

# Influence de la nature des fertilisants apportés sur la dynamique de la structure et les teneurs en carbone et en substances humiques pour un loam argileux Sainte-Rosalie

\*A. N'DAYEGAMIYE<sup>1</sup> et A. DRAPEAU<sup>1</sup>

**RÉSUMÉ** - A. N'Dayegamiye et A. Drapeau. Influence de la nature des fertilisants apportés sur la dynamique de la structure et les teneurs en carbone et en substances humiques pour un loam argileux Sainte-Rosalie. *Agrosolutions* 20 (1) : 15-22. Cette étude de six ans (2001-2006) a évalué les effets des apports répétés d'engrais minéraux, de fumier solide de bovins (36 t/ha) et de boues mixtes de papetières (18, 36 et 54 t/ha) seuls ou complétés avec l'engrais minéral (60 % NPK) sur la dynamique de la structure du sol et sur les teneurs en carbone du sol et des substances humiques. L'étude a été réalisée sur une argile limoneuse de la série Sainte-Rosalie. La succession des cultures de rotation consistait en maïs grain-soya-orge-maïs grain-maïs grain et soya. Les apports de fumier et de boues mixtes ont été effectués en 2001, 2002, 2004 et 2005. En comparaison avec le témoin, les apports de boues mixtes de 2001 à 2006 ont accru de 14 à 36 % les teneurs en C du sol, selon les doses apportées, ces augmentations étant en moyenne de 10 % pour les engrais NPK et les fumiers. Les apports de fumier et de boues mixtes ont aussi accru les teneurs en C de la fraction non humifiée de la MO et des acides humiques. Les apports de boues mixtes de papetières ont accru d'environ 41 % les macro-agrégats supérieurs à 5 mm, de 15 % la somme des agrégats 0,25-5 mm et de 24 % le DMP des agrégats stables à l'eau, en comparaison avec le témoin et le traitement avec les engrais NPK. Les effets du fumier sur la formation de macro-agrégats et sur le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau ont été plus faibles en comparaison avec les boues mixtes. Les effets des boues mixtes sur les propriétés de sol étudiées (agrégats de sol, DMP et teneurs en C) ont été proportionnels aux doses appliquées. Les apports répétés de l'engrais minéral (NPK) ont accru les teneurs en C, mais ont par contre réduit les proportions de macro-agrégats > 5mm ainsi que le DMP des agrégats stables à l'eau, en comparaison avec le témoin. Cette étude montre que les apports réguliers de fumier et de boues mixtes ont rapidement amélioré la structure du sol et accru les teneurs en carbone du sol et des substances humiques, ces bénéfices ont cependant varié selon le type d'engrais organiques.

**Mots clés** : fumier, boues mixtes, engrais minéral, structure et carbone du sol et des substances humiques.

**ABSTRACT** - A. N'Dayegamiye and A. Drapeau. Effects of various fertilizers on the evolution of soil structure, organic carbon and humic substances contents in a Ste-Rosalie clay loam. *Agrosolutions* 20 (1): 15-22. This six-year study (2001-2006) evaluated the effects of repeated additions of mineral fertilizers, dairy cattle manure and mixed paper mill sludges on changes in soil structure, C and humic fractions in a Ste-Rosalie clay loam. The effects of paper mill sludges (18, 36 and 54 Mg ha<sup>-1</sup>) and dairy cattle manure (36 Mg ha<sup>-1</sup>), applied alone or with reduced mineral fertilizer (60% NPK), were compared to a complete NPK fertilizer (100 NPK) treatment and a control (0 NPK). The crop rotation used in these trials included corn-soybean-barley-corn-corn-soybean. Manure and paper mill sludges were applied in 2001, 2002, 2004 and 2005. Compared to the control, applications of paper mill sludges increased soil C content by 14 to 36%, depending on their application rates, and by 10% for mineral fertilizer and dairy cattle manure. Manure and paper mill sludges significantly increased the C content of nonhumic fractions of OM and of humic acids. Four years of paper mill sludges applications induced an increase of about 41% in the proportion of soil macroaggregates > 5 mm, a 15% of 0.25 mm-5 mm macroaggregates and a 24% increase in the mean weight diameter (MWD) of soil water-stable aggregates, in relation to the control and the mineral fertilizer (100% NPK). The effects of paper mill sludges on soil macroaggregates, MWD of aggregates and C contents were proportional to their rates of application. Manure effects on soil aggregates and MWD were less important than those observed for paper mill sludges. Annual mineral fertilizer applications during six years increased soil C content; however they reduced soil macroaggregates > 5 mm and the MWD of soil water-stable aggregates, compared to the control. Frequent additions of manure and paper mill sludges rapidly improved soil properties (soil structure and C content), however, the effect of manure was of less magnitude, compared to that of paper mill sludges. The benefits of these organic wastes on soil properties depended upon their composition.

