

EFFETS DES APPORTS PROLONGÉS DE FUMIER ET DE LISIER SUR L'ÉVOLUTION DES TENEURS DU SOL EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS MAJEURS ET MINEURS

T. SEN TRAN¹, D. CÔTÉ¹ ET A. N'DAYEGAMIYE¹

RÉSUMÉ

Les engrais de ferme apportent des quantités importantes d'éléments nutritifs majeurs et mineurs aux plantes. Cependant, il est nécessaire de tenir compte de l'effet à long terme de l'utilisation de ces engrais sur la fertilité du sol et sur les conséquences environnementales. Cette étude rapporte des résultats issus de deux expériences de longue durée sur le fumier de bovins (8 ans) et le lisier de porcs (16 ans) sur le sol loam limoneux Le Bras, situé à la ferme expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon du MAPAQ. Les apports de fumier et de lisier ont augmenté les rendements du maïs-ensilage et les prélèvements en N, P, K, Ca, Mg et en oligo-éléments. Les applications répétitives de ces engrais de ferme à des doses agronomiques pour le maïs-ensilage (30 à 40 tonnes de fumier ou 60 tonnes de lisier de porcs/ha/an) ont amélioré la teneur en P et K disponibles du sol à un niveau optimal. Par contre, les doses élevées de 100 à 120 t/ha de ces engrais de ferme ont amené les niveaux de P et de K à des seuils excessivement riches. Le taux d'enrichissement du P-Mehlich-3 varie de 12,5 kg P/ha/an pour la faible dose de fumier (60 t/ha/2 ans) à 25,9 kg P/ha/an pour la dose élevée (100 t/ha/2 ans). Pour le lisier de porcs, ce taux varie de 7,9 à 20 kg P/ha/an respectivement pour la dose annuelle de 60 et 120 t/ha. Le taux d'enrichissement en K varie de 7,7 à 38 kg K/ha/an selon les doses de fumier de bovins, alors que pour le lisier de porcs ce taux varie de 4,8 à 17,7 kg K/ha/an. Le fumier de bovins a aussi amélioré la teneur en azote total du sol. Une accumulation de P, K, Mg, Cu, Zn et Mn a été observée surtout dans la couche de surface du sol. Sous des apports répétés avec des doses excessives de lisier, les teneurs du sol en nitrate résiduel, en P soluble à l'eau et la saturation du P sur les sites de fixation sont à des niveaux élevés représentant des risques potentiels pour l'environnement. Il est recommandé d'analyser les teneurs des éléments majeurs et mineurs dans les engrais de ferme et dans le sol, en vue de connaître les niveaux d'enrichissement et de réajuster les doses d'application.

Mots clés : Fumier de bovins, lisier de porcs, maïs-ensilage, éléments majeurs, oligo-éléments.

INTRODUCTION

Les engrais de ferme contiennent plusieurs éléments nutritifs majeurs (N, P, K, Ca, Mg) et mineurs (Cu, Zn, Mn, Fe, B, Mo) requis pour la croissance des plantes cultivées. On produit 32,5 millions de tonnes de fumier et de lisier chaque année dans la province de Québec ; ces engrais de ferme proviennent principalement d'élevage de bovins laitiers (53 %), de la production porcine (27 %), des bovins de boucherie (13 %) et de la production avicole (4 %) (Trudelle 1996). Ces engrais de ferme fournissent 130 000 tonnes d'unités d'azote total, 80 000 tonnes de P_2O_5 et 120 000 tonnes de K_2O disponibles pour les cultures. De telles quantités de fertilisant ont une grande valeur agronomique et économique pour la ferme.

En effet, l'application du fumier et du lisier augmente le rendement des récoltes et améliore la fertilité du sol en éléments nutritifs (Antoun et coll. 1985, N'dayegamiye 1990, Tran et N'dayegamiye 1995, Côté et Tran 1996). De plus, l'application du fumier solide à long terme améliore aussi les propriétés physiques et biologiques du sol (N'dayegamiye et Angers 1991). Par ailleurs, l'application de doses excessives des engrais de ferme à longue durée peut causer des risques environnementaux potentiels concernant la pollution de l'eau par les nitrates et par le phosphore biodisponible (Grimard 1990, Tran et Côté 1995, Simard et coll. 1995, Gangbazo et coll. 1995, Beauchemin et al. 1996, Fardeau et Martinez 1996). Pour les éléments mineurs, les engrais de ferme apportent des quantités importantes de ces éléments pouvant combler les besoins des plantes. En effet, on note rarement des déficiences en éléments mineurs dans les champs qui ont reçu régulièrement des apports d'engrais de ferme (Ouellette 1964). Par contre, des accumulations de cuivre (Cu) et de zinc (Zn) dans le sol ont été observées suite aux apports répétés de ces fumiers (Klessa et coll. 1985, Miller et coll. 1986, N'dayegamiye 1990, Tran et Côté 1996). On peut se demander s'il y aura des risques de toxicité possible pour la santé des animaux, la croissance de la plante ou pour l'environnement suite à ces accumulations de métaux lourds. Une gestion optimale des engrais de ferme est nécessaire afin de connaître les effets de leur application à long terme sur l'enrichissement des sols

¹Centre de recherche et d'expérimentation en sol (CRÉS), MAPAQ, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy, Québec, G1P 3W8

en éléments majeurs et mineurs. Ces connaissances sont utiles à la fois pour la fertilisation intégrée des plants, mais également pour la conservation du sol et de l'eau.

L'objectif de cette étude est de faire un survol sur l'effet des apports répétitifs de l'engrais de ferme sur la production de maïs-ensilage et sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs ainsi que des mesures à considérer pour éviter les effets négatifs de telles pratiques sur l'environnement.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Expériences au champ

Les résultats discutés dans cette étude proviennent de deux expériences de longue durée avec les engrais de ferme et réalisées à la ferme expérimentale de Saint-Lambert de Lauzon sur les sols Neuboiss et Le Bras (N'dayegamiye 1990, Côté et Tran 1996). Ces deux sols ont les mêmes formations pédologiques mais les conditions de drainage sont différentes.

L'expérience sur le fumier solide de bovins a débuté en 1978 sur le sol loam limoneux Neuboiss (podzol humo-ferrique gleyifié) bien drainé et s'est poursuivie pendant huit ans sur la culture de maïs-ensilage. Le fumier a été appliqué à l'automne et incorporé au sol aux doses de 0, 20, 40, 60, 80 et 100 t/ha à tous les deux ans. Aucune fumure minérale n'a été apportée en complément. Le dispositif expérimental était arrangé en blocs aléatoires constituant six traitements de fumier en trois répétitions. Les rendements et les prélèvements en N, P et K du maïs ont été mesurés à chaque année de 1979 à 1986. Les analyses des sols échantillonnés au début de l'expérience en 1978 et en 1987 ont été effectuées pour étudier l'évolution des propriétés chimiques (matière organique, pH, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn et Mn) du sol suite à ces apports de fumier.

