

**Évaluation des effets des apports de fumier de bovins
et de boues mixtes de papetières sur les rendements de maïs,
d'orge et de soya, et sur l'évolution des propriétés des sols**

Rapport final

par

Adrien N'Dayegamiye, IRDA

et

Yvon Thibault ¹ et Sylvie Huard², ¹Abitibi Bowater et ² Bioconseil



**INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT**

2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
CANADA

Tél. : 418 643-2380
Télec. : 418 644-6855

www.irda.qc.ca

Juin 2008

Résumé

Cette étude de six ans (2001-2006) a évalué les effets des apports répétés d'engrais minéraux (FMC), de fumier solide de bovins (FSB) et de boues mixtes de papetières (BMP) sur les changements des propriétés des sols et les niveaux de rendements de maïs, d'orge et de soya. Les effets des applications de BMP (18, 36 et 54 t/ha) et de fumier solide de bovins (36 t/ha) seuls ou combinés avec une fumure minérale réduite (FMR : 60 % NPK) ont été comparés à ceux de la fertilisation minérale complète NPK (FMC :100% NPK) et au témoin sans engrais NPK ni fumure organique. Les engrais organiques ont été appliqués aux printemps 2001, 2002, 2004 et 2005 et leurs arrière-effets évalués en 2003 et 2006. L'étude a été réalisée sur une argile limoneuse de la série Sainte-Rosalie et sur un loam sableux de la série Saint-Amable. Les principales cultures de rotation ont consisté en maïs-soya et céréales. Dans les deux sols, les apports de 36 et 54 t/ha de BMP sans ajout de NPK et de 18 t/ha de BMP avec addition de FMR ont produit des rendements élevés de maïs-grain et d'orge, équivalant à ceux obtenus avec la FMC. Les apports de FSB (36 t/ha) seuls ou avec FMR ont significativement augmenté les rendements de ces cultures par rapport au témoin, cependant, les augmentations ont été toujours plus faibles que celles obtenues avec les BMP. Les arrière-effets des FSB et des BMP ont été faibles pour la culture de soya, mais importants pour l'orge et le maïs-grain. Dans l'argile limoneuse de la série Sainte Rosalie, quatre apports de BMP et de FSB de 2001 à 2006 ont accru les teneurs en C du sol, de la fraction non humifiée de la MO et des acides humiques, et aussi augmenté les proportions de macro-agrégats du sol (> 5 mm et 0,25-5 mm) et le DMP des agrégats stables à l'eau. Ces effets ont été plus faibles dans le loam sableux de la série St Amable. Dans les deux sols, quatre applications de FSB et de BMP ont aussi réduit la masse volumique apparente et accru les teneurs en C de la biomasse microbienne, les taux de respiration microbienne, ainsi que les activités de l'uréase et de la phosphatase alcaline. Les augmentations des taux de minéralisation d'azote n'ont été significatives que seulement dans le loam sableux. Les apports répétés de FMC ont accru les teneurs en C seulement dans l'argile limoneuse et n'ont pas amélioré les propriétés physiques et biologiques dans les sols étudiés. Même si les apports de BMP et de FSB ont amélioré de façon significative la densité et la structure de l'argile limoneuse, ainsi que les activités biologiques et enzymatiques, leurs effets sur les rendements de maïs et d'orge ont été en moyenne 30% moins élevés que dans le loam sableux. Ces résultats suggèrent que les conditions d'aération et de température ont été plus favorables dans ce dernier sol et qu'elles ont ainsi pu conduire à une minéralisation plus élevée des engrais organiques appliquées ainsi qu'une meilleure croissance des plantes au printemps. Cette étude montre que les apports réguliers de FSB et de BMP ont rapidement amélioré les propriétés des sols et augmenté les niveaux de rendement des cultures. Toutefois, ces bénéfices ont varié selon les types de sol et les cultures en rotation.

Table des matières

Table des matières	3
1. Introduction	5
2. Matériel et méthodes	12
2.1. DESCRIPTION DES SITES EXPÉRIMENTAUX.....	12
2.2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	12
2.3 ÉCHANTILLONNAGE ET MÉTHODES ANALYTIQUES	13
2.4. ANALYSES STATISTIQUES.....	15
3. Résultats	17
3.1. CARACTÉRISTIQUES DES ENGRAIS ORGANIQUES	17
3.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SOL	19
3.3 PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES.....	23
3.4 .TENEURS EN C DU SOL ET DES SUBSTANCES HUMIQUES	27
3.5. RENDEMENTS DES CULTURES	29
3.5.1 Rendements des cultures au site de Nicolet	29
3.5. 2. Rendements des cultures à St-Sévère	31
4.Discussion	32
5.Conclusion	38
6. Références bibliographiques	39

Abréviations

BDP	Boues de désencrage de papetières
BMP	Boues mixtes de papetières
BP	Boues de papetières
BPP	Boues primaires de papetières
BSP	Boues secondaires de papetières
CBM	Carbone de la biomasse microbienne
DMP	Diamètre moyen pondéré des agrégats de sol
FMC	Fertilisation minérale complète (NPK)
FMR	Engrais minéral NPK réduit à 60 %
FSB	Fumier solide de bovins
MO	Matière organique du sol
FNH	Fraction non humique de la MO
AF	Acides fulviques
AH	Acides humiques

1. Introduction

Un bilan positif de la matière organique est à la base d'une meilleure structuration des sols et de leurs activités biologiques, ce qui détermine par conséquent des conditions de sol propices pour une meilleure croissance des cultures. Les courtes périodes de rotation ainsi que les faibles résidus de culture apportés au sol par beaucoup d'espèces cultivées ont conduit à la diminution des teneurs en matière organique des sols et, par conséquent, de leur productivité. Des recherches effectuées au Québec ont démontré que les apports réguliers de fumier augmentent les niveaux de matière organique des sols (N'Dayegamiye, 1997b; Estevez et al., 1997). Cependant, beaucoup de régions en grandes cultures (maïs-soya-céréales) font face à un déficit de fumier.

Comme les fumiers, les boues mixtes de papetières sont riches en matière organique, en azote et en d'autres éléments nutritifs. Elles sont ainsi de plus en plus recherchées dans les régions en cultures commerciales faisant face à un déficit de fumier (N'Dayegamiye et al., 2003). Au Québec, environ un million de tonnes de boues mixtes sont ainsi valorisées annuellement sur les sols agricoles, en comparaison avec 30 millions de tonnes de fumier.

Les boues de papetières (**BP**) peuvent être classées en quatre catégories : (1) les boues primaires (**BPP**) venant de la production de fibre de bois; (2) les boues de désencrage (**BDP**) produites en enlevant l'encre du papier utilisé; (3) les boues secondaires ou boues activées (**BSP**) issues d'un traitement secondaire des BPP et; (4) les boues mixtes (**BMP**) résultant d'un mélange de BPP et de BSP.

Le tableau 1 donne la composition moyenne des résidus papetiers produits au Québec. La composition chimique des BP dépend beaucoup de la méthode utilisée pour la fabrication du papier et du niveau de décomposition microbienne pendant le traitement secondaire. Cependant, pour un même type de boues, la composition varie assez peu au cours d'une année (Vance, 2000). Les fluctuations saisonnières dans la composition des BP sont beaucoup moins fortes que dans le cas des engrais de ferme ou des boues municipales, ceci étant lié à la stabilité générale du processus industriel (Desilets, 2003).

Toutefois, la teneur en azote et le rapport C:N des BP changent considérablement selon le type de BP. Les BPP se composent de matière organique surtout sous forme de cellulose (Jackson et Line, 1997) ou de fibre de bois produites pendant le traitement primaire. Les BPP contiennent en général 0,3 % ou moins d'azote sur base sèche, avec un rapport C:N supérieur à 100 (Bellamy et al., 1995).

Les BDP sont surtout constituées de courtes fibres de bois et de kaolin, utilisés pour la production du papier. La composition des BDP varie selon l'origine du papier recyclé et du mode de désencrage employé. En général, le contenu en C des BDP est très élevé alors que les teneurs en N et P sont extrêmement faibles (Trépanier et al., 1998). La composition chimique des BDP est très semblable à celle des BPP.

Les BSP, plus liquides que les BPP et les BDP, contiennent des fibres et d'autres matériels organiques très fins qui n'ont pas été enlevés durant le traitement primaire. Dans les bassins de traitement secondaire, les bactéries décomposent cette matière organique restante contenue dans l'eau. Les engrais N, P et K sont ajoutés dans le traitement secondaire pour stimuler la croissance et l'activité microbienne. De ce fait, les BSP sont très riches en N (3-4 %) et contiennent aussi une quantité non négligeable de P (0,1-0,3 %) (Zibliske, 1997).

La composition chimique des BMP varie selon les techniques utilisées pour obtenir les BPP et les BSP et les quantités relatives de ces dernières dans le mélange (Vance, 2000). Les BMP contiennent d'habitude 1 à 2,5 % de N sur base sèche. Les BMP contiennent entre 5 et 15 % de N-NO₃ et de N-NH₄ (N'Dayegamiye et al., 2004), et ont des quantités variables de K, Ca, Mg, S et oligo-éléments. Les rapports C:N des BMP varient de 12 à 30 (N'Dayegamiye et al., 2003; Giroux et al., 2007).

Tableau 1. Composition moyenne des résidus papetiers produits au Québec¹.

	BPP	BDP	BSP	BMP
Siccité (% m.s)	44	43	2,0	26
MO (%)	65	76	74	80
C:N	293	294	8,0	21
N total (%)	0,15	0,15	5,45	2,40
P₂O₅ (%)	0,08	0,02	0,96	0,96
K₂O (%)	0,06	0,02	0,02	0,21
Ca (%)	5,30	0,83	0,87	0,93
Mg (%)	0,11	0,06	0,21	0,09
PN (%)²	23	4		4
pH	7,8	6,8	7,8	6,8

¹Centre de recherche en horticulture (1998), Charbonneau et al. (2001), Hébert et Beaulieu (2002).;

²Pouvoir neutralisant; **BPP** : boue de primaire; **BDP** : boue désencrée; **BSP** : boue secondaire et **BMP** : boue mixte

Au Québec, les usines de pâte et papiers génèrent annuellement plus de trois millions de résidus dont près de 60 % sont des BP (Morin, 2007). Les quantités de BP produites et les filières de valorisation au Québec entre 2001 et 2005 sont présentées au tableau 2. Il existe plusieurs filières de valorisation des boues de papetières. La plus grande proportion des BP générées par l'industrie papetière québécoise sont des BMP. Les principaux modes de gestion sont l'enfouissement, la valorisation énergétique, la valorisation agricole et le compostage. D'autres modes de gestion incluent le recouvrement de lieu d'enfouissement, la réhabilitation de sites dégradés ainsi que la valorisation sylvicole. Après l'enfouissement, la valorisation agricole constitue la deuxième plus importante destination de ces résidus organiques. De plus, le gouvernement du Québec encourage plus la valorisation agricole que la valorisation énergétique. En 2005, 29% des BP ont été utilisées directement comme engrais organiques en agriculture.

Contrairement aux autres provinces canadiennes et aux états américains, le Québec valorise plus les BPP et les BSP en les mélangeant en fonction des besoins en fertilisation agricole ou comme amendements organiques. En effet, 78 % des BP valorisées sur les sols du Québec sont des BMP contre 18 % pour le Canada et 54 % pour les États-Unis. (Charbonneau et al., 2001).

Tableau 2. Production et types de valorisation des boues de papetières au Québec entre 2001 et 2005.