**Key words**: dairy cattle manure, paper mill sludges, mineral fertilizer, soil structure, soil and humic substances. C contents.

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2700 rue Einstein, Québec (Québec), G1P 3W8, Canada.

\*Auteur pour la correspondance : téléphone : 418 64-6845, télécopieur : 418 286-3597, courriel : adrien.ndaye@irda.qc.ca .

## Introduction

Pour maintenir ou accroître la productivité des sols, il est nécessaire d'y apporter des fumiers ou d'autres sources organiques, car l'apport d'engrais minéral ne peut pas maintenir à long terme la productivité des sols (Layese et al., 2002; Alvarez, 2005; Nyiraneza et al., 2009). Toutefois, beaucoup de régions agricoles, principalement cultivées en maïs en Amérique du Nord, connaissent un déficit de fumier et les cultures de rotations comme le soya n'apportent pas suffisamment de résidus organiques pour maintenir la productivité des sols (Allmaras et al., 2000; Nyiraneza et al., 2009).

Plusieurs études ont mis en évidence des augmentations de rendements en maïs suivant des applications répétées de fumiers (N'Dayegamiye, 1986; Edmeades, 2004) et de boues mixtes de papetières (Simard, 2001; N'Dayegamiye, 2006). Ces effets ont été attribués aux additions d'éléments nutritifs au sol, mais aussi à l'amélioration des propriétés physiques du sol telles que la masse volumique apparente, la porosité et la stabilité structurale (N'Dayegamiye et al., 1997; N'Dayegamiye, 2006; Bipfubusa et al., 2008). Par conséquent, ces engrais organiques avaient créé dans les sols des conditions favorables pour la croissance des cultures.

Cependant, les effets des fumiers et des boues mixtes sur les changements des propriétés des sols peuvent varier en fonction de la composition de leur matière organique (proportions de fractions labiles et récalcitrantes) qui détermine leurs taux de décomposition dans les sols. Depuis les dernières années, les fumiers présentent de faibles taux de matière sèche et par conséquent de MO, ceci en raison des faibles quantités de litière de plus en plus apportées. Les boues mixtes de papetières, composées de courtes fibres de bois, contiennent de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine, comme composantes importantes. Elles ont des taux plus élevés en matière sèche et en matière organique, en comparaison avec les fumiers.

Les taux de décomposition des amendements organiques ayant des rapports C:N élevés (> 30:1) sont faibles en raison des teneurs en lignine (Melillo et al., 1989),

mais aussi à cause de la faible disponibilité de l'azote pour les micro-organismes du sol responsables de cette décomposition (Cheshire et Chapman, 1996). Zibliske (1997) a démontré que la décomposition de boues de papetières ayant entre 0,8 % et 3,3 % de N dépendait en partie de la composition de ces matériaux organiques et surtout de leur teneur en azote. Les matières organiques ayant une plus grande proportion de fractions labiles et de faibles rapports C/N présentent ainsi des taux plus élevés de décomposition en comparaison avec celles qui contiennent une plus grande quantité de fractions récalcitrantes, telle la lignine, (Melillo et al., 1989) et des rapports C/N élevés.