L'expérience sur le lisier de porcs a débuté en 1979 sur le sol loam limoneux Le Bras (gleysol orthique) et s'est poursuivie pendant 16 ans, jusqu'en 1994. Le dispositif expérimental était arrangé en blocs aléatoires et constituait cinq traitements de lisier 0, 30, 60, 90 et 120 t/ha/an en quatre répétitions. Le lisier de porcs a été appliqué en postlevée sur le maïs-ensilage par injection (à 0-20 cm) de 1979 à 1984. De 1985 à 1994, le lisier a été appliqué et incorporé au sol avec un sarclieur en postlevée sur 80 % de la surface de l'entrerang du maïs. Les rendements et les prélèvements en éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn et Fe) du maïs ont été mesurés annuellement. Les analyses de sol (pH, matière organique, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn et Fe) ont été effectuées sur le sol initial et sur toutes les parcelles en 1994 (dans les couches de 0-10, 10-20, 20-50 cm de sol).

2. Méthodes analytiques

Les tissus végétaux de maïs ont été séchés à 70°C pour fins de détermination du pourcentage de matière sèche et de leur composition. Les tissus végétaux ont été digérés par voie humide pour la détermination du N, P, K, Ca et Mg (Isaac et Johnson 1980). Les éléments mineurs Cu, Zn et Mn ont été déterminés après calcination à 375°C (CPVQ 1993). Les teneurs en N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn et Mn dans ces tissus végétaux ont été dosées par colorimétrie pour l'azote (Technicon 1977) et par spectrophotométrie d'émissions au plasma (ICAP).

Le pH du sol a été déterminé dans un rapport sol:eau de 1:1 (p/v). La teneur en matière organique du sol a été mesurée après l'oxydation par voie humide de Walkley Black (CPVQ 1993). Les teneurs du sol en azote total (méthode Kjeldahl), en nitrates (méthode de KCl), en P, K, Ca, Mg, Cu, Zn et Mn disponibles (méthodes Mehlich-3 ou DTPA-TEA) ont été déterminées selon les méthodes décrites par le CPVQ (1993). Les teneurs totales des éléments dans le fumier, le lisier et dans le sol, ont été déterminées par la méthode de digestion acide HNO_3 -HCl (U.S. Environmental Protection Agency 1986).

3. Calculs

La teneur en éléments nutritifs dans les fumiers ou les lisiers a été calculée sur une base de matière humide :

Teneur en kg/t de fumier frais :

$$\frac{\text{Teneur en \% de l'élément dans le fumier sec} \times \% \text{ M.S.}}{10}$$

10

Le % de récupération (apparente) de N, P ou K du fumier ou du lisier par le maïs :

$$\frac{(\text{Prélév. dans les traitements} - \text{Prélév. dans le témoin}) \times 100}{\text{Quantité totale appliquée (N, P, K)}}$$

Quantité totale appliquée (N, P, K)

Le % de récupération (apparente) de P ou K du fumier ou du lisier sous forme disponible (Mehlich-3) dans le sol :

$$\frac{(\text{Teneur (P, K) du sol traité} - \text{Teneur (P, K) init. du sol témoin}) \times 100}{\text{Quantité totale de (P, K) appliquée}}$$

Quantité totale de (P, K) appliquée

Taux d'enrichissement annuel du sol en P ou K-Mehlich-3 (kg/ha/an) :

$$\frac{\text{Teneur en (P, K) du sol traité} - \text{Teneur en (P, K) init. du sol témoin}}{\text{Nombre d'années d'application}}$$

Nombre d'années d'application

Les analyses statistiques ont été effectuées selon le modèle de bloc aléatoire (procédure GLM) de SAS (SAS Institute Inc. 1985).

L'application de doses élevées d'engrais de ferme, qui contiennent beaucoup d'azote minéral, peut laisser des nitrates résiduels dans le sol et contribue ainsi au risque possible de pollution de l'eau par les nitrates. On constate que les apports aux doses agronomiques de lisier de porcs (60 t/ha), appliqués en postlevée, causent une augmentation assez faible de

d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement, surtout lorsqu'il pleut dans l'heure qui suit l'épandage. Les pertes par ruissellement de l'azote ammoniacal du lisier de porcs appliqué à l'automne, sont aussi importantes au cours de l'hiver et tôt au printemps, surtout quand le lisier n'est pas incorporé au sol.

Tableau 3. Effet des apports à long terme de lisier de porcs sur le prélèvement en azote par le maïs et les teneurs en azote total et en nitrate du sol.

Dose annuelle de lisier appliqué	Quantité d'N total apportée de 1985 à 1995	Rendement annuel moyen du maïs	Prélèvement en N par le maïs de 1985 à 1995	Récupération de N du lisier par le maïs	Teneur en N total du sol en 1995 (0-20 cm)	Teneur en nitrate du sol à l'automne 1994 (0-50 cm)
t/ha	kg N/ha	kg/ha	kg/ha	%		kg N-NO ₃ /ha
0	0	2710 c*	288 c*	-	0,150 b*	52,3 c*
60	2138	7560 b	998 b	33,2	0,166 ab	67,4 b
120	4276	8740 a	1660 a	32,0	0,177 a	92,3 a

Analyse statistique
Effet des doses (linéaire) (F)

* les traitements suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents (Waller-Duncan)

** : significatif à P

Tiré de Tran et Côté (1999)

≤ 0,01 et

≤ 0,05 respectivement

Effet sur la fertilité en P du sol

teneur en nitrates dans le sol à l'automne par rapport au témoin sans lisier (Tableau 4). Cependant, avec la dose élevée de 120 t/ha, la teneur résiduelle en nitrates dans le sol était assez élevée et se situait à 92,3 kg/ha en 1994. Par ailleurs, dans le cas des lisiers de bovins, Miller et MacKenzie (1978) et Beauchamp (1983) ont trouvé qu'à la récolte de maïs, les quantités résiduelles de nitrate dans le sol suite à des apports de ces lisiers au printemps ne sont pas plus élevées que celles des traitements de l'urée, même si la quantité d'azote totale apportée par les lisiers de bovins est deux fois plus élevée que celle de l'urée. Il est donc probable que l'azote résiduel dans le sol, provenant des apports au printemps de lisiers de bovins, se trouve plutôt sous forme immobilisée organique qui a aussi moins d'impact environnemental. Par ailleurs, Gangbazo et al. (1993, 1995) ont trouvé que l'épandage du lisier de porcs à la surface du sol a augmenté la charge

de phosphore dans les engrais de ferme provient des compléments alimentaires des animaux et il est excrété essentiellement dans les parties solides de fèces. Les lisiers de porcs ou de bovins contiennent environ de 70 à 80 % du P sous forme minérale (phosphate bicalcique) qui est autant assimilable à la plante que les engrais phosphatés minéraux (Ziegler 1988, Tran et N'dayegamiye 1995). Environ 20 à 30 % du P dans ces lisiers se trouve sous forme organique et se minéralise à long terme. Dans le cas de fumier solide, la proportion du P organique est plus élevée que celle des lisiers à cause de la litière. Dans la pratique agricole, les doses d'application des engrais de ferme sont souvent calculées pour combler les besoins en azote de la culture. Les quantités de phosphore ainsi apportées par les fumiers ou les lisiers excèdent les prélèvements en phosphore de la plante et causent une accumulation du P dans le sol (Tableaux 4 et 5). En effet, on constate que la quan-

Tableau 4. Effet des apports de fumier sur le prélèvement en P par le maïs et la teneur en P-Mehlich-3 du sol après 8 ans.

