

Intégration de boues mixtes et de fumiers dans des rotations agricoles : réponse des cultures et interactions avec les propriétés du sol

*Adrien N'Dayegamiye¹, Anne Drapeau¹, Sylvie Huard² et Yvon Thibault³

Résumé, *Adrien N'Dayegamiye¹, Anne Drapeau¹, Sylvie Huard² et Yvon Thibault³. **Intégration de boues mixtes et de fumiers dans des rotations agricoles : réponse des cultures et interactions avec les propriétés du sol. *Agrosol*. 15 (2) : 83-90.** Les effets des fumiers et des boues mixtes sur la croissance des cultures et les propriétés du sol peuvent dépendre des cultures de rotation. Des apports de fumiers solides de bovins et de boues mixtes de papetières ont été effectués en 2001 et 2002 dans une ferme laitière ayant comme rotation : le maïs-grain, le maïs ensilage, l'orge et les prairies. Les objectifs de l'étude consistaient à déterminer les effets de ces engrais organiques sur les rendements, ainsi que sur leurs interactions avec les propriétés des sols. Des applications de boues mixtes (18, 36 et 54 t/ha sur base humide) et de fumier (36 t/ha), seuls ou combinés avec l'engrais minéral ajusté en tenant compte des coefficients d'efficacité des engrais organiques étudiés, ont été comparées à la fertilisation minérale complète (NPK) et au témoin. Les applications de fumier et de boues mixtes seuls ou avec un complément d'engrais minéral ont accru de façon significative les rendements de maïs seulement en 2002. Les arrière-effets de ces engrais organiques étaient importants sur la production d'orge en 2003. Deux applications de boues mixtes ont augmenté de façon significative ($P < 0,05$) l'activité biologique (CO_2), le potentiel de minéralisation d'azote (NO_3), ainsi que les populations de vers de terre. Par ailleurs, elles ont légèrement accru le niveau de matière organique, tendant aussi à réduire la masse volumique. Les boues mixtes et les fumiers n'ont pas influencé les activités enzymatiques du sol (uréase, phosphatase), ainsi que l'agrégation du sol. En raison des plus faibles teneurs en matière sèche et en C organique du fumier utilisé, ses effets sur les rendements et les propriétés du sol ont été moins importants, en comparaison avec les boues mixtes. Cette étude a démontré qu'une réponse importante aux applications d'engrais organiques et les interactions rapides sur les propriétés du sol dépendent fortement du niveau initial de fertilité des sols récepteurs.

Mots clés : fumier solide de bovins, boues mixtes, rendements, maïs, orge, propriétés du sol.

Abstract, *Adrien N'Dayegamiye¹, Anne Drapeau¹, Sylvie Huard² and Yvon Thibault³. **Manure and paper mill sludge: effects on crop yields and soil properties. *Agrosol*. 15 (2) : 83-90.** Dairy cattle manure and paper mill sludges were applied in 2001 and 2002 on fields under corn-corn-barley-hay rotation. Crop responses and residual effects of these organic material applications and their impacts on soil properties were evaluated. Paper mill sludges (18, 36, and 54 t/ha on wet basis) and dairy cattle manure (36 t/ha on wet basis), were applied alone or combined to reduced mineral fertilizers based on their N, P and K recoveries. These treatments were compared to a complete fertilizer rate for the different crops and to a control (no fertilizer). Manure and paper mill sludges alone or combined to mineral fertilizer significantly increased corn yields in 2002 and residual effects increased significantly barley yields in 2003. Two manure and paper mill sludge applications increased soil biological activity (CO_2), N mineralization and earthworm populations. These organic sources slightly increased soil organic matter and reduced soil density, although not significantly. Manure and paper mill sludges did not influence soil enzyme activities (urease, phosphatase), soil aggregation and structural stability. Manure effects on crop yields and soil properties were generally lower, compared to those measured after paper mill sludge applications, due to lower dry matter and C inputs in the manure used. Results indicated that crop response and interactions on soil properties were related to the initial soil fertility.

Key words: dairy cattle manure, paper mill sludges, corn, barley, soil properties.

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2700, 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

2. Bioconseil, 3480 Notre-Dame, Pointe-du-Lac, Québec, GOX 1Z0, Canada

3. Abitibi Consolidated inc, 800 boulevard René-Levesque Ouest, Montréal, Québec, H3B 1Y9, Canada

Introduction

Les fumiers solides de bovins et les boues mixtes de papetières sont valorisés principalement à cause de leur importante valeur fertilisante en N, P, Mg, Ca et en éléments mineurs, mais aussi à cause de leurs effets positifs sur les propriétés des sols (N'Dayegamiye et Angers, 1994; Simard, 2000; Simard, 2001, N'Dayegamiye et al., 2001). Associés à de bons choix de rotations, ces engrais organiques peuvent rapidement restaurer la qualité et la fertilité des sols cultivés, et accroître à moyen et long terme les bénéfices économiques des entreprises agricoles.