Les matières organiques qui ont des taux élevés de décomposition peuvent conduire à un faible enrichissement des sols en matière organique, contrairement à celles qui présentent de faibles taux de décomposition. Des études récentes ont en effet démontré que trois apports de boues mixtes désencrées ayant des rapports C/N supérieurs à 30 et des contenus élevés en lignine ont accru rapidement les teneurs en C du sol et des acides humiques (Bipfubusa et al., 2008)

L'influence des fumiers et des boues mixtes sur la structure des sols dépend elle aussi de la composition de ces matières organiques et de leur vitesse de décomposition dans les sols. Les matières organiques ayant des taux élevés de minéralisation stimulent une croissance élevée des micro-organismes du sol qui participent au processus d'agrégation par la libération de polysaccharides et aussi par les mucilages fongiques (Bipfubusa et al., 2008). Pour les matières organiques ayant une décomposition plus lente, l'effet sur la croissance et l'activité des micro-organismes, et sur l'agrégation du sol sera moindre (N'Dayegamiye et Angers, 1993) que pour les matières organiques contenant des quantités élevées de fractions organiques facilement minéralisables (N'Dayegamiye, 2006). Les matières organiques qui se minéralisent lentement agissent graduellement sur l'agrégation du sol au fur et à mesure qu'elles sont décomposées, se transformant alors en humus (N'Dayegamiye et Angers, 1993).

Les fumiers solides de bovins et les boues mixtes de papetières sont généralement riches en N (> 1,76 %) et ils ont des rapports C/N qui varient entre 12 et 30. Ils peuvent ainsi présenter une décomposition élevée dans les sols.

Les effets des apports de fumiers et de boues mixtes de papetières sur les propriétés des sols peuvent aussi varier selon les types des sols. Contrairement aux sols sableux, le carbone organique peut être physiquement inaccessible aux micro-organismes décomposeurs suite à ses liaisons chimiques ou physico-chimiques avec les particules minérales du sol telles que les surfaces des argiles (Hassink, 1997). Ce phénomène peut conduire à une plus grande et rapide accumulation de la MO dans les sols argileux. La formation d'agrégats et leur stabilité peuvent aussi être plus importantes dans les sols argileux. En effet, de toutes les particules minérales élémentaires, l'argile est 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).

Cette étude de six ans (2001-2006) a évalué les effets des apports répétés d'engrais minéraux, de fumiers solides de bovins et de boues mixtes de papetières sur les tailles et les proportions des agrégats du sol et les DMP des agrégats stables à l'eau, ainsi que sur les teneurs en carbone du sol et des substances humiques.

## Matériel et méthodes

Cette étude a été réalisée entre 2001 et 2006 sur une argile limoneuse de la série Sainte-Rosalie. Le pH initial des sols étudiés était de 6,8. Les teneurs en carbone organique étaient 4,2 % et celles d'azote de 0,21 %. La texture du sol était constituée de 47 % d'argile, 40 % de limon et 13 % de sable.

Trois doses de boues mixtes (18, 36 et 54 t/ha sur base humide) et une dose de fumier de bovins (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, et au témoin sans fumure minérale ou amendement organique. 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 établies selon les besoins des différentes cultures de rotation et les analyses de sol. Les quantités d'engrais azotés appliquées étaient respectivement de 170 kg N/ha et 90 kg N/ha pour le maïs-grain et l'orge et aucun apport d'engrais azotés pour la culture de soya. Pour toutes les cultures, les doses de phosphore et de potassium étaient respectivement de 60 kg  $P_2O_5$ /ha et de 100  $K_2O$ /ha.

Les boues mixtes utilisées ont été obtenues des unités de traitement biologique d'Abitibi Consolidated inc. situées dans la région de la Mauricie. Les fumiers étaient obtenus de la ferme agricole qui collaborait au projet. 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 ont été 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 NPK ou 60 % NPK ont été apportés à la volée avant les semis.

Les fumiers utilisés avaient en moyenne 29 % de matière sèche et contenaient sur base sèche 30 % C, et 0,19 % N et contenaient 6,6 g P, 9,4 g K, 15,8 g Ca et 5 g Mg/kg. Les boues mixtes de papetières avaient en moyenne 40,5 % de matière sèche, 41,8 % C, 3 % N et contenaient 4,4 g P, 0,9 K, 26 g Ca et 0,4 g Mg/kg.

Des échantillons de sol ont été prélevés au début de l'essai (2001) pour caractériser le sol étudié. Le pH du sol a été déterminé selon le rapport 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).

