

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

M. Bipfubusa¹, A. N'Dayegamiye^{2,3}, et H. Antoun¹

¹Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Pavillon Charles-Eugène Marchand, Québec, Canada G1K 7P4; et ²Institut de recherche et développement en agroenvironnement, 2700 Einstein, Sainte-Foy, Québec, Canada G1P 3W8. Reçu le 28 juli 2003, accepté le 1 novembre 2004.

Bipfubusa, M., N'Dayegamiye, A. et Antoun, H. 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. L'agrégation du sol peut dépendre des caractéristiques physiques et chimiques des matières organiques incorporées. L'objectif de cette étude était de définir les effets des boues mixtes de papetières fraîches (BF) et compostées (BC), et la fréquence de leurs applications sur les proportions de macro-agrégats stables à l'eau, le diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP), ainsi que sur l'inclusion et la minéralisation du C dans différentes fractions d'agrégats. Le dispositif expérimental établi sur un loam limoneux de la série Le Bras (Gleysol Humique) était constitué de parcelles subdivisées ayant six traitements en parcelles principales, et deux fréquences d'application (annuelle et biennale) de BF, de BC et de l'engrais N en parcelles secondaires. Des applications de 40 t ha⁻¹ sur base humide de BF et de BC, appliquées seules ou complétées avec 120 kg N ha⁻¹ sous forme minérale, ont été comparées au témoin et à la fertilisation minérale N (160 kg ha⁻¹) recommandée pour la culture de maïs-ensilage (*Zea mays* L.). Les proportions de macro-agrégats du sol stables à l'eau ont été déterminées par tamisage humide sur une série de tamis de 5 mm, 2 mm, 1 mm et 0,25 mm. Par la suite, la teneur et la minéralisation du C organique ont été déterminées sur le sol entier et sur les fractions d'agrégats > 5 mm, 2–5 mm et 0,25–2 mm. En comparaison avec le traitement témoin et la fertilisation minérale N, les apports de BF et de BC ont augmenté, de façon significative, la proportion des macro-agrégats > 5 mm, le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau, ainsi que les teneurs de C organique dans les différents agrégats. Cependant, nous avons mesuré une diminution significative des macro-agrégats > 5 mm et du DMP, lorsque les BF étaient combinées avec une fertilisation azotée, suggérant une minéralisation rapide des agents liants. Par contre, l'apport de l'engrais azoté en supplément aux BC n'a pas diminué les macro-agrégats > 5 mm et le DMP, probablement à cause des agents liants qui étaient des substances humiques relativement résistantes à la dégradation microbienne. Le taux de minéralisation du C (CO₂) était en moyenne plus élevé dans toutes les classes d'agrégats pour les sols ayant reçu les BF, en comparaison avec les BC. Ces résultats suggèrent que les BF contiennent du C plus rapidement minéralisable que les BC. Il ressort que des apports plus fréquents de BF pourraient donc être nécessaires, afin de soutenir une agrégation stable du sol.

Mots clés: Boues mixtes fraîches, composts de boues mixtes, macro-agrégats stables à l'eau, stabilité structurale, teneurs et taux de minéralisation du C

Bipfubusa, M., N'Dayegamiye, A. and Antoun, H. 2005. **Effects of fresh paper mill sludges and their composts on soil macro-aggregates.** Can. J. Soil Sci. **85**: 47–55. Soil aggregation is influenced by physical and chemical properties of organic materials applied to the soil. The objective of this study was to evaluate the effects of fresh paper mill sludges and their composts, and their application frequency on soil aggregation, mean weight diameter of aggregates (MWD) and on the C content and C mineralization from water-stable aggregates. The experiment was established on a Le Bras silt loam (Humic Gleysol) under silage corn (*Zea mays* L.) production, and was designed as a split-plot experiment with six treatments in the main plots that were applied at two frequencies (annual and biennial) in the sub-plots. Paper mill sludges and their composts were applied at 40 t ha⁻¹ on a wet basis, alone or completed with 120 kg N ha⁻¹. Those treatments were compared to mineral N fertilization (160 kg ha⁻¹) recommended for silage corn, and the control. Soil aggregation was assessed by wet soil sieving on a nest of 5-mm, 2-mm, 1-mm and 0.25-mm sieves. Soil C contents and mineralization were determined on whole soil and on > 5 mm, 2–5 mm and 0.25–2 mm aggregate classes. Fresh and composted paper mill sludges significantly ($P < 0.05$) increased the proportion of water-stable aggregates > 5 mm, the MWD of aggregates and the C content of aggregate fractions, compared to the control and the mineral N fertilizer treatment. However, the abundance of > 5 mm aggregates and the MWD of aggregates were significantly decreased when fresh paper mill sludges were combined with mineral N fertilizer, suggesting a fast mineralization of binding agents. In contrast, N fertilizer application has not reduced soil macro-aggregates >5 mm and the MWD of aggregates in paper mill compost treatments, probably due to resilience to degradation of humic substances brought by the composts. On average, carbon mineralization was highest in all aggregates in soils with paper mill sludges, than for their composts, which suggests that paper mill sludge C was more labile than compost C. Therefore, more frequent fresh paper mill sludge applications would be necessary for a sustainable effect on soil aggregation.

Key words: Fresh paper mill sludges, paper mill compost, water-stable aggregates, C contents and mineralization rates

³Auteur correspondant: adrien.ndaye@irda.qc.ca.

