

# Évaluation des effets de boues mixtes fraîches et de leurs composts sur les rendements des cultures et leur nutrition minérale

M. BIPFUBUSA<sup>1</sup>, \*A. N'DAYEGAMIYE<sup>1</sup> ET H. ANTOUN<sup>1</sup>

**RÉSUMÉ -** M. Bipfubusa, A. N'Dayegamiye et H. Antoun, Évaluation des effets de boues mixtes fraîches et de leurs composts sur les rendements des cultures et leur nutrition minérale. *Agrosol.* 17 (1) : 65-72. Cette étude de quatre ans (2000-2004) a évalué les effets des applications de boues mixtes de désencrage, fraîches (BF) et compostées (BC) sur la production et la nutrition minérale du maïs ensilage et de l'orge. Des apports annuels et triennaux de BF et de BC, à raison de 40 t humide ha<sup>-1</sup>, seules ou combinées avec une dose réduite d'engrais azoté (120 kg ha<sup>-1</sup>) ont été comparés à la fertilisation minérale azotée du maïs ensilage (160 kg ha<sup>-1</sup>) et à un témoin. Ces matières organiques n'ont pas été apportées au sol en 2003 et en 2004 afin d'évaluer leurs effets résiduels sur le maïs et l'orge, les parcelles ayant reçu les mêmes doses de fertilisation minérale en fonction de la culture. En 2001 et en 2002, les apports de BF et de BC combinées avec l'engrais azoté (120 kg N ha<sup>-1</sup>) ont accru les rendements du maïs de 5,6 t ha<sup>-1</sup> en moyenne, soit de 64 %, en comparaison avec le témoin. Sans ajout d'engrais azoté, les apports de BF ont augmenté les rendements du maïs de 29 % en comparaison avec le témoin. Les hausses de rendements du maïs étaient plus faibles pour les apports de BC seules, à cause de la faible minéralisation de l'azote stable qu'elles contiennent. En 2003 et 2004, les apports antérieurs de BF et de BC combinées avec l'engrais azoté (effets résiduels) ont augmenté les rendements de 16 et 24 % en moyenne pour le maïs et l'orge respectivement, en comparaison avec le témoin. Aucune différence significative en rendements et nutrition minérale n'était observée entre les apports annuels ou triennaux de BF et BC. Afin d'obtenir des rendements maximums, les apports de boues mixtes désencrées fraîches ou compostées, avec des rapports C/N supérieurs à 30, doivent être complétés par l'engrais azoté. Les apports de BF et de BC ont rapidement amélioré les propriétés du sol, ce qui justifie en partie l'augmentation de la productivité du sol étudié.

**Mots clé :** boues de désencrage, rendements de maïs-ensilage et d'orge, disponibilité de l'azote et ajustement de la fertilisation.

**ABSTRACT -** M. Bipfubusa, A. N'Dayegamiye and H. Antoun, Effects of fresh and composted de-inking paper mill sludges on corn and barley yields. *Agrosol.* 17 (1) : 65-72. A four yr study (2000-2004) has evaluated the influence of fresh (BF) and composted (BC) de-inking paper mill sludges on corn and barley yields. Annual and biennial application of BF and BC in fall 2000 to 2002 at 40 Mg ha<sup>-1</sup>, alone or combined with reduced N fertilizer rate (120 kg N ha<sup>-1</sup>), were compared to N fertilizer (160 kg N ha<sup>-1</sup>) as recommended for silage corn and the control. Phosphorous and potassium fertilizers were applied to all plots. Those organic residues were not applied in 2003 and 2004 to determine their residual effects on corn, and barley yields, and all plots received N, P and K rates recommended for each crop. When combined to N fertilizer (120 kg N ha<sup>-1</sup>), the application of de-inking paper mill sludges produced on average a 5.6 t ha<sup>-1</sup> increase (64%), in 2001 and 2002 compared to the control. Corn yield increases were similar to those obtained with complete N fertilizer for the crop (160 kg N ha<sup>-1</sup>). The application of BF without supplemental N produced a slower corn yield increase (29 %), compared to the control. Corn yields were slower with BC in comparison to BF probably due to their high content of stable N with low availability to the plant. In 2003 and 2004, residual effects of BF and BC combined with N fertilizer produced a yield increase of 16 and 24% of corn and barley, respectively, compared to the control. Although fresh and composted de-inking paper mill sludges with high C:N (>30) have significantly improved some soil properties (soil structure and organic matter content), their applications to the soil have to be combined with N fertilizer to maintain maximum crop yields.

**Keywords:** de-inking paper mill sludges, corn and barley yields, N availability and N fertilizer management.

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

\*Auteur pour la correspondance : téléphone : ++1-418-644-6845, télécopieur : ++1-418-644-6855, courriel : adrien.ndaye@irda.qc.ca

2. Université Laval, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Département de phytoécologie, Université Laval, Québec (Québec), G1K 7P4, Canada

## Introduction

Les apports de nouvelles matières organiques dans les sols peuvent rapidement améliorer leur productivité. Toutefois, l'efficacité fertilisante de celles-ci dépend de leur composition chimique. La minéralisation de l'azote et la disponibilité de cet élément aux plantes sont reliées aux rapports C/N et à la forme d'azote (Amato *et al.* 1987, N'Dayegamiye *et al.* 2004 b). Les matières organiques ayant des rapports C/N inférieurs à 25, tels que les engrais verts, les fumiers, les lisiers et les boues mixtes, se minéralisent rapidement et peuvent libérer des quantités importantes d'azote aux cultures (Beauchamp 1986, Myers *et al.* 1994, Abdallahi et N'Dayegamiye 2000, Simard 2001). Par contre, celles qui présentent des rapports C/N plus élevés, tels que les résidus ligneux (copeaux de bois, résidus papetiers de désencrage, etc.) occasionnent une immobilisation de l'azote par les micro-organismes du sol et requièrent un complément d'engrais azoté pour favoriser la croissance des cultures (Beauchemin *et al.* 1990, Simard *et al.* 1998, Fierro *et al.* 1999).

Quant aux composts, ils apportent des éléments nutritifs majeurs et des oligo-éléments nécessaires à la croissance optimale des cultures et à l'augmentation des rendements. Cependant, la disponibilité des éléments minéraux des composts pour les cultures dépend de la composition chimique des matériaux qui entrent dans leur fabrication (N'Dayegamiye *et al.* 1997). De façon générale, l'azote des composts est stabilisé dans les substances humiques, ce qui occasionne de faibles coefficients d'utilisation en azote, nécessitant ainsi un ajout supplémentaire d'azote pour favoriser une croissance optimale des cultures et des micro-organismes du sol (Edwards 1997).

