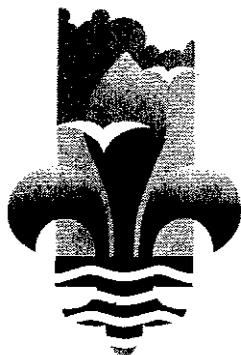
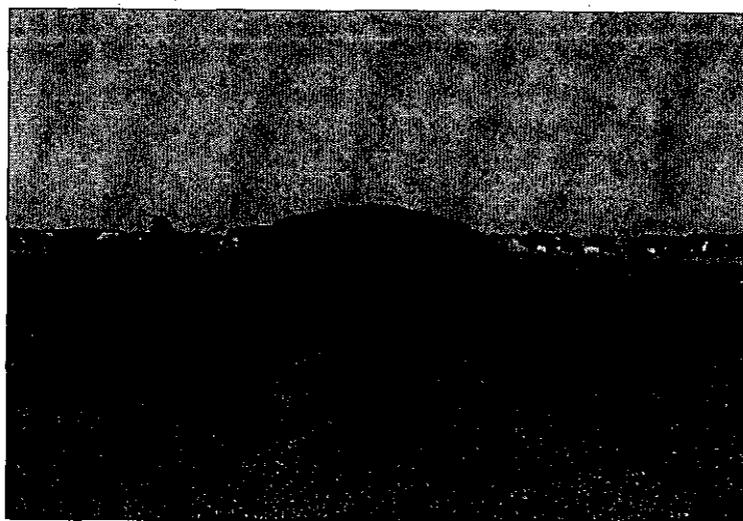


Qualité des eaux



ENVIRONNEMENT
ET FAUNE
QUÉBEC



Effets
de l'épandage
des engrais
minéraux
et de grandes
quantités
de lisier de porc
sur l'eau, le sol
et les cultures

Direction des écosystèmes aquatiques

**EFFETS DE L'ÉPANDAGE DES ENGRAIS MINÉRAUX
ET DE GRANDES QUANTITÉS DE LISIER DE PORC
SUR L'EAU, LE SOL ET LES CULTURES**

par

**Georges Gangbazo, ingénieur
Alain R. Pesant, agronome
Gordon M. Barnett, agronome**

**Ministère de l'Environnement et de la Faune
Août 1997**

ERRATUM

Rapport

Effets de l'épandage des engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc sur l'eau, le sol et les cultures (publié par le ministère de l'Environnement et de la Faune)
Auteurs : Georges Gangbazo, Alain R. Pesant et Gordon M. Barnett

Page	Par.	Ligne	
vi	3	9	..., variant de 1,5 % à 9,7 %.
	4	8	..., variant de 8,3 % à 10,8 %.
vii	5	6-7	..., ranging from 1,5 to 9.7% for all treatments.
	6	6	..., ranging from 8.3 to 10.8% for all treatments.
4			Tableau 2 : voir corrections ci-après pour le P.
30	1	3	Mais la période d'épandage...(enlever «tout comme dans notre expérience»).
33	3	4-5	..., variant de 1,5 % pour le traitement 180-0-360, à 9,7 % pour le traitement 180-0-0 (tableau 14).
36	1	1-2	..., variant de 8,3 % à 10,8 % (tableau 14).
37			Tableau 14 : voir corrections ci-après pour «Apports par les fertilisants» et «Récupération réelle (p. cent)».
38			Tableau 15; dernière annotation: ...pourcentage par rapport au Stock réel.
39			Tableau 16 : voir corrections ci-après.
40	1	2-3	...variant de 20 % à 35 % dans le maïs , et de 15 % à 35 % dans le fourrage.

Tableau 2 Taux d'épandage planifiés et quantités effectives d'azote et de phosphore épandues sur les parcelles au cours des cinq années pour N et des trois premières années pour P

Culture	Parcelles	Taux de N planifiés kg ha ⁻¹ . an ⁻¹	Taux d'épandage effectif kg ha ⁻¹ .an ⁻¹			
			N		P [†]	
			Moy. [†]	σ [†]	Moy.	σ
Maïs	Témoins	180	180	0	34	5
	Avec Lisier	540	536	12	116	31
Fourrage	Témoins	55	55	0	21	16
	Avec Lisier	165	164	4	47	14

† Moyenne de 3 années pour P, et de 5 années pour N

† Écart-type

† Les taux d'épandage effectifs du phosphore (P) au cours des cinq années étaient en moyenne les suivants : Pour le maïs : témoins 31 kg ha⁻¹.an⁻¹; avec lisier 102 kg ha⁻¹.an⁻¹. Pour le fourrage : témoins 18 kg ha⁻¹.an⁻¹; avec lisier 39 kg ha⁻¹.an⁻¹.

Tableau 15 Bilan de l'azote total après 5 années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

Culture	Traitement	Entrées		Sorties		Stock [†]		Différence [‡]	P. cent
		Sol	Fertilisants	Eau	Récoltes	Théorique	Réel		
		Kg N-Total ha ⁻¹		Kg N-Total ha ⁻¹		Kg N-Total ha ⁻¹			
Maïs	0 [†] -0 [‡] -0 [§]	11 300	0	270	607	10 423	12 504	2 081	16,6
	180-0-0	10 160	900	336	765	9 959	13 305	3 346	25,1
	180-180-180	11 025	2 700	740	935	12 050	12 754	704	5,5
	180-360-0	12 180	2 700	575	835	13 470	13 846	376	2,7
	180-0-360	11 205	2 700	510	840	12 555	11 651	- 904	- 7,8
Fourrage	0-0-0	11 750	0	57	642	11 051	11 205	154	1,4
	55-0-0	13 523	275	83	814	12 901	13 075	174	1,3
	55-55-55	11 689	825	101	926	11 487	12 531	1 044	8,3
	55-110-0	11 441	825	91	895	11 280	12 771	1 491	11,7
	55-0-110	12 856	825	120	870	12 691	12 700	10	0,1

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

[†] Stock théorique = Entrées - Sorties; Stock réel = Quantités présentes dans le sol à la fin du projet

[‡] Différence = Stock réel - Stock théorique, en valeur absolue et en pourcentage par rapport au Stock réel

Tableau 16 Bilan du phosphore total après 5 années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

Culture	Traitement	Entrées		Sorties		Stock [†]		Différence [‡]	
		Sol	Fertilisants	Eau	Récoltes	Théorique	Réel	Kg P-Total ha ⁻¹	P. cent
		Kg P-Total ha ⁻¹		Kg P-Total ha ⁻¹		Kg P-Total ha ⁻¹		Kg P-Total ha ⁻¹	
Maïs	0 [†] -0 [‡] -0 [§]	6 297	0	2,82	114	6 180	9 523	3 343	35,1
	180-0-0	6 335	164	3,15	130	6 366	10 038	3 672	36,6
	180-180-180	7 176	581	2,45	166	7 588	10 136	2 548	25,1
	180-360-0	6 830	581	1,80	140	7 269	9 947	2 678	26,9
	180-0-360	6 789	581	3,10	123	7 244	9 207	1 963	21,3
Fourrage	0-0-0	6 784	0	2,00	80	6 702	8 998	2 296	25,5
	55-0-0	7 208	110	2,90	90	7 225	9 568	2 343	24,5
	55-55-55	6 962	241	2,50	106	7 094	9 755	2 661	27,3
	55-110-0	6 270	241	2,25	99	6 410	9 951	3 541	35,6
	55-0-110	8 133	241	3,90	100	8 270	9 618	1 348	14,0

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

[†] Stock théorique = Entrées - Sorties; Stock réel = Quantités présentes dans le sol à la fin du projet

[‡] Différence = Stock réel - Stock théorique, en valeur absolue et en pourcentage par rapport au Stock réel

Direction des écosystèmes aquatiques

**EFFETS DE L'ÉPANDAGE DES ENGRAIS MINÉRAUX
ET DE GRANDES QUANTITÉS DE LISIER DE PORC
SUR L'EAU, LE SOL ET LES CULTURES**

par

**Georges Gangbazo, ingénieur
Alain R. Pesant, agronome
Gordon M. Barnett, agronome**

**Ministère de l'Environnement et de la Faune
Août 1997**

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Québec, 1997
Bibliothèque nationale du Canada
ISBN 2-550-32097-2

ENVIRODOQ : EN970287

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Chargés de projet :	Gordon M. Barnett ² Georges Gangbazo ¹ Alain R. Pesant ²
Collaborateurs :	Jean-Pierre Charuest ² Daniel Cluis ⁴
Révision scientifique :	Denis Côté ⁶ Carol Émond ⁵
Révision linguistique :	Pierre Lafrenière ³
Agent d'information :	Guy Gagnon ³
Soutien technique :	Jacques Dion ¹ Alain Dubreuil ² Réal Gagné ² Dominique Gagnon ² Kouassi Konan ¹
Traitement de texte :	Chantal Beaudoin ¹ Nathalie Milhomme ¹

- 1 Direction des écosystèmes aquatiques, ministère de l'Environnement et de la Faune, Édifice Marie-Guyart, 7^e étage, 675, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7
- 2 Station de recherche, ministère de l'Agriculture et de l'Agro-alimentaire du Canada, 2000, Route 108 Est, Lennoxville (Québec) J1M 1Z3
- 3 Direction des communications et du marketing, ministère de l'Environnement et de la Faune, 150, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 4Y1
- 4 Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Carrefour Molson, 2800, rue Einstein, bureau 105, C.P. 7500, Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7
- 5 Direction des politiques des secteurs agricole et naturel, ministère de l'Environnement et de la Faune, 2360, chemin Sainte-Foy, 2^e étage, Sainte-Foy (Québec) G1V 4H2
- 6 Direction de la recherche et du développement, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Complexe scientifique, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8

RÉSUMÉ

Les charges et les concentrations annuelles et saisonnières d'azote total (N-Total), d'azote ammoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), de nitrates ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), de phosphore total (P-Total) et d'orthophosphates (PO_4^-P) dans l'eau de ruissellement et de drainage ont été évaluées (pendant 3 ans pour le phosphore, et 5 ans pour l'azote) sur des parcelles expérimentales de 45 m² semées soit en maïs ensilage (*Zea mays* L.), soit en fourrage (mélange de mil *Phleum pratense* L.) et en trèfle (*Trifolium repens* L.). L'accumulation et la migration de l'azote et du phosphore dans le sol, leur prélèvement par les cultures ainsi que le rendement de celles-ci ont aussi été évalués.

Les parcelles ont été fertilisées, soit avec des engrais minéraux conformément aux besoins agronomiques recommandés (180 kg N ha⁻¹ pour le maïs et 55 kg N ha⁻¹ pour le mélange de mil et de trèfle), soit avec des engrais minéraux et du lisier de porc (*Sus scrofa domestica* L.), appliqués à double dose. Le lisier de porc était incorporé par rotoculteur dans la couche de surface du sol pour le maïs, et laissé à la surface du sol pour le fourrage, selon trois scénarios : tout à l'automne, tout au printemps, et fractionné en quantités égales à chaque saison. La quantité totale d'azote épanchée en une année était de 540 kg N ha⁻¹ dans le maïs, et 165 kg N ha⁻¹ dans le fourrage, à l'exception des parcelles témoins qui n'ont été fertilisées qu'avec des engrais minéraux (180 kg N ha⁻¹ dans le maïs, et 55 kg N ha⁻¹ dans le fourrage). La quantité totale de phosphore épanchée par année était de 264 kg P ha⁻¹ dans le maïs, et 108 kg P ha⁻¹ dans le fourrage, à l'exception des parcelles témoins qui n'ont été fertilisées qu'avec des engrais minéraux (77 kg P ha⁻¹ dans le maïs, et 49 kg P ha⁻¹ dans le fourrage).

Sur une base annuelle, les parcelles de maïs ont perdu dans l'eau de ruissellement et de drainage, cinq fois plus de N-Total (104 vs 19 kg ha⁻¹), 30 % plus de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (1,87 vs 1,36 kg ha⁻¹), et six fois plus de $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (88 vs 14 kg ha⁻¹) que les parcelles de fourrage. Les charges de P-Total étaient similaires entre les cultures ($\approx 0,55$ kg ha⁻¹), alors que les parcelles de fourrage ont perdu 50 % plus de PO_4^-P que les parcelles de maïs (0,34 vs 0,23 kg ha⁻¹). Dans le maïs, le fractionnement de la dose de lisier entre le printemps et l'automne a influencé surtout les charges de N-Total et $\text{NO}_3^-\text{-N}$: ces parcelles ont perdu deux fois plus de N-Total (148 vs 67 kg ha⁻¹) et de $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (132 vs 55 kg ha⁻¹) que les parcelles témoins, alors que l'épandage de tout le lisier à l'automne a influencé surtout la charge de $\text{NH}_4^+\text{-N}$: ces parcelles ont perdu deux fois plus de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (3,15 vs 1,35 kg ha⁻¹) que les parcelles témoins. Dans le fourrage, l'épandage de tout le lisier à l'automne a influencé surtout les charges de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ et de PO_4^-P : ces parcelles ont perdu 57 % plus de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (1,86 vs 1,18 kg ha⁻¹), et deux fois plus de PO_4^-P (0,55 vs 0,27 kg ha⁻¹) que les parcelles témoins.

Les profils des variations inter-saisonnières des charges de N et P n'étaient pas les mêmes pour tous les paramètres de qualité de l'eau. De la charge de $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 95 % étaient perdues par les drains, alors que 85 % et 60 % des charges de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ et PO_4^-P étaient perdues par le ruissellement. De la charge de $\text{NO}_3^-\text{-N}$ dans l'eau de drainage, 87 % était perdue dans les événements de pluie d'automne et de fonte de neige au printemps, alors que plus de 72 % de la

charge de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ dans l'eau de ruissellement était perdue dans les événements de fonte de neige, en hiver et tôt au printemps.

L'azote ammoniacal s'est accumulé dans la couche 0-40 cm alors que les orthophosphates se sont accumulés dans la couche 0-20 cm. Cependant, les nitrates se sont accumulés dans toutes les couches de sol, migrant même sous la zone 0-100 cm.

Pour le maïs, l'épandage du lisier en plus des engrais minéraux n'a pas nécessairement augmenté les rendements, ni la quantité d'azote total et de phosphore total accumulée dans les récoltes, pas plus que la concentration de nitrates dans les épis et dans les plants entiers, qui est demeurée sous le niveau jugé potentiellement toxique pour les ruminants. De plus, à cause des pertes importantes d'azote occasionnées par la fertilisation excessive (engrais minéraux plus lisier), le traitement à base d'engrais minéraux seuls (180 kg N ha^{-1}) a été le plus efficace de tous, avec une récupération moyenne de 17 % de l'azote épandu. L'efficacité des autres traitements a varié de 8 % à 12 %. La récupération du phosphore total a été généralement faible pour tous les traitements, variant de 0,7 % à 4,3 %.

Pour le fourrage, l'épandage du lisier en plus des engrais minéraux a augmenté significativement le rendement en fourrage et, par conséquent, le prélèvement de l'azote total et du phosphore total, surtout lors de la deuxième coupe. Mais comme dans le maïs, la concentration de nitrates dans le fourrage n'a pas été affectée : celle-ci est demeurée sous le niveau jugé potentiellement toxique pour les ruminants. De la même façon, le traitement à base d'engrais minéraux seuls (55 kg N ha^{-1}) a été le plus efficace de tous, avec une récupération moyenne de 62 % de l'azote épandu. L'efficacité des autres traitements a varié de 12 % à 31 %. La récupération du phosphore total a été généralement faible pour tous les traitements, variant de 3,6 % à 4,7 %.

