

**EFFETS BÉNÉFIQUES DES BOUES MIXTES  
APPLIQUÉES FRAÎCHES OU SOUS FORME  
DE COMPOSTS SUR LE POTENTIEL DE  
FERTILITÉ DES SOLS EN GRANDES CULTURES**

**RAPPORT DE RECHERCHE**

Recherche en partenariat entre l'IRDA et Les COMPOSTS DU QUÉBEC inc.



**Sainte-Foy**

**juillet 2004**





## **ÉQUIPE DE RECHERCHE**

### **Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)**

**Adrien N'Dayegamiye, Ph.D., agr.** : responsable scientifique du projet, coordination, rédaction du rapport.

**Anne Drapeau** : assistance technique au champ, compilation des données, traitements statistiques, participation à la rédaction du rapport.

**Michel Noël** : participation à l'établissement du protocole, opérations mécanisées au champ.

### **Les composts du Québec inc.**

**Julie Desforges, agr. M.Sc.** : coresponsable du projet, communication des résultats.



## RÉSUMÉ

En fonction de leurs caractéristiques, les matières organiques peuvent rapidement améliorer les propriétés et la fertilité des sols. Cette recherche de quatre ans (2000-2003) a porté sur la valorisation en grandes cultures de boues mixtes (mélanges 3 : boues primaires et secondaires, boues désencrées) de la papetière Stadaconna, appliquées fraîches ou sous forme de composts. Le dispositif expérimental était constitué de parcelles subdivisées, avec six traitements en parcelles principales et deux fréquences d'application (annuelle et triennale) en parcelles secondaires. Les six traitements principaux consistaient en témoin, fertilisation azotée recommandée pour le maïs-ensilage (160 kg N/ha), boues mixtes et composts (40 t/ha sur base humide), appliqués seuls ou combinés avec une dose réduite d'azote (120 kg N/ha). De façon générale, les applications de boues mixtes et de composts sans complément d'engrais azoté ont augmenté significativement les rendements en maïs, en comparaison avec le témoin sans engrais ni amendements organiques. Cependant, les rendements ont été plus faibles pour les composts appliqués sans engrais, probablement à cause de leur plus faible disponibilité en azote. Les apports de boues mixtes et de composts, avec la fertilisation minérale (120 kg N/ha), ont permis d'obtenir les augmentations les plus élevées en maïs (>60%), celles-ci étant similaires ou supérieures à la fertilisation minérale complète (160 kg N/ha), selon les années. Par ailleurs, la nutrition en éléments majeurs et mineurs de la culture était significativement accrue par l'incorporation au sol de ces matières organiques. Les applications annuelles de ces matières organiques (trois incorporations) n'ont pas généré de différences significatives de rendements en maïs, en comparaison avec une seule application, ce qui suggère que leur influence sur la productivité est principalement attribuable à l'amélioration des propriétés du sol. En effet, les apports de boues mixtes et de composts ont doublé, dès la première année (2000), les proportions de macro-agrégats supérieurs à 2 mm, et augmenté les agrégats stables à l'eau (DMP), en comparaison avec le témoin et le sol avec engrais minéral sans amendement organique. Toutefois, les apports de ces matières organiques n'ont pas influencé de façon significative la capacité de rétention en eau du sol. Les apports de boues mixtes et de composts ont augmenté de 19 à 41% les teneurs du sol en matière organique, selon les traitements. Au niveau environnemental, nous avons observé que des apports répétés de ces amendements organiques n'ont pas enrichi les sols en nitrates, en phosphore biodisponible ou total, ni en métaux lourds (Cu, Pb, Cd et Zn). Cette étude a démontré que grâce à leur interaction significative avec les propriétés du sol, les boues mixtes et les composts valorisés peuvent rapidement contribuer à la hausse de la productivité et de la qualité des sols agricoles ou horticoles.



## **TABLE DES MATIÈRES**

1. PROBLÉMATIQUE.....	9
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	11
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	
3.1. Rendements et concentrations en éléments majeurs et mineurs.....	13
3.2. Propriétés du sol.....	17
4. ASPECT ENVIRONNEMENTAL	
4.1 Concentrations du maïs en éléments majeurs, mineurs et traces.....	23
4.2. Teneurs du sol en éléments minéraux.....	25
5. CONCLUSION.....	27
6. BIBLIOGRAPHIE.....	29
7. ANNEXE.....	31





## 1. PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

La matière organique, la structure et les activités biologiques constituent les principales composantes de la productivité et de la qualité des sols. C'est pourquoi les pertes de matière organique et la dégradation de la structure du sol ont conduit à la diminution de la fertilité des sols intensivement cultivés, sans retours de matières organiques. En effet, selon l'inventaire des terres agricoles du Québec, près de 50% des superficies cultivées, soit près de 252 000 des 485 000 ha inventoriés, démontraient une baisse importante du niveau de la matière organique (Tabi et al. 1990). La diminution des teneurs en matière organique de ces sols les rendaient par conséquent susceptibles à la compaction, à l'érosion hydrique ainsi qu'à la perte de la stabilité des agrégats. Tous ces facteurs ont contribué à la baisse de la productivité de ces sols, compromettant ainsi les niveaux de rendements et la qualité des récoltes.

Les rotations des cultures sont recommandées comme une importante régie agricole visant à maintenir ou à améliorer la qualité et la productivité des sols. Cependant, celles-ci ne réussissent pas à elles seules, à relever les niveaux de matière organique des sols, car elles sont souvent de trop courte durée ou encore, elles n'apportent pas de résidus organiques en quantités suffisantes pour rétablir l'équilibre humique du sol (N'Dayegamiye et Clément 1998). C'est pourquoi il est nécessaire d'apporter au sol des amendements organiques, afin de maintenir ou d'améliorer les propriétés des sols reliés à la productivité.

Il a été démontré que les apports réguliers de fumiers solides de bovins sous une rotation déficiente en bilan humique (maïs-ensilage-blé-orge), amélioraient les propriétés physiques et biologiques du sol, augmentaient les niveaux de matière organique et par conséquent les productions de maïs, de blé et d'orge (N'Dayegamiye 1996 ; Estevez et al. 1996). Cependant, les quantités de fumiers n'étant pas suffisantes pour couvrir les besoins agricoles, d'autres sources d'amendements organiques sont ainsi de plus en plus utilisées, dont les boues mixtes de papetières.

La valorisation croissante de boues mixtes de papetières en agriculture est justifiée par leur richesse en matière organique et en éléments nutritifs majeurs et mineurs. Des études récentes conduites dans plusieurs régions du Québec sur les cultures de maïs-grain, maïs sucré, céréales, pomme de terre, choux et prairies (Simard 2001 ; N'Dayegamiye et al. 2001 ; N'Dayegamiye et al. 2003 ; Gagnon et al. 2004) ont permis de démontrer que les boues mixtes de papetières avaient une valeur fertilisante élevée et amélioraient très rapidement les productions des cultures.

Une importante quantité des boues mixtes de papetières est également compostée. Le compostage de ces résidus papetiers diminue les volumes massiques et permet la concentration de la matière organique et la génération de l'humus. La compagnie **Les composts du Québec inc.** produit des composts à partir de mélanges de boues primaires, secondaires et désencrées (**mélanges trois**) produites par la papetière Stadaconna. Simard (2000) a rapporté que la valorisation de composts produits à partir de boues désencrées avaient également augmenté les rendements du chou d'hiver, de haricot sec et de pomme de terre.

La connaissance de la valeur fertilisante des boues mixtes et des composts et de leur interaction sur les propriétés du sol est nécessaire pour favoriser leur gestion efficace en productions agricoles et horticoles. Cependant, la valeur fertilisante et les effets de ces amendements organiques sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques dépendent fortement de leur composition chimique.

La minéralisation de l'azote et la disponibilité de cet élément aux plantes est reliée aux rapports C/N et à la forme d'azote. Les boues mixtes ayant de faibles rapports C/N (<20) présentent des coefficients d'efficacité en azote élevée (N'Dayegamiye et al. 2001), comparables aux fumiers solides de bovins (CRAAQ 2003) et aux engrais verts (N'Dayegamiye et Tran 2001). Il est possible que certaines autres boues mixtes produites qui présentent des rapports C/N élevés (25- 30), et les composts ayant l'azote stabilisé dans les substances humiques, présentent une plus faible disponibilité en azote pour les cultures. Toutefois, les effets de ces matières organiques sur la productivité des sols peuvent ne pas dépendre principalement de leur valeur fertilisante, mais également de leurs effets sur la structure, la rétention en eau et la température du sol, qui favorisent une meilleure croissance des microorganismes du sol et des plantes.

Dans la formation de la structure du sol, les processus d'agrégation dépendent des quantités de C minéralisables apportées au sol, qui stimulent la croissance de la microflore du sol et les activités biologiques. Une étude comparant différentes matières organiques résiduelles (boues municipales, boues mixtes de papetières et composts de résidus municipaux) a indiqué que les taux de leur minéralisation et leurs effets sur la formation de la structure étaient reliées à leur contenu en cellulose, qui est un complexe moléculaire facilement minéralisable (Watt 2001). Des études récentes ont démontré une amélioration rapide de la structure du sol, et une croissance significative des activités biologiques et enzymatiques suite aux incorporations de cinq types d'engrais verts (Abdallahi et N'Dayegamiye 1999) et aux apports de fumiers solides de bovins (Estevez et al. 1996). Ces matériaux organiques présentent des teneurs élevées en cellulose. Par contre, les matières organiques avec des taux élevés en lignine minéralisent difficilement et présentent par conséquent une faible influence sur la microflore et l'agrégation du sol (N'Dayegamiye et Angers 1993).

Même si les composts sont pauvres en C minéralisable, épuisé pendant le processus de compostage, ceux-ci pourraient agir rapidement sur la formation stable de la structure grâce aux substances humiques (Chaney et Swift 1986, Piccolo et Mbagwu 1999). D'après ces auteurs, la stabilité des agrégats de sols serait durable lorsqu'elle est assurée par des substances humiques relativement résistantes à la dégradation microbienne. Par contre, la stabilité des agrégats formés à partir des boues mixtes fraîches pourrait être de courte durée, car elle est formée grâce au carbone de polysaccharides, d'hyphes de champignons et de racines fines, qui sont rapidement minéralisables (Tisdall et Oades 1982).

