

Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : rendements de maïs-ensilage, coefficients d'efficacité et accumulation de nitrates dans le sol.

Rapport de recherche 2001-2003.

ÉQUIPE DE RECHERCHE :

Adrien N'Dayegamiye, Marcel Giroux et Raynald Royer

Cette recherche a été réalisée grâce aux fonds de recherche accordés par le CRAAQ, la compagnie Bowater et l'IRDA

RÉSUMÉ

Cette étude avait pour objectif de déterminer 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 d'azote et les pertes de nitrates dans le sol survenues après les épandages. De même, les arrière-effets des fumiers et des boues mixtes ont été évalués en deuxième année sur la culture d'orge. L'essai était constitué de 18 traitements disposés de façon aléatoire, en quatre répétitions. Deux types de fumier (fumier de bovins laitiers et fumier de bovins de boucherie avec bran de scie) et deux types de boues mixtes de papetières, dont les rapports C/N variaient entre 12 et 24, ont été appliqués en automne et au printemps, et comparés à la fertilisation minérale azotée (150 kg ha^{-1}) et au témoin sans engrais ni amendements organiques. Des traitements combinant les deux types de fumiers et de boues mixtes avec des engrais azotés en dose réduite (90 kg ha^{-1}) étaient également inclus. L'étude a été effectuée sur un loam de la série Batiscan. Les applications de fumiers et de boues mixtes, sans ajout d'engrais N, ont permis des augmentations significatives ($P < 0,01$) de rendements, variant de 1 à 2 t ha^{-1} , 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^{-1}). La production de maïs-ensilage et l'efficacité fertilisante n'ont pas été significativement différentes entre les périodes d'épandage d'automne ou de printemps. Les coefficients d'utilisation de l'azote des fumiers et des boues mixtes ont varié de 10,2 à 22,1% et les coefficients d'efficacité de 20 à 43,7%. Ceux-ci étaient influencés par les types d'engrais organiques et leur composition chimique. En effet, les coefficients d'efficacité d'azote étaient significativement corrélés aux rapports C :N des engrais organiques étudiés ($r = -0,92$), à la quantité de N minéral ($r = 0,57$), et au rapport $\text{N-NH}_4/\text{N total}$ ($r = 0,65$). Les coefficients les plus élevés ont été obtenus pour les fumiers de bovins laitiers épandus en automne ou au printemps, qui présentaient de plus faibles rapports C :N (12 à 17). Les arrière-effets de fumiers et de boues mixtes ont permis d'obtenir des gains de 500 kg ha^{-1} d'orge, en moyenne. Les apports de fumiers et de boues mixtes à l'automne (octobre) ont significativement accru les teneurs en nitrates dans le profil du sol (0-40 cm). 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). 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 $\text{N-NH}_4/\text{N total}$ ($r = 0,67$). Cette étude a démontré que les pertes en nitrates dans le profil du sol peuvent être généralement faibles lorsque les engrais organiques appliqués ont des rapports C :N supérieurs à 20 et si des précautions comme l'incorporation au sol sont prises en compte. Il a également été démontré que les apports automnaux de boues mixtes ou de fumiers ne réduisent pas leur efficacité fertilisante.

1. 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 régions agricoles comme engrais ou amendements organiques. Par ailleurs, les quantités de fumiers épandues annuellement s'élèvent environ à 20 millions de tonnes. Cependant, les fumiers autant que les boues mixtes sont avant tout considérés pour leur importante 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 élevés. De plus, leur valeur comme amendements sur les propriétés des sols constitue également un avantage incontestable pour la productivité des sols.

Les fumiers et les boues mixtes contiennent des éléments minéraux (P, K, Ca, Mg) qui sont principalement sous forme minérale, disponible aux cultures. Cependant, l'azote des fumiers ou des boues mixtes se trouve en grande partie sous forme organique, selon la nature des fumiers ou de boues mixtes, et doit donc être minéralisé avant d'être disponible aux plantes cultivées après leur épandage au sol.

Une bonne gestion des fumiers et des boues mixtes se base ainsi d'abord sur la caractérisation de ces engrais organiques, ensuite sur la connaissance des coefficients d'efficacité en azote. L'efficacité fertilisante des fumiers et des boues mixtes dépend de leur composition biochimique, notamment des rapports C :N, et des concentrations en cellulose et lignine. Lorsque ces matières organiques présentent des rapports C :N et des teneurs en lignine élevées, on assiste à une forte immobilisation d'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 étaient reliés aux rapports C :N.

