

# Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : coefficients d'efficacité et nitrates dans le sol

\*A. N'Dayegamiye<sup>1</sup>, M. Giroux<sup>1</sup> et R. Royer<sup>1</sup>

**Résumé,** \*A. N'Dayegamiye<sup>1</sup>, M. Giroux<sup>1</sup> et R. Royer<sup>1</sup>. **Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : coefficients d'efficacité et nitrates dans le sol.** *Agrosol.* 15 (2) : 97-106. Cette étude a déterminé les effets de divers fumiers solides de bovins et de boues mixtes de papetières à différents rapports C/N, et de leurs périodes d'épandage (automne-printemps) sur les rendements en maïs, les coefficients d'efficacité de l'azote et les accumulations de nitrates dans le sol. Deux types de fumiers (fumier de bovins laitiers et fumier de bovins de boucherie) et deux types de boues mixtes de papetières, dont les rapports C/N variaient entre 12 et 24, ont été appliqués à l'automne et au printemps, et comparés à la fertilisation minérale azotée (150 kg ha<sup>-1</sup>) et au témoin sans engrais ni amendements organiques. Des traitements combinant les deux types de fumiers et de boues mixtes avec des engrais azotés à une dose réduite (90 kg ha<sup>-1</sup>) étaient également inclus. Les applications de fumiers et de boues mixtes, sans ajout d'engrais N, ont permis des augmentations significatives ( $P < 0,01$ ) des rendements en maïs ensilage, variant de 1 à 2 t ha<sup>-1</sup> en comparaison avec le témoin. Cependant, les rendements les plus élevés ont été obtenus lorsque ces engrais organiques avaient été combinés avec une dose ajustée d'azote (90 kg ha<sup>-1</sup>). Les coefficients d'utilisation de l'azote ont varié de 10,2 à 22,1 %, et les coefficients d'efficacité (équivalence avec l'engrais minéral N) de 20 à 43,7 %; ceux-ci étant influencés par les caractéristiques des engrais organiques. En effet, les coefficients d'efficacité de l'azote étaient significativement corrélés aux rapports C/N des engrais organiques étudiés ( $r = -0,92$ ), à leur rapport N-NH<sub>4</sub>/N total ( $r = 0,65$ ) et à la quantité de N minéral épandue ( $r = 0,57$ ). Les coefficients les plus élevés ont été obtenus pour les fumiers de bovins laitiers épandus à l'automne ou au printemps, qui présentaient des rapports C/N plus faibles (14 à 17). Les apports de fumiers et de boues mixtes à l'automne (octobre) ont accru les teneurs en nitrates dans le profil du sol (0-60 cm). Toutefois, l'enrichissement le plus significatif en nitrates a été mesuré seulement pour le fumier de bovins laitiers ayant un faible rapport C/N (14). Comme pour les coefficients d'efficacité, les accumulations de nitrates dans le sol ont été fortement reliées aux rapports C/N ( $r = -0,80$ ), à la quantité totale d'azote apportée au sol ( $r = -0,54$ ) et au rapport N-NH<sub>4</sub>/N total ( $r =$

0,67). Cette étude a indiqué que les accumulations de nitrates dans le profil du sol sont faibles lorsque les engrais organiques appliqués ont des rapports C/N supérieurs à 20. Il a également été démontré que les apports automnaux de boues mixtes ou de fumiers ne réduisent pas leur efficacité fertilisante, en comparaison avec les applications de printemps.

**Mots clés :** fumiers de bovins, boues mixtes de papetières, rapports C/N, applications d'automne et de printemps, rendement de maïs ensilage, coefficient d'efficacité, nitrates du sol.

**Abstract,** \*A. N'Dayegamiye<sup>1</sup>, M. Giroux<sup>1</sup> and R. Royer<sup>1</sup>. **Manure and paper mill sludge applications: N efficiency and soil nitrates.** *Agrosol.* 15 (2) : 97-106. This study evaluated silage corn response, N recoveries and effects on soil nitrates, for two different manures (dairy and beef cattle manures), and two paper mill sludges, with C/N ratios varying from 12 to 24, applied in the fall and in the spring. Manures and paper mill sludges were applied alone or combined to a reduced level of mineral N fertilizer (90 kg ha<sup>-1</sup>). These treatments were compared to complete mineral N fertilizer (150 kg ha<sup>-1</sup>) and the control. Manures and paper mill sludges applied alone significantly ( $P < 0.01$ ) increased silage corn yields (1 to 2 t ha<sup>-1</sup>), compared to the control. However, highest corn yields were obtained when these organic amendments were combined with mineral N fertilizer at a rate of 90 kg ha<sup>-1</sup>. Nitrogen recoveries and N efficiency (equivalent to mineral N fertilizer) ranged respectively from 10.2 to 22.1%, and from 20 to 43.7%, and were influenced by manure and paper mill sludge characteristics. Nitrogen recoveries were significantly related to C/N ratios of organic products ( $r = -0.92$ ), N-NH<sub>4</sub>/total N ratios ( $r = 0.65$ ) and mineral N applied ( $r = 0.57$ ). Highest N recoveries and efficiencies were obtained for dairy manures which presented lowest C/N ratios (14 to 17) and applied in fall or in spring. Manures and paper mill sludges applied in fall (October) increased NO<sub>3</sub>-N levels in soil (0-60 cm), but significant increase was found only for dairy cattle manure with lowest the C/N ratios (14). As for N recoveries, the accumulation of NO<sub>3</sub>-N in soil was significantly related to C/N ratios ( $r = -0.80$ ), NH<sub>4</sub>/total N ( $r = 0.67$ ) and total N applied ( $r = -0.54$ ). This study demonstrated that NO<sub>3</sub>-N accumula-

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2 700, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8, Canada

\*Auteur pour la correspondance : téléphone (418) 644-6845, télécopieur : (418) 644-6855, Courriel : adrien.ndaye@irda.qc.ca

tions in soil profile were lower for manures and paper mill sludges with C/N ratios greater than 20. Nitrogen recoveries and efficiencies were equivalent for manures and paper mill sludges applied in the fall or in the spring.