De quantités importantes de boues mixtes de papetières, fraîches ou compostées, sont de plus en plus valorisées au Québec, principalement à cause de leur richesse en éléments nutritifs majeurs et mineurs. Leurs applications ont accru les rendements de maïs-grain, de pomme de terre et des cultures maraîchères (Simard 2000; N'Dayegamiye et al. 2003). Cependant, les boues mixtes ou leurs composts peuvent aussi améliorer la structure des sols et ainsi augmenter la productivité des sols.

En améliorant la structure du sol, les matières organiques enfouies permettent ainsi une aération et des régimes hydrique et thermique du sol favorables à la croissance et aux rendements des cultures. Il a été démontré que des apports réguliers de fumiers solides de bovins augmentaient la proportion d'agrégats stables à l'eau (Aoyama et al. 1999), les activités biologiques, les populations de vers de terre associés à l'agrégation (Estevez et al. 1996) et les rendements de maïs et de blé (N'Dayegamiye 1996).

L'influence des boues mixtes de papetières et de leurs composts sur l'agrégation des sols est encore peu connue, et celle-ci peut dépendre de leurs caractéristiques physico-chimiques. Les effets des matières organiques sur l'agrégation et la stabilité des agrégats du sol dépendent à la fois de leur quantité et de leur qualité (Martin 1942; Dormaar 1983; Lafond et al. 1994). La qualité des amendements organiques est reliée à leurs teneurs en C facilement minéralisable et en éléments nutritifs, à la taille de leurs particules ainsi qu'à leur composition biochimique (rapport C/N, %cellulose, %hémicellulose et %lignine), qui influencent leur vitesse de décomposition (Hadas et al. 1998; Abdallahi et N'Dayegamiye 2000). Abdallahi et N'Dayegamiye (2000) ont observé un effet bénéfique de cinq engrais verts sur l'augmentation des agrégats > 0,25 mm. Par contre, les apports répétés de copeaux de bois qui contenaient des particules grossières, des rapports C/N élevés (> 120) et de la lignine, ont eu peu d'influence sur la stabilité des agrégats, peut-être à cause de leur faible taux de décomposition (N'Dayegamiye et Angers 1990).

La dynamique de la matière organique détermine également l'agrégation du sol (Tisdall et Oades 1982). Selon ces auteurs, les particules minérales primaires sont reliées entre elles par des substances organiques pour former des microagrégats (< 0,25 mm) qui, à leur tour, forment des macroagrégats (> 0,25 mm). Cependant, la cohésion des macroagrégats peut être temporaire parce qu'elle est assurée par des polysaccharides, des hyphes fongiques et des racines fines qui sont facilement minéralisables (Tisdall et Oades 1982). Par contre, des recherches ont démontré que les substances humiques pouvaient augmenter la stabilité des macroagrégats (Chaney et Swift 1986; Fortun et al. 1989; Piccolo et Mbagwu 1999). En effet, certaines études ont mis en évidence une corrélation positive de la proportion des agrégats stables du sol avec la teneur en précurseurs des acides humiques, en l'occurrence les polyphénols des résidus végétaux (Monreal et al. 1995) ou la teneur en acides phénoliques du sol (Martens 2000).

Les boues mixtes de papetières fraîches présentent de faibles rapports C/N variant entre 15 et 30 (N'Dayegamiye et al. 2003) et elles sont riches en cellulose et hémicellulose

(N'Dayegamiye et Watt 2000). Celles-ci peuvent donc stimuler les activités biologiques et favoriser ainsi les processus d'agrégation du sol, tel que cela a été observé pour cinq types d'engrais verts de composition similaire aux boues mixtes (Abdallahi et N'Dayegamiye 2000). Leurs effets sur la structure pourraient donc s'estomper rapidement suite à l'épuisement du C facilement minéralisable. Par contre, les composts de boues mixtes sont riches en substances humiques et leurs effets positifs sur la structure du sol pourraient durer plus longtemps que ceux des boues mixtes fraîches.

Cette étude avait comme objectif de définir les effets des apports de boues mixtes de papetières, fraîches ou compostées, et de leur fréquence d'application (annuelle ou biennale) sur l'agrégation du sol, et sur l'incorporation et la minéralisation du C dans le sol entier et dans les agrégats du sol.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette étude a été effectuée sur un loam limoneux de la série Le Bras située à la station de recherche de l'Institut de Recherche et de Développement en Agro-environnement (IRDA), établie à Saint-Lambert-de-Lauzon (Québec, 46°34'N, 71°13'W). Le pH initial du sol était de 6,2 et les teneurs en matière organique et en N total étaient respectivement de 28 g kg⁻¹ et 1,4 g kg⁻¹. Les contenus du sol en P, K, Ca et Mg étaient respectivement de 50, 103, 1195 et 98 mg kg⁻¹. La texture du sol était constituée de 200 g kg⁻¹ d'argile, 470 g kg⁻¹ de limon et 330 g kg⁻¹ de sable.

L'essai a débuté au printemps 2000 et le dispositif expérimental était constitué de blocs aléatoires complets en quatre répétitions. Des applications de 40 t ha⁻¹ sur base humide de boues mixtes fraîches et de leurs composts, seuls ou combinés avec une fertilisation minérale N réduite (120 kg ha⁻¹), ont été comparés au témoin et à la fertilisation minérale N (160 kg ha⁻¹) recommandée pour le maïs-ensilage (*Zea mays* L.). L'unité expérimentale avait des dimensions de 6 m x 10 m et comportait 8 rangées de 0,75 m de largeur sur 10 m de longueur.

