

Compte-rendu de recherche
sur la valorisation agricole
de biosolides de papetières dans
les cultures de maïs-grain, orge et soya

Rapport de recherche 1997- 1999

présenté à



**ABITIBI
CONSOLIDATED**

Par Adrien N'Dayegamiye



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT EN
AGROENVIRONNEMENT

Complexe scientifique

Décembre 2000

Organismes participants

Abitibi Consolidated Inc.

800, Boulevard René-Lévesque Ouest

Montréal, (Québec), H3B 1Y9

- Division Belgo
- Division Laurentide
- Division Wayagamack

Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA)

3300, rue Sicotte, C.P. 480

Saint-Hyacinthe, (Québec)

J2S 7B8

Bioconseil

3480, Notre-Dame

Pointe-du-Lac, (Québec)

G0X 1Z0

Entreprise agricole R.D.R. Proulx

et

Entreprise agricole Mylamy

Equipe de recherche (1997-2000)

Institut de recherche et de développement en agro-environnement (IRDA) :

- **Adrien N'Dayegamiye**, Ph.D. , agr. responsable scientifique du projet
- **Monique Goulet, Medina Abdallahi et Marie Aube Simon** : professionnelles de recherche, analyses statistiques, participation à la rédaction du rapport
- **Anne Drapeau et Louise Thivierge et Sarah Watt**, assistance technique au champ et au laboratoire
- **Jean-Marie Noël, Michel Noël et Benoît Bolduc**, opérations mécanisées au champ, préparation des échantillons
- **Pierre Audesse, Michel Paradis, Gérard Fortin et Jacqueline Faubert** : analyses physiques, chimiques et biologiques
- **Yves Lemay et Frédérique Maranda**, édition du rapport

Bioconseil :

- **Sylvie Huard**, agr. coresponsable du projet, coordinations techniques au champ, communication technique des résultats
- **Luc Suzor et Guy Fradette**, assistance technique au champ, études en lysimètres.

Projet en partenariat



- Synthèse -

Depuis 1995, la compagnie Abitibi Consolidated inc. a mis en œuvre une technologie environnementale d'assainissement des effluents de papetières par voie microbienne qui a permis d'obtenir des boues mixtes (biosolides) riches à la fois en matière organique et en éléments nutritifs majeurs et mineurs.

Afin de préciser leur valeur agronomique, une étude de trois ans (1997-1999) en partenariat entre Abitibi Consolidated inc. (Divisions Belgo, Laurentides et Wayagamack), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et Bioconseil, a été effectuée sur les cultures de maïs-grain, soya et orge dans les régions de Nicolet et Trois- Rivières.

Production

Des applications de boues mixtes sur les sols ont été bénéfiques sur les rendements et la qualité des cultures. En effet, les productions des cultures étudiées, mais particulièrement le maïs-grain, ont augmenté proportionnellement avec les doses de biosolides de papetières. Toutefois, les rendements maximums ont été obtenus lorsque des apports de biosolides étaient complétés avec de l'engrais minéral en quantités réduites à 50 % et 75% de la dose complète NPKMg. Les applications de biosolides de papetières complétées de fumure minérale en doses réduites ont permis des gains de rendements par rapport à la fertilisation minérale complète; ceux-ci se situaient entre 300 et 500 kg/ha pour le soya et l'orge, respectivement, étant de plus d'une tonne pour le maïs-grain. De plus, l'évaluation économique a démontré des gains considérables suivant les apports répétés de biosolides de papetières, en comparaison avec la fertilisation minérale.

Fertilité ou action directe

Les hausses de rendements des cultures obtenues sont en partie dues à l'équilibre nutritif des biosolides de papetières. En effet, à l'exception du potassium, les biosolides ont apporté aux cultures des quantités importantes des éléments minéraux, majeurs et mineurs. Les applications de biosolides ont également stimulé l'absorption des éléments nutritifs du sol ou des

Coefficients d'efficacité en N, P et K :



engrais, améliorant de cette façon leur efficacité.

Enfin, cette étude a démontré que les biosolides de papetières possédaient des coefficients d'efficacité élevés. Dépendamment des types de sols et des doses de biosolides, ceux-ci ont varié pour le maïs-grain entre 26 et 43% pour l'azote (moyenne pour 1997 et 1999), et entre 76 et 120% pour le phosphore, étant supérieur à 300% pour le potassium (1997). Pour la culture de l'orge, les coefficients d'efficacité en azote des biosolides ont varié de 13 à 27% en 1999, selon les doses appliquées.

Qualité des sols ou action indirecte

Les effets bénéfiques des applications des biosolides sont également dus à leur action rapide sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols, qui sont à la base de la croissance des cultures et de leurs rendements. En effet, des apports répétés de biosolides dans deux types de sol ont rapidement favorisé la structuration des sols et amélioré par conséquent la stabilité structurale, la porosité et l'aération du sol. Des apports de biosolides ont également stimulé la microflore du sol, et activé de façon significative les activités biologiques et enzymatiques. Des apports de biosolides de papetières ont augmenté de 30% en moyenne les niveaux de matière organique des sols étudiés. La matière organique constitue le pivot de la productivité des sols, de plus elle permet la conservation du sol et diminue les impacts de pollution par les activités agricoles.

Effet environnemental

En améliorant les propriétés des sols, les biosolides ont augmenté les rendements des cultures et par conséquent les quantités d'éléments nutritifs prélevées. C'est pourquoi des applications répétées de biosolides à raison de doses agronomiques (20-40 t/ha) n'ont pas conduit à court terme à des enrichissements en éléments minéraux, notamment les nitrates, le phosphore disponible et les métaux lourds dans le profil des sols étudiés. En quantités élevées suite aux doses excessives, ces éléments peuvent avoir des impacts négatifs sur la qualité des végétaux, des sols et de l'eau.

Cette étude a également démontré que les applications de biosolides n'ont pas augmenté les microorganismes pathogènes (E.Coli, coliformes). Au contraire, le nombre de ces microorganismes a diminué dans les sols ayant reçu les biosolides, probablement à cause de la compétition avec la

microflore indigène des sols qui était fortement activée par des apports de ces amendements organiques.

Conclusion

Cette étude a démontré que la valorisation des biosolides de papetières présente des avantages autant au niveau agronomique qu'environnemental, notamment grâce à la réduction d'intrants de synthèse (engrais), et à l'amélioration de la matière organique et de la structure. Ces facteurs permettent de diminuer le ruissellement, l'érosion des sols, les pertes d'engrais ou de produits phytosanitaires vers les milieux aquatiques.

Au niveau pratique, cette recherche a permis d'obtenir les coefficients d'efficacité des éléments nutritifs dans deux sols contrastés et pendant deux saisons climatiques. Il s'agit de connaissances importantes au niveau de la pratique agronomique, car ces coefficients pourront être intégrés dans le prochain guide de fertilisation du CPVQ, ce qui permettra une meilleure gestion agronomique et environnementale des engrais et des boues mixtes (biosolides) de papetières en agriculture.

Ces résultats permettent de conclure que les biosolides de papetières constituent un amendement de qualité pour une agriculture durable, rentable et respectueuse de la préservation de la qualité des sols et de l'eau.

Recommandations techniques

Les résultats obtenus dans cette étude permettent de tirer les recommandations suivantes :

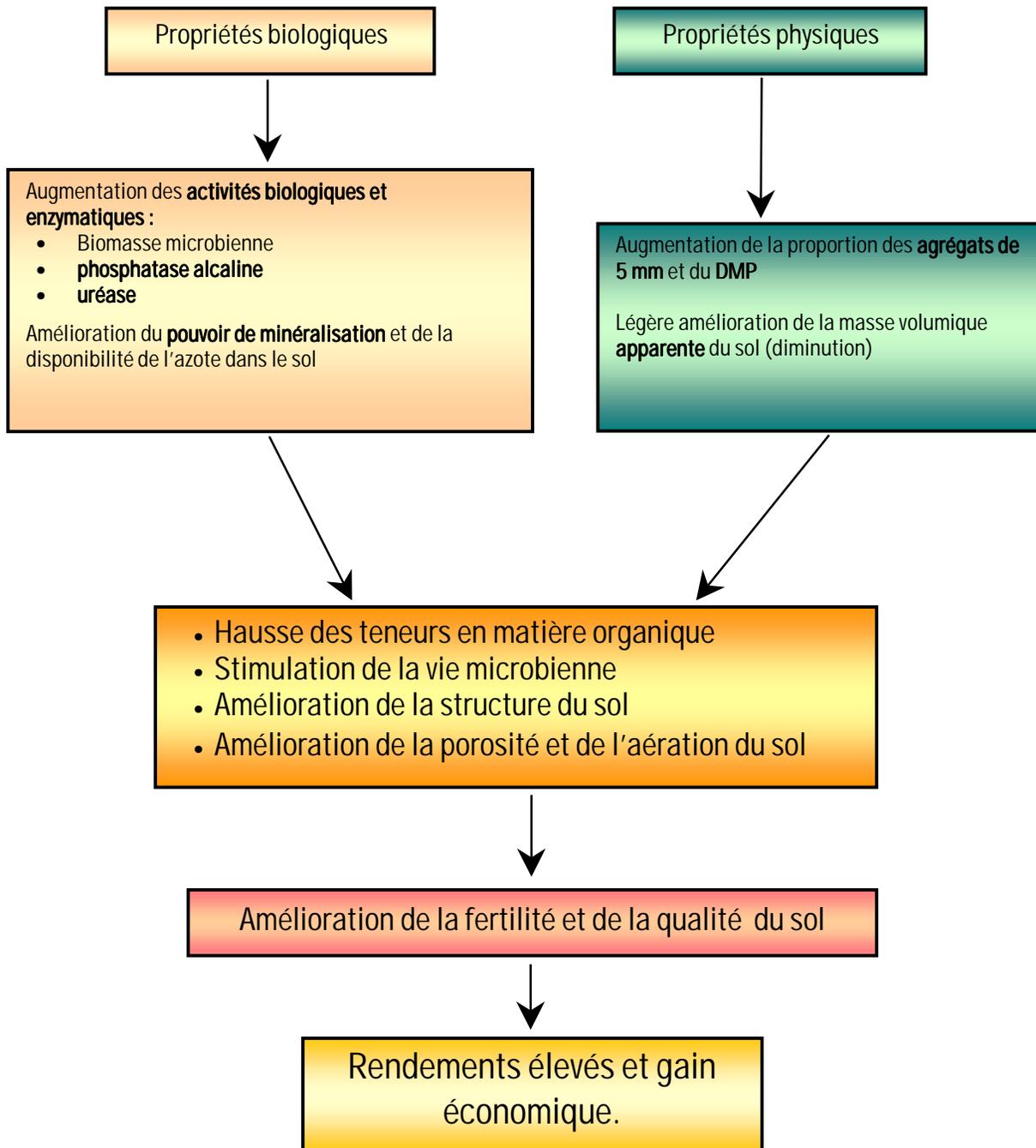
- À cause de l'efficacité élevée des éléments nutritifs des biosolides de papetières, il est recommandable d'ajuster la fertilisation minérale suite à leurs applications, en vue d'assurer des bénéfices à la ferme et de préserver la qualité des sols et de l'environnement.
- Le choix de la culture détermine la valorisation optimale des biosolides de papetières. Il est recommandable de les appliquer sur des cultures ayant une longue période de végétation (maïs, pomme de terre, prairies) qui sont plus exigeantes en éléments nutritifs et qui pourraient davantage valoriser les biosolides de papetières. Par ailleurs, les cultures de céréales ou d'orge peuvent mieux bénéficier des arrières-effets importants des biosolides de papetières.



- Les doses moyennes et économiques recommandées varient de 20 à 40 t/ha, selon la richesse des sols notamment en phosphore, et les cultures envisagées.

Schéma synthèse de l'effet de l'application de biosolides de papetières sur les paramètres physiques et biologiques étudiés

Les applications de biosolides de papetières chez les cultures de maïs-grain, de soya et d'orge ont eu pour effets :



Perspectives de recherche

Les technologies des industries papetières sont en constante évolution et les biosolides (boues mixtes) produits peuvent être variables quant à leur composition physique et minérale, notamment en terme de matière sèche, des rapports C/N, des valeurs de pH et du contenu en soufre.

De plus, il existe plusieurs pratiques de gestion de biosolides dans les sols qui ne sont pas encore bien étudiées. Il s'agit notamment des périodes et des modes d'application, ainsi que des effets du soufre au niveau du sol et des rendements.

Des études sont encore nécessaires pour connaître :

- Les effets agronomiques des biosolides dans les sols sablonneux.
- Les périodes d'application : hiver ou printemps.
- Les effets des modes d'épandage par labour ou chisel sur l'évolution des biosolides dans le sol. (minéralisation-humification), sur l'efficacité et les pertes des éléments nutritifs.
- Poursuite des études relatives aux microorganismes pathogènes dans le sol et l'eau de drainage, suite aux applications répétées de biosolides.

- Table des matières -

1998

Valorisation agricole de boues mixtes de papetières dans les cultures de maïs-grain et de soya

Résumé	4
Problématique	5
Objectifs de recherche	7
Protocole expérimental	8
Paramètres étudiés	11
Résultats	12
- La composition chimique des boues mixtes.....	12
- Observations pendant la période de végétation	13
- Concentrations en éléments nutritifs des cultures en période de floraison	14
- Rendements de maïs-grain	15
- Rendement de soya	19
- Effets sur la structure des sols.....	22
- Effets sur l'activité biologique et enzymatique des sols.....	24
- Coefficients d'utilisation et d'efficacité d'N, P et K.....	25
- Aspect environnemental	28
Conclusion	29
Perspectives de recherche	30

1999

Arrières-effets des boues mixtes de papetières dans les cultures de maïs-grain et de soya

Résumé	32
Problématique	33
Hypothèse.....	35
Protocole expérimental	36
Résultats	38
- La composition physique et chimique des boues mixtes de papetières	38
- Observations pendant la période de végétation	38
- Concentrations en éléments nutritifs des cultures en période de floraison	39
- Rendements et qualité de la récolte du maïs-grain	39

- Prélèvements en éléments nutritifs par le maïs-grain	42
- Le bilan d'azote.....	44
- Évolution des nitrates dans le sol au cours de la saison de croissance.....	46
- Dynamique des éléments nutritifs dans le profil du sol	46
Conclusion	48
Annexes du rapport 1999	49

2000

Valeur agronomique des biosolides de papetières : effets sur la production des cultures et la qualité des sols.

Résumé	57
Problématique	59
Hypothèses et objectifs de recherche	60
Protocole expérimental	61
Résultats	63
- La composition physique et chimique des biosolides de papetières	63
- Rendements et qualité des récoltes du maïs-grain	65
- Rendements de l'orge	67
- Prélèvements en éléments nutritifs (maïs-grain et orge).....	68
- Coefficients d'efficacité d'azote (maïs-grain et orge)	69
- Qualité du sol	
- Effets des biosolides de papetières sur les activités biologiques et enzymatiques du sol.....	72
- Effets des biosolides de papetières sur la structure du sol.....	74
- Effets des biosolides de papetières sur la matière organique et la masse volumique apparente	75
- Fertilité et analyse environnementale	78
- Évaluation économique	81
Conclusion	83
Annexes du rapport 2000	84
Bibliographie	96
Remerciements.....	97

Valorisation agricole de boues mixtes de papetières dans les cultures de maïs-grain et de soya

- 1998 -



Valorisation agricole de boues mixtes de papetières dans les cultures de maïs-grain et de soya

- Résumé -

Cette étude effectuée sur deux types de sols différents a démontré que l'apport de boues mixtes a permis des augmentations très importantes de rendements de maïs-grain et de soya. Dans le cas du maïs, un gain de plus de 1000 kg/ ha en grains a été obtenu suite à l'application de 20 ou 40 t/ha, complétées respectivement par des doses réduites d'un quart ou de la moitié de la fertilisation minérale NPKMg. La réduction de ces doses d'engrais minéraux a été accompagnée par de hausses de rendements, ce qui justifie la valorisation de boues mixtes à la ferme, car l'épargne sur le coût des engrais peut permettre l'acquisition de ces biomasses. Cette étude a également montré que les boues mixtes ont agi très rapidement sur la formation des gros agrégats (> 5 mm), elles ont amélioré la stabilité de la structure (DMP) et augmenté l'activité biologique et enzymatique des sols. Cette action indirecte des boues mixtes sur les conditions du sol (structure, porosité, rétention en eau et minéralisation) est probablement à la base de la meilleure valorisation des éléments nutritifs observée, et par conséquent de l'obtention de rendements élevés. En effet, les coefficients d'utilisation des boues mixtes étaient élevés, variant selon les doses et les types de sol entre 13 et 25 % pour l'azote, 29 et 77% pour le phosphore et plus de 100% pour le potassium. En comparaison avec l'engrais minéral, les coefficients d'efficacité se situaient, selon les sols et les doses de boues mixtes, entre 25 et 42% pour l'azote, 76 et 120% pour le phosphore, étant supérieurs à 300% pour le potassium. Ces résultats démontrent que la valorisation des boues mixtes de papetières, riches en carbone et en éléments nutritifs majeurs et mineurs, constitue non pas un investissement pour aujourd'hui, mais pour celui de demain. En améliorant également les propriétés physiques et biologiques du sol (structure, activité biologique et bilan de la matière organique), l'apport de boues mixtes de papetières peut permettre des augmentations soutenues de rendements à moyen et long terme, tout en maintenant la productivité et la qualité agroenvironnementale des sols.

- Problématique -

La gestion de résidus de papetières constitue un programme environnemental important au sein de la compagnie Abitibi Consolidated inc. Ainsi, les systèmes de traitement primaire et secondaire des eaux usées installés dans les divisions de cette compagnie génèrent des quantités importantes de boues mixtes. Par exemple, les usines de la Mauricie- Trois-Rivières produisent annuellement 350,000 tonnes de boues mixtes (1). Ces boues mixtes, communément appelées biosolides, sont composées de fibres de bois résultant des traitements primaires et de biomasse biologique composée de microfaune et de microflore, provenant essentiellement des traitements secondaires. Dans cette dernière étape de traitement des eaux, des ajouts importants en éléments nutritifs sont effectués, afin de permettre la croissance et la multiplication des microorganismes responsables de la purification des eaux usées.

C'est pourquoi les boues mixtes sont riches à la fois en carbone organique, ainsi qu'en éléments nutritifs, notamment l'azote, le phosphore, le calcium et le magnésium ainsi qu'en éléments mineurs. Les boues mixtes obtenues sont régulièrement analysées afin de respecter les exigences environnementales et de vérifier la constance de leur qualité agronomique (2).

A cause de ces avantages agronomiques des boues mixtes, leur valorisation agricole est à privilégier dans le contexte d'une agriculture durable. En effet, les boues mixtes, à la fois riches en éléments nutritifs et en carbone organique peuvent améliorer ou entretenir la fertilité et la qualité des sols. Plusieurs travaux de recherche ont démontré que les sols intensément cultivés connaissent des pertes en matière organique à cause du travail fréquent du sol et des rotations courtes des cultures qui ne laissent pas au sol des quantités suffisantes de résidus organiques (3). De même, on constate également que le travail réduit du sol ou les rotations ne peuvent pas maintenir à eux seules le bilan positif de la matière organique des sols. Pour toutes ces raisons, on recommande des apports d'amendements organiques afin d'améliorer ou d'entretenir la qualité des sols cultivés (4,7,11).

De tous les amendements organiques, le fumier solide de bovins est le plus utilisé, mais dans les régions de cultures intensives, celui-ci ne se trouve pas en quantités suffisantes pour couvrir les besoins agricoles. Toutefois, il existe, au Québec, d'autres types d'amendements organiques, notamment les biomasses ligneuses comme la tourbe, la sciure, les écorces, les copeaux ou les boues primaires. Cependant, l'incorporation dans les sols de ces amendements organiques ayant des rapports C/N élevés (80-300) crée une faim d'azote pour les plantes à cause de l'immobilisation microbienne des éléments nutritifs, particulièrement l'azote, et on doit par conséquent augmenter

les doses des engrais azotés afin d'assurer la nutrition optimale des cultures et éviter ainsi les baisses de production (5, 10). Dans certains cas, on recommande plutôt de composter ces résidus avant leur valorisation agronomique.