Dose de fumier apportée tous les 2 ans	Quantité de P apportée pendant 8 ans	Prélèvement en P par le maïs pendant 8 ans	Récupération de P du fumier par le maïs	Teneur en P-Mehlich-3 du sol	Récupération de P du fumier sous forme P-Mehlich-3 dans le sol	Taux annuel d'enrichissement en P-Mehlich-3 (moyenne de 8 ans)
t/ha	kg P/ha	kg/ha	%	kg/ha	%	kg P/ha/an
0	0	40	-	51	-	-
20	168	80	23,8	92	24,4	5,1
40	336	88	14,2	112	18,1	7,6
60	504	112	14,2	151	19,8	12,5
80	672	120	11,9	177	18,7	15,7
100	840	144	12,4	258	24,6	25,9

Analyse statistique
Effet des doses (linéaire) (F)

** significatif à P

≤ 0,01. Tiré de N'dayegamiye (1990)

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Effets sur la fertilité du sol en azote (N)

Les engrais de ferme contiennent des teneurs très variables en azote minéral et organique. Dans les fumiers solides de bovins avec pailles, la proportion d'azote sous forme ammoniacale (NH_4^+) sur l'azote total peut varier de 16,8 % (N'dayegamiye 1990), à 28 % (Tableau 1). Pour les lisiers de porcs, cette proportion se situe à environ 70 % (Côté et Tran 1996, Lavoie 1996). Le rapport de C/N du fumier de bovins est aussi plus élevé que celui du lisier de porcs. L'azote total contenu dans les fumiers de bovins est donc moins disponible que celui des lisiers de porcs durant la première année. Cependant, l'azote organique du fumier de bovins peut être minéralisé durant les années subséquentes. Selon Ziegler (1987), seulement 22 % d'azote organique du fumier solide est minéralisé la première année, le reste sera minéralisé dans les années subséquentes. Il faut tenir compte de cet arrière-effet, surtout suite à des apports répétitifs de fumier.

été très faibles (N'dayegamiye 1990). On note cependant une amélioration des rendements au cours des années suite aux applications de fumier, atteignant un rendement maximal de 13 à 15 t/ha avec les doses de 60 à 100 t/ha/2 ans. Les prélèvements en azote par le maïs augmentent aussi linéairement avec les doses de fumier. En tenant compte de l'effet du fumier durant l'année d'application et de l'effet résiduel des années subséquentes, on constate que le pourcentage de récupération d'azote du fumier par le maïs-ensilage est en moyenne de 37,3 % et 35,1 % respectivement pour les doses de 60 et 100 t/ha/2 ans (Tableau 2).

Les apports de lisier de porcs sur le sol Le Bras ont aussi augmenté les rendements du maïs-ensilage de façon significative (Tableau 3). Les prélèvements annuels en azote par le maïs augmentent aussi de 26 kg/ha pour le sol témoin à 150 kg/ha pour la dose 120 t de lisier/ha. Le pourcentage de récupération de l'azote du lisier par la culture de maïs est de 32 à 33 % pour les doses de 60 et 120 t/ha.

Tableau 1. Teneur moyenne en matière sèche, azote total, azote ammoniacal, P_2O_5 et K_2O de différents engrais de ferme.

Type d'engrais de ferme	Matière sèche %	N total	N-NH ₄ kg/t (humide)	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Fumier de bovins avec paille	21,6	5,6	1,6	18,0	3,8	6,0
Fumier de bovins avec sciure	37,9	7,7	3,7	22,5	3,1	5,3
Fumier de bovins de boucherie	23,5	5,2	1,0	16,3	2,7	5,6
Lisier de porcs maternité	4,0	3,6	2,4	4,1	1,4	1,4
Lisier de porcs d'engraissement	3,5	4,0	2,9	3,3	2,7	2,1
Lisier de bovins	7,2	2,9	1,5	11,0	1,5	3,7
Fumier de volailles	52,5	21,5	6,5	12,5	22,7	11,7

Source : Laboratoire régional de Rock-Forest en 1993 (Lavoie 1996), CPVQ (1996), Antoun et al. (1985)

Les résultats obtenus de l'expérience de longue durée, sur les apports de fumier de bovins solide, ont démontré que les rendements du maïs-ensilage ont augmenté significativement avec les doses appliquées (Tableau 2). Le sol Neubois est initialement très pauvre en éléments nutritifs et les rendements du maïs-ensilage durant les premières années ont

Les teneurs en N total du sol ont augmenté très significativement suite à des apports prolongés de fumier solide de bovins. Cette augmentation de l'azote du sol est aussi observée avec les apports de lisier, mais à un niveau moins élevé.

Tableau 2. Effet de différents apports de fumier de bovins sur la production du maïs-ensilage et la teneur en azote total du sol après 8 ans.

Dose de fumier appliquée tous les 2 ans t/ha	Quantité de N apportée pendant 8 ans	Rendement annuel moyen du maïs kg/ha	Prélèvement en N par le maïs pendant 8 ans	Récupération de N du fumier par le maïs %	Teneur en N total du sol après 8 ans
0	0	3963	352	-	0,14
20	328	5648	566	63,4	0,15
40	656	6238	664	47,5	0,17
60	984	6868	720	37,3	0,19
80	1312	7572	800	34,1	0,21
100	1640	8187	928	35,1	0,23
Analyse statistique					
Effet des doses (linéaire) (F)		**	**		**
** significatif à P			≤ 0,01.	Tiré de N'dayegamiye (1990)	

tité de phosphore exportée par le maïs-ensilage correspond à seulement 1/5 à 1/7 de l'exportation en azote (Tableaux 2 et 3).

Dans l'expérience sur le fumier de bovins (Tableau 4), les quantités de P total apportées pendant huit ans variaient de 168 à 840 kg P/ha pour les doses de 20 à 100 t/ha/2 ans. Les exportations totales en P par le maïs-ensilage étaient seulement de 80 à 144 kg P/ha/8 ans. On constate que le pourcentage de récupération de P du fumier de bovins par la culture de maïs-ensilage est de 14,2 % pour la dose de 60 t/ha/2 ans et 12,4 % pour 100 t/ha/2 ans.