**Key words:** cow and beef manures, paper mill sludges, C/N ratios, fall and spring applications, silage corn yields, N recoveries, soil nitrates.

## Introduction

Pour combler les déficits des sols agricoles en matière organique et en éléments nutritifs, environ un million de tonnes de boues mixtes de papetières sont intégrées dans les régies agricoles comme engrais ou amendements organiques. Par ailleurs, les quantités de fumiers et de lisiers épanchées annuellement sur les terres au Québec s'élèvent à plus de 30 millions de tonnes. Les engrais de ferme et les boues mixtes sont avant tout considérés pour leur importance en tant que valeur fertilisante. En effet, ceux-ci apportent dans les sols des quantités élevées d'éléments nutritifs majeurs et mineurs qu'il faut bien intégrer dans les plans de fertilisation. Les arrière-effets de ces engrais organiques sur les productions des cultures sont variables. De plus, leur valeur comme amendements organiques sur les propriétés des sols constitue un avantage incontestable pour la productivité des sols.

Les fumiers et les boues mixtes contiennent des éléments comme l'azote et le phosphore qui sont en partie sous forme minérale, disponibles aux cultures, et en partie sous forme organique. La fraction organique, variable selon la nature des fumiers ou des boues mixtes, doit être minéralisée avant de devenir disponible aux plantes. Une bonne gestion des fumiers et des boues mixtes se base d'abord sur la caractérisation de ces engrais, puis sur la connaissance des coefficients d'efficacité en azote et en phosphore. L'efficacité fertilisante de l'azote des fumiers et des boues mixtes dépend de leur composition biochimique, notamment des rapports C/N et des concentrations en cellulose et en lignine. Lorsque ces engrais organiques

présentent des rapports C/N et des teneurs en lignine élevées, on assiste à une forte immobilisation de l'azote qui peut diminuer la croissance et la production des cultures si la fertilisation azotée n'est pas ajustée. Par contre, les fumiers et les boues mixtes ayant de faibles rapports C/N et des taux élevés en cellulose se décomposent rapidement, libérant ainsi de l'azote disponible aux plantes cultivées (N'Dayegamiye et al., 2001). Chadwick et al. (2000) ont établi que 40 % de la variation du taux de minéralisation d'azote des fumiers était reliée aux rapports C/N.

Les coefficients d'efficacité de l'azote des fumiers et des boues mixtes dépendent également des propriétés du sol (texture, structure, pH) qui influencent leur minéralisation (Douglas et Magdoff, 1991). Ceux-ci dépendent aussi des espèces de cultures. De récentes recherches (Simard, 2001; N'Dayegamiye et al., 2001; Vagstad et al., 2001) ont démontré que l'efficacité fertilisante des boues mixtes était plus élevée pour les cultures ayant une longue période de croissance (maïs, choux, prairies), et faible pour celles de courte saison (orge). Les engrais organiques (fumiers, boues mixtes ou engrais verts) se minéralisent pendant toute la saison de végétation; leur minéralisation et la disponibilité de l'azote ne coïncident pas toujours avec les besoins des cultures. Par exemple, les céréales tels l'orge et le blé comblent leur besoin en azote tôt dans la saison et de cette façon, on obtient de faibles coefficients d'utilisation ou d'efficacité pour ces cultures. Un taux élevé de verse peut aussi être observé suite aux applications de fumiers et de boues mixtes précédant ces cultures. Les céréales peuvent donc préférentiellement bénéficier des arrière-effets des fumiers et des boues mixtes (N'Dayegamiye et al., 2001; Vagstad et al., 2001).

Il a aussi été démontré que l'efficacité fertilisante de l'azote dépend du rapport entre l'azote minéral et l'azote organique (Beauchamp, 1986). D'autres études ont indiqué que le degré de minéralisation et la disponibilité en azote de ces engrais organiques sont reliés aux teneurs en azote total (Palm et Sanchez, 1981). Ces

auteurs ont démontré que la minéralisation de l'azote est plus élevée lorsque les teneurs en N sont supérieures à 2 % (sur base sèche), et plus réduite pour de faibles teneurs en azote. Les matières organiques à très faibles teneurs en azote produisent même une immobilisation, tel que démontré par Fierro et al. (2000) pour les boues primaires désencrées. De même, Beauchamp (1986) a observé une immobilisation temporaire de l'azote pendant les quatre premières semaines après l'enfouissement de fumiers solides (C/N = 16), suivie ensuite d'une reminéralisation. Cette immobilisation temporaire de l'azote pourrait atténuer les risques de pertes de nitrates pour les épandages en post-récolte de fumiers solides de bovins et de boues mixtes de papetières.

Comme pour l'efficacité fertilisante, les pertes de nitrates peuvent également être associées à la composition des fumiers et des boues mixtes, et à leurs périodes d'épandage respectives. Les fumiers riches en azote minéral et ayant de faibles rapports C/N (< 15) pourraient rapidement libérer de l'azote dans le sol qui peut être, soit prélevé par les cultures, soit perdu par lessivage suite aux applications en post-récolte. Par contre, les fumiers et les boues mixtes ayant des rapports C/N plus élevés (15-30), avec une grande proportion d'azote organique pourraient graduellement libérer l'azote dans le sol, pouvant ainsi présenter de plus faibles pertes en nitrates. Les risques de pertes d'azote nitrique et ammoniacal peuvent être atténués par la présence de cultures ou de résidus de cultures et par l'incorporation au sol.

Cette étude avait pour objectifs de déterminer les effets de divers fumiers et boues mixtes à C/N variés, et de leurs périodes d'épandage (automne-printemps) sur les rendements en maïs et les coefficients d'efficacité d'azote. De même, leurs arrière-effets ont été évalués en deuxième année sur la culture d'orge. Un suivi des nitrates dans le sol (0-60 cm) a été effectué en relation avec les périodes d'épandage et la nature de ces engrais organiques.