À partir de la deuxième année, les unités expérimentales comportant les six traitements ont été subdivisées en deux sous-parcelles de 3 m x 10 m chacune, afin d'étudier les fréquences d'application (annuelle et biennale) de BF, de BC et de l'engrais minéral N. L'essai était ainsi disposé selon un plan subdivisé (split-plot) (Steel et Torrie 1980) en quatre répétitions, avec les six traitements en parcelles principales et les deux fréquences des applications en sous-parcelles.

Les boues mixtes fraîches utilisées ont été obtenues de l'unité de traitement biologique de la papetière Stadacona, située dans la ville de Québec. 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 boues mixtes sont donc constituées de boues primaires et secondaires, souvent dans un rapport 60 :40. Les composts utilisés ont été produits par Les

Composts du Québec inc. à partir de ces mêmes boues mixtes auxquelles des écorces sont ajoutées dans de faibles proportions (5%). Pour leur compostage, les boues mixtes sont disposées en andains et retournées périodiquement pendant 6 mois.

Les boues mixtes fraîches et leurs composts avaient des teneurs en matière sèche respectivement de 280 à 400 g kg⁻¹; les valeurs de pH étaient de 7,4 et 6,8 et ils étaient riches en matière organique (Tableau 1). Les boues mixtes fraîches présentaient un rapport C/N de 25, ce qui indique que cette matière organique peut se décomposer plus rapidement que les composts (C/N = 32). Ces matières organiques contenaient de quantités importantes de N, P, Ca et Mg valorisables par la culture.

Les boues mixtes fraîches et leurs composts ont été pesés, et ensuite épandus manuellement au sol. L'incorporation de ces matières organiques et des engrais minéraux a été effectuée avec une herse à dents de type vibro, à une profondeur de 0–15 cm. Les engrais P₂O₅ (60 kg ha⁻¹) et K₂O (100 kg ha⁻¹) ont été appliqués dans toutes les parcelles afin de combler les besoins du maïs-ensilage (*Zea mays* L.) en ces éléments nutritifs. Les doses d'engrais N ont été apportées selon les traitements étudiés.

Après deux saisons de végétation, soit à la récolte du maïs-ensilage en octobre 2001, des échantillons de sols ont été prélevés à la profondeur de 0–20 cm afin d'analyser la proportion des macro-agrégats du sol, le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau, ainsi que l'inclusion et le taux de minéralisation du C dans les macro-agrégats. Les échantillons humides ont été tamisés à 8 mm et gardés au froid à 4°C jusqu'à l'analyse.

Méthodologie analytique

La répartition et le DMP des agrégats stables à l'eau ont été déterminés par tamisage humide d'un échantillon de sol frais déposé sur une série de 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 selon la présence des sables (Elliott 1986). Le DMP des agrégats stables à l'eau était calculé selon la formule suivante :

$$\text{DMP} = (\sum X_i S_i / W)$$

où X_i est le poids du sol restant sur le tamis de taille donnée, S_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).

Les échantillons du sol entier et des différentes fractions d'agrégats > 5 mm, 2–5 mm et <0,25–2 mm ont été séchés à la température de laboratoire pendant 72 h et ensuite broyés à un tamis de 0,25-mm. L'analyse de la teneur en C organique du sol entier et des fractions d'agrégats a été effectuée par oxydation humide (Allison et al. 1965).

La minéralisation du C du sol entier et des différentes fractions d'agrégats a été déterminée en incubation de 20 jours à 25°C. Trente grammes de l'échantillon de sol ont été

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques des boues mixtes de papetières et de leurs composts

Propriétés	Boues mixtes de papetières	Composts
Matière sèche (g kg ⁻¹)	280	400
pH (H ₂ O 1:1)	7,4	6,8
Matière organique (g kg ⁻¹)	668	562
Carbone organique (g kg ⁻¹)	334	281
N total (g kg ⁻¹)	11,3	7,6
Rapport C/N	25	32
P total (g kg ⁻¹)	1,15	1,15
K total (g kg ⁻¹)	0,65	0,99
Ca total (g kg ⁻¹)	30,8	23,6
Mg total (g kg ⁻¹)	0,71	1,64

déposés dans un contenant de 100 g, en présence d'un flacon contenant 10 mL d'une solution de NaOH 1,0 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).

Analyses statistiques

Les données obtenues ont été soumises à l'analyse de variance selon un dispositif en plan subdivisé en tiroirs, avec les traitements en facteur principal et les fréquences (annuelle et biennale) d'application de boues mixtes fraîches, de leurs composts et de l'engrais minéral N en facteur secondaire. Des contrastes a priori ont été établis suivant le type de traitements. Les traitements statistiques ont été effectués à l'aide de la procédure GLM de SAS (SAS Institute, Inc. 1985).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Répartition des agrégats et stabilité structurale du sol

Les apports de boues mixtes fraîches et de leurs composts ont significativement accru les proportions des macro-agrégats stables > 5 mm, la proportion totale des macro-agrégats ($\Sigma > 0,25$ mm), ainsi que le DMP des agrégats stables à l'eau, en comparaison avec le témoin et le traitement avec l'engrais minéral N (Tableaux 2 et 3). Ces données indiquent que les boues mixtes fraîches ont rapidement amélioré l'agrégation du sol et ceci est en accord avec les observations de Tisdall et al. (1978) qui ont démontré que l'addition de C facilement minéralisable améliorerait très rapidement la structure du sol. Les boues mixtes étudiées avaient un rapport C/N de 25 ; elles ont ainsi stimulé la croissance des microorganismes du sol, et augmenté par conséquent les métabolites microbiens, notamment les lipides, les phénols et les polyssaccharides qui sont responsables de l'agrégation du sol (Harris et al. 1966; Tisdall et al. 1978; Abdallahi et N'Dayegamiye 2000). Toutefois, les apports de boues mixtes de papetières fraîches pourraient laisser peu d'humus dans le sol par rapport aux composts, affectant ainsi la stabilité des agrégats formés.