On note qu'environ 21 % du P total apporté par le fumier de bovins ou dans le lisier de porcs se trouve dans le sol sous forme résiduelle disponible à la plante (récupération en P-Mehlich-3). Le reste du P a été en partie rétrogradé sous des formes moins solubles dans le sol (Tran et N'dayegamiye 1995). Par ailleurs, le calcul du bilan du P, basé sur la quantité de P apportée par le lisier, l'exportation du P par le maïs-ensilage et la teneur du P total du sol (0-50 cm) après 16 ans, a montré que la récupération totale (dans la plante et dans le sol) du P appliqué était de 85 à 90 % (Côté et Tran 1995). La perte annuelle du P hors du profil du sol Le Bras est assez minime.

Tableau 5. Effet des apports de lisier de porcs pendant 16 ans sur le prélèvement en P par le maïs et les teneurs en P disponible du sol.

Dose annuelle de lisier	Quantité de P apportée pendant 16 ans	Prélèvement de P par le maïs pendant 16 ans	Récupération de P du lisier par le maïs	Teneur en P-Mehlich-3 après 16 ans (0-20 cm)	Récupération de P du lisier sous forme P-Mehlich-3 dans le sol	Taux annuel d'enrichissement en P-Mehlich-3 (moyenne 16 ans)	P soluble à l'eau (0-10 cm)	Saturation en P (P-Mehlich-3/cap. Fixation) (0-10 cm)
t/ha	kg P/ha	kg/ha	%	kg/ha	%	kg P/ha/an	mg/kg sol	%
0	0	92 c*	-	76 c+	-	-	0,92 c*	3,0 c*
60	672	222 b	19,3	202 b	18,7	7,9	2,87 b	9,1 b
120	1344	266 a	12,9	397 a	23,9	20,1	6,26 a	21,5 a

Analyse statistique

Effet des doses (linéaire) (F)

+ les traitements suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents (Waller-Duncan)

** significatif à P

Tiré de Tran et Côté (1996)

≤ 0,01

Dans l'expérience sur le lisier de porcs, l'application de 60 et 120 t/ha pendant 16 ans a apporté 672 et 1344 kg P/ha. Les prélèvements en P par le maïs-ensilage varient de 222 à 266 kg/ha/16 ans (Tableau 5). Le pourcentage de récupération de P du lisier par le maïs varie de 12,9 à 19,3 %.

Après 8 ans d'expérience, les teneurs en P disponible extrait par Mehlich-3, initialement de 51 kg/ha, sont augmentées à 151 et 258 kg/ha respectivement pour les apports de 60 et 100 kg de fumier/ha/2 ans (Tableau 4). Dans le cas du lisier de porcs, la fertilité du sol en P après 16 ans se trouve au niveau riche (202 kg/ha) pour la dose 60 t/ha/an et excessivement riche (397 kg/ha) pour la dose 120 t/ha/an (Tableau 5).

Les taux annuels d'enrichissement du sol Neuboiss en P-Mehlich-3 étaient de 12,5 et 25,9 kg P/ha/an (moyenne de huit ans) respectivement pour les doses de fumier de bovins de 60 et 100 t/ha/2 ans. Dans le cas du lisier de porcs, les taux d'enrichissement du sol Le Bras étaient de 7,9 et 20 kg P-Mehlich-3/ha/an pour les doses de 60 et 120 t/ha/an. En calculant la quantité de P du fumier ou du lisier nécessaire pour enrichir le sol Le Bras ou Neuboiss d'une unité de P-Mehlich-3, on trouve des valeurs de l'ordre de 4,2 à 5,3 kg P total apporté par ces engrais pour augmenter la teneur en P-Mehlich-3 de ces sols d'un kg/ha.

La teneur du P soluble à l'eau et la saturation du P sur les sites de fixation du P (P-Mehlich-3/capacité de fixation du P), qui sont utilisées comme indice agronomique et environnemental du P, augmentent aussi avec les doses de lisier de porcs apportées (Tableau 5). L'apport prolongé de 120 t/ha de lisier de porcs a amené la concentration de P soluble à l'eau à un niveau élevé de 6,26 mg/kg de sol et la saturation en P à un niveau excessif de 21,5 %. On constate aussi que l'accumulation du P se trouve surtout dans les deux couches de surface du sol (0-10 cm et 10-20 cm). Les particules de sol en surface saturées en P facilement échangeable, peuvent contribuer à la pollution des cours d'eau en phosphore biodisponible à cause des pertes par ruissellement et par érosion (Giroux et al. 1996, Côté et Tran 1995, Simard et al. 1995, Simard 1996, Fardeau et Martinez 1996). Les apports prolongés des engrais de ferme, sur un sol qui est déjà au niveau excessivement riche en P disponible, peuvent aussi augmenter la teneur en P dans l'eau de drainage (HBA 1991, Gangbazo et coll. 1995, Beauchemin et al. 1996).

Dans nos expériences sur le sol loam limoneux Le Bras, l'enrichissement du P disponible dans les couches en profondeur de 20 à 50 cm du sol, suite à des apports de lisier de porcs, est négligeable comparé au témoin sans lisier. Ziegler (1988) a mentionné aussi des cas d'enrichissement en P uniquement dans les couches de surface du sol

Tableau 6. Effet des apports de fumier de bovins sur le prélèvement en K du maïs-ensilage et la teneur en K disponible du sol.

Dose de fumier appliquée tous les 2 ans	Quantité de K apportée pendant 8 ans	Prélèvement en K par le maïs pendant 8 ans	Récupération de K du fumier par le maïs	Teneur en K-Mehlich-3 du sol après 8 ans	Saturation en K sur les sites d'échange	Récupération de K du fumier sous forme K-Mehlich-3 dans le sol	Taux annuel d'enrichissement en K-Mehlich-3 du sol (moyenne 8 ans)
t/ha	kg K/ha	kg K/ha	%	kg/ha	%	%	kg K/ha/an
0	0	240	-	166	1,26	-	-
20	340	454	62,9	228	1,73	18,2	7,7
40	680	560	47,0	260	1,98	13,8	11,7
60	1020	676	42,7	300	2,28	13,1	16,7
80	1360	781	39,8	429	3,27	19,3	32,8
100	1700	840	35,2	472	3,55	18,0	38,0
Analyse statistique Effet des doses (binéaire) (F)		**		**	**		
** significatif à P				≤	0,01.	Tiré de N'dayegamiye (1990)	

(texture limon argilo-sableux) par l'application de lisier et de fumier dans les prairies. D'autres études montrent certains entraînements du P sous forme organique en profondeur du sol par l'écoulement préférentiel ou par la migration des particules de lisier à-travers les micro-porosités du sol (Cheverry et al. 1978). L'application des engrais de ferme non-incorporés à la surface du sol saturé d'eau dans des prairies pourrait aussi contribuer à augmenter la perte de phosphore par ruissellement que d'autres cultures où les engrais sont incorporés par le sarclage (Sharpley 1995).