## Dispositif expérimental

Cet essai était constitué de 18 traitements disposés de façon aléatoire, en quatre répétitions. Deux types de fumiers (fumier de bovins laitiers et fumier de bovins de boucherie) et deux types de boues mixtes de papetières, dont les rapports C/N variaient entre 12 et 24, ont été appliqués à l'automne et au printemps, et comparés à la fertilisation minérale de printemps (150 kg ha<sup>-1</sup>) et au témoin sans engrais minéral ou organique. Des traitements combinant les deux types de fumiers et de boues mixtes avec des engrais azotés en dose réduite (90 kg ha<sup>-1</sup>) étaient également inclus.

Les essais ont été effectués à la Station de recherche de l'IRDA à Deschambault, dans les cultures de maïs ensilage, la première année, et d'orge la seconde année. Le type de sol était un loam de la série Batiscan. Dans la couche arable (0-20 cm), les valeurs de pH étaient de 6,6, tandis que les teneurs en matière organique et en azote total étaient respectivement de 4,23 et 0,20 % (tableau 1). Le sol était riche en P, K, Ca et Mg.

Les fumiers et les boues mixtes ont été appliqués au début d'octobre 2001 et au printemps 2002 avec un épandeur à fumier. La dose apportée était en

moyenne de 30 t ha<sup>-1</sup>. La détermination précise des doses a été faite en plaçant quatre quadrats de 0,9 m<sup>2</sup> dans les parcelles, et par la pesée des quantités épanchées. Les engrais organiques ont ensuite été incorporés avec une herse à disque dans la couche superficielle du sol (0-10 cm).

Ces engrais organiques présentaient des valeurs variables en éléments nutritifs. De façon générale, ils étaient riches en N total (4,3 à 6,8 kg/t), en P (0,6 à 1,9 kg/t) et en carbone organique (38,7 à 45,1 %) (tableau 2). Le carbone a été estimé à partir de la matière organique mesurée par perte au feu en considérant un facteur de 2 : C = (MO/2). Par ailleurs, ces engrais organiques contenaient des teneurs variables en N minéral (N-NH<sub>4</sub> + N-NO<sub>3</sub>), qui représentaient en moyenne entre 4,3 et 32 % de l'azote total, selon les types d'engrais organiques. Les boues mixtes contenaient de faibles quantités de potassium, en comparaison avec les fumiers.

Pendant les deux années de l'étude, les engrais phosphatés et potassiques ont été appliqués dans tous les traitements, selon les analyses du sol et les besoins du maïs ensilage et de l'orge. Les engrais azotés ont été apportés seulement dans les traitements avec une fertilisation minérale (150 kg ha<sup>-1</sup>), et lorsque les

fumiers et les boues mixtes étaient complétés par l'engrais azoté en dose réduite (90 kg ha<sup>-1</sup>). Les engrais minéraux N, P et K ont été apportés sous forme de nitrate d'ammonium, de superphosphate et de chlorure de potassium respectivement.

Le maïs ensilage (variété Hyland HLS 012) a été semé au mois de mai 2002, avec une population de 83 000 plants ha<sup>-1</sup>. La récolte des parcelles a été faite à l'aide d'une ensileuse sur deux rangs espacés de 75 cm sur une longueur de 10 m. La récolte a été pesée et un échantillon a été séché au laboratoire, en vue de la détermination de la matière sèche et de l'analyse de la concentration en azote.

Le calcul des coefficients d'utilisation de N (CUN) a été effectué selon la méthode des différences entre les prélèvements en azote des traitements et du témoin, divisé par la quantité totale de l'azote apporté au sol par les fumiers, les boues mixtes ou l'engrais minéral.

**CUN = Prél. N avec engrais org. ou minéral – Prél. N témoin/ Quantité N apportée par les engrais organiques ou minéraux**

Les coefficients d'efficacité de N (en équivalence avec l'engrais N) ont été

**Tableau 1. Propriétés du sol étudié (série Batiscan).**

Type de sol	Profondeur (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	M.O. (%)	N total	P	K	Ca	Mg	Al (mg/kg)	P/Al (%)
Loam	0-20	6,56	4,23	0,198	410	327	3 883	137	1 397	11,72

**Tableau 2. Caractéristiques des engrais organiques appliqués.**

Types d'engrais organiques	Base humide					Matière sèche (%)	C	Rapport C/N	Rapport N minéral/N total	
	N total	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P	K					
	----- (kg/t) -----					----- (%) -----				
<b>Automne 2001</b>										
Boues de papetières 1	5,0	1,6	0,0	0,7	0,2	22,5	44,2	20	32,0	
Boues de papetières 2	4,7	0,2	0,0	0,6	0,2	25,0	45,1	24	4,3	
Fumier de bovins de boucherie	5,8	0,9	0,5	1,9	3,1	29,2	38,7	20	24,1	
Fumier de bovins laitiers	4,8	1,5	0,0	0,8	3,2	15,2	43,5	14	31,3	
<b>Printemps 2002</b>										
Boues de papetières 3	6,8	2,1	0,0	1,5	0,7	20,7	39,2	12	30,9	
Boues de papetières 4	5,4	1,6	0,0	1,2	0,6	22,9	40,0	17	29,6	
Fumier de bovins de boucherie	6,6	1,5	0,0	1,8	4,5	33,4	42,8	22	22,7	
Fumier de bovins laitiers	4,3	1,2	0,0	1,0	2,3	16,1	44,4	17	27,9	

établis selon le rapport des coefficients d'utilisation de N des engrais organiques, sur les coefficients d'utilisation des engrais minéraux.

$$CEN = CUN \text{ engrais organiques} / CUN \text{ engrais minéral}$$

Des échantillons de sol ont été pris sur plusieurs périodes à l'automne et au printemps, afin de connaître l'influence de la nature des engrais organiques et celle des épandages d'automne et de printemps sur l'accumulation des nitrates dans le profil du sol (0-60 cm).