L'hypothèse de cette étude stipulait que les boues mixtes de papetières fraîches, qui contiennent des quantités élevées

Tableau 2. Effets de l'application de boues mixtes, de leurs composts et de l'engrais minéral N sur la répartition des macro-agrégats et le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau

Traitements	Proportion moyenne des agrégats (%)					DMP ^y (mm)
	> 5 mm	2–5 mm	1–2 mm	0,25–1 mm	$\Sigma > 0,25$ mm	
<i>Fréquence 1^z</i>						
Témoin	15,48	23,55	9,85	11,14	60,01	2,04
Fertilisation minérale N	15,63	24,68	8,59	9,50	58,40	2,07
Boues mixtes	24,61	21,70	7,75	9,08	64,12	2,53
Boues compostées	17,88	23,45	9,43	13,21	63,96	2,20
Boues mixtes + N minéral	21,41	22,43	7,50	8,73	60,06	2,34
Boues compostées + N minéral	19,37	23,83	8,58	9,30	61,08	2,28
<i>Fréquence 2</i>						
Témoin	12,04	21,50	10,05	12,36	55,93	1,76
Fertilisation minérale N	13,81	20,65	9,43	11,87	55,75	1,83
Boues mixtes	28,71	22,30	8,61	9,20	68,82	2,92
Boues compostées	32,26	22,33	7,29	8,18	70,08	3,04
Boues mixtes + N minéral	14,65	20,93	8,09	10,23	53,91	1,87
Boues compostées + N minéral	20,94	23,80	7,81	7,99	60,54	2,36

^zFréquences 1 et 2 : apport biennal et annuel, respectivement.

^yDMP, diamètre moyen pondéré des agrégats stables à l'eau.

de C facilement minéralisable, pourraient agir plus rapidement sur l'agrégation du sol, en comparaison avec leurs composts. Cependant, les résultats obtenus montrent que, d'une manière générale, les deux types de matières organiques ont eu des effets similaires sur la répartition des agrégats et le DMP des agrégats stables à l'eau (Tableau 3). Le pourcentage des agrégats > 5 mm variait de 29% à 33% dans les sols amendés avec les boues mixtes de papetières et leurs composts, respectivement, en comparaison avec 14% et 15% dans le témoin et dans les sols ayant reçu la fertilisation minérale azotée (160 kg ha⁻¹), respectivement (Tableau 2).

Des observations similaires ont été faites par Diné et al. (1991) avec des amendements fibreux et des amendements humiques sur la stabilité des agrégats d'un loam limoneux. Lafond et al. (1994) ont toutefois relié les effets de divers amendements organiques sur la macro-agrégation des argiles limoneuses du Québec à la décomposabilité de ces matériaux organiques. Dans d'autres recherches, les matières organiques difficilement décomposables ont développé, dans une même période de temps, des agrégats moins stables que celles qui étaient facilement décomposables (Martin 1942; Lynch et Bragg 1985; N'Dayegamiye et Angers 1990).

Par ailleurs, l'augmentation de la proportion des macro-agrégats (> 5 mm) au dépens de celle des macro-agrégats de 1–2 mm (Tableau 2) indique que les deux types de matières organiques ont fortement stimulé l'agrégation du sol étudié. Des résultats similaires ont été obtenus par Chantigny et al. (1999). En effet, ces auteurs ont observé une augmentation de la proportion des agrégats > 1 mm au dépens de celle des agrégats de 53–250 µm, suite à l'application de 50 à 100 Mg ha⁻¹ de résidus de désencrage sur un loam argileux et un loam limono-argileux.

L'augmentation de la proportion des macro-agrégats > 5 mm suite aux apports de boues mixtes fraîches ou de leurs composts explique également l'augmentation du DMP des agrégats stables à l'eau. Celui-ci était en moyenne de 2,44

mm pour les sols ayant reçu les matières organiques, contre 1,95 mm en moyenne pour le sol témoin et le sol ayant reçu la fertilisation minérale azotée (160 kg ha⁻¹) (Tableau 2).

La combinaison des boues mixtes fraîches avec une fertilisation minérale azotée a diminué en moyenne entre 13 et 49%, selon les fréquences, le pourcentage des macro-agrégats stables supérieurs à > 5 mm, comparativement aux boues mixtes appliquées seules (Tableau 2). Par conséquent, la somme totale des macro-agrégats stables ($\Sigma > 0,25$ mm) ainsi que le DMP des agrégats stables à l'eau étaient également réduits dans les sols qui avaient reçu les boues mixtes fraîches combinées avec l'engrais azoté. Par contre, la combinaison de la fertilisation minérale azotée avec les composts de boues mixtes n'a pas diminué les proportions des macro-agrégats > 5 mm ni le DMP des agrégats stables à l'eau, comparativement aux composts appliqués seuls.