En effet, des études récentes ont démontré des améliorations rapides de la structure du sol, et des augmentations significatives des activités biologiques et enzymatiques suite aux enfouissements d'engrais verts et aux apports de boues mixtes de papetières (Abdallahi et N'Dayegamiye, 1999; Lalande et al., 2003). De même, des apports réguliers de fumiers de bovins laitiers à raison de 20t/ha sur base humide ont augmenté le niveau de macro-agrégation du sol, le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau, ainsi que les populations de vers de terre (N'Dayegamiye et Angers, 1990; Angers et N'Dayegamiye, 1991; Estevez et al., 1997).

Des augmentations de rendement de maïs et de blé, variant entre 25 et 40 %, ont été attribuées aux effets des fumiers solides de bovins (Magdoff et Amadon, 1980; N'Dayegamiye, 1996) et aux engrais verts (N'Dayegamiye et Tran, 2002). Cet effet bénéfique sur les productions a été nommé « l'effet non azoté » des fumiers, ou effet indirect sur la productivité (Magdoff et Amadon, 1980).

En améliorant la structure et la porosité des sols, ces matières organiques permettent une meilleure aération du sol et une rétention de l'eau et, par conséquent, une croissance optimale des racines des cultures et une absorption élevée des éléments nutritifs (effet indirect). De

plus, l'augmentation des activités biologiques et enzymatiques permet une minéralisation et une disponibilité accrue de l'azote et du phosphore organiques.

Ces effets bénéfiques sur les propriétés des sols peuvent dépendre de plusieurs facteurs, dont la composition physico-chimique des matières organiques utilisées, les systèmes de culture (rotations) et la fertilité initiale des sols. L'objectif de cette étude comparative consistait à intégrer la valorisation des fumiers et des boues mixtes dans une rotation d'une entreprise agricole et d'évaluer les réponses de chaque culture aux apports de ces engrais organiques, leurs arrière-effets, ainsi que leurs interactions sur les propriétés du sol.

Matériel et méthodes

Cette recherche a débuté en 2001 dans la région de Nicolet sur un loam sableux de la série Saint-Amable. Les contenus du sol en sable, limon et argile sont respectivement de 83, 5 et 12 %. Les teneurs initiales en matière organique et en N total étaient respectivement de 2, 98 % et de 0,15 %, la valeur de pH étant 7,2. Les contenus en P, K, Ca et Mg étaient respectivement de 39, 121, 1346 et 158 mg/kg.

Le dispositif expérimental comprenait 8 traitements repartis de façon aléatoire, en trois répétitions. Il s'agit de trois doses de boues mixtes (18, 36 et 54 t/ha) et une dose de fumier (36 t/ha) appliquées seules, et de 18 t/ha de boues mixtes et 36 t/ha de fumier combinées avec l'engrais minéral (NPK) à dose réduite, en tenant compte des coefficients d'efficacité recommandés pour ces engrais organiques (CPVQ, 2000; N'Dayegamiye et al., 2001). Ces traitements ont été comparés à la fertilisation minérale (NPK) complète et au témoin. La fertilisation minérale NPK était calculée selon les besoins de la culture de rotation. Les cultures de rotation étaient le maïs-grain, le maïs ensilage et l'orge.

Pour la culture de maïs, les doses d'engrais apportées pour le traitement avec la fumure minérale complète étaient de 165 kg N, 90 kg P₂O₅ et 150 kg K₂O par hectare. Dans les sols ayant reçu les fumiers ou les boues mixtes, les quantités d'engrais étaient réduites respectivement de 60 et 40 %, en tenant compte des coefficients d'efficacité de N, P et K. Les doses d'engrais de 80 kg N, 60 kg P₂O₅ et 80 kg K₂O ont été apportées pour l'orge dans le traitement avec un engrais minéral NPK. Les autres traitements n'ont pas reçu de fertilisation minérale.