D'autres échantillons de sols ont été prélevés en 2006 afin de mesurer la masse volumique apparente, la répartition des agrégats et le DMP des agrégats stables à l'eau, ainsi que les teneurs en C du sol et des substances humiques. 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, 2, 1 et 0,25 mm. Les agrégats récupérés sur chaque tamis ont ensuite été 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 selon la présence des sables (Elliott, 1986). Le DMP des agrégats stables à l'eau était calculé selon la formule suivante :

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

où  $X_i$  est le poids du sol restant sur le tamis de taille donnée,  $P_i$  le poids du sol corrigé selon la présence 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 0,1 M et  $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$  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<sup>3</sup> de résine polyvinylpyrrolidone insoluble (insoluble PVP, Aldrich, Germany) lavés avec une solution de NaOH 0,5M et équilibrés dans une solution de  $H_2SO_4$  0,01 N (Sesqui et al., 1986; N'Dayegamiye et al., 1997a). La fraction non humifiée (FNH) n'était pas retenue par la résine et elle était lavée avec une solution de  $H_2SO_4$  0,01 N. La fraction AF était adsorbée à la résine et elle était récupérée 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 : soit l'indice d'humification = C-FNH/(C-AH+C-AF) (Sequi et al., 1986) et l'indice de polymérisation = C-AH/C-AF (Orlov, 1995).

## Analyses statistiques

Les résultats obtenus pour chacune des variables dépendantes ont été analysés en utilisant un modèle qui comprend 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 SAS (SAS Institute Inc., 2001). Les analyses de contrastes ont été effectuées afin de déterminer les différences entre les traitements.

## Résultats et discussion

### Teneurs en C du sol et des substances humiques

En agriculture intensive, les principales cultures de rotation n'apportent pas suffisamment de résidus organiques pour combler les déficits en matière organique dans les sols agricoles et ainsi maintenir ou accroître la productivité des sols (Allmaras,

2000; Nyiraneza et al., 2009). Les résultats obtenus dans cette présente étude montrent que les apports répétés de boues mixtes ont conduit à un enrichissement significatif du sol étudié en C, qui était proportionnel aux doses appliquées (Tableau 1). Quatre apports de boues mixtes ont augmenté de 14 à 36 % la teneur du sol en C selon les doses, par rapport au témoin. Cette augmentation était en moyenne de 10 % pour les fumiers et les engrais minéraux NPK.

Les données obtenues sur les différentes fractions de la MO des sols sont indiquées au tableau 1. Les apports de fumier et de boues mixtes 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 le traitement avec les engrais NPK.

Les résultats obtenus montrent un enrichissement rapide et important en MO dans l'argile limoneuse Sainte-Rosalie. Cet enrichissement 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 augmentaient plus rapidement avec la teneur en argile et limon dans les sols. Le C organique du sol est aussi mieux protégé contre une décomposition rapide par les micro-organismes dans les sols riches en argiles de type 2:1 que dans les sols de type 1:1 (Ladd et al., 1993). Des études effectuées dans un autre type de sol argileux ont également indiqué que des apports réguliers de fumiers solides de bovins (Angers et N'Dayegamiye, 1991; N'Dayegamiye et al., 1997b; Aoyama et al., 1999) ou deux incorporations d'engrais verts (N'Dayegamiye et Tran, 2001) avaient augmenté les teneurs en C organique du sol.

Par ailleurs, les données obtenues indiquent que l'augmentation de C était plus importante avec les boues mixtes de papetières qu'avec les fumiers, ce qui suggère que les faibles taux d'accumulation de C dans les sols ayant reçu les fumiers seraient reliés à leurs faibles quantités en matière sèche et en matière organique, en comparaison avec les boues mixtes de papetières.

Les résultats présentés au tableau 1 indiquent également que les applications répétées de fumier et de boues mixtes ont

significativement accru les teneurs en C de la fraction non humique (FNH) et des AH dans l'argile limoneuse Sainte-Rosalie (Tableau 1). Le contenu en C de la FNH variait entre 3,0 et 4,5 g C/kg dans ce sol (Tableau 1). Cette fraction représentait en moyenne 10 à 12 % du C organique du sol. Les apports de boues mixtes de papetières (18 à 54 t/ha) ont produit des augmentations variant entre 13 et 50 % de la teneur en C-FNH, en comparaison avec le témoin, ces augmentations étant proportionnelles aux doses apportées. Les augmentations de la teneur en C de la FNH suite aux apports de fumier étaient identiques à celles obtenues avec les boues mixtes. En comparaison avec les fumiers et les boues mixtes, les applications d'engrais minéraux NPK ont augmenté la teneur en C-FNH de seulement 6 %. Cette action positive du fumier et des boues mixtes sur la fraction non humique de la MO est probablement attribuable à leur teneur élevée en C facilement dégradable qui a favorisé la croissance microbienne du sol. En effet, les matières organiques non humifiées sont en

partie des composés végétaux modifiés par les micro-organismes, des corps microbiens ou des composés nouvellement synthétisés par les micro-organismes (acides aminés libres, peptides, protéines) (Stevenson, 1982; Gigliotti et al., 2001).