Ces résultats suggèrent que les principaux agents liants des macro-agrégats supérieurs à 5 mm dans les sols amendés avec les boues mixtes fraîches ne sont pas de même nature que ceux des boues mixtes compostées. Dans les sols amendés avec les boues mixtes fraîches, la formation des macro-agrégats > 5 mm serait attribuable à des matières organiques labiles. De plus, il est supposé que le contenu plus élevé en N total (Tableau 1) et probablement en C et en N facilement minéralisable des boues fraîches par rapport aux boues compostées, a accru le taux de minéralisation des agents liant les micro-agrégats en macro-agrégats. Dans ce cas, il serait donc recommandable d'appliquer plus fréquemment les boues fraîches afin de maintenir la stabilité structurale du sol. En effet, N'Dayegamiye et Angers (1990) ont observé une augmentation linéaire de macro-agrégats stables à l'eau d'un loam limoneux sous culture du maïs-ensilage, lorsque des doses croissantes de fumiers solides de bovins (20 à 80 t ha⁻¹) avaient été appliquées annuellement depuis 10 ans.

Un compost mature est riche en substances humiques. L'augmentation de la formation des macro-agrégats > 5 mm et l'amélioration subséquente du DMP des agrégats stables

Tableau 3. Analyse de variance sur les effets de l'application de boues mixtes, de leurs composts et de l'engrais minéral N sur la répartition des macro-agrégats et le diamètre moyen pondéré des agrégats stables à l'eau

	> 5 mm	2–5 mm	1–2 mm	0,25–1 mm	$\Sigma > 0,25$ mm	DMP ^z
	Valeur F					
<i>Analyse de variance</i>						
Traitements	3,91*	0,46	1,78	1,50	2,80*	4,44**
Fréquences	0,37	2,26	0,02	0,06	0,01	0,15
Traitements × Fréquences	1,92	0,55	1,03	1,98	0,90	2,23
<i>Contrastes</i>						
Témoin vs autres	5,96*	0,00	6,58*	3,73	1,49	6,04*
N ^y vs boues	6,71*	0,00	1,81	1,25	3,49	7,23*
(BF ^x +BFN ^w) vs (BC ^v +BCN ^u)	0,01	1,88	0,25	0,14	0,82	0,12
BF vs BFN	5,18*	0,04	0,22	0,06	5,56*	7,12*
BC vs BCN	1,68	0,35	0,04	2,30	2,61	1,70
Apport annuel vs apport biennal	0,37	2,26	0,02	0,06	0,01	0,15

^zDMP = diamètre moyen pondéré des agrégats stables à l'eau.

^yN = fertilisation minérale N.

^xBF = boues mixtes de papetières.

^wBFN = boues mixtes de papetières + 120 kg N ha⁻¹.

^vBC = boues mixtes de papetières compostées.

^uBCN = boues mixtes de papetières compostées + 120 kg N ha⁻¹.

*,** Différence significative au seuil de $P < 0,05$ et $P < 0,01$, respectivement.

Tableau 4. Effets de l'application de boues mixtes, de leurs composts et de l'engrais minéral N sur les teneurs en C organique des différentes fractions de macro-agrégats d'un loam limoneux de la série Le Bras

Traitements	Teneur moyenne en C organique (g kg ⁻¹)			
	Sol entier	Agrégats > 5 mm	Agrégats 2–5 mm	Agrégats 0,25–2 mm
<i>Fréquence 1^z</i>				
Témoin	18,1	15,9	16,6	17,1
Fertilisation minérale N	15,7	15,3	15,4	16,1
Boues mixtes	19,8	19,7	19,9	19,7
Boues compostées	20,5	20,5	20,3	20,4
Boues mixtes + N minéral	20,5	20,8	21,5	21,6
Boues compostées + N minéral	21,4	20,2	20,7	23,2
<i>Fréquence 2</i>				
Témoin	18,8	18,2	17,9	18,3
Fertilisation minérale N	17,5	16,4	16,3	17,0
Boues mixtes	22,5	21,5	22,0	21,3
Boues compostées	17,1	19,8	20,3	22,6
Boues mixtes + N minéral	19,7	21,3	19,2	20,2
Boues compostées + N minéral	21,3	19,2	19,8	20,9

^zFréquences 1 et 2 : apport biennal et annuel, respectivement.

à l'eau suite aux apports des composts de boues mixtes pourraient donc être reliées aux effets liants des substances humiques (Chaney et Swift 1986; Fortun et al. 1989; Piccolo et Mbagwu 1989; Diné et al. 1991; Gu et Doner 1993) qui sont relativement résistantes à la dégradation microbienne. Martens (2000) a observé une diminution du DMP des agrégats stables à l'eau dans un sol cultivé en soya, attribuant cet effet à une réduction de la teneur du sol en substances humiques. Swift (2001) rapporte que les substances humiques adsorbées sur le complexe argilo-humique sont efficaces dans la stabilisation des agrégats de sol, même en absence de polysaccharides. Nos résultats supportent ces précédentes études et démontrent que les boues mixtes compostées pourraient favoriser la formation de macro-agrégats stables à l'eau.

L'effet de la fréquence d'application de boues mixtes fraîches ou de leurs composts n'a pas été significatif sur la

formation de macro-agrégats et sur le DMP des agrégats stables à l'eau (Tableau 3). Ces résultats indiquent que les effets positifs d'une seule application au sol de ces matières organiques sont encore importants après deux ans. Chantigny et al. (1999) ont également démontré que l'effet positif de 50 ou 100 Mg ha⁻¹ de résidus de désencrage sur l'agrégation du sol diminuait avec le temps, mais qu'il était encore important trois ans après leur application.