Les fumiers solides de bovins et les boues mixtes de papetières Belgo ont été appliqués en 2001 et 2002 sur les cultures de maïs-grain et maïs fourrager. Ces engrais organiques ont été appliqués au printemps de chaque année, puis incorporés dans les 10 premiers centimètres du sol à l'aide d'une herse à disque. Les engrais minéraux prévus pour chaque traitement ont été appliqués à la volée et incorporés en même temps que les engrais organiques. En 2003, les boues mixtes et les fumiers de bovins n'ont pas été appliqués au sol afin d'évaluer les arrière-effets sur la culture d'orge. Cependant, seuls les engrais minéraux prévus pour le traitement de fertilisation minérale NPK ont été apportés à la volée, avant les semis.

Les engrais organiques étudiés étaient riches en matière organique et en N total (tableau 1). Les quantités totales de carbone et d'azote apportées pendant deux ans sont indiquées dans le tableau 2.

Au cours des deux années d'application, environ 2 fois plus de carbone a été apporté avec les boues mixtes qu'avec les fumiers de bovins (tableau 2). Les boues mixtes et les fumiers contenaient d'importantes quantités d'azote, de phosphore, magnésium et calcium qui pouvaient devenir disponibles aux cultures. Le fumier et les boues mixtes étudiés contenaient également d'importantes quantités d'éléments mineurs nécessaires à la croissance des plantes (données non présentées).

Méthodologie analytique

Afin d'évaluer les effets des fumiers et des boues mixtes sur les propriétés des sols, des échantillons ont été pré-

levés en octobre 2003 dans la couche 0-20 cm pour les activités biologiques et dans les couches 0-10 cm et 10-20 cm pour la densité et la teneur en matière organique.

L'activité de la phosphatase a été évaluée selon la méthode d'hydrolyse d'une solution de para-nitrophénylphosphate tamponnée au pH 6,5 pour la phosphatase acide et au pH 11 pour la phosphatase alcaline (Tabatabai, 1982). L'analyse de l'uréase a été déterminée par incubation des sols en présence d'une solution d'urée à une température de 37 °C pendant 2 heures (Tabatabai, 1982) et le dosage de NH_4^+ a été effectué en colorimétrie sur Technicon.

La respiration microbienne (CO_2) et le pouvoir de minéralisation de l'azote ont été déterminés par une incubation de 60 jours à 25 °C de 150 g de sol, dans un contenant de 500 ml. Une fiole contenant 10 ml 1 M NaOH a été déposée afin de capter la quantité de CO_2 dégagée par les microorganismes. La quantité de CO_2 dégagée a été déterminée tous les dix jours par titration de l'excès de NaOH après précipitation des carbonates formés par la solution de BaCl_2 (Anderson, 1982). Pour déterminer la quantité d'azote minéralisée, une extraction avec une solution de 2M KCl a été effectuée sur les sols incubés pendant 60 jours, et sur les échantillons de sols non incubés. L'azote minéral ($\text{N-NH}_4 + \text{N-NO}_3$) a été dosé sur Technicon, la différence de l'azote minéral entre les sols de départ et les sols incubés constituant l'azote minéralisé. L'étude de la masse volumique des sols a été faite par la méthode de cylindres, tandis que les teneurs en C et N total des sols ont été effectuées respectivement avec les techniques de Walkley-Black (Allison, 1965) et par la digestion Kjeldahl (Bremner, 1965).

L'extraction des vers de terre a été faite par une méthode physique (Bouché et Gardner, 1984), soit le tamisage de sol à l'aide d'un tamis de 6 mailles au pouce (ouverture de 6 mm). Deux quadrats métalliques de 25 x 25 cm de coté (625 cm^2) ont été légèrement enfoncés dans le sol de chacun des traitements. Les parois et le fond de la fosse ont été examinés afin de localiser les canalisations des vers et nous n'avons pas observé de canaux qui descendaient dans l'horizon B sous-jacent à la couche de labour (horizon A_p). Ainsi, les vers de terre

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques des boues mixtes de papetières et de fumier de bovins (exprimées sur base de matière sèche).

Propriétés	Site Nicolet			
	Boues Belgo 2001	Boues Belgo 2002	Fumier 2001	Fumier 2002
Matière sèche (%)	41	33	18	33
Matière organique (%)	78	82	82	54
N total (%)	1,78	2,86	2,60	1,38
Rapport C/N	22	14	16	19
P total (%)	0,24	0,45	0,77	0,66
K total (%)	0,11	0,147	1,67	0,83
Ca total (%)	3,13	2,25	1,09	1,1
Mg total (%)	0,089	0,116	0,514	0,465

Tableau 2. Quantités de carbone, d'azote organique et d'éléments majeurs apportés par les boues mixtes et les fumiers solides de bovins (kg/ha).