Par conséquent, des apports plus fréquents de boues mixtes fraîches pourraient être nécessaires, en comparaison avec les composts, afin d'améliorer de façon durable la structure des sols et augmenter les niveaux de matière organique. Les effets des boues mixtes et des composts sur les rendements des cultures et les propriétés des sols peuvent ainsi être différents, en raison de leurs caractéristiques différentes. L'objectif de cette recherche consistait à évaluer les effets de boues mixtes de papetières et de composts apportés une fois ou trois fois au sol pendant trois ans, sur l'évolution des rendements du maïs-ensilage, ainsi que sur la dynamique de la structure et les niveaux de matière organique du sol. De même, les concentrations dans la plante et le sol des éléments nutritifs et métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) ont été mesurées.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette étude a été effectuée sur un loam limoneux de la série Le Bras situé sur la Station de recherche de l'IRDA établie à St-Lambert-de-Lauzon. Les analyses initiales du sol indiquaient une valeur de pH de 6,2, tandis que les niveaux de matière organique et d'azote total étaient respectivement de 2,8% et de 0,14%. Le sol était riche en K, Ca et Mg (103, 1195, et 98 mg/kg respectivement) et pauvre en phosphore (50 mg/kg). Les teneurs en éléments mineurs essentiels et en métaux lourds (B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni, Cd, Cr, Co et Pb) étaient initialement faibles dans le sol étudié.

L'essai a débuté au printemps 2000 et le dispositif expérimental était constitué de 6 traitements, disposés de façon aléatoire, en quatre répétitions (Tableau 1). Les six traitements comparés sont le témoin, la fertilisation minérale N (160 kg/ha), les boues mixtes et les composts apportés à raison de 40 t/ha sur base humide, seuls ou combinés avec une fertilisation minérale réduite pour la culture de maïs-ensilage (120 kg N/ha).

À partir de la deuxième année (2001), les parcelles expérimentales ont été subdivisées en sous-parcelles afin de comparer les apports annuels de ces matières organiques (2000 à 2002) à leurs applications triennales (une seule application en 2000). L'essai était ainsi disposé selon un plan subdivisé (split-plot), en quatre répétitions, avec les six traitements en parcelles principales, et la fréquence des apports d'amendements organiques en sous-parcelles. Chaque unité expérimentale (parcelle) mesurait 3m X10m.

Les boues mixtes et les composts étudiés provenaient d'un mélange, à l'usine papetière, de résidus primaires, secondaires et désencrés. Le compost étudié a été fabriqué à partir de ces mêmes matériaux organiques (primaires, secondaires et désencrés) auxquels des écorces ont été ajoutées dans de faibles proportions (5%). Le compostage a été effectué en tas, avec retournements mécaniques pour l'aération. La durée de compostage était de six mois.

De façon générale, les propriétés des matières organiques fertilisantes utilisées pendant chaque année d'expérimentation ont été peu variables d'une année à l'autre, surtout pour les composts. En moyenne, les composts et les boues mixtes avaient un pH de 7 (Tableaux 13 et 14, en annexe). Ces valeurs de pH sont propices pour une croissance optimale des cultures et des microorganismes. Les boues mixtes et les composts contenaient des teneurs élevées en matière organique, respectivement de 68 et 57%, tandis que celles de l'azote total étaient plutôt faibles (0,84 et 0,75% respectivement). Leurs faibles taux en N combinés aux rapports C/N relativement élevés (43 à 35) pourraient diminuer la disponibilité de l'azote aux plantes en provoquant une immobilisation de cet élément par la microflore du sol. Pour une meilleure croissance de la culture, un ajustement en azote minéral facilement disponible pourrait donc être nécessaire.

Les matières organiques étudiées présentaient également de faibles teneurs en phosphore et en potassium, mais étaient riches en calcium et magnésium et en éléments mineurs. Les boues mixtes et les composts utilisés contenaient aussi de très faibles quantités en métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb), comparativement aux teneurs maximales admises par les normes pour les composts (BNQ - 2002). Toutefois, ces teneurs étaient plus élevées pour les composts en comparaison avec les boues mixtes.

Les boues mixtes et les composts ont été épandus au sol à raison de 40 t/ha sur base humide, puis incorporés au sol avec une herse à dents de type vibro, à une profondeur de 0 -15 cm. Afin de combler les besoins du maïs ensilage en phosphore et potassium, des doses de 60 kg/ha  $P_2O_5$  et de 100 kg/ha de  $K_2O$  ont été apportées à la volée avant le semis. Dans les traitements de fertilisation minérale, la dose apportée au maïs était de 160 kg N/ha, tandis qu'une dose réduite à 120 kg N/ha était appliquée dans les sols ayant reçu les boues mixtes et les composts. Les engrais en N, P et K ont été apportés sous forme de nitrates d'ammonium, de superphosphate et de muriate de potassium.

Les semis du maïs ensilage ont été effectués avec la variété HL2017 (2250 UTM), la dose de semis étant de 78000 plants/ha. Pour le contrôle des mauvaises herbes, nous avons utilisé l'herbicide Dual-Bladex en pré-levée et deux sarclages mécaniques ont complété cette régie agricole. La récolte du maïs a été effectuée durant les mois d'octobre, et des échantillons de végétaux ont été prélevés afin de déterminer les effets des engrais, des boues mixtes et des composts sur les concentrations et les prélèvements du maïs-ensilage en éléments majeurs et mineurs.

Des échantillons de sol ont été prélevés en 2000 et 2003, afin de mesurer la répartition des agrégats et leur stabilité structurale (DMP). Les teneurs disponibles et totales du sol en éléments nutritifs et en éléments traces, ainsi que les niveaux de matière organique et d'azote total ont été effectuées en 2003 sur la profondeur 0-40 cm du sol.

La répartition et la mesure de la stabilité des macro-agrégats ont été effectuées par tamisage humide du sol humide sur une série de tamis de 5mm, 2mm, 1mm et 0,25mm de diamètre. Les agrégats récupérés dans chaque tamis ont été séchés à 60°C et leur diamètre moyen pondéré calculé (Kemper et Rosenau 1986).

L'analyse du C organique du sol a été effectuée par oxydation humide (Allison et al. 1965). Les quantités en N minéral ( $N-NH_4 + N-NO_3$ ) ont été extraites dans une solution de 2 M KCl et l'azote total par digestion Kjeldhal (Bremner et Mulvaney 1982).

Le dispositif était un split-plot, avec les apports d'engrais et des amendements organiques en facteur principal, et la fréquence d'application des amendements organiques (une fois et trois fois) en facteur secondaire. Certains paramètres ont été mesurés seulement dans les traitements avec apports annuels d'engrais azotés et d'amendements organiques. En fonction de la prise des échantillons, les traitements statistiques ont été effectués avec l'analyse de variance selon un bloc complètement aléatoire ou selon un dispositif en plan subdivisé. Les analyses statistiques ont été effectuées suivant la procédure GLM de SAS.

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Rendements du maïs-ensilage et concentrations en éléments majeurs et mineurs

Les résultats obtenus en 2000 sur les effets d'apports de boues mixtes, de composts et de l'engrais azoté sur la production de maïs-ensilage et les prélèvements en azote sont présentés dans le tableau 1. Les rendements en maïs (poids total : tiges et épis) ont varié de 5512 à 8953 kg/ha. Les apports de l'engrais azoté recommandé pour la culture (160 kg N/ha) et ceux de boues mixtes et de composts sans engrais azoté, ont augmenté de façon significative ( $P < 0,05$ ) la production de maïs-ensilage.

Les rendements en maïs-ensilage ont augmenté en moyenne de 24 % pour les boues mixtes et les composts apportés seuls, et de 28% pour l'engrais minéral azoté (160 kg/ha). Les incorporations de boues mixtes et de composts combinés aux engrais azotés (120 kg/ha) ont permis des augmentations de 62%, en comparaison avec le témoin.

**Tableau 1. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les rendements, les prélèvements et les teneurs en azote (%) du maïs-ensilage (2000).**

Traitements	Rendements	Prélèvements en N kg/ha	Teneurs en N
Témoin	5512	64,3	1,18
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	7081	109,1	1,54
Boues mixtes	6784	88,0	1,29
Compost	6885	86,6	1,25
Boues mixtes + Engrais N*	8953	131,1	1,46
Compost + Engrais N*	8580	125,1	1,54
PPDS ( $P \leq 0,05$ )	257	17,7	0,15

\*Engrais N: 120 kg ha<sup>-1</sup>

Les prélèvements en azote du maïs-ensilage ont été proportionnels aux rendements, variant de 64 à 131 kg N/ha (Tableau 1). Les apports de boues mixtes et de composts ont significativement accru les prélèvements de la culture en azote.

Même si les rendements en maïs-ensilage étaient élevés suite aux apports de boues mixtes et de composts seuls (Tableau 1), les teneurs et les prélèvements en N du maïs-ensilage ont été généralement plus faibles par rapport à la fertilisation azotée complète. Cette faible disponibilité de l'azote dans ces sols amendés s'explique par une immobilisation de l'azote. En effet, comme les amendements organiques apportés présentaient des rapports C/N élevés (>30), les microorganismes du sol ont probablement utilisé l'azote disponible du sol au cours de la décomposition de ces matières organiques incorporées. La carence en azote ainsi provoquée a ainsi temporairement limité la croissance et la nutrition azotée de la culture.

**Tableau 2. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les prélèvements du maïs-ensilage en éléments majeurs (kg/ha) (2000).**

Traitements	P	K	Ca	Mg
Témoin	11,9	45,9	7,8	7,0
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	15,8	61,0	12,3	9,7
Boues mixtes	14,4	54,3	11,3	9,0
Compost	14,6	54,8	10,5	9,3
Boues mixtes + Engrais N*	17,4	64,6	17,3	12,4
Compost + Engrais N*	18,0	74,3	14,0	12,0
PPDS (P ≤ 0,05)	4,2	14,8	3,3	1,7

\*Engrais N: 120 kg ha<sup>-1</sup>

Les apports de boues mixtes et de composts seuls ou combinés avec l'engrais N ont significativement augmenté les prélèvements en Ca, Mg, Mn et Zn (Tableaux 2 et 3). De quantités significativement élevées en éléments majeurs (N,P,K, Ca, Mg) et mineurs ont été prélevées par le maïs dans les sols ayant reçu les apports de boues et de composts combinés à l'engrais azoté (Tableaux 2 et 3), qui ont stimulé la croissance de la culture et l'absorption des éléments nutritifs du sol. Ces données ont démontré qu'il existe ainsi une synergie entre les matières organiques incorporées et l'engrais azoté sur la nutrition de la culture, ce qui a influencé les niveaux de rendements du maïs.