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). Dans le type de sol étudié, les teneurs en C des acides humiques (AH) du sol représentaient 15 % à 24 % du C du sol, tandis que le C des acides fulviques (AF) constituait 7 % à 13,7 % (Tableau 1). 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 (Watanabe et al., 2001; Doane et al., 2003). Les faibles teneurs en C des acides fulviques du sol sont attribuables au fait que les acides fulviques

**Tableau 1. Effets d'apports de boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et de l'engrais minéral (NPK) sur la teneur en C total et des substances humiques de l'argile limoneuse Sainte-Rosalie (2006).**

Traitements	C total	C-FNH§	C-AH§	C-AF§	C-FNH/C-AF+C-AH	C-AF/C-AH
Témoin	25,0	3,0	3,9	1,8	0,53	2,1
FM-NPK	28,0	3,2	4,1	2,1	0,51	2,0
BMP-18 Mg ha <sup>-1</sup>	28,5	3,4	4,3	2,7	0,55	1,6
BMP-36 Mg ha <sup>-1</sup>	30,0	3,8	5,4	2,3	0,50	1,9
BMP-54 Mg ha <sup>-1</sup>	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-36 Mg ha <sup>-1</sup>	27,7	3,4	4,3	2,8	0,42	1,5
FSB-36 + FMR	27,4	3,9	5,1	3,2	0,39	1,6
ANOVA-valeur de F						
Traitements	4,98**	8,43**	3,61*	1,17	1,64	1,98
Contrastes						
Témoin vs autres	9,38**	8,50**	3,82*	2,88	2,44	2,38
NPK vs BMP & FSB	4,33*	5,18*	2,62	0,42	0,90	1,33
36 Mg ha <sup>-1</sup> BMP vs 36 Mg ha <sup>-1</sup> BMP + FMR	0,84	3,23	0,06	0,51	0,45	0,84
36 Mg ha <sup>-1</sup> FSB vs 36 Mg ha <sup>-1</sup> FSB + RMF	0,01	16,59**	1,47	0,00	0,79	0,01
36 Mg ha <sup>-1</sup> BMP vs 36 Mg ha <sup>-1</sup> FSB	3,42*	2,33	2,20	0,65	0,17	1,42
BMP linéaire	6,86**	6,49*	2,17	0,23	2,50	0,86

\*, \*\*: significatif à P < 0,05 et P < 0,01, respectivement.

††FM: dose complète de l'engrais minéral (NPK) recommandée pour chaque culture de la rotation.

‡FMR: dose réduite de l'engrais minéral (60 % NPK).

§FNH, AH, AF: fraction non humique, acides humiques et acides fulviques des substances humiques du sol.

FNH/AF = AH = indice d'humification; AF/AH = indice de polymérisation.

se minéralisent deux fois plus rapidement que les acides humiques (Qualls, 2004).

Les apports de fumier et de boues mixtes de papetières ont significativement augmenté les teneurs en C des acides humiques, en comparaison avec le témoin, contrairement au traitement avec les engrais NPK. Les faibles augmentations des teneurs en C du sol entier et des fractions de la MO (FNH et AH) observées dans les sols ayant reçu les engrais NPK 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 fumiers et des boues mixtes de papetières.

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 0,5 dans l'argile limoneuse (Tableau 1), ce qui indique que l'humification de la matière organique incorporée n'était pas très élevée dans ce type de sol.

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 supérieur à 2 signifie que les substances humiques sont sous forme d'humates, et sous forme de fulvates si ce rapport est inférieur à 2. Dans cette étude, le rapport C-AH/C-AF a varié entre 1,5 et 2,6, ce qui suggère que les substances humiques de ce sol étaient constituées de plus d'humates que de fulvates. Les apports d'engrais organiques ou minéraux n'ont pas influencé les deux indices d'humification étudiés par rapport au témoin (Tableau 1).