Les coefficients d'efficacité 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, prairie), 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 coïncide pas toujours avec les besoins des cultures. Par exemple, les céréales tel l'orge ou le blé comblent leur besoin en azote tôt dans la saison. De cette façon, on obtient de faibles coefficients d'utilisation ou d'efficacité. 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 de la forme d'azote, soit le 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 optimale lorsque les teneurs en N sont supérieures à 2% (sur base sèche), et faible pour des teneurs plus faibles en azote. Les matières organiques ayant de faibles teneurs en azote produisent une forte immobilisation d'azote, tel que démontré par Fierro et al. (2000) pour les boues primaires désencrées. De même, Beauchamp (1986) a observé une immobilisation temporaire pendant les quatre premières semaines après l'enfouissement de fumier solide (C :N=16), suivie ensuite d'une réminéralisation. Cette immobilisation temporaire de l'azote pourrait atténuer les risques de pertes de nitrates pour les épandages en automne 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 respectives d'épandage. 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 soit être prélevé par les cultures, soit perdu par lessivage suite aux applications de fin de récolte ou d'automne. Par contre, des fumiers et des boues mixtes avec des rapports C :N plus élevés (15-30) et une grande proportion en 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 l'incorporation au sol.

2. OBJECTIFS

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, les arrière-effets des fumiers et des boues mixtes 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 des engrais organiques.

2.1. Dispositif expérimental

Deux types de fumier (fumier de bovins laitiers et fumier de bovins de boucherie avec bran de scie) et deux types de boues mixtes de papetières, dont les rapports C/N variaient entre 12 et 24, ont été appliqués en automne et au printemps, et comparés à la fertilisation minérale de printemps et au témoin sans engrais minéraux ou organiques (Tableau 3). Des traitements combinant les deux types fumiers et de boues mixtes avec des engrais minéraux étaient également inclus. L'essai était ainsi constitué de 18 traitements disposés de façon aléatoire, en quatre répétitions

Les essais ont été effectués à la station de recherche de l'IRDA à Deschambault, dans les cultures de maïs, 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 étaient respectivement de 4,03 et 0,17% (Tableau 1) . Le sol était riche en P, K, Ca et Mg.

Tableau 1. Propriétés du sol étudié (série Batiscan)

Type de sol	Profondeur (cm)	pH (H ₂ O)	M.O. -----%-----	N total	P ----- (kg/ha Mehlich-3) -----	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

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⁻¹ . La détermination précise des doses a été faite en plaçant quatre quadrats de 0,9 m² dans les parcelles, et par la pesée des quantités épandues. 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 matière organique (38,7 à 45,1%) (Tableau 2). Par ailleurs, ces engrais organiques contenaient des teneurs variables en N minéral (N-NH₄ + N-NO₃), qui représentaient en moyenne entre 4,3 et 32%, selon les types d'engrais organiques. Les boues mixtes contenaient de faibles quantités de potassium, en comparaison avec les fumiers.

Tableau 2. Caractéristiques des engrais organiques appliqués

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Base humide					Matière sèche	C	Rapport C/N	Rapport N minéral/N total
		N total	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K				
		(kg/t)								
Boues de papetières 1	Automne 2001	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
Boues de papetières 3	Printemps 2002	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

Le maïs-ensilage (variété Hyland HLS 012) a été semé au mois de mai 2002, avec une population de 83000 plants ha⁻¹. La récolte des parcelles a été faite à l'aide d'une ensileuse sur deux rangs espacées de 75 cm et sur une distance de 10 m. La récolte a été pesée et un échantillon pris et 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 apporté par les engrais organiques ou minéraux.

Les coefficients d'efficacité de N ont été 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 (Tableaux 2 et 3 en annexe) en automne et au printemps, afin de connaître l'influence des épandages d'automne et de printemps sur l'accumulation de nitrates dans le profil du sol (0-60 cm).

3. RÉSULTATS

3.1. 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⁻¹, selon les traitements (Tableau 3). Les applications de fumiers et de boues mixtes, sans ajout d'engrais, ont permis des augmentations significatives (P<0,01) de rendements, variant de 1 à 2 t ha⁻¹, ce qui représentait 10 à 20% en comparaison avec le témoin sans engrais minéraux ou organiques. 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⁻¹). Ces rendements étaient similaires et parfois supérieurs à ceux que nous avons obtenus dans le sol fertilisé avec une fumure minérale (150 kg ha⁻¹) pour le maïs ensilage. La production de maïs ensilage n'a pas été significativement différente entre les périodes d'épandage d'automne ou de printemps, mais entre les types d'engrais organiques (P<0,01).