**Tableau 3. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les prélèvements du maïs-ensilage en éléments mineurs (g/ ha) (2000).**

Traitements	B	Cu	Mn	Zn	Co	Mo
Témoin	33,7	22,4	0,05	0,12	0,20	1,45
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	41,4	37,4	0,11	0,17	0,33	2,71
Boues mixtes	41,9	28,0	0,07	0,17	0,21	3,28
Compost	37,5	26,2	0,07	0,17	0,22	2,43
Boues mixtes + Engrais N*	52,9	44,8	0,13	0,21	0,31	4,72
Compost + Engrais N*	49,5	46,0	0,11	0,23	0,28	3,60
PPDS (P ≤ 0,05)	21,9	15,5	0,02	0,04	0,13	1,99

\*Engrais N: 120 kg ha<sup>-1</sup>

Les rendements en maïs-ensilage (poids total : tiges et épis) obtenus en 2001 et 2002 ont été très élevés, variant de 6671 à 14625 kg/ha de matière sèche, selon les traitements (Tableau 4). En comparaison avec le témoin, les apports répétés de boues mixtes, appliquées seules, ont augmenté de façon significative les rendements en maïs (Tableau 5). Les augmentations étaient en moyenne de 28% pour les apports annuels et triennaux. Dans le cas de composts appliqués seuls sans complément d'engrais azoté, aucune augmentation significative de rendements en maïs-ensilage n'a été obtenue en 2001 et 2002, même avec des apports répétés. Les rendements les plus élevés en maïs ont été obtenus avec la fertilisation azotée complète (160 kg N/ha) ou lorsque les applications de boues mixtes ou de composts étaient combinées avec l'engrais azoté en dose réduite (120 kg N/ ha). Aucune différence significative sur les rendements en maïs n'a été obtenue entre les applications annuelle ou triennale de boues mixtes et de composts (Tableau 5).

**Tableau 4. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les rendements du maïs-ensilage.**

Traitements	Rendements (kg/ha m.s.)		
	2001	2002	2003
Témoin	8673	6671	11765
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	14153	12177	12806
Boues mixtes -annuel	11094	8731	14180
Boues mixtes - triennal	10701	8873	14438
Compost -annuel	8372	7318	13361
Compost- triennal	8514	7139	11756
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	14146	12471	14122
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	14535	12965	14180
Compost -annuel+ Engrais N*	13208	12758	14627
Compost - triennal+ Engrais N*	14324	11805	13903
PPDS (P≤ 0,05)	1338	1212	1808

\* Engrais N:120 kg ha<sup>-1</sup>

En 2003, des doses égales d'engrais minéraux ont été apportées dans tous les traitements, à raison de 120 kg N/ha, 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et 100 kg K<sub>2</sub>O/ha, afin de vérifier les arrière-effets de trois apports et une seule application de boues mixtes et de composts. Les résultats indiquent que les effets des boues et des composts appliqués seuls ou avec l'azote ont accru de façon significative la production du maïs, avec des augmentations variant entre 2 et 3,5 t/ha de rendements (Tableaux 4 et 5). Comme pendant les années 2001 et 2002, l'effet de la fréquence d'application (une fois ou trois fois) de boues mixtes ou de composts sur le rendement en maïs n'était pas significatif.

**Tableau 5. Analyse de variance des effets des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les rendements du maïs-ensilage.**

Traitement	Rendements		
	2001	2002	2003
		Valeur de F	
Répétition	0,52	1,61	5,70**
Traitements	37,14**	45,09**	5,16**
Rép*Trait.	3,10*	5,05**	0,67
Fréquence	1,37	0,62	0,39
Trait.*Fréquence	0,40	0,42	0,39
<i>Contrastes</i>			
Témoin vs autres	54,63**	78,92**	14,09*
NPK vs Boues	20,70**	17,71**	0,00
(BF+BFN) vs (BC+BCN)	11,31*	6,07*	1,81
BF vs BFN	29,21**	46,06**	0,03
BC vs BCN	69,82**	76,68**	3,93
Annuel vs Triennal	1,37	0,62	0,39
(Tém vs autres)*Fréq	0,03	0,25	0,00
(NPK vs Boues)*Fréq	0,50	0,12	0,49
(BF+BFN) vs (BC+BCN)*Fréq	0,49	1,17	1,18
(BF vs BFN)*Fréq	0,38	0,09	0,01
(BC vs BCN)*Fréq	0,58	0,45	0,26
C.V. (%)	10,88	11,57	12,46

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

Étant donné que les boues mixtes et les composts étudiés apportent de plus faibles quantités d'éléments nutritifs au sol que les fumiers, les augmentations significatives de rendements en maïs observés dans la présente étude peuvent ainsi être attribuables à l'influence de ces matières organiques fertilisantes sur les propriétés du sol. Cet effet sur les propriétés du sol (structure, aération, régime hydrique dans le sol et température) stimule les activités biologiques et enzymatiques, ainsi que la croissance des racines et l'intensité d'absorption d'éléments nutritifs, accroissant ainsi les rendements.

En effet, les applications de boues mixtes et de composts ont augmenté de façon significative les concentrations et les prélèvements en N, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Mn, Zn et MO (Tableau 6, et tableaux 15-19, en annexe). Cependant, les concentrations et les prélèvements du maïs en ces éléments ont été plus élevés dans les sols ayant reçu les boues mixtes et les composts combinés à l'engrais azoté. Étant donné que les boues mixtes et les composts utilisés dans cette étude contenaient de faibles quantités en N, P et K (Tableau 6), les effets significatifs sur les prélèvements en ces éléments majeurs démontrent que les boues mixtes ont stimulé la nutrition de la culture à partir des réserves du sol. Les quantités en N, P et K apportées annuellement au sol par les incorporations de boues mixtes et de composts s'élevaient en moyenne à 110, 15 et 8 kg /ha, respectivement.

**Tableau 6. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les prélèvements du maïs-ensilage en éléments majeurs (kg/ha) (2002).**

Traitements	N	P	K	Ca	Mg
Témoin	51,50	13,43	59,79	16,65	12,08
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	125,9	22,64	113,69	40,31	24,87
Boues mixtes -annuel	75,78	18,62	70,03	23,62	17,75
Boues mixtes - triennal	78,45	17,75	71,34	23,66	18,52
Compost- triennal	54,10	13,69	52,20	19,82	14,08
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	123,40	20,81	105,52	43,06	25,22
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	128,75	24,34	104,85	39,60	28,13
Compost -annuel+ Engrais N*	126,71	23,56	123,25	36,91	26,49
Compost - triennal+ Engrais N*	104,57	19,10	97,08	34,26	23,10
PPDS (P<0,05)	14,90	3,28	12,54	4,95	3,31

\* Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

Les quantités d'azote apporté par les boues mixtes ou les composts étaient plus importantes que pour le P et le K, cependant une faible partie dans les boues mixtes se trouve sous forme minérale (<10%) (N'Dayegamiye et al. 2003), et une grande proportion sous forme organique. Cette dernière doit être minéralisée pour devenir disponible à la culture. Par ailleurs, l'azote organique du compost se trouve sous une forme plus stable, avec un faible taux de minéralisation et de disponibilité à la culture. Ainsi, les plus faibles rendements en maïs obtenus avec les composts, en comparaison avec les boues mixtes, pourraient être dus, en grande partie, au faible taux de minéralisation de l'azote organique stable des composts.

Les données sur les rendements obtenus indiquent que les apports de boues mixtes, aux rapports C/N élevés, et des composts doivent être combinés aux engrais minéraux pour assurer des productions élevées, surtout pour les cultures exigeantes en éléments nutritifs tel que le maïs. Une action synergique entre ces matières organiques et les engrais a été observée sur les rendements et la nutrition du maïs, ce qui démontre que les apports de boues mixtes et de composts ont eu une interaction sur les propriétés du sol, favorisant ainsi la croissance et la nutrition de la culture. Les apports annuels de ces amendements organiques n'ont pas généré de différences significatives de rendements en maïs, en comparaison avec



les applications triennales, ce qui démontre en effet que l'influence sur les rendements pourrait être en grande partie attribuable à l'amélioration des propriétés du sol. A cause de ces effets positifs des amendements organiques sur les propriétés du sol, une dose réduite d'azote (120 kg N/ha) a permis d'obtenir des rendements élevés de maïs-ensilage.

## 3.2. Les propriétés du sol

### 3.2.1. Propriétés chimiques

Les données portant sur le pH du sol et les teneurs en N total et en matière organique sont présentés dans le tableau 7. Les apports de boues mixtes et de composts n'ont pas modifié les valeurs de pH du sol. Par contre, trois applications de ces matières organiques ont accru de façon significative les teneurs en N total et en matière organique du sol. Les augmentations en M.O varient de 19 à 41%, selon les traitements, en comparaison avec le témoin (Tableau 8).

**Tableau 7. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs du sol en N total, matière organique et sur le pH du sol (2003).**

Traitements	N (%)	M.O (%)	pH eau	pH SMP
Témoin	0,13	2,8	6,4	6,9
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	0,13	2,8	6,4	6,9
Boues mixtes -annuel	0,16	3,7	6,3	6,8
Compost -annuel*	0,15	3,6	6,5	7,0
Boues mixtes -annuel*+ Engrais N	0,14	3,4	6,3	6,8
Compost -annuel*+ Engrais N	0,15	4,00	6,5	6,9
PPDS (P<0,05)	0,02	0,6	0,23	0,2

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

Des augmentations moins importantes de M.O du sol ont été mesurées après vingt ans (1977-1997) d'apports annuels de 20 t/ha de fumiers solides de bovins, dans une rotation de maïs-ensilage-blé-orge (N'Dayegamiye et al. 1997). Les apports de ces boues mixtes et des composts ayant des rapports C/N élevés (>30) ont accru rapidement les niveaux de matière organique, en comparaison avec les boues mixtes et les fumiers dont les rapports C/N variaient entre 14 et 20 (N'Dayegamiye et al. 2001; Estevez et al. 1996). Toutefois, ces augmentations rapides de M.O peuvent également être dues au taux initial de M.O qui était seulement de 2,8%. Une faible accumulation a été observée lorsque le niveau initial de M.O du sol s'élevait à 4,8% (Estevez et al. 1996).

Ces résultats signifient que les boues mixtes qui contiennent de grandes quantités de cellulose et lignine peuvent accumuler rapidement de la M.O dans les sols. Des quantités de C apportées par les boues mixtes et les composts (Tableau 8), une proportion d' environ 6% était intégrée dans le complexe argilo-humique du sol en trois ans, cette accumulation étant plus élevée pour les composts. L'intégration de cette M.O dans le complexe argilo-humique se fait graduellement dans le sol. Après un seul apport de boues primaires, Chantigny et al (1999) ont observé que plus de 40% de matière organique appliquée était encore présente sous forme non humifiée et complexée au système colloïdal du sol.