Les résultats précédents suggèrent que la généralisation des pratiques de fertilisation excédant les besoins agronomiques des cultures augmente les concentrations de $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, P-Total, et $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ dans les rivières au-delà des critères d'usage de l'eau. Par conséquent, ces pratiques doivent être bannies pour prévenir la contamination des nappes souterraines et l'eutrophisation du milieu aquatique.

ABSTRACT

Annual and seasonal Total-N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, Total-P, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ loads and concentrations in runoff and drainage waters were measured for 5 yr (N) and 3 yr (P) from 45 m^2 corn (*Zea mays* L.) and Timothy (*Phleum pratense* L.) red clover (*Trifolium pratense* L.) and ladino clover (*Trifolium repens* L.) plots. Crop yield, N and P uptake, as well as their accumulation and migration in soils were evaluated.

These plots had received either the recommended mineral fertilizer rates of 180 and 55 kg N ha^{-1} for corn and forage respectively, or mineral fertilizer as recommended plus hog manure (*Sus*

scrofa domestica L.) at twice those rates. The hog manure was surface-applied in three different ways : all in the fall, all in the spring, and in a split application with about one-half in each season. Total-N applications for corn and forage were 540 and 165 kg ha⁻¹, except for the check plots receiving only mineral fertilizers. P applications on corn and forage were 264 and 108 kg ha⁻¹, except for the check plots which received only mineral fertilizers (77 kg ha⁻¹ on corn, and 49 kg ha⁻¹ on forage).

On an annual basis, runoff and drainage water losses from corn contained five times more Total-N (104 vs. 19 kg ha⁻¹), one third more NH₄⁺-N (1.87 vs. 1.36 kg ha⁻¹), and six times more NO₃⁻-N (88 vs. 14 kg ha⁻¹) than forage. Total-P loads were similar between crops (=0.55 kg ha⁻¹), while forage exported one half more PO₄⁻-P than corn (0.34 vs. 0.23 kg ha⁻¹). On corn, plots receiving split applications of hog manure had the most impact on Total-N and NO₃⁻-N loads, exporting twice as much Total-N (148 vs. 67 kg ha⁻¹) and NO₃⁻-N (132 vs. 55 kg ha⁻¹) as compared with the check plots, while plots receiving all manure in the fall had more impact on NH₄⁺-N loads, exporting twice as much NH₄⁺-N (3.15 vs. 1.35 kg ha⁻¹) as compared with the check plots. On forage, plots receiving all manure in the fall had the most impact on NH₄⁺-N and PO₄⁻-P loads, exporting 57% more NH₄⁺-N (1.86 vs. 1.18 kg ha⁻¹) and twice as much PO₄⁻-P (0.55 vs. 0.27 kg ha⁻¹) as compared with the check plots.

Inter-seasonal variations in loads differed according to nutrient. Of the NO₃⁻-N loads, 95% were lost in drainage, while 85% and 60% of the NH₄⁺-N and PO₄⁻-P loads were lost in runoff. Of the drainage NO₃⁻-N loads, 87% were lost with fall and spring events, while more than 72% of the runoff NH₄⁺-N loads were lost with winter and early spring events.

NH₄⁺-N accumulated in the 0-40 cm soil layer whereas PO₄⁻-P accumulated in the 0-20 cm soil layer. However, NO₃⁻-N accumulated in all soil layers, and migrated below 100 cm.

In corn, spreading hog manure in addition to mineral fertilizers did not necessarily increase yields, Total-N and Total-P uptake, or NO₃⁻-N levels in ears or in whole plants, the later being lower than levels potentially toxic for ruminants. Because higher nutrient losses occurred with overfertilization (hog manure plus mineral fertilizers), mineral fertilizers (180 kg N ha⁻¹) were more efficient with on average 17% N uptake. N efficiencies ranged from 8 to 12% for the manured treatments. Total -P efficiencies were generally low, ranging from 0.7 to 4.3% for all treatments.

Spreading hog manure in addition to mineral fertilizers significantly increased forage yields, and therefore Total-N and Total-P uptake, especially the second harvest. But as in corn, NO₃⁻-N levels in forage were not affected by treatments, and were less than levels potentially toxic for ruminants. The treatment with mineral fertilizers alone (55 kg N ha⁻¹) was the most efficient, with an average of 62% N uptake. N efficiencies ranged from 12 to 31% for the manured treatments. Total-P efficiencies were generally low, ranging from 3.6 to 4.7% for all treatments.

In conclusion, widespread use of fertilization practices which exceed crop needs would increase NO_3^- -N, NH_4^+ -N, Total-P, and PO_4^- -P concentrations in rivers in excess of raw water standards. Therefore, such practices should be banned to prevent groundwater contamination and surface water eutrophication.

TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE RÉALISATION	iii
RÉSUMÉ	v
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES ANNEXES	xv
1. INTRODUCTION	1
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	3
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	9
3.1 Conditions météorologiques	9
3.2 Pertes d'eau	9
3.2.1 Années 1989 à 1992	9
3.2.2 Années 1989 à 1994	9
3.3 Effets sur l'eau	11
3.3.1 Charges et concentrations annuelles	11
3.3.2 Charges et concentrations saisonnières	13
3.4 Effets sur le sol	24
3.4.1 Azote total	24
3.4.2 Azote ammoniacal	24
3.4.3 Nitrates	27
3.4.4 Phosphore total	27
3.4.5 Orthophosphates	30
3.5 Effets sur les cultures	30
3.5.1 Maïs	30
3.5.2 Fourrage	33
3.6 Bilan	36
3.6.1 Azote total	36
3.6.2 Phosphore total	36

TABLE DES MATIÈRES (suite)

4. CONCLUSION	41
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques physiques et chimiques de l'horizon de surface (0-20 cm) du sol au début du projet	4
Tableau 2	Taux d'épandage planifiés et quantités effectives d'azote et de phosphore épandues sur les parcelles au cours des cinq années pour N, et des trois premières années pour P	4
Tableau 3	Précipitation moyenne saisonnière et température moyenne journalière observées sur le site	10
Tableau 4	Effets des cultures et des traitements sur les charges annuelles d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage pendant 5 ans pour N et 3 ans pour P	10
Tableau 5	Signification des valeurs F de l'analyse de variance des charges saisonnières d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage pendant 5 ans pour N et 3 ans pour P	15
Tableau 6	Effets des cultures et des traitements sur la quantité d'azote total dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc	25
Tableau 7	Effets des cultures et des traitements sur la quantité d'azote ammoniacal dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc	26
Tableau 8	Effets des cultures et des traitements sur la quantité de nitrates dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc	28
Tableau 9	Effets des cultures et des traitements sur la quantité de phosphore total dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc	29
Tableau 10	Effets des cultures et des traitements sur la quantité d'orthophosphates dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc	31
Tableau 11	Effets des traitements sur le rendement du maïs et le prélèvement de l'azote total et du phosphore total pendant 5 ans	32

LISTE DES TABLEAUX (suite)

Tableau 12	Effets des traitements sur le rendement du fourrage et le prélèvement de l'azote total et du phosphore total pendant 5 ans	34
Tableau 13	Récupération de l'azote total par les cultures pendant 5 ans	35
Tableau 14	Récupération du phosphore total par les cultures pendant 5 ans	37
Tableau 15	Bilan de l'azote total après 5 années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc	38
Tableau 16	Bilan du phosphore total après 5 années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Effets des traitements sur les charges saisonnières d'azote total pendant 5 ans (1989-1994)	16
Figure 2	Effets des traitements sur les charges saisonnières d'azote ammoniacal pendant 5 ans (1989-1994)	17
Figure 3	Effets des traitements sur les charges saisonnières de nitrates pendant 5 ans (1989-1994)	19
Figure 4	Effets des traitements sur les charges saisonnières de phosphore total pendant 3 ans (1989-1992)	21
Figure 5	Effets des traitements sur les charges saisonnières d'orthophosphates pendant 3 ans (1989-1992)	23

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 Effets des pratiques conventionnelles d'épandage du lisier de porc et des engrais minéraux sur la charge de nitrates dans les eaux de ruissellement et de drainage (Gangbazo et al., 1992)
- Annexe 2 Contamination de l'eau par l'azote ammoniacal suite à l'épandage du lisier de porc et des engrais minéraux – *Water contamination by ammonium nitrogen following the spreading of hog manure and mineral fertilizers* (Gangbazo et al., 1995)
- Annexe 3 Charges saisonnières d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage pendant 5 ans (1989-1994) pour N, et 3 ans (1989-1992) pour P

1. INTRODUCTION

À cause de la fertilisation excessive des sols, plusieurs usages de l'eau sont déjà compromis ou risquent de l'être à brève échéance dans les régions rurales (Westerman *et al.*, 1987; Bergström et Brink, 1986). L'azote et le phosphore sont les principales substances nutritives en cause, puisqu'elles contrôlent souvent la productivité biologique des eaux de surface (Sharpley *et al.*, 1987).

L'impact spécifique d'une pratique de fertilisation dépend de plusieurs facteurs dont le taux d'épandage, la période d'épandage, le mode d'épandage, les pratiques culturales, les conditions climatiques et hydrologiques (Bottom *et al.*, 1983; Crane *et al.*, 1981; Khaleel *et al.*, 1980; Ross *et al.*, 1979; Gangbazo *et al.*, 1993).

Avec 32 % de la production canadienne de porcs en 1991 (Gouvernement du Québec, 1992), le Québec figure en tête des provinces canadiennes. Les fermes porcines sont concentrées dans la région du Richelieu, de L'Assomption, de Québec, de la Beauce, où la disponibilité de lisier excède les besoins agronomiques des cultures. Il arrive même souvent que dans ces régions, certains producteurs qui hésitent à utiliser le lisier de porc comme principale source d'engrais pour leurs cultures, épandent les engrais minéraux conformément aux besoins agronomiques des cultures, et se débarrassent ensuite du lisier de porc. Cette pratique donne lieu généralement à une fertilisation excessive des sols par l'azote et par le phosphore. Plusieurs auteurs ont étudié les effets de l'épandage de grandes quantités de lisier ou de fumier sur l'eau (Phillips *et al.*, 1981; Evans *et al.*, 1984), le sol (Culley *et al.*, 1981; King *et al.*, 1985; Warman, 1986; Westerman *et al.*, 1987; Chang *et al.*, 1991; Angle *et al.*, 1993) et les cultures (Phillips *et al.*, 1981; Burns *et al.*, 1985; Warman, 1986; Burns *et al.*, 1987), mais peu de travaux permettant d'établir des bilans complets ont été réalisés dans les conditions pédologiques et climatiques du Québec. Ces informations sont nécessaires pour établir des politiques efficaces de prévention de la pollution de l'eau dans les zones d'élevage intensif du Québec, puisque le climat (température, humidité, etc.) et les sols conditionnent la transformation des éléments nutritifs et, par conséquent, les risques de contamination de l'eau (Reddy *et al.*, 1979a;b; Khaleel *et al.*, 1979).

L'objectif du projet était donc d'évaluer les effets de l'épandage des engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc sur l'eau, le sol et les cultures dans des conditions typiques du sud-est du Québec.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le projet, d'une durée de cinq ans (1989-1994), s'est déroulé sur la ferme expérimentale de la station de recherche du ministère de l'Agriculture et de l'Agro-alimentaire du Canada située à Lennoxville, dans le sud-est de la province. La précipitation moyenne (pluie et neige) dans la région est de 1 033 mm. Le sol est un loam limoneux Coaticook (Humaquept typique), un gleysol humo-ferrique développé sur un matériel lacustre (tableau 1). La pente moyenne du site est de 6 %. La ferme expérimentale dispose d'une station météorologique, située à peine à 600 m du site du projet, où l'on enregistre les principales données climatiques (précipitations, température de l'air, etc.).

Les 18 parcelles expérimentales de 45 m² chacune, mesuraient 3 m de largeur sur 15 m de longueur. Elles étaient isolées les unes des autres comme suit : 1) en les entourant sur trois côtés (les deux longueurs, et la largeur supérieure) d'une toile de construction en polythène jusqu'à 1,2 m de profondeur. Cette toile servait à confiner dans chaque parcelle, l'eau infiltrée dans le sol. Cette dernière était captée par un drain agricole de 10 cm de diamètre, installé à 90 cm de profondeur, au centre de chaque parcelle; 2) par l'aménagement de billons engazonnés de 50 cm de largeur et de 25 cm de hauteur entre deux parcelles contiguës, pour contrôler l'eau de ruissellement qui était captée par une gouttière installée en bas de la pente. Les eaux de ruissellement et de drainage étaient dirigées séparément vers des réservoirs en métal où leur volume pouvait être mesuré, et un échantillon représentatif prélevé selon les besoins.

Les parcelles étaient semées soit en maïs ensilage (*Zea mays* L.), soit en fourrage constitué d'un mélange de mil (*Pleum pratense* L.) et de trèfle (*Trifolium repens* L.).

Les quatre traitements consistaient en :

1. une fertilisation exclusivement minérale sous forme de nitrate d'ammonium appliquée au printemps, conformément aux besoins azotés de chaque culture;
2. du lisier de porc (*Sus scrofa domestica* L.) appliqué à raison du double des besoins azotés de chaque culture à l'automne;
3. du lisier de porc appliqué à raison du double des besoins azotés de chaque culture au printemps;
4. du lisier de porc appliqué conformément aux besoins azotés de chaque culture, aussi bien au printemps qu'à l'automne (c'est-à-dire, fractionnement de la dose précédente de lisier entre les deux saisons).

Les parcelles fertilisées avec du lisier de porc étaient également fertilisées avec les engrais minéraux décrits précédemment. Le but était de simuler le cas des agriculteurs qui, bien

Tableau 1 Caractéristiques physiques et chimiques de l'horizon de surface (0-20 cm) du sol au début du projet

Composition texturale	
Sable (%)	3
Limon (%)	80
Argile (%)	17
Masse volumique apparente (Mg m ⁻³) [†]	1,2
Matière organique (g kg ⁻¹ , ignition)	53
pH (1:1 sol-eau)	5,8
N-Total Kjeldahl (mg kg ⁻¹)	2 327
NH ₄ ⁺ -N (mg kg ⁻¹)	2,7
NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹)	85
P-Total (mg kg ⁻¹)	845
P-Mehlich III (mg kg ⁻¹)	81

†Sol non perturbé

Tableau 2 Taux d'épandage planifiés et quantités effectives d'azote et de phosphore épandues sur les parcelles au cours des cinq années pour N et des trois premières années pour P

Culture	Parcelles	Taux de N planifiés kg ha ⁻¹ . an ⁻¹	Taux d'épandage effectif kg ha ⁻¹ .an ⁻¹			
			N		P ^f	
			Moy. [†]	σ [‡]	Moy.	σ
Maïs	Témoins	180	180	0	77	12
	Avec Lisier	540	536	12	264	70
Fourrage	Témoins	55	55	0	49	36
	Avec Lisier	165	164	4	108	33

† Moyenne de 3 années pour P, et de 5 années pour N

‡ Écart-type

^f Les taux d'épandage effectifs du phosphore au cours des cinq années étaient en moyenne les suivants : Pour le maïs : témoins 71 kg ha⁻¹.an⁻¹; avec lisier 232 kg ha⁻¹.an⁻¹. Pour le fourrage : témoins 41 kg ha⁻¹.an⁻¹; avec lisier 90 kg ha⁻¹.an⁻¹.

que disposant de grandes quantités de lisier, font peu confiance au lisier comme source principale d'engrais. Ces traitements étaient répétés deux fois chacun. À noter que deux autres parcelles non fertilisées et non répétées (une en maïs et une en fourrage) ont été ajoutées aux précédentes, pour estimer les proportions de l'azote et du phosphore épandus qui ont été effectivement récupérées par les cultures. Les 18 parcelles (9 en maïs ensilage, et 9 en fourrage) ont été distribuées de façon complètement aléatoire. Puisque la fertilisation azotée recommandée (besoins agronomiques) était de 180 kg N ha^{-1} pour le maïs à ensilage, et 55 kg N ha^{-1} pour le fourrage (Association des fabricants d'engrais du Québec - AFEQ, 1987), la quantité totale d'azote épandue par année sur les parcelles était de 540 kg N ha^{-1} pour le maïs, et 165 kg N ha^{-1} pour le fourrage, à l'exception des parcelles qui ne recevaient que des engrais minéraux conformément aux besoins agronomiques.