## Résultats

### Production en maïs ensilage et prélèvements en N

De façon générale, les rendements en maïs ensilage ont été très élevés en 2002, variant de 11,9 à 16,7 t ha<sup>-1</sup>, selon les traitements (tableau 3). Les applications de fumiers et de boues mixtes, sans ajout d'engrais azoté, ont permis des augmentations significatives (P < 0,01) des rendements, variant de 1 à 2 t ha<sup>-1</sup>, ce qui représentait 10 à 20 % en comparaison avec le témoin sans engrais minéral ou organique. Cependant, les rendements les plus élevés ont été obtenus lorsque les apports de fumiers et de boues mixtes avaient été combinés avec une dose d'azote (90 kg ha<sup>-1</sup>). Ces rendements étaient similaires et parfois supérieurs à ceux que nous avons obtenus dans le sol fertilisé avec une fumure minérale (150 kg ha<sup>-1</sup>) pour le maïs ensilage. La production de maïs ensilage n'a pas été significativement différente entre les périodes d'épandage à l'automne ou au printemps, mais entre les types d'engrais organiques (P < 0,01).

### Arrière-effets

La culture d'orge a été semée en 2003 afin d'évaluer les arrière-effets de l'azote des fumiers et des boues mixtes. Malgré un semis tardif du champ, à cause des conditions météorologiques défavorables, les résultats obtenus indiquent un gain

de production de l'orge variant entre 300 et 760 kg ha<sup>-1</sup>, selon les types d'engrais organiques (tableau 4). Toutefois, les rendements les plus élevés ont été obtenus lorsqu'un supplément d'engrais azoté était apporté, à raison de 40 kg N ha<sup>-1</sup>. En effet, les analyses statistiques indiquent une interaction significative des engrais organiques et de l'engrais azoté apporté en complément, ce qui signifie que les arrière-effets d'une seule application de fumiers ou de boues mixtes n'ont pas été suffisants pour garantir des rendements élevés en orge.

### Coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote

Le coefficient d'utilisation de N de l'engrais minéral azoté a été de 50,9 %, tandis que ceux des fumiers et des boues mixtes variaient de 10,2 à 22,1 %, selon les types d'engrais organiques (tableau 5). En équivalence avec l'engrais minéral, les coefficients d'efficacité ont varié entre 20 et 43,7 %, selon les types d'engrais organiques.

De façon générale, on observe que les coefficients d'utilisation en N ont varié selon le type d'engrais appliqué. Les

Tableau 3. Rendement du maïs ensilage selon divers modes de fertilisation.

Types d'engrais organiques	Engrais organique seul	Engrais organique + N minéral
	Rendement (t/ha)	
Automne 2001	Boues de papetières 1	15,23
	Boues de papetières 2	15,43
	Fumier de bovins de boucherie	16,41
	Fumier de bovins laitiers	16,71
Printemps 2002	Boues de papetières 3	16,39
	Boues de papetières 4	15,31
	Fumier de bovins de boucherie	16,48
	Fumier de bovins laitiers	15,36
	Témoin et fumure minérale	15,28
	Valeur F	Probabilité > F
Types d'engrais organiques	3,25	0,0121
Apport complémentaire N	125,92	< 0,0001
Interaction	1,59	0,1746

Tableau 4. Arrière-effets sur le rendement en orge (2003) selon divers types d'engrais appliqués à l'automne et au printemps.

Types d'engrais organiques	Engrais organique seul	Engrais organique + N minéral*
	Rendement (t/ha)	
Automne 2001	Boues de papetières 1	2,38
	Boues de papetières 2	2,26
	Fumier de bovins de boucherie	1,94
	Fumier de bovins laitiers	1,86
Printemps 2002	Boues de papetières 3	2,03
	Boues de papetières 4	2,09
	Fumier de bovins de boucherie	2,25
	Fumier de bovins laitiers	1,99
	Fumure minérale	2,11
	Valeur F	Probabilité > F
F types d'engrais	0,18	0,4267
F apport complémentaire N minéral	1,85	0,0320
Interaction	2,12	0,0169

\*Dose minimale de N minéral : 40 Kg ha<sup>-1</sup>

coefficients d'utilisation et d'efficacité d'azote les plus élevés ont été mesurés pour les fumiers de bovins laitiers épanchés à l'automne ou au printemps, et ceci pourrait être attribuable à leur faible rapport C/N (14 à 17). L'analyse de corrélation indique une relation significative entre la quantité d'azote minéral appliquée ( $r = 0,57$ ), le rapport  $N-NH_4/N$  total ( $r = 0,65$ ) et les coefficients d'efficacité de l'azote (tableau 6).

Les coefficients d'efficacité de l'azote ont été inversement corrélés aux rapports C/N ( $r = -0,92$ ), ce qui démontre que les engrais organiques ayant de faibles rapports C/N minéralisent rapidement, libérant ainsi de l'azote dans les sols.

### Nitrates dans le profil du sol

Lorsque les engrais organiques minéralisent tardivement, sans aucune culture pour absorber l'azote en post-récolte, on peut assister à une accumulation des nitrates dans le profil du sol, pouvant occasionner du lessivage. Les teneurs en  $N-NH_4$  et en nitrates ( $N-NO_3$ ) mesurées dans le sol sont présentées dans les tableaux 7 et 8, en annexe. Les apports de fumiers et de boues mixtes de papeteries n'ont pas conduit à des accumulations significatives de  $N-NH_4$  dans la couche du sol (0-60 cm).

Les données d'analyse des nitrates dans les sols mesurées une semaine avant les épandages de fumiers et de boues mixtes indiquent de faibles teneurs (tableau 8). Cependant, les teneurs en nitrates se sont accrues substantiellement en novembre (figure 1), après l'épandage des engrais organiques (début octobre). Elles ont augmenté de deux à trois fois dans les sols fertilisés avec des fumiers et des boues mixtes, par rapport au témoin. De façon générale, les quantités totales de nitrates, mesurées dans le profil du sol à l'automne et au printemps, ont varié selon les types d'engrais organiques. Seul le fumier de bovins laitiers ayant un rapport faible de C/N (14) a conduit à une accumulation très importante des nitrates dans le profil du sol étudié (0-60 cm).