Comme les fumiers, les boues mixtes de papetières présentent des rapports C/N moins élevés (C /N :15-28) ; ils sont riches en éléments nutritifs et peuvent être directement valorisées sans créer de nuisance à la croissance et à la production des cultures. Toutefois, la valorisation optimale des boues mixtes exige la connaissance de leur valeur fertilisante en fonction des sols et des cultures, ainsi que leur action sur le sol, notamment l'amélioration de la structure, l'augmentation des niveaux de matière organique et du potentiel biologique des sols.

- Objectifs de recherche -

Les objectifs de cette recherche consistaient à :

- Connaître les effets de l'apport de boues mixtes sur la production des cultures de maïs-grain et de soya.
- Vérifier, en période de végétation, les effets de boues mixtes sur la germination et la croissance des cultures, l'immobilisation d'azote ainsi que les symptômes de carence en éléments nutritifs.
- Déterminer les doses optimales de boues mixtes visant à assurer des productions élevées et une meilleure qualité agroenvironnementale, à court et à moyen terme.
- Évaluer la valeur fertilisante des boues mixtes en déterminant leurs coefficients d'utilisation et d'efficacité d'azote, du phosphore et du potassium. La connaissance de ces coefficients est nécessaire dans l'établissement des plans de fertilisation à la ferme, lorsqu'on valorise les boues mixtes de papetières.
- Préciser l'ampleur de la réduction des engrais minéraux, suite à l'application de boues mixtes de papetières particulièrement riches en N, P, Ca, Mg et en éléments mineurs.
- Mesurer l'effet des boues mixtes sur l'amélioration de la structure et du potentiel biologique des sols.
- Déterminer à moyen terme l'effet cumulatif en éléments nutritifs sur le sol et les productions, ainsi que sur le bilan de la matière organique dans les sols, suite aux apports répétés de boues mixtes.

- Protocole expérimental -

Cet essai sera effectué (1997-1999) sur les cultures de maïs-grain et de soya qui sont parmi les principales cultures de rotation au Québec, en plus d'être parmi les plus rentables productions agricoles. Par ailleurs, le maïs-grain est une plante ayant une longue période de végétation et des exigences élevées en éléments nutritifs, qui par conséquent, valorise le mieux les éléments nutritifs des engrais ou des fumiers. C'est pourquoi elle constitue une meilleure plante-test en vue de la valorisation des boues mixtes en agriculture.

Pour le maïs-grain, l'expérience est établie sur deux types de sols différents, soit sur un loam limono-argileux de la série Nicolet située sur la ferme Proulx à Saint-Jean-Baptiste-de-Nicolet, ainsi que sur un loam limoneux de la série Baudette, emplantée sur la ferme Mylamy à Yamachiche (Tableau 1). Comme pour les fumiers, les propriétés du sol peuvent influencer la valorisation optimale des éléments nutritifs des boues mixtes de papetières. L'essai sur le soya est établi seulement sur la ferme Proulx.

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques des séries de sols.

	Texture	pH	M.O.	N	P	K	Ca	Mg
			---%---		-----kg/ha-----			
Série Nicolet	Loam limono-argileux	6,8	3,8	0, 21	277	294	2978	259
Série Baudette	Loam limoneux	6,5	4,3	0,19	208	336	2549	409

L'expérience, en trois répétitions, comprend le témoin sans engrais, trois doses croissantes respectives pour l'azote (60, 120, 180 kg N /ha complétées de PKMg), le phosphore (30, 60, 90 kg P₂O₅/ha additionnées de NKMg) et les boues mixtes (20, 40, 60 t/ha sur base humide) et enfin deux traitements avec boues mixtes où les doses en engrais minéraux sont réduites d'un quart et de moitié (20 t/ha +³/₄ de la dose de NPKMg; 40 t/ha +¹/₂ de la dose de NPKMg). Il s'agit en tout de 12 traitements x 3 répétitions x 3 sites = 108 parcelles expérimentales.

Les traitements sont identiques pour la culture de soya, cependant nous n'avons pas appliqué de fertilisation azotée, étant donné que cette culture fixe une grande partie de son azote de l'atmosphère grâce à la fixation symbiotique.

Les propriétés physiques et chimiques des boues mixtes utilisées dans cette étude sont indiquées dans les tableaux 2 et 3. L'application de boues mixtes a été effectuée avant le semis, au printemps 1997, avec l'épandeur à fumier. La boue Belgo, qui avait un rapport C/N plus élevé, a été appliquée

pour la culture de soya moins exigeante en azote, tandis que les boues mixtes Laurentides et Wayagamack riches en cet élément ont été apportées dans les deux sites cultivés en maïs-grain, car cette culture présente des besoins plus élevés en azote. Les boues mixtes ont été par la suite incorporées avec une herse à disques dans la couche superficielle du sol (0-10 cm), car l'activité microbienne qui décompose et minéralise ces biomasses organiques est plus élevée dans cette couche.

Le semis du maïs-grain a été fait le 23 mai 1997, avec la variété Pionier 3921-2650 UTM à la ferme RDR Proulx et la variété DK 220-2250 UTM à la ferme Mylamy. Le taux de semis était de 74130 plants/ha dans les deux fermes et l'application de l'herbicide Dual était effectuée en prélevée du maïs. La culture de soya a été semée le 26 mai 1997 avec un taux de semis de 140 kg/ha. On a utilisé la variété Bayfield 2675 UTM. L'herbicide Dual+Affolan a été appliqué en prélevée.

Ces essais seront poursuivis en 1998 et 1999, afin d'étudier les effets résiduels ou cumulatifs sur la nutrition des plantes et les rendements et pour suivre les effets des boues mixtes sur l'amélioration de la fertilité et de la qualité des sols (structure, activité biologique et bilan humique). L'aspect environnemental sera aussi étudié, notamment l'enrichissement du profil du sol en nitrates, phosphore et en métaux lourds.

Tableau 2. Propriétés physiques et chimiques des boues mixtes de papetières valorisées sur les cultures de maïs-grain et de soya (1997)

Boues mixtes	pH	M.S.	Cendres	M.O.	Carbone	N	C/N	N-NH ₄	N-NO ₃
		-----%-----						----- mg/kg -----	
1-Laurentide	6,60	32,4	20,60	79,40	46,20	2,52	18	544,9	0,58
2-Belgo	7,50	31,85	18,78	91,22	53,04	2,19	24	957,6	0,12
3-Wayagamack	7,17	29,86	8,70	91,3	45,65	2,72	17	828,1	0,566

1 et 3 : boues mixtes valorisées dans la culture de maïs-grain. (moyenne de 3 échantillons).
 2 : boues mixtes valorisées dans la culture du soya. (moyenne de 3 échantillons).

Tableau 3. Teneur en éléments majeurs et mineurs des boues mixtes de papetières valorisées sur les cultures de maïs-grain et de soya (1997)

Boues mixtes	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na	Cd	Cr	Co
-----mg/kg-----													
1	3012,6	1018,9	28238,3	926,0	14,65	37,6	1209,6	82,3	119,3	1293,7	2,49	15,9	7,9
2	3816,5	1775,4	22635,7	745,5	21,40	32,2	977,0	184,5	71,9	1084,4	1,74	1,9	0,98
3	4254	1551	9886	1271	6,18	35,98	2202	155,0	155,1	1751	1,26	4,5	0,8

1 et 3 : boues mixtes Laurentide et Wayagamack, respectivement, valorisées dans la culture de maïs-grain. (moyenne de 3 échantillons).

2: boue mixte Belgo, valorisée dans la culture du soya. (moyenne de 3 échantillons).

- Paramètres étudiés -

- Les rendements et la qualité du maïs-grain et du soya.
- Les concentrations en éléments nutritifs majeurs et mineurs à la floraison des cultures, afin de connaître l'état de la nutrition des plantes (nutrition optimale ou carence), suite aux apports de boues mixtes.
- La répartition des agrégats du sol (formation de la structure) et la stabilité structurale (DMP) des sols, suite à l'application de boues mixtes.
- La teneur des sols en biomasse microbienne et en activité enzymatique (phosphatase acide et alcaline et l'uréase) .
- La valeur fertilisante des boues mixtes (coefficients d'utilisation et d'efficacité), a été déterminée selon la méthode classique des bilans apparents. Il s'agit de la différence des quantités d'azote, de phosphore ou de potassium prélevées par les cultures entre les traitements avec les doses de boues et le témoin sans boues ni engrais. On divise par la suite cette différence par la quantité totale de ces éléments apportés dans le sol par l'application de boues mixtes.
- Le choix de la dose optimale de boues mixtes a été fait à partir des comparaisons de rendements et de prélèvements entre les doses étudiées : 20, 40 et 60 t/ha sur la série Nicolet ou 30, 60, 90 t/ha sur la série Baudette.
- Le niveau de réduction de la dose d'azote a été évalué en comparant les rendements obtenus entre la fertilisation conventionnelle (NPKMg) et ceux des sols ayant reçu des boues mixtes de papetières, complétées avec des différents niveaux d'engrais minéraux.

- Résultats -

La composition chimique des boues mixtes

Les résultats des analyses effectuées sur des échantillons de boues mixtes pendant l'hiver 1997 sont présentés dans les tableaux 2 et 3. Les valeurs de pH-eau varient de 6,6 à 7,5. De façon générale, il s'agit de valeurs de pH qui sont optimales pour la croissance de la plupart des plantes cultivées ainsi que des microorganismes du sol.

Au niveau des teneurs en éléments nutritifs, les boues mixtes sont généralement riches en azote total, avec des teneurs faibles en azote ammoniacal, et extrêmement pauvres en nitrates, ce qui indique que l'azote est principalement sous forme organique dans les boues mixtes de papetières. Sous cette forme, les boues mixtes se minéraliseraient graduellement au cours de la période de végétation, fournissant des éléments nutritifs au fur et à mesure que les besoins des plantes deviennent croissants.

Le contenu en P est en moyenne de 0,35%, soit 0,8% P_2O_5 . Les analyses de Mehlich III, qui déterminent le phosphore disponible, indiquent que dans les boues mixtes, cet élément se trouve essentiellement sous forme minérale (60%). Comme dans le cas de l'azote, le phosphore organique est principalement d'origine microbienne. Les boues mixtes sont pauvres en potassium avec une teneur moyenne de 0,2% K_2O . En raison de 30 t/ha de boues mixtes apportées au sol, avec une teneur en matière sèche de 30%, on apporterait ainsi en moyenne 225 kg N/ha, 72 kg P_2O_5 /ha et seulement 18 kg K_2O / ha.

De cet exercice, il ressort qu'un apport de cette dose peut combler les besoins en N et P des cultures plus productrices comme le maïs, la pomme de terre etc. Par contre, l'application de boues mixtes devrait être complétée d'engrais potassiques afin de ne pas rencontrer des carences en cet élément. En effet, les boues mixtes contiennent des teneurs plus élevées en d'autres éléments basiques comme le Ca, le Mg et le Na, ce qui pourrait occasionner des effets d'antagonisme basique, car ces cations basiques peuvent empêcher l'absorption du K lorsque le sol n'est pas suffisamment riche en cet élément. Dans les sols pauvres en K, il faut donc bien ajuster les doses de K suite à l'apport de boues mixtes. Par ailleurs, pour les sols pauvres en Mg et en Ca échangeables, comme c'est le cas dans les sols cultivés en pomme de terre, l'apport des boues mixtes est bénéfique pour contrer des déficiences en ces éléments.

Les boues mixtes apportent également des quantités importantes d'éléments mineurs (Zn, B, Mn, Cr et Co) qui sont indispensables dans la photosynthèse et les autres étapes du métabolisme de la plante, favorisant ainsi la croissance optimale et les rendements élevés des cultures. Dans les sols cultivés, on observe de plus en plus des carences en éléments mineurs à cause de leur épuisement par les prélèvements des plantes à haut rendement. Or, les engrais recommandés ne sont pas souvent complétés d'éléments mineurs. A l'exception du potassium, les boues mixtes apportent ainsi une alimentation équilibrée des cultures.

Observations pendant la période de végétation

Les observations effectuées durant les premières périodes de végétation ont indiqué que les boues mixtes ne sont pas toxiques aux cultures. En effet, lors de la décomposition primaire des amendements organiques frais, des produits phénoliques toxiques sont libérés dans le sol et ils affectent ou diminuent le taux de germination des plantes(6). Dans cette étude, le taux de germination des cultures n'a pas été affecté par l'apport de boues mixtes, même avec les doses les plus élevées, soit 60 et 90 t/ha. De plus, après 40 jours de croissance, la grosseur et la hauteur des plants de maïs ou de soya étaient identiques dans tous les traitements ayant reçu les doses croissantes de boues mixtes ; cette croissance était comparable à celle des parcelles ayant reçu la fertilisation minérale conventionnelle NPKMg.

Contrairement aux autres amendements organiques de nature ligneuse (tourbe, sciure, copeaux, écorce, boues primaires), les boues mixtes n'ont pas créé la faim d'azote dans les sols, c'est-à-dire l'immobilisation d'azote durant les phases primaires de la décomposition. Durant cette phase, les microorganismes du sol utilisent l'azote du sol ou de l'engrais pour leur besoin métabolique, entraînant ainsi une compétition avec la plante pour la nutrition en azote. Le phénomène d'immobilisation d'azote se rencontre surtout pour les amendements riches en carbone organique, mais pauvres en N (5), ce qui ne semble pas être le cas pour les boues mixtes dont les rapports C/N varient de 17 à 24 (Tableau 2). Les amendements ligneux frais présentent des rapports C/N souvent plus élevés (C/N : 60-300).

Concentrations en éléments nutritifs des cultures en période de floraison.

Afin de connaître l'équilibre nutritif ou l'état de carence des cultures suite à l'application de boues mixtes à différentes doses, nous avons effectué un échantillonnage de feuilles de maïs et de soya en période de floraison qui est la plus critique saison pour la nutrition minérale. L'objectif consistait à vérifier, d'une part, si les boues mixtes apportent suffisamment d'éléments nutritifs disponibles aux cultures. D'autre part, nous avons vérifié si l'apport de boues mixtes, à certaines doses élevées, ne pouvait pas créer des carences en certains éléments majeurs ou mineurs.

Une teneur optimale des éléments nutritifs assure aux plantes un métabolisme normal ainsi qu'une bonne croissance. C'est pourquoi une carence dans l'un ou l'autre élément nutritif peut affecter le rendement et la qualité des récoltes. La mesure des carences en éléments nutritifs se fait par observations visuelles des symptômes qui se manifestent par les décolorations des feuilles (N, P, Mg, Zn, Mn, Cu) ou par le brunissement et nécrose (K, B, Fe). Cependant, l'analyse de la concentration des tissus des plantes au moment de la floraison demeure la méthode la plus objective et la plus fiable. Dans cette étude, l'échantillonnage des feuilles a été effectué à l'apparition des soies pour le maïs et au moment de la floraison pour le soya.

Tableau 4. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur la concentration en éléments majeurs et mineurs du maïs-grain en période de floraison (série Nicolet).

Traitements	Éléments majeurs					Éléments mineurs			
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Mn	Zn
	-----%-----					-----mg/kg-----			
1. Témoin	2,3 d	0,29 a	2,6 ab	0,57 c	0,20 c	7,1 a	8,5 b	32,8 abc	19,8 c
2. NPKMg	3,3 a	0,35 a	2,5 b	0,57 c	0,23 a	7,7 a	13,4 a	52,5 a	21,6 b
3. 20 t/ha*	2,5 cd	0,36 a	2,6 ab	0,61 b	0,20 a	8,0 a	9,8 b	18,0 c	25,4 b
4. 40 t/ha*	2,9 bc	0,40 a	2,7 a	0,63 a	0,21 a	7,8 a	13,0 a	22,7 bc	28,1 a
5. 20 t/ha + ¼ NPKMg	3,3 a	0,39 a	2,5 b	0,61 ab	0,24 a	7,3 a	13,0 a	42,0 ab	34,0 a
6. 40 t/ha + ½ NPKMg	3,3 ab	0,38 a	2,6 ab	0,62 ab	0,23 a	7,2 a	13,0 a	35,0 abc	29,7 a
Teneur optimale ⁺	2,5-3,5	0,20-0,45	1,71-2,50	0,21-0,50	0,13-0,30	4-25	3-15	15-300	15-70

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-d : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

+ : source Tran (1995).

Les résultats obtenus (Tableaux 4 et 5) montrent que les concentrations en éléments nutritifs en cette période de végétation des cultures sont généralement plus faibles dans le témoin sans engrais minéraux ni boues mixtes. Ces concentrations augmentent avec les doses de boues mixtes avec ou sans complément d'engrais minéraux et elles sont supérieures ou comparables à la fertilisation

minérale conventionnelle (NPKMg). Il ressort que l'apport de boues mixtes riches en certains éléments nutritifs, notamment l'azote, le Mg et le Ca n'a pas créé de symptômes de carences ni en K ni en éléments mineurs. Au contraire, on observe plutôt un effet stimulant de l'application de boues sur la nutrition minérale des plantes étudiées.

Tableau 5. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur la concentration en éléments majeurs et mineurs du soja en période de floraison (série Nicolet).

Traitements	Éléments majeurs					Éléments mineurs			
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Mn	Zn
	------%-----					-----mg/kg-----			
1. Témoin	4,3 ab	0,40 a	1,6 a	1,7 ab	0,25 b	28,6 a	9,2 b	9,3 ab	15,1 c
2. NPK	4,3 ab	0,40 a	1,7 a	1,6 b	0,25 b	29,2 a	9,8 ab	11,8 a	17,5 b
3. 20 t/ha*	4,2 b	0,40 a	1,7 a	1,9 a	0,28 ab	29,4 a	10,0 ab	8,3 b	17,9 b
4. 40 t/ha	4,5 a	0,43 a	1,7 a	1,8 ab	0,31 a	33,9 a	11,3 a	8,4 b	21,2 a
5. 20 t/ha + ¾ PKMg	4,1 b	0,38 a	1,6 a	1,8 ab	0,26 ab	31,5 a	9,9 ab	10,2 ab	18,8 b
6. 40 t/ha + ½ PKMg	4,3 ab	0,38 a	1,7 a	1,6 b	0,24 b	30,0 a	10,5 ab	10,9 ab	20,9 a
Teneur optimale ⁺	4-5,5	0,20-0,50	1,70-2,50	0,40-2,00	0,25-1,00	20-55	7-30	15-100	15-70

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

+ : source Tran (1995).

Rendements du maïs-grain

Les rendements en grains de maïs varient de 7000 à 11000 kg/ ha (15% d'humidité), selon les séries de sols et les traitements (Tableau 6). Dans le loam limono-argileux de la série Nicolet, les rendements obtenus avec les boues mixtes seules (20, 40 t/ha ; traitements 3 et 4) sont de même niveau que les productions obtenues avec la fertilisation minérale conventionnelle NPKMg (traitement 2) ou les boues mixtes complétées avec la fertilisation minérale (NPKMg) réduite d'un quart ou de la moitié de la dose (traitements 5 et 6).

Tableau 6. Effet de boues mixtes de papetières sur les rendements et la qualité des grains de maïs

Traitements	Série Nicolet		Série Baudette	
	Rendements en grains (kg/ha)	Poids kg/hl	Rendements en grains (kg/ha)	Poids kg/hl
1. Témoin	8 218 b	66 b	6 933 d	61 b
2. NPKMg	9 942 ab	73 a	9 275 bc	68 a
3. 20 t/ha*	9 553 ab	72 a	8 403 c	69 a
4. 40 t/ha	9 607 ab	72 a	8 608 c	68 a
5. 20 t/ha + ¾ NPKMg	9 868 ab	74 a	10 222 ab	69 a
6. 40 t/ha + ½ NPKMg	11 145 a	74 a	10 346 a	69 a

* 30 et 60 t/ha sur la série Baudette.

a-d : deux moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

Dans la série Baudette, les rendements en grains obtenus avec les doses de boues mixtes seules sont plus élevés que le témoin, mais inférieurs à la production obtenue avec la fertilisation minérale conventionnelle (Tableau 6). Les rendements les plus élevés de grains de maïs ont été obtenus avec les doses de boues complétées de la moitié ou du trois quart des doses de la fertilisation minérale.

De façon générale, l'apport de boues mixtes a favorisé des augmentations significatives de rendement de grains. Cependant, l'effet des boues sur la production du maïs est plus significatif sur la série Nicolet qui présente une texture plus lourde, comparativement au sol de la série Baudette (Fig. 1).