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

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Engrais organique seul	Engrais organique + N minéral
		Rendement (t/ha)	
Boues de papetières 1	Automne 2001	13,36	15,23
Boues de papetières 2		12,47	15,43
Fumier de bovins de boucherie		12,42	16,41
Fumier de bovins laitiers		14,31	16,71
Boues de papetières 3	Printemps 2002	14,60	16,39
Boues de papetières 4		13,33	15,31
Fumier de bovins de boucherie		13,64	16,48
Fumier de bovins laitiers		14,49	15,36
Témoin et fumure minérale		11,86	15,28
	Valeur F	Probabilité > F	
Types d'engrais	3,25	0,0121	
Apport complémentaire N	125,92	< 0,0001	
Interaction	1,59	0,1746	

3.2. Arrière-effets.

La culture d'orge a été semée en 2003 afin d'évaluer les arrière-effets 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 d'orge variant entre 300 et 760 kg ha⁻¹, selon les types d'engrais organiques (Tableau 7, annexe). Toutefois, les rendements les plus élevés ont été obtenus lorsque un supplément d'engrais azoté était effectué, en raison de 40 kg N ha⁻¹. En effet, les analyses statistiques indiquent une interaction significative des engrais organiques et l'engrais azoté apporté en complément, ce qui signifie que les arrière-effets d'une seule

application des fumiers ou des boues mixtes seuls n'ont pas été suffisants pour garantir des rendements élevés en orge.

3.3. Coefficients d'utilisation et d'efficacité d'azote

Le coefficient d'utilisation de l'azote de l'engrais 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 4). En équivalence avec l'engrais minéral, les coefficients d'efficacité ont varié entre 20 à et 43,7% .

Tableau 4. 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	Périodes des apports	Doses appliquées	Prélèvements	C.U.N. ¹	C.E.N. ²
		------(kg N/ha)-----	-----	-----%-----	
Boues de papetières 1	Automne 2001	179	140	13,8	27,1
Boues de papetières 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		
Fumure minérale		150	192	50,9	100,0
Boues de papetières 3	Printemps 2002	231	167	22,2	43,7
Boues de papetières 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

De façon générale, on observe que les coefficients d'utilisation en N ont varié selon le type d'engrais appliqué. Les coefficients les plus élevés d'utilisation et d'efficacité d'azote ont été mesurés pour les fumiers de bovins laitiers, épandus en automne ou au printemps, et ceci pourrait être attribuable à leur faible rapport C :N (14 à 17). L'analyse de corrélations indique une relation significative entre la quantité d'azote minéral appliqué ($r=0,57$), le rapport N-NH₄/ N total ($r=0,65$) avec les coefficients d'efficacité d'azote (Tableau 5).

Tableau 5. 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

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

3.4. Nitrates dans le profil du sol

Lorsque les engrais organiques minéralisent tôt ou tardivement, sans aucune culture pour absorber l'azote, on peut assister à une accumulation de nitrates dans le profil du sol, qui peut par la suite être sujet au lessivage. Les teneurs en N-NH₄ et en nitrates (N-NO₃) mesurées dans le sol sont présentées dans les tableaux 8 et 9, en annexe. Les apports de fumiers et de boues mixtes de papetières n'ont pas conduit à des accumulations significatives de N-NH₄ dans la couche du sol (0-60 cm).

Les données mesurées avant les épandages de fumiers et de boues mixtes (24 septembre) indiquent de faibles teneurs en nitrates du sol (Tableau 9, en annexe). Cependant, les teneurs en nitrates se sont accrues substantiellement en novembre (Figure 1), après l'épandage des engrais organiques (début octobre). Les teneurs en nitrates ont augmenté de deux à trois fois dans les sols avec fumiers et boues mixtes, par rapport au témoin. De façon générale, les quantités totales de nitrates, mesurées dans le profil du sol en automne et 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 de 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 plus dans la couche de surface du sol (0-20 cm) où les engrais organiques ont été incorporés. Il est donc nécessaire d'incorporer au sol les engrais de ferme pour éviter le transport des éléments nutritifs vers les eaux de surface après les épandages.

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 5). Cette étude a indiqué que les pertes en nitrates dans le profil du sol ont été généralement faibles lorsque les engrais organiques appliqués avaient des rapports C :N supérieurs à 20.

4. 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⁻¹. Les coefficients d'utilisation et d'efficacité d'azote ont été différents entre les différents 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 d'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).