De plus, on observe un effet significatif de la profondeur ( $P < 0,001$ ); les quantités les plus élevées de nitrates se retrouvant beaucoup plus dans la couche de surface du sol (0-20 cm) où les engrais organiques ont été incor-

porés (tableau 8). Il est donc nécessaire d'incorporer les engrais de ferme au sol pour éviter le transport des éléments nutritifs vers les eaux de surface après les épandages.

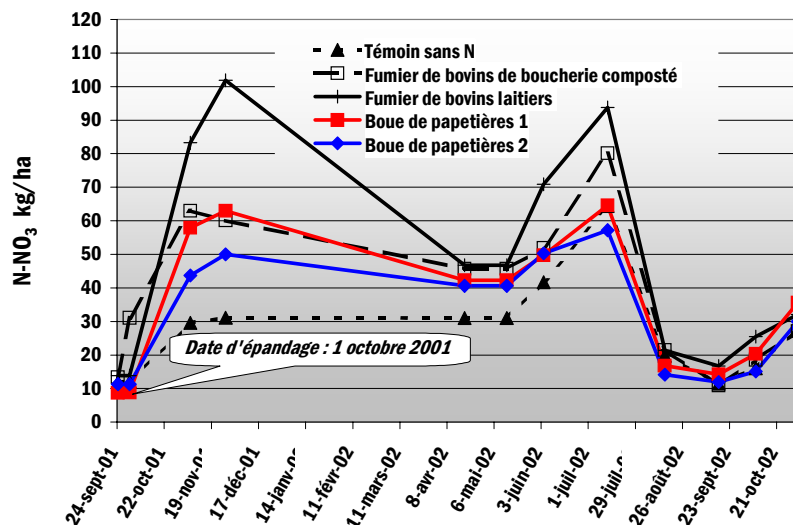


Figure 1. Nitrates dans le profil du sol (0-60 cm).

Tableau 5. Prélèvements en N, coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote selon les types d'engrais et les périodes d'épandage.

Types d'engrais organiques	Doses appliquées	Prélèvements	C.U.N. <sup>1</sup>	C.E.N. <sup>2</sup>	
	(kg N/ha)	(%)	(%)	(%)	
Automne 2001	Boues de papeteries 1	179	140	13,8	27,1
	Boues de papeteries 2	103	126	10,2	20,0
	Fumier de bovins de boucherie	190	143	14,7	28,8
	Fumier de bovins laitiers	167	152	22,1	43,4
Témoin sans N	0	115			
Printemps 2002	Fumure minérale	150	192	50,9	100,0
	Boues de papeteries 3	231	167	22,2	43,7
	Boues de papeteries 4	163	139	14,4	28,2
	Fumier de bovins de boucherie	263	134	12,4	24,3
Fumier de bovins laitiers	171	151	20,8	41,0	

1 : coefficient d'utilisation de l'azote des engrais

2 : coefficient d'efficacité de l'azote des engrais

Tableau 6. Matrice des corrélations entre différents paramètres des sols et des engrais organiques.

	N total appliqué	N minéral appliqué	Rapport $N-NH_4/N$ total	Rapport C/N	CEN	Sol $N-NO_3$
N total appliqué	1					
N minéral appliqué	0,82	1				
Rapport $N-NH_4/N$ total	0,44	0,84	1			
Rapport C/N	-0,26	-0,65	-0,74	1		
CEN	0,22	0,57	0,65	-0,92	1	
Sol $N-NO_3$	0,54	0,69	0,67	-0,80	0,62	1

CEN = coefficient d'efficacité



Les accumulations de nitrates dans le sol ont été fortement reliées aux rapports C/N ( $r = -0,80$ ), à la quantité totale d'azote apporté au sol ( $r = 0,54$ ) et au rapport azote minéral/N total ( $r = 0,67$ ) (tableau 6). Cette étude a indiqué que les accumulations de nitrates dans le profil du sol ont été généralement faibles lorsque les engrais organiques appliqués avaient des rapports C/N supérieurs à 20.

## Discussion

Les résultats obtenus dans cet essai indiquent que les apports de fumiers solides de bovins et de boues mixtes ont amélioré la productivité du sol. Apportés seuls, ces engrais organiques ont permis d'obtenir des gains de rendement en maïs de 1 à 2 t ha<sup>-1</sup>. Les coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote ont été différents entre les divers types d'engrais organiques, étant influencés par leur composition chimique. En effet, les coefficients d'efficacité ont été plus élevés pour les fumiers ou les boues mixtes ayant de faibles rapports C/N, mais n'ont pas été influencés par les périodes d'applications (automne versus printemps).

Les coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote mesurés dans cette étude sont similaires à ceux qui ont été obtenus pour les fumiers solides de bovins (Beauchamp, 1986) ou ceux qui sont généralement recommandés au Québec dans la gestion des fumiers (CRAAQ, 2003). De même, ces coefficients sont similaires à ceux qui ont été déterminés pour cinq espèces d'engrais verts (N'Dayegamiye et Tran, 2001).

Comme ces fumiers et boues mixtes contenaient une faible proportion d'azote minéral (tableau 2), et avaient un rapport N-NH<sub>4</sub>/N total modéré, les coefficients d'efficacité d'azote mesurés n'ont pas été très élevés pour ces engrais organiques. Ces résultats sont conformes aux coefficients généralement mesurés pour les fumiers solides de bovins et d'autres types de boues mixtes. Pour les fumiers de bovins ayant 9 % d'azote minéral et un rapport C/N de 16, les coefficients

d'utilisation étaient en moyenne de 15 % (Beauchamp, 1986), étant similaires à ceux qui ont été obtenus pour les fumiers et les boues mixtes dans cette présente étude. Les coefficients d'utilisation de N obtenus sont également similaires avec ceux qui ont été mesurés dans la culture de maïs grain, suite aux applications d'autres types de boues mixtes contenant entre 3 et 5 % d'azote minéral (N'Dayegamiye et al., 2001). Ces coefficients sont par contre plus faibles que ceux obtenus pour les lisiers de porcs, avec des coefficients d'utilisation supérieurs à 60 % (Paul et Beauchamp, 1995; Mooleki et al., 2002). Les lisiers ont généralement de faibles rapports C/N et des proportions élevées d'azote minéral (> 60 %) (Mooleki et al., 2002), ce qui explique leurs coefficients élevés d'utilisation de l'azote par les cultures.