L'augmentation des rendements des cultures n'est pas uniquement reliée à la disponibilité de l'azote, mais aussi à l'amélioration générale des conditions physiques et biologiques du sol. L'incorporation des boues mixtes désencrées, fraîches (BF) et compostées (BC), a rapidement amélioré la stabilité des agrégats du sol étudié (Bipfubusa *et al.* 2005).

Or, les sols dont les agrégats sont stables se détériorent moins facilement et bénéficient d'un échange gazeux accru, ainsi que d'une meilleure infiltration et rétention en eau dans les horizons supérieurs (Carter 2002). De plus, les macropores permettent un meilleur développement du système racinaire, ce qui favorise une meilleure utilisation de l'eau et des nutriments minéraux du sol. De même, les différents macropores entre les agrégats constituent des niches pour les micro-organismes du sol et ceci augmente les activités biologiques et enzymatiques du sol (Gagnon *et al.* 2000, N'Dayegamiye *et al.* 2004a) et conséquemment, la minéralisation et la disponibilité de l'azote et du phosphore (Bhattacharyya *et al.* 2003). Ces bénéfices sur le sol, grâce aux apports de matière organique, permettent ainsi une croissance graduelle des rendements (McRae et Mehuys 1985, Magdoff et Amadon 1980, Giller *et al.* 1997, Palm *et al.* 1997).

Cet essai de quatre ans avait comme objectif d'évaluer les effets des apports annuels ou triennaux de BF et de BC et leurs effets résiduels sur les niveaux de rendements et la nutrition minérale du maïs ensilage et de l'orge.

## Matériel et méthodes

### Description du site et dispositif expérimental

Cette recherche a été effectuée de 1999 à 2004 sur un sol limoneux de la série Le Bras située à la Station de recherche de l'IRDA à Saint-Lambert de Lauzon. Le pH initial du sol était de 6,2 et ses teneurs en matière organique et en azote total étaient de 2,8 et 0,14 % respectivement. Le sol était riche en K, Ca et Mg (103, 1195 et 98 mg kg<sup>-1</sup>, respectivement) mais pauvre en P (50 mg kg<sup>-1</sup>). La texture de ce sol était constituée de 20 % d'argile, 47 % de limon et 33 % de sable.

En 2000, des applications de BF et de BC ont été effectuées seules, à raison de 40 t ha<sup>-1</sup> sur base humide, ou combinées avec une dose réduite d'engrais azoté (120 kg N ha<sup>-1</sup>). Ces traitements étaient comparés aux apports d'engrais azoté (160 kg N ha<sup>-1</sup>) et à un témoin sans matière organique, ni engrais N. À partir de 2001, les parcelles

ont été subdivisées afin de comparer les effets des applications annuelles et triennales de ces matières organiques. Les applications de BF et de BC ont été effectuées manuellement en 2000, 2001 et 2002 et leur incorporation au sol a été faite à l'aide d'une herse à disques. En 2001 et en 2002, le sol était cultivé en maïs ensilage. Dans les traitements de fertilisation minérale, une dose de 160 kg N ha<sup>-1</sup> sous forme de nitrate d'ammonium (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) a été apportée à la volée. Toutes les parcelles ont reçu des doses de 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> et 100 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> afin que ces deux éléments majeurs ne soient pas des facteurs limitatifs à la croissance des cultures.

En 2003 et en 2004, les matières organiques n'ont pas été apportées au sol afin d'évaluer leurs effets résiduels sur les rendements et la nutrition minérale du maïs ensilage et de l'orge. Cependant, toutes les parcelles ont reçu les mêmes doses d'engrais minéraux, soit 80 kg N ha<sup>-1</sup>, 100 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> et 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> pour le maïs ensilage en 2003, et 60 kg N ha<sup>-1</sup>, 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> et 80 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> pour la culture d'orge en 2004.

### Méthodologie analytique

Chaque année, la récolte était pesée et un échantillon représentatif était prélevé et séché à l'étuve à 60 °C afin de déterminer la teneur en matière sèche ainsi que les teneurs en éléments majeurs et mineurs. Les concentrations en N, P, K, Ca, Mg des tissus végétaux ont été déterminées par digestion dans un mélange H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 %) sur un bloc digesteur BD-40 préalablement chauffé à 370 °C (Isaac et Johnson 1980). Les teneurs en azote total ont été déterminées par Auto-analyseur Technicon, tandis que les autres éléments minéraux ont été déterminés par spectrophotométrie d'émission atomique au plasma (CPVQ 1989). Pour chaque élément minéral, les prélèvements des cultures ont été calculés en multipliant la concentration de chaque élément minéral (%) par le rendement en matière sèche (kg ha<sup>-1</sup>).

### 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 triennale) d'apports 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 traitement. Les traitements statistiques ont été effectués à l'aide de la procédure GLM de SAS (SAS Institute Inc. 1985).

## Résultats et discussion

### Propriétés physico-chimiques des boues mixtes et des composts utilisés

De façon générale, les propriétés des matières organiques fertilisantes utilisées variaient légèrement d'une année à l'autre (tableau 1). Les boues mixtes (BF) et les composts (BC) contenaient des teneurs élevées en matière organique (53 à 69 %). Leurs faibles teneurs en azote total (0,8 à 1,1 % pour les boues mixtes, et 0,6 à 0,8 % pour les composts) combinées aux rapports C/N relativement élevés (généralement supérieurs à 30) pourraient diminuer la disponibilité de l'azote aux plantes en provoquant une immobilisation temporaire de cet élément par la microflore du sol. En effet, une immobilisation nette de N a été observée suite à l'ajout de matière organique ayant des rapports C/N supérieurs à 25 et des teneurs en N inférieures à 1,5 % (Whitehead *et al.* 1989, Seneviratne 2000). Pour une meilleure croissance de la culture, un complément en azote minéral facilement disponible pourrait donc être nécessaire. Les amendements organiques étudiés présentaient également de faibles teneurs en phosphore et en potassium, mais ils étaient riches en calcium et en magnésium. Les boues mixtes et les composts utilisés contenaient aussi des quantités importantes en éléments mineurs.