	Nicolet		Total
	2001	2002	
Carbone organique			
18 t/ha boues mixtes	2 878	2 435	5 313
36 t/ha boues mixtes	5 756	4 870	10 626
54 t/ha boues mixtes	8 634	7 305	15 939
36 t/ha fumier	2 657	3 208	5 865
N total			
18 t/ha boues mixtes	131	170	301
36 t/ha boues mixtes	262	340	602
54 t/ha boues mixtes	393	510	903
36 t/ha fumier	168	164	332
P total			
18 t/ha boues mixtes	18	27	45
36 t/ha boues mixtes	36	54	90
54 t/ha boues mixtes	54	81	135
36 t/ha fumier	50	78	128
K total			
18 t/ha boues mixtes	8	9	17
36 t/ha boues mixtes	16	18	34
54 t/ha boues mixtes	24	27	51
36 t/ha fumier	108	99	207
Ca total			
18 t/ha boues mixtes	231	134	365
36 t/ha boues mixtes	462	268	730
54 t/ha boues mixtes	693	402	1 095
36 t/ha fumier	70	132	202
Mg total			
18 t/ha boues mixtes	7	7	14
36 t/ha boues mixtes	14	14	28
54 t/ha boues mixtes	21	21	42
36 t/ha fumier	33	55	88

semblaient essentiellement localisés dans la couche de labour. Un premier dénombrement ainsi qu'une séparation (adulte vs juvénile) des vers ont été effectués avant que les vers soient déposés dans des contenants et apportés au laboratoire où ils ont été plongés dans l'éthanol 70 %. Par la suite, ils ont été pesés pour obtenir leur poids frais, placés à l'étuve à 60 °C pendant 24 heures et pesés à nouveau pour obtenir leur biomasse sèche.

Résultats et discussion

Rendements

En 2001, les apports de fumiers solides de bovins et de boues mixtes ont accru de 1 t à 2,5 t/ha en moyenne les rendements en maïs-grain (tableau 3). Cependant, les augmentations significatives ($P < 0,05$) des rendements en maïs-grain ont été obtenues seulement avec les apports de 36 t/ha de boues mixtes. La dose la plus élevée de boues mixtes (54 t/ha) a produit de faibles rendements, probablement à cause d'un manque de maturité de grains. Une minéralisation tardive en cours de saison ou une plus grande disponibilité en azote pour les cultures (maïs, pomme de terre) peuvent prolonger leur période de végétation, retardant ainsi la maturité et affectant la qualité de la récolte. Une disponibilité élevée ou une minéralisation tardive peuvent également conduire

à la verse des céréales, réduisant les rendements, tel que cela a été observé par N'Dayegamiye et al. (2001) sur la culture d'orge.

En 2002, les rendements de maïs-ensilage ont varié entre 8 586 et 15 828 kg/ha de matière sèche. Les rendements les plus élevés ont été obtenus suite aux apports de boues mixtes, avec en moyenne des augmentations de 80 % par rapport au témoin (tableau 3). Les rendements obtenus dans les sols avec les boues mixtes étaient comparables à ceux qui étaient obtenus avec la fertilisation minérale complète NPK. Les apports de boues mixtes et de fumier ont augmenté de façon significative les rendements de maïs-ensilage, mais les augmentations de la production étaient plus faibles dans les traitements avec les fumiers. L'ajout d'engrais minéraux aux boues mixtes (18 t/ha + 60 % NPK) ou au fumier (36 t/ha + 40 % NPK), n'a pas significativement augmenté les rendements comparativement aux boues mixtes ou aux fumiers appliqués seuls, probablement en raison des effets cumulatifs reliés aux apports successifs en 2001 et 2002.

En 2003, les arrières-effets de deux apports de fumiers solides de bovins et de boues mixtes ont été étudiés pour la culture de l'orge. L'effet résiduel des boues mixtes et des fumiers appliqués seuls en deux ans a permis des augmentations significatives des rendements de l'orge, comparativement au témoin (tableau 3). Cependant, les augmentations les plus élevées ont été obtenues

avec la fertilisation minérale complète ou avec les arrières-effets des apports de 18 t/ha de boues mixtes complétées avec 60 % de NPK. Malgré les arrières-effets importants des fumiers et des boues mixtes, il est recommandé d'apporter des engrais minéraux en doses ajustées afin d'obtenir des rendements élevés, comparables à la fertilisation minérale.

