

Effets des apports de composts de résidus ménagers sur les rendements des cultures et certaines propriétés du sol

*A. N'Dayegamiye¹, A. Drapeau¹ et M. R. Laverdière¹

Résumé, *A. N'Dayegamiye¹, A. Drapeau¹ et M. R. Laverdière¹. **Effets des apports de composts de résidus ménagers sur les rendements des cultures et certaines propriétés du sol. *Agrosol*. 16 (2) : 135-144.** Cette étude d'une durée de 4 ans visait à évaluer les effets directs et les arrières-effets d'apports de composts de résidus ménagers sur les rendements des cultures et sur certaines propriétés du sol. Pendant les deux premières années de l'essai, les composts ont été ajoutés au sol à l'automne ou au printemps à raison de 20, 40 et 60 t/ha, seuls ou combinés avec 180, 120 et 60 kg N/ha respectivement, en prévision d'une culture de maïs. Ces traitements ont été comparés à la dose 180 kg N/ha et à un témoin sans engrais azoté. Les effets résiduels des apports de composts ont été évalués sur le blé et l'orge au cours des années suivantes. En comparaison avec le témoin, les composts de résidus ménagers apportés seuls ont augmenté les rendements en maïs-grain de 1 à 3 t/ha selon les doses, mais seulement lors de la deuxième année de production. Toutefois, les applications de composts complétées avec l'engrais azoté ont permis pendant les deux années d'obtenir des rendements élevés en grains du maïs, comparables à la dose complète de N (180 kg N/ha) sans compost. Les arrières-effets des apports de composts seuls ont donné, en moyenne, des gains de 720 et 975 kg/ha en rendement en blé et en orge respectivement, en comparaison avec le témoin. Les coefficients d'utilisation de l'azote de ces composts par la culture de maïs étaient de seulement 7 %. Cette étude démontre que les apports de composts ont progressivement augmenté les rendements des cultures et les revenus nets calculés, probablement grâce à l'amélioration des propriétés du sol. En effet, deux applications de composts ont significativement accru la respiration microbienne (CO₂), le potentiel de minéralisation d'azote (NO₃), les teneurs de carbone de la biomasse microbienne ainsi que les activités de la phosphatase alcaline et de l'uréase, ces dernières étant reliées à la minéralisation de l'azote et du phosphore organique. Même s'ils n'ont pas influencé la masse volumique apparente du sol de façon significative, les apports de composts ont amélioré le potentiel de rétention en eau et augmenté les teneurs en matière organique du sol, comparativement au témoin et au traitement avec les engrais minéraux seuls. Valorisés selon les normes environnementales en vigueur, les composts de résidus ménagers peuvent rapidement améliorer la productivité et la qualité des sols.

Mots clés : composts de résidus ménagers, maïs, blé et orge, activités biologique et enzymatique du sol, matière organique, effets résiduels.

Abstract, *A. N'Dayegamiye¹, A. Drapeau¹ and M. R. Laverdière¹. **Effects of municipal waste compost applications on crop yields and soil properties. *Agrosol*. 16 (2): 135-144.** This 4-yr study evaluated direct and residual effects of municipal waste composts on crop yields and on evolution of soil properties. During the first two years under corn production, the composts were applied to the soil in fall and spring at 20, 40 and 60 t/ha rates, without or with decreasing N rates depending of the compost rate applied (180, 120 and 60 kg N/ha respectively). The treatments were compared to a complete N rate for corn (180 kg N/ha), and to a control. Residual effects of compost addition were evaluated on wheat and barley crops in the next years. In comparison to the control, the application of composts alone increased by 1 to 3 t/ha corn yields but only in the second year of the study. However, the compost applications combined with mineral N fertilizer produced the highest corn yields in both years, which were similar to those obtained with the mineral N fertilizer (180 kg N/ha). Compost residual effects increased by 720 and 975 kg/ha wheat and barley yields respectively, compared to the control. The N recovery was only 7% for the studied composts. The benefit of compost application was gradual, and could be due to the improvement of soil properties. Two compost applications significantly increased soil microbial respiration (CO₂), N mineralization potential (NO₃), microbial biomass carbon content and alkaline phosphatase and urease activities. Although compost applications did not have any effect on soil bulk density, they increased the soil water retention and organic matter content, compared to the control or the fertilizer treatment alone. Based on environmental regulations, the use of municipal waste composts could improve rapidly soil productivity and its quality.

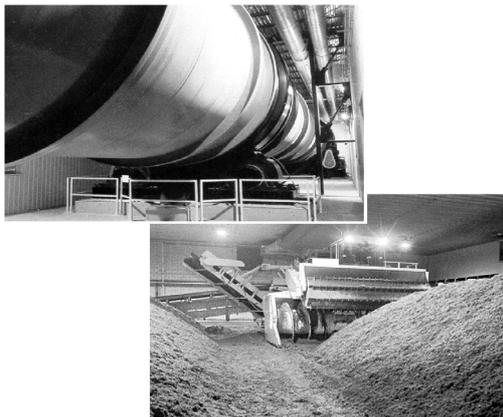
Key words: municipal waste composts, corn, wheat and barley, soil biological and enzymatic activities, organic matter, residual effects.

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

*Auteur pour la correspondance : téléphone : (418) 644-6845, télécopieur : (418) 644-6855, courriel : adrien.ndaye@irda.qc.ca

INTRODUCTION

La disposition de déchets organiques dans les sites d'enfouissement représente de plus en plus un coût élevé, ainsi qu'un impact négatif sur le milieu (Smith 1994). C'est pour ces raisons que le compostage de résidus ménagers triés à la source est en pleine croissance dans plusieurs pays. Au Québec, le Groupe Conporec valorise annuellement environ 30 000 tonnes métriques de résidus ménagers provenant de la Rive-Sud de Montréal, et produit environ 15 000 tonnes métriques de composts. Après une collecte sélective (tri à la source) des déchets domestiques, l'utilisation du bio-réacteur comme procédé de compostage permet à cette compagnie d'hygiéniser les résidus ménagers et de les transformer en humus en une période relativement courte.



La production et la valorisation de composts de résidus ménagers sont en expansion aux États-Unis et en Europe (Cameron et al. 2004; Crecchio et al. 2004), et des effets positifs sur les rendements des cultures ont été obtenus sous plusieurs conditions de sol et de climat (Convertini et al. 1999). Même si les composts obtenus ne sont pas encore valorisés à grande échelle en agriculture, beaucoup de recherches ont démontré que des apports de ces produits augmentaient les niveaux de matière organique, la capacité d'échange cationique, le nombre de microorganismes et leurs activités (Crecchio et al. 2004; Yuksel 2004; Bresson et al. 2001; Guidi et al. 1988). Les apports de composts ont également amélioré la structure des sols et la rétention en eau et réduit la masse volumique (Guisquiani et al. 1995).