**Tableau 8. Bilan de la matière organique suite à trois apports de boues mixtes et de compost.**

Traitements	Carbone organique	Augmentation p/r témoin	Gain de carbone <sup>1</sup>	Taux d'accumulation <sup>2</sup> de carbone	
	(%)	%	kg/ha	Total	Annuel
Témoin	1,65				
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	1,61	-2	- 54		
Boues mixtes –annuel*	2,15	30	680	5,0%	1,67%
Compost –annuel*	2,10	27	612	4,5%	1,5%
Boues mixtes -annuel+ Engrais N	1,97	19	435	3,5%	1,17%
Compost -annuel*+ Engrais N	2,32	41	911	7,3%	2,43%

<sup>1</sup> : calculé pour une densité apparente de 1,36 g/cm<sup>3</sup>; \* traitement avec apport annuel d'amendements

<sup>2</sup> : Les taux d'accumulation correspond au gain de carbone divisé par la quantité totale de C apporté par les amendements. Les quantités de carbone apportées par les boues mixtes et composts sont de 13649 kg C/ha et 12547 kg C/ha respectivement.

### 3.2.2 Propriétés physiques du sol

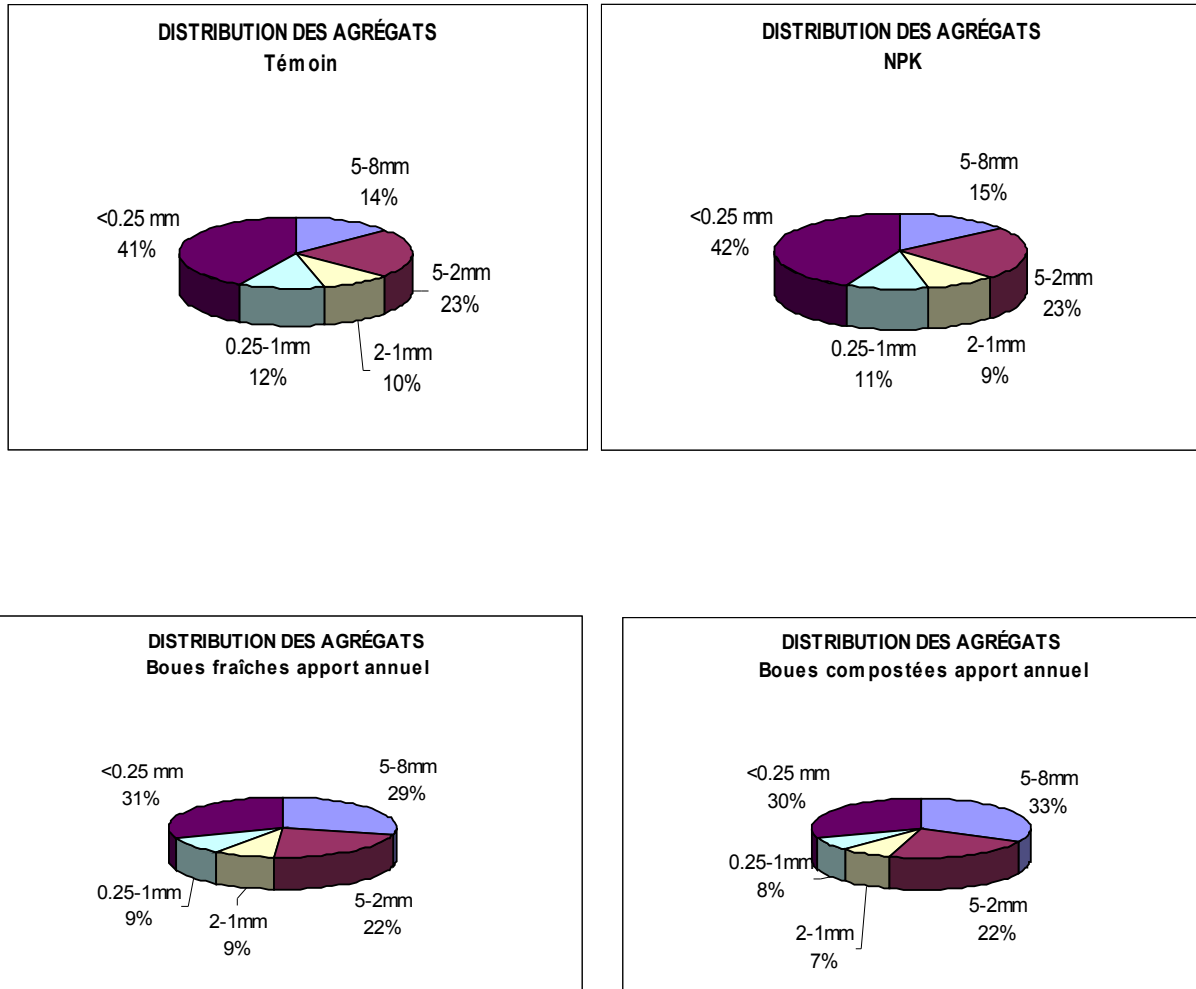
La stabilité de la structure du sol a été mesurée par le diamètre moyen pondéré (DMP) ainsi que par la proportion de différents agrégats (Tableau 9) Les résultats indiquent que les boues mixtes et les composts apportés seuls ou avec de l'engrais N ont significativement accru les proportions de macro-agrégats (>5mm ; 5-0,250 mm), ainsi que les dimensions d'agrégats stables à l'eau (DMP) (Tableaux 9 et 10).

**Tableau 9. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur la répartition des agrégats et la stabilité structurale du sol (2001).**

Traitement	Agrégats (%)					
	5 mm	2 mm	1 mm	0,25 mm	Σ>0,25mm	DMP
Témoin	13,76	22,53	9,95	11,75	57,97	1,90
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	14,72	22,66	9,01	10,68	57,07	1,95
Boues mixtes -annuel	28,71	22,30	8,61	9,20	68,82	2,92
Boues mixtes - triennal	24,61	21,70	7,75	9,08	63,12	2,53
Compost -annuel	32,26	22,33	7,29	8,18	70,08	3,04
Compost- triennal	17,88	23,45	9,43	13,21	63,96	2,20
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	14,65	20,93	8,09	10,23	53,92	1,87
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	21,41	22,43	7,50	8,73	60,06	2,34
Compost -annuel+ Engrais N*	20,94	23,80	7,81	7,99	60,54	2,36
Compost - triennal+ Engrais N*	19,37	23,83	8,58	9,30	61,08	2,28
PPDS (P<0,05)	7,96	3,28	1,74	2,84	8,00	0,49

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

L'augmentation de macro-agrégats supérieurs à 5 mm par des apports de ces matières organiques était d'environ deux fois plus élevée que dans les sols témoin ou ayant reçu la fertilisation minérale NPK (Tableau 9 ; Figure 1a-d). Par ailleurs, les proportions d'agrégats supérieurs à 0,250 mm, qui indiquent une bonne agrégation et une bonne structure, comptaient en moyenne pour 70% de la masse du sol dans les sols amendés avec les boues ou les composts, comparativement à 58% pour le témoin et les sols ayant reçu l'engrais (Figures 1-a-d).



**Figure 1. Répartition des agrégats.**

Les boues mixtes et les composts complétés par l’engrais minéral ont accru significativement les macro-agrégats du sol. Cependant, les effets étaient moins importants, comparativement aux applications de ces matières organiques sans complément d’engrais azoté (Tableau 9). Comme pour les agrégats de 5-8mm ou supérieurs à 0,250mm, l’ajout d’engrais azotés dans les sols ayant reçu les boues mixtes ou les composts a légèrement diminué leurs effets sur la proportion des agrégats stables à l’eau (DMP). Ces observations ont également été faites par Estevez et al. (1996), suite aux apports de fumiers de bovins combinés avec l’engrais minéral NPK. Ce résultat démontre que l’apport de l’engrais minéral en complément avec les boues mixtes et les composts a stimulé très fortement les activités biologiques qui décomposent la M.O labile associée à l’agrégation (Tisdall and Oades 1982).

**Tableau 10. Analyse de variance de l'effet des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur la répartition des agrégats et la stabilité structurale du sol (2001).**

Traitement	Agrégats (%)					
	5 mm	2 mm	1 mm	0,25 mm	$\Sigma > 0,25$ mm	DMP
	Valeur de F					
Répétition	1,38	6,24**	0,61	1,18	3,90*	3,76*
Traitements	3,91*	0,46	1,78	1,50	2,80*	4,44**
Rép*Trait.	2,05	1,04	2,34*	1,22	2,14	2,47*
Fréquence	0,37	2,26	0,02	0,06	0,01	0,15
Trait.*Fréquence	1,92	0,55	1,03	1,98	0,90	2,23
<i>Contrastes</i>						
Témoin vs autres	5,96*	0,00	6,58*	3,73	1,49	6,04*
Engrais N vs Boues mixtes et Compost	6,71*	0,00	1,81	1,25	3,49	7,23*
Boues mixtes vs Compost	0,01	1,88	0,25	0,14	0,82	0,12
Boues mixtes vs Boues mixtes+ Engrais N	5,18*	0,04	0,22	0,06	5,56*	7,12*
Compost vs Compost + Engrais N*	1,68	0,35	0,04	2,30	2,66	1,70
Annuel vs Triennal	0,37	2,26	0,02	0,06	0,01	0,15
(Tém vs autres)*Fréq	0,96	0,12	0,06	0,65	0,60	1,27
(Engrais N vs Boues mixtes et Compost)*Fréq	0,74	2,03	0,85	2,74	0,43	1,44
(Boues mixtes vs Compost) *Fréq	3,02	0,00	3,50	4,34	0,31	2,34
(Boues mixtes vs Boues mixtes+ Engrais N)*Fréq	2,06	0,45	0,03	0,26	2,41	3,45
(Compost vs Compost+Engrais N)*Fréq	2,86	0,12	0,68	1,90	0,76	2,63
C.V. (%)	38,41	13,82	19,26	26,86	12,50	20,42

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

Une étude des proportions d'agrégats de sol et de la stabilité structurale (DMP) a également été effectuée en 2003, afin de déterminer si les apports de boues mixtes et de composts avaient créé une agrégation stable du sol. Les matières organiques qui se décomposent rapidement, tels les engrais verts, peuvent favoriser une agrégation rapide du sol. Cependant cet effet diminue au fur et à mesure de l'épuisement des quantités de C minéralisables. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 11. Les applications de boues mixtes et de composts seuls ou avec les engrais minéraux ont accru de façon significative les proportions d'agrégats  $> 2$  mm, ainsi que les dimensions d'agrégats stables à l'eau (DMP). Cette étude indique ainsi que les apports répétés de boues mixtes et de composts ont constamment amélioré l'agrégation du sol.