### Rendements et prélèvements en azote (2001 et 2002)

Les apports de BF et de BC seules ont eu peu d'effet sur les rendements et la nutrition minérale en 2000 et les résultats ne sont pas présentés. Les rendements en maïs ensilage et les prélèvements en éléments nutritifs obtenus en 2001 et en 2002 sont

présentés aux tableaux 2 et 3. De manière générale, les apports de matières organiques combinés à la fertilisation azotée ont amélioré de façon significative les rende-

ments et la nutrition azotée du maïs ensilage. Cependant, ceux-ci étaient plus élevés pour les BF, comparativement aux applications de BC.

**Tableau 1. Propriétés des boues mixtes fraîches et compostées utilisées.**

Propriétés	Périodes d'application					
	Printemps 2000		Automne 2000		Automne 2001	
	BF <sup>u</sup>	BC <sup>v</sup>	BF	BC	BF	BC
Matière sèche (g kg <sup>-1</sup> de MF <sup>w</sup> )	369	370	280	400	363	406
pH (H <sub>2</sub> O 1:1)	7,45	8,14	7,4	6,8	6,07	7,01
C organique (g kg <sup>-1</sup> de MS <sup>x</sup> )	344	264	334	281	335	253
N total (g kg <sup>-1</sup> de MS)	8,0	7,8	11,3	7,6	7,2	5,9
Rapport C/N	43	34	25	32	47	43
<b>Éléments totaux</b>						
P total (g kg <sup>-1</sup> de MS)	0,78	0,74	1,15	1,15	1,03	1,39
K total (g kg <sup>-1</sup> de MS)	0,55	0,59	0,65	0,99	0,55	1,01
Ca total (g kg <sup>-1</sup> de MS)	29,2	24,1	30,8	23,6	34,0	27,2
Mg total (g kg <sup>-1</sup> de MS)	0,76	1,27	0,71	1,64	0,91	1,77
B (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	n.d. <sup>y</sup>	n.d.	7	13	2,8	7,2
Cu (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	130	86	154	115	177	237
Fe (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	1320	4025	1001	6704	1106	6312
Mn (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	84	224	93	266	88	249
Zn (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	98	315	n.d.	n.d.	124	305
Mo (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	n.d.	n.d.	5	5	4,5	2,4
Na (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	415	274	405	468	621	421
Ni (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	15	63	10	88	5,1	10,2
Cd (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	0,3	1,4	1	1	0,5	1,4
Cr (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	23	71	12	52	11,5	11,2
Co (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	1,6	2,3	1,0	2,0	3,2	33,7
Pb (mg kg <sup>-1</sup> de MS)	9,3	22,7	6	24	7	24,2

<sup>u</sup>BF = boues mixtes fraîches ; <sup>v</sup>BC = boues mixtes compostées ; <sup>w</sup>MF = matière fraîche

<sup>x</sup>MS = matière sèche ; <sup>y</sup>n.d. = non déterminé.

**Tableau 2. Effets des apports de boues mixtes fraîches et compostées et de l'engrais minéral N sur les rendements du maïs ensilage et les prélèvements en éléments majeurs (2001).**

Traitements	Rendements (t ha <sup>-1</sup> )	N	P	K (kg ha <sup>-1</sup> )	Ca	Mg
<b>Fréquence 1</b>						
Témoin	8,8	88,8	16,5	68,1	16,2	12,0
Fertilisation minérale N	14,7	166,5	28,9	144,1	40,0	23,5
<sup>v</sup> BF	10,7	116,3	18,9	83,5	21,3	16,0
<sup>v</sup> BC	8,5	74,9	16,6	60,3	15,9	12,3
<sup>v</sup> BFN	14,5	144,5	25,6	120,1	37,5	25,9
<sup>v</sup> BCN	14,3	128,7	27,8	124,4	32,5	24,1
<b>Fréquence 2</b>						
Témoin	8,5	81,1	15,1	74,3	17,5	11,4
Fertilisation minérale N	13,6	149,4	26,5	130,1	32,2	20,6
BF	11,1	118,5	20,0	85,7	22,8	15,0
BC	8,4	72,2	16,8	62,5	16,4	12,4
BFN	14,1	137,0	28,3	120,6	33,9	23,8
BCN	13,2	117,4	22,2	131,2	30,2	19,5
<b>Valeur F de l'analyse de variance</b>						
Traitements	37,0**	21,0**	11,6**	44,3**	69,9**	44,3**
Fréquence	1,4	1,6	0,5	0,0	3,8	7,4*
Traitements * fréquence	0,4	0,2	0,9	0,6	2,7	1,1
<b>Contrastes</b>						
Témoin vs autres	54,6**	24,0**	18,8**	44,3**	90,4**	69,2**
<sup>u</sup> FMN vs boues	20,7**	31,9**	10,8**	51,4**	63,6**	13,3**
(BF <sup>v</sup> + BFN <sup>w</sup> ) vs (BC <sup>x</sup> + BCN <sup>y</sup> )	11,3**	19,3**	2,3	2,7	22,0**	13,5**
BF vs BFN	29,2**	5,5*	11,7**	27,7**	77,4**	62,1**
BC vs BCN	69,8**	25,0**	14,3**	95,3**	95,9**	63,3**

\*, \*\* = différence significative au seuil de 0,05 et 0,01, respectivement

<sup>v</sup>BF = boues mixtes de papetières

<sup>w</sup>BFN = boues mixtes de papetières + 120 kg N ha<sup>-1</sup>

<sup>x</sup>BC = boues mixtes de papetières compostées

<sup>y</sup>BCN = boues mixtes de papetières compostées + 120 kg N ha<sup>-1</sup>

Fréquence 1 et 2 = apport annuel et un seul apport en 2000, respectivement.

En 2001, les apports de BF seules ont augmenté les rendements de 2,2 t ha<sup>-1</sup>, soit de 26 % par rapport au témoin. De même, ils ont augmenté de façon significative les prélèvements en N de 33 kg N ha<sup>-1</sup>, par rapport au témoin. Par contre, les apports de BC n'ont pas eu d'effet sur les rendements et ils ont réduit les prélèvements en N, par rapport au témoin (tableau 2). En 2002, les apports de BF et de BC ont augmenté les rendements du maïs ensilage de 2,1 et 0,6 t ha<sup>-1</sup> respectivement, par rapport au témoin (tableau 3).