En améliorant les propriétés des sols, ceci a favorisé la croissance des cultures et leurs rendements, ainsi que les bénéfices bruts (MacLaren et Cameron 1996). Les composts de résidus domestiques sont fréquemment utilisés dans les sols sablonneux de la Floride et leurs apports ont conduit à des augmentations de la productivité de ces sols, principalement en cultures commerciales (Smith 1994).

Comme dans le cas des boues municipales, il existe une certaine crainte relative à l'accumulation de métaux lourds dans les sols et à leur toxicité pour les plantes et les microorganismes qui s'y développent. Cependant, des études indiquent de faibles enrichissements des sols en métaux lourds, lorsque les composts apportés rencontrent les normes environnementales prescrites, et qu'ils sont apportés périodiquement au sol en tant qu'amendements organiques. D'autres études ont indiqué que des apports de composts pendant six ans n'avaient pas affecté la diversité et les fonctions des microorganismes des sols étudiés (Crecchio et al. 2004).

Les composts ont généralement de faibles teneurs en N et P, en comparaison avec les engrais minéraux, les fumiers ou les boues mixtes de papeteries. Cependant, leur application pourrait améliorer les conditions du sol (aération, CEC, porosité), favorisant ainsi une meilleure croissance des plantes et une absorption efficace des éléments nutritifs en provenance du sol, des engrais minéraux ou des composts.

L'objectif de cette étude consistait à évaluer l'influence d'apports de composts de résidus ménagers sur les rendements et la nutrition du maïs et des céréales, ainsi que sur l'évolution de quelques propriétés du sol.

Matériel et méthodes

Description du site et des traitements

Cette étude a été réalisée sur un sable loameux de la série Du Contour, à la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-

Hyacinthe. Le sol présentait un pH initial de 6,8, un niveau en matière organique de 1,81 %, ainsi que des teneurs moyennes en P, K et Mg de 360, 391 et 270 mg/kg de sol, respectivement.

Les composts utilisés provenaient du Groupe Conporec (Sorel-Tracy, Québec) Il s'agit généralement de résidus ménagers triés à la source et compostés dans un bio-réacteur pendant trois jours. Les composts sont par la suite tamisés, avant d'être disposés en andains dans un bâtiment où ils poursuivent leur maturation pendant environ trois mois. Les andains sont périodiquement retournés, afin de maintenir de bonnes conditions de compostage.

Les traitements, en trois répétitions, consistaient en trois doses de composts (20, 40 et 60 tonnes/ha sur base humide) apportées à l'automne ou au printemps. Les composts étaient apportés seuls ou avec un supplément d'engrais minéral azoté correspondant à 180, 120 et 60 kg N/ha, respectivement pour 20, 40 et 60 t/ha de composts. Ces traitements étaient comparés au témoin sans engrais azoté et à des doses d'azote minéral (60 à 180 kg N/ha). Les composts ont été appliqués pendant les deux premières années sur une culture de maïs.

Les arrières-effets des deux apports de composts ont été évalués sur des cultures de blé et d'orge au cours des deux années suivantes. Les doses d'azote apportées pour le blé et l'orge étaient de 90, 60 et 30 kg N/ha, selon les doses croissantes de composts appliquées antérieurement. Pendant les quatre années, tous les traitements ont reçu des doses égales d'engrais minéraux P et K, suivant les recommandations du CPVQ (50 kg P₂O₅/ha + 50 kg K₂O/ha). Les engrais de N, P et K apportés étaient sous forme de nitrate d'ammonium, superphosphate triple (0-46-0) et muriate de potassium (0-0-60), respectivement.

Les composts ont été appliqués à l'aide d'un épandeur à fumier conventionnel, et les résidus ont été incorporés par labour à l'automne ou avec la herse à disques au printemps. Les engrais minéraux ont été épandus à la volée et

enfouis à la herse à disques en même temps que les composts.

Méthodologie analytique

En prévision des analyses chimiques, les composts ont été séchés à 60 °C pendant 48 heures, tamisés à 2 mm et broyés à 0,5 mm. Le pH a été mesuré dans un mélange 1:1 eau: matériel organique. Les teneurs en cendres et en matière organique ont été mesurées par calcination à 550 °C durant 16 heures, et le contenu en matière sèche après séchage à 105 °C à l'étuve. Les quantités d'azote minéral (N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻) ont été extraites avec une solution de 2 N KCl (Bremmer and Mulvaney 1982) et dosées en colorimétrie sur Technicon. Les teneurs en N, P, K, Mg et Ca des composts ont été déterminées après une digestion acide dans une solution de H₂SO₄ et H₂SeO₃ avec ajout de H₂O₂ pendant une heure à 400 °C (Isaac et Johnson 1980). Les contenus en N dans les extraits ont été mesurés en colorimétrie sur Technicon, tandis que ceux en P, K, et Mg ont été dosés par spectrométrie d'émission dans le plasma à induction couplée.

Après quatre années d'essai, des échantillons de sol ont été prélevés à la profondeur 0-20 cm pour déterminer les activités biologiques, et dans celles de 0-20 et 20-40 cm pour mesurer la masse volumique apparente et la teneur en matière organique. Le contenu du sol en carbone organique a été déterminé par la méthode d'oxydation par voie humide (Allison et al. 1965). La méthode des cylindres a été utilisée pour la détermination de la masse volumique apparente du sol (McKeague 1978), tandis que la capacité de rétention en eau et la porosité totale ont été mesurées à l'aide de la marmite à membranes à pression (Topp et al. 1993).

L'activité de la phosphatase a été évaluée selon la méthode d'hydrolyse d'une solution de p-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 en colorimétrie sur Technicon. Les teneurs en C de la biomasse microbienne ont été déterminées par la fumigation des échantillons de sol au chloroforme, suivie d'une extraction avec une solution de 0,5M K₂SO₄ (Vance et al. 1987).

La respiration microbienne et le pouvoir de minéralisation ont été déterminés à partir d'une incubation de 20 jours de 150 g de sol frais dans un contenant hermétique de 500 ml à une température de 25 °C. Une fiole contenant 10 ml 1 M NaOH a été déposée afin de capter la quantité de CO₂ dégagée par les microorganismes. La quantité de CO₂ dégagée a été déterminée par titration de l'excès de NaOH après précipitation des carbonates formés par une solution de BaCl₂ 3 N (Anderson 1982). Pour déterminer la quantité d'azote minéralisé, une extraction a été effectuée sur les sols incubés et non incubés avec une solution de KCl 2 M. L'azote minéral (N-NH₄⁺ + N-NO₃⁻) a été

dosé sur Technicon, la différence de l'azote minéral entre les sols de départ et les sols incubés constituant l'azote minéralisé.