Année	Type de boues	Poids humide Mg	Enfouissement	Valorisation énergétique	Compostage	Valorisation agricole	Autres
2001	Boues primaires	44023	52,7	21,3	2,2	23,8	
	Boues secondaires	32408	32,6			67,4	
	Boues de désencrage	206509	1,4	21,5	19,1	32,9	25,1
	Boues mixtes	160528	27,0	24,5	10,0	32,7	5,8
2002	Boues primaires	92086	26,2	52,0	2,8	18,9	0,1
	Boues secondaires	10107	56,3			43,7	
	Boues de désencrage	180299	0,0		26,7	47,1	26,2
	Boues mixtes	1648762	29,2	28,6	8,0	28,8	5,4
2003	Boues primaires	94295	29,1	50,2	4,3	16,4	
	Boues secondaires	445				100,0	
	Boues de désencrage	1444154			28,3	34,8	36,9
	Boues mixtes	1650098	33,2	23,7	9,7	27,3	6,1
2004	Boues primaires	68539	25,6	57,9	2,2	13,5	0,8
	Boues secondaires	8484	35,2			64,8	0,0
	Boues de désencrage	154782			25,3	46,7	28,0
	Boues mixtes	1751501	31,6	24,9	8,4	28,4	6,7
2005	Boues primaires	71199	25,9	51,4	4,3	18,3	0,1
	Boues secondaires	1446	33,5			66,5	
	Boues de désencrage	182532			32,9	21,3	45,8
	Boues mixtes	1705539	34,7	23,0	5,6	27,0	9,7

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec [MDDEP] (2005).

Les taux de décomposition des BP dans les sols et l'impact de leurs apports sur la fertilité des sols sont reliés à leurs caractéristiques physiques et chimiques. Les BP

sont surtout composées de courtes fibres de bois et contiennent de la cellulose, de l'hemicellulose et de la lignine. Dans le premier temps, la décomposition de la matière organique fraîche dans le sol est rapide et elle est surtout caractérisée par la disparition de la cellulose libre (holocellulose). La deuxième phase de décomposition est caractérisée par la dégradation lente de la cellulose incrustée de lignine (ligno-cellulose) (Melillo et al., 1989). Au cours de l'humification, la proportion de lignine restante augmente dans le sol (Melillo et al., 1989). La lignine est considérée comme la fraction la plus récalcitrante de tissus végétaux (Aber et al., 1990) et précurseur des substances humiques du sol.

Fierro et al. (1999) ont observé que les BP présentaient une grande proportion de matière organique récalcitrante qui se décomposait très lentement. Selon ces auteurs, 51 % du matériel initial s'est décomposé avec une demi-vie de 0,4 an, alors que la partie restante a eu un taux de décomposition beaucoup plus lent avec une demi-vie de 13 ans. Le rythme de décomposition des BP a été assez comparable à celui des résidus de récolte, avec une phase initiale de perte rapide de C suivie d'une deuxième phase de perte lente (Fierro et al., 1999; Chantigny et al., 2000b). Les boues de papetières ayant des rapports C :N supérieurs à 30 peuvent être valorisées comme amendements organiques des sols. Cependant, il est fort recommandé d'apporter des doses supplémentaires d'engrais N afin d'éviter les effets d'immobilisation de l'azote qui réduisent la croissance et les rendements des cultures suivant les applications.

De façon générale, les amendements organiques ayant un rapport C:N élevé (> 30) se décomposent lentement en raison de la faible disponibilité de l'azote pour les microorganismes du sol responsables de cette décomposition (Cheshire et Chapman, 1996). Zibliske (1997) a démontré que la décomposition de BP dépendait en partie de la qualité du substrat carboné contenu dans les matériaux organiques et de la disponibilité de N.

Les bénéfices des apports de FSB et de BMP dépendent aussi des espèces des cultures. En effet, les cultures de rotation valorisent différemment les engrais organiques (fumier et boues mixtes de papetières). Cependant, on dispose encore de très peu de données concernant l'intégration des apports de fumier et de boues mixtes dans les systèmes de rotation.

La réponse des cultures aux boues mixtes de papetières (BMP) est très variable et dépend du contenu en N, du rapport C:N et des taux d'application (Camberato et al., 1997). Les fumiers solides de bovins et les boues mixtes de papetières sont généralement riches en N (> 1,76 %) et elles ont des rapports C :N variant entre 12 et 30. Il a été démontré que les taux de décomposition et de libération de l'azote

étaient inversement reliés aux rapports C:N de ces engrais organiques (N'Dayegamiye et al., 2004 ; Giroux et al. 2007). Plusieurs études effectuées au Québec ont démontré que les cultures ayant une longue période de végétation (chou, maïs, prairie et pomme de terre) valorisaient efficacement ces engrais organiques, en comparaison avec les cultures de courte saison végétative telles les céréales (Simard, 2001; Arfaoui et al., 2001; N'Dayegamiye et al., 2003; N'Dayegamiye et al., 2004; Giroux et al., 2007). Ces recherches ont mis évidence des augmentations du rendement des cultures établies sur des sols amendés avec des BMP (Arfaoui et al., 2001; Simard, 2001; N'Dayegamiye et al., 2003; Giroux et al., 2007). Ces effets sont probablement attribuables à l'amélioration des propriétés physiques du sol telles que la masse volumique apparente, la porosité et la stabilité structurale (Chantigny et al., 1999; N'Dayegamiye, 2006; Bipfubusa et al., 2008). Dans les sols sableux, la matière organique apportée par les FSB et par les BMP peut améliorer la capacité de rétention en eau ainsi que la disponibilité des éléments nutritifs. Dans les sols argileux, elle favorise beaucoup plus l'aération et la perméabilité de la couche arable. L'apport de matière organique par les FSB et les BMP se traduit également par l'amélioration des caractéristiques biologiques du sol en termes de biodiversité, de taille et d'activité des microorganismes (Estevez et al., 1996; Gagnon et al., 2001; N'Dayegamiye, 2006). Certaines études signalent également une augmentation de la population des vers de terre suite à l'ajout de FSB et de BMP au sol (Estevez et al. 1996; N'Dayegamiye et al., 2004).

D'autres recherches ont également démontré que l'application de BMP au sol a un impact positif sur la qualité et la fertilité des sols agricoles en améliorant la structure du sol (stabilité des agrégats) et en augmentant l'activité biologique, la réserve en eau du sol, la capacité d'échange cationique et la disponibilité en éléments nutritifs pour les cultures; ceci se traduisant par de meilleurs rendements des cultures (Camberato et al., 2006). Cependant, les données disponibles proviennent seulement d'études de courte durée (2 ou 3 ans). Les effets associés des applications répétées de FSB et de BMP et des rotations des cultures sur la productivité des sols ne sont par encore bien documentés. Les effets bénéfiques de divers amendements organiques (fumiers solides et boues de papetières) sur la productivité des sols peuvent aussi dépendre des caractéristiques physiques et chimiques des sols. Enfin, l'impact des apports de ces engrais organiques sur les propriétés des sols peut dépendre de la nature de ces derniers.

Le type de sol et les cultures de rotation peuvent ainsi déterminer les effets des apports de fumier et de boues mixtes sur l'évolution des propriétés du sol et les niveaux de rendement. Cependant, ces effets ont souvent été évalués sur un même type de sol ou de culture. Cette étude de six ans (2001-2006) a été effectuée sur

deux types de sols différents et visait à (1) évaluer la réponse de différentes cultures de rotation aux apports d'engrais minéral NPK, de fumier et de boues mixtes et à (2) déterminer les changements au niveau des propriétés physiques du sol (masse volumique et la stabilité structurale), des propriétés biologiques (taux de respiration microbienne, de minéralisation d'azote et C de la biomasse microbienne) et des teneurs en C des sols et des fractions des substances humiques .

2. Matériel et méthodes

2.1. Description des sites expérimentaux

Cette étude a été réalisée entre 2001 et 2006 sur deux sites différents. Le premier site expérimental était situé dans la région de Nicolet sur un loam sableux de la série St-Amable. La texture légère de ce site offrait des caractéristiques de drainage et d'aération pouvant favoriser la minéralisation des matières organiques incorporées. De plus, dans ce type de sol l'apport de MO pourrait améliorer la capacité de rétention en eau et des éléments nutritifs dans la couche arable, ce qui augmenterait ainsi l'efficacité des éléments nutritifs apportés par les engrais organiques. Le deuxième site d'essai était situé à St-Sévère, sur une argile limoneuse de la série Ste-Rosalie. Étant donnée sa texture argileuse, ce site pouvait présenter de mauvaises conditions d'aération et de drainage.

Le pH initial des sols étudiés était en moyenne de 6,8. Les teneurs en carbone organique étaient de 1,7 et 4,2%, celles d'azote de 0,11 et 0,21%, respectivement pour le loam sablonneux St Amable et l'argile limoneuse Sainte Rosalie. La texture du sol était constituée de 13% d'argile, 5% de limon et 82% de sable pour le loam sablonneux St Amable, et de 47% d'argile, 40% de limon et 13% de sable pour l'argile limoneuse de la série Sainte Rosalie. Les deux sols avaient des teneurs élevés en P, K et Mg.

2.2. Dispositif expérimental

Trois doses de BMP (18, 36 et 54 t/ha sur base humide) et une dose de FSB (36 t/ha) apportées seules ou complétées avec une dose réduite l'engrais minéral (60% NPK) ont été comparées à la fumure minérale complète (100% NPK) recommandée pour les différentes cultures de rotation, ainsi qu' au témoin sans fumure minérale ou amendement organique. Sur chacun des sites, le dispositif expérimental comprenait ainsi 9 traitements repartis de façon aléatoire, en trois répétitions. L'unité expérimentale mesurait 10 X 12 m.

Pour le traitement avec les engrais minéraux NPK, les doses étaient calculées selon les besoins des différentes cultures de rotation et les analyses de sol. La réduction des doses d'engrais minéral NPK a été faite en tenant compte des coefficients d'efficacité des engrais organiques étudiés (CRAAQ, 2003).

Les boues mixtes fraîches utilisées ont été obtenues des unités de traitement biologique de deux papetières d'Abitibi Consolidated Inc situées dans la région de la Mauricie. Les boues mixtes sont extraites en deux phases d'extraction. La séparation de débris de fibres trop fines se fait d'abord par décantation dans un premier bassin

(boues primaires). L'extraction se poursuit ensuite dans un bassin secondaire, où les microorganismes digèrent les fibres dissoutes dans l'eau (boues secondaires). Les BMP utilisées comprenaient approximativement 60% de boues primaires et de 40% de boues secondaires. Le fumier solide de bovin (FSB) a été obtenu de producteurs laitiers.

Les fumiers et les boues mixtes de papetières ont été appliqués au printemps en 2001, 2002, 2004 et 2005 puis immédiatement incorporés dans les 10 premiers cm du sol à l'aide d'une herse. Les engrais minéraux prévus pour chaque traitement ont été appliqués à la volée avant le semis et incorporés en même temps que les engrais organiques. En 2003 et 2005, les engrais organiques n'ont pas été appliqués au sol afin d'évaluer leurs arrière-effets sur les rendements des cultures. Toutefois, les engrais minéraux prévus pour chacun des traitements avec la fumure minérale (FMC) ont été apportés à la volée avant les semis

Les rendements en grain (maïs-grain, orge et soya) et en biomasse (maïs-ensilage) ont été mesurés à la récolte. Les tissus végétaux ont été prélevés, séchés à 65 °C et pesés pour déterminer le rendement en matière sèche.