Cependant, les augmentations des rendements et des prélèvements en N étaient plus élevées suite à la fertilisation minérale N complète (160 kg N ha<sup>-1</sup>), ce qui indique que la disponibilité de l'azote facilement assimilable était le principal facteur qui a limité la croissance et la production du maïs ensilage suite aux applications de ces matières organiques seules. Par contre, N'Dayegamiye *et al.* (2003) ont constaté que deux ou trois applications de boues mixtes seules à raison de 30 à 90 t ha<sup>-1</sup> sur un loam limoneux de la série Baudette produisaient des rendements de maïs-grain et des prélèvements en N plus élevés, comparativement à la fertilisation minérale complète. Ces effets sur les rendements en maïs-grain étaient attribuables aux faibles rapports C/N (13 à 15) et aux teneurs élevées en N des boues mixtes utilisées (N'Dayegamiye *et al.* 2003). Les résultats de notre étude indiquent que les apports de boues mixtes désencrées, fraîches ou compostées, ayant de faibles teneurs en azote (0,9 % sur base sèche) et des rapports C/N élevés (supérieurs à 30) ne peuvent pas suffisamment combler les besoins en N des cultures aussi exigeantes que le maïs ensilage.

Les faibles effets des apports de BC sur les rendements et la nutrition azotée des plantes sont en accord avec de nombreuses recherches qui ont rapporté une baisse des rendements et des prélèvements en N au cours des premières saisons culturales suite à l'application d'autres types de composts (Shiralipour *et al.* 1992, Warman 1998, Warman et Cooper 2000a et b). Ce n'est qu'après 6 ans d'applications de composts que Warman (1998) a observé des augmentations de rendements des cultures. Comme dans notre étude, ces résultats

**Tableau 3. Effets des apports de boues mixtes de papetières fraîches et compostées sur les rendements du maïs ensilage et les prélèvements en éléments majeurs (2002).**

Traitements	Rendements (t ha <sup>-1</sup> )	N P K Ca Mg				
		(kg ha <sup>-1</sup> )				
<b>Fréquence 1</b>						
Témoin	7,0	55,6	13,6	66,1	17,0	12,3
Fertilisation minérale N	12,4	128,7	23,6	116,9	39,7	24,9
vBF	8,7	75,8	18,6	70,0	23,6	17,8
wBC	7,3	59,8	15,6	60,2	19,0	15,3
xBFN	12,5	123,4	20,8	105,5	43,1	25,2
yBCN	12,8	126,7	23,6	123,3	36,9	26,4
<b>Fréquence 2</b>						
Témoin	6,4	47,5	13,3	53,3	16,3	11,9
Fertilisation minérale N	12,0	122,9	21,7	110,5	40,9	24,9
BF	8,9	78,5	17,8	71,3	23,7	18,5
BC	7,1	54,1	13,7	52,2	19,8	14,1
BFN	13,0	128,8	24,3	104,9	39,6	28,1
BCN	11,8	104,6	19,1	97,1	34,3	23,1
<b>Valeur F de l'analyse de variance</b>						
Traitements	45,1**	47,3**	13,4**	39,6**	42,9**	29,9**
Fréquence	0,6	1,9	1,2	6,4*	0,3	0,07
Traitements * fréquence	0,4	0,9	1,4	1,4	0,3	0,88
<b>Contrastes</b>						
Témoin vs autres	78,9**	78,8**	28,4**	46,1**	71,3**	63,9**
vFMN vs boues	17,7**	32,2**	7,9*	35,5**	30,7**	9,3**
(BF <sup>v</sup> + BFN <sup>w</sup> ) vs (BC <sup>x</sup> + BCN <sup>y</sup> )	6,1*	9,3**	4,7*	1,3	9,0**	5,7*
BF vs BFN	46,1**	47,6**	7,9*	33,4**	56,4**	29,4**
BC vs BCN	76,7**	68,4**	18,3**	81,8**	47,2**	41,2**

\*, \*\* = différence significative au seuil de 0,05 et 0,01, respectivement

vBF = boues mixtes de papetières

wBFN = boues mixtes de papetières + 120 kg N ha<sup>-1</sup>

xBC = boues mixtes de papetières compostées

yBCN = boues mixtes de papetières compostées + 120 kg N ha<sup>-1</sup>

Fréquence 1 et 2 = apport annuel et un seul apport en 2000, respectivement.

**Tableau 4. Effets résiduels des apports de boues mixtes de papetières fraîches et compostées sur le rendement en maïs ensilage et les prélèvements en éléments minéraux majeurs (2003).**

Traitements	Rendements (t ha <sup>-1</sup> )	N P K Ca Mg				
		(kg ha <sup>-1</sup> )				
<b>Fréquence 1</b>						
Témoin	12,4	139	30,3	114,0	26,5	20,4
Fertilisation minérale N	13,6	163	30,9	128,0	34,8	24,0
vBF	14,2	165	32,6	106,0	38,2	29,5
wBC	13,4	151	34,4	113,0	31,2	27,0
xBFN	14,1	164	35,2	114,0	35,5	28,9
yBCN	14,6	176	37,3	133,0	31,8	27,6
<b>Fréquence 2</b>						
Témoin	13,6	155	36,5	121,0	30,7	24,2
Fertilisation minérale N	14,0	163	34,5	120,0	31,1	24,7
vBF	14,4	173	35,4	118,0	37,1	30,6
wBC	11,8	137	30,2	99,0	30,2	22,7
xBFN	14,2	166	33,8	120,0	32,0	26,7
yBCN	13,9	164	35,5	118,0	33,0	27,2
<b>Valeur F de l'analyse de la variance</b>						
Traitements	1,16	1,52	0,68	2,68	2,07	4,30*
Fréquence	0,39	0,00	0,34	0,41	0,14	0,04
Traitements * fréquence	0,39	1,22	1,22	1,72	0,49	1,09
<b>Contrastes</b>						
Témoin vs autres	0,01	2,35	0,08	0,01	4,43*	9,64**
FMN vs boues	0,00	0,02	0,66	3,07	0,08	4,32
(BF + BFN) vs (BC + BCN)	1,81	1,17	0,00	0,10	3,87	4,28
BF vs BFN	0,03	0,10	0,05	0,57	1,67	1,42
BC vs BCN	3,93	3,96	2,63	9,63**	0,31	1,85

\*, \*\* = différence significative au seuil de 0,05 et 0,01, respectivement

vFMN = fertilisation minérale N (160 kg N ha<sup>-1</sup>)

vBF = boues mixtes de papetières

wBFN = boues mixtes de papetières + 120 kg N ha<sup>-1</sup>

xBC = boues mixtes de papetières compostées

yBCN = boues mixtes de papetières compostées + 120 kg N ha<sup>-1</sup>

Fréquence 1 et 2 = trois apports en 2000, 2001 et 2002 et un seul apport en 2000, respectivement.

