qui a plus ou moins bien fonctionné, il n'est pas possible d'avoir une valeur précise des volumes ruisselés dans nos parcelles. Comme d'autres équipes de recherche de l'IRDA ont procédé à des mesures de ruissellement sur le même sol au même site, il est possible de fixer un ordre de grandeur acceptable pour l'épaisseur de la lame de ruissellement. Une épaisseur de 4 cm est retenue pour établir les volumes de ruissellement dans la prairie et de 6 cm pour le champ de maïs-grain pour la période allant du 15 mars au 15 novembre 2002. Les volumes ont été produits par 4 jours de fonte rapide des neiges, deux événements estivaux de précipitation intense et un événement automnal de précipitation continue. L'automne particulièrement sec en 2002 a produit un ruissellement sans doute inférieur à la normale. L'arrêt des mesures a eu lieu le 15 novembre à cause du gel qui rend inopérants les systèmes de mesure des débits et d'échantillonnage des eaux.

##### *Prairie*

Le tableau 4.16 présente les concentrations moyennes pondérées en ÉTM totaux des eaux ruisselées selon les différents modes de fertilisation dans la prairie. Les eaux de ruissellement sont relativement peu chargées de sédiments et les concentrations en ÉTM sont beaucoup plus faibles dans la prairie que dans le champ de maïs-grain. Elles sont plus faibles dans la parcelle avec la fumure minérale. La présence d'engrais de ferme semble donc de nature à accroître les pertes de ÉTM dans les eaux de ruissellement. Le tableau 4.17 présente les charges de ÉTM perdus dans les eaux de ruissellement dans la prairie. Elles ont varié de 1,8 à 4,4 g/ha pour le nickel, de 1,02 à 2,07 g/ha pour le plomb, de 0,39 à 1,05 g/ha pour le cobalt, de 1,00 à 2,82 g/ha pour le chrome, de 0,02 à 0,09 g/ha pour le cadmium, de 7,2 à 32,8 g/ha pour le zinc, de 15,2 à 39,6 g/ha pour le manganèse et de 2,16 à 21,25 g/ha pour le cuivre. La parcelle fertilisée au lisier de porcs a produit des charges plus élevées en

cuire, en zinc et en manganèse dans les eaux de ruissellement que les autres traitements. Ces éléments se retrouvent en grande quantité dans le lisier, ce qui pourrait expliquer ces résultats.

**Tableau 4.16 - Concentration moyenne pondérée des éléments totaux ruisselés dans la prairie**

Traitements	Cu (µg/l)	Mn (µg/l)	Zn (µg/l)	Cd (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Pb (µg/l)	Ni (µg/l)
Fumure minérale	5,40	39	18	0,05	3,27	0,98	2,54	4,51
Fumier de bovins laitiers	9,21	59	55	0,21	6,17	2,03	3,74	9,68
Fumier de poulets	5,89	38	20	0,12	2,49	1,14	5,18	4,53
Lisier de porcs	53,1	99	82	0,19	7,05	2,63	4,59	11,04

**Tableau 4.17 - Charge des éléments totaux ruisselés dans la prairie**

Traitements	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)	Ni (g/ha)
Fumure minérale	2,16	15,6	7,2	0,02	1,31	0,39	1,02	1,80
Fumier de bovins laitiers	3,68	23,6	22,0	0,09	2,47	0,81	1,49	3,87
Fumier de poulets	2,36	15,2	8,1	0,05	1,00	0,46	2,07	1,81
Lisier de porcs	21,3	39,6	32,8	0,07	2,82	1,05	1,83	4,42

De la même manière, nous avons établi les concentrations moyennes pondérées et les charges en ÉTM solubles des eaux de ruissellement (Tableaux 4.19 et 4.20). Les charges en ÉTM solubles ont varié de 0,42 à 0,92 g/ha pour le nickel, de 0,03 à 0,46 g/ha pour le plomb, de 0 à 0,07g/ha pour le cobalt, de 0,15 à 0,51 g/ha pour le chrome, de 0,04 à 0,10 g/ha pour le cadmium, de 2,41 à 23,4 g/ha pour le zinc, de 0,82 à 5,50 g/ha pour le manganèse et de 1,30 à 2,82 g/ha pour le cuivre. La couverture végétale des prairies agit comme un filtre sur les eaux de ruissellement de sorte qu'elles sont peu chargées de matière en suspension. Les ÉTM particuliers sont peu présents dans les eaux de ruissellement des prairies. Ceci peut expliquer la quantité relativement faible des ÉTM perdus et la proportion relativement élevée des ÉTM solubles par rapport aux ÉTM totaux dans les eaux de ruissellement sous prairies. Les prairies perdent peu de ÉTM totaux mais elles les perdent sous des formes relativement solubles.