2.3 Échantillonnage et méthodes analytiques

Des échantillons de sol ont été prélevés au début de l'essai (2001) pour caractériser les deux types de sol. Le pH du sol a été déterminé selon le rapport de sol:eau de 1:1. Les teneurs en C et N total des sols ont été mesurées respectivement avec les techniques de Walkley- Black (Allison, 1965) et par la digestion Kjeldahl (Bremner, 1965). L'extraction des formes biodisponibles de P, K, Ca et Mg, B, Cu, Fe, Mn et Zn des sols a été réalisée à l'aide de la méthode Mehlich III (Tran et Simard 1993), leur dosage étant ensuite fait sur un spectromètre d'émission dans le plasma.

D'autres échantillonnages ont eu lieu en 2003 et 2006 afin de mesurer la masse volumique apparente, la répartition des agrégats et le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau. La méthode des cylindres a été utilisée pour la détermination de la masse volumique apparente du sol (McKeague, 1978). Pour l'étude de la structure, les échantillons humides de sol ont été tamisés à 8 mm et gardés au froid à 4 °C jusqu'à l'analyse. La répartition et le DMP des agrégats stables à l'eau ont été déterminés par tamisage humide des échantillons de sol frais déposés sur une série de 4 tamis de mailles décroissantes (5 mm, 2 mm, 1 mm et 0,25 mm). Les agrégats récupérés sur chaque tamis ont été ensuite séchés à 60°C pendant 24 heures, permettant ainsi de calculer le DMP (Kemper et Roseneau, 1986). Les poids d'agrégats utilisés pour calculer le DMP ont été corrigés en fonction de la proportion

en sables (Elliott, 1986). Le DMP des agrégats stables à l'eau a été calculé selon la formule suivante:

$$\mathbf{DMP = (\sum Xi * Pi / W)}$$

où X_i est le poids du sol restant sur le tamis de taille donnée, P_i le poids du sol corrigé selon la proportion des sables, et W le poids total du sol utilisé moins le poids total des sables (Haynes et Beare, 1997).

La détermination des substances humiques a été effectuée selon la méthode décrite par Schnitzer et al. (1981). Dix grammes de sol sec tamisé à 2 mm et broyé à 0,15 mm ont été ajoutés dans une bouteille à centrifuger de 250 mL contenant 100 mL d'une solution de NaOH 0,1M et $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0,1 M. Les bouteilles ont été agitées horizontalement pendant 24 heures à la température de la pièce, puis centrifugées à 3 000 g pendant 20 minutes. Le surnageant a été décanté puis centrifugé à 15 000 g pendant 15 minutes. Vingt-cinq millilitres du surnageant ont été acidifiés à pH 2 avec du H_2SO_4 50%. Les échantillons ont été gardés au réfrigérateur toute la nuit afin de permettre la précipitation des acides humiques (**AH**). Ces derniers ont été séparés de la fraction fulvique (**FF**) par une centrifugation à 15 000 g pendant 15 minutes. Le précipité d'acides humiques était séché à l'étuve à 45° C, puis dissous dans 25 mL de NaOH 0,5 N.

Les acides fulviques (**AF**) ont été séparés de la fraction non humifiée (**FNH**) par adsorption des AF sur une résine de polyvinylpyrrolidone (Sequi et al. 1986, N'Dayegamiye et al. 1997a). Ainsi, 25 mL de l'extrait FF étaient chargés dans une colonne contenant 12 cm^3 de résine polyvinylpyrrolidone insoluble (insoluble PVP, Aldrich, Germany) lavée avec une solution de NaOH 0,5M et équilibrée dans une solution de H_2SO_4 0,01 N (Sequi et al. 1986, N'Dayegamiye et al. 1997a). La fraction non humifiée (FNH) n'était pas retenue par la résine et elle était éluée avec une solution de H_2SO_4 0,01 N. La fraction d'acides fulviques (AF) était adsorbée à la résine et elle était éluée avec une solution de NaOH 0,5 M.

Les trois fractions des substances humiques (FNH, AF et AH) étaient conservées à 4° C jusqu'à l'analyse. Le C organique des AF (C-AF) et celui des AH (C-AH) ont été dosés par oxydation au dichromate (Nelson et Sommers 1992), tandis que le C organique de la fraction FNH (C-FNH) a été dosé sur l'autoanalyseur Technicon. De plus, deux paramètres d'humification ont été calculés : l'indice d'humification = $\text{C-FNH}/(\text{C-AH} + \text{C-AF})$ (Sequi et al. 1986) et l'indice de polymérisation = $\text{C-AH}/\text{C-AF}$ (Orlov 1995).

Les taux de respiration microbienne (CO_2) des sols ont été déterminés par incubation de sols humides pendant 20 jours à 25°C. Trente grammes de

l'échantillon de sol ont été déposés dans un contenant de 100 g, en présence d'un flacon contenant 10 mL d'une solution de NaOH 1 M. Après 20 jours d'incubation, la quantité de CO₂ dégagée et captée par la solution de NaOH a été déterminée par ajout de BaCl₂ et l'excès de NaOH a été titré avec une solution de HCl 0,01 M standardisé à pH 8.2 en utilisant un titre automatique (Anderson 1982).

Les quantités d'azote minéralisées ont été déterminées par incubation de 150 g de sol pendant 60 jours à 25 °C, dans un contenant de 500 ml. Pour déterminer la quantité d'azote minéralisée, une extraction avec une solution de 2M KCl a été effectuée sur les échantillons de sols incubés et non incubés. Les teneurs des sols en azote minéral (N-NO₃ et N-NH₄) ont été dosées sur l'auto-analyseur Technicon. Les quantités d'azote minéralisées représentent la différence entre les quantités de N minéral (N-NO₃ et N-NH₄) à la fin de l'incubation et celles du début d'incubation.

Les activités de la phosphatase ont été évaluées 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 NH₄⁺ a été effectué par colorimétrie sur Technicon.

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 de 25 x 25 cm 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 galeries des vers, mais il n'y avait pas de canaux descendant dans l'horizon B sous-jacent à la couche de labour (horizon Ap). Ainsi, les vers de terre semblaient essentiellement localisés dans la couche de labour. Un premier dénombrement ainsi qu'une séparation (adulte vs juvénile) des vers ont été effectués aux champs. Les vers ont ensuite été déposés dans des contenants remplis d'éthanol à 70 % et apportés au laboratoire. Par la suite, ils ont été pesés pour obtenir leur poids frais, puis ils ont été placés à l'étuve à 60 °C pendant 24 heures et pesés à nouveau pour obtenir leur biomasse sèche.

2.4. Analyses statistiques

Une erreur a été faite lors des épandages de BMP sur le loam sableux dans le traitement 36 t/ha + fumure minérale réduite. Ainsi, nous n'avons pas considéré ce traitement dans l'analyse des données sur les propriétés des sols et les rendements des cultures.

Les données obtenues pour chacune des variables dépendantes ont été analysés statistiquement en utilisant un modèle comprenant les traitements et les répétitions comme variables indépendantes. Les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à l'aide de PROC GLM du programme statistique SAS (SAS Institute Inc. 2001). Lorsque l'analyse de variance indiquait des valeurs significatives de F ($P \leq 0,05$) pour les traitements, les moyennes des traitements ont été alors comparées par la plus petite différence significative (PPDS) au seuil de 5%.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques des engrais organiques

Les BMP utilisées de 2001 à 2006 dans l'essai situé sur le loam sableux à Nicolet avaient des pH variant de 6,1 à 6,7, alors que celles utilisées sur l'argile limoneuse de St-Sévère avaient des valeurs de pH comprises entre 3,8 et 4,6 (Tableau 3). Les FSB appliqués présentaient des pH supérieurs à 7. Les teneurs en carbone organique des BMP appliquées dans les deux sols étaient similaires. Cependant, les teneurs en C des BMP étaient plus élevées en comparaison avec celles des FSB. Par exemple, les quantités de carbone organique apportées par des apports de 36 t/ha de FSB étaient égales à celles des BMP à 18 t/ha. Les teneurs en azote des deux matières organiques étaient similaires. De façon générale, les teneurs en N minéral variaient entre 8 et 20% de l'azote total. Dans l'ensemble, les rapports C:N de ces engrais organiques étaient inférieurs à 22, ce qui suggère que les FSB et les BMP pouvaient présenter des taux élevés de minéralisation.

Les FSB et les BMP contenaient d'importantes quantités de P: 2,4 à 5,5 g /kg et de 5,4 à 12 g /kg , respectivement. Contrairement au FSB, les BMP ont apporté de faibles quantités de K au sol. Ces deux engrais organiques contenaient des quantités de Ca et de Mg, cependant, les concentrations les plus élevées se retrouvaient plus dans le FSB. Le FSB et les BMP étudiés contenaient aussi d'importantes quantités d'éléments mineurs, nécessaires pour la croissance des plantes.

Les concentrations en métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) dans les boues et les fumiers étaient très faibles, étant même inférieures aux limites permises (données non présentées). Les BMP utilisées se classaient dans la catégorie C1 (Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 1997), ce qui suggère qu'à court et moyen terme, les apports de ces BMP ne présentaient aucun risque pour la santé humaine, les plantes et l'environnement.

Tableau 3. Caractéristiques physiques et chimiques des boues mixtes (BMP) et du fumier solide de bovins (FSB).

Loam sableux Nicolet								
	BMP				FSB			
	2001	2002	2004	2005	2001	2002	2004	2005
Mat. sèche (%)	41	33	46,8	41,5	18	33	29,3	37,8
C (%)	39	41	43,5	43,5	41	27	13,0	23
N total (%)	1,8	2,8	3,7	3,6	2,6	1,4	1,7	1,9
Rapport C/N	16	14	12	12	22	19	8	12
NO₃ (mg/kg)	n,d,	1,30	15	n,d,	n,d,	508	4	n,d,
NH₄ (mg/kg)	n,d,	5932	3616	2224	n,d,	146	198	259
pH	n,d,	6,73	6,15	6,68	n,d,	7,36	8,46	7,00
P (g/kg)	2,4	4,5	5,46	5,5	7,7	6,6	4,0	8,0
K (g/kg)	1,1	1,5	0,7	0,5	16,7	8,3	8,3	4,4
Ca (mg/kg)	31275	22554	3804	6584	10875	11152	23222	18416
Mg (mg/kg)	889	1162	278	557	5140	4651	4642	5994
Argile limoneuse Sainte-Rosalie								
Mat. sèche (%)	39	37	41,8	37	17	20	46,8	19
C (%)	36,5	42,5	39,4	40	41,5	40,5	29,4	42
N total (%)	3,1	2,2	2,0	2,5	2,4	2,6	2,3	2,4
Rapport C/N	12	20	20	16	17	15	13	18
NO₃ (mg/kg)	n,d	11,80	7	n,d,	n,d,	29,66	63	n,d,
NH₄ (mg/kg)	n,d	1120	387	1548	n,d	6106	126	4081
pH	n,d	4,15	3,81	4,59	n,d	8,09	8,34	8,08
P (g/kg)	3,3	2,3	2,7	3,0	5,4	10,5	11,6	5,1
K (g/kg)	0,044	0,042	0,034	0,04	1,60	2,40	1,168	1,08
Ca (mg/kg)	3239	3003	2830	3047	10230	16592	10142	17664
Mg (mg/kg)	344	297	586	301	3780	7982	10407	3075

3.2. Propriétés physiques du sol

Les effets des apports répétés de FMC, de FSB et de BMP sur la masse volumique apparente du sol sont présentés dans le tableau 4. Sur le site de Nicolet, l'ajout de FSB et de de BMP a diminué la masse volumique apparente du loam sableux St Amable en 2003 et en 2006, dans la couche de 0-10 cm. Cependant, aucune différence significative n'a été observée pour la couche inférieure (10-20 cm). Sur le site de St Sévère, les apports de 54 t/ha de BMP seuls, et de 18 et 36 t/ha de BMP combinées à l'engrais NPK ont significativement réduit la masse volumique apparente de l'argile limoneuse pour la couche 0-10 cm du sol.. Les effets des apports de FSB sur ce paramètre n'étaient pas significatifs sur le site de St Sévère. Les apports de FMC n'ont pas induit des changements significatifs de la masse volumique apparente du sol en comparaison avec le témoin.