### Propriétés physiques du sol

En enrichissant les sols en matière organique, les apports de fumier et de

boues mixtes peuvent positivement modifier la structure des sols. Les effets de quatre apports de fumier et de boues mixtes de papetières sur la répartition des agrégats et le DMP des agrégats stables à l'eau ont été mesurés à l'automne 2006 (Tableau 2). Les résultats indiquent une augmentation des proportions de différents macro-agrégats (> 5 mm; 0,25-5 mm) et du DMP des agrégats stables à l'eau suite aux apports répétés de fumier et de boues mixtes de papetières. Quatre apports de boues mixtes ont accru d'environ 41 % les proportions de macro-agrégats > 5 mm, de 15 % la somme de macro-agrégats 0,25-5 mm et de 24 % le DMP des agrégats stables à l'eau, en comparaison avec le témoin et les sols ayant reçu les engrais minéraux NPK (Tableau 2). Les effets des fumiers ont aussi accru les proportions des macro-agrégats et le DMP, bien que les augmentations aient été plus faibles en comparaison avec les boues mixtes. Comme pour les teneurs en C, ces faibles effets des fumiers sur l'agrégation seraient attribuables aux faibles teneurs en matière sèche et en matière organique des fumiers par rapport aux boues mixtes. En effet, 4 applications de fumiers (36 t/ha) ont apporté 12,1 t/ha de MO, tandis que la même dose de boues mixtes a fourni 28,4 t/ha de MO.

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 boues mixtes de papetières au sol (Nemati et al., 2000; Gagnon et al., 2001; Bipfubusa et al., 2005, 2008; N'Dayegamiye, 2006) et de fumier (Nyiraneza et al., 2009). Ces résultats démontrent que les effets sur l'agrégation des sols dépendent 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 microbienne dans les sols. Le potentiel des engrais organiques à favoriser l'agrégation du sol est en relation avec leur taux de décomposition par les micro-organismes et, par conséquent, à leur capacité à stimuler la microflore et à produire des substances transitoires qui favorisent l'agrégation (polysaccharides, hyphes fongiques). En effet, dans cette même étude, N'Dayegamiye (2009) indique que les

**Tableau 2. Effets d'apports de boues mixtes de papetières (BMP), de fumier solide de bovins (FSB) et de l'engrais minéral (NPK) sur les proportions des agrégats et le DMP des agrégats stables à l'eau dans une argile limoneuse Sainte-Rosalie (2006).**

Traitements	>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0,25 mm	$\Sigma > 0,25$ mm	DMP $\S$
	%					mm
Témoin	34,17	18,63	2,57	2,82	58,19	2,98
FM-NPK	32,07	21,83	3,06	2,70	59,66	2,91
BMP-18 Mg ha <sup>-1</sup>	44,40	17,23	2,00	2,41	66,04	3,53
BMP-36 Mg ha <sup>-1</sup>	49,00	14,20	1,91	2,01	67,12	3,72
BMP-54 Mg ha <sup>-1</sup>	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-36 Mg ha <sup>-1</sup>	45,30	16,23	2,32	2,38	66,23	3,43
FSB-36+FMR	42,43	17,03	2,31	2,76	64,53	3,56
ANOVA – valeur de F						
Traitements	3,01*	1,31	0,81	0,33	3,67*	4,10**
Contrastes						
Témoin vs autres	3,11*	0,34	0,09	0,72	3,23*	0,47
NPK vs BMP & FSB	9,74**	4,77*	1,52	0,48	3,45*	9,30**
36 Mg ha <sup>-1</sup> BMP vs 36 Mg ha <sup>-1</sup> BMP + FMR	0,42	0,36	0,09	0,33	2,19	0,28
36 Mg ha <sup>-1</sup> FSB vs 36 Mg ha <sup>-1</sup> FSB + RMF	4,30*	0,06	0,00	0,36	3,64*	6,46**
36 Mg ha <sup>-1</sup> BMP vs 36 Mg ha <sup>-1</sup> FSB	1,18	0,41	0,24	0,35	2,74*	1,21
BMP linéaire	0,71	0,01	0,85	0,17	1,95	1,38

\*, \*\*: significatif à P < 0,05 et P < 0,01, respectivement.