L'impact de la pollution des cours d'eau par le phosphore biodisponible est observé surtout dans les zones de fortes concentrations d'élevage ou d'agriculture intensive (Simard et al. 1995, Bernier et al. 1996). Il est donc important de tenir compte des apports de phosphore par les engrais de ferme et de limiter ces quantités dans les sols ayant des teneurs riches en P disponible.

Effet sur la fertilité en K du sol

Dans les engrais de ferme, le potassium se trouve sous forme minérale, facilement disponible à la plante comme les engrais chimiques. Le potassium dans les fumiers et les lisiers peut subir des pertes durant le stockage de ces produits. Les fumiers de bovins et de volailles contiennent généralement plus de potassium que les lisiers de porcs (Tableau 1). L'exportation annuelle du potassium par le maïs-ensilage est aussi importante (25 à 105 kg K/ha) et elle augmente significativement avec les apports de fumier ou de lisier (Tableaux 6 et 7). On trouve des pourcentages de récupération du K du fumier de bovins (moyenne de 8 ans) par le maïs variant de 62,9 % pour la plus faible dose (20 t/ha/2 ans) et de 35,2 % pour la dose élevée (100 t/ha/2 ans). Dans le cas de lisier de porcs, ces coefficients sont de 60,3 % pour la dose annuelle de 60 t/ha et 43,5 % pour la dose de 120 t/ha. Le pourcentage de récupération de ces engrais de ferme par le potassium est donc plus élevé que celui du phosphore et il est comparable ou légèrement supérieur à celui de l'azote.

Après huit ans, l'apport du fumier de bovins a augmenté le niveau de K-Mehlich-3 du sol Neubois, initialement avec une teneur moyenne en K disponible, à un niveau riche (300 kg/ha) avec la dose de 60 t/ha/2 ans. La dose de 100 t/ha/2 ans a amené le niveau de K de ce sol à un niveau excessivement riche (472 kg/ha) (Tableau 6). On constate qu'environ 16 % du K apporté par le fumier se trouve dans le sol (0-20 cm) sous forme disponible (K-Mehlich-3). Le taux d'enrichissement du K-Mehlich-3 du sol est de 7,7 à 38 kg K/ha/an pour les doses variant de 20 à 100 t/ha/2 ans de fumier. La saturation en K sur les sites d'échanges cationiques augmente aussi de 1,26 % dans le sol témoin à 3,55 % dans le sol traité avec la dose de 100 t/ha. Il faudrait donc tenir compte de ces quantités importantes de K apportées par les fumiers et diminuer les apports d'engrais potassiques chimiques pour ne pas dépasser 4 % de saturation en K sur les sites d'échange du sol.

L'application de lisier de porcs pendant 16 ans a également enrichi le K-Mehlich-3 du sol, surtout avec la dose annuelle de 120 t/ha (Tableau 7). La teneur en K-Mehlich-3 du sol témoin a augmenté du niveau moyen (144 kg/ha) à un niveau riche (221 kg/ha) et excessivement riche (427 kg/ha) suite à des applications de 60 et 120 t/ha. La saturation en K s'accroît aussi de 1,1 % dans le témoin à 3,26 dans le traitement de 120 t/ha. Cependant, le taux annuel d'enrichissement par le lisier de porcs est plus faible que par le fumier de bovins : 4,8 et 17,7 kg K/ha/an respectivement pour les doses annuelles de 60 et 120 t/ha de lisier. On observe qu'environ 6 à 10,8 % du K apporté par le lisier de porcs est resté sous forme résiduelle en K-Mehlich-3 dans la couche de 0-20 cm du sol. Il y a aussi une faible accumulation du K-Mehlich-3 dans la couche de 30 à 40 cm pour la dose élevée de 120 t/ha de lisier. Le reste du K peut être converti sous des formes fixées ou non échangeables dans le sol.

Tableau 7. Effet des apports de lisier de porcs sur le prélèvement en K par le maïs-ensilage et la teneur en K disponible du sol.

Dose annuelle de lisier	Quantité de K apportée pendant 16 ans	Prélèvement en K par le maïs pendant 16 ans	Récupération de K du lisier par le maïs	Teneur en K-Mehlich-3 du sol après 16 ans	Saturation en K sur les sites d'échange	Pourcentage de K du lisier sous forme K-Mehlich-3 dans le sol	Taux annuel d'enrichissement en K-Mehlich-3 du sol (moyenne 16 ans)
t/ha	kg K/ha	kg K/ha	%	kg/ha	%	%	kg K/ha/an
0	0	390 c'	—	144 c'	1,10 c'	-	-
60	1310	1180 b	60,3	221 b	1,69 b	6,0	4,8 b'
120	2620	1530 a	43,5	427 a	3,26 a	10,8	17,7 a

Analyse statistique Effet des doses (linéaire) (F)

' les traitements suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents (Waller-Duncan)

** significatif à P

≤ 0,01. Tiré de Tran et Côté (1996)

Effet sur le pH et la fertilité en Ca et Mg du sol

Le calcium et le magnésium se trouvent dans la partie solide des engrais de ferme. Les fumiers de volailles sont les plus riches en ces deux éléments suivis par les fumiers de bovins (Tableau 8). Les lisiers de porcs contiennent moins de Ca et de Mg que les autres engrais de ferme. Le rapport de K/Mg dans les fumiers de bovins et les lisiers de porcs varie de 4 à 6. Les prélèvements annuels du Ca par le maïs-ensilage (12 à 25 kg/ha) augmentent significativement avec les doses de lisiers apportées (Tableau 10). Les prélèvements en Mg, qui varient de 6 à 14 kg/ha, s'accroissent aussi avec les doses de lisier.

Les quantités des bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) apportées par le fumier de bovins durant plusieurs années permettent la neutralisation de l'acidité causée par la nitrification de l'azote contenu dans le fumier et entraînent aussi une hausse du pH du sol (Tableau 9). Les quantités de ces cations apportées par le lisier de porcs sont beaucoup plus faibles et peuvent contribuer à entretenir le pH du sol. Par conséquent, le changement de pH du sol suite à des apports de lisier de porcs (comparé au témoin sans lisier) n'est pas significatif (Tableau 11). Par ailleurs, Ziegler (1988) a noté aussi que les traitements avec les engrais minéraux ont baissé le pH du sol de 0,3 unité tandis que les traitements avec le lisier de bovins ou de porcs ont augmenté le pH du sol de 0,5 unité de pH.