La répartition des agrégats et le DMP des agrégats stables à l'eau ont été mesurés à l'automne 2003 et 2006 (Tableaux 5 et 6). Les données obtenues en 2003 sur le site de Nicolet montrent que les différentes tailles de macro-agrégats (>0.25 mm) et la stabilité des agrégats stables à l'eau du loam sableux (DMP) n'ont pas été augmentées significativement par deux apports de FMC, de FSB et de BMP (Tableau 5). Les mesures effectuées en 2006, soit après 4 applications des engrais organiques, indiquent seulement des tendances d'augmentation des différents macro-agrégats (> 5mm; 0,25-5mm) et du DMP des agrégats de sol stables à l'eau . Les apports de FMC sans ajouts d'amendements organiques ont résulté en de plus faibles valeurs de macro-agrégats et de DMP, en comparaison avec les sols ayant reçu les engrais organiques, et même avec le témoin.

Tableau 4. Effet des boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et d'engrais minéral (FMC) sur la masse volumique apparente.

Loam sableux St Amable				
Traitement	2003		2006	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 m
----- g/cm ³ -----				
Témoin	1,29	1,39	1,32	1,43
FMC*	1,21	1,35	1,33	1,44
BMP-18	1,16	1,39	1,33	1,46
BMP-36	1,21	1,36	1,21	1,41
BMP-54	1,20	1,43	1,26	1,39
BMP-18+FMR*	1,20	1,36	1,31	1,39
FSB	1,22	1,44	1,33	1,46
FSB+FMR	1,25	1,39	1,26	1,42
PPDS (P < 0,05)	NS	NS	NS	NS
Argile limoneuse Sainte-Rosalie				
Témoin	1,28	1,43	1,24	1,39
FMC*	1,33	1,37	1,24	1,36
BMP-18	1,26	1,35	1,22	1,36
BMP-36	1,23	1,40	1,17	1,35
BMP-54	1,02	1,34	1,11	1,27
BMP-18+FMR*	1,18	1,43	1,14	1,33
BMP-36+FMR	1,10	1,30	1,15	1,35
FSB	1,28	1,36	1,21	1,36
FSB+FMR	1,20	1,44	1,21	1,36
PPDS (P < 0,05)	0,11	NS	0,10	NS

*FMC : fumure minérale complète recommandée (NPK) pour chaque culture de rotation
 FMR : fumure minérale réduite à 60 % de la dose totale NPK

Sur le site de St Sévère, deux apports de 36 et 54 t/ha de BMP en 2001 et 2002 sans ajout d'engrais NPK ont accru de 14% les proportions de macro-agrégats (>5 mm) de l'argile limoneuse Sainte Rosalie en 2003, en comparaison avec le témoin (Tableau 6). Deux apports de FSB et de BMP ont augmenté de façon significative les macro-agrégats 0,25-5mm dans ce même sol. Cependant, les DMP des agrégats stables à l'eau ont été augmentés seulement avec des apports de 36 et 54 t/ha de BMP apportées seules. Deux apports successifs de FSB ont aussi

légèrement accru le DMP des agrégats stables à l'eau, mais pas de façon significative au seuil de $P < 0,05$. Les données obtenues en 2006 sur l'argile limoneuse Sainte Rosalie située à St-Sévère indiquent que 4 apports de FSB et de BMP ont accru d'environ 41% les proportions de macro-agrégats $> 5\text{mm}$, de 15% la somme de macro-agrégats $0,25\text{mm}-5\text{mm}$ et de 24% le DMP des agrégats stables à l'eau, en comparaison avec le témoin et les sols ayant reçu la FMC (Tableau 6). En effet, les apports répétés de FMC ont légèrement diminué les proportions de macro-agrégats et le DMP des agrégats stables à l'eau, par rapport au témoin.

Tableau 5. Effet des boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et d'engrais minéral (FMC) sur la répartition des agrégats et la stabilité structurale du loam sableux St Amable.

Année	Traitement	>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0,25 mm	$\Sigma > 0,25$ mm	DMP
		----- % -----					mm
2003	Témoin	41,10	14,58	1,31	2,11	56,98	3,36
	FMC*	34,68	22,67	1,61	2,46	58,96	3,09
	BMP-18	49,35	13,89	1,69	2,30	64,93	3,73
	BMP-36	49,16	15,58	1,67	2,45	66,41	3,58
	BMP-54	46,69	15,80	1,88	2,52	64,37	3,98
	BMP-18+FMR*	50,91	15,63	1,47	1,73	68,00	3,89
	FSB	42,96	21,66	1,79	2,25	66,41	3,59
	FSB+FMR	38,92	15,20	1,34	2,01	55,46	2,99
		NS	NS	NS	NS	NS	NS
2006	Témoin	8,79	12,00	1,52	3,73	26,04	1,04
	FMC	5,83	11,03	1,77	4,06	22,69	0,82
	BMP-18	15,11	18,90	1,63	1,84	37,48	1,68
	BMP-36	13,07	19,53	1,44	3,99	38,03	1,58
	BMP-54	17,63	13,10	0,78	2,80	34,31	1,63
	BMP-18+FMR	17,40	18,87	1,60	2,23	40,10	1,83
	FSB	18,00	13,77	1,53	3,43	36,73	1,69
	FSB+FMR	18,99	20,57	0,40	0,71	40,67	1,96
		NS	NS	NS	NS	NS	NS

*FMC : fumure minérale complète recommandée (NPK) pour chaque culture de rotation

FMR : fumure minérale réduite à 60 % de la dose totale NPK

Tableau 6. Effet des boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et d'engrais minéral (FMC) sur la répartition des agrégats et la stabilité structurale de l'argile limoneuse Sainte-Rosalie.

Année	Traitements	>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0,25	$\Sigma > 0,25$	DMP
					mm		
2003	Témoïn	73,06	6,97	1,64	1,58	81,66	5,28
	FMC*	71,96	13,37	3,65	2,75	88,98	5,22
	BMP-18	81,51	8,45	2,02	1,58	91,98	5,63
	BMP-36	84,58	6,81	1,15	0,90	92,55	5,96
	BMP-54	89,00	5,31	1,21	0,76	95,51	5,99
	BMP-18+FMR*	79,54	10,05	2,59	1,62	92,18	5,57
	BMP-36+FMR	83,30	8,62	2,01	1,39	93,68	5,75
	FSB	86,76	7,46	1,62	1,32	92,83	5,74
	FSB+FMR	83,48	7,09	2,12	1,39	92,70	5,71
	PPDS (P < 0,05)	11,18	NS	NS	NS	4,85	0,65
2006	Témoïn	34,17	18,63	2,57	2,82	58,19	2,98
	FMC	32,07	21,83	3,06	2,70	59,66	2,91
	BMP-18	44,40	17,23	2,00	2,41	66,04	3,53
	BMP-36	49,00	14,20	1,91	2,01	67,12	3,72
	BMP-54	47,43	20,67	3,42	2,37	73,89	3,88
	BMP-18+FMR	48,80	14,70	1,88	2,30	67,68	3,73
	BMP-36+FMR	45,60	16,10	2,16	2,37	66,23	3,58
	FSB	45,30	16,23	2,32	2,38	62,23	3,43
	FSB+FMR	42,43	17,03	2,31	2,76	64,53	3,56
	PPDS (P<0,05)	10,11	NS	NS	NS	8,9	0,56

*FMC : fumure minérale complète recommandée (NPK) pour chaque culture de rotation
 FMR : fumure minérale réduite à 60 % de la dose totale NPK

3.3 Propriétés biologiques

Des échantillons de sols pris en 2003 et 2006 ont été incubés à 25⁰C sur une période de 60 jours afin de mesurer les taux de minéralisation d'azote des sols (Tableau 7). Dans le loam sableux de Nicolet, les apports de BMP à des doses de 36 et 54 t/ha ont augmenté les quantités de N minéralisées en 2003 et 2006. (Tableau 7). Par exemple, en 2006, sur le site de Nicolet, les quantités de N minéralisées étaient de 27,19 mg NO₃ /kg pour une application de 54 t/ha de BMP, en comparaison avec des taux de minéralisation de 3,19 NO₃ /kg pour le témoin non fertilisé. Les sols ayant reçu les FSB ou la FMC avaient de plus faibles taux de minéralisation de N, en comparaison avec les BMP. Sur l'argile limoneuse Sainte Rosalie, les apports répétés de BMP ou de FSB n'ont pas accru les taux de minéralisation de N, en comparaison avec le témoin.

Les taux de respiration microbienne reflètent la quantité de microorganismes actifs dans le sol. Les données obtenues en 2003 et 2006 sur le loam sableux de Nicolet indiquent que les taux de respiration microbienne ont augmenté avec les apports de FSB et de BMP. Sur le site de St-Sévère, seulement quatre apports antérieurs de FSB et de BMP ont significativement accru les taux de respiration microbienne du sol en 2006.

Les teneurs de carbone de la biomasse (**CBM**) du sol représentent la totalité des microorganismes du sol. Ainsi, plus les quantités de CBM sont élevées, plus l'activité et la densité de la vie microbienne sont plus importantes. Les mesures de CBM ont été effectuées seulement en 2003 après 2 apports de FSB et de BMP (Tableau 7). Dans les deux types de sols, les apports de FSB et de BMP ont accru de façon significative les teneurs en CBM par rapport au témoin non fertilisé. Dans les deux sols étudiés, les apports de FMC n'ont pas significativement accru les taux de minéralisation d'azote, les taux de respiration microbienne, ni les teneurs en carbone de la biomasse, en comparaison avec le témoin..

Tableau 7. Effet des boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et d'engrais minéral (FMC) sur les taux de minéralisation de N et de respiration microbienne et le C de la biomasse microbienne (CBM).