Le lisier et les engrais minéraux azotés et phosphatés étaient appliqués manuellement et à la volée. Les suppléments d'engrais minéraux (P - sous forme de superphosphate, et K - sous forme de chlorure de potassium) étaient appliqués au printemps, à des taux ajustés selon la composition du sol, tel que recommandé (AFEQ, 1987). Il s'ensuit que la fertilisation phosphatée totale a varié d'une parcelle à l'autre, excédant les besoins des cultures à cause de cette correction, et du fait que les taux de lisier ne tenaient compte que des besoins azotés des cultures (tableau 2). Au printemps, dans le maïs, le lisier était incorporé dans la couche superficielle du sol par rotoculteur dans un délai d'une heure après l'épandage, suivi du semis, effectué à la main (75 cm d'intervalle entre les rangs, et 15 cm sur les rangs). À l'automne, le lisier était également incorporé au sol par rotoculteur dans un délai d'une journée après l'épandage. Pour le fourrage, le lisier était épandu et laissé à la surface du sol aussi bien au printemps qu'à l'automne. La densité des plants de maïs à la récolte était de l'ordre de 6 plants/m^2 .

Le volume total d'eau de ruissellement et de drainage était mesuré après chaque événement de pluie ou de fonte de neige. Deux échantillons représentatifs de 125 ml étaient prélevés après décantation dans chaque réservoir (ruissellement et drainage) aux fins d'analyses chimiques, $0,5 \text{ ml}$ d'acide sulfurique (H_2SO_4) étant ajoutés dans l'échantillon utilisé pour déterminer les concentrations d'azote et de phosphore total pour ralentir les transformations chimiques susceptibles de se produire au cours de la conservation. Aucun agent de conservation n'était ajouté à l'échantillon utilisé pour déterminer la concentration d'orthophosphates. Les échantillons prélevés dans la même semaine sur une même parcelle étaient gardés à $4 \text{ }^\circ\text{C}$ dans une chambre froide, et composés proportionnellement aux volumes journaliers respectifs à la fin de la semaine, puis envoyés dans les meilleurs délais au laboratoire du ministère de l'Environnement et de la Faune, à Sainte-Foy.

Le sol des parcelles était échantillonné, en octobre chaque année après la récolte du maïs. L'échantillonnage a été fait à l'aide d'un échantillonneur Giddings modèle GSR-T-S installé sur l'attache trois points d'un tracteur. L'échantillonneur était équipé d'un cylindre creux de 5 cm de diamètre, et de 1 m de longueur qui était enfoncé complètement dans le sol à deux endroits éloignés l'un de l'autre dans la même parcelle. Chaque carotte de sol ainsi prélevée était découpée par tranches de 20 cm . Les tranches correspondant à chaque profondeur étaient mélangées dans des sacs de plastique, d'où une fraction pouvait être prélevée aux fins d'analyses chimiques.

Le fourrage était récolté deux fois pendant la saison de végétation, en juin et en août, alors que le maïs était récolté en septembre. Au moment de la coupe du fourrage, le rendement de chaque parcelle était évalué et un échantillon représentatif de la récolte était prélevé. Sur les quatre rangées de maïs que comportait chaque parcelle, seules les deux rangées du centre étaient échantillonnées. Les rendements des épis et des plants entiers étaient évalués séparément. Sur l'une des rangées, tous les épis étaient arrachés et broyés, une fraction de ce mélange constituant l'échantillon des épis. Sur l'autre rangée, tous les plants incluant les épis étaient coupés, puis broyés, une fraction de ce mélange constituant l'échantillon des plants entiers. Tous les échantillons (fourrage et maïs) étaient placés au séchoir à 37 °C, conservés dans des sacs en papier, puis moulus ultérieurement en vue des analyses chimiques.

Les échantillons d'eau étaient filtrés sur membrane GF/C 1,2 µm φ. Les filtrats étaient analysés pour l'azote total [N-Total, c'est-à-dire N Total Kjeldahl (NTK) plus nitrates (NO₃-N)], l'azote ammoniacal (NH₄⁺-N), les nitrates (NO₃⁻-N), le phosphore total (P-Total) et les orthophosphates (PO₄⁻-P) selon des méthodes colorimétriques automatisées (ministère de l'Environnement et de la Faune - MEF, 1987). Les paramètres suivants étaient analysés dans le lisier : NTK (Schuman *et al.*, 1973), NH₄⁺-N et NO₃⁻-N (McKeague, 1977), P-Total (APHA, 1989). Les échantillons de sol étaient analysés pour déterminer les concentrations de NTK (Schuman *et al.*, 1973), NH₄⁺-N et NO₃⁻-N (McKeague, 1977), P-Total (Page *et al.*, 1982) et PO₄⁻-P par la méthode Mehlich III (CPVQ, 1988). Les paramètres suivants étaient analysés dans les plantes : NTK (Schuman *et al.*, 1973, sauf que la titration a été faite selon la méthode micro Kjeldahl), NH₄⁺-N et NO₃⁻-N (CEE, 1979), et P-Total (Walsh, 1971). À cause de contraintes budgétaires, les analyses de P dans l'eau ont été limitées aux trois premières années du projet, alors que les analyses de N dans l'eau ont été réalisées durant les trois premières et la cinquième année du projet. Toutes les analyses de sol et de plantes ont été réalisées comme prévu chaque année. Rappelons aussi que les traitements (fertilisation) ont été effectués comme prévu pendant chacune des cinq années du projet.

Les charges hebdomadaires de N et P dans l'eau ont été calculées pour chaque parcelle en multipliant les volumes hebdomadaires par les concentrations moyennes hebdomadaires pondérées ainsi obtenues grâce à la composition des échantillons, puis regroupées sur une base saisonnière et annuelle. Chaque saison comprend 13 semaines ou 90 jours répartis selon les dates de calendrier : automne (15 septembre au 14 décembre); hiver (15 décembre au 14 mars); printemps (15 mars au 14 juin); été (15 juin au 14 septembre).

La transformation $\log_{10}(X+1)$ a dû être utilisée pour normaliser les quantités d'eau hebdomadaires, ainsi que les charges hebdomadaires d'éléments nutritifs, parce que les variances augmentaient proportionnellement avec les moyennes. De plus, comme il n'y avait que deux répétitions par traitement et que la variabilité des données était grande, toutes les analyses statistiques (eau, sol, plantes) ont été interprétées au seuil de 10 %. Dans le texte, la probabilité du *F*-calculé est représentée par *p*, et la probabilité tabulaire par *P*.

Comme les taux annuels d'épandage de N et P diffèrent beaucoup entre le maïs et le fourrage, les traitements ont été emboîtés à l'intérieur des cultures. Ainsi, aucun effet moyen des traitements pour les deux cultures n'a été déterminé. Les comparaisons ont donc été faites à l'intérieur de chaque culture.

La procédure GLM de SAS PC version 6,04 avec Windows (SAS, 1988) a été utilisée pour évaluer l'effet des cultures et des traitements sur l'eau (quantités et charges annuelles et saisonnières de N et P), le sol (accumulation de N et P par couches successives) et les cultures (rendements, concentrations et prélèvements de N et P). Les différences significatives entre les traitements à l'intérieur d'une culture ont été évaluées par des comparaisons simples (contrastes), en considérant les traitements à base d'engrais minéraux seuls comme les témoins.

Les charges d'éléments nutritifs dans l'eau ont été traitées selon l'approche des mesures répétées dans le temps (Rowell et Walters, 1976). Pour ce qui est des charges saisonnières, la différence moyenne entre saisons successives a été étudiée. Les quantités d'eau (comprendre quantités totales, c'est-à-dire ruissellement plus drainage) ainsi que les charges (comprendre charges totales, c'est-à-dire ruissellement plus drainage) et parfois, les concentrations typiques correspondantes ont été présentées dans ce rapport. Le ruissellement et le drainage n'ont été traités séparément que lorsque cela était nécessaire, auquel cas, les termes « ruissellement » et « drainage » sont utilisés explicitement.

Les quantités d'azote et de phosphore dans le sol au début du projet variaient beaucoup d'une parcelle à l'autre, surtout dans la couche 0-20 cm. Celles-ci ont donc été utilisées comme covariables, lors de l'analyse de variance des quantités présentes dans le sol à la fin du projet.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

La précipitation totale moyenne annuelle (pluie et neige) était de 1 018 mm (\pm 114 mm) pour les trois premières années (1989-1992), et 1 035 mm (\pm 96 mm) pour toute la durée du projet (1989-1994; 5 ans); (tableau 3). Ces valeurs sont comparables à la moyenne de 29 ans pour la région [1 030 mm (\pm 135 mm)]. La deuxième et la cinquième années étaient les plus humides, avec 1 144,7 mm et 1 128,7 mm respectivement, alors que la troisième année était la plus sèche, avec 924,6 mm.

Les pluies automnales et printanières ont totalisé 440 mm (moyenne de 3 ans), et 445 mm (moyenne de 5 ans). Elles représentaient 42 % de la précipitation totale annuelle. La précipitation de neige représentait 12 % de la précipitation totale annuelle.

3.2 PERTES D'EAU

3.2.1 Années 1989 à 1992

Les quantités annuelles d'eau se sont élevées à 267 mm (26 % de la précipitation moyenne annuelle) et n'ont pas varié selon les cultures ($p > 0,10$). Cependant, le ruissellement était significativement plus élevé dans le maïs (110 mm) que dans le fourrage (72 mm); ($p < 0,10$). Par contre, le drainage n'a pas varié selon les cultures ($p > 0,10$), s'élevant en moyenne à 159 mm.

Les quantités saisonnières d'eau n'ont pas varié selon les cultures à l'automne, en hiver et au printemps, avec des valeurs moyennes de 66 mm (automne), 67 mm (hiver), et 70 mm (printemps), ($p > 0,10$). Par contre, en été, elles étaient significativement plus élevées dans le maïs (25 mm) que dans le fourrage (5 mm), ($p < 0,10$).

3.2.2 Années 1989 à 1994

Les tendances étaient similaires à celles observées au cours des trois premières années. Les quantités annuelles d'eau se sont élevées à 307 mm (30 % de la précipitation moyenne annuelle), et n'ont pas varié selon les cultures ($p > 0,10$). Cependant, le ruissellement était significativement plus élevé dans le maïs (122 mm) que dans le fourrage (89 mm), ($p < 0,10$). Par contre, le drainage n'a pas varié selon les cultures ($p > 0,10$), s'élevant en moyenne à 187 mm.

Les quantités saisonnières d'eau n'ont pas varié selon les cultures à l'automne, en hiver, et au printemps, avec des valeurs moyennes de 77 mm (automne), 61 mm (hiver), et 96 mm (printemps), ($p > 0,10$). Par contre, en été, elles étaient significativement plus élevées dans le maïs (29 mm) que dans le fourrage (8 mm), ($p < 0,10$).

Tableau 3 Précipitation moyenne saisonnière et température moyenne journalière observées sur le site

Saison	3 ans (1989-1992)		5 ans (1989-1994)		Moyenne normale (29 ans)		
	Pluie	Neige	Pluie	Neige	Pluie	Neige	Température moy. journée
	mm	cm	mm	cm	mm	cm	°C
Automne [†]	238	31,2	234	30,9	198	63,7	7,4
Hiver [†]	81	122,4	60	139,0	61	148,4	-9,1
Printemps [†]	202	25,4	211	26,8	213	37,0	4,5
Été [†]	325	0,0	337	0,0	320	0,0	18,1

[†]Automne : 15 septembre au 14 décembre; Hiver : 15 décembre au 14 mars; Printemps : 15 mars au 14 juin; Été : 15 juin au 14 septembre

Tableau 4 Effets des cultures et des traitements sur les charges annuelles d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage pendant 5 ans pour N et 3 ans pour P

	N-Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	P-Total	PO ₄ ⁻ -P
	kg N ou P ha ⁻¹ .an ⁻¹				
<i>Culture</i>					
Maïs	104,2a [†]	1,87a	88,7a	0,52a	0,23a
Fourrage	19,6b	1,36b	14,8b	0,57a	0,34b
<i>Traitement</i>					
Maïs : 180 [†] -0 [‡] -0 [§]	67,2	1,35	54,8	0,63	0,26
Maïs : 180-180-180	148,2c ^f	2,00c	132,6c	0,49	0,23
Maïs : 180-360-0	115,0	1,32	98,4	0,36	0,16
Maïs : 180-0-360	102,8	3,15c	86,5	0,62	0,27
Fourrage : 55-0-0	16,6	1,18	12,0	0,58	0,27
Fourrage : 55-55-55	20,2	1,19	15,1	0,50	0,32
Fourrage : 55-110-0	18,2	1,29	13,8	0,45	0,25
Fourrage : 55-0-110	24,1	1,86c	19,2	0,78	0,55c

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

[†] Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,10 pour la culture seulement

^f Indique que ce traitement diffère (p ≤ 0,10) du traitement témoin (fertilisant minéral seul, 180-0-0 pour le maïs, 55-0-0 pour le fourrage)

3.3 EFFETS SUR L'EAU

3.3.1 Charges et concentrations annuelles

3.3.1.1 Effets des cultures

Azote

Le maïs a exporté cinq fois plus de N-Total, 30 % plus de $\text{NH}_4^+\text{-N}$, et six fois plus de $\text{NO}_3^-\text{-N}$ que le fourrage ($p < 0,10$), (tableau 4). Il en résulte que le risque de contamination de l'eau par l'azote est plus élevé pour le maïs que pour le fourrage, puisque la quantité totale de N appliquée sur les parcelles est un multiple des besoins agronomiques des cultures, besoins plus élevés pour le maïs que pour le fourrage. La majeure partie du $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (95 %) a été exportée par le drainage, alors que la majeure partie du $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (85 %) a été exportée par le ruissellement. Ces résultats confirment ceux obtenus au cours des deux premières années pour $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (Gangbazo *et al.*, 1992; annexe 1), et des trois premières années pour $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (Gangbazo *et al.*, 1995; annexe 2). Par suite d'une expérience effectuée avec du lisier de bovins sur des parcelles de maïs, Phillips *et al.*, (1981) ont aussi rapporté que la presque totalité des nitrates était exportée par le drainage. Il en résulte que les modes de transport des nitrates et de l'azote ammoniacal diffèrent.