**Tableau 4.18 - Concentration moyenne pondérée des éléments solubles ruisselés dans la prairie**

Traitements	Cu (µg/l)	Mn (µg/l)	Zn (µg/l)	Cd (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Pb (µg/l)	Ni (µg/l)
Fumure minérale	3,26	2,06	6,02	0,19	0,37	0,00	0,34	1,04
Fumier de bovins laitiers	4,20	6,20	58,47	0,26	1,28	0,02	1,16	2,29
Fumier de poulets	4,21	2,40	6,93	0,11	0,40	0,00	0,26	1,28
Lisier de porcs	7,05	13,75	12,58	0,25	1,14	0,17	0,07	2,14

**Tableau 4.19 - Charge des éléments solubles ruisselés dans la prairie**

Traitements	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)	Ni (g/ha)
Fumure minérale	1,30	0,82	2,41	0,07	0,15	0,00	0,13	0,42
Fumier de bovins laitiers	1,68	2,48	23,39	0,10	0,51	0,01	0,46	0,92
Fumier de poulets	1,69	0,96	2,77	0,04	0,16	0,00	0,10	0,51
Lisier de porcs	2,82	5,50	5,03	0,10	0,46	0,07	0,03	0,86

## Mais-grain

Dans le champ de maïs-grain, deux parcelles seulement sont instrumentées pour recueillir les eaux de ruissellement. Il s'agit de la parcelle fertilisée avec la fumure minérale et celle avec le lisier de porcs. Le tableau 4.20 présente la concentration moyenne pondérée en ÉTM totaux des eaux de ruissellement du champ de maïs-grain. On remarque que les concentrations en ÉTM sont beaucoup plus élevées que celles de la prairie. Le maïs-grain, semé en rangs espacés de 75 cm, laisse à nu une grande superficie de sol pendant une bonne partie de la saison, ce qui rend cette culture vulnérable à l'érosion des sols.

**Tableau 4.20 - Concentration moyenne pondérée des éléments totaux ruisselés dans le maïs-grain**

Traitements	Cu (µg/l)	Mn (µg/l)	Zn (µg/l)	Cd (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Pb (µg/l)	Ni (µg/l)
Lisier de porcs	133	2141	494	3,2	169	63	71	104
Fumure minérale	97	2011	373	3,1	162	60	68	100

Le tableau 4.21 présente la quantité des ÉTM totaux perdus par hectare pour une lame de ruissellement à 6 cm. Les charges en ÉTM totaux ruisselés ont varié de 60 à 62 g/ha pour le nickel, de 41 à 42 g/ha pour le plomb, de 36 à 38 g/ha pour le cobalt, de 97 à 101 g/ha pour le chrome, de 1,8 à 1,9 g/ha pour le cadmium, de 224 à 297 g/ha pour le zinc, de 1207 à 1284 g/ha pour le manganèse et de 58 à 80 g/ha pour le cuivre. Ces pertes relativement importantes de ÉTM sont associées aux pertes de sols. La parcelle fertilisée avec la fumure minérale a fourni des pertes semblables à celle fertilisée avec du lisier de porcs pour tous les éléments sauf Cu, Mn et Zn pour lesquels les pertes sont plus élevées avec le lisier de porcs. Il semble que les modes de fertilisation puissent affecter les pertes de ces éléments. Le niveau des apports prolongés de lisier pourrait accroître les pertes de cuivre, de zinc et de manganèse en augmentant la teneur de ces métaux dans les sols. Ce phénomène concorde tout à fait avec ce qui a été observé pour le phosphore. Cet élément, fixé par le sol, se perd principalement par érosion des sols et le ruissellement de surface mais les apports d'engrais accroissent significativement les pertes. Les modèles utilisés pour prédire les pertes de phosphore pourraient donc être utiles pour estimer les risques de pertes des ÉTM.

**Tableau 4.21 - Charge des éléments totaux ruisselés dans le maïs-grain**

Traitements	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)	Ni (g/ha)
Lisier de porcs	80	1284	297	1,9	101	38	42	62
Fumure minérale	58	1207	224	1,8	97	36	41	60

Nous avons également établi les concentrations et les charges en ÉTM solubles (Tableaux 4.23 et 4.24). Les charges de ÉTM solubles perdus à l'hectare par ruissellement de surface dans le champ de maïs-grain ont varié de 1,8 à 1,9 g/ha pour le nickel, de 0,36 à 0,56 g/ha pour le plomb, de 0,22 à 0,24 g/ha pour le cobalt, de 0,68 à 1,30 g/ha pour chrome, de 0,12 à 0,16 g/ha pour le cadmium, de 3,4 à 15,1 g/ha pour le zinc, de 7 à 37 g/ha pour le manganèse et de 1,8 à 3,0 g/ha pour le cuivre. Elles sont supérieures pour le cuivre, le manganèse et le zinc dans la parcelle fertilisée avec le lisier de porcs. Soulignons que la fraction soluble est hautement disponible dans le milieu aquatique.