Comme dans le cas des fumiers, ces résultats montrent que les effets des boues mixtes sont plus rapides dans un sol présentant des conditions initiales pauvres, tel le compactage ou une mauvaise structure. En effet,

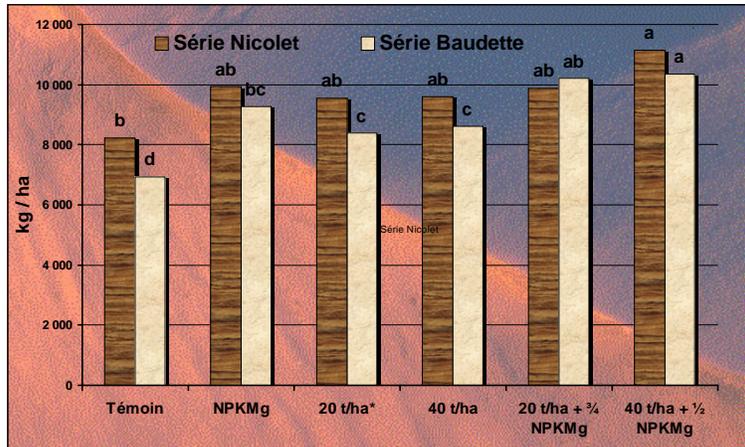


Figure 1. Effet de boues mixtes de papetières sur les rendements en grains de maïs.

les rendements en grains

obtenus sur la série Nicolet sont supérieurs à la production obtenue sur la série Baudette, même si les doses de boues mixtes apportées étaient plus élevées sur cette dernière (30, 60 et 90 t/ha) comparativement à 20, 40 et 60t/ha de boues apportées sur la série Nicolet (Tableau 6, Fig. 2).

Comme pour le rendement en grains, l'effet des boues mixtes sur le poids par hl est plus élevé dans le loam limono-argileux de la série Nicolet, comparativement au loam limoneux de la série Baudette

(Tableau 6). On a observé un effet significatif des apports de biosolides et d'engrais minéraux sur le poids spécifique des grains de maïs.

Les prélèvements du maïs-grain en éléments nutritifs majeurs (N, P, K, Ca et Mg) sont proportionnels aux rendements obtenus et aux doses de boues mixtes apportées au sols. Les analyses statistiques montrent que ceux-ci sont significativement plus élevés suite à l'apport de boues mixtes complétées de doses réduites d'engrais (Tableaux 7-10). À l' exception du B, les prélèvements en éléments mineurs ont également été significativement augmenté par des apports de boues mixtes, comparativement au témoin. L'apport des boues mixtes avec ou sans ajout d'engrais a donc favorisé une nutrition équilibrée de la plante ainsi qu'un niveau élevé de la qualité des grains, probablement grâce à son apport en éléments majeurs et mineurs, mais aussi en améliorant les conditions du sol propices à la croissance du maïs et au remplissage et à la maturation des grains.

Tableau 7. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur la production et les prélèvements en éléments majeurs du maïs-grain (plant entier, série Nicolet).

Traitements	Rendement (matière sèche)	N	P	K	Ca	Mg
-----kg/ha-----						
1. Témoin	15 027 b	148 b	31,9 c	164,0 c	31,3 b	22,8 b
2. NPKMg	20 041 a	237 a	60,0 a	217,0 a	43,5 a	32,1 a
3. 20 t/ha*	15 894 b	182 ab	46,9 b	178,9 b	35,0 b	22,7 b
4. 40 t/ha	16 411 b	211 a	55,2 a	188,6 ab	44,0 a	24,7 b
5. 20 t/ha + ¾ NPKMg	21 430 a	219 a	61,2 a	203,0 a	40,2 a	28,2 a
6. 40 t/ha + ½ NPKMg	20 960 a	209 a	59,0 a	183,6 ab	39,7 a	26,2 a

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan .

Tableau 8. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur la production et les prélèvements en éléments majeurs du maïs-grain (plant entier, série Baudette).

Traitements	Rendement (matière sèche)	N	P	K	Ca	Mg
-----kg/ha-----						
1. Témoin	9 051 c	99,0 c	18,4 b	82,3 c	20,3 b	21,4 bc
2. NPKMg	15 372 b	188,0 a	35,0 a	142,5 b	34,0 a	39,6 a
3. 30 t/ha*	13 213 b	145,0 b	33,9 a	147,2 b	28,6 ab	28,8 bc
4. 60 t/ha	15 337 b	186,0 a	45,8 a	136,6 b	34,8 a	32,7 b
5. 30 t/ha + ¾ NPKMg	18 746 a	202,6 a	39,5 a	164,7 a	34,4 a	39,1 a
6. 60 t/ha + ½ NPKMg	20 183 a	235,7 a	48,2 a	171,6 a	39,0 a	44,1 a

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-d : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan .

Tableau 9. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les prélèvements du maïs-grain en éléments mineurs (plant entier, série Nicolet).

Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----g/ha-----				
1. Témoin	50 a	27 c	1414 a	229 c	31 c
2. NPKMg	60 a	79 a	1834 a	659 a	66 b
3. 20 t/ha*	50 a	38 b	2253 a	248 c	156 a
4. 40 t/ha	60 a	43 b	3695 a	317 bc	35 c
5. 20 t/ha + ¼ NPKMg	60 a	74 a	2683 a	449 b	116 a
6. 40 t/ha + ½ NPKMg	60 a	88 a	3089 a	496 b	96 ab

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

Tableau 10. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les prélèvements du maïs-grain en éléments mineurs (plant entier, série Baudette).

Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----g/ha-----				
1. Témoin	60 b	54 b	2949 a	139 b	28 c
2. NPKMg	80 a	79 a	2896 a	252 a	50 b
3. 30 t/ha*	60 b	43 b	5099 a	150 ab	85 a
4. 60 t/ha	70 b	59 b	3320 a	199 a	36 b
5. 30 t/ha + ¼ NPKMg	70 b	62 ab	2728 a	208 a	55 b
6. 60 t/ha + ½ NPKMg	60 b	57 a	2540 a	216 a	17 c

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

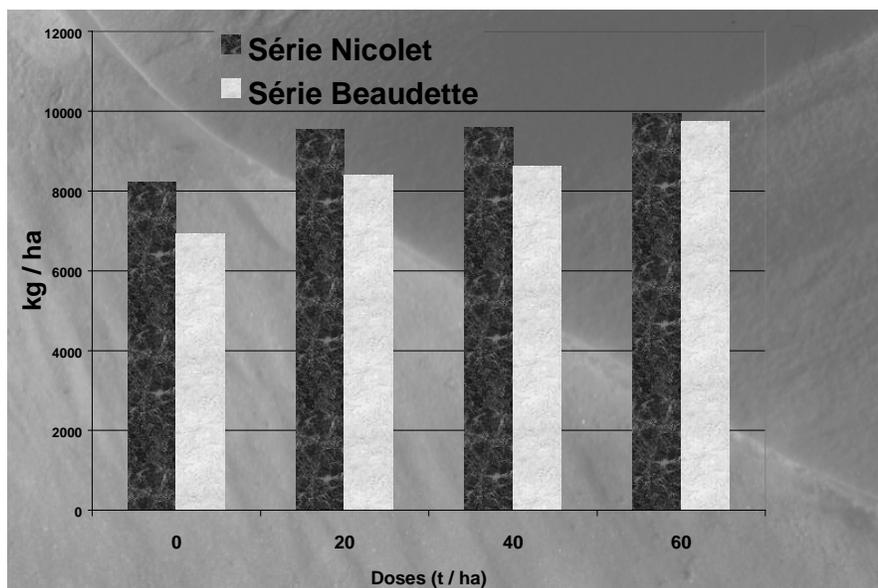


Figure 2: Effets de doses de boues mixtes sur les rendements en grains de maïs : 20, 40 et 60 t sur la série Nicolet; 30, 60 et 90 t/ha sur la série Baudette.

Rendements du soya

Les rendements de soya et les prélèvements en éléments nutritifs sont indiqués dans les tableaux 11, 12 et 13. La production de soya (15% d'humidité) varie de 1900 à 2500 kg/ha, selon les traitements. Les rendements les plus élevés sont obtenus avec la fertilisation conventionnelle NPKMg, ainsi qu'avec les doses de boues complétées par l'engrais minéral. Les rendements obtenus avec les doses de boues mixtes seules sont légèrement inférieurs à la production obtenue avec la fertilisation minérale conventionnelle.

Tableau 11. Effet de boues mixtes de papetières et de l'engrais minéral sur le rendement (+) et la quantité en protéines du soya cultivé sur la série Nicolet.

Traitements	Rendements		Quantité en protéines
	-----kg/ha-----		
1. Témoin	1 889	c ⁺	533,8 b
2. NPKMg	2 193	ab	549,8 b
3. 20 t/ha*	2 087	b	565,8 b
4. 40 t/ha	2 096	b	602,7 ab
5. 20 t/ha + ¼ PKMg	2 429	a	670,3 a
6. 40 t/ha + ½ PKMg	2 478	a	693,7 a

* : doses de boues mixtes, sur base humide

+ : rendement à 15 % d'humidité

a-c : deux moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan

Tableau 12. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les prélèvements du soya (**) en éléments majeurs (série Nicolet).

Traitements	N	P	K	Ca	Mg
-----kg/ha-----					
1. Témoin	86,8 b	10,4 b	26,3 b	3,0 b	3,6 b
2. NPKMg	89,4 b	10,6 b	26,6 b	3,0 b	3,6 b
3. 20 t/ha*	92,0 b	12,1 b	28,4 b	3,4 ab	3,9 b
4. 40 t/ha	98,0 b	12,8 b	30,0 b	3,2 b	4,1 b
5. 20 t/ha + ¼ PKMg	109,1 a	13,9 a	34,7 a	3,7 a	4,7 a
6. 40 t/ha + ½ PKMg	112,8 a	14,0 a	34,9 a	3,8 a	4,9 a

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan .

** : sur rendement (100 % sec)

Tableau 13. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les prélèvements du soya (**) en éléments mineurs (série Nicolet).

Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn
-----g/ha-----					
1. Témoin	18 a	24 c	21 a	14 c	41 c
2. NPKMg	20 a	25 c	16 a	14 c	48 c
3. 20 t/ha*	20 a	25 c	18 a	13 c	60 ab
4. 40 t/ha	23 a	26 bc	20 a	13 c	84 a
5. 20 t/ha + ¼ PKMg	25 a	30 ab	17 a	16 ab	77 b
6. 40 t/ha + ½ PKMg	26 a	31 a	18 a	17 a	85 a

* : doses de boues mixtes sur base humide; ** : sur rendement (100% sec)

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

Il ressort qu'avec l'application de boues mixtes seules sans engrais minéraux, on ne peut pas atteindre les rendements maximums de soya, probablement à cause des faibles teneurs de boues mixtes en potassium ; cet élément ayant une grande importance dans la croissance de la plante, la production et la qualité de grain. L'apport de boues mixtes seules ou de l'engrais minéral n'a pas

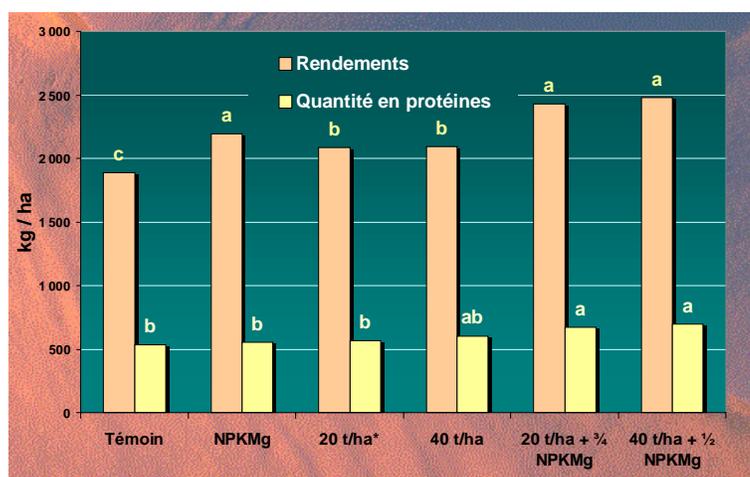


Figure 3. Effet de boues mixtes de papetières et de l'engrais minéral sur le rendement et les teneurs en protéines du soya.

significativement accru le contenu en protéines et les prélèvements en éléments majeurs et mineurs du soya, comparativement au témoin sans engrais ni boues mixtes (Tableaux 12 et 13; Fig.3). Au contraire, les contenus en protéines et les prélèvements les plus élevés en éléments nutritifs ont été obtenus suite à l'apport de boues mixtes complétées d'une fertilisation minérale réduite (Tableau 12; Fig. 7).

Les résultats obtenus sur les productions et la nutrition des cultures étudiées démontrent que la culture de soya a valorisé moins les boues mixtes de papetières, comparativement au maïs grain. Ces résultats montrent également qu'un apport de 20 t/ha de boues mixtes complétées d'engrais (¾ de la dose de PKMg) est recommandable afin de maintenir une production optimale de soya. Des doses plus élevées de boues mixtes (40 et 60 t/ha) n'ont pas entraîné de hausses de rendement de cette culture (Fig. 4). De plus, à cause des quantités élevées d'azote apportées par les boues, celles-ci peuvent nuire à la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par cette légumineuse. Toutefois, l'application de 20 t/ ha de boues est bénéfique à la culture de soya, car cette biomasse permet de maintenir des conditions physiques et biologiques optimales dans les sols. Une étude récente a démontré que l'apport d'une source de C augmente le potentiel de fixation de l'azote atmosphérique par les bactéries symbiotiques.

L'apport de boues mixtes a accru de façon significative les rendements et la qualité des grains de maïs. Les rendements en grains de maïs ont été élevés dans toutes les doses étudiées, étant de mêmes niveaux que la fertilisation minérale conventionnelle dans le loam limono-argileux de la série Nicolet (Fig. 2). Contrairement au soya, le maïs est une culture qui présente des exigences plus élevées en éléments minéraux . De plus, à cause de son pouvoir élevé d'absorption, le maïs profite avantageusement des éléments nutritifs apportés soit par les engrais, les fumiers ou de toute autre source d'éléments minéraux.

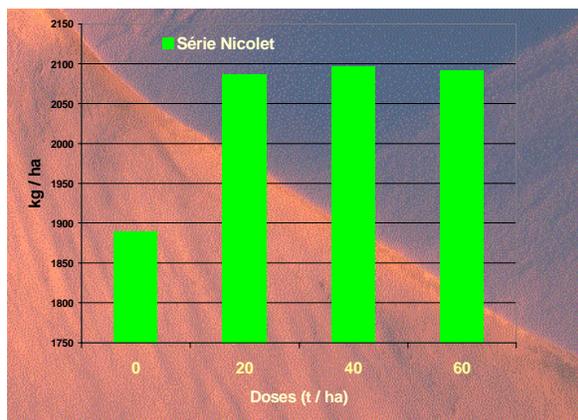


Figure 4. Effet de doses de boues mixtes sur le rendement en grain de soya (kg / ha).

Effets sur la structure du sol

Les résultats relatifs à l'effet d'apports de boues mixtes sur la structure du sol sont indiqués dans les tableaux 14 et 15. De façon générale, on observe un effet significatif de l'apport des boues mixtes de papetières sur la stabilité structurale du sol (DMP) ainsi que sur les plus gros agrégats (>5mm), comparativement au témoin. Dans les deux sols étudiés, les applications de boues mixtes (30 et 40 t/ha) ont augmenté la proportion des plus gros agrégats dans les séries Baudette et Nicolet, respectivement. Cet effet rapide des boues mixtes sur la formation de gros agrégats et sur la structure du sol s'explique par la stimulation de la microflore du sol à la fois par les éléments nutritifs apportés ainsi que par des quantités de carbone facilement minéralisable apportées par les boues mixtes dans le sol. En effet, les boues mixtes contiennent des quantités élevées en hémicellulose et cellulose et également des teneurs importantes en lignine. Ces sources de carbone (hémicellulose et cellulose) se décomposent généralement plus rapidement dans le sol, comparativement à la lignine et aux tannins, pouvant ainsi agir sur la croissance intensive de la microflore et de cette façon influencer la formation d'agrégats du sol.

Tableau 14. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les agrégats et la structure du loam limono-argileux de la série Nicolet.

Traitements	Pourcentage d'agrégats		Stabilité structurale
	> 5 mm	> 0,25 mm	DMP (mm)
1. Témoin	10,53 b	57,20 b	2,14 b
2. NPKMg	11,40 ab	61,53 ab	2,28 b
3. 20 t/ha*	12,70 ab	63,14 ab	2,40 a
4. 40 t/ha	14,70 a	65,05 a	2,51 a
5. 20 t/ha + ¼ NPKMg	13,00 ab	62,80 ab	2,40 a
6. 40 t/ha + ½ NPKMg	14,30 ab	64,14 a	2,46 a

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

Dans les processus de formation d'agrégats, les petits agrégats du sol se lient ensemble pour former les gros agrégats grâce aux mucilages microbiens, aux filaments de champignons, aux polysaccharides issues de la décomposition de la matière organique enfouie, ainsi que grâce aux racines fines des plantes. L'amélioration de la structure (DMP) par l'apport de boues mixtes a été plus évidente sur le loam limono-argileux initialement plus compacté, que sur le loam limoneux, ce qui est en accord avec les résultats obtenus avec le fumier où on a observé que l'effet des fumiers sur les rendements des cultures et la structure du sol est plus rapide dans les sols pauvres en

éléments nutritifs et dans les sols plus dégradés, comparativement aux sols riches et mieux structurés(6).

À court terme, l'apport de boues mixtes n'a pas augmenté de façon significative la proportion des agrégats (5mm-0,25mm). L'effet des amendements organiques sur la proportion de ces agrégats se manifeste à moyen et long terme (7, 8, 11). La plus rapide modification de la structure a été observée sur les plus gros agrégats (5mm) et cette action dépend de la nature de l'amendement organique incorporé.

L'action rapide des boues mixtes sur la structure est semblable à celle de divers engrais verts étudiés (trèfle, millet japonais, moutarde, sarrasin, et colza) qui, comme les boues mixtes, ont des rapports C/N faibles (9b). Toutefois, des améliorations durables de la structure seront possibles grâce à des apports réguliers de cet amendement organique. En effet, on a observé que l'action durable des fumiers sur la structure se manifeste à moyen terme (7, 11). Par contre, les amendements ligneux ayant des rapports C/N plus élevés, et contenant plus de lignine, se décomposent très lentement dans le sol et leur effet sur la structure du sol se manifeste à long terme (6).

Tableau 15. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les agrégats et la structure du loam limoneux de la série Baudette.

Traitements	Pourcentage d'agrégats		Stabilité structurale
	> 5 mm	> 0,25 mm	DMP (mm)
1. Témoin	9,85 b	65,87 a	2,27 b
2. NPKMg	11,73 ab	68,02 a	2,40 a
3. 30 t/ha*	13,04 a	68,90 a	2,50 a
4. 60 t/ha	12,72 ab	68,09 a	2,45 a
5. 30 t/ha + ¾ NPKMg	12,07 ab	68,97 a	2,44 a
6. 60 t/ha + ½ NPKMg	12,70 ab	66,70 a	2,34 ab

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

Comme dans le cas des engrais verts, il est possible que cet effet des boues mixtes sur la structure soit temporaire et s'estompe rapidement à cause de l'épuisement du C facilement minéralisable. Lors de deux prochaines années de cette étude, nous allons vérifier si l'effet des boues mixtes sur la structure est durable à moyen terme.

Effets sur l'activité biologique et enzymatique.

Les effets d'apports de boues mixtes sur l'activité biologique et enzymatique des sols sont indiqués dans les tableaux 16 et 17. Dans les deux sols étudiés, les applications de boues mixtes ont augmenté la biomasse microbienne, ainsi que l'activité de la phosphatase alcaline et de l'uréase, comparativement à la fumure minérale et au témoin sans engrais. Cependant, cet effet est significatif ($P < 0,05$) particulièrement avec des apports de 40 et 60 t/ha. Bien que la phosphatase acide soit plus élevée dans les sols ayant reçu les boues mixtes, leur effet n'est pas significatif par rapport au témoin ou à la fumure minérale. Il ressort que l'apport de boues mixtes a stimulé la microflore du sol et par conséquent la phosphatase alcaline, celle-ci étant une enzyme provenant principalement des cellules microbiennes.