†FM: dose complète de l'engrais minéral (NPK) recommandée pour chaque culture de la rotation.

‡FMR: dose réduite de l'engrais minéral (60 % NPK).

§DMP: diamètre moyen pondéré des agrégats stables à l'eau.

apports de fumier et de boues mixtes ont significativement accru les activités biologiques et les taux de minéralisation d'azote.

En apportant de la matière organique labile, les fumiers et les boues mixtes ont ainsi favorisé les processus d'agrégation du sol étudié. 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 colloïdes du sol (particules d'argile, de limon et de sable) entre eux et contribuent ainsi à l'agrégation du sol et à la stabilité de la structure. 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 comme les fumiers (N'Dayegamiye et al., 1997 b; Aoyama et al., 1999), les boues de désencrage (Chantigny et al., 1999), ou l'incorporation des engrais verts (Abdallahi et N'Dayegamiye, 2000) favorisent le processus de formation d'agrégats et de la stabilisation de la structure.

Les résultats obtenus ont aussi démontré que les phénomènes d'agrégation du sol étaient très importants dans l'argile limoneuse Sainte-Rosalie. Dans les sols argileux, l'agrégation ne dépend pas uniquement de la matière organique, mais également des oxydes et hydroxydes de  $Fe^{++}$  et  $Al^{+++}$  qui agissent sur l'agrégation en établissant des ponts entre les argiles et les polymères organiques (Golchin et al., 1994).

De toutes les particules minérales élémentaires, l'argile est ainsi 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 (N'Dayegamiye, 2009). 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 a accru les teneurs en C du sol, mais a par contre diminué les macro-agrégats stables > 5 mm du sol, ainsi que le DMP des agrégats stables à l'eau. 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 (Layese et al., 2002; Alvarez, 2005; Nyiraneza et al., 2009).

Les apports de fumier et de boues mixtes ont amélioré la structure du sol, diminué la densité du sol, bien que pas de façon significative au seuil de  $p < 0,05$  (données non présentées), et accru les activités biologiques des sols (N'Dayegamiye, 2009), 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. En effet, à l'exception de la première année d'application, les apports répétés de fumier et de boues mixtes, même sans complément d'engrais NPK, ont accru les rendements du maïs grain; ces augmentations étant similaires à celles de l'engrais minéral NPK (N'Dayegamiye, 2009).

## Conclusion

Dans une rotation de maïs-soya et orge, quatre apports de fumiers et de boues mixtes de papetières en 6 ans ont accru les teneurs en C du sol et des fractions de la MO (FNH et AH). De même, ils ont accru les tailles et les proportions de macro-agrégats du sol (> 5 mm; 0,25-5 mm) ainsi que le DMP des agrégats stables à l'eau. À cause des faibles quantités de MO contenues dans les

fumiers utilisés, les effets de ces derniers sur la structure du sol et les bilans de la MO ont été plus faibles en comparaison avec les boues mixtes de papetières. Cette étude a démontré que les bénéfices importants des apports de fumier et de boues mixtes de papetières sur l'agrégation et la stabilité de la structure étaient liés à leur teneur élevée en N et à leurs faibles rapports C/N qui ont stimulé la croissance et les activités des micro-organismes responsables de l'agrégation des sols. De même, ces effets étaient rapides et importants à cause du type de sol étudié qui présentait des teneurs élevées en argile. Dans les sols ayant de faibles teneurs en argile, des apports à long terme de fumiers et de boues mixtes seraient nécessaires pour maintenir une structure stable des sols, ainsi qu'un bilan positif en matière organique.

## 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.
- Allison, L. E., W. B. Bollen and C. D. Moodie. 1965. Total carbon. In C. A. Black et al. (Eds) *Methods of soil analysis*. Agronomy Monograph No 9, p. 1346-1365. ASA, SSSA, Madison, WI.
- Allmaras, R. R., H. H. Schomberg, C. L. Douglas Jr. and T. H. Dao. 2000. Soil organic carbon sequestration potential of adopting conservation tillage in U.S. croplands. *J. Soil Water Conserv.* 55: 365-373.
- Alvarez, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management.* 21: 38-52.
- Angers, D. A. and A. N'Dayegamiye. 1991. Effects of manure applications on C, N and carbohydrate contents of a silt loam and its particle-size fractions. *Biol. Fertil. Soils* 11: 79-82.