**Tableau 5. Effets résiduels des apports de boues mixtes de papetières fraîches et compostées sur le rendement en grains de l'orge et ses prélèvements en éléments minéraux majeurs (2004).**

Traitements	Rendements (t ha <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg
		(kg ha <sup>-1</sup> )				
<b>Fréquence 1</b>						
Témoin	2,4	37,13	9,1	11,1	1,2	2,8
Fertilisation minérale N	2,3	34,37	8,3	10,2	1,1	2,6
Boues mixtes	3,3	51,37	12,0	14,6	1,6	3,6
Boues compostées	2,8	43,9	10,3	12,9	1,4	3,2
Boues mixtes + N	3,1	48,56	11,5	13,9	1,6	3,5
Boues compostées + N	2,7	43,36	10,2	12,7	1,4	3,1
<b>Fréquence 2</b>						
Témoin	2,4	37,37	9,2	11,4	1,3	2,8
Fertilisation minérale N	2,5	38,08	8,9	11,1	1,3	2,7
Boues mixtes	2,8	43,51	10,2	12,7	1,4	3,2
Boues compostées	2,8	43,59	10,5	13,0	1,5	3,2
Boues mixtes + N	2,8	44,6	10,5	13,1	1,5	3,3
Boues compostées + N	3,1	47,3	11,2	13,8	1,5	3,5
<b>Valeur F de l'analyse de la variance</b>						
Traitements	3,96*	3,33	3,78	3,99*	3,99*	4,15*
Fréquence	0,06	0,10	0,11	0,03	0,10	0,03
Traitements * fréquence	0,97	0,74	0,95	0,77	0,92	0,74
<b>Contrastes</b>						
Témoin vs autres	5,92*	5,18*	4,43*	4,91*	5,27*	4,99*
FMN <sup>u</sup> vs boues	12,19**	10,35**	13,55**	14,29**	13,46**	14,74**
(BF <sup>v</sup> + BFN <sup>w</sup> ) vs (BC <sup>x</sup> + BCN <sup>y</sup> )	1,23	0,86	0,77	0,58	0,70	0,83
BF vs BFN	0,21	0,05	0,04	0,03	0,37	0,02
BC vs BCN	0,26	0,18	0,14	0,12	0,12	0,15

\*, \*\* = différence significative au seuil de 0,05 et 0,01, respectivement

<sup>u</sup>FMN = fertilisation minérale N (160 kg N ha<sup>-1</sup>)

<sup>v</sup>BF = boues mixtes de papetières

<sup>w</sup>BFN = boues mixtes de papetières + 120 kg N ha<sup>-1</sup>

<sup>x</sup>BC = boues mixtes de papetières compostées

<sup>y</sup>BCN = boues mixtes de papetières compostées + 120 kg N ha<sup>-1</sup>

Fréquence 1 et 2 = trois apports en 2000, 2001 et 2002 et un seul apport en 2000, respectivement.

reflètent la faible teneur des BC en azote total, en particulier l'azote facilement minéralisable et disponible aux cultures. Il ressort que les matières organiques fraîches ou compostées contenant moins de 1 % d'azote doivent être supplémentées en N pour prévenir l'immobilisation de l'azote dans le sol (Barker 1997).

En effet, les rendements et les prélèvements en N les plus élevés ont été obtenus suite aux apports de BF et de BC complémentées avec une dose réduite d'engrais minéral N (120 kg N ha<sup>-1</sup>) (tableaux 2 et 3). En 2001, les apports de BF et de BC combinées avec l'engrais minéral N ont augmenté les rendements de 5,7 et 5,1 t ha<sup>-1</sup> respectivement, par rapport au témoin. L'année suivante, les apports de BF et de BC combinées avec l'engrais minéral N ont augmenté les rendements de 6,0 et 5,6 t ha<sup>-1</sup>, ce qui représentait 91 et 84 % respectivement, par rapport au témoin. Ces augmentations de rendements étaient comparables, voire plus importantes que celles obtenues suite à la fertilisation complète en N (tableaux 2 et 3). De même, l'ajout d'engrais minéral N aux apports de BF et de BC

a augmenté de façon significative les prélèvements en N. Ces résultats démontrent que les apports de BF et de BC ont amélioré l'efficacité des engrais N et permis de réduire de 40 kg N ha<sup>-1</sup> la dose d'azote requise pour une croissance et une nutrition optimales du maïs ensilage. De même, Paré *et al.* (1993) et Abdallahi et N'Dayegamiye (2000) ont démontré que l'incorporation des engrais verts pouvait permettre de réduire de 30 à 60 kg N ha<sup>-1</sup> les quantités d'engrais minéral recommandées pour les cultures de maïs ensilage ou de blé.

Cette synergie entre les matières organiques apportées au sol et les engrais minéraux est généralement attribuable à une meilleure synchronisation de la disponibilité et des besoins en éléments nutritifs de la culture (Saviozzi *et al.* 1993). En effet, l'engrais minéral N répond aux besoins immédiats des cultures et stimule la décomposition des matières organiques apportées ou endogènes du sol ainsi qu'une libération subséquente des éléments nutritifs au fil de l'évolution des besoins des cultures pendant la période de

croissance (Shiralipour *et al.* 1992, Myers *et al.* 1994, Bhattacharyya *et al.* 2003). Selon Palm *et al.* (1997). La combinaison des matières organiques et de l'azote minéral ne peut toutefois pas augmenter l'efficacité d'utilisation de l'engrais minéral N que si les apports de matières organiques ont amélioré les conditions physiques du sol, telles que la structure et la capacité de rétention en eau, favorisant ainsi la croissance des racines et une meilleure absorption des éléments nutritifs contenus dans le sol.