L'effet de l'application de boues mixtes (40, 60 t/ha) sur l'activité de l'uréase indique également que ces biomasses ont stimulé les microorganismes responsables de la minéralisation d'azote, soit les populations des ammonificateurs et des nitrificateurs. Il ressort qu'en améliorant la structure ainsi que le potentiel biologique et enzymatique des sols, les boues mixtes ont créé des conditions optimales de croissance des plantes, de minéralisation et de disponibilité des éléments nutritifs, tel que démontré par les résultats des rendements et des prélèvements des éléments nutritifs.

Tableau 16. Effet d'apports de boues mixtes de papeteries et d'engrais minéraux sur la biomasse microbienne et l'activité enzymatique du loam limono-argileux de la série Nicolet.

Traitements	Biomasse microbienne -----g C/kg sol-----	Phosphatase alcaline -----µg P.N.P./g sol-----	Phosphatase acide	Uréase µg/g N-NH ₄ /2 h
1. Témoin	534,30 b	230,30 b	306,83 a	53,55 b
2. NPKMg	526,81 b	237,93 b	337,40 a	48,11 b
3. 20 t/ha*	681,32 a	238,70 b	329,70 a	83,60 ab
4. 40 t/ha	697,64 a	292,87 a	345,30 a	84,83 a
5. 20 t/ha + ¼ NPKMg	684,12 a	254,23 ab	336,73 a	65,94 b
6. 40 t/ha + ½ NPKMg	693,22 a	268,83 a	334,03 a	66,60 ab

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P = 0,05$, selon le test Duncan.

Tableau 17. Effet d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur la biomasse microbienne et l'activité enzymatique du loam limoneux de la série Baudette.

Traitements	Biomasse microbienne -----g C/kg sol-----	Phosphatase alcaline -----µg P.N.P./g sol-----	Phosphatase acide	Uréase µg/g N-NH ₄ /2 h
1. Témoin	434,16 b	226,43 b	268,80 ab	38,81 b
2. NPKMg	431,12 b	286,60 ab	298,30 a	37,81 b
3. 30 t/ha*	415,23 b	241,80 a	261,80 ab	43,35 b
4. 60 t/ha	674,80 a	258,30 a	293,00 a	75,50 a
5. 30 t/ha + ¾ NPKMg	569,00 a	236,96 ab	283,90 ab	47,73 ab
6. 60 t/ha + ½ NPKMg	560,40 a	249,66 a	310,30 a	62,97 a

* : doses de boues mixtes sur base humide.

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05, selon le test Duncan.

Coefficients d'utilisation et d'efficacité d'N, P et K.

Afin de calculer les coefficients apparents d'utilisation en éléments nutritifs des boues mixtes, nous avons déterminé la matière sèche totale produite par hectare pour le maïs-grain (tiges + épis), ainsi que les prélèvements en éléments nutritifs (Tableaux 7 et 8). Le calcul des bilans apparents (net nutrient recovery), basé sur les prélèvements des cultures chez le témoin sans engrais ni boues et dans les sols ayant reçu les engrais minéraux ou différentes boues mixtes, est présenté dans les tableaux 18 et 19. Les résultats obtenus montrent des coefficients d'utilisation d'azote par le maïs-grain de 49 % pour l'engrais azoté sur les deux séries de sols étudiées. Dans le cas de boues mixtes, les coefficients d'utilisation d'azote varient en moyenne de 13 à 21%, étant variables selon les types de sol et les doses de boues mixtes.

Les coefficients d'utilisation d'azote dérivé de ces biomasses sont plus faibles que ceux qu'on mesure généralement pour les engrais minéraux. Il est possible que les boues qui contiennent beaucoup de carbone retiennent une partie de leur azote afin de satisfaire les besoins métaboliques de la microflore du sol, sans pour autant provoquer les carences des plantes en azote. En effet, les microorganismes du sol tirent leur énergie du carbone et utilisent l'azote pour leurs besoins métaboliques. Il s'agit en ce cas des processus de l'immobilisation et de la réminéralisation de l'azote qui s'effectue simultanément dans le cas de biomasses ayant des rapports C/N faibles, assurant une disponibilité graduelle mais soutenue de l'azote aux plantes. Ces constatations sont identiques pour les engrais verts dont les coefficients d'utilisation sont similaires à ceux qui ont été mesurés pour les boues mixtes (9a)

En comparaison avec l'engrais minéral, les coefficients d'efficacité d'azote varient entre 25 et 42%, selon les types de sol et les doses de boues mixtes. Ces résultats démontrent que les coefficients d'efficacité de l'azote des boues mixtes sont élevés, étant comparables à ceux des fumiers solides de bovins.

Tableau 18. Coefficients d'utilisation et d'efficacité en azote de boues mixtes de papetières en culture de maïs - Série Nicolet (1997).

Traitements	Apports (kg/ha)			Prélèvements (kg/ha)			Coefficients d'utilisation (%)			Coefficient d'efficacité p/r aux engrais (%)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Témoin				148	31,9	164						
NPKMg	180	43,69	99,62	237	60	217	49	64	53			
20 t/ha	163	19,44	6,70	182	46,9	178,9	21	77	222	42	120	418
40 t/ha	326	38,89	13,40	211	55,2	188,6	19	60	184	39	93	345
60 t/ha	489	58,33	20,10	233	67,4	196,8	17	61	163	35	95	307

Tableau 19. Coefficients d'utilisation et d'efficacité en azote de boues mixtes de papetières en culture de maïs - Série Baudette (1997).

Traitements	Apports (kg/ha)			Prélèvements (kg/ha)			Coefficients d'utilisation (%)			Coefficient d'efficacité p/r aux engrais (%)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Témoin				99	18,4	82,3						
NPKMg	180	43,69	99,62	188	35	142,5	49	38	60			
30 t/ha	243,6	38,10	13,86	145	33,9	147,2	19	41	468	38	107	775
60 t/ha	487,2	76,20	27,81	186	45,8	136,6	18	36	195	36	95	323
90 t/ha	730,8	114,31	41,59	191	51,5	154,7	13	29	174	25	76	288

Dans la série Nicolet, les coefficients d'utilisation du phosphore sont de 64% pour l'engrais minéral et varient de 61 à 77% pour les boues mixtes de papetières. Les coefficients d'utilisation de phosphore sont plus faibles sur la série Baudette, étant de 38% pour l'engrais minéral et variant entre 29 et 41%, selon les doses de boues mixtes de papetières. Les coefficients d'utilisation du K des engrais minéraux et des boues mixtes sont en moyenne de 56% et supérieurs à 100% respectivement, dans les deux types de sols étudiés (Tableaux 18 et 19). En comparaison avec l'engrais minéral, on retrouve des coefficients d'efficacité de 76 à 120% pour le P et supérieurs à 300% pour le K. Ces coefficients d'utilisation et d'efficacité de P et K très élevés s'expliquent par la stimulation de l'absorption des éléments nutritifs (priming effect) par les cultures suite aux applications au sol de biomasses végétales qui améliorent les propriétés physiques du sol, tel que mesuré pour les boues mixtes.

Les résultats obtenus démontrent que les coefficients d'utilisation et d'efficacité des éléments nutritifs des boues mixtes sont supérieurs dans le loam limono-argileux de la série Nicolet, comparativement au loam limoneux de la série Baudette. Cette valorisation optimale des éléments nutritifs des boues mixtes dans la série Nicolet est probablement due à l'effet rapide des boues mixtes sur l'amélioration des propriétés physiques et biologiques de ce sol, plus particulièrement la structure, la porosité. Par conséquent, l'amélioration du pouvoir de rétention en eau des sols, du potentiel de minéralisation d'azote et la croissance optimale des cultures suite à l'apport de boues mixtes était plus importante dans la série Nicolet, comparativement à la série Baudette.

Cette étude démontre que les valeurs mesurées des coefficients d'utilisation d'azote, de phosphore et de potassium des boues mixtes sont similaires à celles des fumiers. De même, les coefficients de l'azote des boues mixtes sont similaires aux coefficients d'azote mesurés suite à l'enfouissement de diverses espèces d'engrais verts dans les sols (9a).

Coefficients d'efficacité en N, P et K :



Dans les boues mixtes, le P et le K sont principalement sous forme inorganique, ce qui peut expliquer leur disponibilité élevée. Cette étude a également permis d'observer l'effet du type du sol sur la valorisation des éléments nutritifs des boues mixtes.

Aspect environnemental

Afin d'évaluer l'aspect environnemental de l'apport de diverses doses de boues mixtes, des analyses ont été effectuées sur des échantillons pris en automne dans tous les traitements avec l'engrais minéral et les boues mixtes, à deux profondeurs : 0-20 cm et 20-40 cm (données non présentées). L'apport de boues mixtes n'a pas significativement enrichi le profil du sol en nitrates, en phosphore biodisponible (Mehlich III), ainsi qu'en différents éléments majeurs et mineurs, ainsi qu'en éléments traces. Il ressort qu'une seule application de boues mixtes ne peut pas conduire à l'enrichissement excessif du sol en éléments minéraux. De plus, cette étude a montré que l'application de boues mixtes a amélioré les propriétés du sol propices à la croissance optimale des cultures et à la valorisation élevée des éléments nutritifs du sol et des boues mixtes, ce qui a accru les coefficients d'utilisation et diminué par conséquent leur accumulation dans le sol. Comme pour le cas des fumiers, l'enrichissement du sol en éléments nutritifs s'effectuera graduellement, suite aux apports répétés de boues mixtes. Une bonne gestion de boues mixtes en agriculture exigera donc un suivi périodique de l'évolution des teneurs en éléments nutritifs, plus particulièrement le contenu en azote, en phosphore et en d'autres éléments minéraux. Cet exercice va permettre d'établir des recommandations judicieuses en fertilisation intégrée des cultures, ainsi qu'un suivi environnemental adéquat à la ferme.

- Conclusion -

Les résultats obtenus dans cette étude effectuée sur deux types de sol permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La valeur fertilisante (action directe) des boues mixtes et leurs effets sur le sol et par conséquent sur les productions (action indirecte) étaient différents selon les types de sols.
- La culture de maïs-grain a mieux valorisé les boues mixtes de papetières, comparativement au soya. Pour le maïs, les rendements étaient croissants avec les doses de boues mixtes (20, 40 et 60 t/ha).
- L'action bénéfique des boues mixtes sur la structure et le potentiel biologique des sols a été très rapide, probablement à cause des rapports C/N faibles et de leur composition chimique.
- Les doses de boues seules (20 à 90t/ha) n'ont pas permis d'atteindre les rendements supérieurs à ceux obtenus avec la fertilisation minérale conventionnelle ou avec des boues mixtes complétées avec des engrais minéraux à doses réduites.
- L'apport de boues mixtes doit donc être complété par une fumure minérale réduite. Avec les doses de boues complétées de fumure minérale (à doses réduites), on a obtenu un gain en grains de maïs de plus de 1000 kg/ha , face à la fertilisation minérale conventionnelle NPKMg.
- Selon les types de sol et les doses de boues mixtes, les coefficients d'efficacité des boues mixtes (boues mixtes par rapport aux engrais minéraux) ont varié de 25 à 42% pour l'azote, de 76 à 120% pour le phosphore, étant de plus de 300% pour le potassium.
- Les doses optimales de boues mixtes sont de 20 t/ha pour le soya, et peuvent varier de 20 à 40 t/ha pour le maïs-grain, selon les sols. Il ressort que le choix de la dose doit tenir compte du sol et de la culture.
- Il est recommandable de réduire les doses des engrais minéraux suite à l'application de boues mixtes.



le sol me répondra ...

- Perspectives de recherche (1989, 1999) -

- Étudier les effets résiduels d'apports répétés de boues mixtes sur des augmentations progressives de rendements des cultures, ainsi que sur la dynamique des éléments minéraux dans le profil du sol.
- Optimiser la fertilisation minérale, en déterminant les niveaux de réduction de doses d'engrais suite aux apports répétés de boues mixtes.
- Déterminer les niveaux de matière organique des sols.
- Connaître la dynamique de la structure et du potentiel biologique des sols, en relation avec l'évolution des productions ; vérifier l'effet de boues mixtes sur la formation stable de la structure.

Toutes ces connaissances sont nécessaires pour la gestion optimale de boues mixtes, dans une agriculture productive et rentable, ayant aussi à cœur le souci de préserver la qualité des sols et du milieu.

Arrières-effets des boues mixtes de papetières dans les cultures de maïs-grain et de soya

- 1999 -



Arrières-effets des boues mixtes de papetières dans les cultures de maïs-grain et de soya

- Résumé -

Cette étude entreprise depuis 1997 dans les régions de la Mauricie et Nicolet vise à connaître à court terme les coefficients directs et d'arrières-effets azotés de boues mixtes de papetières nécessaires dans les recommandations judicieuses et intégrées de ces amendements organominéraux à l'intérieur des rotations agricoles. Les traitements consistent en un témoin sans engrais, une fertilisation minérale complète (NPKMg), trois doses croissantes de boues mixtes (20, 40 et 60 t/ha sur la série Nicolet et 30, 60 et 90 t/ha sur la série Baudette) et enfin deux traitements (20, 40 t/ha et 30 et 60t/ha) où les boues mixtes sont complétées d'engrais NPKMg apportés en doses réduites à 50 et 75%. Pendant la deuxième année de ce projet (1998), les parcelles ont été divisées en deux parties égales où une seule moitié a reçu continuellement des apports de boues et/ou des engrais minéraux, afin d'évaluer l'effet cumulatif des traitements sur les rendements, la qualité de la récolte et du sol. L'autre moitié des parcelles visait à évaluer les arrières-effets des engrais et des boues mixtes appliquées uniquement en 1997. Pour les deux séries de sols étudiées, les résultats obtenus indiquent que les applications répétées en 1997 et 1998 de doses élevées de boues mixtes (60-90 t/ha) ont permis d'obtenir des rendements en grains de maïs égaux ou supérieurs de 1 t/ha à la dose complète d'engrais NPKMg. C'est pourquoi il ne serait pas recommandable de compléter ces doses élevées de boues mixtes avec une fumure minérale. Par contre, il a été nécessaire d'ajouter une fumure minérale NPKMg réduite à 50 et 75%, aux doses agronomiques de boues mixtes, soit 20 à 40 t/ha, pour atteindre les rendements maxima, comparables à ceux obtenus avec la fertilisation minérale complète. À court terme, les apports répétés de boues mixtes (20 à 90 t/ha) n'ont pas conduit à l'enrichissement des sols en nitrates, phosphore et autres éléments minéraux ou encore en métaux lourds. Cette étude a particulièrement démontré que les coefficients d'arrières-effets azotés des boues mixtes de papetières étaient élevés, variant par exemple entre 19 à 27% et de 10 à 14% sur les séries Nicolet et Baudette, respectivement. Les coefficients directs et les arrières-effets azotés mesurés respectivement en 1997 et 1998 indiquent une récupération ou une utilisation totale de l'azote des boues mixtes par la culture de maïs pendant les deux années qui s'élève de 23 à 48%, étant faible pour les doses les plus élevées (60 –90 t/ha). Cette étude démontre qu'il est nécessaire de tenir compte des arrières-effets des boues mixtes de papetières dans l'établissement des plans de fertilisation intégrée des cultures.

- Problématique -

La gestion de boues mixtes de papetières constitue un programme environnemental important au sein de la compagnie Abitibi Consolidated inc. Les systèmes de traitement primaire et secondaire des eaux usées installés dans les usines génèrent des quantités importantes de boues mixtes. Celles-ci sont constituées de fibres de papier résultant des traitements primaires et de biomasse biologique composée de microfaune et de microflore, provenant essentiellement des traitements secondaires. Dans cette dernière étape de traitement des eaux, des ajouts importants en éléments nutritifs sont effectués afin de permettre la croissance et la multiplication des microorganismes responsables du traitement des eaux usées.

Les boues mixtes qui résultent de ces procédés sont riches à la fois en carbone organique et en éléments nutritifs, notamment en azote, en phosphore, en calcium et en magnésium, ainsi qu'en éléments mineurs. C'est pourquoi leur valorisation agricole est à privilégier dans le contexte d'une agriculture durable. Ainsi, les boues mixtes constituent une source importante d'éléments nutritifs dont il faudra tenir compte dans les programmes de fertilisation des cultures. Puisque les boues mixtes contiennent des quantités importantes d'azote principalement sous forme organique, la disponibilité de cet élément pour les cultures dépendra de la vitesse de minéralisation graduelle des boues au cours des saisons de végétation.

À cause de leur valeur fertilisante élevée et de leur apport important en matière organique, la valorisation agricole des boues mixtes de papetières est en progression au Québec. Elle atteignait 575 000 tonnes en 1997 (épandage direct et compostage industriel confondus). Bien qu'il s'agisse d'un taux élevé de valorisation, soit près de 40% des résidus disponibles, les quantités épandues demeurent encore relativement faibles lorsqu'on les compare aux 31 000 000 tonnes de fumiers générées en agriculture (12).

Comme les fumiers, les boues mixtes constituent à la fois une fumure minérale et un amendement organique. Des études de longue durée débutées en 1977 à la Station expérimentale de Saint-Lambert (MAPAQ-IRDA) ont démontré les effets bénéfiques d'apports annuels de 20 t/ha de fumier solide de bovins sur les augmentations progressives de rendements de maïs fourrager et de blé. Ce sol, pauvre au départ en éléments nutritifs et mal structuré, a plus que doublé sa production de maïs fourrager (6000 kg/ha en 1986 à 15000 kg/ha en 1997). Ces augmentations de rendements sont attribuables principalement à l'amélioration des propriétés du sol, notamment la structure,

l'enrichissement en éléments majeurs et mineurs, l'augmentation du nombre de microorganismes et de vers de terre et l'action de ceux-ci sur la formation de la structure, la minéralisation et la disponibilité de l'azote (7, 11 et 14, 15).

Des essais à court terme (1995-1998) ont également indiqué que les applications au sol de boues mixtes de papetières ont augmenté les rendements du maïs-grain, du soya, de la pomme de terre, du foin et des céréales (14, 15). De plus, les applications de résidus mixtes de papetières ont rapidement amélioré l'activité biologique et enzymatique du sol ainsi que l'agrégation des sols (10, 14, 15).

Toutefois, l'amélioration à court terme des rendements est avant tout reliée aux effets résiduels et cumulatifs des boues mixtes qui enrichissent les sols en éléments majeurs et mineurs disponibles aux cultures pendant les années subséquentes. À moyen et long terme, la quantité et la qualité de la matière organique découlant de l'incorporation des boues mixtes se traduiront au niveau de la structure et de la porosité du sol, de la rétention en eau, de la température et de la minéralisation du sol, facteurs essentiels à la croissance optimale des cultures.

Dans le cadre de ce projet, un des objectifs spécifiques en 1998 consistait à déterminer les arrières-effets azotés (coefficients résiduels) et les effets cumulatifs azotés d'une ou de deux applications de boues mixtes sur les productions de maïs-grain et de soya tout en assurant la qualité de la récolte et la protection du sol et de l'environnement. La connaissance des coefficients d'utilisation (1997) et des arrières-effets azotés (1998) seront utiles dans l'élaboration des plans de fertilisation suite aux applications périodiques ou répétées de boues mixtes de papetières.

Enfin, le deuxième objectif en 1998 visait à évaluer les quantités d'azote minéral disponible aux cultures au cours de la saison de végétation, ainsi que l'enrichissement du profil de sol en nitrates, phosphore et en autres éléments majeurs et mineurs incluant les métaux lourds, suite aux applications périodiques ou annuelles de boues mixtes dans les sols..



- Hypothèse -

L'apport de boues mixtes de papetières peut maintenir ou augmenter la production de maïs et de soya grâce aux apports en éléments nutritifs ([effet direct](#), [arrière-effet](#)) et à l'amélioration des propriétés du sol ([effet indirect](#)) favorables à la croissance optimale des cultures.

- Protocole expérimental -

Cet essai est effectué depuis 1997 sur les cultures de maïs-grain et de soya qui sont des cultures importantes au Québec en termes de superficies, en plus d'être parmi les productions agricoles les plus rentables. Comme les propriétés du sol peuvent influencer la valorisation optimale des éléments nutritifs en provenance des boues mixtes de papetières, l'expérience se déroule sur deux types de sols pour le maïs-grain, soit un loam limono-argileux de la série Nicolet situé sur la ferme Proulx à Saint-Jean-Baptiste-de-Nicolet et un loam limoneux de la série Baudette sur la ferme Mylamy à Yamachiche (Tableau 1). L'essai sur le soya a été établi sur le loam limono-argileux de la série Nicolet seulement.

Tableau 1. Propriétés physiques et chimiques initiales des séries de sols.