- Aoyama, M., D. A. Angers, A. N'Dayegamiye 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.
- Biederbeck, V. O., C. A. Campbell 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., 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.
- Bipfubusa, M., D. A. 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.
- Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Total nitrogen. In A.L. Page et al. (Eds.). *Methods of soil analysis*. 2nd ed. Agronomy Monogr, p. 595-622. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 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 <sup>14</sup>C-labelled ryegrass in soil. *Biol. Fertil. Soils* 21:166-170.
- 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. 1999. Aggregation and organic matter decomposition in soils amended with de-inking paper sludge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1214-1221.
- Dinel, H., M. Schnitzer and G. R. Mehyus. 1989. Soil lipids: origin, nature, contents, decomposition and their effect on soil physical properties. In Stotzky, G. and Bollag, J.M. (eds). *Soil Biochemistry*. Vol. 6: 397-429.
- Doane, T. A., O. C. Devêvre and W. R. Horwath. 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., D. A. Angers, M. R. Laverdière et 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.
- 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.
- Golchin, A., J. M. Oades, J. O. Skjemstad and P. Clarke. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* 32: 1043-1068.
- Gigliotti, G., P. L. Giusquiani, and D. Businelli. 2001. A long-term chemical and infrared spectroscopy study on a soil amended with municipal sewage sludge. *Agronomie* 21: 169-178.
- 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.
- 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.
- Kemper, W. O. and R. C. Roseneau. 1986. Aggregate stability. In C.A. Black et al., (Ed). *Methods of soil analysis*. Agronomy No. 9, Part. 1, p. 511-519. ASA Inc., Madison, WI.399-407.
- Ladd, J. N., R. C. Foster and J. O. Skjemstad. 1993. Soil structure: carbon and nitrogen metabolism. *Geoderma* 56: 401-436.
- Layese, M. F., C. E. Clapp, R. R. Allmaras, R. Linden, S. M. Copeland, J. A. E. Molina and R. H. Dowdy. 2002. Current and relic carbon using natural abundance carbon-13. *Soil Sci.* 167: 315-326.
- 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*. Vol. 3. p. 71-94.
- 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.
- N'Dayegamiye, A. 1986. 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. and D. A. Angers. 1993. Organic matter characteristics and water-stable aggregation of a sandy soil after 9 years of wood-residue applications. *Can. J. Soil Sci.* 73: 115-122.
- N'Dayegamiye, A., R. Royer 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., M. Goulet 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.

- 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. and T. S. Tran. 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. 2006. Mixed paper mill sludge effects on corn yield, nitrogen efficiency and soil properties. *Agron. J.* 98:1471-1478.
- N'Dayegamiye, A. 2009. Soil properties and crop yields in response to mixed paper mill sludges, dairy cattle manure and inorganic fertilizer application. *Agronomy Journal*. (sous presse).
- Nemati, M. R., J. Caron and J. Gallichand. 2000. Using paper de-inking sludge to maintain soil structural form: field measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:275-285.
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 961-1010. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI*
- Nyiraneza, J., M. H. Chantigny, A. N'Dayegamiye and M. R. Laverdière. 2009. Dairy cattle manure improves soil productivity in low residue rotation systems. *Agronomy Journal*, 101 : 207-214.
- Orlov, D. S. 1995. Humic substances of soils and general theory of humification. *Balchema, Rotherdam*, p. 235-286.
- SAS Institute. 2001. SAS for windows version 8.02. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Schnitzer, M., L. E. Lowe, J. F. Dormaar and V. Martel. 1981. Chemical parameters for the characterization of soil organic matter. *Can. J. Soil Sci.* 61: 517-519.
- Sequi, P., M. de Nobili, L. Leita 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., R. T. Conant, E. A. Paul 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.
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Watanabe, A., S. J. Rumbanraja, K. Tsutsuki and M. Kimura. 2001. Humus composition of soils under forest, coffee and arable cultivation in hilly areas of south Sumatra, Indonesia. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 599-606.
- Zibliske, L. M. 1997. Temperature effects on the decomposition of paper mill sludges in soil. *Soil Sci.* 162:198-204.