Pendant les trois années de l'étude, les prélèvements en azote ont été proportionnels aux rendements obtenus, et ils ont augmenté significativement avec les apports de fumier et de boues mixtes. Ces résultats démontrent que ces engrais organiques présentent des coefficients de disponibilité d'azote et d'arrières-effets élevés, tel que déjà observé par N'Dayegamiye et al. (2001) sur des cultures de maïs-grain et d'orge. Comme pour diverses espèces d'engrais verts (N'Dayegamiye et Tran, 2001), cette disponibilité en azote pour les cultures peut également être reliée à l'amélioration des conditions du sol par les fumiers et les boues mixtes (aération, régime hydrique et thermique) qui ont stimulé l'absorption de l'azote du sol.

Activités enzymatiques et biologiques du sol

L'uréase est une enzyme impliquée dans les processus de minéralisation de l'azote. De façon générale, on observe une tendance à la hausse de l'activité de l'uréase avec les doses croissantes de boues mixtes (tableau 4). Cependant, ces augmentations n'étaient pas significative-

Tableau 3. Effet des apports de boues mixtes, de fumier et d'engrais NPK sur les rendements des cultures et les prélèvements en azote (kg/ha).

Traitements	Maïs grain 2001		Maïs ensilage 2002		Orge 2003	
	Rendement	Prél. N	Rendement	Prél. N	Rendement	Prél. N
Témoin	6 633 b	72,40 c	8 586 d	78,54 e	1 348 e	24,18 c
NPK	8 327 ab	111,31 ab	15 355 a	175,07 abc	3 489 a	69,37 a
18 t/ha boues mixtes	7 515 ab	93,17 abc	14 897 ab	165,41 bc	1 694 de	28,63 c
36 t/ha boues mixtes	9 031 a	114,81 ab	15 828 a	197,08 ab	2 233 cd	38,13 bc
54 t/ha boues mixtes	6 838 b	85,59 bc	15 425 a	190,69 ab	1 610 de	29,23 c
18 t/ha boues + NPK (60 %)	8 232 ab	112,40 ab	15 799 a	219,88 a	3 352 ab	61,24 a
36 t/ha fumier	7 453 ab	86,92 bc	10 852 c	106,33 cd	1 898 d	29,20 c
36 t/ha fumier + NPK (40 %)	7 515 ab	94,44 abc	10 390 cd	103,13 cd	2 257 cd	40,07 b
PPDS	2 078	29,26	2248	46,40	498	21,08

a-d : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P < 0,05$.

Tableau 4. Effets d'apports de boues mixtes, de fumier et d'engrais minéraux sur les activités enzymatiques et quelques propriétés biologiques d'un loam sablonneux de la série Saint-Amable.

Traitements	Uréase	Phosphatase acide	Phosphatase alcaline	Pouvoir de minéralisation	Respiration microbienne	Indice biologique*
	µg N-NH ₄ /g sol	-----µg P.N.P./g sol-----		mg NO ₃ /kg sol	mg CO ₂ /kg sol	
Témoin	32,08 bc	262 a	246 ab	15,75 bc	731 cd	0,047a
NPK	35,78 abc	301 a	239 b	12,61 c	791 cd	0,040a
18 t/ha boues mixtes	39,53 ab	332 a	282 ab	19,35 bc	1 013 ab	0,037 a
36 t/ha boues mixtes	40,79 ab	280 a	328 a	26,16 ab	1 071 ab	0,042 a
54 t/ha boues mixtes	41,64 ab	293 a	270 ab	31,84 a	1 113 a	0,045 a
18 t/ha boues + NPK (60 %)	43,04 a	321 a	300 ab	14,14 c	952 ab	0,037 a
36 t/ha fumier	40,67 ab	281 a	302 ab	15,47 c	957 ab	0,042 a
36 t/ha fumier + NPK (40 %)	27,86 c	255 a	215 b	19,30 bc	1 067 ab	0,049 a
PPDS	10,91		89	10,45	277	

a-d : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P<0,05

* Indice biologique: rapport entre le CO₂ dégagé par la respiration microbienne pendant la période de 60 jours d'incubation et le carbone organique du sol.

ment différentes au seuil de probabilité de P < 0,05.

La phosphatase acide et la phosphatase alcaline sont des enzymes associées aux fonctions métaboliques des microorganismes et à la minéralisation et à la disponibilité du phosphore organique. La phosphatase acide se retrouve principalement au niveau des cellules végétales dans les matières organiques et les résidus de culture. Pour sa part, la phosphatase alcaline se retrouve principalement au niveau des cellules microbiennes. De façon générale, les apports de boues mixtes et de fumier n'ont pas augmenté significativement les activités de la phosphatase dans le type de sol étudié (tableau 4).