Résultats

Caractéristiques des composts

Les caractéristiques physico-chimiques des composts utilisés sont présentées aux tableaux 1 et 2. Les pourcentages en matière sèche des matériaux étaient relativement stables au cours des années, variant de 62 à 65 %. Les composts avaient des teneurs élevées mais variables en matière organique, reflétant la variabilité de la composition des ordures ménagères. La teneur en azote était relativement constante et se situait autour de 1,3 %, avec des rapports C/N légèrement élevés, entre 27 et 37. De façon générale, les composts n'étaient pas riches en N et

Tableau 1. Caractéristiques physiques et chimiques des composts de résidus ménagers.

Propriétés	Automne 1998	Printemps 1999	Automne 1999	Printemps 2000	Moyenne
Matière sèche (%)	62	65	63	62	63
pH	7,7	8,0	7,8	7,5	7,8
M.O. (%)	87,2	76,1	66,9	73,6	75,9
Carbone (%)	43,6	38,0	33,4	36,8	37,9
N total (%)	1,76	1,19	1,27	1,14	1,34
Rapport C/N	25	32	26	32	28
N-NH ₄ (mg/kg)	372,1	15,3	169,3	n.d.	185
N-NO ₃ (mg/kg)	2,9	2,2	2,0	n.d.	2,4
P Mehlich3 (mg/kg)	n.d.*	219	488	139	282
K Mehlich 3 (mg/kg)	n.d.	3 389	4 659	6 185	4 744

* n.d. non déterminé

Tableau 2. Teneurs en éléments totaux des composts de résidus ménagers.

Éléments totaux (mg/kg)	Automne 1998	Printemps 1999	Automne 1999	Printemps 2000	Moyenne
P	2 129	1 980	2 680	3 014	2 451
K	5 616	6 492	5 918	7 116	6 286
Ca	23 963	31 102	27 511	80 351	40 732
Mg	2 619	2 430	2 586	2 542	2 544
B	41	46	n.d.*	50	46
Cu	256	108	195	201	190
Fe	11 962	5 343	10 198	6 880	8 596
Mn	243	334	236	469	321
Na	4 110	5 495	4 349	5 417	4 843
Zn	634	325	687	575	555

* n.d. non déterminé

en P, mais présentaient de bonnes teneurs en éléments basiques (K, Ca et Mg), ainsi qu'en éléments mineurs, notamment le Cu, Fe, Mn, et Zn. Les pH des composts étaient faiblement alcalins.

À raison de 20 t/ha de composts humides et avec une teneur en matière sèche de 62 %, les quantités en N, P et K apportées au sol étaient en moyenne de 169 kg N/ha, 71 kg P₂O₅/ha et 95 kg K₂O/ha. Cependant, ces quantités d'éléments nutritifs ne se retrouvent pas entièrement sous forme assimilable ou disponible aux cultures et c'est pourquoi elles ne peuvent se substituer qu'en partie aux engrais minéraux.

Au niveau agronomique et environnemental, ces composts de résidus ménagers sont considérés comme étant une matière résiduelle fertilisante, en raison de leur niveau élevé de matière organique et de leurs teneurs intéressantes en éléments majeurs et mineurs. Selon les normes du BNQ, ces composts se classeraient généralement dans la catégorie A, ce qui leur permet d'être valorisés en agriculture. Par contre, certains lots se classant dans la catégorie B, notamment à cause de leur teneur en Pb qui dépasse la norme, sont destinés à d'autres usages moins restrictifs que l'agriculture (horticulture ornementale, revégétalisation de sablières).

de 40 t/ha de composts complémenté avec 120 kg N/ha, rendements similaires à ceux obtenus avec la fertilisation minérale complète (180 kg N/ha + PK).

Les résultats indiquent que les composts apportés seuls n'ont pas permis d'obtenir des rendements élevés en maïs-grain, probablement à cause de la faible disponibilité de leurs éléments nutritifs, particulièrement l'azote. En effet, l'azote du compost de résidus ménagers était principalement sous forme organique (tableau 1) et sa minéralisation en période de végétation n'a probablement pas été suffisante pour combler les besoins en N du maïs-grain.

Pour la culture du maïs en 1998, les coefficients d'utilisation de l'azote calculés étaient de 7 % pour le compost, et de 33 % pour l'engrais minéral azoté (180 kg N/ha), ce qui représente un coefficient d'efficacité (d'équivalence avec l'engrais minéral N) de 21 %.

Lors de la deuxième année consécutive d'application (1999), les effets des apports de composts ont été plus importants. Comparativement au témoin sans engrais minéraux ni composts, les apports de composts seuls à raison de 20, 40 et 60 t/ha se sont traduits par des augmentations de 1 à 3 t/ha en grains; celles-ci étant proportionnelles aux doses apportées. Comme en 1998, les rendements les plus élevés en maïs ont toutefois été obtenus lorsque les apports de composts étaient complétés par des ajouts d'engrais azotés, avec des gains atteignant 6 t/ha en comparaison avec le témoin.

Arrières-effets des composts sur le blé et l'orge

Les arrières-effets des apports de composts sur les cultures de blé et d'orge ont été évalués en 2000 et 2001. De façon générale, les rendements en céréales ont été particulièrement élevés, variant de 2 479 à 4 670 kg/ha pour le blé et de 2 333 à 4 841 kg/ha pour l'orge, selon les traitements (tableau 4). Les apports antérieurs de composts seuls, à raison de 20 à 60 t/ha, ont accru en moyenne de

Tableau 3. Effets des apports de composts de résidus ménagers et d'engrais minéraux sur les rendements en maïs-grain (kg/ha).

Traitements	Mais 1998	Mais 1999
Témoin	10292	6 194
60 kg N/ha	11432	9 795
120 kg N/ha	12360	11 179
180 kg N/ha	12 735	12 054
20 t/ha automne	9 957	7 731
40 t/ha automne	11 449	9 537
60 t/ha automne	9 383	9 158
20 t/ha printemps	7 314	7 339
40 t/ha printemps	10 355	8 278
60 t/ha printemps	9 598	8 770
20t/ha automne + 180 kg N/ha	11 818	11 888
40t/ha automne + 120 kg N/ha	12 738	12 099
60 t/ha automne + 60 kg N/ha	11 822	11 387
PPDS*	3 957	1 703

* PPDS : plus petite différence significative à P ≤ 0,05

Tableau 4. Arrières-effets des apports de composts de résidus ménagers sur les rendements en céréales (kg/ha).