**Tableau 11. Influence des apports annuels d'engrais, de boues mixtes et de composts sur la répartition des agrégats et la stabilité structurale du sol (2003).**

Traitements	Agrégats >2mm	Agrégats 0,25-2mm	Agrégats <0,25 mm	DMP mm
Témoin	8,31	34,15	56,00	1,855
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	5,18	29,50	63,92	1,423
Boues mixtes -annuel	13,32	37,50	47,59	2,400
Compost -annuel	14,64	32,60	51,12	2,433
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	11,96	37,11	49,48	2,298
Compost -annuel+ Engrais N*	13,70	34,82	49,98	2,395
<b>Niveau de signification (valeur F)</b>				
Traitements	5,53**	1,67	3,51*	4,73**
Témoin vs autres	5,85*	0,64	0,41	3,02
Engrais N vs Boues mixtes et Compost	5,24*	0,01	1,40	3,63*
Boues mixtes et Boues mixtes+ Engrais N vs Compost et Compost+Engrais N	14,18**	5,66*	12,54**	14,21**
Boues mixtes vs Boues mixtes+ Engrais N	13,52**	6,05*	12,81**	13,47**
Compost vs Compost+Engrais N	2,72	0,82	2,04	2,76

ns, \*, \*\* = différence non significative, significative au seuil de P<0,05 et 0,01, respectivement

L'agrégation des sols se manifeste avant tout sur les plus gros agrégats. Pour les boues mixtes, celle-ci a résulté des produits transitoires issus de la décomposition (sucres et polyssacharides), ainsi que des hyphes des champignons et des mucilages des bactéries. Ces produits générés des matières organiques en décomposition ou des microorganismes, lient les petits agrégats ensemble afin de former les macro-agrégats des sols.

L'analyse de variance (Tableau 11) démontre que les effets des composts ont été plus importants sur l'agrégation et la stabilité de la structure, en comparaison avec les boues mixtes, ce qui confirme que les substances humiques jouent aussi un rôle important sur l'agrégation et la stabilisation de la structure (Chaney et Swift 1986 ; Piccolo et Mbagwu 1999).

Une agrégation rapide démontre la qualité de l'amendement organique qui stimule rapidement le développement et la croissance des microorganismes des sols. Ces derniers jouent un grand rôle dans les mécanismes de structuration des sols. Les amendements organiques de qualité doivent donc contenir des quantités importantes de matière organique facilement décomposable et d'éléments nutritifs majeurs et mineurs, afin de combler les besoins métaboliques des microorganismes du sol. Les résultats obtenus ont démontré que les boues mixtes et les composts étudiés ont constitué des amendements organiques de qualité relativement à la formation rapide de la structure. des sols.

Même si les apports répétés de boues mixtes et de composts ont amélioré de façon significative l'agrégation et la stabilité structurale du sol étudié, ils n'ont pas encore influencé la capacité de rétention de l'eau du sol (Tableau 12). Cependant, le pouvoir de rétention en eau était plus élevé dans les sols ayant reçu les boues mixtes et les composts, en comparaison avec le témoin et le sol avec engrais. Cette faible influence de ces matières organiques est probablement due à la texture du sol en étude, qui présente une grande teneur en argile (20%), ayant ainsi naturellement un grand pouvoir de rétention en eau.

**Tableau 12. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur la dynamique de l'eau dans le sol (2003).**

Traitements	Capacité de rétention en eau (%)	Capacité au champ (%)	Point de flétrissement (%)	Réserve en eau utile (%)
Témoin	65,4	21,98	8,86	13,12
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	65,8	21,58	7,84	13,74
Boues mixtes -annuel	71,3	22,59	8,80	13,78
Compost -annuel	66,7	22,64	9,11	13,53
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	67,5	24,92	8,59	16,33
Compost -annuel+ Engrais N*	66,1	22,71	9,52	13,19
PPDS (P<0,05)	5,09	3,23	1,08	2,85

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

Toutefois, les boues mixtes et les composts étudiés ont accru la productivité du sol en améliorant la structure du sol, et en augmentant les niveaux de matière organique. Pendant les quatre années de cette étude, les apports de boues mixtes et de composts ont accru de 28% en moyenne les rendements en maïs-ensilage. Magdoff et Amadon (1980) ont également observé que les apports de fumiers solides de bovins avaient accru de 5 à 25% les rendements de maïs. Ces auteurs ont attribué ces augmentations de rendements à l'action des fumiers de bovins sur les conditions du sol. Cet effet bénéfique sur les productions a été nommé l'effet-non-azoté des fumiers, ou effet indirect sur la productivité (Magdoff et Amadon 1980).

De même, Estevez et al. (1996) ont démontré que les apports annuels de fumier à raison de 20t/ha sur base humide ont amélioré à moyen et long terme la structure du sol, l'activité biologique et les populations de vers de terre. Par conséquent, les rendements en maïs-ensilage qui étaient de 5000 kg/ha en 1985 ont passé à plus de 12000 kg/ha dans ce sol (N'Dayegamiye 1996).

Des études récentes ont également démontré des améliorations rapides de la structure du sol, et des augmentations significatives des activités biologiques et enzymatiques suite aux applications de cinq types d'engrais verts (Abdallahi et N'Dayegamiye 1999) et de boues mixtes (Simard 2000 ; Lalande et al. 2003). Ces bénéfices sur le sol ont permis ainsi des augmentations élevées de rendements en maïs, tel que démontré dans le cas des fumiers solides de bovins en culture de maïs (Magdoff et Amadon 1980 ; N'Dayegamiye 1996), dans le cas de boues mixtes sur les cultures de maïs grain, maïs sucré, orge, choux d'hiver et pomme de terre (Simard 2000, N'Dayegamiye et al. 2001), et aussi dans le cas de cinq types d'engrais verts sur la culture de blé (Abdallahi et N'Dayegamiye 1999; N'Dayegamiye et Tran 2001).

Même si les boues mixtes et les composts étudiés ne contenaient pas de quantités élevées en éléments nutritifs, les résultats démontrent qu'ils ont amélioré la productivité du sol principalement à cause de leurs interactions avec les propriétés du sol.

## 4. ASPECT ENVIRONNEMENTAL

### 4.1 Concentration du maïs en éléments mineurs et traces

La plupart des éléments mineurs sont essentiels pour la croissance des plantes. Il s'agit du cuivre, zinc, fer, manganèse, molybdène, nickel, cobalt et bore. Ils jouent un rôle important dans le métabolisme des plantes, entre autres pour la synthèse des protéines, de la chlorophylle, la formation de sucres et des huiles et ils fortifient la plante contre le stress. Les éléments mineurs jouent aussi un rôle important dans la structure cellulaire. En excès, certains de ces éléments peuvent devenir toxiques aux plantes, ainsi qu'aux microorganismes des sols. Les apports répétés de boues mixtes et de composts seuls n'ont pas significativement accru les concentrations en Cu, Zn, Cd et Pb, en comparaison avec le témoin (Fig. 2 à 4) (Tableaux 5 à 8). Cependant, ces concentrations ont été les plus élevées dans les traitements avec engrais minéraux, ainsi que dans les sols amendés et fertilisés. Ces résultats démontrent que la fertilisation minérale seule ou combinée aux amendements organiques a favorisé une meilleure croissance du maïs, ainsi qu'une absorption élevée de ces éléments. Même si des apports d'engrais minéraux ou de boues et compost combinés à l'engrais ont accru les concentrations des ces éléments dans le maïs, ces teneurs sont jugées très faibles relativement au seuil de toxicité de ces éléments pour les plantes.

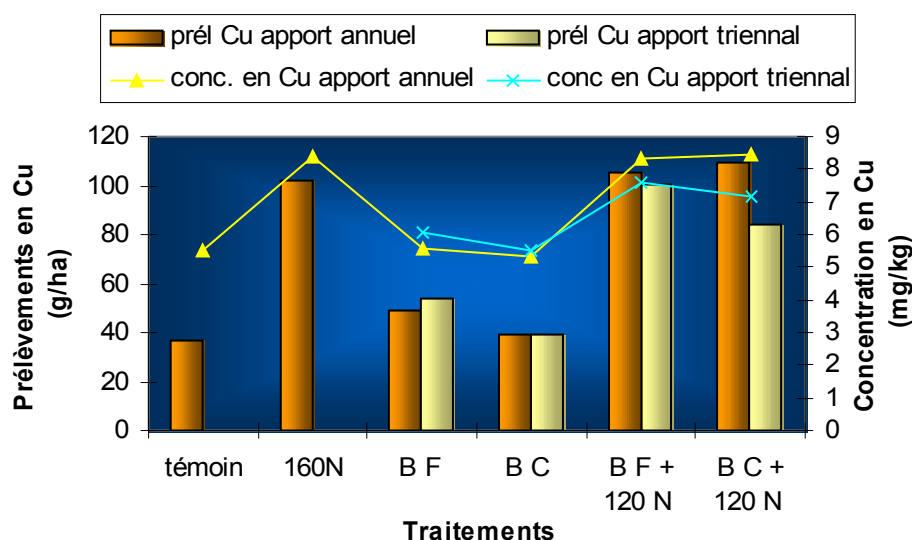


Figure 2. Effet sur les prélèvements et les concentrations en Cu du maïs – ensilage

À titre d'exemple, les concentrations normales de cuivre dans les cultures varient de 2 à 20 mg/kg (Prasad et Hagemeyer 1999). Le Cu est un élément essentiel, jouant un rôle activateur d'enzymes. Dans le sol, le Cu est lié au complexe humique, sa mobilité étant ainsi réglée par la minéralisation du complexe humique.

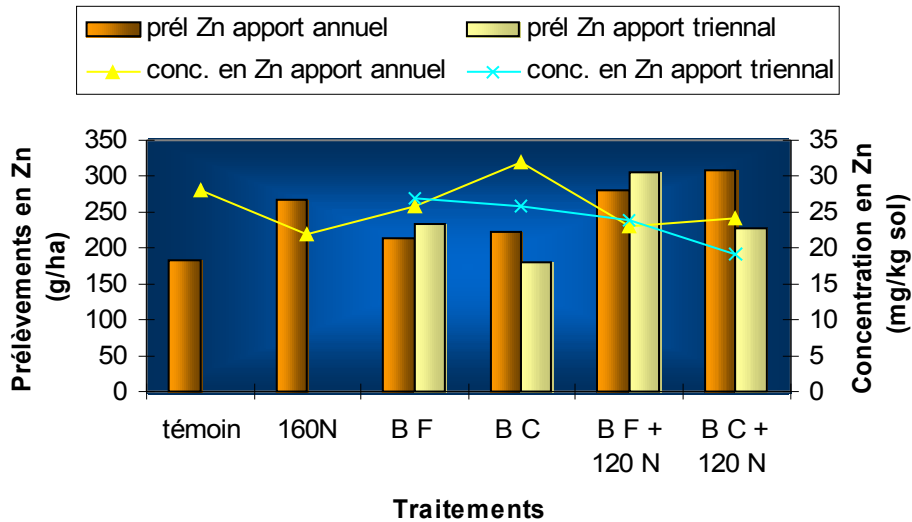


Figure 3. Effet sur les prélèvements et les concentrations en Zn du maïs – ensilage.