Phosphore

Les charges de P-Total n'ont pas varié selon les cultures ($p > 0,10$), alors que les charges de $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ étaient 50 % plus élevées dans le fourrage que dans le maïs ($p < 0,10$), (tableau 4). Il en résulte que le risque de contamination de l'eau par $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ est plus élevé pour le fourrage que pour le maïs, bien que les besoins du fourrage en phosphore soient plus faibles que ceux du maïs. Rappelons que dans le maïs, le lisier était incorporé dans la couche de labour du sol, alors qu'il était laissé à la surface du sol dans le fourrage. Le $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ du lisier risquait par conséquent d'être plus facilement entraîné par le ruissellement dans le fourrage que dans le maïs. La majeure partie du phosphore (68 % pour P-Total, et 60 % pour $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) a été exportée par le ruissellement, aussi bien dans le maïs que dans le fourrage. Il en résulte que les orthophosphates sont transportés aussi bien par ruissellement que par drainage, alors que le transport du phosphore total s'effectue principalement par ruissellement.

3.3.1.2 Effets des traitements

Azote

Dans le maïs, le fractionnement de la dose de lisier entre l'automne et le printemps (traitement 180-180-180) a doublé la charge de N-Total, augmenté de 48 % la charge de $\text{NH}_4^+\text{-N}$, et plus que doublé la charge de $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($p < 0,10$), si l'on compare ces traitements au témoin (180-0-0), (tableau 4). De plus, comme pour le traitement 180-180-180, l'épandage de toute la dose de lisier à l'automne (traitement 180-0-360) dans le maïs a plus que doublé la charge de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($p < 0,10$). Donc, il s'avère que dans le maïs, le fractionnement de la dose de lisier entre

L'automne et le printemps a affecté surtout les charges de N-Total et NO_3^- -N, alors que l'épandage de toute la dose de lisier à l'automne a affecté surtout la charge de NH_4^+ -N. L'épandage de toute la dose de lisier au printemps et le traitement témoin semblent avoir eu le même effet ($p > 0,10$). Ces résultats suggèrent que, pour un taux annuel d'épandage donné, la période de l'épandage est le principal facteur qui détermine quel paramètre de qualité d'eau risque d'être le plus affecté.

Dans le maïs, la concentration moyenne⁽¹⁾ de NO_3^- -N dans l'eau était de 43 mg N L⁻¹ pour le traitement 180-180-180, comparativement à 18 mg N L⁻¹ pour le témoin. Puisque 95 % des nitrates étaient exportés par le drainage, les concentrations dans l'eau de drainage étaient similaires à celles présentées ci-dessus. Tous les traitements ont occasionné des concentrations de NO_3^- -N qui excédaient la norme de 10 mg N L⁻¹ pour l'eau utilisée aux fins d'alimentation humaine (McNeely *et al.*, 1980).

La concentration moyenne de NH_4^+ -N due au traitement 180-0-360 était de 1,02 mg N L⁻¹, comparée à 0,44 mg N L⁻¹ pour le témoin. Les traitements qui contenaient du lisier de porc ont donc occasionné des concentrations de NH_4^+ -N qui dépassaient 0,5 mg N L⁻¹, norme pour l'eau brute destinée à la consommation humaine (McNeely *et al.*, 1980). Soulignons que la concentration moyenne de NH_4^+ -N dans l'eau de ruissellement seule était beaucoup plus élevée, soit 2,21 mg L⁻¹ pour le traitement 180-0-360, comparativement à 0,94 mg L⁻¹ pour le témoin.

Dans le fourrage, l'épandage de tout le lisier à l'automne (traitement 55-0-110) était le plus dommageable, comparé au témoin. La charge de NH_4^+ -N a augmenté de 58 %, avec une concentration moyenne de 0,60 mg N L⁻¹ (2,03 mg N L⁻¹ dans l'eau de ruissellement), comparativement à 0,38 mg N L⁻¹ (1,47 mg N L⁻¹ dans l'eau de ruissellement) pour le traitement témoin. La norme pour l'eau brute destinée à la consommation humaine avait donc été également dépassée.

Il s'avère donc qu'aussi bien dans le maïs que dans le fourrage, l'application généralisée de grandes quantités de lisier de porc, en plus de la fertilisation minérale normale, est une cause importante de contamination des eaux par NH_4^+ -N et NO_3^- -N, et ce, au-delà des normes acceptables pour la consommation humaine⁽²⁾.

(1) Concentration moyenne pondérée.

(2) À l'échelle d'un bassin versant, les concentrations réelles des différentes formes d'azote devraient être plus faibles que celles rapportées dans ce texte, à cause notamment de la dilution exercée par l'eau provenant des zones forestières amont et du prélèvement des fertilisants par la végétation aquatique. L'importance des concentrations rapportées dans ce document suggère cependant que la généralisation de telles pratiques peut affecter sérieusement la qualité de l'eau dans les bassins agricoles.

Phosphore

Les traitements n'ont eu aucun effet sur la charge de P-Total aussi bien dans le maïs que dans le fourrage ($p > 0,10$), (tableau 4). La charge moyenne était de $0,55 \text{ kg ha}^{-1}$, pour une concentration moyenne typique de $0,21 \text{ mg L}^{-1}$. Par contre, le fait d'épandre tout le lisier à l'automne dans le fourrage a doublé la charge de $\text{PO}_4\text{-P}$ comparé au témoin ($p < 0,10$). Aucun effet des traitements sur la charge de $\text{PO}_4\text{-P}$ n'a été observé dans le maïs ($p > 0,10$). La concentration moyenne de $\text{PO}_4\text{-P}$ occasionnée par le traitement 55-0-110 dans le fourrage était de $0,20 \text{ mg P L}^{-1}$ comparée à $0,13 \text{ mg P L}^{-1}$, pour le témoin.

Soulignons par contre que dans le maïs comme dans le fourrage, le fait d'épandre tout le lisier à l'automne a eu un effet significatif sur la charge de $\text{PO}_4\text{-P}$ dans l'eau de ruissellement ($p < 0,10$), (données non présentées) : comparativement aux témoins, les charges ont presque doublé dans le maïs ($0,21 \text{ vs } 0,14 \text{ kg P ha}^{-1}$), et plus que doublé dans le fourrage ($0,38 \text{ vs } 0,14 \text{ kg P ha}^{-1}$). Si l'on examine les résultats des trois premières années séparément, on s'aperçoit que l'effet du traitement 55-0-110 sur la charge de $\text{PO}_4\text{-P}$ dans le ruissellement a été significatif pendant la troisième année seulement. Cela suggère qu'à partir de cette année-là, l'épandage de P a commencé à excéder la capacité de sorption de la couche de surface du sol, provoquant le transport des orthophosphates par ruissellement. Le manque de données sur les concentrations de P dans l'eau pendant les années subséquentes nous empêche cependant de confirmer cette hypothèse.

Des résultats similaires ont été obtenus par Evans *et al.*, (1984) en Caroline du Nord, sur une prairie de graminées [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.] fertilisée avec du lisier de porc à raison de $1300 \text{ kg N ha}^{-1}$ (300 kg P ha^{-1}) pendant six ans. Dans notre projet, les normes de phosphore dans les lacs ($0,02 \text{ mg PO}_4\text{-P L}^{-1}$, et $0,03 \text{ mg P-Total L}^{-1}$; Sharpley *et al.*, 1987) ont été largement dépassées, ce qui démontre que l'épandage de grandes quantités de lisier de porc sur les prairies accroît les risques d'eutrophisation des eaux de surface. Phillips *et al.* (1981) ont montré que même dans le maïs, l'épandage de grandes quantités de fumier (soit à des taux $\geq 560 \text{ kg N ha}^{-1}$, c'est-à-dire $\geq 140 \text{ kg P ha}^{-1}$) est susceptible d'augmenter la concentration de $\text{PO}_4\text{-P}$ dans l'eau de drainage comparativement à l'épandage d'engrais minéraux phosphatés selon la dose agronomique.

Nos résultats démontrent donc l'importance de respecter strictement des niveaux de fertilisation correspondant aux besoins agronomiques des cultures pour prévenir l'eutrophisation des eaux de surface.

3.3.2 Charges et concentrations saisonnières

Les valeurs absolues des charges saisonnières pour toute la durée du projet par culture et par traitement sont présentées à l'annexe 3.

3.3.2.1 Azote total

Automne vs hiver

Les charges étaient plus faibles en hiver qu'à l'automne, quels que soient la culture et le traitement (tableau 5; figure 1). Mais les différences entre les charges saisonnières étaient plus élevées dans le maïs (35 kg ha⁻¹) que dans le fourrage (4 kg ha⁻¹). Dans le maïs, 45 % de la charge annuelle était perdue à l'automne, alors que 5 % de la charge annuelle était perdue en hiver. Dans le fourrage, 35 % de la charge annuelle était perdue à l'automne, comparativement à 10 % en hiver.

Hiver vs printemps

Les charges étaient plus élevées au printemps qu'en hiver, quels que soient la culture et le traitement (tableau 5; figure 1). Mais les différences entre les charges saisonnières étaient plus élevées dans le maïs (30 kg ha⁻¹) que dans le fourrage (6 kg ha⁻¹). Les charges printanières représentaient 35 % et 45 % de la charge annuelle dans le maïs et dans le fourrage, respectivement.

Printemps vs été

Les charges étaient plus faibles en été qu'au printemps, quels que soient la culture et le traitement (tableau 5; figure 1). Les charges estivales représentaient 15 % et 10 % de la charge annuelle dans le maïs et dans le fourrage, respectivement.

3.3.2.2 Azote ammoniacal

Automne vs hiver

Les charges étaient plus élevées en hiver qu'à l'automne, quels que soient la culture et le traitement. Le cas du traitement 180-0-360 dans le maïs était cependant particulier, puisqu'il avait provoqué la plus forte augmentation entre les deux saisons (tableau 5; figure 2). En effet, les charges ont augmenté de 0,96 kg ha⁻¹ (3 fois) entre l'automne et l'hiver comparativement à 0,15 kg ha⁻¹ (100 %) pour le traitement témoin (180-0-0). La concentration moyenne de NH₄⁺-N dans l'eau en hiver pour le traitement 180-0-360 était de 2,08 mg L⁻¹, comparée à 0,45 mg L⁻¹ pour le traitement témoin. Il en résulte que l'épandage de grandes quantités de lisier de porc à l'automne comporte d'importants risques environnementaux pour la qualité de l'eau en hiver, et confirme les résultats obtenus pendant les trois premières années (Gangbazo *et al.*, 1995; annexe 2). Aussi bien dans le maïs que dans le fourrage, les charges automnales représentaient 10 % de la charge annuelle. Par contre, les charges hivernales représentaient 35 % et 45 % de la charge annuelle dans le maïs et dans le fourrage, respectivement.

Tableau 5 Signification des valeurs *F* de l'analyse de variance des charges saisonnières d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage pendant 5 ans pour N et 3 ans pour P

Comparaison/Source [†]	N-Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	P-Total	PO ₄ ⁻ -P
<i>Automne vs hiver</i>					
Moyenne	*	*	*	ns	ns
C [‡]	*	ns	*	ns	ns
T(C) [†]	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Contraste</i>					
Maïs : 180 [‡] -0 [‡] -0 ^{††} vs 180-180-180	ns	ns	ns	ns	ns
Maïs : 180-0-0 vs 180-360-0	ns	ns	ns	ns	ns
Maïs : 180-0-0 vs 180-0-360	ns	*	ns	*	ns
Fourrage : 55-0-0 vs 55-55-55	ns	ns	ns	ns	ns
Fourrage : 55-0-0 vs 55-110-0	ns	ns	ns	ns	ns
Fourrage : 55-0-0 vs 55-0-110	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Hiver vs printemps</i>					
Moyenne	*	ns	*	*	*
C	*	ns	*	*	*
T(C)	ns	ns	ns	*	*
<i>Contraste</i>					
Maïs : 180-0-0 vs 180-180-180	ns	ns	ns	ns	ns
Maïs : 180-0-0 vs 180-360-0	ns	ns	ns	*	*
Maïs : 180-0-0 vs 180-0-360	ns	ns	ns	*	*
Fourrage : 55-0-0 vs 55-55-55	ns	ns	ns	ns	ns
Fourrage : 55-0-0 vs 55-110-0	ns	ns	ns	ns	ns
Fourrage : 55-0-0 vs 55-0-110	ns	ns	ns	*	*
<i>Printemps vs été</i>					
Moyenne	*	*	*	*	*
C	ns	*	ns	ns	ns
T(C)	ns	ns	ns	ns	*
<i>Contraste</i>					
Maïs : 180-0-0 vs 180-180-180	ns	ns	ns	ns	ns
Maïs : 180-0-0 vs 180-360-0	ns	ns	ns	*	*
Maïs : 180-0-0 vs 180-0-360	ns	*	*	ns	ns
Fourrage : 55-0-0 vs 55-55-55	ns	ns	ns	ns	ns
Fourrage : 55-0-0 vs 55-110-0	ns	ns	ns	ns	ns
Fourrage : 55-0-0 vs 55-0-110	ns	ns	ns	ns	ns