Traitements	Blé 2000	Orge 2001
Témoin	2 479	2 333
30 kg N/ha	3 406	3 322
60 kg N/ha	4 048	4 331
90 kg N/ha	4 300	4 754
20 t/ha automne	3 196	2 715
40 t/ha automne	3 351	3 576
60 t/ha automne	3 264	3 508
20 t/ha printemps	2 819	3 170
40 t/ha printemps	3 120	3 186
60 t/ha printemps	3 450	3 701
20t/ha automne + 90 kg N/ha	4 569	4 708
40t/ha automne + 60 kg N/ha	4 670	4 841
60 t/ha automne + 30 kg N/ha	4 369	4 130
PPDS*	568	528

* PPDS : plus petite différence significative à P ≤ 0,05

Effets des composts sur les rendements en maïs

Les observations effectuées sur les plants de maïs lors de la première saison de végétation ont indiqué des carences en N lorsque les composts de résidus ménagers avaient été apportés au printemps, particulièrement à la dose la plus élevée (60 t/ha), ce qui suggère un manque de maturité des composts utilisés. Par contre, les symptômes de carence en N n'ont pas été observés suite aux applications automnales, probablement en raison d'une décomposition plus avancée du matériel, celle-ci s'étant poursuivie tard à l'automne et ayant probablement repris au printemps avant le semis de la culture. Dans les traitements combinant composts et engrais minéraux, la croissance était comparable à celle observée avec la fertilisation minérale complète (NPK).

Les rendements en maïs-grain obtenus en 1998 étaient particulièrement élevés en raison des conditions climatiques favorables dans la région de Saint-Hyacinthe pendant cette année (tableau 3). Les rendements moyens en grains atteignaient 10 866 kg/ha sur base sèche (12 496 à 15 % humidité). Les apports de composts seuls à l'automne ou au printemps ont occasionné de légères baisses de rendement comparativement au témoin. Toutefois, des augmentations significatives de plus 1 t/ha ont été mesurées lorsque les composts étaient combinés à des engrais azotés. Les rendements les plus élevés ont été obtenus suite à l'apport

720 et 975 kg/ha respectivement les rendements de ces deux cultures, en comparaison avec le témoin sans compost ni engrais minéral, ce qui démontre des arrières-effets importants des composts. Toutefois, les augmentations des rendements ne sont pas proportionnelles aux doses de composts apportées. De tels résultats tendent à indiquer que ces augmentations des rendements seraient attribuables à l'amélioration des propriétés du sol, plutôt qu'à la mise en disponibilité des éléments nutritifs résiduels.

Les rendements les plus élevés en blé et en orge ont été obtenus suite aux applications de composts complémentées avec l'engrais azoté. Les niveaux de rendement obtenus étaient comparables à ceux obtenus à partir des traitements avec une fertilisation minérale complète, ce qui permet de conclure qu'on peut réduire la dose d'engrais azoté d'environ 30 kg N/ha, suite aux applications répétées de 20 à 40 t/ha de composts, sans baisser les rendements de ces cultures.

Afin de mettre en perspective les apports résiduels en N des composts, nous avons comparé les rendements obtenus avec les composts seuls à ceux des engrais minéraux de la courbe de réponse (e.g. 30 à 90 kg N/ha). En choisissant les traitements qui présentent des valeurs comparables,

nous avons observé que le compost d'ordures ménagères a apporté 30 kg N/ha par unité disponible de 20 t de composts.

Actions des composts sur les propriétés du sol

Activité biologique

L'activité biologique globale du sol a été déterminée par la mesure des taux de respiration microbienne (mg CO₂/kg sol). Ce paramètre reflète la quantité de microorganismes présents dans le sol. De façon générale, un effet significatif des apports de composts a été observé sur les taux de respiration microbienne en comparaison avec celui du traitement témoin ou de l'engrais minéral seul (tableau 5). Deux apports de composts, seuls ou complémentés d'engrais minéraux, ont significativement accru les taux de respiration microbienne par rapport au témoin, ce qui indique que ces applications ont fortement stimulé la croissance et l'activité des microorganismes du sol. De plus, les taux de respiration microbienne étaient directement proportionnels aux doses de composts apportées au sol.

Par ailleurs, la respiration microbienne a été plus élevée avec les applications printanières de composts. Ceci s'explique par le fait que ces composts contenaient

encore une grande quantité de carbone facilement minéralisable, ce qui a stimulé les microorganismes du sol. Les quantités d'azote minéralisé à partir des incubations de sol menées en laboratoire ont été variables (tableau 5). Cependant, les quantités de nitrate ont été significativement accrues par l'apport d'engrais minéral azoté, étant donné que l'azote stimule également les activités des microorganismes du sol. Les effets des composts sur ce paramètre ont néanmoins été plus faibles, probablement à cause des processus concomitants de minéralisation et d'immobilisation dans les sols ayant reçu des matières organiques aux rapports C/N > 30 (tableau 1), ce qui s'est probablement traduit par de faibles teneurs en nitrate dans le sol.

Le carbone de la biomasse microbienne représente la totalité des microorganismes du sol. Ainsi, plus les quantités de carbone sont élevées, plus la biomasse et l'activité microbiennes sont abondantes. Les apports de composts ont plus que doublé les teneurs en carbone de la biomasse en comparaison avec celle du témoin et celle du sol ayant reçu les engrais minéraux (tableau 4). Par ailleurs, les teneurs en carbone de la biomasse ont augmenté proportionnellement avec les doses de composts. Grâce à l'ajout de carbone au sol, deux applications de

Tableau 5. Effets d'apports de composts de résidus ménagers et d'engrais minéraux sur quelques propriétés biologiques du sol.