Site	Traitement	N minéralisé		Respiration microbienne		CBM
		2003 ---- mg NO ₃ -N/kg -- --	2006	2003 ---- mg CO ₂ /kg ----	2006	2003 mg/kg sol
Loam sableux St Amable	Témoin	15,75	3,19	891	326	219
	FMC*	12,61	7,61	791	358	336
	BMP-18	19,35	4,05	1013	543	392
	BMP-36	26,16	11,84	1,071	534	507
	BMP-54	31,84	27,19	1113	510	406
	BMP-18+FMR*	14,14	4,00	952	429	340
	FSB	15,47	4,96	957	480	387
	FSB+FMR	19,30	7,13	1067	688	373
	PPDS (P < 0,05)	10,15	2,90	277	112	140
Argile limoneuse Sainte-Rosalie	Témoin	18,65	8,35	904	383	181
	FMC	17,33	9,56	797	398	254
	BMP-18	16,10	5,84	976	504	582
	BMP-36	16,76	4,21	1180	536	360
	BMP-54	18,77	5,57	1025	783	354
	BMP-18+FMR	22,79	7,24	1027	512	427
	BMP-36+FMR	16,88	6,70	1030	605	267
	FSB	18,77	9,39	787	536	318
	FSB+FMR	19,27	8,24	781	404	279
PPDS (P < 0,05)	4,9	NS	NS	120	136	

*FMC : fumure minérale complète recommandée (NPK) pour chaque culture de rotation
FMR : fumure minérale réduite à 60 % de la dose totale NPK

Les effets des apports des engrais organiques étudiés sur les activités de l'uréase et des phosphatases ont été mesurés en 2003 et 2006 (Tableau 8). Les apports de BMP ont significativement accru les activités de l'uréase, ces augmentations étant beaucoup plus importantes en 2006 après 4 apports de ce type d'engrais organiques. Dans les deux sols, les apports répétés de FSB n'ont pas accru les activités de l'uréase, en comparaison avec le témoin.

Pour le loam sableux Saint-Amable, les apports de BMP et de FSB n'ont pas augmenté l'activité de la phosphatase acide en 2003 par rapport au témoin (Tableau 8). Cependant, on note un accroissement de l'activité de la phosphatase acide (**Pac**) sur l'argile limoneuse Sainte-Rosalie suite à l'application des BMP et des FSB. Deux apports de BMP et de FSB n'ont pas augmenté significativement les activités de la phosphatase alcaline (**Pal**) des sols en 2003 dans les deux sols étudiés. Toutefois, quatre apports de BMP et de FSB ont accru les activités de cette enzyme en 2006 dans les deux types de sol (Tableau 8).

Tableau 8. Effet des boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et d'engrais minéral (FMC) sur les activités enzymatiques.

Site	Traitements	Uréase		Pac		Pal	
		2003	2006	2003	2006	2003	2006
		ug N-NH ₄ /g sol		-----ug P.N.P./g sol-----		---	
Loam sableux Saint-Amable	Témoin	32,08	36,59	262	230	246	223
	FMC*	35,78	41,88	301	277	239	237
	BMP-18	39,53	43,56	332	321	282	279
	BMP-36	40,79	78,54	280	303	328	280
	BMP-54	41,64	59,99	293	309	270	282
	BMP-18+FMR*	43,04	45,09	321	363	300	280
	FSB	40,67	44,66	281	328	302	354
	FSB+FMR	27,86	48,12	255	308	215	336
	PPDS (0,05)	NS	16,74	NS	NS	NS	53
Argile limoneuse Sainte-Rosalie	Témoin	92,72	84	555	590	380	378
	FMC	94,00	103	625	727	342	376
	BMP-18	99,66	90	596	776	347	336
	BMP-36	121,74	121	578	727	410	442
	BMP-54	111,27	140	693	935	375	455
	BMP-18+FMR	128,59	100	667	780	383	325
	BMP-36+FMR	124,39	155	641	802	406	450
	FSB	87,49	88	604	764	355	372
	FSB+FMR	87,87	89	620	788	331	369
PPDS (0,05)	29,57	34	74	173	NS	46	

*FMC : fumure minérale complète recommandée (NPK) pour chaque culture de rotation
FMR : fumure minérale réduite à 60 % de la dose totale NPK

L'impact des apports de FMC, de BMP et de FSB sur les populations de vers de terre a été évalué seulement pour le loam sableux Saint-Amable en 2003 (Tableau 9). Les populations de vers de terre variaient entre 13,33 vers/m² dans les parcelles ayant reçu la FMC et 72 vers/m² pour les apports de 54 t/ha de BMP. Les parcelles amendées avec les BMP contenaient les populations les plus nombreuses de vers de terre, suivies par celles qui avaient reçu des applications de FSB. Les apports d'engrais minéraux ont provoqué une légère baisse du nombre de vers de terre.

Les quantités de vers de terre étaient directement proportionnelles aux doses de BMP apportées. Les apports de BMP et de FSB ont aussi accru les populations juvéniles de vers de terre, en comparaison avec le témoin. Ce résultat reflète la disponibilité de matières organiques nouvelles dans ces traitements.

Cependant, les poids de vers frais et secs n'ont pas suivi nécessairement la même tendance en raison des différences entre les espèces et l'âge des vers de terre. Dans certains traitements, il y avait une présence de plus gros vers (genre *Lumbricus*) mais qui étaient moins nombreux comparativement à des vers plus petits (genre *Aporrectodea*). Les valeurs mesurées pour les populations de vers de terre se situent à l'intérieur des limites rapportées dans la littérature. Cependant, les poids frais et secs sont 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 dominant était *Aporrectodea* dans le site échantillonné. Ces vers de terre sont de plus petite taille que ceux du genre *Lumbricus*. Nous avons compté des vers du genre *Lumbricus* dans certaines 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. Également, 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 ($P > 0,05$), ces résultats montrent que les apports d'engrais organiques stimulent la croissance et la diversité des populations de vers de terre.

Tableau 9. Impacts des boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et d'engrais minéral (FMC) sur les populations de vers de terre du loam sableux Saint-Amable en 2003.

Traitements	Nombre de vers de terre	Proportion d'individus		Poids frais de vers de terre	Poids sec de vers de terre
	#/m ²	Adultes	Juveniles	g/m ²	
Témoin	18,67	100	0	9,58	2,35
FMC*	13,33	60	40	3,71	1,57
BMP-18	32,00	75	25	16,00	4,57
BMP-36	37,33	64	36	12,17	5,36
BMP-54	72,00	78	22	21,88	6,67
BMP-18+FMR*	34,67	85	15	16,71	5,03
FSB	18,67	43	57	13,23	3,25
FSB+FMR	26,67	80	20	17,40	6,38
PPDS (0,05)	NS	--	--	NS	NS

La séparation entre les adultes et les juvéniles est basée sur la présence ou l'absence d'un clitellum (renflement de couleur plus foncée).

*FMC : fumure minérale complète recommandée (NPK) pour chaque culture de rotation
FMR : fumure minérale réduite à 60 % de la dose totale NPK

3.4 .Teneurs en C du sol et des substances humiques

Les teneurs en C des sols dans la couche 0-20 cm ont été influencées par les apports des engrais organiques selon les types de sol et la nature des matières organiques incorporées (Tableau 10). Sur le loam sableux St Aimable, les teneurs en C mesurées en 2006 ont été augmentées par quatre apports antérieurs de BMP. Dans les sols ayant reçu la FMC et le FSB, les teneurs du sol en C n'étaient pas différentes de celles du témoin. Les résultats obtenus sur l'argile limoneuse Ste Rosalie montrent par contre que les apports répétés de 36 et 54 t/ha de BMP ont conduit à des enrichissements significatifs de ce sol en C, ceux-ci étaient même proportionnelles aux doses de BMP. Après quatre apports de 36 et 54 t/ha de BMP, la teneur du sol en C en 2006 avait augmenté de 20 et 36% respectivement par rapport au témoin, et de 7 et 21% en comparaison avec les apports de FMC et de FSB. Les apports de FSB et de FMC ont également accru les niveaux de C par rapport au témoin, mais cette augmentation n'était pas significative au seuil de $P < 0,05$.

Les données obtenues sur les différentes fractions de la MO des sols sont indiquées dans le tableau 10. Dans le loam sableux St Amable, quatre apports de FMC, de FSB et de BMP ont légèrement accru la fraction non humique de la MO ainsi

que les acides humiques, ces augmentations n'étaient toutefois pas significatives au seuil de $P < 0,05$. Sur l'argile limoneuse Ste Rosalie, les apports de 36 et 54 t/ha de BMP ont accru de façon significative les teneurs en C des fractions non humiques (FNH) et des acides humiques (AH), en comparaison avec le témoin sans engrais ni amendements organiques et la FMC. Les apports de FSB complétées de FMR ont légèrement accru les teneurs en C des FNH et des AH, ces augmentations n'étant pas toutefois significatives.

Tableau 10. Effet d'apports d'engrais NPK (FMC) de boues mixtes de papetières (BMP) et de fumier solide de bovins (FSB) sur les teneurs en C du sol et des substances humiques (2006).

Loam sableux St Amable						
Traitements	C	FNH	AH	AF	FNH/AF + AH	AF/AH
	-----C g kg ⁻¹ -----					

Témoin	24,8	2,3	5,2	3,1	0,27	1,7
FMC*	22,6	2,3	6,2	2,9	0,25	2,0
BMP-18	29,0	2,8	7,0	3,5	0,26	2,0
BMP-36	28,3	2,8	6,5	3,9	0,27	1,7
BMP-54	27,4	2,7	6,4	2,7	0,30	2,4
BMP-18+FMR*	24,5	2,9	6,4	3,3	0,30	1,9
FSB	20,7	2,4	6,4	2,5	0,26	2,6
FSB+FMR	22,4	2,5	6,8	2,7	0,27	2,5
PPDS (P < 0,05)	1,4	NS	NS	NS	NS	0,7
Argile limoneuse Sainte-Rosalie						
Témoin	25,0	3,0	3,9	1,8	0,53	2,1
FMC*	28,0	3,2	4,1	2,1	0,51	2,0
BMP-18	28,5	3,4	4,3	2,7	0,55	1,6
BMP-36	30,0	3,8	5,4	2,3	0,50	1,9
BMP-54	34,0	4,5	6,0	2,4	0,53	2,5
BMP-18+FMR*	27,0	3,8	4,5	2,1	0,57	2,0
BMP-36+FMR	33,6	4,0	5,1	2,7	0,51	1,9
FSB	27,7	3,0	4,3	2,8	0,42	1,5
FSB+FMR	27,4	3,9	5,1	3,2	0,39	1,6
PPDS (P < 0,05)	4,6	0,51	1,2	NS	NS	NS

3.5. Rendements des cultures

3.5.1 Rendements des cultures au site de Nicolet

Les niveaux de rendements des cultures sur le site de Nicolet sont présentés dans le tableau 11. En 2001, les rendements en maïs-grain ont été accrus par les apports de FSB et de BMP. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec les doses de 36 t/ha de BMP, ces niveaux de production étant même supérieurs à ceux obtenus avec la FMC. La plus grande dose de BMP (54 t/ha) a présenté de plus faibles rendements en grains probablement à cause d'une plus grande disponibilité d'azote qui aurait conduit à une faible maturité de grains. L'application de 18 t/ha de FSB seul a également résulté en une augmentation de rendement par rapport au témoin non fertilisé sans toutefois se différencier du traitement de FMC. L'apport de FSB et de BMP complété avec la FMR n'a pas conduit à des augmentations plus élevées en maïs-grain, en comparaison avec des apports de ces engrais organiques seuls. Les apports de FMC, de FSB et de BMP n'ont pas significativement augmenté le poids spécifique des grains, en comparaison avec le témoin.

Tableau 11. Effet des apports de boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et d'engrais NPK (FMC) sur les rendements de l'orge, du maïs-grain et du maïs-ensilage (kg/ha) et le poids spécifique (kg/hl) sur un loam sableux St Amable.