Même si ces fumiers et boues mixtes contenaient une grande proportion d'azote minéral (Tableau 2), et avaient un rapport N-NH₄/N total élevé, les coefficients d'efficacité d'azote mesurés n'ont pas été très élevés pour ces engrais organiques. Ces résultats ne sont pas conformes aux autres recherches qui ont mesuré des coefficients élevés en première année pour les lisiers de porc ou de bovins riches en azote minéral (Mooleki et al 2002; Paul et Beauchamp 1995). Par exemple, les lisiers généralement riches en N minéral, ont produit des coefficients d'utilisation supérieurs à 60%. (Mooleki et al. 2002). Par contre, pour les fumiers de bovins ayant 9% d'azote minéral et un rapport C :N de 16, les coefficients 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 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).

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 à 36 kg N ha⁻¹, selon les engrais organiques, tandis que l'azote prélevée de l'engrais minéral était de 76 kg N ha⁻¹. 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⁻¹ dans le traitement témoin. Il est possible que le loam sur lequel l'essai était situé ait présenté une importante

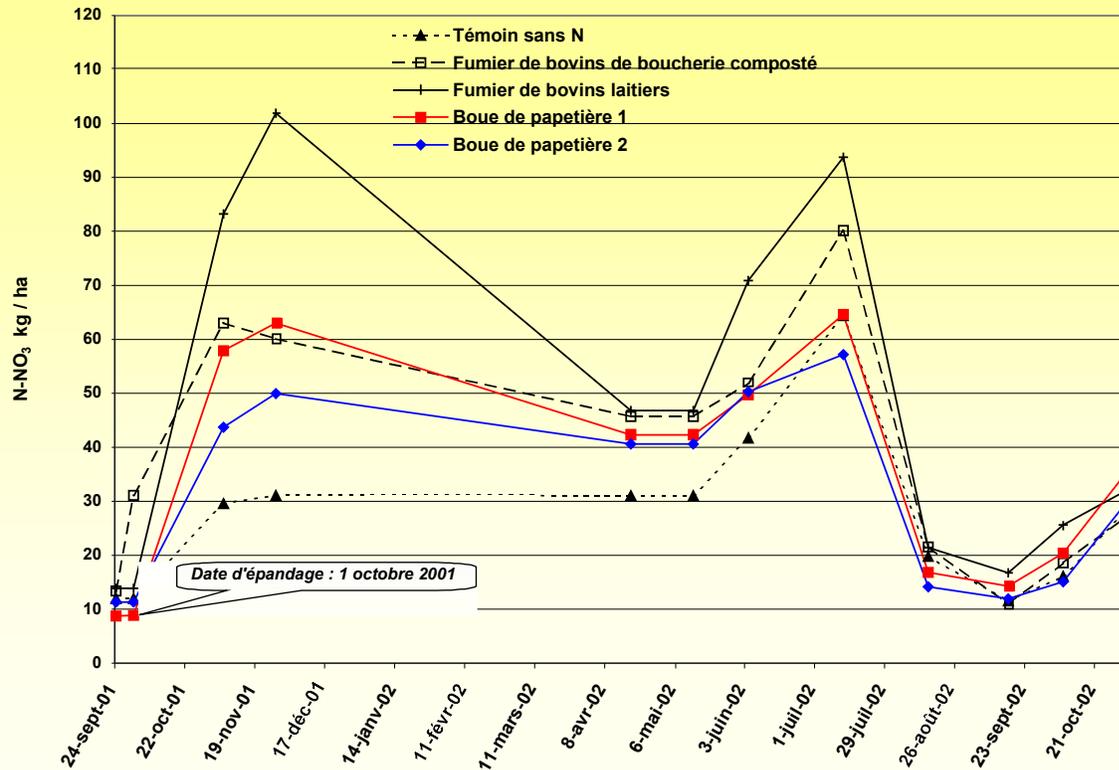
minéralisation d'azote de la matière organique, ce qui explique ainsi les faibles coefficients d'utilisation pour ces engrais organiques riches en N minéral.

Ces résultats suggèrent que la quantité d'azote minéral apporté 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.

Les apports en automne de fumiers et de boues mixtes ont conduit à une minéralisation et libération de 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-NO₃ 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 en période automnale (septembre-octobre 2002), et n'ont pas été influencées par les apports de fumiers ou de boues mixtes de l'automne et printemps précédents (Tableau 9). Ces faibles teneurs en nitrates dans le sol en 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 épuisés.

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



L'intensité du pic automnal de nitrates peut être relié aux pertes de nitrates dans le réseau de drainage des sols (Berrouard et al. 2001). Deux pics de nitrates ont été observés (Figure 1); celui d'automne 2001 reflète une minéralisation des engrais organiques et une accumulation de nitrates dans le profil du sol en novembre, ces quantités de nitrates pouvant être perdues par lessivage.