Traitements	Respiration microbienne (mg CO ₂ /kg sol)	C-biomasse (mg C/kg sol)	Minéralisation (mg N-NO ₃ /kg sol)	Phosphatase acide (μg P.N.P./g sol)	Phosphatase alcaline (μg P.N.P./g sol)	Uréease (μgN-NH ₄ /g sol)
Témoin	197,97	298,13	9,85	224,6	165,0	19,43
180 kg N/ha	200,47	369,95	25,32	231,1	179,7	22,92
20 t/ha aut.	457,45	682,72	11,19	219,8	177,5	21,99
40 t/ha aut.	389,41	714,76	15,51	244,4	204,8	29,97
60 t/ha aut.	652,50	885,98	13,19	240,4	229,2	35,92
20 t/ha print.	504,37	760,21	13,05	220,6	188,6	28,31
40 t/ha print.	652,59	861,39	14,49	236,3	244,1	37,02
60 t/ha print.	1101,42	1110,93	6,37	228,5	253,7	38,31
20 t/ha aut. + 180 N*	607,58	424,98	13,54	239,2	185,6	26,48
40 t/ha aut. + 120 N	447,77	632,69	20,53	263,1	201,5	31,96
60 t/ha aut. + 60 N	690,36	703,46	17,33	250,1	222,1	35,93
PPDS ≤ 0,05	406,04	323,37	8,62	26,52	67,71	9,66

* kg N/ha

aut. : automne, print. : printemps

composts à l'automne ou au printemps ont permis d'augmenter significativement la microflore du sol ainsi que les activités qui leur sont associées (respiration microbienne) par rapport aux engrais minéraux seuls.

Les apports de composts ont eu un faible effet sur la phosphatase acide, mais ont accru de façon significative les activités de la phosphatase alcaline et de l'uréase (tableau 5). La phosphatase alcaline est une enzyme principalement intracellulaire retrouvée au niveau des cellules microbiennes. Quant à l'uréase, c'est une enzyme impliquée dans les réactions se produisant lors du processus de minérali-

sation de l'azote. L'augmentation de l'activité de ces enzymes a été proportionnelle avec les doses de composts apportées. Ces résultats confirment l'existence d'un lien direct entre l'apport de composts et la stimulation de l'activité des microorganismes.

Propriétés physiques du sol et matière organique

Les résultats obtenus indiquent que deux apports de composts ont légèrement diminué la masse volumique apparente et augmenté la porosité totale et la rétention en eau des sols (tableau 6). Bien que ces améliorations soient plus importantes pour les doses de 40 et 60 t/ha, les

résultats suggèrent que deux applications de composts n'ont pas été suffisantes pour influencer significativement ces propriétés du sol étudié.

Les apports de composts ont légèrement augmenté les teneurs en matière organique du sol, particulièrement lorsqu'ils étaient appliqués à 60 t/ha (tableau 6). Ces augmentations ont surtout été observables dans la couche superficielle (0-20 cm) du sol.

Évaluation économique

L'impact des applications de composts et des engrais minéraux sur les revenus bruts a été calculé en tenant compte du prix des engrais minéraux, des frais d'épandage des composts et du prix du marché pour le maïs-grain. Les prix présentés ont été extraits des références économiques pour l'année 1999 (GÉAGRI, 1999).

Les résultats des calculs (tableaux 7 à 9) montrent que les apports de composts combinés aux engrais minéraux pour la culture de maïs-grain ont offert des revenus bruts intéressants, bien que l'apport d'engrais minéral seul présente les revenus les plus élevés. Plus particulièrement, l'apport de composts à l'automne constitue une alternative à considérer compte tenu d'une augmentation plus élevée des revenus bruts. Toutefois, les résultats montrent aussi que la dose la plus élevée de composts (60 t/ha) et les applications printanières ont réduit les niveaux des rendements en maïs et les revenus bruts à cause de l'immobilisation de l'azote, ce qui a conduit à des revenus nets négatifs.

De façon générale, les revenus nets ont augmenté lorsque les apports de composts étaient supplémentés d'engrais minéraux. Il est à noter que, selon la littérature, les bénéfices économiques associés à l'application d'amendements organiques en agriculture augmentent proportionnellement avec les années d'application. En effet, les revenus bruts et nets semblent augmenter légèrement pour la culture du maïs en 1999 suite aux apports de composts, alors qu'ils étaient négatifs en 1998 (données

Tableau 6. Effets d'apports de composts de résidus ménagers et d'engrais minéraux sur les teneurs en matière organique et les propriétés physiques du sol.

Traitements	% M.O. (0-20 cm)	% M.O. (20-40 cm)	Masse vol. app. (g/cm ³)	Porosité totale (%)	Teneur en eau (%)
Témoin	1,82	1,12	1,49	41,86	15,67
90 kg/ha N	1,95	1,02	1,50	42,30	16,19
20 t/ha automne	1,79	1,16	1,46	41,85	18,35
40 t/ha automne	2,03	1,44	1,49	44,92	15,53
60 t/ha automne	2,33	1,20	1,37	46,12	17,50
20 t/ha printemps	1,97	1,01	1,42	45,75	16,76
40 t/ha printemps	2,06	1,30	1,38	45,27	18,55
60 t/ha printemps	2,20	1,22	1,37	45,91	21,84
20 t/ha automne + 90 N*	1,84	1,28	1,44	45,27	17,09
40 t/ha automne + 60 N	1,93	1,28	1,48	43,24	17,93
60 t/ha automne + 30 N	2,11	1,39	1,44	44,10	17,62
PPDS ≤ 0,05	0,13	0,29	0,08	4,04	4,55

* kg N/ha

Tableau 7. Revenus bruts obtenus suite à l'application de composts de résidus ménagers et d'engrais minéraux sur la culture de maïs-grain (1999).

Traitements	Prix intrants (\$/ha)	Rendements 15 % hum (kg/ha)	Prix du marché (\$/kg)	Prix récolte (\$/ha)	Revenus bruts (\$/ha)	Revenus nets (\$/ha)
Témoin (P ₂ O ₅ et K ₂ O)	75	7 123	0,17	1 196,74	1 121,74	-
NPK (180 kg N/ha)	291	13 862	0,17	2 328,95	2 037,95	916,00
N = 180 kg/ha	216					
P ₂ O ₅ = 40 kg/ha	45					
K ₂ O = 120 kg/ha	30					
20 t/ha automne	295	8 890	0,17	1 493,61	1 198,61	77,00
40 t/ha automne	515	10 968	0,17	1 842,73	1 327,73	206,00
60 t/ha automne	735	10 532	0,17	1 769,48	1 034,48	-88,00
20 t/ha printemps	295	8 440	0,17	1 418,00	1 123,00	1,00
40 t/ha printemps	515	9 519	0,17	1 599,29	1 084,29	-38,00
60 t/ha printemps	735	8 863	0,17	1 489,07	754,07	-218,00
20 t/ha aut. + 180 N	586	13 671	0,17	2 296,86	1 710,86	589,00
40 t/ha aut. + 120 N	734	13 913	0,17	2 337,52	1 303,52	182,00
60 t/ha aut. + 60 N	882	13 095	0,17	2 200,09	1 318,09	196,00

non présentées). De plus, des bénéfices importants ont été mesurés pour les cultures de blé et d'orge dans les années 2000 et 2001 pendant lesquelles nous avons évalué les arrières-effets des composts (tableaux 8 et 9). Au cours de ces deux années, les composts ont présenté des revenus intéressants, ce qui indique que ces produits peuvent présenter des bénéfices économiques à moyen terme, à cause de l'amélioration graduelle de la fertilité et de la qualité des sols (tableaux 5 et 6).