Les coefficients d'utilisation obtenus ont varié entre 10,2 et 22 %, selon les types de fumiers et de boues mixtes. En les rapportant à la quantité totale de N appliqué, la quantité d'azote dérivée des engrais organiques et prélevée par le maïs ensilage représentait seulement entre 10 et 36 kg N ha<sup>-1</sup>, selon les engrais organiques, tandis que l'azote prélevé de l'engrais minéral était de 76 kg N ha<sup>-1</sup>. Ces données montrent que les quantités d'azote des fumiers et des boues mixtes utilisées par le maïs n'ont pas été élevées dans ce sol qui a fourni 115 kg N ha<sup>-1</sup> dans le traitement témoin.

Les résultats démontrent également que la quantité d'azote apportée par ces engrais organiques n'était pas suffisante pour combler les besoins des cultures exigeantes en N, tel le maïs, contrairement aux lisiers. De plus, les quantités d'azote organique apportées doivent être minéralisées avant de devenir disponibles à la culture. Il n'est donc pas approprié de vouloir combler 100 % des besoins en azote des cultures avec les fumiers solides et les boues mixtes dont les rapports C/N varient entre 15 et 25. Pour maximiser les rendements en maïs, un complément d'azote minéral est donc requis avec les engrais organiques utilisés.

À l'automne, les apports de fumiers et de boues mixtes ont conduit à une minéralisation et une libération des nitrates dans le sol. Toutefois, l'enrichissement le plus élevé du sol en nitrates a été mesuré seulement pour le fumier frais de bovins laitiers ayant un faible rapport C/N (14).

Pendant la saison de végétation des cultures (juin à septembre 2002), les quantités en N-NO<sub>3</sub> du sol ont également été augmentées par les apports de fumiers et de boues mixtes. Les teneurs en nitrates ont été faibles en fin de saison de végétation et durant la période automnale (septembre-octobre 2002), et n'ont pas été influencées par les apports de fumiers ou de boues mixtes de l'automne et du printemps précédents (tableau 8). Ces faibles teneurs en nitrates dans le sol à l'automne, après la saison de croissance des plantes, indiquent que les quantités d'azote minéralisé ont été prélevées par la culture. Elles démontrent également que les engrais organiques minéralisent de moins en moins dans le sol, les quantités de N minéral et la fraction labile d'azote ayant graduellement été épuisées par les prélèvements des cultures.

L'intensité du pic automnal des nitrates peut être reliée aux pertes de nitrates dans le réseau de drainage des sols (Berrouard et al., 2001). Deux pics de nitrates ont été observés (figure 1). Il s'agit d'abord du pic automnal de 2001 après les épandages, qui reflète une minéralisation des engrais organiques et une accumulation des nitrates dans le profil du sol en novembre, ces quantités de nitrates pouvant être perdues par lessivage.

Le deuxième pic des nitrates est observé durant l'été (figure 1), et il indique également une minéralisation continue des engrais organiques. Cependant, ces quantités estivales d'azote minéralisé sont prélevées par la culture, ce qui ramène les teneurs en nitrates à des niveaux plus bas en fin de saison. Ce même pic de minéralisation estivale a été également observé pour les épandages des engrais organiques au printemps 2002 (tableau 8). Afin de diminuer les pertes de nitrates dans le

sol, la minéralisation maximale des engrais organiques appliqués doit donc correspondre à la période maximale d'absorption par les cultures. Pour cela, les applications d'automne doivent être propices à ne pas générer des pics importants de minéralisation, ceci concerne les engrais organiques aux rapports C/N > 15, qui minéralisent avec moins d'intensité dans les sols en automne.

Les pertes d'azote sous forme de nitrates sont donc principalement reliées aux caractéristiques de l'engrais organique appliqué. C'est pourquoi l'évaluation du risque environnemental associé aux épandages d'automne peut être établie à partir des caractéristiques des engrais organiques, notamment leurs rapports C/N et la proportion de l'azote minéral (N-NH<sub>4</sub>/N-total), ainsi que des doses d'épandage et des caractéristiques des systèmes culturaux dans lesquels ils sont intégrés.

Cette présente étude a démontré que les épandages d'automne produisent la même efficacité fertilisante en azote que ceux de printemps, pour un même type d'engrais organique. Cependant, les pertes de N peuvent être plus élevées pour les épandages d'automne lorsque les fumiers et les boues mixtes ont de faibles rapports C/N, pouvant ainsi minéraliser rapidement. Même s'il survient des pertes d'azote lors des épandages de fumiers ou de boues mixtes à l'automne, il n'est pas approprié d'augmenter leurs doses afin de tenir compte de ces pertes. Les coefficients d'efficacité en N, identiques pour les épandages d'automne et de printemps pour les engrais organiques étudiés, suggèrent que leur forte proportion d'azote organique pourrait atténuer les pertes de N et permettre une bonne utilisation de l'azote l'année suivante.