Série	Texture	pH	M.O.	N	P	K	Ca	Mg
			-----%-----		-----Kg/ha-----			
Nicolet	Loam limono-argileux	6,8	3,8	0,21	277	294	2978	259
Baudette	Loam limoneux	6,5	4,3	0,19	208	336	2549	409

Le protocole expérimental comporte trois répétitions et comprend un témoin sans engrais, une fertilisation minérale complète (NPKMg) selon les recommandations du C.P.V.Q. et trois doses croissantes de boues mixtes : 20, 40 et 60 t/ha sur la série Nicolet et 30, 60 et 90 t/ha sur la série Baudette. Enfin, sur chaque type de sol, deux traitements (20 et 40t/ha; 30 et 60t/ha) combinent les boues mixtes et les engrais minéraux NPKMg, en doses réduites à 50 et 75% de la quantité recommandée (Tableau 3). Les traitements sont identiques pour la culture de soya, avec une fertilisation minérale adaptée à cette culture.

En cette deuxième année de projet (1998), les parcelles principales (4m X 25m) ont été subdivisées en deux parties égales (4m X 12,5m). Des boues seules ou combinées avec des engrais minéraux ont été appliquées dans la première moitié des parcelles afin d'évaluer l'effet cumulatif de ces traitements sur les rendements, la qualité de la récolte et du sol (Tableau 3). L'autre moitié des parcelles n'a reçu aucun apport en 1998, afin d'évaluer principalement les arrières-effets azotés de ces mêmes traitements effectués uniquement l'année précédente. Les boues mixtes ont été appliquées au printemps avec un épandeur à fumier quelques jours avant le semis. Par la suite, elles ont été incorporées à la herse à disques dans la couche superficielle du sol (0-10 cm).

Sur la série Nicolet, le semis du maïs-grain a été effectué le 16 mai 1998 avec l'hybride *DEKALB343-2550 UTM*, à un taux de 76 100 plants / ha. Les herbicides *Fieldstar* (220g/ha) et *Dual* (2,5 l / ha) ont été appliqués en prélevée du maïs. Sur la série Baudette, le semis a eu lieu le 14 mai avec la variété *DEKALB 221-2250 UTM* à un taux de 74130 plants / ha. L'herbicide *Dual* a été appliqué au semis à raison de 1 l / ha, suivi de l'herbicide *Partner* au sarclage. La récolte du maïs-grain a eu lieu en octobre sur les deux fermes.

Le soya a été semé le 19 mai sur la série Nicolet à un taux de 142 kg/ha avec la variété *Maple Gleen*. Les herbicides *Dual* (2,5 l / ha) et *Sencor* (550g/ha) ont été appliqués en présemis et les herbicides *Basagran* (2,25 l / ha) et *Pinacle* (8 g/ha) mélangés avec de l'huile (1 l / ha) ont été épandus en postlevée. En cette deuxième année de projet, le site cultivé en soya était envahi par les mauvaises herbes ce qui a compromis la récolte ; il n'y a donc pas eu de prises de rendements pour cette culture.

Des échantillons de végétaux ont été prélevés en juillet au moment de la floraison du maïs et du soya. Cette analyse foliaire visait à déterminer l'équilibre nutritif des cultures en éléments majeurs et mineurs suite aux applications de boues mixtes de papetières. Des échantillons de sol ont été prélevés en mai, juillet et septembre dans la couche 0-20 cm afin de mesurer les effets de ces amendements sur la teneur en eau et la minéralisation de l'azote du sol. Le sol a de nouveau été échantillonné aux profondeurs 0-20 et 20-40 cm après la récolte à l'automne afin d'évaluer l'enrichissement du sol en éléments majeurs et mineurs, ainsi qu'en métaux lourds, suite aux apports de boues mixtes. Les rendements, les poids à l'hectolitre, les prélèvements, les arrières-effets, les effets cumulatifs et l'efficacité de l'azote des boues mixtes ont été calculés pour la culture de maïs-grain. Les données recueillies ont été traitées par des analyses de variance selon un dispositif en blocs randomisés.



- Résultats -

La composition physique et chimique des boues mixtes de papetières

La composition physique et chimique des boues mixtes de papetières appliquées en cette deuxième année de projet (1998) est présentée au tableau 2. Les valeurs de pH se situent entre 6,8 et 8,0 et sont appropriées pour la croissance de la plupart des plantes cultivées et des micro-organismes du sol. La teneur en azote total des boues varie de 1,7 à 3% dont une infime quantité sous forme minérale. Les rapports C/N sont de 15 à 28. Les contenus en P total représentent entre 0,29 et 0,42% et cet élément se retrouve à 60% sous forme minérale extraite au Mehlich III, qui est facilement disponible pour les plantes. Enfin, les contenus moyens en K total varient de 0,14 à 0,21% selon les boues mixtes, étant essentiellement sous forme minérale disponible à la culture. Les boues mixtes de papetières apportent également des quantités importantes d'éléments mineurs de plus en plus nécessaires pour la croissance optimale des plantes en sols sous cultures intensives.

Tableau 2. Composition physique et chimique des boues mixtes de papetières.

Série de sol et culture	pH	M.S.	M.O.	C	N	C/N	N-NH ₄	N-NO ₃	P	
		-----%-----					-----mg/kg-----			
Mais-Nicolet (Belgo)	8,0	39,1	78,3	45,5	1,65	28	1176	0,20	2949	
Soya-Nicolet (Laurentide)	6,8	28,5	79,4	46,2	2,98	15	337	0,32	3996	
Mais-Baudette (Wayagamack)	7,5	29,1	91,4	53,1	2,71	20	844	0,32	4165	
		K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Na	Zn
Série de sol et culture		-----mg/kg-----								
Mais-Nicolet (Belgo)		1392	21991	951	33,6	123	1303	75	1761	75
Soya-Nicolet (Laurentide)		2087	6092	844	22,2	16	2870	41	4979	41
Mais-Baudette (Wayagamack)		1501	9623	1242	5,9	35	2175	157	1579	157

Observations pendant la période de végétation

Les observations effectuées durant les premières périodes de végétation ont indiqué une forte carence en zinc généralisée sur les plans de maïs cultivés en loam limono-argileux de la série Nicolet. Concernant la culture de soya, les observations effectuées ont indiqué une carence en manganèse sur cette même série de sol.

Concentrations en éléments nutritifs des cultures à la floraison

Afin de connaître l'équilibre nutritif des cultures suite à l'application des boues mixtes de papetières, un échantillonnage de feuilles de maïs et de soya a été effectué en période de floraison, cette période étant la plus critique pour la nutrition minérale. De façon générale, les teneurs foliaires en éléments nutritifs mesurées à la floraison du maïs étaient en quantités optimales sur les deux sites (Tableaux 7 et 8, en annexe). Toutefois, les teneurs en azote étaient légèrement plus faibles dans les parcelles sans engrais ni boues en 1998, comparativement aux sols fertilisés ou amendés avec des boues mixtes en 1997 et 1998. Les teneurs en zinc des feuilles de maïs se retrouvaient à la limite de carence dans quelques traitements situés dans le loam limono-argileux de la série Nicolet (Tableau 8, en annexe), ceci étant probablement attribuable aux valeurs élevées de pH ainsi qu'aux conditions de sécheresse de la mi-juin. Comme pour le maïs, les teneurs foliaires en éléments nutritifs majeurs et mineurs mesurées à la floraison du soya sont aussi en quantités optimales, à l'exception du bore et du manganèse (Tableaux 9 et 10, en annexe). Pour les deux cultures, les apports de boues et/ou d'engrais n'ont pas significativement augmenté les concentrations en éléments minéraux de la culture comparativement au témoin. Toutefois, on observe que des applications répétées de boues mixtes seules ou avec la fumure minérale ont significativement amélioré les teneurs foliaires du soya en bore et en manganèse, corrigeant de cette façon les carences observées en ces éléments sur le sol étudié, en période de végétation.

Rendements et qualité de la récolte du maïs-grain

Dans les deux séries de sols, les rendements en grains de maïs (15% d'humidité) ont varié de 6465 à 9450 kg/ha, selon les doses, suite à l'apport répété de boues mixtes et de 5131 à 7920 kg/ha dans les traitements sans applications de boues en 1998 (Tableau 3). Les apports annuels (1997, 1998) ou une fois en 1997 de boues mixtes ont significativement augmenté les rendements en grains de maïs, comparativement au témoin sans engrais ni boues mixtes. De plus, les doses croissantes de boues mixtes ont entraîné des augmentations proportionnelles de rendements de maïs-grain.

Rendements :

- 60t à 90 t/ha ≥ fertilisation minérale conventionnelle NPKMg.
- 20t à 40t/ha < fertilisation minérale conventionnelle NPKMg.
- 20t à 40t/ha + dose réduite NPKMg = fertilisation minérale conventionnelle.

Tableau 3. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les rendements en grains de maïs (15% d'humidité, kg/ha), le pourcentage d'humidité (%) et le poids spécifique (kg/hl).

Série Nicolet	Effet cumulatif			Effet résiduel		
	rendement	humidité	Poids/hl	rendement	humidité	Poids/hl
Témoin	4582c	32a	59a	4585c	32a	59b
NPKMg	8828a	31a	60a	8710a	32a	61ab
20 t/ha	6465bc	31a	60a	6364bc	31a	61a
40 t/ha	7456ab	32a	61a	7614ab	31a	60ab
60 t/ha	9078a	32a	60a	7920ab	31a	61ab
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	9448a	31a	61a	7435ab	31a	61ab
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	9310a	30a	61a	7457ab	31a	61ab

Série Baudette	Effet cumulatif			Effet résiduel		
	rendement	humidité	Poids/hl	rendement	humidité	Poids/hl
Témoin	4254d	29a	62ab	3859a	28a	62a
NPKMg	6921bc	28ab	62ab	5232a	28a	62a
30 t/ha	6721c	27b	63a	5131a	27a	62a
60 t/ha	8122a	27b	63a	6506a	27a	63a
90 t/ha	7928ab	27ab	62ab	6586a	28a	62
30 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	7179abc	28ab	62ab	6806a	27a	61a
60 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	8192a	29ab	61b	6439a	28a	62a

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Cumulatif : apport de boues mixtes en 1997 et 1998.

Résiduel : apport de boues mixtes seulement en 1997.

Cette étude a principalement démontré que les réponses du maïs-grain à l'apport de boues mixtes ont été élevées dans les deux types de sols étudiés. Sur la série Baudette, les applications répétées de boues mixtes ont eu un effet bénéfique important sur les rendements de maïs; les trois doses apportées en 1997 et 1998 ayant entraîné des rendements significativement supérieurs de 1300 à 1600 kg/ha, comparativement à une seule application des mêmes doses de boues mixtes en 1997 (Figure 1). De plus, des apports répétés de 60 et 90 t/ha de boues mixtes ont permis l'atteinte de rendements supérieurs de 1 t/ha de grains de maïs à la fertilisation minérale complète. Suite aux applications de doses élevées de boues mixtes (> 60 t/ha), on observe ainsi qu'il n'a pas été nécessaire de compléter celles-ci avec une fumure minérale réduite pour atteindre les rendements maxima. Cependant, l'ajout d'engrais minéral en dose réduite (75%) à 60 t/ha de boues mixtes a augmenté de 1,3 t/ha de grains, comparativement à la fertilisation minérale complète. Les boues mixtes apportées sur la série Baudette pendant les deux années présentaient des rapports C/N faibles ainsi que des teneurs élevées en azote total. Ces dernières caractéristiques des boues mixtes ont probablement favorisé une minéralisation et une disponibilité plus élevée de l'azote, ainsi qu'un effet résiduel important, ce qui a déterminé par conséquent les hausses importantes de rendements du maïs.

La réponse aux apports de boues mixtes et d'engrais minéraux a été également importante sur la série Nicolet. Par exemple, les apports répétés de 60 t/ha et les doses de 20 et 40 t/ha de boues mixtes complétées d'une fumure minérale réduite ont permis d'augmenter les rendements respectivement de plus de 1 et 2 t/ha, comparativement aux sols ayant reçu des boues mixtes seulement en 1997 (Figure 2).

De plus, ces mêmes traitements ont permis des rendements supérieurs à ceux obtenus avec la fumure minérale conventionnelle. En raison des réponses élevées à l'engrais ou aux apports de boues mixtes sur ce type de sol, des apports combinés de fumure minérale NPKMg et de boues mixtes se sont traduits par des augmentations de près de 2 t/ha de grains avec de la dose de 40

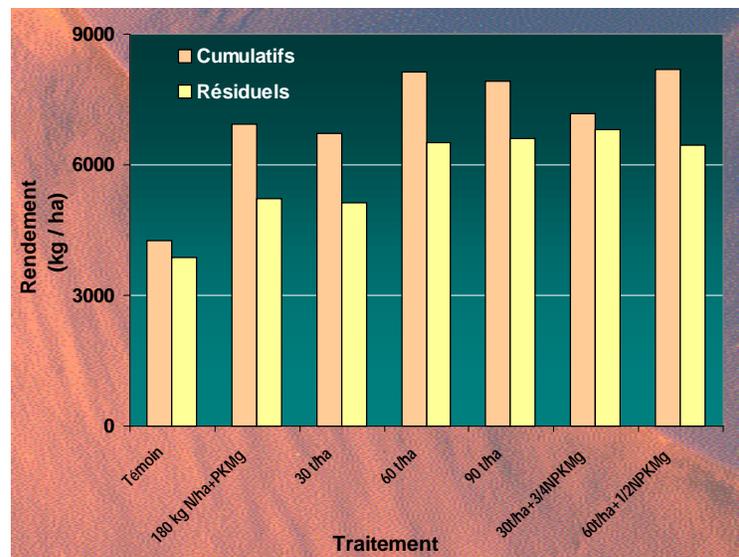


Figure 1. Effets cumulatifs et résiduels des boues mixtes de papetières sur les rendements de maïs (Série Baudette).

t/ha et de 3 t/ha de grains avec la dose de 20 t/ha de boues, comparativement à ces mêmes doses de boues mixtes apportées seules (Fig. 2).

Le poids spécifique des grains varie de 60 à 63 kg/hl (Tableau 3). De manière générale, les différents traitements avec engrais ou boues mixtes n'ont pas significativement augmenté le poids spécifique des grains, probablement à cause des conditions climatiques favorables qui ont permis le remplissage et la maturité des grains dans tous les champs.

En résumé, sur les deux types de sols étudiés, on constate que les apports répétés de doses recommandées (20–40 t/ha) ont justifié un complément d'engrais minéral NPKMg (50-75%), afin d'obtenir des rendements élevés, égaux ou supérieurs à ceux obtenus avec la fumure minérale conventionnelle complète. Étant donné que les doses de boues mixtes seules n'ont pas reçu de fumure complémentaire de potassium, de phosphore ou de magnésium, on observe que l'apport de boues mixtes stimule également la valorisation efficace des éléments nutritifs contenus dans le sol.

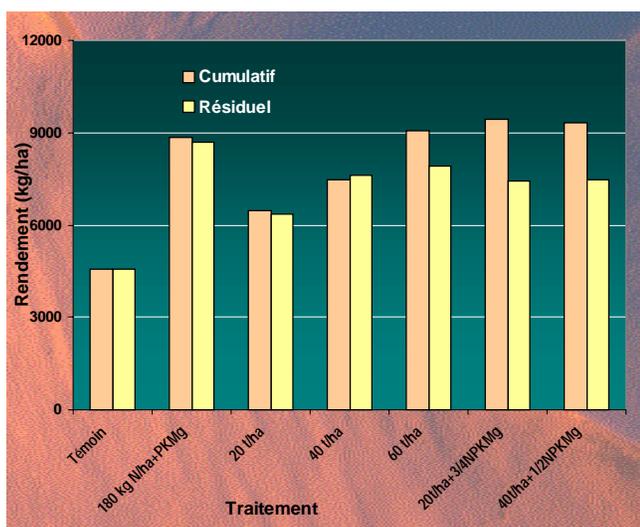


Figure 2. Effets cumulatifs et résiduels des boues mixtes de papetières sur les rendements de maïs (série Nicolet)

Les résultats de production obtenus indiquent que les boues mixtes présentent des arrières- effets élevés en éléments nutritifs qui ont accru significativement les rendements de maïs. Cependant, les augmentations obtenus de production de maïs ne sont pas uniquement attribuables aux arrières- effets azotés, mais également aux apports équilibrés des autres éléments nutritifs majeurs et mineurs, à l'amélioration des conditions de sol propices à la croissance optimale des cultures et à l'absorption efficace des éléments nutritifs, tel que déjà démontré dans cette présente étude (14).

Prélèvements en éléments nutritifs par le maïs-grain

Les résultats présentés dans les tableaux 4 et 5 indiquent que les prélèvements en éléments nutritifs majeurs et mineurs ont été proportionnels aux rendements obtenus. Les doses croissantes

de boues mixtes ont significativement augmenté les prélèvements en N, P et K sur les deux sols étudiés. À l'exception de l'azote, les quantités d'éléments absorbés par le maïs sont égales dans les traitements avec ou sans apports de boues mixtes en deuxième année d'expérimentation. Il ressort que les arrières-effets azotés des boues mixtes sont très importants.

Sur la série Nicolet, les apports répétés de 60 t/ha, de même que les doses de boues mixtes (20-40 t/ha) complétées d'engrais minéral NPKMg, ont entraîné des prélèvements élevés en éléments nutritifs, comparables à ceux mesurés avec la fertilisation minérale conventionnelle complète. Sur la série Baudette, les apports répétés de 60 et 90 t/ha de boues mixtes, de même que 60 t/ha de boues mixtes complétées de 50% d'engrais NPKMg ont significativement augmenté les prélèvements en N, qui sont supérieurs à la fertilisation minérale conventionnelle. De façon générale, les apports de boues mixtes ont significativement amélioré l'absorption des éléments nutritifs majeurs et mineurs, comparativement au témoin, ce qui démontre que celles-ci augmentent la fertilité potentielle des sols.

Tableau 4. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les prélèvements en éléments majeurs (kg/ha) par les grains de maïs.

Série Nicolet	Effet cumulatif					Effet résiduel				
	Traitements	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca
Témoin	56c	17b	21b	0,24c	5,42c	57c	17a	21ab	0,18a	3,81b
NPKMg	130a	29a	32a	0,48ab	9,77a	110a	19a	24ab	0,18a	5,99ab
20 t/ha	86b	21ab	22b	0,50a	6,66bc	80bc	16a	18b	0,15a	5,20ab
40 t/ha	105ab	24ab	27ab	0,34bc	8,04ab	99ab	17a	21ab	0,18a	5,50ab
60 t/ha	130a	27a	31a	0,35ab	9,02ab	109a	20a	25ab	0,20a	6,41a
20 t/ha+ ³ / ₄	133a	27a	29a	0,37ab	8,80ab	105ab	22a	25a	0,20a	7,09a
40 t/ha+ ¹ / ₂	132a	26a	28ab	0,35bc	8,29ab	101ab	21a	25ab	0,22a	6,98a

Série Baudette	Effet cumulatif					Effet résiduel				
	Traitements	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca
Témoin	43d	10b	13b	0,13b	4,18a	39b	10a	12a	0,19a	4,02a
NPKMg	88bc	16ab	20a	0,16b	6,74a	57ab	13a	16a	0,25a	5,34a
30 t/ha	74c	15ab	18ab	0,18b	5,45a	58ab	11a	13a	0,18a	3,85a
60 t/ha	112a	17a	20a	0,19b	6,82a	73ab	14a	17a	0,29a	5,07a
90 t/ha	109a	16ab	20a	0,23b	6,71a	77ab	16a	20a	0,25a	5,99a
30 t/ha+ ³ / ₄	96ab	12ab	17ab	0,68a	5,06a	85a	13	18a	0,21a	5,49a
60 t/ha+ ¹ / ₂	111a	14ab	19a	0,17b	5,77a	83a	17a	20a	0,17a	6,84a

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 5. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les prélèvements en éléments mineurs (g/ha) par les grains de maïs.