Tableau 8. Composition moyenne en Ca, Mg et oligo-éléments de différents types d'engrais de ferme.

Type d'engrais de ferme	Matière sèche %	pH	Ca kg/t (frais)	Mg kg/t (frais)	Cu g/t (frais)	Zn g/t (frais)	Mn g/t (frais)	Fe g/t (frais)	B g/t (frais)	Mo g/t (frais)
Fumier de bovins laitiers	20,1	7,5	3,09	1,04	11,0	42,1	47,8	372,9	3,9	0,6
Fumier de bovins de boucherie	23,5	7,8	5,17	0,89	11,8	30,2	53,2	444,5	2,7	0,3
Lisier de porcs	3,5	7,3	1,0	0,34	14,0	55,0	50,0	70,0	0,4	0,2
Fumier de moutons	30,3	8,0	5,6	1,5	8,2	44,9	106,9	1324,5	4,7	0,8
Fumier de volailles	51,6	7,5	35,2	5,0	64,4	241,6	272,6	867,3	14,0	2,5

* Pour la variabilité de ces teneurs, voir Dupont et al. (1984), Tran et Côté (1996), Antoun et al. (1985)

Les teneurs en Ca-Mehlich-3 du sol Neubois ont été augmentées après huit ans d'expérience avec les doses de fumier de bovins appliquées (Tableau 9) ; tandis que celles du sol Le Bras ayant reçu du lisier de porcs sont semblables au sol témoin sans lisier (Tableau 11). Par ailleurs, les teneurs en Mg-Mehlich-3 du sol Neubois, qui étaient de niveau pauvre, de 43 mg/kg (96 kg/ha), ont augmenté de 1,8 à 3 fois respectivement suite aux apports de 60 et 100 t/ha/2 ans de fumier de bovins (Tableau 9). L'application de 60 et 120 kg/ha de lisier de porcs pendant 16 ans a aussi augmenté la teneur en Mg-Mehlich-3 du sol témoin de 29 mg/kg à un bon niveau de 56 et 92 mg/kg respectivement.

Effet sur la fertilité en oligo-éléments du sol

Les engrais de ferme contiennent des oligo-éléments, disponibles à la nutrition des plantes, tels que le cuivre, le zinc, le manganèse, le fer, le bore et le molybdène (Tableau 8). Le Cu et le Zn dans le lisier de porcs proviennent des additions dans l'alimentation de sulfate de cuivre pour augmenter le facteur de croissance des porcs et des composés de zinc utilisés comme fongicide. On retrouve 95 % de la quantité de ces métaux ajoutée à l'alimentation des animaux dans leurs déjections. Les quantités de ces éléments dans les engrais de ferme varient beaucoup avec l'alimentation du bétail (Dupont et al. 1984, Antoun et Al. 1985).

Tableau 9. Effet de huit années d'apports de fumier de bovins sur le pH et les teneurs en Ca, Mg et oligo-éléments du sol.

Dose de fumier de bovins apportée tous les 2 ans t/ha	pH du sol (H ₂ O)	Teneur des éléments après 8 ans				
		Mehlich-3		DTPA-TEA		
		Ca	Mg	Cu	Zn	Mn
		mg/kg sol				
0	6,7	1183	43	2,13	1,26	6,8
20	6,8	1250	55	2,26	2,02	8,6
40	6,8	1516	65	2,26	2,52	8,6
60	7,0	1566	78	2,40	3,60	8,8
80	7,1	1666	98	2,53	6,80	10,2
100	7,4	1883	126	3,06	7,60	11,7
Analyse statistique						
Effet des doses (linéaire) (F)						
	**	**	**	**	**	**

Source : N'dayegamiye (1990)

Les prélèvements en Cu, Zn et Mn ont été augmentés très significativement avec les doses de lisier de porcs appliquées (Tableau 10). Le maïs est une des cultures exigeantes en zinc. L'application des engrais de ferme apporte des quantités intéressantes de zinc pour cette culture. On constate que l'exportation du Zn par le maïs s'accroît de 119 g/ha dans le témoin à 372 g/ha dans le traitement fertilisé à la dose annuelle de 120 t/ha de lisier de porcs.

Tableau 10. Quantité de Ca, Mg et oligo-éléments apportée annuellement par le lisier de porcs et prélevée par le maïs-ensilage.

Dose annuelle de lisier de porcs	Quantité apportée annuellement par le lisier de porcs					Prélèvement annuel par le maïs				
	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn
	kg/ha					g/ha				
0	0	0	0	0	0	12	6	27	119	94
60	60	20	840	3300	3000	18	9	37	230	134
120	120	40	1680	6600	6000	25	14	61	372	213
Analyse statistique										
Effet des doses (linéaire) (F)										
							≤ 0,0			

** significatif à P

Source : Tran et Côté (1996)

D'autres études ont démontré que des apports assez élevés de lisier de porcs (112 ou 270 t) n'augmentent pas la concentration des oligo-éléments dans les tissus végétaux du maïs et n'affectent pas la croissance des plantes (Antoun et al. 1985, Sutton et al. 1983). L'apport d'engrais de ferme est donc bénéfique pour les sols pauvres en oligo-éléments. En ce qui concerne la phytotoxicité possible de Cu et de Zn par des apports répétitifs d'engrais de ferme,

Chevery (1978) a estimé qu'il serait prudent de ne pas dépasser des quantités totales cumulatives de 500 kg de Cu ou de Zn par hectare.

Les niveaux de fertilité du sol en Cu, Zn et Mn s'accroissent aussi avec les doses de fumier de bovins et de lisier de porcs (Tableaux 9 et 11). Le sol Neubois contient initialement de bonnes teneurs en Cu, Zn et Mn disponibles à la plante. Les apports de fumier ont amené ces teneurs à des niveaux élevés mais non toxiques à la plante. Les apports de lisier de porcs sur le sol Le Bras ont aussi amélioré la teneur en Zn-Mehlich-3 initialement de niveau pauvre (0,7 mg/kg) à riche (3,0 et 7,3 mg/kg) et celle de Mn-Mehlich-3 de 8,4 mg/kg (pauvre) à des niveaux plus adéquats (de 9 à 12,0 mg/kg). On constate aussi que l'augmentation des teneurs en Cu-Mehlich-3 est significative dans les couches 0-10, 10-20 et 20-30 cm du sol ; tandis que celle du Zn-Mehlich-3 n'est significative que dans les deux premières couches du sol (Tran et Côté 1996).

On constate aussi une accumulation de Cu et de Zn totaux surtout dans la couche de surface du sol, suite à des apports de lisier de porcs (Tableau 11). La teneur en Cu total dans cette couche a passé de 11,6 dans le témoin à 22 mg/kg dans le traitement de 120 t/ha. La teneur de Zn total dans le sol témoin

de 44,7 kg/ha a été augmentée à 65,7 kg/ha pour la dose de 120 kg/t de lisier. Ceci est dû à un surplus d'apport de ces éléments par le lisier par rapport au prélèvement par le maïs (Tableau 11).