*, ns Significatif et non significatif à $P \leq 0.10$

[‡]C Culture

[†]T Traitement

[‡] Engrais minéral épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

^{††} Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

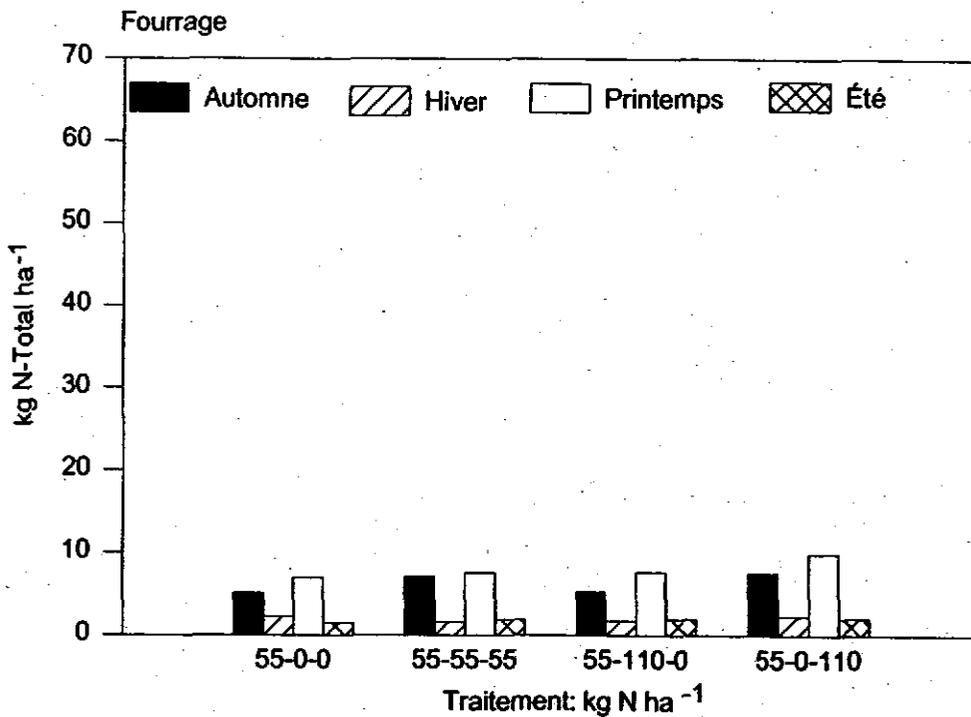
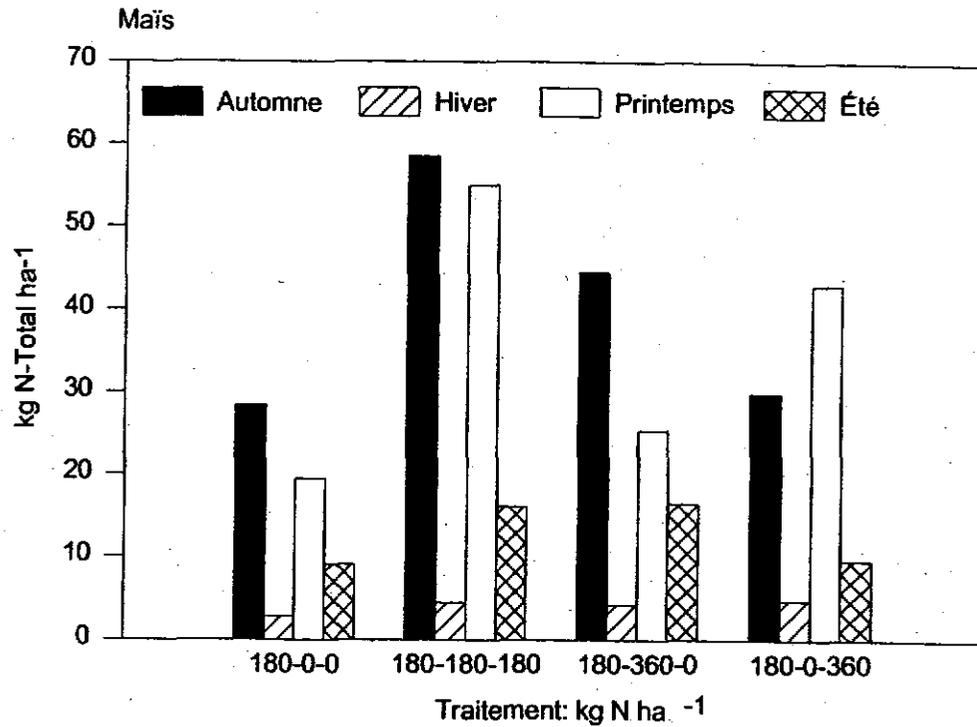


Figure 1 Effets des traitements sur les charges saisonnières d'azote total pendant 5 ans (1989-1994). Codes de traitement : premier chiffre = N minéral épandu au printemps; deuxième nombre = lisier de porc épandu au printemps; troisième nombre = lisier de porc épandu à l'automne, le tout en kg N ha⁻¹.

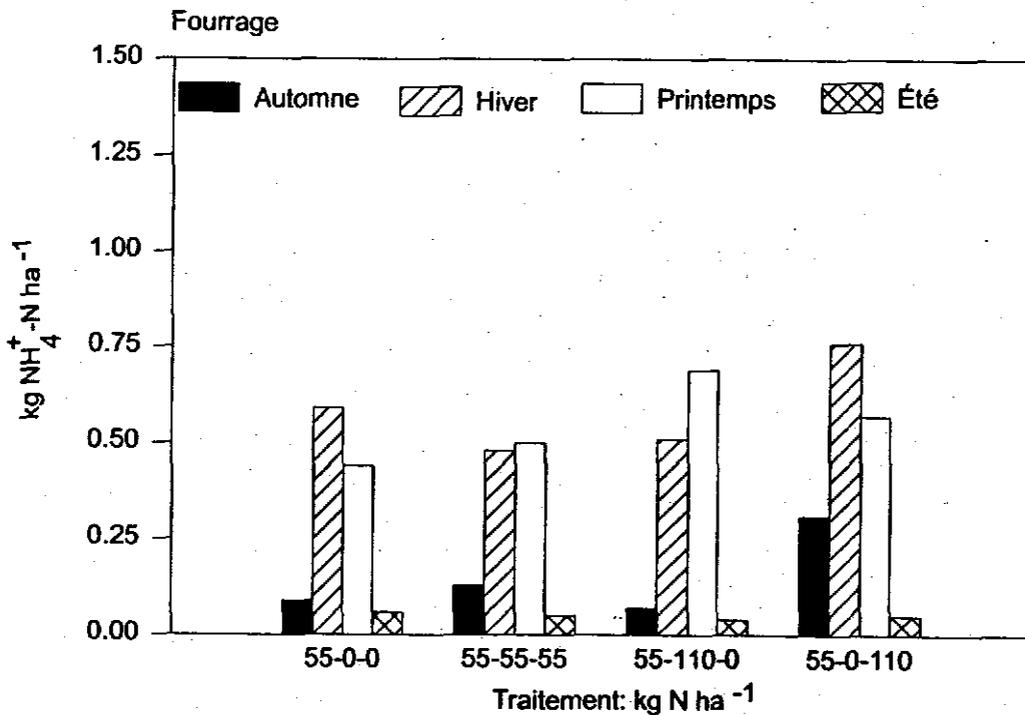
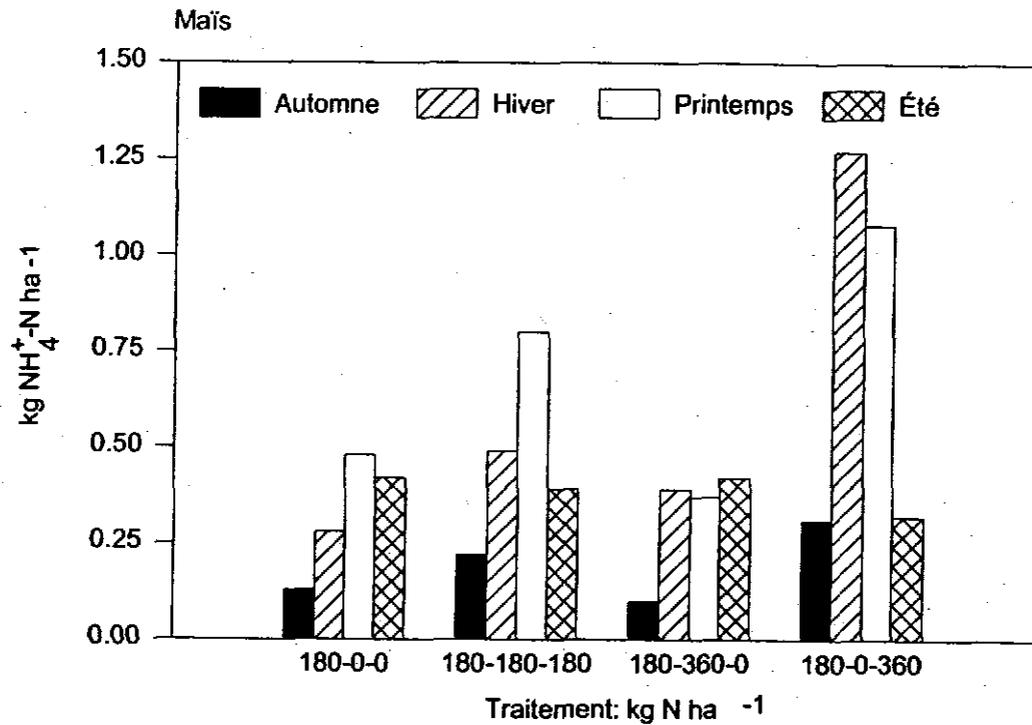


Figure 2 Effets des traitements sur les charges saisonnières d'azote ammoniacal pendant 5 ans (1989-1994). Codes de traitement : premier chiffre = N minéral épandu au printemps; deuxième nombre = lisier de porc épandu au printemps; troisième nombre = lisier de porc épandu à l'automne, le tout en kg N ha⁻¹.

Hiver vs printemps

Il n'y a eu aucun effet de culture ou de traitement sur les différences entre les charges hivernales et printanières (tableau 5; figure 2). Cependant, les charges printanières avaient tendance à être plus faibles que les charges hivernales, quels que soient la culture et le traitement. Malgré cette diminution, le traitement 180-0-360 dans le maïs a occasionné une concentration de 1,10 mg $\text{NH}_4^+\text{-N L}^{-1}$, soit au-dessus de la norme acceptable aux fins d'alimentation humaine. Cette concentration était le double de celle occasionnée par le traitement témoin. Les charges printanières représentaient 35 % et 40 % de la charge annuelle dans le maïs et dans le fourrage, respectivement.

Printemps vs été

De façon générale, les charges étaient plus faibles en été qu'au printemps, quels que soient la culture et le traitement. Le cas du traitement 180-0-360 dans le maïs était cependant particulier, puisqu'il avait provoqué la plus forte diminution entre les deux saisons (tableau 5; figure 2). En effet, les charges ont diminué de 0,76 kg ha^{-1} (70 %) entre le printemps et l'été, comparativement à une diminution de 0,02 kg ha^{-1} (12 %) pour le traitement témoin. Les charges estivales représentaient 20 % et 5 % de la charge annuelle dans le maïs et le fourrage, respectivement.

3.3.2.3 Nitrates

Automne vs hiver

Les charges étaient plus faibles en hiver qu'à l'automne, quels que soient la culture et le traitement (tableau 5; figure 3). Mais, comme pour N-Total, les différences entre les charges saisonnières étaient plus élevées dans le maïs (35 kg ha^{-1}) que dans le fourrage (4 kg ha^{-1}). Dans le maïs, 45 % de la charge totale annuelle était perdue à l'automne, comparativement à seulement 5 % en hiver. Au centre de la Suède, Bergström et Brink (1986) ont également observé que sur des parcelles de maïs fertilisées avec des engrais minéraux (0-200 kg ha^{-1}), les charges de $\text{NO}_3^-\text{-N}$ étaient très élevées à l'automne, et ont attribué ces pertes importantes à l'azote résiduel qui demeurait dans le sol après la récolte, et aux fortes pluies d'automne. Dans le fourrage, 40 % de la charge totale annuelle était perdue à l'automne, comparativement à 5 % en hiver.

Hiver vs printemps

De façon générale, les charges étaient plus élevées au printemps qu'en hiver, quels que soient la culture et le traitement (tableau 5; figure 3). Mais comme pour N-Total, les différences entre les charges saisonnières étaient plus élevées dans le maïs (30 kg ha^{-1}) que dans le fourrage (5 kg ha^{-1}). La proportion de la charge totale annuelle perdue au printemps était de 40 % dans le maïs, et 45 % dans le fourrage.

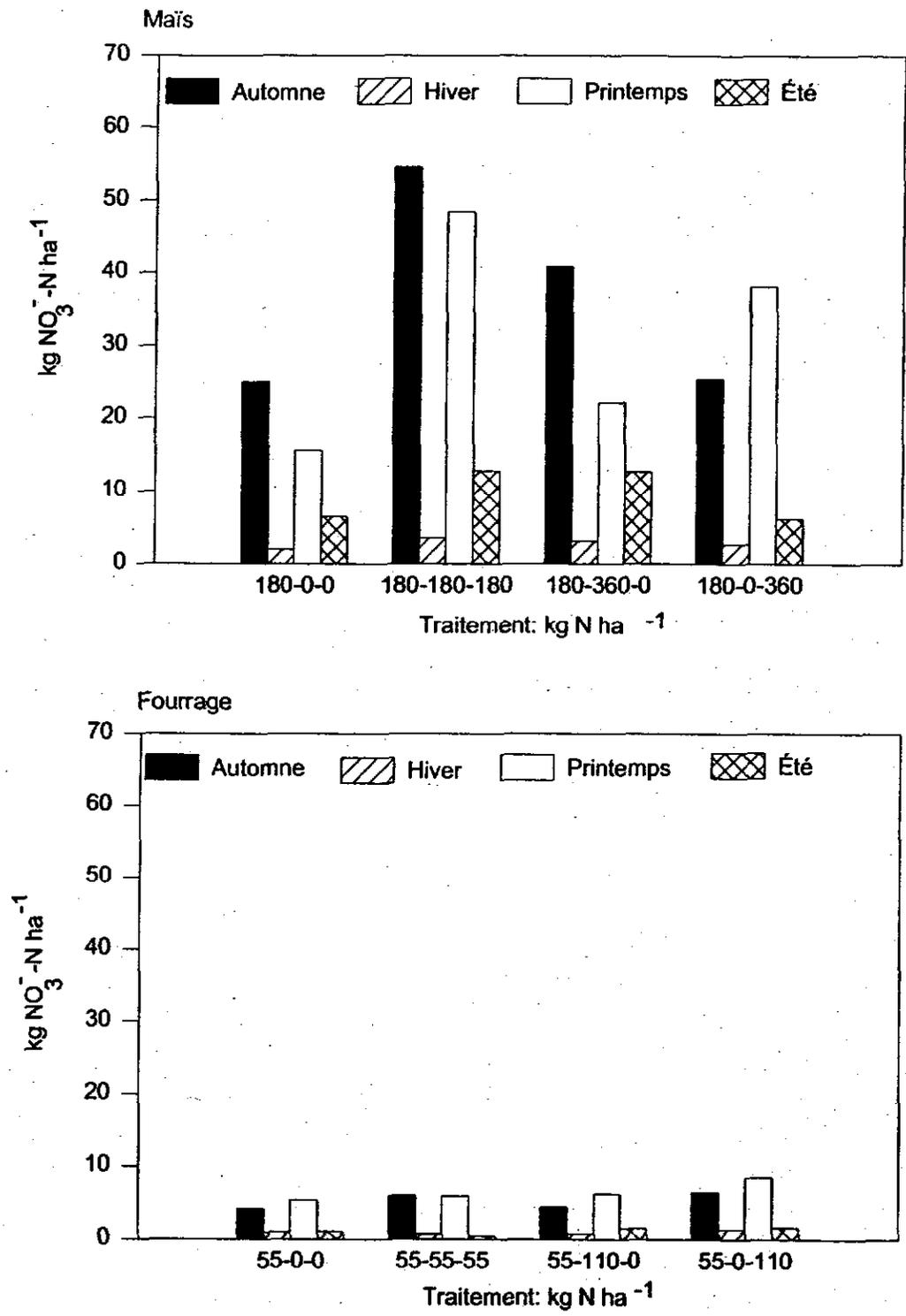


Figure 3 Effets des traitements sur les charges saisonnières de nitrates pendant 5 ans (1989-1994). Codes de traitement : premier chiffre = N minéral épandu au printemps; deuxième nombre = lisier de porc épandu au printemps; troisième nombre = lisier de porc épandu à l'automne, le tout en kg N ha⁻¹.

Printemps vs été

Les charges de NO_3^- -N étaient plus faibles en été qu'au printemps, quels que soient la culture et le traitement. Le cas du traitement 180-0-360 dans le maïs était cependant particulier puisqu'il avait provoqué la plus forte diminution entre les deux saisons (tableau 5; figure 3). En effet, les charges ont diminué de 32 kg ha^{-1} (84 %) entre le printemps et l'été, comparativement à 9 kg ha^{-1} (58 %) pour le traitement témoin. On remarque que dans le cas du traitement 180-180-180, la charge de nitrates a diminué également de 36 kg ha^{-1} (74 %) entre les deux saisons, soit du même ordre de grandeur que le traitement 180-0-360. Dans le cas du traitement 180-360-0, la diminution était de 9 kg ha^{-1} (40 %). Dix pour cent de la charge totale annuelle était perdue en été dans le maïs aussi bien que dans le fourrage.