Série Nicolet		Effet cumulatif					Effet résiduel				
Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
Témoin	13b	8c	148b	14b	77c	9a	8b	111c	15c	60a	
NPKMg	23a	25a	298a	34a	142a	8a	12ab	207abc	23abc	91a	
20 t/ha	16b	13bc	237ab	26a	95bc	8a	10ab	149c	19bc	72a	
40 t/ha	17b	14bc	273ab	31a	109abc	8a	9ab	182bc	26abc	81a	
60 t/ha	25a	16b	281ab	33a	118ab	8a	11ab	335ab	26abc	83a	
20 t/ha+ ³ / ₄	27a	17b	291ab	33a	120ab	7a	19a	352a	30ab	93a	
40 t/ha+ ¹ / ₂	27a	15b	334a	36a	114ab	12a	17ab	243abc	31a	97a	

Série Baudette		Effet cumulatif					Effet résiduel				
Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
Témoin	6c	4a	72b	22c	85a	10a	6a	88a	22a	84a	
NPKMg	12b	7a	129ab	37ab	125a	10a	9a	113a	30a	103a	
30 t/ha	12b	5a	101ab	26bc	99a	8a	5a	69a	19a	75a	
60 t/ha	14b	11a	134ab	35abc	127a	10a	7a	96a	29a	97a	
90 t/ha	13b	6a	182a	40a	136a	12a	7a	141a	29a	116a	
30 t/ha+ ³ / ₄	23a	9a	116ab	29abc	99a	13a	9a	100a	28a	101a	
60 t/ha+ ¹ / ₂	24a	9a	108ab	31abc	108a	11a	6a	115a	32a	126a	

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Le bilan apparent d'azote

Le calcul des bilans apparents visait principalement à déterminer les arrières-effets azotés des boues mixtes de papetières. Le coefficient apparent d'utilisation (direct ou résiduel) de l'azote de l'engrais ou des boues mixtes est calculé selon la différence entre les prélèvements en N de la parcelle avec engrais ou boues mixtes et ceux du témoin sans engrais N ou boues mixtes, divisé par les quantités résiduelles d'azote apportées. Quant à l'efficacité de l'azote des boues mixtes sur les rendements (kg grains produit/ kg N), elle consiste dans la différence entre le traitement et le témoin (rendement) divisée par les quantités d'azote apportées (Tableau 6). Les résultats obtenus démontrent une importante valorisation de l'azote résiduel des boues mixtes par la culture de maïs. Sur la série Nicolet, les coefficients apparents d'utilisation de l'azote résiduel des boues (arrières-effets) varient de 19 à 27%, selon les doses de boues mixtes appliquées, tandis qu'ils vont de 10 à 14% sur la série Baudette. Il ressort que les arrières-effets azotés des boues mixtes sont importants et que ceux-ci sont influencés par la texture des sols.

Tableau 6. Coefficients apparents d'utilisation et efficacité de l'azote des boues mixtes de papetières basés sur les rendements et les prélèvements totaux en N.

	Arrière-effet				
	Rend. grains	Prél. total N*	N résiduel	Efficacité N	Coefficient d'utilisation
Série Nicolet	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/N	%
Témoin	4585	118	---	---	---
NPKMg	5710	141	91,8	12,3	25
20 t/ha	6364	153	130,4	13,6	27
40 t/ha	7614	169	266,3	11,4	19
60 t/ha	7920	226	408,8	8,1	26
Série Baudette	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/N	%
Témoin	3859	75	---	---	---
NPKMg	5232	103	91,8	15	30
30 t/ha	5131	99	197,3	6,4	12
60 t/ha	6506	131	399,5	6,6	14
90 t/ha	6580	139	643,1	4,2	10

De façon générale, les coefficients d'utilisation de l'azote des boues mixtes mesurés en première année (13 à 21%), étaient inférieurs aux coefficients des engrais ou des lisiers, mais comparables à ceux des fumiers solides de bovins. Toutefois, les coefficients d'arrière-effets en deuxième année sont très élevés particulièrement dans la série Nicolet où ceux-ci sont égaux aux coefficients mesurés pour les engrais minéraux azotés (Tableau 6). Ceci indique que l'azote des boues mixtes de papetières, principalement sous forme organique, se minéralise graduellement et reste encore disponible aux cultures en deuxième année de production.

En additionnant les coefficients d'utilisation mesurés pendant les deux années de production (1997, 1998), on observe qu'une proportion variant entre 23 et 48% de l'azote total des boues mixtes a été disponible pour le maïs dans les deux types de sol étudiés, cette valeur étant plus faible pour les doses les plus élevées. Comme pour l'engrais minéral azoté, une quantité résiduelle d'azote des boues mixtes demeure immobilisée dans les microorganismes du sol ou fixée aux colloïdes argileux. Étant principalement sous forme organique et à cause également de l'efficacité élevée de l'azote en provenance des boues, les pertes en azote à partir des boues mixtes par lessivage seraient donc très faibles.

De cette étude, il ressort que les coefficients d'arrière-effets azotés des boues mixtes sont importants sur la culture de maïs-grain qui valorise mieux les éléments nutritifs. Comme dans le cas

des fumiers, on doit donc tenir compte de l'azote résiduel des boues mixtes (arrière-effets en deuxième année) dans l'établissement des plans de fertilisation.

Évolution des nitrates dans le sol au cours de la saison de croissance

Afin d'évaluer l'azote disponible aux cultures par les ajouts de boues mixtes et de fumure minérale, des échantillons de sols ont été prélevés à différentes périodes au cours de la saison de croissance du maïs et du soya dans la couche de sol 0-20 cm. Sur la série Baudette, les quantités de nitrates étaient plus élevées dans les parcelles ayant reçu une seconde application de boues et/ou d'engrais minéral comparativement aux parcelles qui n'en ont reçu qu'en première année (Tableau 11, en annexe). Sur la série Nicolet, les quantités de nitrates étaient plus élevées dans les traitements avec boues complétées d'engrais minéral et avec engrais minéraux seuls, comparativement aux boues appliquées seules. Durant toute la période de végétation, les teneurs en nitrates ont augmenté proportionnellement avec les doses de boues mixtes appliquées, demeurant très élevées pour les doses supérieures à 60 t/ha (Tableau 12, en annexe).

Dans la culture de soya, la fertilisation minérale et la dose élevée de boues mixtes (60 t/ha) ont libéré les plus grandes quantités de nitrates, surtout en début de saison.

Dynamique des éléments nutritifs dans le profil du sol

Les effets d'apports répétés de boues mixtes de papetières sur la dynamique des éléments minéraux ont été mesurés sur les échantillons de sol prélevés à deux profondeurs (0-20 et 20-40 cm), après la récolte à l'automne. Aussi bien dans le loam limono-argileux de la série Nicolet que dans le loam limoneux de la série Baudette, les boues mixtes apportées chaque année n'ont pas entraîné de hausses significatives des teneurs en nitrates, phosphore soluble et en autres éléments minéraux ou métaux lourds (Tableaux 13 à 14, en annexe). La fertilisation minérale appliquée seule ou en combinaison avec les boues de papetières a entraîné des teneurs en nitrates qui sont de 3 à 7 fois supérieures au témoin seulement dans la couche de surface des deux types de sols. Par ailleurs, la fertilisation minérale a augmenté plus les teneurs en nitrates dans la couche inférieure de la série Nicolet, comparativement aux boues mixtes. Ces résultats démontrent que l'azote dérivé des boues est absorbé par les cultures au fur et à mesure de sa minéralisation, ce qui explique les faibles accumulations et migrations de nitrates dans les traitements avec les boues de papetières.

Comme il avait été noté en première année de projet, les résultats obtenus démontrent également qu'à court terme, les apports répétés de boues mixtes de papetières n'ont pas enrichi le profil de sol en éléments minéraux majeurs et mineurs, même à des doses élevées. De plus, les applications de boues mixtes n'ont pas conduit à la contamination du sol en métaux lourds (Tableaux 13 à 18, en annexe).

- Conclusion -

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que les apports répétés (1997, 1998) de boues mixtes seules à raison de 60 et 90 t/ha ont permis des rendements élevés de maïs-grain, supérieurs ou égaux à ceux obtenus avec la fumure minérale conventionnelle. Toutefois, des applications répétées de doses agronomiques pour les boues mixtes (20 et 40 t/ha) sans complément d'engrais NPKMg n'ont pas permis l'atteinte de rendements maximums, ce qui a justifié un complément en doses réduites d'engrais NPKMg, afin de maintenir des productions comparables à ceux de la fumure minérale conventionnelle. Cette étude a principalement indiqué que les arrières-effets azotés des boues mixtes étaient importants particulièrement dans le loam limono-argileux de la série Nicolet, ce qui démontre qu'il serait nécessaire de tenir compte de l'azote résiduel dans l'établissement des plans de fertilisation.

Toutefois, les augmentations de rendements obtenus sont dues non seulement aux effets résiduels des boues mixtes, mais également à leur action bénéfique sur les conditions physiques, chimiques et biologiques qui favorisent la croissance optimale des cultures et des rendements.

- Annexes du rapport 1999 -

Tableau 7. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les concentrations en éléments majeurs (%) du maïs-grain, en période de floraison.

Série Nicolet	Effet cumulatif					Effet résiduel				
	Traitements	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca
Témoin	2,72a	0,32a	2,62a	0,62bc	0,25b	2,75a	0,32a	2,62b	0,62a	0,25a
NPKMg	3,31a	0,35a	2,63a	0,59c	0,27ab	3,01a	0,34a	2,61b	0,69a	0,27a
20 t/ha*	2,75a	0,45a	2,61a	0,69abc	0,26b	3,10a	0,53a	2,61b	0,82a	0,26a
40 t/ha-	3,24a	0,45a	2,89a	0,73abc	0,27ab	3,28a	0,54a	3,04a	0,77a	0,29a
60 t/ha	3,61a	0,42a	2,67a	0,80a	0,29ab	3,08a	0,37a	2,59b	0,70a	0,27a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	3,66a	0,43a	2,83a	0,77ab	0,31a	3,04a	0,42a	2,64ab	0,69a	0,28a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	3,68a	0,43a	2,69a	0,75abc	0,26ab	3,21a	0,53a	3,04a	0,73a	0,28a

Série Baudette	Effet cumulatif					Effet résiduel				
	Traitements	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca
Témoin	2,09c	0,23b	2,38ab	0,39b	0,18b	2,13a	0,21a	2,39a	0,42a	0,17a
NPKMg	3,49a	0,34a	2,61a	0,43ab	0,24a	2,06a	0,22a	2,30ab	0,40a	0,17a
30 t/ha*	2,90b	0,30a	2,24ab	0,49ab	0,19b	1,82a	0,21a	2,44a	0,40a	0,17a
60 t/ha	3,41a	0,35a	2,32ab	0,53a	0,22a	2,04a	0,25a	2,36a	0,45a	0,19a
90 t/ha	3,62a	0,34a	2,17b	0,54a	0,25a	2,44a	0,26a	2,06b	0,48a	0,17a
30 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	3,48a	0,32a	2,23ab	0,51a	0,24a	2,53a	0,26a	2,19ab	0,43a	0,18a
60 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	3,23a	0,31a	2,30ab	0,46ab	0,28a	2,51a	0,26a	2,32ab	0,37a	0,17a
Teneurs optimales	2,5- 3,5	0,2- 0,45	1,7-2,5	0,2-0,5	0,1-0,3	2,5-3,5	0,2- 0,45	1,7-2,5	0,2-0,5	0,1-0,3

* : doses de boues mixtes de papetières sur base humide.

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 8. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les concentrations en éléments mineurs (mg/kg) du maïs-grain, en période de floraison.

Série Nicolet	Effet cumulatif					Effet résiduel				
	Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Fe	Mn
Témoin	4,7b	26b	417a	23b	15a	4,7b	26a	417a	23a	15a
NPKMg	4,8b	33ab	306a	25b	16a	4,5b	33a	607a	27a	17a
20 t/ha	5,9ab	36ab	676a	33ab	14a	6,8a	47a	976a	43a	16a
40 t/ha	5,5ab	41ab	776a	38ab	14a	6,0ab	47a	1030a	46a	15a
60 t/ha	6,5a	42ab	678a	53a	15a	5,8ab	32a	631a	30a	14a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	6,6a	48a	515a	37ab	16a	6,1ab	45a	863a	34a	14a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	6,3a	36ab	450a	36ab	16a	6,8a	49a	960a	43a	20a

Série Baudette	Effet cumulatif					Effet résiduel				
	Traitements	B	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Fe	Mn
Témoin	4,7b	8,4b	85b	24b	25b	4,8ab	8,6a	91a	26a	27a
NPKMg	4,7b	13,0a	100ab	50b	36a	4,7ab	8,0a	82a	24a	24a
30 t/ha	5,0ab	11,4ab	93ab	22ab	27ab	4,3b	7,6a	72a	17a	25a
60 t/ha	4,5b	11,1ab	108a	52ab	31ab	4,5b	7,2a	89a	29a	22a
90 t/ha	5,2ab	12,7a	102ab	52ab	34ab	5,1ab	9,7a	85a	21a	26a
30 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	5,7a	10,4ab	97ab	51ab	34ab	5,5a	8,0a	93a	37a	24a
60 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	4,9ab	11,7ab	87b	58a	32ab	4,6b	7,2a	74a	35a	18a
Teneurs optimales	4-25	3-15	N.D.	15-300	15-70	4-25	3-15	N.D.	15-300	15-70

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 9. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les concentrations en éléments majeurs (%) du soya, en période de floraison.

Série Nicolet	Effet cumulatif					Effet résiduel				
	Traitements	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca
Témoin	4,34a	0,35a	2,00a	1,33a	0,26a	4,39ab	0,37ab	1,80a	1,42a	0,26a
NPKMg	4,22a	0,34a	1,89a	1,27a	0,24a	4,31ab	0,39a	1,93a	1,43a	0,27a
20 t/ha	4,48a	0,36a	1,86a	1,28a	0,24a	4,43ab	0,33b	1,84a	1,44a	0,26a
40 t/ha	4,51a	0,38a	1,90a	1,25a	0,25a	3,85b	0,32b	1,70a	1,41a	0,25a
60 t/ha	4,44a	0,34a	1,94a	1,24a	0,24a	4,35ab	0,32b	1,79a	1,31a	0,24a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	4,63a	0,36a	2,10a	1,29a	0,27a	4,75a	0,36ab	1,99a	1,33a	0,27a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	4,36a	0,36a	1,97a	1,17a	0,24a	4,15ab	0,35ab	1,94a	1,39a	0,25a
Teneurs optimales	4,5-5	0,2-0,5	1,7-2,5	0,4-2,0	0,2-1,0	4,5-5	0,2-0,5	1,7-2,5	0,4-2,0	0,2-1,0

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 10. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les concentrations en éléments mineurs (mg/kg) du soya, en période de floraison.

Série Nicolet Traitements	Effet cumulatif					Effet résiduel				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Témoin	25bc	9,1a	110a	14c	18b	25a	9,3a	118a	18a	16a
NPKMg	22c	8,9a	99a	21bc	19ab	24a	9,1a	114a	20a	16a
20 t/ha	27ab	9,0a	104a	23b	22ab	26a	8,5a	115a	16a	17a
40 t/ha	26ab	9,4a	104a	20bc	20ab	27a	9,0a	96b	17a	17a
60 t/ha	28a	8,1a	92a	33a	24a	28a	8,4a	104ab	21a	19a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	25ab	8,9a	110a	20bc	21ab	28a	9,1a	109ab	16a	19a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	27bc	8,5a	93a	16bc	21ab	28a	8,9a	97b	16a	18a
Teneurs optimales	20-55	7-30	N.D.	15-100	15-70	20-55	7-30	N.D.	15-100	15-70

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 11. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en nitrates du sol (mg/kg) au cours de la saison de croissance du maïs.

Série Nicolet Traitements	Effet cumulatif			Effet résiduel		
	Juin	juillet	septembre	Juin	juillet	septembre
Témoin	14,9b	9,9d	5,3d	16,9b	9,1a	5,9b
NPKMg	42,4a	25,5bc	14,2cd	21,9ab	10,2a	5,3b
20 t/ha	18,5b	11,5cd	10,6cd	20,3ab	14,6a	11,2ab
40 t/ha	22,8b	14,2cd	11,2cd	14,0b	16,9a	11,7ab
60 t/ha	22,8b	21,2bcd	16,6bc	18,3b	7,4a	11,5ab
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	37a	29,8ab	26,5ab	27,7a	18,0a	11,3ab
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	47,3a	40,1a	30,3a	21,6ab	12,4a	17,8a

Série Baudette Traitements	Effet cumulatif			Effet résiduel		
	Juin	juillet	septembre	Juin	juillet	septembre
Témoin	19,8c	3,9b	4,2d	24,2a	4,5b	3,8b
NPKMg	57,3abc	8,0b	8,5cd	20,6a	5,2b	4,4b
30 t/ha	34,7c	5,7b	6,8cd	22,5a	4,9b	4,8b
60 t/ha	40,7bc	10,8b	14,7bc	20,4a	5,9ab	13,0a
90 t/ha	77,3ab	25,4a	32,4a	25,0a	6,8a	8,1ab
30 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	75,2ab	13,0b	19,5b	30,9a	5,5ab	6,7b
60 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	88,1a	26,1a	24,1ab	27,4a	5,1b	7,5b

a-d : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 12. Effets d'apports de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs du sol en nitrates (mg/kg) au cours de la saison de croissance du soya.

Série Nicolet Traitements	Effet cumulatif		Effet résiduel	
	Juin	juillet	Juin	juillet
Témoin	12,7d	9,4a	13,5a	6,8b
NPKMg	35,1a	13,4a	11,3a	6,3b
20 t/ha	22,8bcd	11,3a	12,9a	7,2b
40 t/ha	25,7abc	13,7a	12,7a	7,6b
60 t/ha	34,0ab	15,2a	13,3a	7,1b
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	29,3abc	18,1a	11,4a	7,2b
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	21,5cd	13,2a	13,4a	11,5a

a-d : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 13. Effet d'apports répétés de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments minéraux dans le profil de sol de la série Baudette, cultivé en maïs. (mg/kg).

0-20 cm	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	Cu	Fe	Mo
Témoin	6,8c	63a	190a	1008b	99a	1224a	2,30b	275a	0,25a
NPKMg	26,6a	81a	239a	1117ab	123a	1206a	2,15b	271a	0,24a
30 t/ha	7,8bc	73a	191a	1433ab	122a	1130a	2,59ab	278a	0,21a
60 t/ha	8,6bc	81a	213a	1474a	121a	1168a	2,81ab	262a	0,24a
30 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	19,7ab	70a	192a	1345ab	136a	1202a	3,09ab	296a	0,25a
60 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	18,8abc	66a	197a	1260ab	137a	1183a	3,40a	267a	0,24a

20-40 cm	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	Cu	Fe	Mo
Témoin	2,1b	21a	94a	857a	257a	1035a	2,30a	251ab	0,18a
NPKMg	6,0ab	38a	120a	836a	219a	1082a	1,85a	288a	0,20a
30 t/ha	2,5b	25a	95a	1121a	299a	983a	2,41a	220b	0,18a
60 t/ha-	2,6b	33a	109a	943a	217a	1065a	2,45a	240ab	0,21a
30 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	8,8a	33a	121a	986a	230a	1171a	2,64a	228ab	0,25a
60 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	7,0a	35a	102a	1042a	285a	1034a	2,50a	247ab	0,20a

a-c : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 14. Effets d'apports répétés de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments minéraux et en métaux lourds dans le profil de sol de la série Baudette, cultivé en maïs. (mg/kg) .

0-20 cm	Mn	Na	Zn	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
Témoin	12,7a	40a	3,23ab	0,21a	0,25a	0,23a	0,45a	3,67a
NPKMg	19,0a	49a	3,23ab	0,22a	0,32a	0,21a	0,48a	3,60a
30 t/ha	14,4a	53a	3,26ab	0,22a	0,29a	0,28a	0,44a	7,31a
60 t/ha	13,3a	53a	3,30a	0,22a	0,27a	0,27a	0,43a	5,43a
30 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	17,5a	43a	2,82ab	0,23a	0,29a	0,25a	0,44a	3,99a
60 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	19,8a	53a	2,51b	0,21a	0,31a	0,25a	0,39a	3,70a

20-40 cm	Mn	Na	Zn	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
Témoin	9,09a	55a	1,79ab	0,15a	0,23a	0,33a	0,44b	2,58a
NPKMg	10,30a	56a	1,58b	0,17a	0,25a	0,34a	0,45b	2,66a
30 t/ha	17,22a	66a	1,91a	0,16a	0,35a	0,35a	0,53ab	3,00a
60 t/ha	12,98a	62a	2,01a	0,17a	0,29a	0,32a	0,50ab	3,57a
30 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	16,40a	68a	2,08a	0,17a	0,33a	0,31a	0,49ab	3,08a
60 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	18,73a	59a	1,98a	0,17a	0,37a	0,32a	0,57a	2,99a

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 15. Effets d'apports répétés de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments minéraux dans le profil de sol de la série Nicolet cultivé en maïs. (mg/kg).