L'accumulation de Cu et de Zn dans le sol suite à des apports d'engrais de ferme a aussi été observée dans plusieurs études (Sutton et al. 1983, Chevery et al. 1978). Au Québec, Giroux et al. (1992) ont trouvé que la teneur totale en Cu des sols varie

Tableau 11. Effet de 16 ans d'apports de lisier de porcs sur le pH et les teneurs en Ca, Mg oligo-éléments du sol (0-10 cm)

Dose annuelle de lisier de porcs	pH (H ₂ O)	Teneur en Mehlich-3					Teneur totale	
		Ca	Mg	Cu	Zn	Mnz	Cu	Zn
		mg/kg sol						
0	6,54 a [*]	1500 a [*]	29 c [*]	1,5 c [*]	0,7 c [*]	8,4 b [*]	11,6 c [*]	44,7 c [*]
60	6,18 a	1393 a	56 b	3,9 b	3,0 b	9,0 b	14,5 b	54,2 b
120	6,33 a	1468 a	92 a	6,7 a	7,3 a	12,0 a	22,0 a	65,9 a
Analyse statistique								
Effet des doses (linéaire) (F)								
	ns	ns	**	**	**	**	**	**

* les traitements suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents (Waller-Duncan)

** significatif à P

** le sol a été chaulé à tous les quatre ans.

≤ 0,01.

Source : Tran et Côté (1996)

de 6 à 54 mg/kg de sol (moyenne de 19 mg/kg) et le critère limite pour la teneur totale de Cu est établi à 100 mg/kg (Standish 1981). Selon ces mêmes études, la teneur totale en zinc dans les sols du Québec varie de 17 à 120 mg/kg (moyenne de 63 mg/kg) et le seuil limite est de 185 mg/kg. En Écosse, le règlement établi pour les apports de métaux lourds au sol permet une application maximale de 3 kg de Cu et 5 kg de Zn par année, et ce, pour une période limite de 50 ans. L'accumulation de Cu à des quantités élevées dans le sol peut aussi affecter la vie biologique du sol tel les vers de terre. Wei-Chun Ma (1988) a trouvé que la population des vers de terre a été affectée par des concentrations totales de Cu supérieures à 50 mg/kg et lorsque cette concentration atteint 150 mg/kg, la détérioration de la vie des vers de terre est vraiment drastique.

CONCLUSION

Les apports de longue durée de fumier de bovins et de lisier de porcs ont augmenté la production du maïs-ensilage et les prélèvements en éléments nutritifs par cette culture. L'accumulation d'éléments nutritifs majeurs et mineurs sous formes disponibles et totales a été observée dans les couches de surface du sol suite à l'application de ces engrais de ferme.

Les fumiers de bovins contiennent des quantités élevées en potassium et l'apport répétitif de ces fumiers à dose élevée peut amener la teneur du sol en potassium disponible à un niveau excessivement riche. Il est donc nécessaire de réduire les apports d'engrais potassiques dans ces cas.

L'apport des engrais de ferme à des doses élevées pendant plusieurs années a augmenté la teneur du sol en phosphore disponible, surtout dans la couche de 0 à 20 cm, jusqu'au niveau excessivement riche. La teneur en phosphore soluble et la saturation en P du sol s'accroissent aussi, atteignant des niveaux très élevés, et peuvent causer des risques de pollution des cours d'eau par la perte de P due au ruissellement ou à l'érosion du sol. Dans ce cas il est recommandé d'arrêter l'application du lisier ou de diminuer les doses de lisier pour que la quantité de P appliquée corresponde seulement au prélèvement en P de la culture.

Les engrais de ferme apportent des quantités importantes d'oligo-éléments au sol. L'apport de ces engrais de ferme sera bénéfique pour la croissance des cultures, surtout dans les sols ayant des pH élevés ou des sols sableux, riches en matière organique et susceptibles d'avoir des déficiences en oligo-éléments. Cependant, des apports répétitifs du fumier ou du lisier causent aussi une accumulation de Cu et de Zn dans la couche de surface du sol. Il faudrait donc tenir compte de ces effets cumulatifs à

long terme et ne pas dépasser les seuils limites actuels au Canada pour les métaux lourds dans le sol. Ceci a pour but de maintenir la qualité des sols, minimiser la perte de ces métaux lourds vers les cours d'eau et d'éviter la détérioration de l'activité biologique.

En résumé, les engrais de ferme appliqués à des doses agronomiques ont des effets bénéfiques sur la productivité du sol. Cependant, il est recommandé d'analyser la teneur des éléments contenus dans les engrais de ferme et de tenir compte de ces quantités pour faire des recommandations judicieuses, tant pour les doses de fumier ou de lisier à appliquer que pour les doses d'engrais chimiques supplémentaires. Il faudrait aussi choisir les meilleurs modes et temps pour appliquer ces engrais de ferme afin de réduire les risques de pollution des cours d'eau par le phosphore biodisponible et par les nitrates.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Antoun, H., Visser, S. A., Cascas, M. P. et Joyal, P. 1985. Effects of liquid hog manure application rates on silage corn yield and nutrient uptake. *Can. J. Plant Sci.* 65:63-70.
- Beauchamp, E.G. 1986. Availability of nitrogen from three manures to corn in the field. *Can. J. Soil Sci.* 66:713-720.
- Beauchamp, E.G., Kidd, G.E. and Thurtell, G. 1982. Ammonia volatilization from liquid dairy cattle manure in the field. *Can. J. Soil Sci.* 62:11-19.
- Beauchemin, S., Simard, R.R. et Cluis, D. 1996. Drainage water P concentrations of nine gleysolic soil series from the St-Lawrence lowlands. Congrès annuel de la Société canadienne de la Science du sol. Lethbridge, Juillet 1996.
- Bernier, D., Emond, C. et Giroux, M. 1996. Utilisation rationnelle du phosphore en agriculture. Problématique environnementale associée à l'enrichissement des sols en phosphore. p. 75-83. Colloque sur la fertilisation intégrée des sols. Drummondville. CPVQ inc., 257 pp.
- Chevry, C., Menetrier, Y., Barloy, J. et Héduit, M. 1978. Épandage de lisier de porcs et fertilisation. dans *Bâtiment et environnement*, N° 5, Technique Porc. I.T.P. ed. Paris.
- Côté, D. et Tran, T. Sen. 1995. Étude de l'évolution de la qualité des sols en parcelles de longue durée à Saint-Lambert (Québec). V. Seize années d'application de lisier de porcs en postlevée du maïs : efficacité fertilisante et effets sur les propriétés du sol. Proc. Congrès AQSSS-CSSS, Sainte-Foy, Québec.
- Côté, D. et Tran, T. Sen. 1996. Effet de seize années de fertilisation en postlevée du maïs avec du lisier de porcs sur le rendement de la récolte et sur la teneur du sol en C et en N. Séminaire du Centre de recherche et d'expérimentation en sols. MAPAQ, Avril 1996. Sainte-Foy, Québec.
- CPVQ. 1993. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Conseil des productions végétales du Québec. Agdex 533. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Fardeau, J.C. et Martinez, J. 1996. Épandages de lisiers : conséquences sur le phosphore biodisponible et sur la concentration de quelques cations dans la solution du sol. *Agronomie* 16 (3):153-166.