Traitement	Maïs-grain (2001)		Maïs-ensilage (2002)	Orge (2003)	Maïs-grain (2004)	Maïs-grain (2005)		Maïs-grain (2006)
	kg/ha	kg/hl	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/hl	kg/ha
Témoin	6 633	61,60	8 586	1 348	4 257	3 459	65,16	2 160
FMC*	8 327	63,17	15 355	3 489	10 416	8 365	67,17	8 660
BMP-18	7 115	64,07	14 897	1 694	9 937	8 407	66,25	3 068
BMP-36	9 031	61,90	15 828	2 233	10 359	9 990	67,77	4 837
BMP-54	6 838	62,93	15 425	1 610	10 046	8 805	67,19	4 920
BMP-18+FMR*	8 232	62,40	15 799	3 352	10 559	9 833	67,62	7 984
FSB	7 453	62,17	10 852	1 698	7 796	4 525	66,43	4 022
FSB+FMR	7 515	62,00	10 390	2 257	7 124	5 312	66,66	4 520
PPDS (P < 0,05)	1 078	NS	3 248	1 098	979	1 572	1,99	1 209

*FMC : fumure minérale complète recommandée (NPK) pour chaque culture de rotation
FMR : fumure minérale réduite à 60 % de la dose totale NPK

En 2002, les rendements de maïs-ensilage ont varié entre 8596 et 16374 kg /ha de matière sèche. Deux apports de BMP sans complément de NPK ont accru de 80% les rendements en maïs ensilage en comparaison avec le témoin non fertilisé. Les rendements obtenus dans les sols amendés avec les BMP seuls étaient comparables à ceux obtenus avec la FMC. L'apport supplémentaire d'engrais azoté aux BMP n'a pas produit un gain significatif de rendement en maïs, en comparaison avec les applications seules de ces matières fertilisantes. L'apport de FSB a légèrement accru les rendements en maïs ensilage par rapport au témoin, quoique cette augmentation ne soit pas significative à $P < 0,05$.

En 2003 et 2006, les BMP et les FSB n'ont pas été appliqués sur les sols afin d'évaluer les arrière-effets de ces engrais organiques sur les niveaux de rendements des cultures. Sur le site de Nicolet, les rendements d'orge en 2003 sur les sols antérieurement fertilisés avec les FSB et les BMP seuls étaient supérieurs à ceux du témoin non fertilisé mais les différences n'étaient pas significatives. Les rendements obtenus dans ces traitements étaient inférieurs à ceux de la FMC. L'effet résiduel était plus élevé avec la dose de 36 t/ha de BMP. L'application conjointe des BMP et de FMR a permis d'obtenir les rendements les plus élevés d'orge, comparables à ceux de la FMC. Les applications antérieures de FSB seuls ou avec la FMR ont résulté en une légère augmentation de rendement d'orge par rapport au témoin sans que celle-ci soit significative à $P < 0,05$.

En 2004, les rendements en maïs-grain ont été plus élevés dans les sols ayant reçu trois apports de FSB et de BMP seuls ou avec la FMR. Aucune différence significative n'a été observée entre la FMC et les trois doses de BMP. Par ailleurs, les apports supplémentaires de FMR aux FSB et BMP n'ont pas produit des augmentations significatives, en comparaison avec les FSB et BMP seuls.

Les niveaux de rendements en maïs-grain obtenus en 2005 après quatre apports de BMP sont deux fois plus élevés que le témoin sans NPK ni amendements organiques (Tableau 11). Dans l'ensemble, les parcelles ayant reçu les BMP ont produit des rendements comparables à ceux de FMC pendant toutes les années. En 2005, les rendements en grains les plus élevés (9990 kg/ha) ont été obtenus avec l'application de 36 t/ha de BMP. L'ajout de FMR aux BMP n'a pas procuré une augmentation de rendement de maïs en comparaison avec les BMP appliquées seules. Par contre, l'apport de FSB complété avec la FMR a significativement accru les rendements en grains, par rapport au témoin. Les apports de FMC et de BMP ont augmenté le poids spécifique du grain.

Les rendements de maïs-grain obtenus en 2006 après quatre applications antérieures des FSB et de BMP seuls ou avec la FMR étaient 2 fois plus élevés que ceux du témoin non fertilisé, mais inférieurs à ceux de la FMC.

3.5. 2. Rendements des cultures à St-Sévère

Les niveaux de rendements des cultures obtenus sur l'argile limoneuse à St-Sévère sont présentés dans le tableau 12. Dans la première année en 2001, les apports de FSB et de BMP n'ont pas accru significativement les rendements en maïs-grain ni le poids spécifique des grains, en comparaison avec le témoin. En 2002, les rendements de soya ont varié entre 2812 et 3368 kg/ha et n'ont pas été influencés par les apports de FMC, de FSB et de BMP. Le soya est une légumineuse, et grâce à son pouvoir de fixation de l'azote de l'air, cette culture ne répond pas toujours aux apports d'azote minéral ou organique.

Tableau 12. Effet des boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et d'engrais minéral (FMC) sur les rendements de l'orge, du maïs-grain et du soya (kg/ha) et le poids spécifique (kg/hl) sur une argile limoneuse Sainte-Rosalie.

Traitement	Maïs-grain (2001)		Soya (2002)	Orge (2003)	Maïs-grain (2004)	Maïs-grain (2005)		Soya (2006)
	kg/ha	kg/hl	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/hl	kg/ha
Témoin	4 324	64,33	3 212	2 977	6 450	2 933	69,09	2 996
FMC*	4 719	66,97	2 862	3 832	8 361	6 199	71,14	3 120
BMP-18	5 002	66,23	2 964	3 513	7 690	4 306	70,07	2 809
BMP-36	4 623	67,00	3 368	3 356	8 642	5 893	71,95	3 102
BMP-54	4 862	67,70	3 254	4 203	8 083	7 068	73,80	3 108
BMP-18+FMR*	4 389	65,47	2 812	4 011	8 226	5 942	71,08	2 758
BMP-36+FMR	4 691	65,83	3 179	3 844	8 383	6 919	72,97	2 860
FSB	4 732	64,63	3 103	2 741	7 861	3 844	68,84	2 768
FSB+FMR	4 630	64,20	3 200	4 202	8 476	4 894	70,67	3 011
PPDS (P < 0,05)	NS	NS	NS	869	955	1 316	1,28	NS

*FMC : fumure minérale complète recommandée (NPK) pour chaque culture de rotation
FMR : fumure minérale réduite à 60 % de la dose totale NPK

Les rendements d'orge obtenus en 2003 dans les sols ayant reçu les FSB et les BMP en 2001 et 2002, seuls ou avec la FMR, ont augmenté de 13 à 34% respectivement, par rapport au témoin. Ces niveaux de rendements étaient similaires avec ceux qui étaient produits avec la FMC.

Les résultats obtenus en 2004 indiquent que trois apports de FSB et de BMP de 2001 à 2004, seuls ou combinés à la FMR, ont significativement augmenté les niveaux de rendements en maïs-grain, en comparaison avec le témoin. Les rendements obtenus dans les parcelles ayant reçu successivement les engrais organiques seuls étaient similaires à ceux de la FMC. De façon générale, l'apport de la FMR n'a pas conduit à des augmentations significatives de rendements par rapport aux FSB et BMP appliqués seuls au sol.

En 2005, les apports répétés de BMP ont conduit à des augmentations de 3 à 4 t de maïs-grain par rapport au témoin non fertilisé, ces augmentations étant proportionnelles aux doses de BMP. Les rendements obtenus dans les parcelles avec des doses de 36 et 54 t/ha de BMP étaient égaux à ceux de celles qui étaient fertilisées avec la FMC. L'addition de la FMR aux BMP a produit des augmentations de rendement de 38 et 17% pour les doses de 18 et 36 t/ha, respectivement, par rapport aux mêmes doses appliquées seules. Les niveaux de rendements obtenus dans les parcelles avec FSB apportés seuls étaient plus faibles, en comparaison avec celles ayant reçu les BMP. L'ajout de la FMR au FSB a significativement augmenté les rendements en maïs-grain. Les résultats montrent une augmentation significative du poids spécifique suite à l'application des BMP et de la FMC.

En 2006, les arrière-effets des engrais organiques ont été évalués sur la culture de soya. Dans l'ensemble, les rendements de soya n'ont pas été significativement influencés par les engrais organiques seuls ou combinés avec la FMR.

Les résultats obtenus indiquent que les arrière-effets des engrais organiques mesurés en 2003 et 2006 ont été plus importants pour les cultures d'orge et de maïs-grain dans les deux types de sol (Tableaux 11 et 12).

4. Discussion

Les principales rotations des cultures n'apportent plus suffisamment de résidus organiques pour combler les déficits en matière organique dans les sols agricoles et maintenir ou accroître la productivité de ces derniers. Dans les deux sols étudiés, quatre applications de BMP pendant six ans ont augmenté les teneurs en C entre 20 et 36 % par rapport au témoin. Ces augmentations dépendaient des doses apportées

au sol et des types de sol. En effet, l'enrichissement le plus élevé en C se retrouvait dans l'argile limoneuse Sainte Rosalie (St Sévère) que sur le loam sableux St Amable (Nicolet). Cette différence peut probablement être expliquée par les conditions de sol différentes d'un site à l'autre.

Dans le loam sableux, les conditions d'aération et de température sont plus favorables par rapport à l'argile limoneuse, ce qui augmente la décomposition de la matière organique, réduisant par conséquent les taux d'accumulation du C dans ce sol. De plus, le C est plus protégée contre la décomposition microbienne dans les sols argileux, en comparaison avec les sols sableux. Nos résultats ne concordent pas avec des travaux antérieurs (Foley et Cooperband, 2002) qui ont démontré que les taux d'accumulation de C dans les sols suite aux apports d'amendements organiques dépendaient très fortement des teneurs initiales. Au début de l'étude en 2001, le sol sableux étudié contenait de plus faibles teneurs en C (1,7%) en comparaison avec l'argile limoneuse (4,2 %). Cependant les augmentations de C ont été plus faibles dans le loam sableux suite à quatre apports de BMP et de FSB.

Le carbone organique du sol peut également être physiquement inaccessible aux micro-organismes décomposeurs et à leurs enzymes extracellulaires suite à ses liaisons chimiques ou physico-chimiques avec les particules minérales du sol telles que les surfaces des argiles (Hassink 1997). L'enrichissement le plus élevé en C de l'argile limoneuse concorde avec les observations faites dans des études antérieures (Hassink, 1997 ; Aoyama et al., 1999 ; Six et al., 2002). Ces auteurs ont démontré que les teneurs en C augmenteraient plus rapidement avec la teneur en argile et limon dans les sols.

Par ailleurs, les données obtenues indiquent que l'augmentation de C était plus importante avec les BMP qu'avec le FSB sur les deux sites. Il est généralement admis qu'en plus de la quantité, la composition des engrais organiques influence l'enrichissement des sols en C, ce qui suggère que les faibles taux d'accumulation de C dans les sols ayant reçu les FSB seraient reliés aux plus faibles quantités de C apporté au sol, en comparaison avec les BMP (Tableau 3).

Les résultats obtenus indiquent également que les applications répétées de BMP ont accru les teneurs en C de la FNH et des AH dans l'argile limoneuse Sainte Rosalie, mais pas dans le loam sableux St Amable. Le contenu en C de la FNH variait entre 2,3 et 2,9 g C/ kg dans le loam sableux et entre 3,0 et 4,5 g C/kg dans l'argile limoneuse. Cette fraction représentait en moyenne 10 à 12% du C organique du sol (Tableau 10).