0-20 cm	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	Cu	Fe	Mo
Témoin	6,5c	135a	148a	2496a	120ab	1026a	4,43a	345a	0,53a
NPKMg	24,7bc	145a	176a	2311a	154a	1086a	5,02a	334a	0,45a
20 t/ha	11,9c	142a	147a	3114a	114b	970a	4,99a	371a	0,53a
40 t/ha	16,1c	159a	155a	2689a	117ab	1000a	5,13a	377a	0,54a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	38,2ab	142a	165a	2732a	133ab	1041a	5,81a	352a	0,56a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	47,9a	158a	188a	2579a	143ab	1051a	5,41a	349a	0,55a

20-40 cm	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	Cu	Fe	Mo
Témoin	4,0b	79a	108a	1805a	106a	963a	6,57a	330a	0,50a
NPKMg	12,4ab	95a	110a	1829a	120a	991a	5,66a	352a	0,41a
20 t/ha	6,3b	98a	116a	2529a	93a	896a	6,43a	350a	0,49a
40 t/ha	11,4ab	99a	122a	1894a	108a	963a	6,35a	362a	0,52a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	22,3a	91a	110a	1884a	100a	933a	6,35a	343a	0,49a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	20,5a	112a	121a	1978a	100a	967a	6,42a	346a	0,50a

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 16. Effets d'apports répétés de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments minéraux et en métaux lourds dans le profil de sol de la série Nicolet cultivé en maïs. (mg/kg).

0-20 cm	Mn	Na	Zn	Cd	Coa	Cr	Ni	Pb
Témoin	4,73a	33a	1,07a	0,22b	0,14a	0,65a	0,54b	4,57a
NPKMg	4,19a	38a	1,10a	0,23ab	0,13a	0,65a	0,61a	4,79a
20 t/ha	5,46a	35a	1,25a	0,23ab	0,15a	0,66a	0,57ab	4,66a
40 t/ha	5,13a	28a	1,25a	0,24a	0,15a	0,67a	0,60a	4,79a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	4,89a	45a	1,30a	0,23ab	0,14a	0,68a	0,60ab	4,73a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	5,03a	34a	1,27a	0,22ab	0,13a	0,67a	0,61a	4,66a

20-40 cm	Mn	Na	Zn	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
Témoin	3,01a	27b	1,37a	0,19a	0,14ab	0,73a	0,57a	3,88a
NPKMg	2,89a	40ab	1,31a	0,20a	0,14ab	0,74a	0,66a	4,09a
20 t/ha	4,30a	27b	1,54a	0,20a	0,15a	0,70a	0,60a	4,08a
40 t/ha	3,26a	29b	1,48a	0,20a	0,15ab	0,74a	0,61a	4,11a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	3,48a	49a	1,37a	0,19a	0,14ab	0,75a	0,57a	3,91a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	3,29a	28b	1,38a	0,20a	0,12b	0,71a	0,61a	4,19a

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 17. Effets d'apports répétés de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments minéraux dans le profil de sol de la série Nicolet cultivé en soya. (mg/kg).

0-20 cm	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	Cu	Fe	Mo
Témoin	7,4a	124a	154b	2485a	128a	1025a	5,03a	328ab	0,58a
NPKMg	5,7a	138a	184a	2396a	135a	1046a	5,98a	334ab	0,57a
20 t/ha	7,0a	115a	146b	2270a	123a	968a	5,63a	334ab	0,55a
40 t/ha	9,2a	110a	144b	2366a	131a	984a	4,76a	327ab	0,54a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	7,2a	129a	160ab	2294a	141a	1021a	4,49a	321b	0,55aa
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	6,6a	117a	152b	2114a	146a	993a	5,68a	347a	0,55a

20-40 cm	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	Cu	Fe	Mo
Témoin	3,6a	49a	73a	1372a	106a	845a	5,56ab	338a	0,48a
NPKMg	3,5a	53a	77a	1415a	91a	918a	6,87a	331a	0,51a
20 t/ha	4,9a	55a	81a	1429a	106a	840a	4,13b	340a	0,48a
40 t/ha	4,5a	44a	71a	1637a	125a	887a	5,21ab	343a	0,50a
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	3,5a	50a	66a	1324a	96a	852a	4,31b	327a	0,47a
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	3,8a	54a	71a	1329a	105a	829a	5,71ab	343a	0,48a

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Tableau 18. Effets d'apports répétés de boues mixtes de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments minéraux et en métaux lourds dans le profil de sol de la série Nicolet cultivé en soya. (mg/kg).

0-20 cm	Mn	Na	Zn	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
Témoin	4,47a	30a	1,24a	0,21a	0,15a	0,56ab	0,58a	4,40a
NPKMg	4,26a	29a	1,40a	0,21a	0,14a	0,58a	0,60a	4,48a
20 t/ha	5,09a	29a	1,97a	0,20ab	0,17a	0,52ab	0,60a	4,00ab
40 t/ha	4,70a	38a	1,31a	0,19b	0,15a	0,50b	0,55a	3,86b
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	4,66a	34a	1,21a	0,19b	0,14a	0,52ab	0,54a	4,07ab
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	4,91a	31a	1,80a	0,20ab	0,16a	0,51ab	0,61a	4,00ab

20-40 cm	Mn	Na	Zn	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
Témoin	2,11a	31a	1,49a	0,16a	0,15a	0,63a	0,60a	3,29ab
NPKMg	1,60a	30a	1,64a	0,19a	0,13a	0,64a	0,58a	3,57a
20 t/ha	2,54a	27a	1,24a	0,16a	0,15a	0,54a	0,60a	3,17ab
40 t/ha	2,30a	33a	1,42a	0,17a	0,15a	0,57a	0,56a	3,25ab
20 t/ha+ ³ / ₄ NPKMg	2,07a	27a	1,33a	0,16a	0,13a	0,58a	0,52a	3,02b
40 t/ha+ ¹ / ₂ NPKMg	2,46a	30a	2,04a	0,17a	0,15a	0,58a	0,58a	3,30ab

a-b : deux moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Valeur agronomique des biosolides de papetières :
effets sur les rendements du maïs-grain et de l'orge et sur
les propriétés des sols.

- 2000 -



Valeur agronomique des biosolides de papetières : effets sur les rendements du maïs-grain et de l'orge, et sur les propriétés des sols.

- Résumé -

Le programme environnemental des industries papetières entrepris depuis 1996 génère d'importantes quantités de boues mixtes de papetières (biosolides) qui constituent une importante source de fertilisant et d'amendement organique. Afin de préciser leur valeur agronomique, une étude de 3 ans (1997-1999) a été effectuée sur les cultures de maïs-grain, soya et orge dans les régions de Nicolet et Trois-Rivières. Les traitements, établis sur deux types de sols, étaient le témoin sans engrais ni biosolides, la fertilisation minérale complète (NPKMg), trois doses de biosolides (20, 40 et 60 t/ha sur la série Nicolet ainsi que 30, 60 et 90 t/ha sur la série Baudette) et deux traitements combinant les biosolides de papetières (20 et 40 t/ha ainsi que 30 et 60 t/ha) et les engrais minéraux (NPKMg) en doses ajustées selon les doses croissantes, respectivement à 75 et 50% de la fertilisation minérale complète. Les résultats obtenus en 1999 montrent que les biosolides de papetières appliqués seuls annuellement depuis 1997 ont permis d'obtenir des rendements élevés de maïs-grain et d'orge, équivalents à la fertilisation minérale complète. De façon générale, les rendements de maïs-grain et d'orge ont augmenté proportionnellement aux doses de biosolides appliquées. Toutefois, les rendements maximums, supérieurs à la fertilisation minérale complète, étaient obtenus lorsque les biosolides de papetières étaient complétés par une fertilisation minérale réduite de 50% et 75%. Ces importantes augmentations de rendements sont dus à la valeur fertilisante élevée des biosolides, mais également à leurs effets sur l'amélioration des propriétés des sols. En effet, les coefficients d'efficacité de l'azote en 1999 étaient élevés, variant respectivement entre 27 et 45% pour la culture de maïs-grain et entre 13 et 27% pour la culture d'orge, selon les doses appliquées et les types de sol. Par ailleurs, les apports de biosolides ont amélioré les propriétés physiques et biologiques, bien que ces effets aient été variables d'un type de sol à l'autre. En effet, les applications de biosolides de papetières ont augmenté de façon significative la proportion d'agrégats supérieurs à 5 mm et les agrégats stables à l'eau (DMP) seulement dans la série Nicolet, tandis que les effets sur les activités de la phosphatase alcaline et de l'uréase et sur le potentiel de minéralisation ont été plus importants sur la série Baudette. Dans les deux types de sol, les apports annuels de biosolides de papetières pendant trois ans ont significativement augmenté les niveaux de matière organique d'environ 30% pour les doses situées entre 40 et 90 t/ha, comparativement au témoin et au traitement avec engrais minéral. Il ressort que les niveaux élevés des rendements des cultures étudiées ne sont pas uniquement attribuables à

l'efficacité élevée des éléments nutritifs apportés par les biosolides de papetières, mais également à leur action bénéfique sur les propriétés du sol. Au niveau environnemental, les apports répétés de biosolides de papetières (20 à 60 t/ha et 30 à 90 t/ha) n'ont pas conduit à l'enrichissement des sols en nitrates, phosphore, métaux lourds ou en microorganismes pathogènes (E.coli, coliformes). Les biosolides de papetières constituent ainsi une intéressante source comme fertilisant et amendement organique des sols dans une agriculture durable.

- Problématique -

Il existe une préoccupation constante pour le maintien d'une agriculture durable faisant intervenir la conservation des ressources sol et eau, la productivité, la rentabilité des entreprises agricoles et l'amélioration de l'environnement. Cependant, le maintien d'une production élevée ne doit pas se faire au détriment de la qualité des récoltes et de la santé des sols. Depuis les dernières années, de bonnes pratiques agricoles sont proposées, notamment une meilleure valorisation agricole des engrais et des fumiers grâce aux plans de fertilisation intégrée actuellement en vigueur au Québec. L'agriculture a également opté pour le travail réduit des sols ainsi que pour de meilleures rotations, comme par exemple le maïs-grain-céréales ou la pomme de terre-céréales avec paille enfouie, en substitution aux monocultures de maïs ou de pommes de terre, telles que pratiquées dans un passé encore récent.

Toutefois, malgré ces bonnes pratiques agricoles, il n'est pas facile de restaurer rapidement ou de maintenir la fertilité et la qualité des sols, caractérisées par une quantité suffisante de matière organique de qualité, une structure stable et une activité biologique et enzymatique élevée. C'est pourquoi l'utilisation d'amendements organiques tels les biosolides de papetières est en nette progression afin de maintenir une bonne qualité des sols, surtout dans les régions déficientes en fumier.

Les biosolides de papetières (boues mixtes) présentent généralement des rapports C/N moins élevés (15-28) ; ils sont riches en éléments nutritifs et peuvent être directement valorisés sans créer de nuisance à la croissance et à la production des cultures. Au contraire, l'application de biosolides de papetières permet de fournir aux cultures des éléments nutritifs majeurs et mineurs rapidement disponibles. Appliqués à l'état frais, les biosolides peuvent également restaurer rapidement ou maintenir la qualité et la fertilité des sols, comparativement aux composts. En effet, les biosolides de papetières frais, à la fois riches en éléments nutritifs, en carbone organique minéralisable, en cellulose, en hémicellulose et en lignine, peuvent stimuler intensément la microflore et la microfaune des sols et par conséquent stimuler les activités spécifiques de ces dernières sur la structuration des sols, la minéralisation et la formation d'humus.

Au cours de cette recherche de trois ans (1997-1999) établie sur deux types de sol, nous avons principalement étudié l'efficacité des éléments nutritifs provenant des biosolides de papetières et mesuré leurs effets sur les rendements du maïs-grain, du soya et de l'orge, ainsi que sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques reliées à la fertilité et à la qualité des sols.

- Hypothèses et objectifs de recherche -

Hypothèse principale

L'apport de biosolides de papetières maintient et/ou améliore constamment les rendements, la qualité commerciale des récoltes et la disponibilité des éléments nutritifs principalement grâce aux teneurs élevées en azote, phosphore, calcium et magnésium et en éléments mineurs (action directe), ainsi que grâce à l'amélioration rapide des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (action indirecte)

Objectifs de la recherche

Ce projet de recherche vise à déterminer les effets de l'application de biosolides de papetières sur les rendements, la qualité des récoltes, sur la disponibilité des éléments nutritifs et sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Cette étude vise également à évaluer la valeur fertilisante de cet amendement en déterminant la dose optimale à appliquer pour chacun des deux sols à l'étude soit :

- un loam limono-argileux (20, 40 ou 60 t/ha) et,
- un loam limoneux (30, 60 ou 90 t/ha).

De plus, l'étude tend à évaluer l'effet d'applications annuelles de biosolides de papetières en comparaison à des applications bisannuelles, afin de déterminer la fréquence idéale d'application pour un développement maximal des cultures. Finalement, ce projet vise à ajuster les doses d'engrais minéraux ajoutés aux biosolides de papetières afin d'établir des recommandations adéquates pour un plan de fertilisation qui assure les rendements élevés, tout en diminuant l'enrichissement et les pertes d'éléments nutritifs dans l'environnement.

- Protocole expérimental -

Cette étude a été effectuée de 1997 à 1999 sur deux rotations de cultures :

- **Maïs-Maïs-Maïs**
- **Soya-Soya-Orge.**

Ces deux rotations incluaient des productions fort importantes au Québec tant sur le plan des superficies de cultures que sur le plan économique. Étant donné que les propriétés du sol peuvent influencer la valorisation optimale des éléments nutritifs en provenance des biosolides de papetières, l'expérience s'est déroulée sur deux types de sol différents au niveau textural. Pour le maïs-grain, l'expérience a été établie sur un loam limono-argileux de la série Nicolet situé sur la ferme Proulx à Saint-Jean-Baptiste-de-Nicolet ainsi que sur un loam limoneux de la série Baudette situé sur la ferme Mylamy à Yamachiche. Pour le soya et l'orge, l'essai a été uniquement établi sur le loam limono-argileux de la Série Nicolet. L'ensemble des propriétés physiques et chimiques de ces deux sols sont présentés au tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés physiques et chimiques initiales des deux séries de sol à l'étude (0-20 cm).

Série	Ferme	Texture	pH	M.O.	N	P	K	Ca	Mg
				------(%)-----		------(kg/ha)-----			
Nicolet	Proulx	Loam limono-argileux	6,8	3,8	0,21	277	294	2978	259
Baudette	Mylamy	Loam limoneux	6,5	4,3	0,19	208	336	2549	409

Cultures de maïs-grain, de soya et d'orge

Les dispositifs expérimentaux utilisés au cours de ces trois années d'étude comprenaient pour l'ensemble des cultures sept traitements répétés 3 fois et incluaient :

- Un témoin sans engrais ni biosolides
- Une fertilisation minérale complète (NPKMg)
- Trois doses croissantes de biosolides de papetières : 20, 40 et 60 t/ha pour le loam limono-argileux et 30, 60 et 90 t/ha pour le loam limoneux.
- Une combinaison des biosolides de papetières (20 et 40 t/ha ou 30 et 60 t/ha) et des engrais minéraux (NPKMg) en doses réduites à 75% et 50 % de la fertilisation complète NPKMg, selon les quantités croissantes de biosolides apportées.

Pour le maïs, les doses d'engrais apportés étaient de 180kg N, 100 P₂O₅ et 120 kg K₂O /ha en 1997 et de 180 kg N, 80 kg P₂O₅ et 100 kg K₂O/ha en 1998 et 1999. Pour le soya, les doses de phosphore et de potassium s'élevaient à 0 kg N, 50 kg P₂O₅ et 60 kg K₂O/ha. Enfin, les quantités d'engrais pour l'orge étaient de 60 kg N, 0 kg P₂O₅ et 0 kg K₂O/ha.

En deuxième et troisième année du projet (1998, 1999), les parcelles principales (5 x 25 m) ont été subdivisées en deux parties égales (5 x 12,5 m). Pour la culture de maïs, les traitements ci-haut décrits ont été appliqués dans la première moitié des parcelles (volet A), afin d'évaluer les effets des applications répétées annuellement sur les rendements et la qualité de la récolte et du sol (voir tableaux 4 et 5). L'autre moitié des parcelles (volet B) n'a pas reçu d'apport de biosolides en 1998 mais, seulement en 1997 et 1999. Dans la rotation soya-céréales, les biosolides de papetières ont été apportés en 1997 et 1998 pour le volet A et seulement en 1997 pour le volet B, afin d'évaluer les arrières-effets de ces résidus organiques sur les rendements des cultures et les propriétés du sol (voir tableau 6).

Étant donné que l'efficacité des éléments nutritifs des biosolides peut varier en fonction des conditions climatiques, des parcelles sans engrais azoté avaient été prévues à cette fin dans le dispositif expérimental. Ainsi des applications de biosolides y ont été effectuées au printemps 1999 afin de mesurer leurs coefficients d'efficacité en azote en cultures de maïs et d'orge, en cette saison climatique.

- Résultats -

Composition physique et chimique des biosolides de papetières

Les résultats de l'analyse des biosolides de papetières incorporés au printemps 1999 sont présentés dans le tableau 2. Les biosolides étudiés présentaient des pH allant de légèrement acides à presque neutres ce qui suggérait une influence favorable sur le développement et la croissance de la microflore et des cultures. Ils étaient riches en matière organique dévoilant des valeurs très élevées en comparaison à des échantillons de lisier et de fumier. Pour améliorer rapidement la fertilité et la qualité des sols dans une agriculture durable, il est nécessaire d'apporter une quantité importante de matière organique fraîche au sol. Effectivement, en apportant du carbone minéralisable, on assiste à la prolifération de la microflore et de la microfaune dans les sols et par conséquent à la stimulation de l'activité biologique et enzymatique qui est reliée à la fertilité et la qualité des sols. Les teneurs en azote total des biosolides de papetières variaient entre 1,99 et 3,40%.

Les rapports C/N déterminent la vitesse de minéralisation des amendements organiques et la disponibilité de l'azote aux cultures. Les rapports C/N des biosolides étudiés, variant entre 15 et 22, étaient tous inférieurs à 30, ce qui indiquait une matière résiduelle fertilisante (MRF) ne créant aucun déséquilibre azoté lors de sa minéralisation primaire dans le sol. De plus, nous avons observé qu'il existait une relation étroite entre les teneurs en azote total des biosolides et leurs rapports C/N (voir tableau 2), les plus faibles rapports C/N présentant des teneurs plus élevées d'azote total. Il ressort que les coefficients d'efficacité de l'azote en première année peuvent varier principalement en fonction des rapports C/N.

Tableau 2 : Composition physique et chimique des biosolides de papetières à l'étude.

Biosolides	Ferme	pH	M.S.	M.O.	C	N	C/N	N-NH ₄	N-NO ₃	P
			----- (%) -----				----- (mg/kg) -----			
Laurentide	Proulx	6,40	26,4	58,1	33,7	2,67	19	2114	0,46	3447
Belgo	Proulx	6,85	40	77,0	44,7	1,99	22	1966	1,53	6036
Wayagamack	Mylamy	5,92	28,9	87,2	50,6	3,40	15	782	0,29	5203
		K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
		----- (mg/kg) -----								
Laurentide	Proulx	1203	4846	827	13,1	14,5	4611	137,2	77,4	614,7
Belgo	Proulx	1987	29678	1427	34,6	104,8	1153	296,8	81,7	762,7
Wayagamack	Mylamy	1925	6230	1353	5,3	27,6	1878	306,8	82,6	1116,2

Les biosolides de papetières contenaient également des quantités importantes en phosphore mais, plus faibles en potassium. Ils présentaient de fortes concentrations de calcium et de magnésium et des quantités importantes d'éléments mineurs. Ainsi, à l'exception du potassium, le statut nutritif des biosolides était très équilibré, étant comparable à celui du fumier de bovins. C'est pourquoi les biosolides de papetières peuvent être utilisés à la fois comme fumure minérale (éléments majeurs et mineurs) et comme amendement organique de sol (carbone).