**Tableau 4.22 - Concentration moyenne pondérée des éléments solubles ruisselés dans le maïs-grain**

Traitements	Cu (µg/l)	Mn (µg/l)	Zn (µg/l)	Cd (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Pb (µg/l)	Ni (µg/l)
Lisier de porcs	5,1	61	25,2	0,27	1,1	0,36	0,60	2,9
Fumure minérale	2,9	12	5,7	0,19	2,2	0,40	0,94	3,2

**Tableau 4.23 - Charge des éléments solubles ruisselés dans le maïs-grain**

Traitements	Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)	Ni (g/ha)
Lisier de porcs	3,0	37	15,1	0,16	0,68	0,22	0,36	1,8
Fumure minérale	1,8	7	3,4	0,12	1,30	0,24	0,56	1,9

## 4.6 - Bilan des ÉTM

Sans prétendre avoir mesuré le bilan global des ÉTM, les données prises sur les ÉTM des engrais, des cultures, des eaux de drainage souterrain et de ruissellement représentent des postes importants du bilan des ÉTM dans les systèmes agricoles. Nous avons établi la différence entre les ÉTM totaux qui entrent dans les parcelles avec les fumures minérales et avec les engrais de ferme et ceux qui en sortent avec les récoltes, les eaux de drainage souterrain et de ruissellement dans une prairie et dans un champ de maïs-grain.

### *Prairie*

La prairie fertilisée avec la fumure minérale a montré un bilan déficitaire pour tous les ÉTM analysés (Tableau 4.24). Ceci signifie qu'il sort des champs plus de ÉTM qu'il en entre. La différence est particulièrement importante pour le zinc (-223,2 g/ha), pour le manganèse (-273 g/ha) et pour le cuivre (-80,1 g/ha). Ces éléments sont essentiels en petite quantité pour le développement des plantes et des déficiences sont rapportées occasionnellement sur les cultures au Québec. Les champs qui sont fertilisés uniquement avec des fumures minérales sont plus à risque de démontrer des carences en ces éléments si les sols n'en sont pas bien pourvus.

La parcelle fertilisée au fumier de bovins laitiers montre un bilan déficitaire ou près de l'équilibre pour plusieurs ÉTM (Ni, Pb, Co, Cr et Cd). Ces éléments ne présentent donc pas de problématique d'accumulation dans les sols. Le bilan est positif pour le zinc (+445,1 g/ha), pour le manganèse (+390,4 g/ha) et pour le cuivre (+72,9 g/ha). La situation est la même pour le fumier de poulets avec des bilans positifs pour le zinc de +165,7 g/ha, de +618,1 g/ha pour le manganèse et de +118,8 g/ha pour le cuivre. Il est à noter que ce bilan positif a été obtenu avec des doses d'épandage de seulement 3,4 t/ha alors qu'en pratique il s'applique souvent des doses de 15 t/ha et plus. Des cas d'enrichissement important en cuivre et en zinc des sols fertilisés à long terme avec du fumier de volailles sont rapportés dans la littérature (Kingery *et al.*, 1994). La parcelle fertilisée au lisier de porcs montre des bilans déficitaires ou près de l'équilibre pour tous les ÉTM à l'exception du zinc (+1781 g/ha), du manganèse (+826 g/ha) et du cuivre (+1291 g/ha). Le lisier de porcs utilisé provenait du fond d'une fosse et avait une teneur plus élevée que la moyenne en ces trois éléments. Ceci démontre que l'application de lisiers, du moins ceux riches en zinc, manganèse et cuivre, peut apporter aux sols des quantités très en excès des exportations de ces éléments, ce qui pourrait enrichir les sols et accroître la disponibilité des ÉTM dans les sols.