Contrairement à la présente étude, d'autres recherches ont rapporté des effets positifs de boues mixtes de papetières appliquées seules sur les rendements et la nutrition azotée des cultures (Arafaoui *et al.* 2001, Simard 2001, N'Dayegamiye *et al.* 2003, 2004b). Ces auteurs ont attribué ces effets à la teneur élevée de ces matières organiques en N. Les faibles teneurs en N des BF et des BC étudiées (tableau 1) suggèrent plutôt que leurs effets sur la production et la nutrition azotée des plantes sont en grande partie attribuables à leur action positive sur la structure (Bipfubusa *et al.* 2005) et les activités biologiques et enzymatiques du sol (Gagnon *et al.* 2000, Lalande *et al.* 2003, N'Dayegamiye *et al.* 2004a). Des augmentations de rendements des cultures variant entre 10 et 25 % ont également été attribuées à l'effet non azoté des fumiers sur la productivité des sols (Magdoff et Amadon 1980). De même, des améliorations de la productivité des sols suite à l'incorporation des engrais verts (McRae et Mehuy 1985, Paré *et al.* 1993, Abdallahi et N'Dayegamiye 2000, N'Dayegamiye et Tran 2001) ont essentiellement été reliées à l'amélioration des propriétés du sol. Dans la présente étude, les effets indirects des apports de BF et de BC expliqueraient également le fait que les apports annuels des deux types d'amendements organiques n'aient pas généré de différence significative des rendements du maïs ensilage, ni des prélèvements en N, en comparaison avec les applications triennales (tableaux 2 et 3).

### Prélèvements en P, K, Ca et Mg (2001 et 2002)

Le sol, les BF et les BC apportés étaient riches en Ca et en Mg; mais ces amendements organiques étaient pauvres en P et en K.

Ainsi, les mêmes quantités d'engrais minéraux  $P_2O_5$  (60 kg P ha<sup>-1</sup>) et  $K_2O$  (100 kg K ha<sup>-1</sup>) ont été appliquées annuellement de 2000 à 2002 dans tous les traitements, afin de satisfaire les besoins de la culture. En 2001 et 2002, les apports de BF seules ont augmenté de façon significative les prélèvements de la culture en P, en K, en Ca et en Mg, par rapport au témoin (tableaux 2 et 3). Ces augmentations étaient toutefois faibles comparativement à celles obtenues suite à la fertilisation minérale complète en azote. Contrairement aux apports de BF, les applications de BC sans ajout de N n'ont pas eu d'effet sur les prélèvements en P, Ca et Mg; ils ont même réduit la quantité de K absorbé par la plante en 2001, par rapport au témoin (tableau 2).

Ces résultats indiquent que la disponibilité de l'azote facilement assimilable par les plantes est le facteur qui a limité l'absorption d'autres éléments nutritifs du sol suite à des apports de ces matériaux organiques, notamment les BC. Les faibles prélèvements du maïs ensilage en éléments nutritifs majeurs suite aux apports de BC résultent vraisemblablement de l'azote stable du compost qui se minéralise lentement dans le sol. La culture du maïs ensilage étant très exigeante en N, la carence de cet élément a considérablement réduit les niveaux d'absorption d'autres éléments nutritifs dans les sols ayant reçu des apports de BC, en comparaison avec les apports de BF. Il ressort que les apports de BF et de BC pauvres en N doivent être complétés en azote afin d'optimiser l'absorption des autres éléments minéraux par la plante et par conséquent, les rendements de la culture.

Au cours des deux années, les prélèvements les plus élevés du maïs ensilage en P, K, Ca et Mg ont en effet été obtenus suite à la combinaison des apports de BF et de BC avec une dose réduite d'engrais minéral N (120 kg N ha<sup>-1</sup>) (tableaux 2 et 3). Ces effets positifs de la combinaison de ces matières organiques avec l'engrais minéral N ont une grande importance agronomique. En effet, une disponibilité élevée d'azote pour les cultures stimule le développement de leur système racinaire et par conséquent, une plus grande absorption d'autres éléments minéraux du sol résultant en une amélioration de la croissance et du rendement

des cultures (Wild et Jones 1988). Les effets positifs des apports de BF et de BC sur les prélèvements en Ca et Mg peuvent aussi être reliés à leurs teneurs élevées en Ca et Mg (tableau 1) qui étaient essentiellement sous formes facilement solubles.

Les apports annuels de BF et de BC ont augmenté de façon significative ( $P < 0,05$ ) les prélèvements en K et Mg, mais leurs effets sur les prélèvements en P et Ca n'étaient pas significatifs, comparativement aux apports triennaux (tableaux 2 et 3). Ces résultats peuvent être reliés aux teneurs élevées du sol en K et Mg et aussi au fait que ces deux éléments se trouvent dans les résidus organiques et dans les composts sous forme minérale facilement échangeable (Barker 1997, Bar-Tal *et al.* 2004). Par ailleurs, les applications de matières organiques peuvent accroître la mobilité et la disponibilité des éléments nutritifs du sol suite à la production d'acides aliphatiques à faible poids moléculaires tels que l'acide acétique, l'acide formique et l'acide oxalique qui améliorent la mobilité et la disponibilité des éléments nutritifs (Baziramakenga et Simard 1998).

### Effets résiduels des apports de boues mixtes et de leurs composts

Aucun apport de BF ni de BC n'a été effectué en 2003 et des quantités identiques d'engrais minéraux, soit 160 kg N ha<sup>-1</sup>, 100 kg  $K_2O$  ha<sup>-1</sup> et 60 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> ont été appliquées dans tous les traitements selon les besoins de la culture du maïs ensilage. Les niveaux de rendements en maïs ensilage ont varié de 11,8 à 14,6 t ha<sup>-1</sup> (tableau 4). Les effets résiduels des apports de BF et de BC seuls n'étaient pas significatifs au niveau des rendements en maïs ensilage. Néanmoins, trois apports annuels antérieurs de BF et de BC combinées avec l'engrais minéral N ont augmenté les rendements du maïs ensilage de 1,2 à 1,3 t ha<sup>-1</sup>. De faibles rendements du maïs ensilage ont été observés avec les effets résiduels des apports de BC sans ajout de N, ces derniers ayant réduit les rendements de maïs ensilage de 14 % en moyenne, par rapport au témoin (tableau 4).

Les effets résiduels des apports de BF et de BC n'étaient pas significatifs au niveau des prélèvements en N, P et K du maïs ensilage. Cependant, ils ont augmenté de façon

significative les prélèvements en Ca et Mg, comparativement au témoin (tableau 4); ce qui peut être lié au contenu élevé de ces matériaux en ces deux éléments minéraux (tableau 1). Les analyses statistiques n'ont pas montré de différence significative entre les effets résiduels des apports annuels (trois apports) et des apports triennaux (un apport) des deux types de matière organique sur les rendements du maïs ensilage, ni sur les prélèvements en éléments minéraux majeurs (tableau 4).