Contrairement aux boues mixtes fraîches et à leurs composts, la fertilisation minérale N n'a pas eu d'effet significatif sur le DMP des agrégats stables à l'eau et sur la formation de macro-agrégats (Tableaux 2 et 3), ce qui corrobore les résultats d'autres recherches (Kay 1990; Aoyama et al. 1999). Cependant, les effets de la fertilisation minérale N sur l'agrégation du sol sont variables (Angers et Carter 1996). Ainsi, celle-ci a réduit (Ram et Zwerman 1960) ou

Tableau 5. Analyse de variance sur les effets de l'application de boues mixtes, de leurs composts et de l'engrais minéral N sur les teneurs en C organique du sol entier et des différentes fractions d'agrégats d'un loam limoneux de la série Le Bras

	Sol entier	Agrégats > 5 mm	Agrégats de 2- 5 mm	Agrégats 0,25-2 mm
	Valeur de F			
<i>Analyse de variance</i>				
Traitements	3,88*	6,53*	9,07**	6,08**
Fréquences	0,03	0,98	0,00	0,26
Traitements × Fréquences	1,34	0,63	1,14	1,02
<i>Contrastes</i>				
Témoin vs autres	1,27	7,12*	8,88*	6,96*
N ² vs boues	13,28**	24,03**	36,39**	21,73**
(BF ^y +BFN ^x) vs (BC ^w +BCN ^y)	0,32	1,20	0,05	1,43
BF vs BFN	0,59	0,12	0,02	0,11
BC vs BCN	3,96	0,17	0,00	0,15
Apport annuel vs apport biennal	0,03	0,98	0,00	0,26

^yBF = boues mixtes de papetières.

^xBFN = boues mixtes de papetières + 120 kg N ha⁻¹.

^wBC = boues mixtes de papetières compostées.

^yBCN = boues mixtes de papetières compostées + 120 kg N ha⁻¹.

²N = fertilisation minérale N.

*, ** = différence significative au seuil de P < 0,05 et 0,01, respectivement.

Tableau 6. Effets de l'application de boues mixtes, de leurs composts et de l'engrais minéral N sur les quantités de C minéralisé dans le sol entier et dans différentes fractions d'agrégats d'un loam limoneux de la série Le Bras

Traitements	Quantité moyenne de C minéralisé (mg CO ₂ kg ⁻¹ sol s)			
	Sol entier	Agrégats > 5 mm	Agrégats 2- 5 mm	Agrégats < 0,25-2 mm
<i>Fréquence 1²</i>				
Témoin	126,9	423,75	487,50	415,00
Fertilisation minérale N	82,1	379,5	357,00	405,00
Boues mixtes	67,5	507,0	517,50	372,25
Boues compostées	205,0	812,75	669,75	611,00
Boues mixtes + N minéral	157,5	675,00	604,25	570,75
Boues compostées + N minéral	127,5	809,00	550,25	549,25
<i>Fréquence 2⁺</i>				
Témoin	96,7	476,5	498,25	559,50
Fertilisation minérale N	69,5	424,0	348,25	414,00
Boues mixtes	122,5	489,50	577,50	613,75
Boues compostées	167,5	719,25	810,50	1070,50
Boues mixtes + N minéral	92,5	1278,50	944,00	877,50
Boues compostées + N minéral	185,0	529,25	622,00	673,25

²Fréquences 1 et 2 : apport biennal et annuel, respectivement.

présenté des effets variables sur la stabilité des agrégats en fonction de la dose de l'engrais minéral N appliqué au sol (Roberson et al. 1995). Les résultats de notre étude peuvent être reliés aux faibles retours de résidus organiques dans le sol qui était cultivé en maïs-ensilage, ceux-ci n'étant pas suffisants pour enrichir le sol et les agrégats en matière organique nouvelle (N'Dayegamiye et Côté 1996). Par ailleurs, Kay (1990) a démontré que, malgré une augmentation de la production des racines, une fertilisation minérale N n'améliore pas l'agrégation du sol et le DMP des agrégats stables et la stabilité structurale du sol parce qu'elle accroît également le taux de minéralisation du C. Il ressort de notre étude que la fertilisation minérale azotée doit être combinée avec des amendements organiques pour améliorer de façon durable la structure des sols.

Inclusion et minéralisation du C dans le sol entier et dans les agrégats

En comparaison avec le témoin et la fertilisation minérale N, les boues mixtes fraîches et leurs composts ont accru les teneurs en C organique du sol entier, cette augmentation était significative au seuil de probabilité de $P < 0.05$ (Tableaux 4 et 5). Les apports de ces matières organiques ont significativement accru les teneurs en C dans les différentes fractions de macro-agrégats. Par rapport au témoin, les augmentations de la teneur en C étaient en moyenne de 10% dans le sol entier et de 19,5%, 17,8% et 20% dans les fractions d'agrégats > 5 mm, de 2-5 mm et 0,25-2 mm, respectivement. Ces résultats suggèrent que le C de ces matières organiques s'est principalement accumulé dans les macro-agrégats, ce qui pourrait expliquer l'augmentation de la formation et de la stabilité des macro-agrégats du sol. Ces

Tableau 7. Analyse de variance sur les effets de l'application de boues mixtes, de leurs composts et de l'engrais minéral N sur les quantités de C minéralisé dans le sol entier et dans différentes fractions d'agrégats d'un loam limoneux de la série Le Bras

	Sol entier	Agrégats > 5 mm	Agrégats de 2- 5 mm	Agrégats 0,25-2 mm
	Valeur de F			
<i>Analyse de variance</i>				
Traitements	4,62**	3,12*	9,37**	8,22**
Fréquences	0,13	0,26	5,95*	21,16**
Traitements × Fréquences	1,74	1,42	1,54	1,91
<i>Contrastes</i>				
Témoin vs autres	0,56	2,42	3,63	4,23
N ^z vs boues	9,26**	5,48*	28,99**	16,34**
(BF ^y +BFN ^x) vs (BC ^w +BCN ^v)	10,64**	0,03	0,00	4,24
BF vs BFN	1,34	7,38*	9,72**	8,21*
BC vs BCN	1,36	0,30	4,49*	8,09*
Apport annuel vs apport biennal	0,13	0,26	5,95*	21,16**

^zN = fertilisation minérale N.