Le pic de nitrates durant l'été indique également une minéralisation continue des engrais organiques et ces quantités d'azote 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 a été également observé pour les épandages de printemps des engrais organiques (données non présentées). 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.

Les pertes d'azote 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 des systèmes culturaux dans lesquels ils sont intégrés. Des abaques de risque environnemental pour les périodes d'épandage (Tableau 6, en annexe) ont été établis en considérant les rapports C :N des engrais organiques, la présence de résidus organiques au sol et la présence de cultures de couverture (Côté et al. 2003). Cet outil vise à assurer de bonnes pratiques d'épandage de fumiers et de boues mixtes et à préciser les pratiques qui présenteraient ainsi un risque de pertes de nitrates.

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 organiques. 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 ne semble pas approprié d'augmenter leurs doses pour 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 N l'année suivante.

5. 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 des 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. Ils ont plutôt varié selon les rapports C :N, les rapports N-NH₄/N total, et les quantités d'azote total de ces engrais organiques. Les pertes les plus importantes de nitrates dans le profil du sol ont été observés pour les fumiers de bovins laitiers qui présentaient un faible rapport C :N et donc une plus grande minéralisation d'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 comportent d'ailleurs peu de quantités d'azote minéral et accroissent faiblement les teneurs en nitrates des sols.

6. BIBLIOGRAPHIE

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 comparatif 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.

Côté, D., M. Giroux, A. N'Dayegamiye et S.P. Guertin 2003. Analyse des risques environnementaux liés aux périodes d'épandage. LA TERRE DE CHEZ NOUS Vol. 4, no 41 : 24-25.

CRAAQ 2003. Guide de référence en fertilisation, 1^{ère} 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 (biosolides) dans des sols cultivés en maïs-grain, soya et orge. Agrosol, vol. 12, no1 : 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 (NH₄)₂ SO₄. 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 6. Rapport C/N, efficacité fertilisante des engrais organiques et risque potentiel de pertes d'azote pour les épandages post-récolte.

Nature de l'engrais	Rapport C/N	Coefficient d'efficacité (%)	N-NH ₄ /N total	Risque*
Lisier de porcs	3	65	70	4
Lisier de porcs (surnageant)	2	80	80	4
Lisier de porcs (fond de fosse)	6	60	55	4
Lisier de poules	4	75	65	4
Lisier de bovins laitiers	11	50	52	3
Lisier de bouvillons	14	50	41	3
Lisier de veaux de lait	3	70	67	4
Fumier de porcs	24	30	30	2
Fumier de poulets	13	65	19	3
Fumier de bovins laitiers	18	45	32	2
Fumier de bouvillons	22	45	32	2
Fumier de veaux lourds	25	30	16	1
Fumier de bovins compostés	22	24	23	1
Boues de papetières	12	44	31	3
Boues de papetières	17	28	30	2
Boues de papetières	20	27	20	2
Boues de papetières	24	20	4	1
Boues municipales	11	50	33	3

*Niveau de risque potentiel associé aux épandages post-récolte

1 : risque faible; 2 : risque modéré; 3 : risque potentiellement élevé; 4 : risque potentiellement très élevé

**Tableau de synthèse, à partir de plusieurs études.

Tableau 7. Arrière-effets sur le rendement en orge (2003) selon divers types d'engrais appliqués à l'automne et au printemps.

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Rendement (t/ha)	
		Engrais organique seul	Engrais organique + N minéral
Boues de papetières 1	Automne 2001	1,41	2,38
Boues de papetières 2		1,50	2,26
Fumier de bovins de boucherie		1,02	1,94
Fumier de bovins laitiers		0,79	1,86
Boues de papetières 3	Printemps 2002	1,59	2,03
Boues de papetières 4		1,17	2,09
Fumier de bovins de boucherie		1,27	2,25
Fumier de bovins laitiers		1,52	1,99
Fumure minérale		0,83	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	

Tableau 8. Teneurs en N-NH₄ du sol (0-60 cm) selon les types d'engrais organiques et les périodes d'épandage

Traitements		Prof.	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	
		(cm)	N-NH ₄ (kg/ha)										
Automne 2001	Témoïn	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	
	Boue de papetière 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	
	Boue de papetière 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	Boue de papetière 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
Boue de papetière 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	
Témoïn			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	
			1,21 0,3578	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	



	F Pr > F		F Pr > F		F Pr > F		F Pr > F		F Pr > F		F Pr > F		F Pr > F							
Témoïn	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	2,68	0,0293	0,99	0,4660
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
Traitement * profondeur	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	0,5534