En 2004, toutes les parcelles expérimentales ont été fertilisées avec 80 kg N ha<sup>-1</sup>, 60 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> et 80 kg  $K_2O$  ha<sup>-1</sup> pour la culture d'orge. Les effets résiduels des apports de BF et de BC ont augmenté de façon significative ( $P < 0,05$ ) les rendements en grains d'orge et les prélèvements en éléments minéraux majeurs (N, P, K, Ca et Mg), comparativement aux applications répétées de la fertilisation minérale N complète et au témoin (tableau 5). En comparaison avec le témoin, les augmentations moyennes des rendements en orge ont varié de 364 à 621 kg de grains ha<sup>-1</sup>, soit de 13 à 35 %, par rapport au témoin.

Il ressort que les effets résiduels des apports de BF et de BC sur les rendements et la nutrition minérale des cultures ont été plus importants pour l'orge, en comparaison avec le maïs. Ces différences peuvent être liées aussi bien à leurs exigences nutritives, notamment en N, mais aussi au mode de disposition spatiale de leurs racines. En effet, celle-ci influence l'efficacité des systèmes racinaires des plantes à utiliser l'eau et les éléments minéraux du sol (Tardieu et Manichon 1987). L'orge pourrait avoir une faculté plus forte de colonisation du sol que le maïs, comme c'est le cas pour le blé (Nicoulaud *et al.* 1995), et cela lui aurait permis une absorption intense de l'eau et des éléments minéraux. Les résultats de notre étude sont en accord avec les observations de N'Dayegamiye *et al.* (2004a) qui ont montré des effets résiduels importants suite à deux applications de boues mixtes et de fumiers solides de bovins sur la production d'orge sur un loam sableux.

Les effets résiduels des apports annuels et triennaux des deux types d'amendements organiques sur les rendements en orge et

les prélèvements en éléments minéraux n'étaient pas statistiquement différents (tableau 5). Cela suggère que l'effet n'était pas seulement dû à l'accumulation des éléments nutritifs, mais à l'amélioration des conditions de sol favorables à la croissance des racines et donc à l'absorption des éléments minéraux du sol. En effet, l'importance de l'état structural du sol pour la production de l'orge a été démontrée dans plusieurs études. Dans des essais combinant différents niveaux d'engrais N et différentes structures de sols, Wibawa (1992) a en effet démontré que l'absorption de l'azote par l'orge de printemps était particulièrement réduite dans des sols compactés.

Les résultats de notre étude montrent qu'un seul apport de boues mixtes et de leurs composts a pu maintenir des niveaux de rendements et des prélèvements en éléments nutritifs élevés de l'orge à la quatrième année après application. Ces observations sont en accord avec les résultats de nombreuses recherches qui ont montré que les effets résiduels des applications de fumiers et de leurs composts sur les rendements des cultures et les propriétés du sol pouvaient durer plusieurs années après l'arrêt de leurs applications au sol (Murwira 1979, Eghball *et al.* 2004).

## Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que des applications de boues mixtes fraîches et compostées ayant de faibles teneurs en N, P et K et des rapports C/N supérieurs à 30 peuvent optimiser la productivité du sol si elles sont combinées avec une dose réduite d'engrais minéral N. Par ailleurs, ils ont démontré que les apports de ces matières organiques ont permis des réductions importantes de la fertilisation minérale azotée, probablement grâce à leurs effets positifs sur la structure du sol, tel que mesuré dans cette recherche. L'influence sur les rendements et la nutrition minérale des cultures était identique pour les apports annuels et triennaux. Les effets résiduels des apports de boues mixtes fraîches et compostées sur la productivité du sol peuvent demeurer importants pendant plusieurs années suivant leurs dernières applications au sol. Cette étude démontre que la valeur

agronomique des matières organiques étudiées consiste non seulement dans leur aptitude à fournir des éléments nutritifs aux plantes, mais également dans leur capacité à améliorer les propriétés du sol propices à la croissance des plantes et des micro-organismes du sol.

## Références

- Abdallahi, M.M. et A. N'Dayegamiye. 2000. Effets de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement et la nutrition en azote du blé (*Triticum aestivum* L.), ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Can. J. Soil Sci.* 80 : 81-89.
- Amato, M., J.N. Ladd, A. Ellington, G.M. Ford, J.E. Mahoney, A.C. Taylor et D. Walscott. 1987. Decomposition of plant material in Australian soils. IV. Decomposition *in situ* of <sup>14</sup>C-labelled legume and wheat materials in a range of Southern Australian soils. *Aust. J. Soil Res.* 25: 95-105.
- Arfaoui, M.A., R.R. Simard, G. Bélanger, M.R. Laverdière et R. Chabot. 2001. Mixed papermill residues affect yield, nutritive value and nutrient use of a grass-alfalfa sward. *Can. J. Soil Sci.* 81: 103-111.
- Barker, A.V. 1997. Composition and use of compost. *In* Rechcigl, J.E. and MacKinnon, H.C. (eds). *Agricultural uses of by-products and wastes*. American Chemical Society, Washington, D.C., pages 140-162.
- Bar-Tal, A., U. Yermiyahu, J. Beraud, M. Keinan, R. Rosenberg, D. Zohar, V. Rosen et P. Fine. 2004. Nitrogen, phosphorus, and potassium uptake by wheat and their distribution in soil following successive, annual compost applications. *J. Environ. Qual.* 33: 1855-1865.
- Baziramakenga, R. et R.R. Simard. 2001. Effect of de-inking paper sludge compost on nutrient uptake and yields of snap bean and potatoes grown in rotation. *Compost Science & Utilization* 9 (2): 115-126.
- Beauchamp, E.G. 1986. Availability of nitrogen from three manures to corn in the field. *Can. J. Soil Sci.* 66: 713-720.
- Beauchemin, S., A. N'Dayegamiye et M. R. Laverdière. 1990. Effects of fresh and humified wood residues on potato yields and on the availability of nitrogen in a sandy soil. *Can. J. Soil Sci.* 70: 555-564.
- Bhattacharyya, P., A. Chakraborty, B. Bhattacharya et K. Chakrabarti. 2003. Evaluation of MSW compost as a component of integrated nutrient management in wetland rice. *Compost Science & Utilization* 11: 343-350.
- Bipfubusa, M., A. N'Dayegamiye et H. Antoun. 2005. Effets des boues mixtes de papeteries fraîches et compostées sur l'agrégation du sol, l'inclusion et la minéralisation du carbone dans les macro-agrégats stables à l'eau. *Can. J. Soil Sci.* 85 : 47-55.
- Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94: 38-47.
- Conseil des productions végétales du Québec inc., (CPVQ), 1989. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. AGDEX 533.
- Edwards, J.H. 1997. Composition and use of uncomposted wastepaper and other organics. *In* Rechcigl, J.E. and MacKinnon, H.C. (eds). *Agricultural uses of by-products and wastes*. American Chemical Society, Washington, D.C. pages 163-184.
- Eghball, B., D. Ginting et J.E. Gilley. 2004. Residual effects of manure and compost applications on corn productions and soil properties. *Agron. J.* 96: 442-447.
- Fierro A., D.A. Angers et C.J. Beauchamp. 1999. Restoration of ecosystem function in an abandoned sandpit: plant and soil responses to paper de-inking sludge. *J. Appl. Ecol.* 36:244-253.
- Gagnon, B., R. Lalande, R.R. Simard et M. Roy. 2000. Soil enzyme activities following paper sludge addition in a winter cabbage-sweet corn rotation. *Can. J. Soil Sci.* 80: 91-97.