^yBF = boues mixtes de papetières.

^xBFN = boues mixtes de papetières + 120 kg N ha⁻¹.

^wBC = boues mixtes de papetières compostées.

^vBCN = boues mixtes de papetières compostées + 120 kg N ha⁻¹.

*,** Différence significative au seuil de $P < 0,05$ et $P < 0,01$, respectivement.

observations corroborent les travaux de Angers (1998) qui ont démontré que, dans les sols argileux du Québec, tout apport de quantités de C dans le sol de surface favorisait la macro-agrégation du sol. Cet auteur attribue ce phénomène à la saturation des micro-agrégats de ces sols en carbone organique.

Pour un même traitement, les teneurs en C étaient généralement semblables pour toutes les fractions d'agrégats étudiées (Tableau 4). Ces résultats sont contradictoires avec d'autres recherches qui ont démontré que la teneur en C augmentait avec la taille des agrégats (Tisdall et Oades 1982, Elliott 1986). Cependant, les résultats de la présente étude corroborent ceux de Cambardella et Elliott (1993) qui ont démontré que dans les sols cultivés ou sous prairie native, les teneurs en C étaient similaires dans les fractions d'agrégats, variant de 53 à 2000 µm. De même, d'autres études n'ont pas trouvé de corrélation entre les teneurs en C organique et la taille des agrégats (Gupta et Germida 1988, Elliott et al. 1991).

Les apports des boues mixtes fraîches et de leurs composts ont significativement augmenté ($P < 0,01$) les quantités de C minéralisé dans le sol entier et dans les différents agrégats (Tableaux 6 et 7), en comparaison avec le sol ayant reçu l'engrais minéral N et le témoin. La fréquence des apports des boues mixtes fraîches ou compostées a également eu un effet significatif sur la minéralisation du C inclus dans les agrégats (Tableau 7). En effet, les apports annuels de ces matières organiques ont accru les quantités de C minéralisé dans les agrégats de 2-5 mm et 0,25-2 mm, comparativement à un seul apport en deux ans.

Cette augmentation du taux de minéralisation de C dans le sol entier et dans les agrégats peut être attribuable à l'addition au sol de matières organiques facilement minéralisables qui stimulent les activités biologiques. En incubant le sol avec du glucose, Aoyama et al. (2000) ont noté une augmentation rapide de CO₂ et cette quantité de carbone minéralisé était plus élevée dans les macro-agrégats que

dans les micro-agrégats. Dans une autre étude, Aoyama et al. (1999) ont démontré que le carbone inclus dans les macro-agrégats était plus labile que dans les micro-agrégats.

L'apport d'une fertilisation minérale N, en combinaison avec les boues mixtes fraîches, a augmenté de 96%, 41% et 46% en moyenne les taux de minéralisation de C dans les fractions d'agrégats > 5 mm, 2-5 mm et 0,25-2 mm, respectivement, par rapport aux boues mixtes appliquées seules. Cette augmentation du taux de minéralisation du C inclus dans les macro-agrégats peut donc expliquer en partie la réduction des proportions de macro-agrégats et du DMP en présence de boues mixtes fraîches avec ajout d'engrais azoté (Tableau 2). Au contraire, le taux de minéralisation du C des agrégats a été plus faible pour les apports de boues mixtes compostées avec ou sans ajout d'engrais azoté. Cet effet de l'azote minéral sur la décomposition des matières organiques a été relevé par Kay (1990) et Fog (1988). Ces auteurs ont indiqué que l'ajout d'azote minéral stimule la décomposition des matières organiques labiles. Les composts contiennent des substances humiques résistantes à la décomposition microbienne (Gu et Doner 1993), et ceci explique la stabilité des agrégats dans les sols ayant reçu les composts de boues mixtes (Tableau 2).

CONCLUSION

Cette étude a démontré que l'application des boues mixtes fraîches ou compostées a rapidement favorisé l'agrégation et la stabilité des agrégats du sol. Cependant, le supplément de fertilisation azoté aux boues mixtes fraîches a réduit les proportions de macro-agrégats > 5 mm, ainsi que le diamètre moyen pondéré des agrégats stables à l'eau, contrairement aux composts de boues mixtes. Les résultats de cette étude suggèrent que les agents liant les macro-agrégats étaient plus facilement minéralisables dans les sols amendés avec les boues mixtes fraîches que dans les sols ayant reçu les boues compostées. Les effets positifs des boues mixtes

fraîches pourraient donc être temporaires, comparativement à ceux de leurs composts. C'est pourquoi celles-ci devraient par conséquent être appliquées plus fréquemment que leurs composts, afin d'assurer une agrégation stable du sol.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Anne Drapeau, Angèle Corriveau, J. Marie Noël et Michel Noël pour leur assistance dans les travaux de laboratoire et de champ. M. Bipfubusa remercie l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) pour son soutien financier.

Abdallahi, M. M. et N'Dayegamiye, A. 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., Bollen, W. B. et Moodie, C. D. 1965. Total carbon. Pages 1346–1365 dans C. A. Black et al. éd. *Methods of soil analysis*. Agronomy no. 9. ASA, SSSA, Madison, WI.