Le zinc est également un élément essentiel pour la croissance des cultures, car cet élément joue un rôle enzymatique important dans la synthèse de protéines. Les concentrations normales en zinc dans les plantes varient de 15 à 100 mg/kg, selon les espèces. (Prasad et Hagemeyer 1999). Les teneurs du maïs en cet élément ont été inférieures à 30 mg/kg dans les sols fertilisés ou amendés avec les boues mixtes les composts (Fig 3).

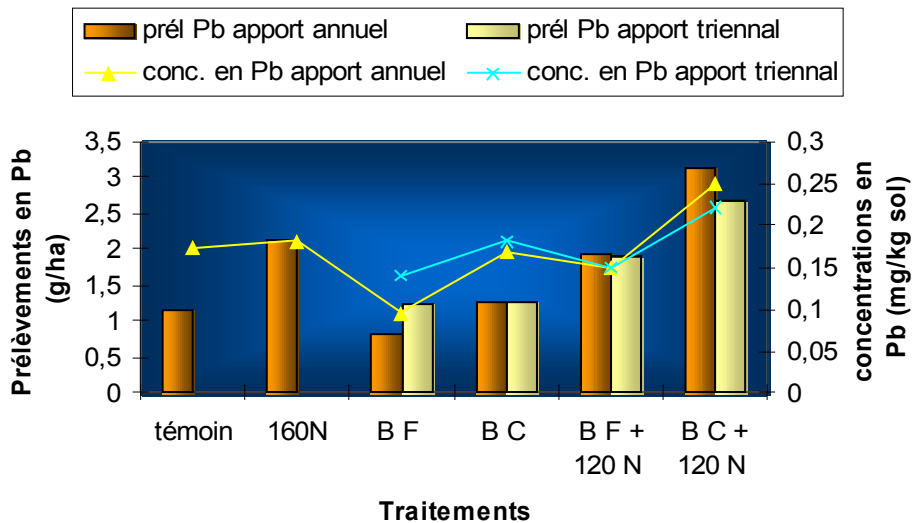


Figure 4. Effet sur les prélèvements et les concentrations en plomb du maïs - ensilage

Le Pb et le Cd ne sont pas des éléments essentiels à la croissance des plantes. Les concentrations normales de Cd dans les plantes varient de 0.05 à 0.2 mg/kg (Prasad et Hagemeyer 1999). Selon ces mêmes auteurs, les concentrations normales de Pb dans les plantes ne doivent pas dépasser 1 mg/kg.



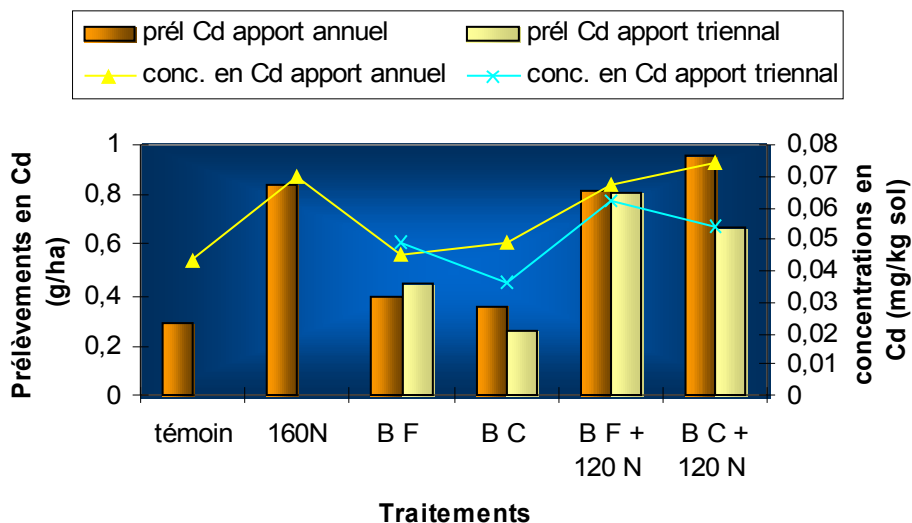


Figure 5. Effet sur les prélèvements et les concentrations en Cd du maïs - ensilage

Les résultats obtenus indiquent de faibles concentrations en Cd et Pb dans la culture de maïs-ensilage, suite à trois applications d'engrais, de boues mixtes et de composts. De plus, les teneurs en métaux lourds mesurées dans le maïs sont très faibles, en comparaison avec les seuils de toxicité pour ces éléments métalliques.

## 4.2. Teneurs du sol en éléments minéraux

### 4.2.1. Le contenu en azote minéral et en éléments minéraux disponibles (Mehlich III)

Les teneurs du sol en nitrates et en éléments minéraux disponibles sont indiquées dans les tableaux 20 à 24, en annexe. Les apports de l'engrais azoté et des amendements organiques combinés à l'engrais minéral azoté ont significativement augmenté les teneurs en nitrates du sol, en comparaison avec le témoin (Tableau 20, en annexe). Les applications de boues mixtes et de composts seuls n'ont pas influencé les teneurs en azote minéral ( $N-NO_3$  et  $N-NH_4$ ) dans la couche du sol étudié (0-40 cm).

Les apports répétés de l'engrais minéral, de boues mixtes et composts seuls ou combinés à l'engrais minéral n'ont pas enrichi le sol en P disponible, comparativement au témoin (Tableau 21, en annexe). Cependant, les applications de boues mixtes et de composts ont significativement diminué les quantités de K disponible, ce qui pourrait s'expliquer par les faibles teneurs en cet élément, ainsi que par une stimulation élevée de son absorption par la culture, grâce à l'amélioration des conditions du sol. Les apports de boues mixtes et de composts ont significativement accru les teneurs du sol en Ca et Mg disponible dans la couche 0-20 cm, comparativement à la fertilisation minérale et au témoin. De même, les apports de composts ont enrichi le sol en B, Cu et Zn (Tableaux 21 à 24, en annexe). Les apports de boues et de composts ont accru les teneurs en Cd disponible, mais pas celles du Pb (Tableau 24, en annexe). Ces enrichissements en éléments mineurs et traces extraits dans la solution Mehlich III ont été observés seulement dans la couche superficielle du sol (0-20 cm) dans laquelle les boues mixtes et les composts étaient incorporés. Aucun enrichissement n'a été mesuré dans la couche inférieure du sol (20-40 cm).



#### 4.2.2. Les teneurs du sol en éléments totaux

Les données sont présentées dans les tableaux 25 à 28, en annexe. Les apports répétés de boues mixtes et de composts seuls ou avec engrais minéraux ont accru les teneurs totales du sol en P, Ca, ainsi qu'en Cu, Cd et Pb, seulement dans la couche 0-20 cm du sol.

En considérant les deux profondeurs du sol, nous observons que les quantités en métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) sont très faibles. Par exemple, les teneurs normales du sol en Cu, sans effet de toxicité pour une croissance de la culture, se situent entre 10 et 80 mg/kg et les teneurs mesurées sont en moyenne 20 mg/kg. Les niveaux du sol en Zn, pour une croissance normale des plantes, sont entre 10 et 300 mg/kg, et entre 0,5 et 3 mg/kg pour le Cd (Prasad et Hagemeyer 1999). Les teneurs mesurées dans les sols amendés de boues mixtes et de composts s'élèvent en moyenne à 100 mg/kg et 0,50 mg/kg, respectivement pour le Zn et le Cd.

Ces résultats indiquent, qu'à court terme, les apports de boues mixtes et de composts ont contribué à une amélioration de la fertilité des sols, sans conduire à une accumulation excessive en éléments minéraux (nitrates, P) et traces. Ces faibles accumulations en P et en métaux traces sont principalement dues aux faibles teneurs apportées au sol, mais aussi à la stimulation de l'absorption des éléments minéraux du sol. En effet, il a été démontré que les apports de boues mixtes ou de composts ont augmenté les concentrations et les prélèvements totaux de ces éléments par la culture de maïs. Il ressort, dans le cas du phosphore, que les apports de boues mixtes ou de composts peuvent conduire à une absorption maximale de cet élément par les cultures, et par conséquent à une faible accumulation de cet élément dans le sol. De plus, étant donné que les matières organiques stimulent fortement la microflore, une partie du P apporté est organisé dans les microorganismes du sol.

Les apports de boues de désencrage dans des sols cultivés de choux d'hiver (Simard et al. 1998) et de pomme de terre (Beauchamp et al. 1998) n'ont pas également enrichi les sols en métaux lourds. Les boues mixtes et les composts étudiés apportent les éléments traces en de faibles quantités, dont une proportion seulement est absorbée par la plante tandis qu'une autre devient résiduelle dans le sol. Leurs applications au sol à des doses agronomiques (20 à 40 t/ha sur base humide) ne devraient pas enrichir le sol en ces éléments, ni conduire à la toxicité dans les sols pour les plantes et les microorganismes du sol.

## 5. CONCLUSION

Cette étude a démontré que les boues mixtes et les composts apportés seuls, annuellement ou tous les trois ans, ont permis d'obtenir des augmentations de rendements en maïs de plus de 2 t/ha, en comparaison avec le témoin. Ces importantes augmentations paraissent surprenantes particulièrement pour les applications triennales. Étant donné que ces boues et composts n'apportent pas des quantités importantes en éléments nutritifs, leurs effets significatifs sur les rendements s'expliquent principalement par l'amélioration rapide des propriétés du sol. En effet, les boues et les composts ont rapidement amélioré la structure du sol, grâce à l'augmentation des agrégats de grande taille (> 5mm ; 5-0,250mm) et de la stabilité structurale des agrégats (DMP). Les apports de boues mixtes et de composts ont augmenté de 19 à 40% les niveaux de matière organique du sol, selon les traitements.

Bien que les effets des composts sur la structure et la M.O aient été plus élevés que pour les boues mixtes appliquées à l'état frais, les rendements en maïs ont été plus faibles dans les sols amendés avec les composts seuls, en comparaison avec les boues. Des niveaux élevés de rendements ont été cependant obtenus pendant toutes les années d'expérimentation, lorsque les composts et les boues mixtes étaient combinés avec un apport d'engrais azoté (120 kg N/ha), ce qui reflète un avantage économique. Étant donné que ces matières organiques fertilisantes n'apportent pas de quantités importantes en éléments nutritifs, il est recommandé d'effectuer des ajustements de la fertilisation minérale. À court terme, les apports de boues mixtes et des composts ont rapidement amélioré la productivité du sol étudié, grâce à l'amélioration de la structure et à l'augmentation du niveau de la matière organique.



## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Abdallahi, M.M. et A. N'Dayegamiye 1999. Effets de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement et la nutrition en azote du blé (*Triticum aestivum* L.), ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Can. J. Soil Sci.* 80: 81-89.
- Allison, L. E., Bollen, W.B. and Moddie, C.D. 1965. Total carbon. Pages 1346-1365 in C. A. Black et al., eds. *Methods of soil analysis. Agronomy no 9 : ASA and SSSA, Madison, WI.*
- 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. 2<sup>nd</sup> ed. Agronomy no 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
- Chaney, K. and Swift, R.S. 1986. Studies on aggregate stability. II. The effect of humic substances on the stability of re-formed soil aggregates. *J. Soil Sci.* 37 : 337-343.
- Chantigny, M. H., D.A. Angers and C.J. Beauchamp 1999. Aggregation and organic matter decomposition in soils amended with de-inking sludge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1214-1221.
- CRAAQ, 2003. Guide de référence en fertilisation. 1<sup>ère</sup> édition. pp 294.
- Estevez, B., N'Dayegamiye, A. and D. Coderre 1996. The effect on earthworm abundance and selected soil properties after 14 years of solid cattle manure and NPKMG fertilizer application. *Can. J. Soil Sci.* 76: 351-355.
- Gagnon, B., Ziadi, N. et J. Lafond 2004. Valorisation des boues mixtes de papetières en grandes cultures et en productions horticoles : leur impact sur le rendement les propriétés du sol et l'environnement. *Agrosol*, vol. 15, no 1 : 4-9.
- Gagnon, B., R.R. Simard, R. Lalande and M. Roy 2000. Soil enzyme activities following paper sludge addition in a winter cabbage-sweet corn rotation. *Can. J. soil Sci.* 80: 91-97.
- Magdoff, F.R. and J.F. Amadon. 1980. Yield trends and soil chemical changes resulting from N and manure application to continuous corn. *Agron. J.* 72 : 161-164.
- N'Dayegamiye, A., S. Huard et Y. Thibault 2001. Valeur fertilisante des boues mixtes de papetières (biosolides) dans des sols cultivés en maïs-grain, soya et orge. *Agrosol*, vol. 12, no1 : 25-34.
- N'Dayegamiye, A. and Thi Sen 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. et M. Clément 1998. Valeur agronomique des composts à l'intérieur des systèmes de production agricoles. *Agrosol*, vol. 10, no 2 : 44-51.
- 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 en N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. *Can. J. Soil Sci.* 77: 351-358.
- N'Dayegamiye, A. and D.A. Angers 1993. Organic matter characteristics and water-stable aggregates of a sandy loam soil after 9 years of wood applications. *Can. J. Soil Sci.* 73 : 115-122.
- N'Dayegamiye, A. 1996. Response of silage corn and wheat to dairy cattle manure and fertilizers in long-term fertilized and manured trials. *Can. J. Soil Sci.* 76: 357-363.
- Norme Nationale du Canada, BNQ 2002. Amendements organiques - Biosolides municipaux granulés. pp19.
- Piccolo, A. and J.S.C. Mbagwu 1989. Effects of humic substances and surfactants on the stability of soil aggregates. *Soil Sci.* 147: 47-54.
- Prasad, M.N.V and J. Hagemeyer, eds. *Heavy metal stress in plants.* 1999. pp.401.
- Simard, R.R. 2001. Combined primary-secondary papermill sludge as nitrogen source in a cabbage-sweet corn cropping sequence. *Can. J. Soil Sci.* 81: 1-10.
- Simard, R.R. 2000. Les résidus papetiers: mode d'usage horticole. *Colloque sur les biosolides, CPVQ* : 47-70.
- Simard, R.R., J. Coulombe, R. Lalande, B. Gagnon and S. Yelle 1998. Use of fresh and composted de-inking sludge in cabbage production. p. 349-361, in S. Brown et al., ed. *Beneficial co-utilization of agricultural, municipal and industrial by-products.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas.

Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G. et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire. pp. 71.

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

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. Université Laval. pp 80.

## 7. ANNEXE

Tableau 13. Caractéristiques physico-chimiques des composts utilisés pour les saisons 2000, 2001 et 2002.

Propriétés	Compost printemps 2000	Compost automne 2000	Compost automne 2001	Moyenne	Écart-type
Matière sèche (%)	37	40	41	39	2,08
pH	8,1	6,84	7,01	7,32	0,68
Matière organique (%)	52,7	56,2	50,62	53	2,82
N total (%)	0,78	0,76	0,722	0,75	0,03
Rapport C/N	34	37	35	35	1,53
<b>Éléments totaux (EPA)</b>					
P (%)	0,074	0,115	0,139	0,109	0,03
K (%)	0,059	0,099	0,1015	0,087	0,02
Ca (mg/kg)	24100	23640	27243	24994	1961
Mg (mg/kg)	1265	1646	1969	1627	352
Al (mg/kg)	8620	3982	4392	5665	2568
B (mg/kg)	n. d.	13	7,2	10	4,10
Cu (mg/kg)	86	115	237	146	80
Fe (mg/kg)	4025	6704	6312	5680	1447
Mn (mg/kg)	224	266	249	246	21
Zn (mg/kg)	n. d.	n. d.	305	305	--
Mo (mg/kg)	n. d.	4,76	2,4	3,6	1,67
Na (mg/kg)	274	468	421	388	101
Ni (mg/kg)	63	88,31	10,2	54	40
Cd (mg/kg)	1,38	1,49	1,4	1,4	0,06
Cr (mg/kg)	71	52	11,2	45	31
Co (mg/kg)	2,3	2,47	33,7	12,8	18
Pb (mg/kg)	23	24	24,2	24	0,64



**Tableau 14. Caractéristiques physico-chimiques des boues mixtes utilisées pour les saisons 2000, 2001 et 2002.**

Propriétés	Boues mixtes printemps 2000	Boues mixtes automne 2000	Boues mixtes automne 2001	Moyenne	Écart-type
Matière sèche (%)	37	28	36	34	4,93
pH	7,5	7,44	6,07	7,00	0,81
Matière organique (%)	68,7	66,8	67,00	68	1,04
N total (%)	0,81	1,13	0,586	0,84	0,27
Rapport C/N	42	30	57	43	13,53
<b>Éléments totaux (EPA)</b>					
P (%)	0,078	0,115	0,106	0,100	0,02
K (%)	0,055	0,065	0,0549	0,058	0,01
Ca (mg/kg)	29100	30783	33998	31294	2489
Mg (mg/kg)	758	716	911	795	103
Al (mg/kg)	22350	3713	3858	9974	10718
B (mg/kg)	n,d,	7	2,8	5	2,97
Cu (mg/kg)	130	154	177	154	23,50
Fe (mg/kg)	1320	1001	1106	1142	163
Mn (mg/kg)	84	93	88	88	4,51
Zn (mg/kg)	n,d,	n,d,	124	124	--
Mo (mg/kg)	n,d,	4,66	4,5	4,6	0,11
Na (mg/kg)	415	405	621	480	122
Ni (mg/kg)	15	9,93	5,1	10	4,95
Cd (mg/kg)	0,33	0,50	0,5	0,4	0,10
Cr (mg/kg)	23	12	11,5	16	6,50
Co (mg/kg)	1,6	0,99	3,2	1,9	1,14
Pb (mg/kg)	9	6	7,0	7	1,53

**Tableau 15. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les concentrations du maïs-ensilage en éléments majeurs (2002).**

Traitements	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
Témoin	0,77	2041	8967	2475	1821
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	1,04	1854	9353	3316	2057
Boues mixtes -annuel	0,87	2158	7876	2715	2071
Boues mixtes - triennal	0,88	1998	8014	2728	2122
Compost -annuel	0,82	2228	8370	2516	2093
Compost- triennal	0,76	1947	7410	2753	1964
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	0,99	1660	8354	3425	2016
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	0,98	1839	8001	3025	2132
Compost -annuel+ Engrais N*	0,99	1849	9627	2890	2078
Compost - triennal+ Engrais N*	0,89	1629	8246	2942	1960
PPDS (P<0,05)	0,07	269	549	368	149

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 16. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les concentrations du maïs-ensilage en éléments mineurs (mg/kg) (2002).**

Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Mo
Témoin	2,93	5,51	251	15,95	28,13	0,309
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	3,11	8,36	175	24,39	22,01	0,386
Boues mixtes -annuel	3,06	5,55	166	13,53	25,97	0,840
Boues mixtes - triennal	3,23	6,05	189	14,86	26,95	0,704
Compost -annuel	3,21	5,34	209	14,16	31,87	0,416
Compost- triennal	3,00	5,50	282	14,35	25,81	0,463
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	2,99	8,33	162	18,10	23,01	1,100
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	2,89	7,60	158	16,30	23,82	0,798
Compost -annuel+ Engrais N*	3,27	8,45	210	18,25	24,19	0,428
Compost - triennal+ Engrais N*	2,98	7,16	212	15,45	19,22	0,422
PPDS (P<0,05)	0,20	0,75	57	3,16	3,34	0,150

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 17. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les concentrations du maïs-ensilage en éléments traces (mg/kg) (2002).**

Traitements	Cd	Cr	Co	Pb
Témoin	0,043	0,665	0,093	0,174
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	0,070	0,519	0,058	0,180
Boues mixtes -annuel	0,045	0,535	0,051	0,095
Boues mixtes - triennal	0,049	0,551	0,065	0,140
Compost -annuel	0,049	0,614	0,072	0,169
Compost- triennal	0,036	0,729	0,103	0,181
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	0,067	0,477	0,051	0,150
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	0,062	0,511	0,051	0,149
Compost -annuel+ Engrais N*	0,074	0,613	0,074	0,249
Compost - triennal+ Engrais N*	0,054	0,624	0,075	0,222
PPDS (P<0,05)	0,012	0,117	0,021	0,049

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 18. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les prélèvements du maïs-ensilage en éléments mineurs (g/ha) (2002).**

Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Mo
Témoin	19,55	37,10	1670	106,42	183,90	2,08
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	37,79	101,72	2090	287,62	267,17	3,46
Boues mixtes -annuel	26,98	49,24	1400	119,48	213,43	8,98
Boues mixtes - triennal	28,47	53,89	1670	132,81	232,46	6,29
Compost -annuel	23,57	39,24	1500	103,77	221,49	3,21
Compost- triennal	21,47	39,01	2010	101,42	179,75	3,40
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	37,73	105,23	2040	217,60	280,12	9,69
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	37,91	100,57	2020	209,07	305,53	7,04
Compost -annuel+ Engrais N*	41,59	109,16	2620	229,66	307,91	5,70
Compost - triennal+ Engrais N*	35,19	84,14	2380	177,58	227,07	4,96
PPDS (P<0,05)	4,47	14,43	440	33,73	38,64	1,42