**Tableau 4.24 - Bilan des éléments apportés et perdus dans la prairie selon les modes de fertilisation**

		Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Ni (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)
Fumure minérale	Apport des engrais	0,85	37	7,2	1,3	0,39	9,07	0,33	0,08
	Exportation de la récolte	74	263	125	10,24	1,03	1,34	3,06	0,40
	Exportation des drains	4,78	31,4	98,1	4,44	0,31	3,43	0,89	1,71
	Exportation du ruissellement	2,16	16	7,3	1,80	0,02	1,31	0,39	1,02
	BILAN 2002	-80,1	-273	-223	-15,2	-0,97	2,99	-4,01	-3,05
Fumier de bovins laitiers	Apport des engrais	212	706	818	30	0,98	37	4,55	0,81
	Exportation de la récolte	115	231	174	6,39	0,34	1,79	5,88	1,24
	Exportation des drains	20,45	61,0	176,8	32,97	0,86	24,81	8,86	7,79
	Exportation du ruissellement	3,68	24	22,1	3,87	0,09	2,47	0,81	1,49
	BILAN 2002	72,9	390	445	-13,2	-0,31	7,93	-11,0	-9,71
Fumier de poulets	Apport des engrais	252	934	733	26	1,08	25	6,03	1,26
	Exportation de la récolte	119	259	219	6,00	0,56	1,80	9,25	0,86
	Exportation des drains	11,84	41,6	340	20	0,53	17,08	5,46	5,09
	Exportation du ruissellement	2,36	15	8,1	1,81	0,05	1,00	0,46	2,07
	BILAN 2002	119	618	166	-1,8	-0,06	5,12	-9,14	-6,76
Lisier de porcs	Apport des engrais	1451	1180	2285	40	1,54	22	5,38	0
	Exportation de la récolte	121	271	224	8,82	0,59	1,63	6,23	0,41
	Exportation des drains	16,93	43,3	246,7	22,04	0,58	17,83	4,94	6,19
	Exportation du ruissellement	21,25	40	32,8	4,42	0,07	2,82	1,05	1,83
	BILAN 2002	1292	826	1781	4,7	0,30	-0,28	-6,84	-8,43

### *Mais-grain*

Comme pour la prairie, le champ de maïs-grain fertilisé avec la fumure minérale a montré un bilan déficitaire pour tous les ÉTM analysés (Tableau 4.25). Pour les oligo-éléments requis par les plantes, les bilans sont de -438 g/ha pour le zinc, de -4097 g/ha pour le manganèse et de -127 g/ha pour le cuivre. La fumure minérale est donc de nature à fournir un bilan déficitaire des oligo-éléments obligeant à un suivi analytique des sols et à des apports éventuels d'éléments mineurs aux cultures.

Dans le cas de la parcelle fertilisée au lisier de porcs, les bilans des ÉTM sont déficitaires à l'exception du zinc (+2954 g/ha) et du cuivre (+2136 g/ha) (Tableau 4.25). Le bilan fortement positif du zinc et du cuivre pourrait potentiellement créer un accroissement de la teneur totale et mobilisable de ces éléments dans les sols, suite à des applications répétées à long terme.

La parcelle fertilisée au fumier de bovins laitiers montre également un bilan positif pour le cuivre (+ 431 g/ha) et le zinc (+1169 g/ha) mais le bilan des autres ÉTM est déficitaire. Le cuivre et le zinc sont donc les deux seuls éléments à présenter un bilan fortement positif avec les engrais de ferme. Le cas du manganèse est particulier. Les apports de cet élément par les engrais de ferme sont importants mais les pertes aux drains et dans les eaux de ruissellement sont encore plus élevées, de sorte que le bilan de cet élément est déficitaire.

**Tableau 4.25 - Bilan des éléments apportés et perdus dans le champ de maïs-grain selon les modes de fertilisation**

		Cu (g/ha)	Mn (g/ha)	Zn (g/ha)	Ni (g/ha)	Cd (g/ha)	Cr (g/ha)	Co (g/ha)	Pb (g/ha)
Fumier de bovins laitiers	Apport des engrais	557	1607	1574	70	2,08	82	24,05	0,05
	Exportation de la récolte	20	27	100	1,70	0,00	0,80	0,50	0,60
	Exportation des drains	105,6	2938	305	187	2,53	130	58	48
	Exportation du ruissellement *	--	--	--	--	--	--	--	--
	BILAN 2002	431	-1358	1169	-119	-0,45	-49	-35	-49
Lisier de porcs	Apport des engrais	2295	1848	3548	56	2,75	36	8,39	0,05
	Exportation de la récolte	24	26	113	1,90	0,00	0,70	0,60	0,30
	Exportation des drains	55	1050	184	92	1,39	69	27	26
	Exportation du ruissellement	80,0	1284	297	62	1,9	101	38	42
	BILAN 2002	2136	-512	2954	-100	-0,56	-135	-57	-69
Fumure minérale	Apport des engrais	3,69	67	13,2	2,35	0,7	16,3	0,6	0,22
	Exportation de la récolte	21	21	71	1,60	0,00	0,60	0,40	0,30
	Exportation des drains	51,3	2937	156	90	1,54	62	28	24
	Exportation du ruissellement	58	1206	224	60	1,8	97	36	41
	BILAN 2002	-127	-4097	-438	-149	-2,64	-143	-64	-65

\* : Parcelle non instrumentée pour le captage des eaux de ruissellement.