Discussion

Des apports périodiques d'amendements organiques sont nécessaires pour maintenir un niveau optimal de matière organique des sols cultivés, assurant ainsi la productivité des fermes agricoles. La teneur en matière organique (M.O.) du sol, bien que ne représentant qu'un faible pourcentage sur une base pondérale, influence plusieurs propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, qui sont à la base de leur qualité globale.

Dans la présente étude, les apports de composts ont légèrement augmenté les niveaux de matière organique dans la partie supérieure (0-20 cm) de la couche arable, en comparaison avec ceux du témoin ou du sol fertilisé, sans apport d'amendement organique. Cependant, cette augmentation de la matière organique était significative seulement pour la dose la plus élevée de composts (60 t/ha). De tels résultats peuvent s'expliquer par la courte durée du projet et par les apports relativement faibles de composts. En effet, dans le cadre de cette étude de quatre années, seulement deux apports ont été effectués. Comme la teneur en matière sèche des composts variait entre 62 à 65 % (tableau 1), l'apport de 60 t/ha de composts humides représentait en réalité 39 t/ha de matière sèche. Ces composts contenaient entre 67 et 87 % de matière organique, ce qui signifie qu'un apport de 60 t/ha humide représentait entre 26 et 34 t/ha de matière organique. Les apports de 20 t/ha de composts ne permettaient en fait qu'une addition de 8,7 à 11,3 t/ha de M.O. dans

le sol, alors que la dose de 40 t/ha apportait entre 17,4 et 22,8 t/ha de M.O.

En tenant compte d'un coefficient de minéralisation de 0,12 pour ce type de sol, contenant en moyenne 2,2 % de matière organique et une masse volumique apparente de 1 550 kg/m³, la matière

organique minéralisée annuellement s'élèverait à 7 365 kg/ha sur 20 cm et 8 838 kg/ha sur 24 cm. Deux apports de 20 à 40 t de composts jumelés à des résidus de culture laissés au sol après la récolte ont probablement permis de compenser les pertes associées à la minéralisation de l'humus stable. En

Tableau 8. Revenus bruts obtenus suite à l'application de composts de résidus ménagers et d'engrais minéraux sur la culture de blé (2000 effet résiduel).

Traitements	Prix intrants (\$/ha)	Rendements 15 % hum (kg/ha)	Prix du marché (\$/kg)	Prix récolte (\$/ha)	Revenus bruts (\$/ha)	Revenus nets (\$/ha)
Témoin (P ₂ O ₅ et K ₂ O)	45	2 851	0,16	458,44	413,44	--
NPK (90 kg N/ha)	153	4 945	0,16	795,16	642,16	229,00
N = 90 kg/ha	108					
P ₂ O ₅ = 30 kg/ha	27					
K ₂ O = 30 kg/ha	18					
20 t/ha automne	45	3 675	0,16	590,94	545,94	133,00
40 t/ha automne	45	3 854	0,16	619,72	574,72	162,00
60 t/ha automne	45	3 754	0,16	603,64	558,64	146,00
20 t/ha printemps	45	3 242	0,16	521,31	476,31	63,00
40 t/ha printemps	45	3 470	0,16	557,98	512,98	100,00
60 t/ha printemps	45	3 962	0,16	637,09	592,09	179,00
20 t/ha aut. + 90 N	153	5 254	0,16	844,84	687,84	275,00
40 t/ha aut. + 60 N	117	5 371	0,16	863,66	746,66	334,00
60 t/ha aut. + 30 N	81	5 024	0,16	807,86	726,86	314,00

Tableau 9. Revenus bruts obtenus suite à l'application de composts de résidus ménagers et d'engrais minéraux sur la culture d'orge (2001 effet résiduel).

Traitements	Prix intrants (\$/ha)	Rendements 15 % hum (kg/ha)	Prix du marché (\$/kg)	Prix récolte (\$/ha)	Revenus bruts (\$/ha)	Revenus nets (\$/ha)
Témoin (P ₂ O ₅ et K ₂ O)	45	2 683	0,17	454,77	409,77	--
NPK 90 kg N/ha	153	5 467	0,17	926,67	773,67	364,00
N = 90 kg/ha	108					
P ₂ O ₅ = 30 kg/ha	27					
K ₂ O = 30 kg/ha	18					
20 t/ha automne	45	3 122	0,17	529,18	484,18	74,00
40 t/ha automne	45	4 112	0,17	696,98	651,98	242,00
60 t/ha automne	45	4 034	0,17	683,76	638,76	229,00
20 t/ha printemps	45	3 646	0,17	618,00	573,00	163,00
40 t/ha printemps	45	3 664	0,17	621,05	576,05	166,00
60 t/ha printemps	45	4 256	0,17	721,39	676,39	266,00
20 t/ha aut. + 90 N	153	5 414	0,17	917,67	764,67	355,00
40 t/ha aut. + 60 N	117	5 567	0,17	943,61	826,61	417,00
60 t/ha aut. + 30 N	81	4 750	0,17	805,13	724,13	314,00

effet, les accroissements en matière organique dans l'horizon 0-20 cm ont atteint en moyenne 15 % suite à deux applications de composts seuls ou combinés à l'engrais minéral.

Les apports de composts peuvent également améliorer la structure des sols. Une étude récente (Watt 2001) a comparé les effets d'un apport de trois boues mixtes de papetières, d'une boue de station d'épuration et d'un compost d'ordures ménagères (en provenance du Groupe Conporec inc.) sur certaines propriétés du sol de la série Le Bras. L'ajout au sol de composts d'ordures ménagères s'est avéré supérieur aux boues mixtes de papetières et à la boue de station d'épuration au niveau des proportions d'agrégats > 5 mm. Cet amendement a également augmenté de façon significative les proportions d'agrégats stables à l'eau (DMP), un indice de la qualité structurale des sols, par rapport aux boues mixtes de papetières et à la boue de station d'épuration municipale. Cet effet positif serait attribuable à l'action des substances humiques du compost sur l'agrégation et la stabilité des agrégats.