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

Angers, D. A. 1998. Water-stable aggregation of Québec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. *Soil Tillage Res.* **47**: 91–96.

Angers, D. A. et Carter, M. R. 1996. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils. Pages 193–211 dans M. R. Carter et B. A. Stewart, éd. *Advances in soil science: structure and organic matter storage in agricultural soils*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Aoyama, M., Angers, D. A. et N'Dayegamiye, A. 1999. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Can. J. Soil Sci.* **79**: 295–302.

Aoyama, M., Angers, D. A., N'Dayegamiye, A. et Bissonnette, N. 2000. Metabolism of ¹³C-labeled glucose in aggregates from soils with manure application. *Soil Biol. Biochem.* **32**: 295–300.

Cambardella, C. A. et Elliott, E. T. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **57**: 1071–1076.

Chaney, K. et Swift, R. S. 1986. Studies on aggregate stability. II. The effect of humic substances on the stability of re-formed soil aggregates. *J. Soil Sci.* **37**: 337–343.

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

Dinel, H., Mehys, G. R. et Lesveque, M. 1991. The influence of humic and fibric materials on the aggregation and aggregate stability of a lacustrine silty clay. *Soil Sci.* **151**: 146–158.

Dormaar, J. F. 1983. Chemical properties of soil and water-stable aggregates after sixty-seven years of cropping to spring wheat. *Plant Soil* **75**: 51–61.

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

Elliott, E. T., Palm, C. A., Reuss, D. E. et Monz, C. A. 1991. Organic matter contained in soil aggregates from a tropical chronosequence: correction for sand and light fraction. *Agric. Ecosyst. Environ.* **34**: 443–451.

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

Fog, K. 1988. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biol. Rev.* **63**: 432–462.

Fortun, A., Fortun, C. et Ortega, C. 1989. Effect of farmyard manure and its humic fractions on the aggregate stability of a sandy loam soil. *J. Soil Sci.* **40**: 293–298.

Gu, B. et Doner, H. E. 1993. Dispersion and aggregation of soils as influenced by organic and inorganic polymers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **57**: 709–716.

Gupta, V. V. S. R. et Germida, J. J. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.* **20**: 777–786.

Hadas, A., Parkin T. B. et Stahl, P. D. 1998. Reduced CO₂ release from decomposing wheat straw under N-limiting conditions: simulation of carbon turnover. *Eur. J. Soil Sci.* **49**: 487–494.

Harris, R. F., Chester, G. et Allen, O. N. 1966. Dynamics of soil aggregation. *Adv. Agron.* **18**: 107–169.

Haynes, R. L. et Beare, M.H., 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* **29**: 1647–1653.

Kay, B. D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* **12**: 1–52.

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

Lafond, J., Angers, D. A. et Laverdière, M. R. 1994. Water-stable macroaggregation in soils amended with various organic materials. Pages 115–127 dans J. Caron et D. A. Angers, éd. *Proceedings of the Second Eastern Canada Soil Structure Workshop*, Mont St-Anne, Aug. 23–24, 1993, Université Laval, Québec, QC.

Lynch, J. M. et Bragg, E. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Adv. Soil Sci.* **2**: 133–171.

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

Martin, J. P. 1942. The effect of composts and compost materials upon the aggregation of the silt and clay particles of Colington sandy loam. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **7**: 218–222.

Monreal, C. M., Schnitzer, M., Schulten, H. R., Campbell, C. A. et Anderson, D. W. 1995. Soil organic structures in macro and microaggregates of a cultivated brown chernozem. *Soil Biol. Biochem.* **27**: 845–853.

N'Dayegamiye, A. et Angers, D. A. 1990. Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés physiques et biologiques d'un loam limoneux Neubois sous culture de maïs. *Can. J. Soil Sci.* **70**: 259–262.

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

N'Dayegamiye, A. et Côté, D. 1996. Effet de l'application à long terme du fumier de bovins, du lisier de porc et de l'engrais minéral sur la teneur en matière organique et la structure du sol. *Agrosol* **9**: 31–35.

N'Dayegamiye, A. et Watt, S. 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*. IHSS 10 Proceedings: 1009–1013.

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

Piccolo, A. et Mbagwu, J. S. C. 1989. Effects of humic substances and surfactants on the stability of soil aggregates. *Soil Sci.* **147**: 47–54.

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

- Ram, D. et Zwerman, P. 1960.** Influence of management systems and cover crops on soil physical conditions. *Agron. J.* **62**: 173–476.
- Roberson, E. B., Sarig, S., Shennan, C. et Firestone, M. K. 1995.** Nutritional management of microbial polysaccharide production and aggregation in an agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **59**: 1587–1594.
- SAS Institute, Inc. 1985.** SAS user's guide : Statistics, version 5 ed. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Simard, R. R. 2000.** Les résidus papetiers: mode d'usage horticole. Colloque sur les biosolides, Colloque CPVQ, Montebello, QC. pp. 47–70.
- Steel, R. G. D. et Torrie, J. H. 1980.** Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. McGraw-Hill, New York, NY.
- Swift, R. S. 2001.** Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.* **166**: 856–871.
- Tisdall, J. M., Cockroft, B. et Uren, N. C. 1978.** The stability of soil aggregate as affected by organic materials, microbial activity and physical disruption. *Aust. J. Soil Res.* **16** : 9–17.
- Tisdall, J. M. et Oades, J. M. 1982.** Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* **33**: 141–163.