## 4.7 - Analyse des ÉTM des sols

### Prairie

Afin de mesurer l'effet à long terme des applications d'engrais minéraux et des engrais de ferme dans les sols, nous avons analysé la teneur en ÉTM totaux et Mehlich-3 jusqu'à 80 cm. Ces parcelles sont en place depuis 10 ans et ont été fertilisées annuellement de la même façon. Le bilan annuel et la composition en ÉTM des engrais ne sont cependant connus que pour 2002. Rappelons que le bilan des ÉTM dans la prairie pour Zn, Cu et Mn est positif avec les engrais de ferme et déficitaire avec la fumure minérale. On devrait donc noter des différences dans les analyses de sol après 10 ans selon les modes de fertilisation.

La teneur en ÉTM totaux est sensiblement la même pour tous les ÉTM, peu importe le mode de fertilisation (Tableau 4.26). Elle est plus élevée en profondeur, sans lien avec la fertilisation. L'analyse des ÉTM totaux ne permet pas de conclure que les bilans positifs de Zn, Cu et Mn, des parcelles fertilisées avec les engrais organiques, ont modifié de façon appréciable la teneur totale en ces éléments dans les sols. Cette méthode se montre peu sensible au suivi de l'évolution des ÉTM des sols agricoles. Les ÉTM apportés sont fortement dilués dans la couche arable des sols représentant environ 2,5 millions kg/ha, de sorte que les concentrations varient peu à moyen terme.

Les teneurs en cuivre, zinc manganèse et cobalt des sols mesurées par la méthode Mehlich-3 dans la couche arable (0-20 cm) sont par contre différentes entre les traitements avec la fumure minérale ceux avec les engrais de ferme (Tableau 4.27). Pour la fumure minérale et le lisier de porcs, elles sont respectivement de 0,77 et 1,98 mg/kg pour le zinc, de 1,02 et 2,17 mg/kg pour le cuivre, de 22,8 et 34,4 mg/kg pour le manganèse et de 0,37 et 0,74 mg/kg pour le cobalt. Les autres ÉTM montrent moins de différence selon les modes de fertilisation. Plus en profondeur, les teneurs en ÉTM pour une même couche de sol sont comparables entre les traitements. La méthode Mehlich-3 est donc plus sensible pour le suivi des ÉTM dans les sols que l'analyse des ÉTM totaux. Elle met en évidence une fraction dite labile ou mobilisable. Dix années d'apports de lisiers ont peu affecté les teneurs totales en cuivre, zinc et manganèse mais ont affecté la fraction mobilisable. Le tableau 4.27 démontre que les différences en cuivre et en zinc Mehlich-3 de la couche arable, mesurées entre les engrais minéraux et le lisier de porcs, constituent un accroissement relativement important si on se rapporte aux critères des teneurs de ces

deux éléments établis dans les sols du Québec (Tableau 4.31). D'un niveau initialement plutôt pauvre en Cu et Zn Mehlich-3, les apports de lisier des dix années ont amené ce sol à un niveau riche.

**Tableau 4.26 - Teneur en ÉTM totaux des sols selon les modes de fertilisation de la prairie après 10 ans d'application d'engrais**

	Prof. (cm)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Fumure minérale	0-20	15,2	420	56	30	0,557	27	12	13
	20-40	24,1	476	61	36	0,577	29	15	14
	40-60	23,3	499	67	44	0,605	32	15	13
	60-80	29,0	515	68	43	0,591	31	15	13
Fumier de bovins	0-20	14,1	363	57	26	0,560	25	10	13
	20-40	19,6	477	61	38	0,581	29	14	13
	40-60	25,2	510	65	45	0,606	31	15	13
	60-80	29,2	545	69	47	0,600	33	16	13
Fumier de poulets	0-20	14,7	360	60	28	0,562	26	11	13
	20-40	17,6	456	60	35	0,604	29	14	13
	40-60	20,9	514	63	42	0,621	31	15	13
	60-80	23,8	521	68	47	0,627	33	15	13
Lisier de porcs	0-20	19,1	406	60	34	0,610	27	12	11
	20-40	20,5	463	60	39	0,651	30	13	12
	40-60	26,4	619	66	47	0,666	41	18	11
	60-80	22,3	523	66	42	0,695	33	15	13