De faibles apports (20 t hum./ha/an) de fumiers solides de bovins pendant 18 ans ont contribué à augmenter de façon marquée la teneur en matière organique du sol ainsi que la quantité d'agrégats stables, comparativement à la fertilisation minérale seule (Aoyama et al. 1999; N'Dayegamiye et al. 1997; Estevez et al. 1996). On pourrait ainsi penser que les composts d'ordures ménagères, appliqués sur une base périodique à des doses variant entre 20 et 40 t/ha sur base humide, pourraient avoir un effet comparable sur la structure des sols. Cependant, le sol étudié était un sable loameux qui ne favorisait pas la structuration, comparativement aux sols limoneux ou argileux. Pour cette raison, nous n'avons pas mesuré la stabilité des agrégats dans ce type de sol.

D'autres propriétés physiques importantes du sol (masse volumique apparente, porosité, rétention en eau) sont aussi intimement associées au contenu en matière organique du sol et donc aux divers

apports d'amendements organiques. Ces propriétés auront un effet important au niveau de la qualité globale du sol et de leur aptitude à produire. N'Dayegamiye et Angers (1990) ont montré que des apports prolongés de fumiers solides de bovins (0 à 100 t/ha) pendant dix ans se traduisaient par une relation inverse avec la masse volumique apparente; cette dernière passait de 1,29 g/cm³ pour le témoin à 1,17 g/cm³ avec des apports de 100 t/ha/an de fumier. Ces auteurs indiquent également des effets significatifs des fumiers sur la teneur en eau du sol.

Dans la présente étude avec les composts, on n'observe pas encore de différences significatives au niveau de la masse volumique apparente, mais les effets au niveau de la teneur en eau ont été significatifs après deux applications de composts. Dans des sols sablonneux, des apports ponctuels de composts de résidus ménagers ont rapidement augmenté les niveaux de M.O., la CEC, la rétention en eau, la capacité au champ et la porosité totale (Weber et al. 2005). Cependant, ces effets bénéfiques sur les paramètres physiques ont été de courte durée, ce qui suppose que des applications répétées auraient été nécessaires.

En augmentant les teneurs en M.O. et en améliorant les propriétés physiques des sols, les composts peuvent stimuler la croissance et l'activité de la microflore du sol. Les organismes du sol utilisent le carbone comme source d'énergie et les apports d'amendements organiques se traduisent par une croissance importante des populations microbiennes, selon la nature des sources carbonées apportées (N'Dayegamiye 2000). Cette population microbienne est souvent estimée de façon indirecte à partir de divers paramètres qui sont les reflets de son activité dont la mesure de sa respiration, de la minéralisation de l'azote ou encore par la production d'enzymes qui lui sont spécifiques comme l'uréase et la phosphatase alcaline.

Dans cette étude, les apports de composts ont significativement augmenté le taux de respiration microbienne (CO₂) et les teneurs en C de la biomasse microbienne. Des effets positifs au niveau de l'activité

de l'uréase et de la phosphatase alcaline suite aux apports de composts ont également été mesurés. Ces résultats sont comparables aux observations de Baziramakenga et al. (2001) et Chantigny et al. (2000) suite à des applications de boues de désencrage. Dans une étude de six ans, Crecchio et al. (2004) ont observé que les apports de composts de résidus ménagers avaient augmenté les niveaux de M.O. et d'azote total du sol. Comme dans notre étude, ces apports ont aussi accru les activités enzymatiques de l'uréase et de la phosphatase. Selon ces auteurs, les apports de ces composts n'ont cependant pas modifié les communautés microbiennes du sol.

Les résultats obtenus ont démontré que les composts de résidus ménagers se comportent comme la plupart des autres amendements organiques, incluant le fumier solide de bovins et les boues mixtes de papetières (N'Dayegamiye et Angers 1993; Estevez et al. 1996; N'Dayegamiye et al. 2004), en favorisant une augmentation de l'activité biologique et enzymatique proportionnelle aux doses apportées.

Les composts de résidus ménagers présentaient globalement de faibles teneurs en N et P, en comparaison avec les engrais minéraux ou les fumiers. Les coefficients d'utilisation de l'azote étaient seulement de 7 % (données non présentées), contre 25 % en moyenne pour les fumiers ou les boues mixtes (N'Dayegamiye et al. 2004). Cependant, deux apports de composts de résidus ménagers ont tout de même amélioré les conditions du sol favorisant ainsi la croissance et la nutrition des cultures. En effet, deux apports de ces composts, sans complément azoté, se sont traduits par un accroissement des rendements par rapport au témoin (sans compost ni fertilisants minéraux), qui étaient toutefois nettement moindres que ceux obtenus à partir d'une fertilisation minérale NPK. Le fait d'apporter des composts combinés à des doses réduites d'engrais azotés a permis de contrer l'immobilisation de l'azote attribuable au manque de maturité de ces composts, tout en assurant des augmentations substantielles des rendements.

Les données des rendements indiquent une amélioration progressive de la productivité du sol étudié (tableaux 3 et 4). Une étude effectuée en Italie a aussi démontré que les apports de composts de résidus ménagers avaient augmenté les rendements de la betterave à sucre et du blé (Crecchio et al. 2004). L'analyse économique effectuée dans la présente étude a indiqué une augmentation croissante des bénéfices bruts, suite aux apports de composts. Cette augmentation progressive des rendements est attribuable en grande partie à l'amélioration des propriétés du sol qui ont créé de meilleures conditions de croissance et de nutrition pour les cultures, tel que décrit par Cameron et al. (2004).

Cette étude a démontré que les composts de résidus ménagers peuvent être bénéfiques pour la fertilité des sols; ils peuvent donc être valorisés en agriculture s'ils satisfont aux normes actuelles du Bureau de normalisation du Québec (BNQ). Même si la valorisation des composts de résidus domestiques est en expansion aux États-Unis et en Europe (Cameron et al. 2004; Crecchio et al. 2004), pour leur valorisation, on doit d'abord tenir compte de leur contenu en matière organique et en éléments nutritifs qui influencent les conditions physiques et biologiques du sol, la croissance des plantes et les activités des microorganismes. Il faut ensuite considérer leurs teneurs en métaux lourds afin de respecter les normes environnementales en vigueur.