L'incubation de sols à 25 °C pendant une période de 60 jours, a permis de mesurer le pouvoir de minéralisation des sols. Les quantités d'azote minéralisées ont augmenté proportionnellement avec les doses de boues mixtes. Cependant, seul l'apport de 54 t/ha de boues mixtes a permis une augmentation significative du potentiel de minéralisation par rapport au témoin et au traitement avec la fertilisation minérale.

La respiration microbienne est un indice biologique qui reflète la quantité de microorganismes présents et actifs dans le sol. Cette analyse a permis de mesurer la quantité de CO₂ (mg CO₂/kg sol sec) déga-

gée pendant une incubation de 20 jours par les activités des microorganismes du sol. Les apports de boues mixtes et de fumiers ont accru les quantités de CO₂ dégagées par les microorganismes du sol (tableau 4). De même, les apports de boues mixtes et de fumiers combinés avec l'engrais minéral ont stimulé de façon significative les activités biologiques (CO₂) des microorganismes du sol.

L'indice biologique représente le rapport entre le dégagement de CO₂ par la respiration microbienne et la teneur en carbone organique du sol. Les applications de boues mixtes et de fumiers n'ont pas significativement influencé ce paramètre global de la biologie du sol (tableau 4).

Les populations de vers de terre

Les populations de vers de terre tiennent un rôle très important dans la décomposition de la matière organique et l'amélioration de la structure du sol. De même, les vers de terre stimulent la croissance des microorganismes du sol. Leur action permet l'amélioration du drainage, de la porosité et aide à la formation d'agrégats stables. Les valeurs obtenues représentent une moyenne de deux échantillons par parcelle et de trois répétitions par traitement (tableau 5).

Les populations de vers de terre étaient de 13,33 vers/m² dans les sols fertilisés

avec NPK et de 72 vers/m² avec 54 t/ha de boues mixtes (tableau 5). Les sols ayant reçu les boues mixtes ont donné les populations les plus nombreuses de vers de terre, suivis par les traitements ayant reçu des applications de fumiers. Les quantités de vers de terre étaient directement proportionnelles aux doses de boues mixtes apportées. De même, les apports de boues mixtes et de fumiers ont accru les populations juvéniles de vers de terre, en comparaison avec le témoin. Le poids des vers frais et secs était élevé dans les sols qui avaient reçu les engrais organiques, en comparaison avec le témoin et le traitement avec l'engrais minéral. Les résultats obtenus reflètent la disponibilité de matières organiques nouvelles dans ces traitements, qui ont stimulé la croissance des vers de terre.

Les populations de vers de terre mesurées dans cette étude se situent à l'intérieur des limites rapportées dans la littérature (Desforges, 1996). Cependant, le poids des vers frais et secs est nettement sous les valeurs moyennes pour les sols agricoles, soit de 50 g/m² pour la biomasse vivante et de 8,5 g/m² pour la biomasse sèche. Cette situation s'expliquerait par le fait que le genre de vers dominants était *Aporrectodea* dans le site échantillonné. Ces espèces de vers de terre sont de plus petite taille que ceux du genre *Lumbricus*. Nous avons compté des vers du genre *Lumbricus* dans certain-

Tableau 5. Effets d'apports de boues mixtes, de fumier et d'engrais minéraux sur les populations de vers de terre d'un loam sablonneux de la série Saint-Amable.

Traitements	Nombre de vers de terre (/m ²)	Adultes	Juveniles	Poids frais de vers de terre (g/m ²)	Poids sec de vers de terre (g/m ²)
Témoin	18,67 b	100 %	0 %	9,58 a	2,35 a
NPK	13,33 b	60 %	40 %	8,71 a	1,57 a
18 t/ha boues mixtes	32,00 ab	75 %	25 %	16,00 a	4,57 a
36 t/ha boues mixtes	37,33 ab	64 %	36 %	12,17 a	5,36 a
54 t/ha boues mixtes	72,00 a	78 %	22 %	21,88 a	6,67 a
18 t/ha boues + engrais (60 %)	34,67 ab	85 %	15 %	16,71 a	5,03 a
36 t/ha fumier	18,67 ab	43 %	57 %	13,23 a	3,25 a
36 t/ha fumier + engrais (40 %)	26,67 ab	80 %	20 %	17,40 a	6,38 a
PPDS	47,51				

a-d: deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différents à P < 0,05.

nes parcelles, mais toujours en petit nombre. Il importe aussi de rappeler que l'utilisation annuelle de pratiques culturales comme le labour conventionnel suivi de deux hersages, contribue à réduire les populations de vers de terre. Aussi, l'hiver particulièrement froid en 2003 pourrait avoir contribué à tuer une forte proportion des vers qui nous ont semblé se retrouver essentiellement dans la couche de labour.