- Gangbazo, G., Couillard, D., Pesant, A.R. et Cluis, D. 1992. Effets du lisier de porc sur la charge d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement sous des pluies simulées. *Can. Agric. Eng.* 35:97-103.
- Gangbazo, G., Pesant, A.R., Cluis, D., Couillard, D. et Barnett, G.M. 1995. Winter and early spring losses of nitrogen following late fall application of hog manure. *Can. Agric. Eng.* 37:73-79.
- Gangbazo, G., Pesant, A.R., Barnett, G.M., Charest, J.P. et Cluis, D. 1995. Water contamination by ammonium nitrogen following the spreading of hog manure and mineral fertilizers. *J. Environ. Qual.* 24:420-425.
- Gangbazo, G., Pesant, A. R. et Barnett, G. M. 1995. Effets de l'épandage des engrais minéraux et de grandes quantités de lisier de porc sur l'eau, le sol et les cultures. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des écosystèmes aquatiques. Québec.
- Giroux, M., Rompré, M., Carrier, D., Audesse, P. et Lemieux, M. 1992. Caractérisation de la teneur en métaux lourds et disponibles des sols du Québec. *Agrosol* 5 (2):46-56.
- Giroux, M., Bernier, D. et Emond, C. 1996. Utilisation agronomique et environnementale judicieuse des engrais phosphatés selon les caractéristiques des sols et des engrais. p. 49-64, dans *Colloque sur la fertilisation intégrée des sols*. Drummondville. CPVQ inc., 257 pp.
- Grimard, Y. 1990. Quantité générale de l'eau au Québec. p. 24-27. dans *Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole*. Conseil des productions végétales du Québec. Qué.
- Isaac, R.A. et Johnson, W.C. 1980. Determination of total nitrogen on plant tissues using BD-40 digestion. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 59:98-100.
- Klessa, D.A., Golightly, R.D., Dixon, J. et Voss, R.C. 1985. The effects upon soil and herbage Cu and Zn of applying pig slurry to grassland. *Res. Dev. Agric.* 2:135-141.
- Lavoie, M. 1996. Fertiliser quelles cultures et à quel moment ? p. 142-152 dans *Colloque sur la fertilisation intégrée des sols*. Drummondville. CPVQ inc., 257 pp.
- Miller, P.L. et MacKenzie, A.F. 1978. Effects of manures, ammonium nitrate and S-coated urea on yield and uptake of N by corn and on subsequent inorganic N levels in soils in southern Quebec. *Can. J. Soil Sci.* 58:153-158.
- N'dayegamiye A. et Côté, D. 1989. Effects of long-term pig slurry and solid cattle manure application on soil chemical and biological properties. *Can. J. Soil Sci.* 69:39-47.
- N'dayegamiye, A. 1990. Effets à long terme d'apports de fumier solide de bovins sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol et de la production de maïs-ensilage. *Can. J. Plant Sci.* 70:767-775.
- N'dayegamiye, A. et Angers, D. 1990. Effet de l'apport prolongé du fumier de bovins sur quelques propriétés physiques et biologiques d'un loam limoneux Neubois sous culture de maïs. *Can. J. Soil Sci.* 70:259-262.
- Ouellette, G. 1964. Importance des oligo-éléments dans l'agriculture québécoise. *Agriculture XXX*:19-22.
- Paul, J.W., Beauchamp, E.G. and Zhang, X. 1993. Nitrous and nitric oxide emission during nitrification and denitrification from manure-amended soil in the laboratory. *Can. J. Soil Sci.* 73:539-553.
- Paul, J.W. and Beauchamp, E.G. 1993. Nitrogen availability for corn in soils amended with urea, cattle slurry and solid and composted manure. *Can. J. Soil Sci.* 73:253-266.
- Sharpley, A. Daniel, T.C., Sims, J.T. et Pote, D.H. 1995. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J. Soil and Water Cons.* 51:160-166.
- Simard, R.R., Cluis, D., Gangbazo, G. et Beauchemin, S. 1995. Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Quality* 24:1010-1017.
- Simard, R.R. 1996. Influence des pratiques agricoles sur le devenir du phosphore du sol. p. 65-74. *Colloque sur la fertilisation intégrée des sols*. Drummondville. CPVQ inc., 257 pp.
- Standish, J.F. 1981. Concentrations de métaux lourds dans les matières d'égoût traitées et les sous-produits. Agriculture Canada. Direction générale, Production et inspections des aliments. Trade memorandum T-4-93, 3 p.
- Sutton, A.L., Nelson, D.W., Mayrose, V.B. et Kelly, D.T. 1983. Effect of copper levels in swine manure on corn and soil. *J. Environ. Qual.* 12:198-203.
- Technicon, 1977. Individual/simultaneous determination of nitrogen and/or phosphorus in BD acid digests. Industrial method # 334-74 W/B. Technicon Industrial Systems. Tarrytown, N.Y. 10591.
- Tran, T. Sen et N'dayegamiye, A. 1995. Long-term effects of fertilizers and manure application on the forms and availability of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 75:281-285.
- Tran, T. Sen et Côté, D. 1996. Effet des apports à long terme du lisier de porcs en postlevée du maïs sur la fertilité du sol en P, K, Ca, Mg et oligo-éléments. Séminaire du Centre de recherche et d'expérimentation en sols. MAPAQ. Avril 1996. Sainte-Foy, Québec.
- Trudelle, M. 1996. Nature et composition des engrais de ferme et des composts. p. 136-138, dans *Colloque sur la fertilisation intégrée des sols*. Drummondville. CPVQ inc., 257 pp.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1986. Test method for evaluation solid waste-physical/chemical methods. SW-846, Vol. 1B, 3^e Edition.
- Wei-Chun, Ma. 1988. Toxicity of copper to lumbricid earthworms in sandy agricultural soils amended with Cu-enriched organic waste material. *Ecological Bulletin* 39:53-56.
- Ziegler, D. 1987. Azote et déjections animales (Valeur azotée des engrais de ferme). *Perspectives agricoles* 115:159-164.
- Ziegler, D. 1988. Valeur fertilisante des effluents d'élevage : P₂O₅, K₂O, CaO. *Perspectives agricoles*. 127:165-179.