- Giller, K.E., G. Cadish, C. Ehaliotis, E. Adams, W.D. Sakal et P.L. Mafongoya. 1997. Building soil nitrogen capital in Africa. *In*: Buresh, R.J., Sanchez, P.A. and Calhoun, F. (eds). Resplenishing soil fertility in Africa. SSSA Special Publication Number 51, p. 151-192.
- Isaac, R.A. et W.C. Johnson. 1980. Determination of total nitrogen on plant tissues using BD-40 digestion. *J. Assoc. Off. Anal.* 50: 98-100.
- Lalande, R., B. Gagnon et R.R. Simard. 2003. Papermill biosolid and hog manure compost affect short-term biological activity and crop yield of a sand soil. *Can. J. Soil Sci.* 83: 353-362.
- Magdoff, F.R. et J.F. Amadon. 1980. Yield trends and soil chemical changes resulting from manure applications to continuous corn. *Agron. J.* 72: 161-164.
- McRae, R. et G.R. Mehuys. 1985. The effects of green manuring on the physical properties of temperate-area soils. *In*: Stewart, B.A. (ed.). *Advances in soil science*. Volume 3. p. 71-94.
- Murwira, L.M. 1979. Residual effects of dairy manure on millet and rye forage and soil properties. *J. Environ. Qual.* 8: 251-255.
- Myers, R.J.K., C.A. Palm, E. Cuevas, I.U.N. Gunatilleke et M. Brossard. 1994. The synchronisation of nutrient mineralization and plant nutrient demand. *In*: Woerner, P.L. and Swift, M.J. (eds). *The biological management of tropical soil fertility*. John Wiley & Sons, New York, pages 81-116.
- N'Dayegamiye, A., A. Drapeau, S. Huard et Y. Thibault. 2004a. Intégration de boues mixtes et de fumiers dans des rotations agricoles : réponse des cultures et interactions avec les propriétés du sol. *Agrosol* 15 (2) : 83-90.
- N'Dayegamiye, A. et T.S. Tran. 2001. Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition. *Can. J. Soil Sci.* 81: 371-382.
- N'Dayegamiye, A., M. Giroux et R. Royer. 2004b. Épandages 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., S. Huard et Y. Thibault. 2003. Influence of paper mill sludges on corn yields and N recovery. *Can. J. Soil Sci.* 83 : 497-505.
- N'Dayegamiye, A., R. Royer et P. Audesse. 1997. Nitrogen-mineralization and availability in manure composts from Quebec biological farms. *Can. J. Soil Sci.* 77: 345-350.
- Nicoulaud, B., R. Darthout et O. Duval. 1995. Étude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. *Étude et gestion des sols* 2 (3) :183-200.
- Palm, C.A., J.K. Myers et S.M. Nandwa. 1997. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. *In*: Buresh, R.J., Sanchez, P.A. and Calhoun, F. (eds). *Resplenishing soil fertility in Africa*. SSSA Special Publication Number 51, p. 193-217.
- Paré, T., F.P. Chalifour, J. Bourassa et H. Antoun. 1993. Forage-corn production and N-fertilizer replacement values following 1 or 2 years of legume. *Can. J. Plant Sci.* 72: 461-476.
- SAS Institute, Inc. 1985. *SAS user's guide*. Statistics. Version 5 ed. SAS Institute, Inc. Cary, NC.
- Seneviratne, G. 2000. Litter quality and nitrogen release in tropical agriculture: a synthesis. *Biol. Fertil. Soils* 31: 60-64.
- Shiralipour, A., D.B. McConnell et W.H. Smith. 1992. Uses and benefits of MSW compost: a review and an assessment. *Biomass and Bioenergy* 3: 267-279.
- Simard, R.R. 2001. Combined primary/secondary papermill sludge as a nitrogen source in a cabbage-sweet corn cropping sequence. *Can. J. Soil Sci.* 81: 1-10.
- Simard, R.R., J. Coulombe, R. Lalande, B. Gagnon et S. Yelle. 1998. Use of fresh and composted de-inking sludge in cabbage production. *In*: Brown *et al.* (eds). *Beneficial co-utilization of agricultural, municipal and industrial by-products*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, p. 349-361.
- Tardieu, F. et H. Manichon. 1987. État structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie* 7 : 201-211.
- Warman, P.R. 1998. Effects of fertilizer, pig manure and sewage sludge on timothy soils. *J. Environ. Qual.* 15: 95-100.
- Warman, P.R. et J.M. Cooper. 2000a. Fertilization of a mixed forage crop with fresh and composted chicken manure and NPK fertilizer: effects on dry matter yield and soil and tissue N, P, and K. *Can. J. Soil Sci.* 80: 337-344.
- Warman, P.R. et J.M. Cooper. 2000b. Fertilization of a mixed forage crop with fresh and composted chicken manure and NPK fertilizer: effects on soil and tissue Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn and Zn. *Can. J. Soil Sci.* 80: 345-352.
- Whitehead, D.C., A.W. Bristow et B.F. Pain. 1989. The influence of some cattle and pig slurries on the uptake of nitrogen by rye grass in relation to fractionation of the slurry N. *Plant and Soil* 117: 111-120.
- Wibawa, G. 1992. Approche, par enquête et expérimentation, de l'effet de l'état structural du sol sur la nutrition azotée et l'élaboration du rendement de l'orge de brasserie. Thèse de Doctorat, INA PG, Paris.
- Wild, A. et L.H.P.Jones. 1988. Mineral nutrition of crop plants. *In* Wild, A. (ed). *Russel's soil conditions and plant growth*. 11<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, New York, pages 69-112.