3.3.2.4 Phosphore total

Automne vs hiver

Il n'y a eu aucun effet de culture ou de traitement sur les différences entre les charges automnales et hivernales (tableau 5; figure 4). Cependant, les charges hivernales avaient tendance à être plus élevées que les charges automnales pour le traitement 180-0-360 dans le maïs. La charge hivernale pour ce traitement ($0,33 \text{ kg ha}^{-1}$) équivalait à une concentration moyenne de $0,5 \text{ mg P L}^{-1}$. Dans le maïs, 20 % de la charge totale annuelle était perdue à l'automne, alors que 30 % était perdue en hiver. Dans le fourrage, 20 % de la charge annuelle était perdue à l'automne, alors que 40 % était perdue en hiver.

Hiver vs printemps

Dans le fourrage, les charges étaient plus faibles au printemps qu'en hiver, alors que dans le maïs, le profil des charges saisonnières (augmentation ou diminution) était différent selon les traitements ($p < 0,10$); (tableau 5; figure 4). Les différences significatives ($p < 0,10$) entre le traitement témoin et les traitements à base de lisier dans le maïs indiquaient une diminution de $0,05 \text{ kg ha}^{-1}$ (42 %) pour le traitement 180-360-0, et $0,17 \text{ kg ha}^{-1}$ (53 %) pour le traitement 180-0-360 entre l'hiver et le printemps. Par contre, le traitement témoin et le traitement 180-180-180 ont tous les deux provoqué une augmentation des charges entre l'hiver et le printemps, la différence entre les charges saisonnières étant plus élevée pour le traitement témoin ($0,13 \text{ kg ha}^{-1}$ ou 118 %) que pour traitement 180-180-180 ($0,09 \text{ kg ha}^{-1}$ ou 90 %). Le traitement 55-0-110 a provoqué la plus forte diminution entre les deux saisons, soit $0,21 \text{ kg ha}^{-1}$ (65 %) comparée à $0,06 \text{ kg ha}^{-1}$ (27 %) pour le traitement témoin. Dans le maïs et le fourrage, les charges printanières représentaient 30 % et 25 % de la charge totale annuelle.

Printemps vs été

Les charges étaient plus faibles en été qu'au printemps, quels que soient la culture et le traitement. Le cas du traitement 180-360-0 dans le maïs était cependant particulier, puisque les

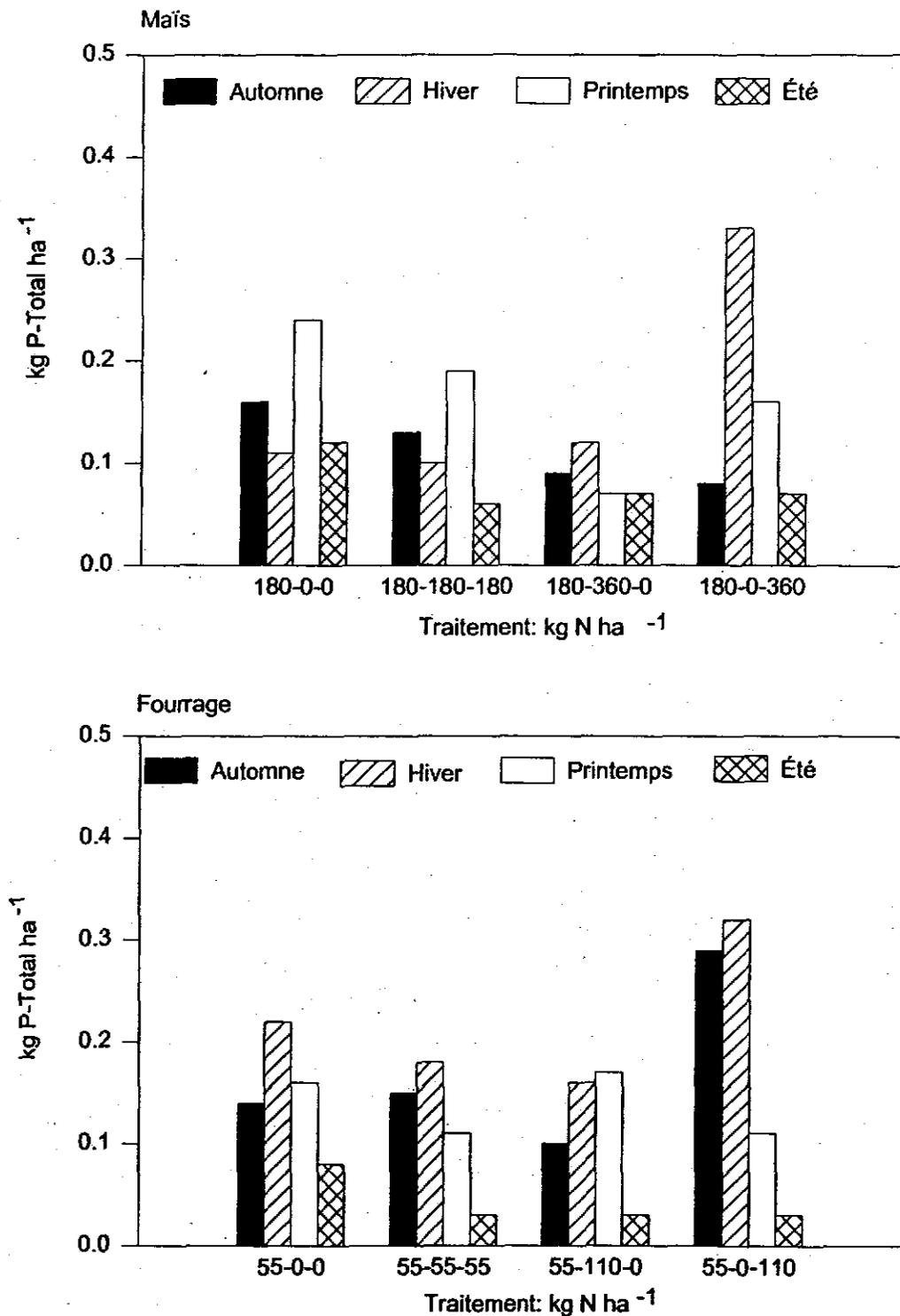


Figure 4

Effets des traitements sur les charges saisonnières de phosphore total pendant 3 ans (1989-1992). Codes de traitement : premier chiffre = N minéral épandu au printemps; deuxième nombre = lisier de porc épandu au printemps; troisième nombre = lisier de porc épandu à l'automne, le tout en kg N ha⁻¹.

charges printanières et estivales étaient sensiblement les mêmes, comparativement à une diminution de $0,30 \text{ kg ha}^{-1}$ (35 %) pour le traitement témoin 180-0-0 (tableau 5; figure 4). L'analyse de variance des charges estivales a montré qu'il n'y avait aucun effet de culture ou de traitement ($p > 0,10$). Les charges moyennes estivales étaient de $0,06 \text{ kg ha}^{-1}$, avec des concentrations estivales de $0,24 \text{ mg L}^{-1}$ dans le maïs, et $1,18 \text{ mg L}^{-1}$ dans le fourrage. Les charges estivales dans le maïs et le fourrage représentaient 20 % et 5 % de la charge totale annuelle.

3.3.2.5 Orthophosphatés

Automne vs hiver

Comme pour P-Total, il n'y a eu aucun effet de culture ou de traitement sur les différences entre les charges automnales et hivernales (tableau 5; figure 5). Dans le maïs, les charges automnales aussi bien que les charges hivernales représentaient 30 % de la charge totale annuelle, alors que dans le fourrage, les charges automnales et hivernales représentaient 40 % et 35 % de la charge totale annuelle.

Hiver vs printemps

Comme pour P-Total, les charges étaient plus faibles au printemps qu'en hiver dans le fourrage, alors que dans le maïs, le profil des charges saisonnières (augmentation ou diminution) était différent selon les traitements ($p < 0,10$), (tableau 5; figure 5). Les différences significatives ($p < 0,10$) entre le traitement témoin et les traitements à base de lisier dans le maïs indiquaient une diminution de $0,03 \text{ kg ha}^{-1}$ (60 %) pour le traitement 180-360-0, et de $0,09 \text{ kg ha}^{-1}$ (64 %) pour le traitement 180-0-360 entre l'hiver et le printemps. Par contre, le traitement témoin et le traitement 180-180-180 ont tous les deux provoqué une augmentation des charges entre l'hiver et le printemps, la différence entre les charges saisonnières étant plus faible pour le traitement témoin ($0,04 \text{ kg ha}^{-1}$ ou 100 %) que pour le traitement 180-180-180 ($0,09 \text{ kg ha}^{-1}$ ou 200 %). Le traitement 55-0-110 dans le fourrage a provoqué la plus forte diminution ($0,21 \text{ kg ha}^{-1}$ ou 65 %) entre l'hiver et le printemps, comparativement à une diminution $0,02 \text{ kg ha}^{-1}$ (22 %) pour le traitement témoin. Dans le maïs et le fourrage, les charges printanières représentaient 25 % et 20 % de la charge annuelle, respectivement.

Printemps vs été

Comme pour P-Total, les charges étaient, de façon générale, plus faibles en été qu'au printemps. C'était le cas quels que soient la culture et le traitement, sauf pour le traitement 180-360-0 dans le maïs (tableau 5; figure 5). Pour ce traitement, les charges ont augmenté de $0,01 \text{ kg ha}^{-1}$ (50 %) entre le printemps et l'été, comparativement à une diminution de $0,04 \text{ kg ha}^{-1}$ (50 %) pour le traitement témoin (180-0-0). L'analyse de variance des charges saisonnières a révélé qu'il n'y avait aucun effet de culture et de traitement ($p > 0,10$). La charge moyenne estivale était de $0,03 \text{ kg ha}^{-1}$, avec une concentration moyenne de $0,12 \text{ mg L}^{-1}$ dans le maïs, et $0,6 \text{ mg L}^{-1}$ dans

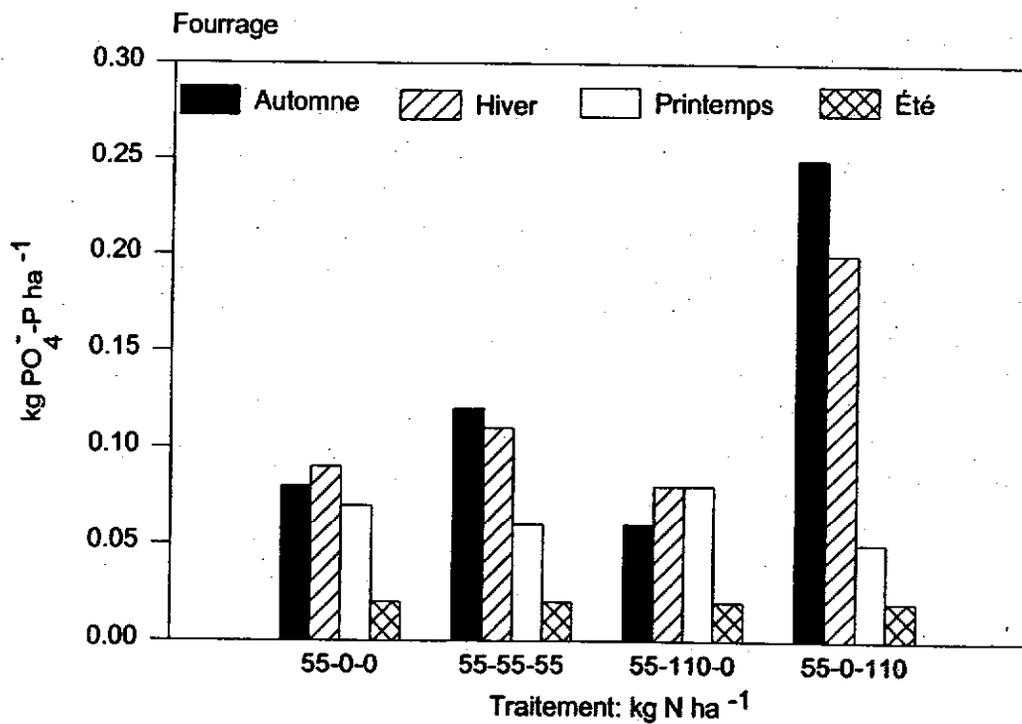
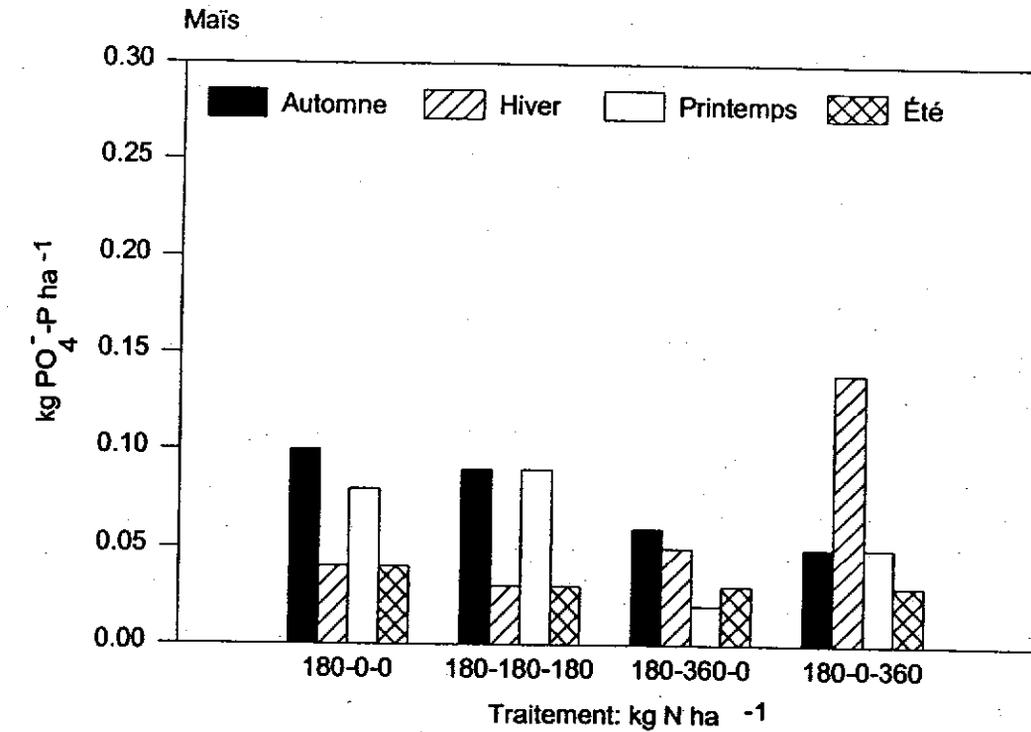


Figure 5 Effets des traitements sur les charges saisonnières d'orthophosphates pendant 3 ans (1989-1992). Codes de traitement : premier chiffre = N minéral épandu au printemps; deuxième nombre = lisier de porc épandu au printemps; troisième nombre = lisier de porc épandu à l'automne, le tout en kg N ha⁻¹.

le fourrage. Les charges estivales dans le maïs et le fourrage représentaient 15 % et 5 % de la charge annuelle, respectivement.