La FNH de la MO est constituée de sucres, d'acides aminés libres, de peptides, de protéines et d'autres substances organiques de faibles poids moléculaires (Gigliotti et

al. ,2001). Les apports de BMP (18 à 54 t/ ha) ont produit des augmentations variant entre 13 et 50% de la teneur en C-FNH dans l'argile limoneuse, en comparaison avec le témoin, ces augmentations étant proportionnelles aux doses apportées. En comparaison avec les BMP, les applications de FMC et de FSB ont augmenté la teneur en C-FNH de 6% et 13% respectivement dans ce type de sol. Ces résultats démontrent que l'augmentation de la teneur en C-FNH dans l'argile limoneuse résultait directement des apports de MO par les BMP et non des résidus de récolte.

La matière organique non humifiée est soit dégradée par les micro-organismes qui l'utilisent comme source de C et d'énergie, soit utilisée par la suite dans la synthèse des substances humiques du sol (Dinel et al. 1989). Les faibles teneurs en C de la FNH dans le loam sableux suggèrent que cette fraction de la matière organique a été rapidement minéralisée par les micro-organismes dans ce sol. En effet, les activités biologiques ont été plus importantes dans ce type de sol (Tableau 7)

Dans les deux sols, les teneurs en C des AH du sol entier représentaient 15% à 24% du C du sol, tandis que le C des AF constituait 7% à 13,7% (Tableau 10). Ces résultats sont en accord avec d'autres recherches qui ont démontré que les acides humiques constituaient la majeure fraction de substances humiques extractibles du sol, et que les acides fulviques étaient généralement une fraction transitoire (Doane et al., 2003). Les faibles teneurs en C des AF du sol sont attribuables au fait que les acides fulviques se minéralisent deux fois plus rapidement que les acides humiques (Qualls, 2004). Les proportions de C-AF et de C-AH obtenues dans cette étude sont proches des valeurs mesurées par Bipfubusa et al. (2008) suite à trois applications de boues désencrées et de leurs composts sur un loam argileux.

Les teneurs en C des AH et des AF sont légèrement plus élevées dans le loam sableux en comparaison avec l'argile limoneuse. Ces résultats suggèrent une décomposition et humification plus rapide des FSB et des BMP dans ce sol. Ainsi , la fixation des matières organiques sur les surfaces argileuses aurait pu entraîner une plus faible décomposition et humification dans l'argile limoneuse, ceci ayant conduit à l'enrichissement observé en C du sol entier et en C-FNH (Tableau10).

Les faibles augmentations des teneurs en C du sol entier et des fractions de la MO observées dans les sols ayant reçu la FMC résultent probablement d'une faible vitesse de décomposition et d'humification des tiges de maïs à cause de leurs rapports C/N généralement élevés, comparativement à ceux des FSB et aux BMP.

Le rapport C-FNH/(C-AF+C-AH) est l'indice d'humification de la matière organique (Gigliotti et al. 2001, N'Dayegamiye et Watt 2000). Selon Gigliotti et al. (2001), cet

indice est normalement de 0,5 et peut atteindre 1 si cette matière organique est peu humifiée ; il est proche de zéro si celle-ci est très humifiée. Dans notre étude, l'indice d'humification était de 0,3 dans le loam sableux et de 0,5 dans l'argile limoneuse (Tableau 10), ce qui confirme que l'humification de la matière organique incorporée a été plus importante dans le loam sableux.

Le rapport C-AH/C-AF, appelé indice de polymérisation, permet de déterminer le type d'humus (Orlov 1995). Selon cet auteur, un rapport C-AH/C-AF > 2 signifie que les substances humiques sont sous forme d'humates. Cet indice varie de 1 à 2 si les teneurs en humates sont plus abondantes que celles des fulvates et inversement s'il varie entre 0,5 et 1. Dans cette étude, le rapport C-AH/C-AF a varié entre 1,5 et 2,6, ce qui suggère que les substances humiques dans ces sols étaient constituées de plus d'humates que de fulvates. Cet indice de polymérisation présentait des valeurs similaires entre les deux sols.

En enrichissant les sols en C, les apports de FSB et de BMP peuvent positivement modifier la structure des sols. Nos résultats indiquent une augmentation de la macro-agrégation (<0,25 mm) et de la stabilité structurale du sol exprimée par le DMP des agrégats stables à l'eau suite aux apports répétés de FSB et de BMP.

Plusieurs études ont également mis en évidence l'augmentation des macro-agrégats et du DMP des agrégats stables à l'eau suite aux applications de BMP au sol (Gagnon et al., 2001; Bipfubusa et al., 2005, 2008; N'Dayegamiye, 2006). Dans l'argile limoneuse Sainte Rosalie, les apports de FSB ont exercé le même effet positif sur la formation de macro-agrégats et le DMP des agrégats stables à l'eau que les BMP, même si les quantités totales de MO apportée au sol étaient plus faibles par rapport à celles des BMP. En effet, les applications de FSB à la dose de 36 t/ha ont apporté entre 12,1 t/ha de MO sur le loam argileux Sainte-Rosalie et la même dose de BMP a fourni 28,4 t/ha de MO.

Les effets sur l'agrégation des sols dépend non seulement de la quantité, mais aussi de la qualité des matières organiques incorporées. Les engrais organiques étudiés étaient riches en N et leurs rapports C:N inférieurs à 20, ce qui suggère qu'ils présentaient des taux élevés de décomposition dans les sols. Le potentiel des engrais organiques à favoriser l'agrégation du sol est en relation avec leur taux de décomposition par les microorganismes et, par conséquent, à leur capacité à stimuler la microflore et à produire des substances humiques. La macro-agrégation accrue du sol suite aux apports de BMP et de FSB est ainsi reliée à leur composition chimique et à leur taux de décomposition.

La matière organique est le facteur principal de l'agrégation des sols des régions tempérées (McRae et Mehuys, 1985) Les matières organiques assurent la cohésion

des autres constituants du sol entre eux et contribuent à l'agrégation du sol et à la stabilité de la structure (Balesdent, 1996). En effet, plusieurs études ont démontré que la stabilité des agrégats du sol est positivement corrélée à la teneur du sol en matière organique (Tisdall et Oades, 1982; Chaney et Swift, 1984). Ainsi, les pratiques culturales qui permettent des apports de matières organiques au sol telles que les rotations, l'incorporation des amendements organiques tels que les fumiers de ferme (N'Dayegamiye et al., 1997b ; Aoyama et al., 1999) et les résidus de désherbage (Chantigny et al., 1999), l'incorporation des engrais verts (Abdallahi et N'Dayegamiye, 2000) favorisent le processus de macro-agrégation stable du sol.

Les résultats obtenus ont aussi démontré que les effets des FSB et des BMP sur l'agrégation dépendaient du type de sol, étant plus importants dans l'argile limoneuse Sainte Rosalie, en comparaison avec le loam sableux Saint Amable. Dans les sols argileux, l'agrégation ne dépend pas uniquement de la matière organique, mais également des oxydes et hydroxydes de Fe et d'Al qui agissent sur l'agrégation en établissant des ponts entre argiles et polymères organiques (Golchin et al., 1994).

De toutes les particules minérales élémentaires, l'argile est en effet le facteur le plus important de la stabilité des agrégats. Plusieurs recherches ont fortement corrélé la stabilité structurale des sols à leur teneur en argile (Kemper et al. 1987, Elustondo et al. 1990). Par exemple, grâce à leur surface spécifique élevée et à leur charge négative permanente, les argiles de type 2 :1 ont une grande capacité d'adsorption des matières organiques et elles assurent, par conséquent, une grande stabilité des agrégats, comparativement aux argiles de type 1 :1 (Greenland, 1965).

La fertilisation minérale NPK permet généralement de maintenir ou d'améliorer les rendements des cultures. Ces derniers s'accompagnent d'importantes quantités de résidus organiques qui, lorsque retournés au sol, peuvent augmenter le niveau de matière organique du sol (Biederbeck et al., 1984 ; Haynes et Naidu, 1998). Dans notre étude, la fertilisation minérale NPK (FMC) n'a pas accru les teneurs en C organique du sol entier ni celles des fractions de MO. Les apports annuels de NPK n'ont pas non plus permis une amélioration de la structure et des activités biologiques des sols étudiés. Ces résultats suggèrent que même si les engrais minéraux permettent de produire des rendements élevés, ils peuvent aussi réduire à long terme la productivité des sols à cause de la dégradation des propriétés des sols (Nybord et al. 1995).

Les apports de FSB et de BMP ont amélioré la structure du sol, réduit la densité du sol et accru les activités biologiques des sols, ces paramètres étant déterminants pour la productivité des sols. Les améliorations de la structure du sol présentent une

influence directe sur les autres propriétés physiques du sol comme la porosité, l'aération et la rétention en eau qui n'ont pas été examinées dans la présente étude, ces paramètres améliorent les conditions de croissance et de nutrition des cultures.

Les rendements des cultures ont été améliorés par les apports de BMP et de FSB. De façon générale, on observe des augmentations graduelles des rendements des cultures. À l'exception de la première année d'application, on observe que les doses élevées de BMP (36 et 54 t/ha) apportées sans supplément d'engrais NPK ont permis d'obtenir des rendements similaires et parfois supérieurs à la fertilisation minérale complète. Il ressort que les apports réguliers de ces doses de BMP peuvent combler les besoins nutritifs des cultures, sans complément d'engrais minéral.

Même si les effets de FSB et de BMP sur la MO, la structure et la masse volumique apparente ont été plus importants dans l'argile limoneuse Sainte Rosalie, les apports de BMP et de FSB ont conduit à des augmentations plus importantes de rendements des cultures dans le loam sableux St Amable. En considérant par exemple l'année 2005 où le maïs-grain était cultivé dans les deux sols, on observe que 4 apports de 36 t/ha de FSB et de BMP seuls ont permis des augmentations de 65% par rapport au témoin dans le loam sableux et de 50% dans l'argile limoneuse.

Ces augmentations plus élevées de rendements dans le loam sableux pourraient être attribuables aux conditions printanières (aération, température du sol, meilleur drainage) plus propices à la croissance des plantes et à l'absorption des éléments nutritifs. Ces augmentations de rendements dans ce type de sol peuvent aussi être causées par une minéralisation plus élevée des FSB et de BMP dans le loam sableux par rapport à l'argile limoneuse. En effet, les taux de minéralisation d'azote étaient plus élevés dans le loam sableux (Tableau 7).

Les apports de 36 à 54 t/ha de BMP seuls ont produit des rendements équivalents à ceux de la FMC dans les deux types de sol. Par ailleurs, l'ajout de la FMR a produit des gains plus importants de rendements seulement avec les apports de 18 t/ha. Après quatre apports de FSB en 2005, les augmentations de rendements en grains de maïs par rapport au témoin représentaient de 20 et 23% dans le loam sableux et l'argile limoneuse respectivement. Les rendements des cultures obtenus avec le FSB étaient tout le temps inférieurs aux rendements obtenus avec les BMP et la FMC. Même si les FSB apportaient au sol des quantités plus élevées en azote et même si les coefficients d'efficacité de N des BMP et des FSB sont souvent similaires (N'Dayegamiye et al. 2004; N'Dayegamiye. 2006), les rendements des cultures sont demeurés plus faibles dans les sols ayant reçu les FSB par rapport aux BMP. Ces résultats indiquent que les effets indirects sur le sol (structure, densité, activités biologiques) qui étaient beaucoup plus importants dans les sols ayant reçu les BMP

ont favorisé une croissance plus élevée des cultures. Ces résultats sont en accord avec les observations de Edmeades (2003). Cet auteur suggère que seulement des apports réguliers de fumier peuvent influencer à moyen et long-terme la productivité des sols.