Même si l'analyse statistique ne montre pas de différence significative au seuil de probabilité P < 0,05, à l'exception de 54 t/ha de boues mixtes, ces résultats montrent que les apports de matières organiques nouvelles ont tendance à stimuler la croissance des populations de vers de terre.

Masse volumique, teneur en matière organique et azote du sol

Dans la couche de surface (0-10 cm), les apports de boues mixtes ont légèrement diminué la masse volumique apparente du sol (densité), et accru les niveaux de matière organique (tableau 6). Toutefois, ces améliorations n'étaient pas significatives au seuil de P < 0,05. De façon générale, les applications de boues mixtes ont augmenté les teneurs en matière organique entre 10 et 20 %, en comparaison avec le témoin. Ces résultats indiquent une accumulation graduelle de la matière organique dans le sol étudié, et des apports réguliers pourraient en augmenter les niveaux, comme cela a été démontré après 20 ans d'application régulière de fumier solide de bovins, à raison de 20 t/ha sur base humide (N'Dayegamiye et al., 1997).

Les apports totaux de carbone organique provenant des traitements étaient importants, variant de 5,3 à 15,9 t/ha, selon les doses appliquées (tableau 2). Les boues mixtes et les fumiers contiennent des composés organiques facilement minéralisables, comme les sucres, les acides organiques, la cellulose et l'hémicellulose. Ces composés stimulent la microflore, mais laissent peu de matière organique stable. Les boues mixtes et les fumiers contiennent également une quantité de lignine qui pourra graduellement constituer l'humus du sol.

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que deux apports de boues mixtes et de fumier ont rapidement stimulé les activités biologiques du sol, et légèrement accru les populations de vers de terre et les teneurs en matière organique. Les effets des fumiers étudiés sur ces paramètres ont été moins importants,

Tableau 6. Effets d'apports de boues mixtes de papetières, de fumier et d'engrais minéraux sur les teneurs en azote et en matière organique, et la masse volumique apparente d'un loam sablonneux de la série Saint-Amable.

Traitements	Site Nicolet					
	N % 0-10 cm	N % 10-20 cm	M. O. % 0-10 cm	M. O. % 10-20 cm	Masse volumique g/cm ³ 0-10 cm	Masse volumique g/cm ³ 10-20 cm
Témoin	0,140 a	0,141 a	3,84 a	4,7 a	1,29 ab	1,39 a
NPK	0,130 a	0,106 a	4,09 a	3,7 a	1,21 abc	1,35 a
18 t/ha boues mixtes	0,167 a	0,133 a	5,29 a	4,7 a	1,16 c	1,39 a
36 t/ha boues mixtes	0,153 a	0,152 a	4,66 a	5,1a	1,21 abc	1,36 a
54 t/ha boues mixtes	0,165 a	0,118 a	4,95 a	4,1 a	1,20 bc	1,43 a
18 t/ha boues + NPK (60 %)	0,162 a	0,144 a	4,97 a	5,0 a	1,20 bc	1,36 a
36 t/ha boues + NPK (60 %)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
36 t/ha fumier	0,146 a	0,113 a	3,79 a	3,7 a	1,39 ab	1,44 a
36 t/ha fumier + NPK (40 %)	0,134 a	0,106 a	3,82 a	3,9 a	1,25 abc	1,39 a

probablement à cause de plus faibles teneurs en matière sèche et en C organique apportées au sol, en comparaison avec les boues mixtes (tableaux 1 et 2). Les applications de ces engrais organiques n'ont pas accru les activités enzymatiques du sol étudié (uréase, phosphatase). Ces données sont contraires à une étude de Lalonde et al. (2003) qui ont indiqué que les apports de boues mixtes désencrées et de composts avaient augmenté rapidement les activités enzymatiques dans un sol sablonneux.

Aussi, deux applications de boues mixtes et de fumier n'ont pas influencé la structure du sol. Dans des sols intensivement cultivés en cultures commerciales, des effets significatifs sur la macro-agrégation ont été mesurés suite à trois applications de boues mixtes (N'Dayegamiye et al., 2001) et deux incorporations de cinq types d'engrais verts (Abdallahi et N'Dayegamiye, 2000).