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 19. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les prélèvements du maïs-ensilage en éléments traces (g/ha) (2002).**

Traitements	Cd	Cr	Co	Pb
Témoin	0,289	4,42	0,614	1,164
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	0,842	6,24	0,684	2,151
Boues mixtes -annuel	0,398	4,52	0,419	0,847
Boues mixtes - triennal	0,442	4,86	0,575	1,254
Compost -annuel	0,355	4,40	0,518	1,279
Compost- triennal	0,261	5,20	0,735	1,280
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	0,814	5,95	0,645	1,932
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	0,813	6,62	0,650	1,899
Compost -annuel+ Engrais N*	0,949	7,73	0,927	3,138
Compost - triennal+ Engrais N*	0,664	7,15	0,837	2,673
PPDS (P<0,05)	0,188	0,94	0,180	0,556

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 20. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs du sol en N total, NH<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub>.**

Traitements	N total (%)		NH <sub>4</sub> (mg/kg)		NO <sub>3</sub> (mg/kg)	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	0,133	0,073	0,398	0,231	5,01	1,799
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	0,131	0,065	0,432	0,415	21,08	4,852
Boues mixtes -annuel	0,155	0,116	0,545	0,991	6,83	3,821
Boues mixtes - triennal	0,148	0,079	0,821	0,489	6,64	2,730
Compost -annuel	0,146	0,087	0,390	0,467	4,54	2,865
Compost- triennal	0,145	0,052	0,397	0,413	5,01	1,647
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	0,145	0,082	0,313	0,323	26,48	4,779
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	0,148	0,076	0,383	0,442	12,42	3,591
Compost -annuel+ Engrais N*	0,155	0,109	0,592	0,582	16,38	4,159
Compost - triennal+ Engrais N*	0,152	0,086	0,710	0,435	8,12	2,747
PPDS (P<0,05)	0,009	0,020	0,310	0,272	3,36	0,833

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 21. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs du sol en éléments majeurs disponibles (Mehlich) (mg/kg) (2002).**

Traitements	P		K		Ca		Mg	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	60,22	15,71	97,04	54,36	1265	883	74,25	117
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	54,04	9,32	88,52	48,67	1308	908	72,52	124
Boues mixtes -annuel	50,36	15,56	71,04	47,48	1338	969	83,60	97
Boues mixtes - triennal	56,03	10,51	84,79	46,92	1336	922	96,22	140
Compost -annuel	58,64	18,02	82,15	57,43	1492	905	110,04	112
Compost- triennal	50,87	9,87	72,19	41,50	1543	768	92,77	101
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	57,72	12,77	79,85	44,63	1467	887	81,92	114
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	59,95	17,44	75,84	40,97	1317	869	83,12	131
Compost -annuel+ Engrais N*	62,84	17,41	90,58	62,87	1457	1052	103,00	127
Compost - triennal+ Engrais N*	55,44	11,54	79,20	52,15	1416	994	82,32	134
PPDS (P<0,05)	10,02	6,26	10,88	10,74	144	130	10,57	29

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 22. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs du sol en éléments mineurs disponibles (Mehlich) (mg/kg) (2002).**

Traitements	B		Cu		Fe		Mn	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	0,266	0,106	1,846	1,053	217	170	34,07	30
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	0,267	0,100	1,811	0,988	219	170	34,86	36
Boues mixtes -annuel	0,274	0,133	1,867	1,201	200	201	27,48	28
Boues mixtes - triennal	0,283	0,114	1,908	1,081	210	186	30,69	33
Compost -annuel	0,311	0,118	2,332	1,293	205	178	38,19	29
Compost- triennal	0,328	0,088	2,040	0,905	193	160	34,75	34
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	0,263	0,106	1,970	1,038	199	176	33,72	30
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	0,252	0,115	1,904	1,102	209	183	24,83	25
Compost -annuel+ Engrais N*	0,308	0,133	2,703	1,468	194	179	37,46	43
Compost - triennal+ Engrais N*	0,275	0,090	1,827	1,172	189	164	36,21	44
PPDS (P<0,05)	0,034	0,027	0,311	0,237	14	22	7,19	17

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 23. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs du sol en éléments mineurs disponibles (Mehlich) (mg/kg).**

Traitements	Zn		Mo		Ni	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	2,11	0,848	0,004	0,004	0,825	0,642
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	2,63	0,827	0,006	0,003	0,781	0,614
Boues mixtes -annuel	2,56	1,067	0,006	0,001	0,636	0,661
Boues mixtes - triennal	3,28	1,019	0,005	0,000	0,734	0,612
Compost -annuel	5,51	1,188	0,006	0,008	0,790	0,712
Compost- triennal	3,86	0,849	0,003	0,005	0,598	0,437
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	2,67	0,921	0,007	0,002	0,732	0,613
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	3,07	0,897	0,006	0,002	0,613	0,497
Compost -annuel+ Engrais N*	4,65	1,531	0,008	0,005	0,819	0,862
Compost - triennal+ Engrais N*	2,82	1,077	0,006	0,004	0,696	0,904
PPDS (P<0,05)	1,08	0,269	0,006	0,004	0,127	0,214

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 24. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs du sol en éléments traces disponibles (Mehlich) (mg/kg).**

Traitements	Cd		Cr		Co		Pb	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	0,052	0,022	0,188	0,240	0,379	0,451	2,976	1,965
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	0,056	0,021	0,174	0,215	0,356	0,537	2,942	1,872
Boues mixtes -annuel	0,061	0,040	0,174	0,184	0,262	0,309	2,916	2,262
Boues mixtes - triennal	0,064	0,029	0,170	0,205	0,302	0,441	3,041	2,083
Compost -annuel	0,075	0,031	0,181	0,209	0,405	0,397	3,173	2,129
Compost- triennal	0,065	0,017	0,190	0,227	0,356	0,527	3,598	1,638
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	0,058	0,023	0,181	0,217	0,305	0,342	2,878	2,025
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	0,059	0,026	0,192	0,244	0,229	0,303	2,880	2,492
Compost -annuel+ Engrais N*	0,071	0,037	0,181	0,198	0,417	0,556	3,189	2,324
Compost - triennal+ Engrais N*	0,058	0,026	0,185	0,216	0,379	0,620	3,025	1,969
PPDS (P<0,05)	0,009	0,009	0,009	0,037	0,096	0,182	0,337	0,398

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 25. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs totales du sol en éléments majeurs (mg/kg) (2002).**

Traitements	P		K		Ca		Mg	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	643	446	1441	1418	2467	1865	4853	5305
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	630	440	1366	1411	2372	1926	4747	5373
Boues mixtes -annuel	637	511	1294	1330	2826	2089	4634	4846
Boues mixtes - triennal	605	438	1256	1319	2600	1941	4600	5234
Compost -annuel	695	521	1472	1462	3011	2102	4932	5305
Compost- triennal	664	413	1350	1360	2984	1746	4716	5434
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	658	454	1358	1261	2757	1911	4711	5034
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	620	447	1201	1337	2448	1834	4376	5412
Compost -annuel+ Engrais N*	740	594	1522	1502	2978	2469	4981	5158
Compost - triennal+ Engrais N*	708	548	1411	1575	3015	2316	4872	5453
PPDS (P<0,05)	45	90	103	238	222	372	230	611

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 26. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs totales du sol en éléments mineurs (mg/kg) (2002).**

Traitements	B		Cu		Fe		Mn	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	3,264	3,138	10,47	11,73	22117	23539	356	367
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	3,172	3,081	10,41	12,05	21882	24673	360	415
Boues mixtes -annuel	3,459	3,140	13,06	10,51	22150	22511	361	366
Boues mixtes - triennal	4,795	3,194	10,99	10,46	21434	24349	337	380
Compost -annuel	3,559	3,331	14,11	11,80	22603	24089	375	376
Compost- triennal	3,419	2,961	11,75	11,41	22713	25192	359	433
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	3,317	3,111	13,25	10,08	21538	22734	363	361
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	2,949	3,083	10,41	13,55	20103	24993	317	402
Compost -annuel+ Engrais N*	3,544	4,172	15,60	12,57	22678	23716	377	388
Compost - triennal+ Engrais N*	3,426	3,474	12,26	13,48	22222	23639	366	434
PPDS (P<0,05)	0,825	0,589	1,26	3,05	946	2319	31	91

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 27. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs totales du sol en éléments mineurs (mg/kg) (2002).**

Traitements	Zn		Mo		Ni	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	57	54	0,636	0,563	26	30
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	56	53	0,677	0,575	26	30
Boues mixtes -annuel	59	54	0,809	0,745	25	26
Boues mixtes - triennal	58	54	0,684	0,646	24	28
Compost -annuel	68	57	0,840	0,659	27	32
Compost- triennal	62	53	0,833	0,583	26	29
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	59	52	0,899	0,608	26	27
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	56	56	0,723	0,618	23	30
Compost -annuel+ Engrais N*	69	58	0,884	0,718	28	29
Compost - triennal+ Engrais N*	64	56	0,757	0,648	27	32
PPDS (P<0,05)	3	5	0,129	0,078	2	4

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>

**Tableau 28. Influence des apports d'engrais, de boues mixtes et de composts sur les teneurs totales du sol en éléments traces (mg/kg) (2002).**

Traitements	Cd		Cr		Co		Pb	
	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm	0-20 cm	20-40cm
Témoin	0,502	0,465	23,93	25,71	8,54	10,01	12,93	11,53
Engrais N (160 kg ha <sup>-1</sup> )	0,497	0,485	23,28	25,47	8,51	10,32	12,70	11,48
Boues mixtes -annuel	0,534	0,494	23,19	24,22	8,25	8,73	13,47	12,21
Boues mixtes - triennal	0,497	0,509	23,07	25,40	7,88	9,76	12,70	11,76
Compost -annuel	0,560	0,505	23,96	25,35	8,79	9,65	13,46	11,72
Compost- triennal	0,549	0,478	23,58	25,69	8,35	10,29	14,33	10,73
Boues mixtes -annuel+ Engrais N*	0,495	0,456	23,28	23,74	8,38	8,75	12,63	11,17
Boues mixtes - triennal+ Engrais N*	0,467	0,501	21,77	25,73	7,35	9,74	11,97	12,40
Compost -annuel+ Engrais N*	0,573	0,533	24,28	24,87	9,03	9,47	13,57	12,61
Compost - triennal+ Engrais N*	0,542	0,484	24,75	26,06	8,62	10,39	13,54	11,91
PPDS (P<0,05)	0,028	0,046	0,86	2,12	0,59	1,31	0,41	1,03

\*Engrais N = 120 kg ha<sup>-1</sup>