**Tableau 4.27 - Teneur en ÉTM des sols extraits avec Mehlich-3 selon les modes de fertilisation de la prairie après 10 ans d'application d'engrais**

	Prof. (cm)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Fumure minérale	0-20	1,020	22,8	0,773	0,424	0,035	0,264	0,373	1,872
	20-40	0,941	44,2	0,815	0,667	0,027	0,310	0,573	1,936
	40-60	0,981	50,2	1,054	1,284	0,014	0,365	1,226	1,933
	60-80	0,884	52,2	1,221	1,468	0,012	0,378	1,201	1,861
Fumier de bovins	0-20	1,131	16,5	1,437	0,389	0,039	0,223	0,302	1,851
	20-40	0,849	30,4	0,923	0,673	0,021	0,274	0,698	1,796
	40-60	0,784	47,9	1,033	1,186	0,011	0,342	1,235	1,751
	60-80	0,827	47,5	1,133	1,279	0,009	0,358	1,171	1,837
Fumier de poulets	0-20	1,363	21,1	2,095	0,433	0,045	0,228	0,383	2,141
	20-40	0,919	30,8	0,934	0,535	0,025	0,276	0,791	1,892
	40-60	0,983	51,9	0,972	1,123	0,019	0,317	1,324	1,911
	60-80	1,119	61,8	1,117	1,756	0,020	0,352	1,348	2,193
Lisier de porcs	0-20	2,174	34,4	1,980	0,689	0,039	0,248	0,742	2,124
	20-40	1,654	44,9	1,025	0,468	0,026	0,322	0,982	1,999
	40-60	0,894	47,8	1,054	1,501	0,011	0,324	1,152	1,954
	60-80	0,899	44,3	1,101	1,139	0,009	0,374	1,061	2,004

### *Mais-grain*

Dans le champ de maïs-grain fertilisé selon une fumure minérale, du lisier de porcs et du fumier de bovins pendant 10 ans, les teneurs en ÉTM sont assez semblables selon les modes de fertilisation pour une même couche de sol (Tableau 4.28). Les bilans du zinc, du cuivre et du manganèse sont pourtant fortement positifs avec les engrais de ferme. L'analyse des ÉTM totaux montre cependant peu de différence entre les traitements. Cette méthode est peu sensible pour un suivi à long terme des ÉTM apportés dans les sols agricoles.

La méthode Mehlich-3 montre davantage de différences entre les teneurs en ÉTM dans la couche arable selon les modes de fertilisation (Tableau 4.29). Les teneurs Mehlich-3 de la couche arable, pour la fumure minérale et le lisier de porcs, sont respectivement de 0,88 et 2,88 mg/kg pour le zinc, de 1,64 et 2,70 mg/kg pour le cuivre et de 32 et 50 mg/kg pour le manganèse. Les autres ÉTM montrent moins de différences selon les modes de fertilisation. Plus en profondeur, les différences entre les modes de fertilisation sont moindres. C'est donc principalement dans la couche arable des sols que doit s'effectuer le suivi des ÉTM. La méthode Mehlich-3 a la sensibilité voulue pour révéler les différences selon les modes de fertilisation. Les apports de cuivre et de zinc avec le lisier de porcs ont été suffisants pour affecter de façon appréciable la classification de Cu et Zn Mehlich-3 dans la couche arable des sols (Tableau 4.30). Les teneurs des sols en Cu et Zn Mehlich-3 du champ de maïs-grain se sont accrues d'un niveau initialement plutôt pauvre à un niveau riche après 10 années d'application de lisier. Les résultats indiquent également que les apports d'engrais de ferme riches en cuivre et en zinc accroissent proportionnellement plus rapidement la fraction labile de ces éléments dans les sols que leur teneur totale. À très long terme, il y a lieu de s'inquiéter de ce phénomène car il pourrait provoquer une mobilité excessive de ces éléments dans les sols.