## Conclusion

Cette étude a démontré une réponse significative du maïs ensilage aux applications d'automne ou de printemps des fumiers et des boues mixtes de papetières. En équivalence avec l'engrais minéral, les coefficients d'efficacité ont varié de 20 à 43,4 %, selon les types d'engrais organiques. Les coefficients d'efficacité ainsi que les rendements n'ont pas été influencés par les périodes d'épandage de fumiers et de boues mixtes de papetières. Ils ont plutôt varié selon les rapports C/N, les rapports N-NH<sub>4</sub>/N total, et les quantités d'azote total et d'azote minéral appliquées. Les accumulations les plus importantes de nitrates dans le profil du sol ont été observées pour les fumiers de bovins laitiers qui présentaient un faible rapport C/N et donc une plus grande minéralisation de l'azote. Les apports automnaux de boues mixtes ou de fumiers au rapport C/N plus élevé (> 20) pourraient être effectués en post-récolte, sans occasionner une perte d'efficacité fertilisante et sans porter atteinte à l'environnement, si des précautions comme l'incorporation au sol sont prises en compte. Ces engrais organiques à rapport C/N plus élevé contiennent d'ailleurs peu d'azote minéral et accroissent faiblement les teneurs en nitrates des sols.

## Remerciements

Cette recherche a été réalisée grâce aux fonds de recherche accordés par le CRAAQ, la compagnie Bowater et l'IRDA. Nous sommes très reconnaissants pour l'aide financière apportée.

## Références bibliographiques

- Beauchamp, E. G. 1986. Availability of nitrogen from three manures to corn in the field. *Can. J. Soil Sci.* 66: 713-720.
- Berrouard, A., M. Giroux et M. Blackburn. 2001. Effets comparatifs de différentes cultures et modes de fertilisation sur la teneur en nitrates dans les sols en fin de culture et dans les eaux de drainage souterrain. *Cahier de l'Observatoire de la qualité des sols. IRDA.* 37 p.
- Chadwick, D.R., John, F. Pain, B.F., Chambers, B.J. and Williams, J. 2000. Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures: a laboratory experiment. *J. Agric. Sci.* 134: 159-168.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation, 1<sup>ère</sup> édition. p 119- 152.
- Douglas, B. F. and F.R. Magdoff. 1991. An evaluation of nitrogen mineralization indices for organic residues. *J. Environ. Qual.* 20: 368-372.
- Fierro, A., Angers, D.A. and C.J., Beauchamp. 2000. Decomposition of paper de-inking sludge in a sandpit minesoil during revegetation. *Soil Biol. Biochem.* 32: 143-150.
- Mooleki, M. D., J.J. Schoenau, G. Wen, and J. L. Charles. 2002. Effect of rate, frequency and method of liquid swine manure application on soil nitrogen availability, crop performance and N use efficiency in eastern-central Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 82: 457-467.
- N'Dayegamiye, A., S. Huard et Y. Thibault. 2001. Valeur fertilisante des boues mixtes de papetières dans des sols cultivés en maïs-grain, soya et orge. *Agrosol*, vol. 12, no 1 : 25-34.

- N'Dayegamiye, A. and Thi Sen Tran. 2001. Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition. *Can. J. Soil Sci.* 81 : 371-382.
- Palm, C. A. and P. A. Sanchez. 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biol. Biochem.* 23 : 83-88.
- Paul, J. W. and E.G. Beauchamp. 1995. Availability of manure slurry ammonium for corn using 15 N-labelled  $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ . *Can. J. Soil Sci.* 73: 35-42.
- Simard, R.R. 2001. Combined primary/secondary papermill sludge as a nitrogen source in a cabbage-sweet corn cropping sequence. *Can. J. Soil Sci.* 81: 1-10.
- Vagstad, N., Broch-Due, A. and I. Lymgstad. 2001. Direct and residual effects of pulp and paper mill sludge on crop yield and soil mineral. *Soil Use and Management* 17: 173-178.



# Annexe

Tableau 7. Teneurs en N-NH<sub>4</sub> du sol (0-60 cm) selon les types d'engrais organiques et les périodes d'épandage

Traitements	Prof. (cm)	N-NH <sub>4</sub> (kg/ha)																			
		24 sept 01	6 nov 01	27 nov 01	18 avr 02	4 juin 02	12 juil 02	15 août 02	16 sept 02	8 oct 02	12 nov 02										
-----																					
Autonne 2001																					
Temoin	0-20	4,97	4,49	2,37	10,68	3,39	3,27	2,99	2,43	2,51	1,68										
	20-40	4,35	4,44	2,56	6,13	2,73	3,19	1,53	2,24	2,16	2,65										
	40-60	2,21	1,95	1,57	3,30	1,36	1,23	1,69	1,31	1,04	1,18										
Boues de papeteries 1	0-20	5,22	5,09	3,13	11,49	2,70	5,09	4,92	3,13	3,11	1,71										
	20-40	4,66	2,95	1,95	4,78	2,12	3,07	2,28	1,65	2,02	1,46										
	40-60	2,37	2,21	1,37	3,38	1,10	1,01	0,96	1,14	1,42	1,32										
Boues de papeteries 2	0-20	5,43	4,63	2,27	9,26	5,26	3,83	3,83	2,20	2,85	2,19										
	20-40	3,40	3,34	1,70	6,36	4,20	2,57	2,74	1,66	1,62	1,58										
	40-60	2,11	1,90	1,67	5,74	1,13	0,60	2,30	0,62	1,03	1,11										
Fumier de bovins de boucherie 1	0-20	5,15	4,41	2,54	10,71	2,85	5,29	3,58	2,35	2,80	1,34										
	20-40	4,23	4,30	2,03	6,16	2,43	2,76	1,59	2,96	2,86	2,25										
	40-60	1,97	2,20	1,58	3,44	1,75	1,72	1,00	0,77	1,28	1,18										
Fumier frais de bovins laitiers 1	0-20	4,57	8,91	3,85	11,11	3,31	5,22	3,62	1,55	7,03	1,41										
	20-40	4,06	4,23	2,87	5,35	2,57	2,46	1,95	1,59	2,42	1,39										
	40-60	1,69	1,91	1,23	3,00	1,70	1,39	0,65	0,58	1,25	0,86										
-----																					
Printemps 2002																					
Boues de papeteries 3	0-20	---	---	---	---	11,59	6,00	4,58	3,03	5,91	1,67										
	20-40	---	---	---	---	2,35	3,79	2,75	1,51	2,18	1,22										
	40-60	---	---	---	---	1,54	1,39	1,16	1,01	1,26	1,15										
Boues de papeteries 4	0-20	---	---	---	---	2,78	3,48	3,57	3,10	2,80	1,60										
	20-40	---	---	---	---	2,05	2,64	1,89	1,14	1,84	1,25										
	40-60	---	---	---	---	1,85	2,00	0,44	0,79	1,49	1,81										
Fumier de bovins de boucherie 2	0-20	---	---	---	---	4,56	4,56	3,92	3,79	2,36	2,33										
	20-40	---	---	---	---	2,04	2,52	2,24	1,07	1,71	1,17										
	40-60	---	---	---	---	1,38	1,14	0,87	0,89	1,19	1,54										
Fumier frais de bovins laitiers 2	0-20	---	---	---	---	2,50	6,16	3,93	1,79	4,42	1,36										
	20-40	---	---	---	---	1,66	2,82	2,49	1,32	1,80	1,29										
	40-60	---	---	---	---	1,49	0,64	1,47	0,76	1,04	1,28										
-----																					
Traitements		F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F	F Pr > F								
Profondeur		1,21 0,3878	0,70 0,6096	0,62 0,6538	0,05 0,9949	3,24 0,0120	0,71 0,6801	0,71 0,6789	1,01 0,4570	2,86 0,0219	0,60 0,7663	83 0,0001	9,83 0,0005	10,36 0,0004	23,97 0,0001	19,65 0,0001	42,12 0,0001	65,93 0,0001	34,63 0,0001	37,77 0,0001	3,39 0,0410
Profondeur * profondur		0,78 0,6250	0,88 0,5449	1,03 0,4365	0,42 0,8975	2,99 0,0014	0,73 0,7539	0,82 0,6589	1,51 0,1318	2,33 0,0109	1,33 0,2154										