Conclusion

Cette étude a démontré que le compost de résidus ménagers utilisé dans ces essais a agi avant tout comme un amendement organique qui a rapidement amélioré certaines propriétés physiques et biologiques, ainsi que la teneur en matière organique du sol. Par conséquent, deux apports de ces composts ont créé de meilleures conditions de croissance et de nutrition pour les cultures. L'efficacité fertilisante azotée de ces composts semble cependant faible en comparaison à celle des fumiers, des engrais verts ou des boues mixtes de papetières et c'est pourquoi il

est nécessaire de combiner l'apport de ces matériaux avec des engrais minéraux azotés en doses réduites. L'apport de composts à raison de 40 t/ha complémenté avec 120 kg N/ha d'engrais minéral, a assuré de meilleurs rendements en maïs et s'est traduit par des arrières-effets (effets résiduels) importants sur les cultures de blé et d'orge. En raison de leur faible maturité en général, des doses supérieures à 60 t/ha sont à éviter dû aux risques potentiels d'immobilisation de l'azote et de phytotoxicité. Pour ces raisons, il serait préférable de les appliquer à l'automne plutôt qu'au printemps, ce qui permettrait d'amorcer une certaine décomposition.

Remerciements

Les auteurs remercient la compagnie Groupe Conporec inc., l'IRDA et le CORPAQ pour le financement de cette recherche. Des remerciements sont également adressés au personnel des fermes de recherche de Saint-Lambert de Lauzon et de Saint-Hyacinthe, ainsi que du laboratoire de l'IRDA pour leur soutien dans les différentes étapes de ce projet.

Références bibliographiques

Allison, L.E., Bollen, W.B. and Moodie, C.D. 1965. Total carbon. Pages 1346-1365 in C.A. Black et al., eds. *Methods of soil analysis*. Agronomy no. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.

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

Aoyama, M., D.A. Angers and A. N'Dayegamiye. 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.

Baziramakenga, R., R.R. Simard and R. Lalonde. 2001. Effect of de-inking paper sludge compost application on soil chemical and biological properties. *Can. J. Soil Sci.* 81: 561-575.

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

Bresson, L.M., Koch, C., Le Bissonnais, Y., Barriuso, E. and Lecomte, V. 2001. Soil surface structure stabilization by municipal waste compost application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1804-1811.

Cameron, E., How, N., Saggat, S. and Ross C. 2004. The cost-benefits of applying bio-solid composts for vegetable, fruit and maize/sweet corn. Landcare Research Science Series no. 27. Manaaki Whenua Press, Lincoln, Canterbury, NZ. 31 p.

Chantigny, M. H., D.A. Angers and C.J. Beauchamp. 2000. Active carbon pools and enzyme activities in soils amended with de-inking paper sludges. *Can. J. Soil Sci.* 80:99-105.

Convertini, G., De Giorgio, D., Ferri, D., La cava, P and Giglio, L. 1999. Sugar beet and durum wheat quality characteristics as affected by composted urban waste. Pages 241-244 in Anac., D., Martin- Prével (eds). *Improved Crop Quality by Nutrient Management*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.

Crecchio, C., Curci, M., Pizzigallo, M.D.R., Ricciuti, P. and Ruggiero, P. 2004. Effects of municipal solid waste compost amendments on soil enzyme activities and bacterial genetic diversity. *Soil Biol. Biochem.* 36: 1595-1605.

Estevez, B., D. Côté, A. N'Dayegamiye, F. Pagé et D. Coderre. 1996. Effet à court terme de l'application de pailis sur les populations de vers de terre et l'activité biologique d'un sol en monoculture de maïs. *Agrosol* 9 (2): 27-32.

- GROUPE GÉAGRI inc. 1999. Rendements, prix moyens de fertilisants et amendements. Le Comité de références économiques en agriculture du Québec. 4 p.
- Guidi, G., Pera, A., Giovanetti, M., Poggio, G. and Bertoldi, M. 1988. Variations of soil structure and microbial population in a compost amended soil. *Plant Soil* 106: 113-119.
- Guisquiani, P.L., Pagliai, M. Gigliotti, G., Businelli, D. et Benetti, A. 1995. Urban waste compost: effects on physical, chemical and biochemical soil properties. *J. Environ. Qual.* 24: 175-182.
- Isaac, R.A. et Johnson, W.C. 1980. Determination of total nitrogen on plant tissues using BD-40 digestion. *J. Assoc. Anal. Chem.* 50: 98-100.
- McKeague, J.A. (ed). 1978. Manual of soil sampling and method of analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science, Ottawa, ON. 250 p.
- MacLaren, R.G. and Cameron, K.C. 1996. Soil science : sustainable production and environmental protection. 2nd ed. Auckland, Oxford University Press, NZ. p. 83-277.
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M. et Royer, R. 2004. Épandage d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : coefficients d'efficacité et nitrates dans le sol. *Agrosol* 15 (2): 97-106.
- N'Dayegamiye, A. 2000. Pistes pour le maintien de la biodiversité des microorganismes des sols suite à des apports de divers amendements organiques: étude de longue durée. Colloque sur la biologie des sols, CPVQ.
- N'Dayegamiye, A., M. Goulet et M.R. Laverdière. 1997. Effet à long terme d'apports d'engrais minéraux et de fumier sur les teneurs en C et N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Neubois sous culture de maïs. *Can. J. Soil Sci.* 77: 351-358.
- N'Dayegamiye, A. and D.A. Angers. 1993. Organic matter characteristics and water-stable aggregation of a sandy loam soil after 9 years of wood-residue applications. *Can. J. Soil Sci.* 73:115-122.
- N'Dayegamiye, A. et D.A. Angers. 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.
- Smith, W.H. 1994. Using compost to recycle Florida's organics in agriculture. Pages 44-45 in Proc. of the Composting Council, Fifth Annual Conf. Nov. 16-18, 1994. Washington, DC.
- Tabatabai, M. A. 1982. Soil enzymes. Pages 903-947 in A.L. Page, R. H. Miller, et D.R. Keeney, eds. *Methods of soil analysis.* Agronomy No. 9. ASA, Madison, WI.
- Topp, G.C., Galganov, Y.T., Ball, B.C. and Carter, M.R. 1993. Soil water desorption curves. Pages 569-579 in M.R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis.* Canadian Society of Soil Science. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Watt, S. 2001. Étude comparative des effets de différents résidus organiques sur les propriétés physico-chimiques et biologiques reliées à la qualité des sols. Mémoire de maîtrise en sols et environnement, Université Laval, Sainte-Foy, QC. 81 p.
- Weber, J., Drozd, J., Licznar, M., Jamroz, E., Karczewska, A. and Liczar, S.E. 2005. Agricultural and ecological aspects of soil fertility improvement by application of composts produced from municipal solid wastes. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 7, 01380. Yuksel, O. 2004. Effect of municipal waste compost on some chemical characteristics of clay soils. *J. Agron.* 3: 43-45.
- Vance, E. D., Brookes, C. and Jenkinson, D.S. 1987. An extraction method for measuring soil organic microbial biomass carbon. *Soil Biol. Biochem.* 19 : 703-707.