Il ressort que dans la ferme laitière où se situait cette présente étude, qui avait de bonnes rotations incluant des légumineuses, les interactions des engrais organiques avec les propriétés du sol ont été moins rapides que dans des sols en cultures commerciales. Cette étude indique également que deux applications de boues mixtes ou de fumier ne sont pas nécessairement suffisantes pour améliorer rapidement toutes les propriétés du sol. Des apports annuels de fumier solide de bovins (20 t/ha, sur base humide) pendant dix ans ont accru les populations de la microflore du sol, augmenté les carbohydrates du sol reliés à la formation de la structure, les tailles d'agrégats stables du sol (N'Dayegamiye et Angers, 1990; Angers et N'Dayegamiye, 1991) et par conséquent les rendements de maïs et de blé (N'Dayegamiye, 1996).

Conclusion

Deux applications de fumier solide de bovins et de boues mixtes de papetières ont accru les rendements de maïs-grain et de maïs ensilage. Nous avons aussi mesuré des arrière-effets importants sur la culture de l'orge. De façon générale, les apports de boues mixtes et de fumiers ont amélioré les propriétés biologiques, augmenté les populations de vers de terre, réduit la densité du sol et accru les niveaux de matière organique dans la couche 0-10 cm. Les effets des fumiers sur les rendements des cultures et les propriétés du sol ont été moins importants que les boues mixtes, en raison de plus faibles teneurs en matière sèche et en carbone organique apportées. Les améliorations des propriétés du sol mesurées ont été significatives seulement avec les doses élevées de ces matières organiques (36 t/ha). Des apports fréquents des ces engrais organiques sont donc nécessaires pour améliorer de façon durable les propriétés du sol.

Références bibliographiques

Abdallahi, M.M. et A. N'Dayegamiye. 1999. Effets de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement et la nutrition en azote du blé (*Triticum aestivum* L.), ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Can. J. Soil Sci.* 80: 81-89.

Allison, L. E., Bollen, W.B. and Moddie, C.D. 1965. Total carbon. Pages 1346-1365 in C. A. Black et al., eds. *Methods of soil analysis*. Agronomy no 9 : ASA and SSSA, Madison, WI.

Anderson, J. 1982. Soil respiration. Pages 831-866 in A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, eds. *Methods of soil analysis*. Agronomy no. 9. ASA, Madison, WI.

Angers, D.A. and N'Dayegamiye, A. 1991. Effects of manure application on carbon, nitrogen, and carbohydrate contents of a silt loam and its particle-size fractions. *Biol. Fertil. Soils* 11: 79-82.

Bouché, M.B. and Gardner, R.H. 1984. Earthworm functions: population estimation techniques. *Rev. Ecol. Biol.* 21: 37-63.

Bremner, J.M. and Mulvaney, C.S. 1982. Total nitrogen. Pages 595-622 in A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, eds. *Methods of soil analysis*. 2nd ed. Agronomy no 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Conseil de Productions Végétales du Québec inc. (CPVQ). 2000 : Recommandations de fertilisation. 1^{ère} éd. P. 131.

Estevez, B., N'Dayegamiye, A. and D. Coderre. 1996. The effect on earthworm abundance and selected soil properties after 14 years of solid cattle manure and NPKMG fertilizer application. *Can. J. Soil Sci.* 76: 351-355.

Lalonde, R., Gagnon, B. and Simard, R.R. 2003. Paper mill biosolid and hog manure compost affect short-term biological activity and crop yields of a sandy soil. *Can. J. Soil Sci.* 83: 353-362.

Magdoff, F.R. and J.F. Amadon. 1980. Yield trends and soil chemical changes resulting from N and manure application to continuous corn. *Agron. J.* 72 : 161-164.

N'Dayegamiye, A. et Angers, D.A. 1990. Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés physiques et biologiques d'un loam limoneux Neuboiss sous culture de maïs. *Can. J. Soil Sci.* 77: 351-358.

N'Dayegamiye, A. 1996. Response of silage corn and wheat to dairy cattle manure and fertilizers in long-term fertilized and manured trials. *Can. J. Soil Sci.* 76: 357-363.

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, 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.

Simard, R.R. 2001. Combined primary-secondary papermill sludge as nitrogen source in a cabbage-sweet corn cropping sequence. *Can. J. Soil Sci.* 81: 1-10.

Simard, R.R. 2000. Les résidus papetiers: mode d'usage horticole. Colloque sur les biosolides, CPVQ : 47-70.

Tabatabai, M. A. 1982. Soil enzymes. Pages 903-947 in A. L. Page, R.H. Miller, et D.R. Keeney, eds. *Methods of soil analysis*. Agronomy no 9. ASA, Madison, Wi.

Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregation in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.