**Tableau 4.28 - Teneur en ÉTM totaux des sols selon les modes de fertilisation du champ de maïs-grain après 10 ans d'application d'engrais**

	Prof. (cm)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Fumier de bovins	0-20	14,09	363	54,51	24,54	0,67	24,95	9,77	13,47
	20-40	19,74	488	59,13	36,32	0,69	29,83	15,85	12,95
	40-60	26,54	624	71,67	54,36	0,79	35,34	18,55	13,03
	60-80	25,89	584	73,45	51,69	0,76	34,87	17,30	12,75
Lisier de porcs	0-20	15,40	402	58,20	28,00	0,62	23,64	10,79	12,53
	20-40	13,39	408	51,11	29,61	0,59	24,59	11,33	11,61
	40-60	16,12	495	59,35	36,41	0,62	27,63	13,40	12
	60-80	22,34	549	69,32	45,38	0,69	32,47	15,24	12,42
Fumure minérale	0-20	15,97	344	47,01	26,73	0,52	22,81	9,56	11,80
	20-40	18,00	478	54,26	37,37	0,61	28,09	13,34	11,50
	40-60	23,79	514	63,45	47,74	0,67	33,04	14,76	12,66
	60-80	22,70	602	67,09	47,01	0,77	32,62	15,79	12,53

**Tableau 4.29 - Teneur en ÉTM des sols extraits avec Mehlich-3 selon les modes de fertilisation du champ de maïs-grain après 10 ans d'application d'engrais**

	Prof. (cm)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Fumier de bovins	0-20	1,88	11,6	1,72	0,48	0,05	0,22	0,20	2,16
	20-40	1,51	23,0	0,87	0,49	0,02	0,27	0,63	2,02
	40-60	0,83	35,4	0,96	0,91	0,01	0,32	0,78	1,66
	60-80	0,82	34,7	1,08	0,98	0,01	0,38	0,78	1,83
Lisier de porcs	0-20	2,70	50	2,88	1,04	0,05	0,27	0,69	2,76
	20-40	1,36	46	0,97	0,94	0,03	0,30	0,74	2,24
	40-60	1,63	83	1,28	1,63	0,03	0,38	1,24	2
	60-80	1,30	90	1,36	2,34	0,02	0,37	1,73	2,47
Fumure minérale	0-20	1,64	32	0,88	0,76	0,04	0,25	0,53	2,33
	20-40	1,14	62	0,81	1,17	0,02	0,31	1,21	2,10
	40-60	1,02	63	1,00	2,16	0,01	0,36	1,27	2,01
	60-80	0,95	77	1,16	2,09	0,02	0,36	1,66	2,16



**Tableau 4.30 - Classification des sols selon leur teneur en ÉTM mesurée avec la méthode Mehlich-3**

Classe	Distribution percentile	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
1	< 25	< 15,2	< 1,3	< 1,3	< 0,15	< 0,21	< 0,05	< 0,25	< 1,6
2	25 – 50	15,2–25,3	1,3–1,9	1,3–1,6	0,15–0,22	0,21–0,27	0,05–0,07	0,25–0,36	1,6–2,1
3	50 – 75	25,3–35,0	1,9–2,8	1,6–2,1	0,22–0,29	0,27–0,42	0,07–0,10	0,36–0,57	2,1–2,6
4	75 – 99	35,0–98,6	2,8–8,0	2,1–5,8	0,29–1,18	0,42–0,75	0,10–0,24	0,57–2,05	2,6–5,7
5	> 99	> 98,6	> 8,0	> 5,8	> 1,18	> 0,75	> 0,24	> 2,05	> 5,7

## 5 - CONCLUSIONS

---

Le bilan des ÉTM mesurés pour deux cultures, prairie luzerne-mil et maïs-grain, fertilisées avec une fumure minérale montre que tous les ÉTM analysés ont un bilan déficitaire et ne présentent pas de problématique particulière d'accumulation dans les sols. Au contraire, on observe un déficit en certains ÉTM requis par les plantes, tels que Zn, Mn et Cu. Pour les engrais de ferme, le bilan de plusieurs ÉTM est déficitaire ou près de l'équilibre, tant dans la prairie que dans le champ de maïs-grain. Les éléments Ni, Pb, Co, Cr, et Cd ne présentent pas un bilan pouvant provoquer des problèmes d'accumulation dans les sols ou les cultures. Le zinc et le cuivre ont un bilan positif pour tous les traitements avec les engrais de ferme, particulièrement pour le lisier de porcs. Ces éléments font l'objet d'ajout substantiel dans les rations animales. Les rejets de ces éléments dans le fumier de volailles et le lisier de porcs sont particulièrement élevés, de sorte que les concentrations sont au niveau C2 pour un ou l'autre de ces éléments selon les critères des matières résiduelles fertilisantes du MENV (2002). Les charges de cuivre et de zinc qui résultent des apports de fumier de poulets et de lisier de porcs, représentent des apports suffisants pour affecter de façon significative le bilan de ces éléments. Les excès du bilan annuel du zinc (+2957 g/ha) et du cuivre (+2137 g/ha) avec le lisier de porcs dans le maïs-grain nous indiquent que des accumulations de ces éléments sont très susceptibles de modifier les teneurs en Zn et Cu labiles mesurées avec Mehlich-3 dans la couche arable. L'analyse des ÉTM totaux des sols est cependant peu affectée par les apports des ÉTM provenant des engrais de ferme. Cette méthode est peu sensible pour mettre en évidence les accumulations des ÉTM provenant des applications d'engrais à moyen et long terme. La méthode Mehlich-3 s'est montrée beaucoup plus sensible. Nous recommandons donc son utilisation pour le suivi des ÉTM dans les sols agricoles au Québec. Les apports d'engrais de ferme riches en Cu et Zn accroissent proportionnellement plus rapidement la fraction labile de ces éléments dans les sols que leur teneur totale. Ceci pourrait donc à très long terme provoquer un accroissement excessif de la mobilité de ces métaux. Afin de prévenir les accumulations excessives de cuivre et de zinc dans les sols, il est souhaitable de connaître leur concentration dans les engrais de ferme. Il faudrait aussi procéder occasionnellement à l'analyse des sols avec la méthode Mehlich-3 et suivre l'évolution des ÉTM, particulièrement pour Cu et Zn. Des solutions devraient être envisagées pour réduire l'ajout de ces éléments dans les rations alimentaires afin de diminuer les rejets par les animaux et ainsi limiter les apports aux champs.