3.4 EFFETS SUR LE SOL

3.4.1 Azote total

L'azote total n'a été affecté ni par les cultures, ni par les traitements, quelle que soit la profondeur ($p > 0,10$), (tableau 6). Il s'avère donc qu'aucune accumulation ou migration significative de N-Total n'a eu lieu pendant la durée du projet. La quantité moyenne d'azote total à la fin du projet s'élevait à 5,0 Mg ha⁻¹ dans la couche 0-20 cm, à 3,3 Mg ha⁻¹ dans la couche 20-40 cm, à 1,7 Mg ha⁻¹ dans la couche 40-60 cm, à 1,4 Mg ha⁻¹ dans la couche 60-80 cm, et à 1,1 Mg ha⁻¹ dans la couche 80-100 cm. Ces valeurs correspondent sensiblement aux quantités présentes dans le sol au début du projet, soit : 5,7 Mg ha⁻¹, 3,1 Mg ha⁻¹, 1,2 Mg ha⁻¹, 1,0 Mg ha⁻¹ et 0,9 Mg ha⁻¹ dans les couches 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, et 80-100 cm respectivement. L'absence d'accumulation et de migration significative de N-Total dans le profil du sol s'explique probablement par la grande variabilité spatiale des concentrations dans le sol au début du projet, surtout dans la couche 0-20 cm.

D'autres auteurs ont cependant montré que l'épandage de fortes doses de lisier peut provoquer une accumulation de N-Total dans le sol. Dans certains cas, les taux d'épandage étaient cependant plus élevés que ceux utilisés dans le cadre de ce projet. Par exemple, les résultats de Motavalli *et al.* (1985), obtenus dans l'état du Wisconsin, indiquent que l'épandage du lisier de bovin (250 à 500 kg N-Total ha⁻¹) pour fertiliser des parcelles de maïs aménagées sur un loam sableux ou sur un loam limoneux a provoqué une augmentation significative de la concentration de N-Total jusqu'à 60 cm de profondeur dès la première année. De la même façon, à Ottawa, Culley *et al.* (1981) qui ont utilisé du lisier de bovin laitier pour fertiliser du maïs cultivé sur un loam sablo-argileux ont indiqué qu'à la récolte, la quantité de N-Total dans la couche 0-120 cm des parcelles ayant reçu 224 kg NTK ha⁻¹, 560 kg NTK ha⁻¹, et 879 kg NTK ha⁻¹ a augmenté de 59 %, 86 % et 78 % après trois années de fertilisation. Même dans les parcelles qui n'ont été fertilisées qu'avec des engrais minéraux conformément aux besoins agronomiques de la culture, la concentration de N-Total a eu aussi tendance à augmenter après cinq années de fertilisation. En Alberta, Chang *et al.* (1991) ont aussi montré qu'après onze années d'épandage à forte dose (de 480 à 2 880 kg N-Total ha⁻¹) de lisier de bovin de boucherie sur un loam argileux cultivé en orge, l'accumulation de N-Total a été observée jusqu'à 150 cm de profondeur.

3.4.2 Azote ammoniacal

L'azote ammoniacal n'est pas une forme de l'azote qui se trouve normalement en grande quantité dans le sol, sauf tôt après l'épandage du lisier. Elle se nitrifie ou se volatilise après l'épandage selon les conditions de température et d'humidité. Dans ce projet, l'azote ammoniacal a été affecté par les cultures et par les traitements jusqu'à 40 cm de profondeur ($p < 0,10$), (tableau 7). Le fourrage a accumulé plus de NH₄⁺-N que le maïs jusqu'à cette profondeur. Dans la couche 0-20 cm, la quantité d'azote sous forme ammoniacale était en moyenne 40 % plus élevée sous

Tableau 6 Effets des cultures et des traitements sur la quantité d'azote total dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

	Profondeur (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
	kg N-Total ha ⁻¹				
<i>Culture</i>					
Maïs	5 071a ¹	3 427a	1 788a	1 492a	1 111a
Fourrage	5 172a	3 424a	1 651a	1 382a	1 142a
<i>Traitement</i>					
Maïs : 180 [†] -0 [‡] -0 [§]	5 409	3 662	1 701	1 437	1 096
Maïs : 180-180-180	5 349	3 626	1 569	1 250	960
Maïs : 180-360-0	4 749	4 034	2 179	1 696	1 188
Maïs : 180-0-360	4 778	2 383	1 704	1 586	1 200
Fourrage : 55-0-0	6 064	3 093	1 394	1 341	1 183
Fourrage : 55-55-55	5 092	3 194	1 819	1 356	1 070
Fourrage : 55-110-0	4 682	3 535	1 802	1 538	1 214
Fourrage : 55-0-110	4 852	3 873	1 584	1 291	1 108

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

¹ Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P = 0,10$ pour la culture seulement.

Tableau 7 Effets des cultures et des traitements sur la quantité d'azote ammoniacal dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

	Profondeur (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
	kg NH ₄ ⁺ -N ha ⁻¹				
<i>Culture</i>					
Maïs	23,4a [†]	8,7a	6,7a	- [§]	-
Fourrage	32,9a	19,2b	7,0a	-	-
<i>Traitement</i>					
Maïs : 180 [†] -0 [‡] -0 [§]	24,7	11,9	6,0	-	-
Maïs : 180-180-180	23,2	5,2	4,9	-	-
Maïs : 180-360-0	25,5	11,3	9,0	-	-
Maïs : 180-0-360	20,2	6,5	6,6	-	-
Fourrage : 55-0-0	59,3	43,4	8,8	-	-
Fourrage : 55-55-55	44,6	10,5c	6,8	-	-
Fourrage : 55-110-0	7,3c ^f	8,3c	4,3	-	-
Fourrage : 55-0-110	20,7	14,2c	8,0	-	-

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

[¶] Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P = 0,10$ pour la culture seulement.

^f Indique que ce traitement diffère ($p \leq 0,10$) du traitement témoin (fertilisant minéral seul, 180-0-0 pour le maïs, 55-0-0 pour le fourrage).

[§] Plusieurs données manquantes

le fourrage que sous le maïs, alors que dans la couche 20-40 cm, elle était deux fois plus élevée sous le fourrage que sous le maïs. Sous le fourrage, l'utilisation du lisier de porc en plus des engrais minéraux a même diminué l'accumulation de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ dans la couche 20-40 cm ($p < 0,10$) comparativement au témoin (traitement 55-0-0), probablement parce que la charge de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ dans l'eau a légèrement augmenté (tableau 4). Entre l'automne 1989 et l'automne 1994, les quantités d'azote ammoniacal ont en moyenne quadruplé (6,5 à 28,1 kg ha^{-1}) dans la couche 0-20 cm, doublé (6,3 à 13,9 kg ha^{-1}) dans la couche 20-40 cm, mais n'ont augmenté que de 30 % (5,0 à 6,8 kg ha^{-1}) dans la couche 40-60 cm.

Chang *et al.* (1991) n'ont cependant décelé aucun effet significatif de l'épandage du lisier sur l'azote ammoniacal dans le sol, bien que les taux d'épandage utilisés soient 17 fois plus élevés que les nôtres et que la durée de l'essai soit deux fois plus longue.

3.4.3 Nitrates

Le maïs a accumulé plus de nitrates que le fourrage jusqu'à 1,0 m de profondeur ($p < 0,10$), (tableau 8). La différence entre le maïs et le fourrage s'est accrue avec la profondeur, passant de 70 % dans la couche 0-20 cm à 12 fois dans la couche 80-100 cm. L'ajout du lisier de porc aux engrais minéraux a provoqué une accumulation des nitrates dans toutes les couches de sol sous le maïs, mais pas sous le fourrage. Dans la couche 0-20 cm par exemple, le traitement 180-180-180 a plus que doublé la quantité de nitrates comparativement au témoin (traitement 180-0-0). Les quantités de nitrates dans les parcelles de maïs étaient plus faibles à l'automne 1994 qu'à l'automne 1989, où elles s'élevaient à 205 kg ha^{-1} , 103 kg ha^{-1} , 57 kg ha^{-1} , 50 kg ha^{-1} et 50 kg ha^{-1} dans les couches 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm et 80-100 cm, respectivement. La faiblesse relative de la quantité de nitrates dans le sol à l'automne 1994 suggère que la migration a atteint les couches plus profondes du sol.

Les résultats précédents confirment ceux obtenus par plusieurs autres auteurs selon lesquels la surfertilisation accroît la concentration et la migration des nitrates dans le sol (Westerman *et al.*, 1987; Chang *et al.*, 1991; Angle *et al.*, 1993; Liang et Mackenzie, 1994).

3.4.4 Phosphore total

L'effet des cultures et des traitements sur le P-Total a varié selon la couche de sol (tableau 9), si bien qu'il est difficile de se prononcer. La quantité moyenne de P-Total dans la couche 0-20 cm (3,2 Mg ha^{-1}) est deux fois plus élevée que dans chacune des couches sous-jacentes (de l'ordre de 1,6 Mg ha^{-1} en moyenne), ce qui indique quand même une concentration plus élevée dans la couche de surface. Entre l'automne 1989 et l'automne 1994, la quantité de P-Total a augmenté de 60 % dans la couche 0-20 cm (2,0 Mg ha^{-1} à 3,2 Mg ha^{-1}). Dans les couches subséquentes, les augmentations étaient plus faibles : 28 % dans la couche 20-40 cm (1,4 à 1,8 Mg ha^{-1}), 27 % dans la couche 40-60 cm (1,1 à 1,4 Mg ha^{-1}), 33 % dans la couche 60-80 cm (1,2 à 1,6 Mg ha^{-1}), et 23 % dans la couche 80-100 cm (1,3 à 1,6 Mg ha^{-1}).

Tableau 8 Effets des cultures et des traitements sur la quantité de nitrates dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

	Profondeur (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
	kg NO ₃ -N ha ⁻¹				
<i>Culture</i>					
Maïs	95,7a [†]	61,3a	39,0a	28,4a	23,6a
Fourrage	55,6b	19,9b	5,4b	4,7b	1,8b
<i>Traitement</i>					
Maïs : 180 [†] -0 [‡] -0 [§]	57,0	23,0	19,9	18,2	18,3
Maïs : 180-180-180	144,8c [†]	88,7c	51,6c	31,3c	19,8
Maïs : 180-360-0	127,6c	83,8c	43,7c	26,9	21,7
Maïs : 180-0-360	53,2	22,0	41,0c	37,1c	34,6c
Fourrage : 55-0-0	47,1	22,1	4,2	1,0	0,8
Fourrage : 55-55-55	81,0	19,3	8,4	6,9	2,3
Fourrage : 55-110-0	47,6	13,0	5,5	7,9	2,4
Fourrage : 55-0-110	46,9	25,0	3,3	3,1	1,8

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹.

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹.

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹.

[†] Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P = 0,10$ pour la culture seulement.

[‡] Indique que ce traitement diffère ($p \leq 0,10$) du traitement témoin (fertilisant minéral seul, 180-0-0 pour le maïs, 55-0-0 pour le fourrage).

Tableau 9 Effets des cultures et des traitements sur la quantité de phosphore total dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

	Profondeur (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
	kg P-Total ha ⁻¹				
<i>Culture</i>					
Maïs	3 312a ^f	1 723a	1 524a	1 600a	1 672a
Fourrage	3 100a	1 922b	1 440b	1 589a	1 670a
<i>Traitement</i>					
Maïs : 180 [†] -0 [‡] -0 [§]	3 400	1 747	1 555	1 620	1 716
Maïs : 180-180-180	3 510	1 877	1 540	1 517	1 692
Maïs : 180-360-0	3 276	1 942	1 538	1 538	1 653
Maïs : 180-0-360	3 058	1 330 ^{c,f}	1 462	1 728	1 629
Fourrage : 55-0-0	3 226	1 778	1 411	1 548	1 605
Fourrage : 55-55-55	3 005	1 841	1 486	1 709	1 714
Fourrage : 55-110-0	3 060	2 134	1 498	1 553	1 706
Fourrage : 55-0-110	3 112	1 942	1 363	1 545	1 656

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

[†] Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P = 0,10$ pour la culture seulement.

^f Indique que ce traitement diffère ($p \leq 0,10$) du traitement témoin (fertilisant minéral seul, 180-0-0 pour le maïs, 55-0-0 pour le fourrage).

Dans l'expérience de Culley *et al.* (1981), la plus forte dose de lisier (219 kg P ha⁻¹) a provoqué une accumulation significative de P-Total, qui a été restreinte cependant à la couche 0-30 cm au bout de cinq ans. Mais, tout comme dans notre expérience, la période d'épandage (automne, printemps, fractionnement entre l'automne et le printemps) n'a pas influencé l'accumulation de P-Total. Chang *et al.* (1991) ont observé aussi une accumulation de P-Total dans la couche 0-30 cm sur le site non irrigué, et dans la couche 0-60 cm sur le site irrigué, ce qui démontre l'influence des conditions hydriques sur le transport du phosphore.

3.4.5 Orthophosphates

Les effets de la culture et des traitements ont été restreints à la couche 0-20 cm ($p < 0,10$), (tableau 10). Dans cette couche, l'accumulation de phosphore extraite par la méthode Mehlich III a été de 53 % plus élevée sous le maïs que sous le fourrage. On se souviendra qu'en moyenne, le fourrage avait perdu plus d'orthophosphates dans l'eau que le maïs. Sous le maïs, l'ajout de lisier aux engrais minéraux a augmenté les quantités de PO₄-P de 38 % à 50 % par rapport au témoin (traitement 180-0-0). Aucun effet significatif des traitements n'a été observé sous le fourrage ($p > 0,10$). Entre l'automne 1989 et l'automne 1994, dans la couche 0-20 cm, les quantités d'orthophosphates ont augmenté de 70 % sous le maïs (195,0 à 335,0 kg ha⁻¹), et de 12 % sous le fourrage (195,0 à 218 kg ha⁻¹). À cause de la fertilisation excessive, on est donc passé en 5 ans d'un sol riche (151-250 kg P ha⁻¹) à un sol excessivement riche (> 251 kg P ha⁻¹), (CPVQ, 1994). Dans les couches plus profondes, l'augmentation des quantités de P a été comme suit : 10 % dans la couche 20-40 cm (98,0 à 107,4 kg ha⁻¹), 38 % dans la couche 40-60 cm (53,9 à 74,5 kg ha⁻¹), 72 % dans la couche 60-80 cm (30,8 à 53,0 kg ha⁻¹), et 37 % dans la couche 80-100 cm (23,0 à 31,5 kg ha⁻¹).

Sutton *et al.* (1986) ont rapporté aussi une accumulation d'orthophosphates dans les couches superficielles du sol, surtout avec le taux d'épandage le plus élevée, soit 605 kg N-Total ha⁻¹ (168 kg P-Total ha⁻¹). L'expérience avait été effectuée avec du lisier de bovin appliqué sur un laom limoneux cultivé en maïs pendant cinq ans. Selon les résultats rapportés par Chang *et al.*, (1991), l'accumulation des orthophosphates a atteint les couches plus profondes : 90 cm sur le site non irrigué, et 120 cm sur le site irrigué. Cependant, Motavalli *et al.*, (1985) n'ont rapporté aucune accumulation d'orthophosphates, même avec des taux d'épandage de l'azote qui s'apparentent à ceux utilisés dans ce projet. La durée du projet n'était cependant que de deux ans. L'accumulation d'orthophosphates aurait probablement été observée si le projet avait duré plus longtemps.