**Tableau 8. Teneurs en N-NO<sub>3</sub> du sol (0-60 cm) selon les types d'engrais organiques et les périodes d'épandage**

Traitements	Prof. (cm)	24 sept 01	6 nov 01	27 nov 01	18 avr 02	4 juin 02	12 juil 02	15 août 02	16 sept 02	8 oct 02	12 nov 02
		N-NO <sub>3</sub> (kg/ha)									
<b>Automne 2001</b>											
Témoïn	0-20	6,33	14,74	13,00	13,27	21,74	33,62	7,52	7,69	10,34	13,85
	20-40	4,31	10,93	14,01	10,53	12,85	19,39	8,19	2,23	3,69	12,55
	40-60	1,35	3,93	4,11	7,22	7,13	11,34	4,07	1,61	2,09	1,73
Boues de papetières 1	0-20	5,89	32,68	28,76	14,98	26,11	34,61	8,02	9,85	13,15	13,54
	20-40	2,02	18,02	25,72	13,11	14,86	20,10	2,95	1,79	3,45	11,88
	40-60	0,83	7,21	8,55	14,23	8,76	9,86	5,84	2,63	3,79	10,19
Boues de papetières 2	0-20	6,46	24,36	21,00	15,51	27,14	28,35	5,50	8,69	10,51	13,30
	20-40	2,97	14,24	21,21	12,49	16,01	19,05	3,41	1,36	2,65	12,29
	40-60	1,89	5,14	7,76	12,61	7,12	9,79	5,23	1,87	1,94	4,43
Fumier de bovins de boucherie 1	0-20	7,84	31,39	23,43	12,96	23,92	39,87	8,42	7,98	11,78	11,99
	20-40	4,15	26,07	26,72	17,92	15,95	26,42	6,18	1,63	2,98	11,11
	40-60	1,39	5,57	9,94	14,82	12,01	13,84	6,93	1,35	3,85	4,02
Fumier frais de bovins laitiers 1	0-20	6,29	48,24	53,77	15,47	32,07	49,71	9,56	11,99	18,48	12,58
	20-40	5,88	27,43	38,04	19,42	24,23	28,47	6,15	1,63	4,14	14,35
	40-60	1,70	7,59	10,07	11,92	14,58	15,57	5,70	3,09	2,87	5,21
Boues de papetières 3	0-20	---	---	---	---	57,21	62,63	28,36	12,53	26,26	14,02
	20-40	---	---	---	---	16,14	35,52	11,23	2,09	4,82	13,47
	40-60	---	---	---	---	7,40	14,56	12,26	2,33	2,93	5,34
Boues de papetières 4	0-20	---	---	---	---	42,47	51,69	7,02	8,99	17,25	14,58
	20-40	---	---	---	---	14,60	19,87	4,51	1,65	3,04	12,44
	40-60	---	---	---	---	6,53	27,00	5,61	2,41	2,50	7,06
Fumier de bovins de boucherie 2	0-20	---	---	---	---	30,94	47,26	8,97	10,29	14,55	17,93
	20-40	---	---	---	---	12,90	28,70	3,48	1,57	3,53	12,67
	40-60	---	---	---	---	6,72	13,89	5,47	2,71	3,41	4,88
Fumier frais de bovins laitiers 2	0-20	---	---	---	---	35,94	37,60	4,98	8,51	12,48	11,51
	20-40	---	---	---	---	14,61	22,28	2,55	1,41	2,47	9,04
	40-60	---	---	---	---	7,49	11,12	4,72	2,18	2,80	2,60
<b>Traitement</b>		<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>	<b>F Pr &gt; F</b>
Profondeur		0,93 0,4802	7,67 0,0026	14,14 0,0002	1,55 0,2511	4,73 0,0014	4,41 0,0022	4,66 0,0015	0,96 0,4868	2,66 0,0293	0,99 0,4660
Traitement * profondeur		46,30 0,0001	68,84 0,0001	36,56 0,0001	3,04 0,0629	234 0,0001	117,8 0,0001	17,73 0,0001	159,5 0,0001	136,50 0,0001	59,07 0,0410
		1,04 0,4624	3,103 0,0013	3,11 0,0111	1,85 0,1065	7,60 0,0001	1,92 0,0390	3,21 0,0007	0,77 0,7069	2,55 0,0054	0,92 0,5634