## 6 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Baize, D. 1997. Teneurs totales en ÉTM dans les sols (France). Colloque INRA ed. 409 p.
- 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. Cahier de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. IRDA. 37 p.
- Giroux, M., M. Rompré, D. Carrier, P. Audesse et M. Lemieux. 1992. Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. *Agrosol*. 9 (2) : 46-55.
- Goulet, M., J. Gallichand, M. Giroux et M. Duchemin. 2003. Évaluation d'un système pour quantifier les pertes de phosphore par ruissellement en régions tempérées froides. Article soumis au Canadian biosystems engineering.
- Kingery, W. L., C.W. Wood, D.P. Delaney, J.C. Williams et G.L. Mullins. 1994. Impact of long-term land application of broiler litter on environmentally related soil properties. (367-373).
- Mclean J.E. et B.E. Bledsoe. 1992. Behavior of metals in soils. EPA Groundwater issue. EPA/540/S-92/018. Washington DC.
- MENV. (2002). Critères provisoires pour la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. Ministère de l'Environnement du Québec. 184 p.
- Quian, P., J.J. Schoenau, T. Wu et S.P. Mooleki. 2003. Cooper and zinc distribution in soil as influenced by application of animal manure in east-central Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 83 (2):197-202
- Quilbé, R. 2002. Transfert de polluants inorganiques par ruissellement en terre de grande culture. Thèse de doctorat. École normale supérieure lettres et sciences humaines. Lyon. 274 p.
- Royer, I., R.R. Simard, D.A. Angers, G.M. Barnett et D. Cluis. 2004. Cooper and zinc fractions in soil profile after 9 yr of liquid hog manure application. *Can. J. Soil Sci.* (sous presse)
- Tisdale, S.L., W. L. Nelson et J. D. Beaton. 1985. Micronutrients and other beneficial elements in soils and fertilizers. Dans *Soil Fertility and Fertilizer*, 4<sup>th</sup> ed. Macmillan pub. N.Y. pp. 350-413.
- Tran, T.S., D. Côté et A. Ndayegamiye. 1996. Effets des apports prolongés de fumier et de lisier sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs. *Agrosol* 9 (1):21-31.
- Zagury, G.J., Dudal, Y., Bureau, J., Bastien C., et Chassé R. (2002). Sample handling and preparation for estimation of mobility, bioavailability and toxicity of contaminants in soils. In: *Environmental Analysis of Contaminated Sites*. G.I. Sunahara, A.Y. Renoux, C. Thellen, C.I. Gaudet et A. Pilon. John Wiley & Sons. p.p. 9-24.

## **7 - REMERCIEMENTS**

---

Nous tenons à remercier toute l'équipe technique de la station de recherche et du laboratoire d'analyse des sols de l'IRDA, spécialement MM. Raynald Royer, Michel Lemieux, Pierre Audesse et Colin Federspiel pour l'acquisition des données et les analyses en laboratoire. Nous remercions également M. Jacques Gallichand et Mme Monique Goulet de l'Université Laval pour nous avoir fourni les échantillons d'eau de ruissellement de surface. Nos remerciements vont aussi à Mmes Claudine Jomphe et Frédérique Maranda pour la mise en page et la présentation graphique du document.

Ce projet a bénéficié d'une subvention du programme PARDE du ministère de l'Environnement du Québec. Nous sommes très reconnaissants pour l'aide financière apportée.