3.5 EFFETS SUR LES CULTURES

3.5.1 Maïs

Le fait de fractionner la dose de lisier entre l'automne et le printemps (traitement 180-180-180) a augmenté le rendement des épis de 25 % par rapport au témoin ($p < 0,10$); (tableau 11). Par conséquent, le prélèvement de l'azote total et du phosphore total par les épis a augmenté de 25 % et 32 %, respectivement ($p < 0,10$), (tableau 11). On peut constater aussi que tous les autres

Tableau 10 Effets des cultures et des traitements sur la quantité d'orthophosphates dans le sol, à l'automne, après cinq années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

	Profondeur (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
	kg PO ₄ -P ha ⁻¹				
<i>Culture</i>					
Maïs	335,0a [†]	114,5a	78,0a	53,5a	34,5a
Fourrage	218,0b	100,3a	71,2a	52,6a	28,5a
<i>Traitement</i>					
Maïs : 180 [†] -0 [‡] -0 [§]	254,1	132,7	79,2	48,9	25,9
Maïs : 180-180-180	350,8c ^f	115,4	60,0	39,3	30,5
Maïs : 180-360-0	384,0c	119,5	103,9	62,6	37,7
Maïs : 180-0-360	350,4c	90,7	68,4	62,8	44,4
Fourrage : 55-0-0	236,4	117,3	70,8	38,9	28,6
Fourrage : 55-55-55	228,2	108,5	86,6	55,7	23,5
Fourrage : 55-110-0	193,1	97,2	69,6	84,2	40,5
Fourrage : 55-0-110	212,8	78,7	57,6	31,7	21,7

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

[†] Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P = 0,10$ pour la culture seulement.

^f Indique que ce traitement diffère ($p \leq 0,10$) du traitement témoin (fertilisant minéral seul, 180-0-0 pour le maïs, 55-0-0 pour le fourrage).

Tableau 11 Effets des traitements sur le rendement du maïs et le prélèvement d'azote total et de phosphore total pendant 5 ans

Traitements	Rendement t ha ⁻¹ .an ⁻¹	N-Total kg ha ⁻¹ .an ⁻¹	P-Total kg ha ⁻¹ .an ⁻¹
Épis			
180 [†] -0 [‡] -0 [§]	5,7	75,9	18,9
180-180-180	7,1c ^f	94,7c	25,1c
180-360-0	6,1	83,7	21,8
180-0-360	6,4	87,5	23,1
Plants entiers			
180 [†] -0 [‡] -0 [§]	11,6	153,5	26,0
180-180-180	14,0c ^f	187,2	33,3c
180-360-0	12,5	167,6	28,1
180-0-360	12,4	168,3	24,7
Moyenne		169,1	

† Engrais minéral, kg N ha⁻¹

‡ Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

§ Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

¶ Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P = 0,10$ pour la culture seulement.

∫ Indique que ce traitement diffère ($p \leq 0,10$) du traitement témoin (fertilisant minéral seul, 180-0-0 pour le maïs).

traitements ont provoqué des augmentations de rendement et de prélèvement de N et de P. Par contre, la concentration de nitrates dans les épis n'a pas été influencée par les traitements ($p > 0,10$), s'élevant à 38,8 ppm (données non présentées).

Pour les plants entiers, le fait de fractionner la dose de lisier entre l'automne et le printemps a également augmenté le rendement de 21 % ($p < 0,10$), (tableau 11). Le prélèvement de l'azote total, dû au traitement 180-180-180, semble aussi plus élevé, quoique non significatif ($p > 0,10$). Cependant, le prélèvement de P-Total a augmenté de 28 % comparé au témoin ($p < 0,10$); (tableau 11). Les autres traitements n'ont provoqué que de très faibles augmentations de rendement et de prélèvement de N et de P par rapport au témoin ($p > 0,10$). Remarquons que le fait d'épandre toute la dose de lisier à l'automne a augmenté de 75 % la concentration moyenne de nitrates dans les plants entiers comparativement au témoin ($p < 0,10$), (données non présentées). La concentration de nitrates a atteint 563 ppm, comparée à une valeur moyenne de 370 ppm pour tous les autres traitements, y compris le témoin. Ces valeurs demeurent cependant inférieures à 1000 ppm, concentration jugée toxique pour les animaux (Noller et Rhykerd, 1974).

Avec un pourcentage de récupération de l'azote total des fertilisants de 17 %, le traitement 180-0-0 a été le plus efficace, suivi du traitement 180-180-180, avec 12 %. Les traitements 180-360-0 et 180-0-360 n'ont récupéré que 8 % et 9 % de l'azote, respectivement (tableau 13). La récupération du phosphore total a été en général très faible, variant de 0,7 % pour le traitement 180-0-360, à 4,3 % pour le traitement 180-0-0 (tableau 14).

3.5.2 Fourrage

Le rendement et le prélèvement de N et de P obtenus lors de la première coupe du fourrage n'ont pas été affectés par les traitements ($p > 0,10$), (tableau 12). Le rendement moyen était de 4,4 t ha⁻¹. Cependant, le traitement 55-110-0 a augmenté de 43 % la concentration de nitrates dans le fourrage comparativement au témoin ($p < 0,10$), (données non présentées). Celle-ci a atteint 1 315 ppm, une valeur qui est par contre inférieure à la concentration de 3 000 ppm jugée toxique pour les animaux (Hajjati *et al.*, 1972).

Lors de la deuxième coupe, les traitements 55-55-55 et 55-110-0 ont augmenté le rendement du fourrage de 10 % et 17 %, respectivement ($p < 0,10$), et le prélèvement de N-Total par le fourrage de 18 % chacun ($p < 0,10$). Aucun effet significatif des traitements sur P-Total n'a été observé (tableau 12). Le prélèvement moyen de P-Total était de 8,6 kg ha⁻¹.an⁻¹. Mais contrairement à la première coupe, les traitements n'ont pas affecté la concentration de nitrates dans le fourrage, avec une moyenne de 312 ppm ($p > 0,10$), (données non présentées). Cependant, l'ajout de lisier aux engrais minéraux a provoqué des concentrations de nitrates dans le fourrage de 1,5 à 2,1 fois celles mesurées sur les parcelles témoin.

Avec un pourcentage de récupération de l'azote total des fertilisants de 62 %, le traitement 55-0-0 a été le plus efficace, suivi des traitements 55-110-0 et 55-0-110, avec 31 % et 27 % respectivement. Le traitement 55-55-55 n'a récupéré que 12 % de l'azote total épandu (tableau 13).

Tableau 12 Effets des traitements sur le rendement du fourrage et le prélèvement d'azote total et de phosphore total pendant 5 ans

Traitement	Rendement t ha ⁻¹ .an ⁻¹	N-Total kg ha ⁻¹ .an ⁻¹	P-Total kg ha ⁻¹ .an ⁻¹
Première coupe			
55 [†] -0 [‡] -0 [§]	4,4	97,8	10,4
55-55-55	4,6	108,2	12,2
55-110-0	4,2	102,5	10,8
55-0-110	4,6	103,4	11,5
Moyenne	4,4	102,9	11,2
Deuxième coupe			
55 [†] -0 [‡] -0 [§]	2,9	64,9	7,6
55-55-55	3,2 ^c	76,8 ^c	9,0
55-110-0	3,4 ^c	76,8 ^c	9,0
55-0-110	3,1	71,3	8,7
Moyenne			8,6

† Engrais minéral, kg N ha⁻¹

‡ Lisière de porc épandue au printemps, kg N ha⁻¹

§ Lisière de porc épandue à l'automne, kg N ha⁻¹

¶ Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P = 0,10$ pour la culture seulement.

∗ Indique que ce traitement diffère ($p \leq 0,10$) du traitement témoin (fertilisant minéral seul, 55-0-0 pour le fourrage).

Tableau 13 Récupération de l'azote total par les cultures pendant 5 ans

Culture	Traitement	Apport par les fertilisants kg N-Total ha ⁻¹	Prélèvement par les cultures kg N-Total ha ⁻¹	Récupération réelle ^f	
				Kg N-Total ha ⁻¹	P. cent
Maïs	0 [†] -0 [‡] -0 [§]	0	607	607	-
	180-0-0	900	765	158	17,6
	180-180-180	2 700	935	328	12,1
	180-360-0	2 700	835	228	8,4
	180-0-360	2 700	840	233	8,6
Fourrage	0-0-0	0	642	642	-
	55-0-0	275	814	172	62,5
	55-55-55	825	926	101	12,2
	55-110-0	825	895	253	30,7
	55-0-110	825	870	228	27,6

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

^f N prélevé par le traitement cité moins N prélevé par le traitement 0-0-0, en valeur absolue ou en pourcentage par rapport aux apports par les fertilisants.

La récupération du phosphore total a été en général très faible, variant de 3,6 % à 4,7 % (tableau 14).

3.6 BILAN

Le bilan de l'azote total (tableau 15) et du phosphore total (tableau 16) a été établi pour chaque traitement, et pour toute la couche de sol (0-100 cm) selon l'équation suivante :

$$\text{Entrées} - \text{Sorties} = \text{Stock}$$

Les « entrées » comprennent les quantités de N et P présentes dans le sol au début du projet ainsi que les quantités ajoutées sous forme de lisier de porc et d'engrais minéraux. Les « sorties » comprennent les pertes par ruissellement et drainage ainsi que les prélèvements par les végétaux. Le stock théorique a été calculé en soustrayant les sorties des entrées. Les valeurs obtenues ont été comparées au stock réel qui existait dans le sol à la fin du projet.

Certaines hypothèses ont été utilisées pour établir les bilans, à savoir :

- Les apports par les précipitations et les pertes d'azote par dénitrification et volatilisation (N) ont été considérés comme négligeables.
- Les pertes d'azote au cours de la quatrième année ont été estimées comme étant la moyenne des pertes pour les quatre autres années. De la même façon, les pertes de phosphore au cours de la quatrième et de la cinquième année ont été estimées comme étant la moyenne des pertes des trois premières années.

3.6.1 Azote total

Dans le maïs, les sorties étaient généralement inférieures aux apports par les fertilisants, sauf pour les traitements 0-0-0 et 180-0-0, ce qui suggère un stockage de l'azote pour tous les traitements à base de lisier de porc et une diminution des réserves d'azote du sol pour les autres traitements. Les valeurs théoriques du stock en font foi. Dans le fourrage par contre, les sorties étaient supérieures aux apports par les fertilisants, ce qui suggère une diminution des réserves d'azote du sol, une tendance que semblent confirmer les valeurs théoriques du stock. On peut constater que les valeurs théoriques et réelles sont relativement proches les unes des autres, la différence entre les deux variant de - 7 % à + 33 % dans le maïs, et de 0 % à 13 % dans le fourrage.

3.6.2 Phosphore total

Aussi bien dans le maïs que dans le fourrage, les sorties étaient inférieures aux apports par les fertilisants, sauf pour le traitement 0-0-0, ce qui suggère un stockage du phosphore pour tous ces traitements, et une diminution des réserves pour le traitement 0-0-0. Les valeurs théoriques du

Tableau 14 Récupération du phosphore total par les cultures pendant 5 ans

Culture	Traitement	Apport par les fertilisants kg P-Total ha ⁻¹	Prélèvement par les cultures kg P-Total ha ⁻¹	Récupération réelle ^f	
				Kg P-Total ha ⁻¹	P. cent
Maïs	0 [†] -0 [‡] -0 [§]	0	114	114	-
	180-0-0	375	130	16	4,3
	180-180-180	1 325	166	52	3,9
	180-360-0	1 325	140	26	2,0
	180-0-360	1 325	123	9	0,7
Fourrage	0-0-0	0	80	80	-
	55-0-0	250	90	10	4,0
	55-55-55	550	106	26	4,7
	55-110-0	550	99	19	3,5
	55-0-110	550	100	20	3,6

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

^f P prélevé par le traitement cité moins P prélevé par le traitement 0-0-0, en valeur absolue ou en pourcentage par rapport aux apports par les fertilisants.

Tableau 15 Bilan de l'azote total après 5 années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

Culture	Traitement	Entrées		Sorties		Stock ¹		Différence ^f	P. cent
		Sol	Fertilisants	Eau	Récoltes	Théorique	Réel		
		Kg N-Total ha ⁻¹		Kg N-Total ha ⁻¹		Kg N-Total ha ⁻¹		Kg N-Total ha ⁻¹	
Maïs	0 [†] -0 [‡] -0 [§]	11 300	0	270	607	10 423	12 504	2 081	16,6
	180-0-0	10 160	900	336	765	9 959	13 305	3 346	25,1
	180-180-180	11 025	2 700	740	935	12 050	12 754	704	5,5
	180-360-0	12 180	2 700	575	835	13 470	13 846	376	2,7
	180-0-360	11 205	2 700	510	840	12 555	11 651	- 904	- 7,8
Fourrage	0-0-0	11 750	0	57	642	11 051	11 205	154	1,4
	55-0-0	13 523	275	83	814	12 901	13 075	174	1,3
	55-55-55	11 689	825	101	926	11 487	12 531	1 044	8,3
	55-110-0	11 441	825	91	895	11 280	12 771	1 491	11,7
	55-0-110	12 856	825	120	870	12 691	12 700	10	0,1

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

¹ Stock théorique = Entrées - Sorties; Stock réel = Quantités présentes dans le sol à la fin du projet

^f Différence = Stock réel - Stock théorique, en valeur absolue et en pourcentage par rapport au Stock théorique

Tableau 16 Bilan du phosphore total après 5 années de fertilisation à base d'engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc

Culture	Traitement	Entrées		Sorties		Stock ¹		Différence ^f	P. cent
		Sol	Fertilisants	Eau	Récoltes	Théorique	Réel		
		Kg N-Total ha ⁻¹		Kg N-Total ha ⁻¹		Kg N-Total ha ⁻¹		Kg N-Total ha ⁻¹	
Maïs	0 [†] -0 [‡] -0 [§]	6 297	0	2,82	114	6 180	9 523	3 343	35,1
	180-0-0	6 335	375	3,15	130	6 577	10 038	3 461	34,5
	180-180-180	7 176	1 325	2,45	166	8 333	10 136	1 803	17,8
	180-360-0	6 830	1 325	1,80	140	8 013	9 947	1 934	19,4
	180-0-360	6 789	1 325	3,10	123	7 988	9 207	1 219	13,2
Fourrage	0-0-0	6 784	0	2,00	80	6 702	8 998	2 296	25,5
	55-0-0	7 208	250	2,90	90	7 365	9 568	2 203	23,0
	55-55-55	6 962	550	2,50	106	7 404	9 755	2 352	24,1
	55-110-0	6 270	550	2,25	99	6 719	9 951	3 232	32,5
	55-0-110	8 133	550	3,90	100	8 579	9 618	1 039	10,8

[†] Engrais minéral, kg N ha⁻¹

[‡] Lisier de porc épandu au printemps, kg N ha⁻¹

[§] Lisier de porc épandu à l'automne, kg N ha⁻¹

¹ Stock théorique = Entrées - Sorties; Stock réel = Quantités présentes dans le sol à la fin du projet

^f Différence = Stock réel - Stock théorique, en valeur absolue et en pourcentage par rapport au Stock théorique

stock en font foi. Il s'est avéré cependant que le stock réel était beaucoup plus élevé que prévu : la différence entre les deux valeurs variait de 15 % à 54 % dans le maïs, et de 12 % à 48 % dans le fourrage.