5. Conclusion

Les apports de FSB et de BMP ont accru les teneurs en C du sol et des fractions de la MO (FNH et AH) seulement dans l'argile limoneuse. De même, ils ont diminué la masse volumique apparente, accru les proportions de macro-agrégats stables à l'eau (< 5 mm; 0,25-5 mm) ainsi que le DMP des agrégats stables à l'eau dans ce même sol. Ces effets ont été plus faibles dans le loam sableux St Amable. Par contre, l'influence des FSB et des BMP sur les activités biologiques (respiration microbienne et de minéralisation d'azote) a été plus importante dans le loam sableux. Les apports de 36 et 54 t/ha de BMP seuls ont permis d'obtenir des rendements de maïs-grain et d'orge équivalents à ceux de la FMC. Des applications de plus faibles doses de BMP (18 t/ha) complétées par une FMR ont également produit des rendements élevés des cultures. Les plus importantes augmentations de rendements des cultures suite aux apports de FMC, de FSB et de BMP ont été obtenues sur le loam sableux. Cette étude a démontré que les bénéfices des apports de FSB et de BMP sur les propriétés des sols et les rendements des cultures dépendaient de la composition chimique des engrais organiques incorporés et des types de sol.

6. Références bibliographiques

Abdallahi, M.M., et A. N'Dayegamiye. 2000. 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.

Aber, J.D., J.M. Melillo and C.A. McLaugherty. 1990. Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics and soil organic matter formation from initial litter chemistry in temperate forest ecosystems. *Can. J. Bot.* 68: 2201-2208.

Allison, L.E., W.B. Bollen and C.D. Moodie. 1965. Total carbon. Pages 1346–1365 *In* C. A. Black et al. ed. *Methods of soil analysis*. Agronomy Monograph no. 9. ASA, SSSA, Madison, WI.

Anderson, J. 1982. Soil respiration. Pages 831–866 *In* A. L. Page, R. H. Miller et D. R. Keeney, ed. *Methods of soil analysis*. Agronomy Monograph no. 9. ASA, SSSA, Madison, WI.

Aoyama, M., Angers, D.A., N'Dayegamiye, A., and N. Bissonnette. 1999. Protected organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Can. J. Soil Sci.* 79: 419-425.

Arfaoui, M.A., R.R. Simard, G. Bélanger, M.R. Laverdière and R. Chabot. 2001. Mixed papermill residues affect yield, nutritive value and nutrient use of a grass-alfalfa sward. *Can. J. Soil Sci.* 81: 103–111.

Bellamy, K.L., C. Chong and R.A. Cline. 1995. Paper sludge utilization in agriculture and container nursery culture. *J. Environ. Qual.* 24:1074-1082.

Biederbeck, V.O., Campbell, C.A., and R.P. Zentner. 1984. Effect of crop rotation and fertilization on some biological properties of a loam in Southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 64: 355-367.

Bipfubusa, M. D. Angers, A. N'Dayegamiye and H. Antoun. 2008. Soil aggregation and biochemical properties following the application of fresh and composted organic amendments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:160-166.

Bipfubusa, M., A. N'Dayegamiye et H. Antoun. 2005. Effets de boues mixtes de papetières fraîches et compostées sur l'agrégation du sol, l'inclusion et la minéralisation du C dans les macro-agrégats stables à l'eau. *Can. J. Soil Sci.* 85:47-55.

Bremner, J.M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. *In*: C.A. Black et al. (ed.) *Methods of soil analysis*, part 2. Am. Soc. Agron. Madison, WI. Agron., 9: 1179-1239.

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

Camberato, J.J., E.D. Vance and A.V. Someshwar. 1997. Composition and land application of paper manufacturing residuals. Pages 185–202 in J. E. Rechcigl and H. C. MacKinnon, eds. *Agricultural Uses of Byproducts and Wastes*. American Chemical Society, Washington, DC.

Chaney, K., and R.S. Swift. 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *J. Soil Sci.* **35**: 223-230.

Chantigny, M.H., D.A. Angers and C.J. Beauchamp. 2000. Decomposition of de-inking paper sludge in agricultural soils as characterized by carbohydrate analysis. *Soil Biol. & Biochem.* 32:1561-1570.

Chantigny, M.H., D.A. Angers and C.J. Beauchamp. 1999. Aggregation and organic matter decomposition in soils amended with de-inking paper sludge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1214-1221.

Charbonneau, H., M. Hébert, et A. Jaouich. 2001. Contenu en éléments fertilisants et qualité environnementale. *Vecteur Environnement* 34:56-60.

Cheshire, M.V. and S.J. Chapman. 1996. Influence of the N and P status of plant material and of added N and P on the mineralization of ¹⁴C-labelled ryegrass in soil. *Biol. Fertil. Soils* 21:166–170.

Désilets, L. 2003. Qu'advient-il des boues de traitement des papetières? *Vecteur Environnement* 36:47-53.

Dinel, H., Schnitzer, M., and G. Mehyus. 1989. Soil lipids: origin, nature, contents, decomposition, and their effect on soil physical properties. In Stotzsky, G. and Bollag, J.M. (eds). *Soil Biochemistry*. Volume **6**: 397-429.

Doane, T.A., Devêvre, O.C., et W.R. Horwáth. 2003. Short-term soil carbon dynamics of humic fractions in low-input and organic cropping systems. *Geoderma* 114: 319-331.

Edmeades, D.C. 2003. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66: 165-180

Elliott, E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:627–633.

Elustondo, J., Angers, D.A., Laverdière, M.R., and A. N'Dayegamiye. 1990. Étude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs et de prairie. *Can. J. Soil Sci.* **70** : 395-402.

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 application. *Can. J. Soil Sci.* **76** : 351-355.

Fierro, A., D.A. Angers, D.A. and C.J. Beauchamp. 1999. Dynamics of physical organic matter fractions during de-inking sludge decomposition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **63**:1013-1018.

Foley, B.J. and L.R. Cooperband. 2002. Paper mill residuals and compost effects on soil carbon and physical properties. *J. Environ. Qual.* **31**:2086-2095.

Gagnon, B., R. Lalande and S.H. Fahmy. 2001. Organic matter and aggregation in a degraded potato soil as affected by raw and composted pulp residue. *Biol. Fertil. Soils.* **34**:441-447.

Gigliotti, G., Giusquiani, P.L., and D. Businelli. 2001. A long-term chemical and infrared spectroscopy study on a soil amended with municipal sewage sludge. *Agronomie* **21**: 169-178.

Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., and P. Clarke. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* **32**: 1043-1068.

Giroux, M., A. N'Dayegamiye et R. Royer. 2007. Effet des apports d'automne et de printemps de fumiers et de boues mixtes de papetières sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et l'efficacité de l'azote. *Agrosolutions* **18**(1) : 25-34.

Greenland, D.J. 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. Part II. Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties. *Soil Fert.* **38**: 521-532.

Kemper, W.D., Roseneau, R.C., and A.R. Dexter 1987. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter and temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51**: 860-867.

Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* **191**: 77-87.

Haynes, R.J., and R. Naidu. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **51**: 123-137.

Jackson, M.J. and M.A. Line. 1997. Composting pulp and paper mill sludge. Effect of temperature and nutrient addition method. *Compost Sci. & Utiliz.* **5**:74-81.

Kemper, W.O. and R.C. Roseneau. 1986. Aggregate stability. Pages 511–519 *In* C.A. Black et al., ed. *Methods of soil analysis*. Agronomy no. 9, Part. 1. ASA Inc., Madison, WI. 399-407.

McRae, R., and G.R. Mehuys. 1985. The effects of green manuring on the physical properties of temperate-area soils. *In: Stewart, B.A. (ed.). Advances in soil science. Volume 3.* pp. 71-94.

Martens, D.A. 2000. Management and crop residue influence soil aggregate stability. *J. Environ. Qual.* 29: 723-727.

McKeague, J.A. 1978. Manual of soil sampling and method of analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Ottawa, ON. 250 p.

Melillo, J.M., J.D. Aber, A.E. Linkins, A. Ricca, B. Fry and K.J. Nadelho. 1989. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: plant litter to soil organic matter. *Plant and Soil* 115: 189-198.

Morin, N. 2007. Guide d'évaluation et d'adaptation de l'utilisation des biosolides papetiers pour le contrôle des éricacées. Centre d'expérimentation et de développement en forêt boréale, Baie-Comeau.

N'Dayegamiye, A. 2006. Mixed paper mill sludge effects on corn yield, nitrogen efficiency and soil properties. *Agron. J.* 98:1471-1478.

N'Dayegamiye, A., M. Giroux et R. Royer. 2004. Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières: coefficients d'efficacité et nitrates dans le sol. *Agrosol* 15:97-106.

N'Dayegamiye, A., S. Huard and Y. Thibault. 2003. Influence of paper mill sludges on corn yields and N recovery. *Can. J. Soil Sci.* 83:497-505.

N'Dayegamiye, A., and Tran, T.S. 2001. Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition. *Can. J. Soil Sci.* **81**: 371-382.

N'Dayegamiye, A., and S. Watt. 2000. Changes in soil organic matter and humic substances after paper mill sludges application to corn. *In Humic substances and organic matter in water, soil and sediments. IHSSS 10 Proceedings:* 1009-1013.

N'Dayegamiye, A., Royer, R., and P. Audesse. 1997a. Nitrogen-mineralization and availability in manure composts from Quebec biological farms. *Can. J. Soil Sci.* **77**: 345-350.

N'Dayegamiye, A., Goulet, M., et M.R. Laverdière. 1997b. Effet à long terme d'apports d'engrais minéraux et de fumier sur les teneurs en C et en N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. *Can. J. Soil Sci.* **77** : 351-358

Orlov, D.S. 1995. Humic substances of soils and general theory of humification. *Balchema, Rotherdam,* pp 235-286..

Piccolo, A., and J.S.C. Mbagwu. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **63**: 1801-1810.

Qualls, R.G. 2004. Biodegradability of humic substances and other fractions of decomposing leaf litter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**: 1705-1712.

SAS Institute, 2001. SAS for windows version 8.02. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Schnitzer, M., Lowe, L.E., Dormaar, J.F., and V. Martel. 1981. Chemical parameters for the characterization of soil organic matter. *Can. J. Soil Sci.* **61**: 517-519

Sequi, P., de Nobili, M., Leita, L., and G. Cercignani. 1986. A new index of humification. *Agrochimica* **30**: 175-179.

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.

Six, J. ,. Conant, R.T., Paul, E.A., and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* **241**: 155-176.

Stevenson, F.J. 1982. Humus chemistry : Genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons, Inc. New York. 443 p.

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 Monograph no 9. ASA, Madison, Wi.

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

Tran, T.S and R.R. Simard. 1993. Mehlich-3 extractable elements. In M.R. Carter (ed) *Soil sampling and methods of soil analysis*. (p. 43-50) Lewis, Boca Raton, FL.

Trépanier, L., J. Gallichand, J. Caron and G. Thériault. 1998. Environmental effects of deinking sludge application on soil and soil water quality. *Transactions ASAE* **41**: 1279-1287.

Vance, E.D., Brookes, P.C. and D.S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil organic microbial biomass carbon. *Soil Biol. Biochem.* **19**: 703-707.

Zibilske, L.M. 1997. Temperature effects on the decomposition of paper mill sludges in soil. *Soil Sci.* **162**:198-204.

Zibilske, L.M. 1987. Dynamics of nitrogen and carbon in soil during papermill sludge decomposition. *Soil Sci.* **143**:26-33.