Les contenus des résidus organiques en cellulose, hémicellulose et lignine déterminent leur vitesse de décomposition et d'humification dans le sol. De même, leur composition biochimique peut déterminer leur vitesse d'action sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols. Les teneurs élevées en cellulose et hémicellulose indiquent généralement une décomposition rapide mais une faible accumulation d'humus dans le sol. Les biosolides de papetières possèdent des caractéristiques intermédiaires; une fraction non négligeable (cellulose et hémicellulose) pouvant se décomposer facilement et agissant ainsi sur la microflore et la structuration du sol et, parallèlement, un contenu important en lignine confirmant leur potentiel à enrichir les sols en humus (Tableau 3).

Tableau 3 : Composition biochimique des boues de papetières.

Résidus organiques	C/N	Cellulose (%)	Hémicellulose	Lignine
Biosolides de papetières	24,6	25,0	38,4	36,6

Rendements et qualité des récoltes du maïs-grain .

Loam limono-argileux

Les résultats des rendements en maïs-grain cultivé sur le loam limono-argileux de la série Nicolet sont présentés au tableau 4 et à la figure 1. Des applications annuelles de biosolides de papetières seuls (40 et 60 t /ha) pendant 3 ans ont augmenté de façon significative les rendements en maïs-grain (Figure 1) , comparativement au témoin. Toutefois, l'application de biosolides de papetières complétées par des formulations ajustées d'engrais minéraux (20 t/ha + $\frac{3}{4}$ NPKMg et 40 t/ha + $\frac{1}{2}$ NPKMg) a favorisé les rendements les plus élevés de maïs-grain. Ces niveaux de rendement étaient comparables à la production obtenue avec la fertilisation minérale complète (NPKMg). Concernant

la fréquence d'application de biosolides, les rendements ont été légèrement supérieurs lorsque les biosolides de papetières ont été appliqués annuellement (Tableau 4, A) comparativement aux applications bisannuelles (Tableau 4, B). De façon générale, les rendements en maïs-grain ont augmenté

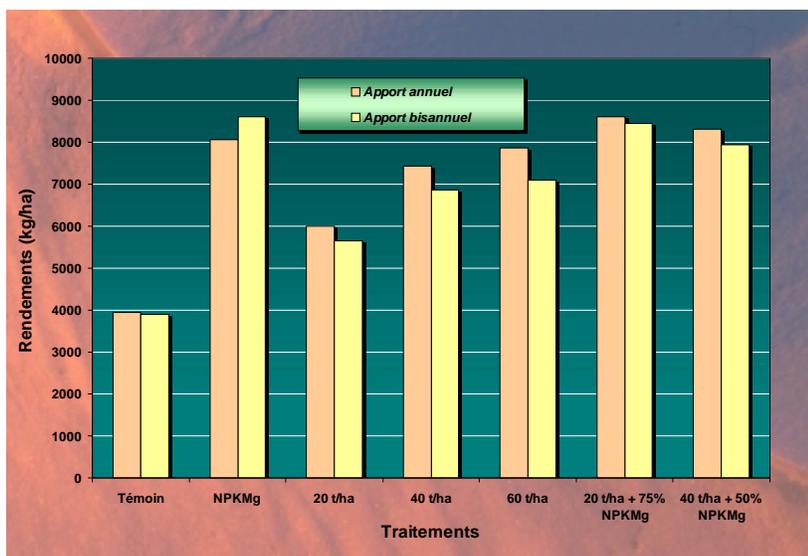


Figure 1. Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les rendements en grains de maïs cultivé sur un loam limono-argileux.

proportionnellement aux doses de biosolides apportées. Les applications d'engrais minéral (NPKMg) et de biosolides de papetières n'ont pas significativement maintenu le poids spécifique des grains de maïs par rapport au témoin sans engrais minéraux ni amendement organique (Tableau 4).

Tableau 4 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les rendements en grains de maïs cultivé sur un loam limono-argileux (1999).

Traitements	Rendements		Poids spécifique	
	A	B	A	B
	(kg/ha)		(kg/hl)	
Témoin	3938 c	3896 c	73,6 a	73,6 a
NPKMg*	8067 a	8608 a	73,1 a	74,5 a
20 t/ha	6005 b	5641 bc	73,5 a	73,4 a
40t/ha	7432 ab	6868 ab	73,8 a	74,3 a
60 t/ha	7857 a	7091 ab	72,9 a	73,5 a
20 t/ha + 3/4 NPKMg	8600 a	8446 a	74,4 a	74,7 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	8305 a	7934 a	74,7 a	74,6 a
PPDS	1753,3	1920,1	2,0708	2,7926

* : NPKMG: 180 kg N, 80kg P2O5 et 100 kg K2O /ha

A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

B : Application bisannuelle de biosolides en 1997 et 1999.

Loam limoneux

Les résultats des rendements en maïs-grain cultivé sur le loam limoneux de la série Baudette sont présentés au tableau 5 et à la figure 2.

Attention ! l'ordre dans la figure a été inversé.» La couleur jaune représente les rendements avec les apports annuels et la couleur orange les productions sous apports bisannuels.

Des apports annuels ou bisannuels de biosolides de papetières

seules à raison de 30 à 90 t/ha ont permis d'obtenir des gains d'environ une tonne, en comparaison avec la fertilisation minérale complète. Les applications annuelles de 30 et 60 t/ha de biosolides de papetières complétées avec des quantités réduites d'engrais minéral ont permis des augmentations élevées de rendement en grains de maïs, égales et parfois supérieures à la fertilisation minérale

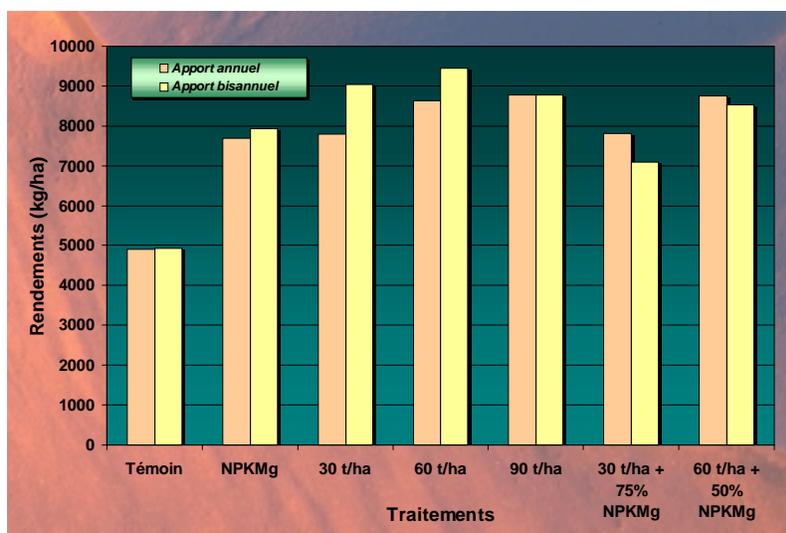


Figure 2. Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les rendements en grains de maïs cultivé sur un loam limoneux. (attention :

complète (Figure 2). Dans ce sol, les augmentations de rendements en maïs n'étaient pas proportionnelles aux doses de biosolides apportées. De plus, les rendements ont été augmentés de façon significative peu importe la fréquence d'application (Figures 2). Ces résultats démontrent une importante réponse du maïs aux applications de biosolides dans ce type de sol.

Tableau 5 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les rendements en grains de maïs cultivé sur un loam limoneux (1999)

Traitements	Rendements		Poids spécifique	
	A	B	A	B
	(kg/ha)		(kg/hl)	
Témoin	4932c	4904b	67,4b	67,7abc
NPKMg	7928ab	7686a	67,2b	68,2ab
30 t/ha	9046ab	7789a	65,8bc	66,4abc
60t/ha	9447a	8631a	70,0a	68,3ab
90 t/ha	8782ab	8768a	69,8a	68,4a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	7102b	7804a	64,9c	65,7c
60 t/ha + 1/2 NPKMg	8525ab	8750a	66,5bc	66,1bc
PPDS	2017,2	1444,6	1,7765	2,2943

NPKMg* : 180 kg N, 80 kg P2O5 et 100 kg K2O/ha.

A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

B : Application bisannuelle de biosolides en 1997 et 1999.

Rendements de l'orge

Loam limono-argileux

Dans le cadre de l'assolement soya-soya-orge, les arrières-effets ont été étudiés sur la culture de l'orge en 1999, puisque les derniers apports de biosolides ont été effectués au printemps 1998 pour le volet A et au printemps 1997 pour le volet B. De façon générale, l'apport de biosolides a significativement augmenté les rendements

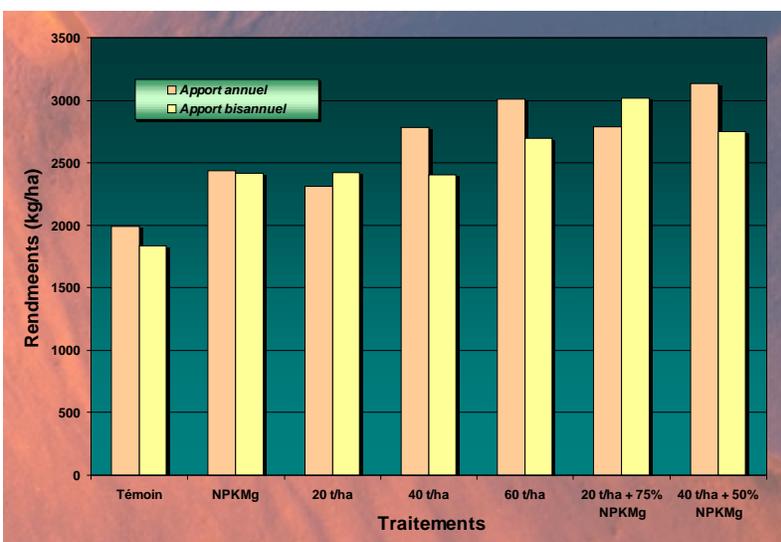


Figure 3. Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les rendements en grains d'orge cultivé sur un loam limono-argileux(1999).

d'orge. Les rendements les plus élevés ont été obtenus pour les doses de 40 et 60 t/ha avec ou sans complément d'engrais minéral. Les augmentations de rendements en grains étaient proportionnelles aux doses de biosolides apportées. Avec les doses de 40 et 60 t /ha de biosolides, nous avons observé des gains de rendements situés entre 300 et 600 kg /ha, comparativement à la fertilisation minérale complète. (Tableau 6; Figure 3) On remarque donc un effet résiduel significatif de l'application de ces résidus papetiers sur les rendements de céréales. Cependant l'application de biosolides en 1997 et 1998 a permis l'obtention de rendements plus élevés d'orge en 1999, comparativement à une seule application en 1997.

Tableau 6 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les rendements en grains d'orge cultivé sur un loam limono-argileux (1999).

Traitements	Rendements	
	A	B
	(kg/ha)	
Témoin	1989 c	1832 b
NPKMg*	2435 ab	2413 ab
20 t/ha	2309 bc	2423 ab
40t/ha	2783 ab	2405 ab
60 t/ha	3008 ab	2697 ab
20 t/ha + 3/4 NPKMg	2790 ab	3018 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	3132 a	2749 ab
PPDS	537,9	974,95

* : NPKMg : 60 kg N, 0 kg P2O5 et 0 kg K2O/ha

A : Application annuelle de biosolides en 1997 et 1998.

B : Application unique de biosolides en 1997.

Prélèvements en éléments nutritifs (maïs-grain et orge)

Les apports d'engrais minéraux et de biosolides seuls ou complétés d'engrais minéraux ont significativement augmenté les prélèvements en éléments majeurs et mineurs du maïs-grain et de l'orge (Tableaux 17,18 et 19 en annexe). Les résultats indiquent que de façon générale, les prélèvements en éléments majeurs et en oligoéléments ont été proportionnels aux rendements obtenus pour chacune des cultures. De plus, on note que dans l'ensemble des éléments étudiés, leur prélèvement a évolué de façon proportionnelle suivant les doses de résidus papetiers apportés et ce, indépendamment de la fréquence d'application. Il ressort que les apports de biosolides de papetières ont significativement amélioré la disponibilité et l'absorption des éléments nutritifs majeurs et mineurs, ce qui démontre que ceux-ci augmentent la fertilité potentielle des sols et, par conséquent, les rendements et la qualité des récoltes. Ainsi, tout comme les fumiers, les biosolides enrichissent les sols également en éléments mineurs (oligoéléments), ce qui constitue un facteur

important de la fertilité des sols au Québec puisqu'une majorité de ces derniers sont de plus en plus déficients en ces éléments essentiels pour la croissance des cultures.

Coefficients d'efficacité d'azote (maïs-grain et orge)

Afin de calculer les coefficients d'efficacité d'azote, les quantités de matière sèche totale produite par hectare pour le maïs-grain et l'orge (tiges et épis), ainsi que les prélèvements en azote par ces récoltes ont été déterminés. Le calcul des coefficients d'utilisation et d'efficacité d'azote a permis de déterminer les quantités d'azote provenant des biosolides de papetières prélevées et utilisées par les cultures à l'étude. Le coefficient d'utilisation d'azote est calculé d'après la différence entre les prélèvements en azote des traitements (engrais ou biosolides) et les prélèvements en azote total du traitement témoin, cette différence étant par la suite divisée par l'apport total en azote provenant du traitement à l'étude. Par la suite, le coefficient d'efficacité d'azote est déterminé selon le rapport entre le coefficient d'utilisation d'azote du biosolide à l'étude et le coefficient d'utilisation d'azote de l'engrais minéral. Les résultats de ces calculs sont présentés aux tableaux 7, 8 et 9.

Pour la culture de maïs, les coefficients d'utilisation de l'azote des biosolides variaient entre 32 et 48% pour l'engrais minéral azoté et se situaient entre 10 et 21,5% selon les doses de biosolides de papetières appliquées et les types de sol. Pour la culture d'orge, les coefficients d'utilisation d'azote étaient de 21% pour l'engrais minéral azoté et variaient de 3 à 6%, selon les doses de biosolides. Comme dans le cas des engrais, les coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote ont diminué avec les doses de biosolides ou les quantités d'azote total apportées au sol.

Les coefficients d'efficacité d'azote des biosolides de papetières dans la culture de maïs ont varié selon les doses et les types de sol de 31 à 36% et de 27 à 45%, respectivement dans le loam limono-argileux de la série Nicolet et le loam limoneux de la série Baudette. Les coefficients d'efficacité d'azote variaient de 13 à 27% pour la culture d'orge, selon les doses de biosolides.

Cette étude a montré que les coefficients d'efficacité en azote des biosolides de papetières étaient similaires à ceux des fumiers solides de bovin. Toutefois, l'intégration des coefficients d'efficacité n'est pas une simple opération mathématique, mais doit tenir compte de plusieurs facteurs. En effet, les coefficients d'efficacité d'azote dépendent de la nature des biosolides appliqués (rapport C/N) et des doses apportées, les coefficients diminuant donc proportionnellement avec les doses croissantes de biosolides. Les valeurs des coefficients d'efficacité d'azote dépendent également des conditions de champ (précédent cultural, culture envisagée) et des propriétés des sols, notamment

la structure, la densité (ou compactage) qui déterminent le régime d'air, de l'eau et de la température dans le sol. Ces paramètres influencent l'activité des microorganismes du sol responsables respectivement de la minéralisation et de la libération des éléments nutritifs, ainsi que de la croissance optimale et l'absorption maximale des nutriments par les cultures. Les coefficients d'utilisation et d'efficacité d'azote dépendent également des cultures, étant plus élevés pour le maïs qui est une culture plus exigeante en azote, en plus d'avoir une plus longue période d'absorption, comparativement aux céréales.

Tableau 7 : Coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote des biosolides de papetières à partir des prélèvements en azote du maïs-grain cultivé sur un loam limono-argileux.

Traitements	Apports d'N (kg/ha)	Rendements en matière sèche (kg m.s./ha)	Prélèvements en N (kg/ha)	Coefficient d'utilisation (%)	Coefficient d'efficacité (%)
Témoin	---	7933c	62,7 c	---	---
NPKMg	180	12506 a	121,1 a	32,4	---
20 t/ha*	196,5	9518 ab	85,6b	11,6	36
40 t/ha	393,0	10233 ab	105,3 ab	10,8	33
60 t/ha	589,5	12426 a	122,1 a	10,0	31
PPDS	---	2109,7	25,3		

* : Les trois doses de biosolides ont été appliquées pour la première fois en 1999 et provenaient de l'usine Wayagamack.

* : Analyse du biosolide : MS = 28,9%; %N = 3,40%

Tableau 8 : Coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote des biosolides de papetières à partir des prélèvements en azote du maïs-grain cultivé sur un loam limoneux.

Traitements	Apports d'N (kg/ha)	Rendements en matière sèche (kg m.s./ha)	Prélèvements en N (kg/ha)	Coefficient d'utilisation (%)	Coefficient d'efficacité (%)
Témoin	---	11306 b	104,4 b	---	---
NPKMg	180	15765 a	191,0 a	48,1	---
30 t/ha*	211,5	14540 ab	149,8 ab	21,5	45
60 t/ha	423,0	16142 a	185,0 a	19,0	39
90 t/ha	634,5	17136 a	188,0 a	13,0	27
PPDS	---	3555,4	63,019		

* : Les trois doses de biosolides ont été appliquées pour la première fois en 1999 et provenaient de l'usine Laurentides.

* : Analyse du biosolide : MS = 26,4%; %N = 2,67%

Tableau 9 : Coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote des biosolides de papetières à partir des prélèvements en azote de l'orge cultivé sur un loam limono-argileux.

Traitements	Apports d'N (kg/ha)	Rendements en matière sèche (kg m.s./ha)	Prélèvements en N (kg/ha)	Coefficient d'utilisation (%)	Coefficient d'efficacité (%)
Témoin	---	1741 a	34,8 a	---	---
NPKMg	60	2118 a	47,3 a	20,8	---
20 t/ha*	159,2	2270 a	44,0 a	5,7	27
40 t/ha	318,4	2237 a	47,9 a	4,1	20
60 t/ha	477,6	2289 a	47,9 a	2,7	13
PPDS	---	868,29	15,052		

* : Les trois doses de biosolides ont été appliquées pour la première fois en 1999 et provenaient de l'usine Belgo.
 * : Analyse du biosolide : MS = 40%; %N = 1,99%

- Qualité du sol -

Effets des biosolides de papetières sur les activités biologiques et enzymatiques du sol.

Les résultats obtenus pour ces paramètres sont présentés dans les tableaux 10, 11 et 12.

Phosphatase

La **phosphatase acide** est une enzyme associée aux fonctions métaboliques des microorganismes et à la minéralisation et la disponibilité du phosphore. Cette enzyme est retrouvée dans les amendements organiques et les résidus de culture au niveau des cellules végétales. Contrairement aux premières années d'applications de biosolides (1997,1998), l'activité de la phosphatase acide n'a pas été augmentée de façon significative en 1999 par des apports de ces amendements organiques ou d'engrais minéral, comparativement au témoin.

La **phosphatase alcaline** est une enzyme principalement intra-cellulaire retrouvée au niveau des cellules microbiennes. En 1999, l'apport de biosolides de papetières a permis des augmentations importantes de l'activité de cette enzyme, mais de façon significative seulement dans le loam limoneux de la série Baudette. Par ailleurs, l'activité de la phosphatase était plus élevée dans les sols ayant reçu des apports annuels de biosolides comparativement aux applications bisannuelles. Les augmentations les plus élevées de l'activité de cette enzyme étaient observées lorsque les biosolides étaient apportées à raison de 60 et 90 t/ha. Par ailleurs, deux applications précédentes en 1997 et 1998 n'ont pas significativement augmenté les activités de la phosphatase dans le sol en 1999, dans la rotation soya-soya-orge (Tableau 12)

Uréase

L'**uréase** est une enzyme impliquée dans les réactions se produisant lors du processus de minéralisation de l'azote. De façon générale, l'activité de l'uréase a été augmentée de façon importante par des apports annuels de biosolides de papetières dans les deux types de sol étudiés ainsi que dans les deux systèmes de culture (Tableaux 10, 11 et 12). De plus, les applications de biosolides de papetières ont augmenté de façon plus importante l'activité de l'uréase en comparaison avec les apports de fumure minérale. Ces résultats indiquent que l'apport de biosolides de papetières stimule les microorganismes ammonificateurs et nitrificateurs responsables de la minéralisation de l'azote.

Pouvoir de minéralisation

Pour l'ensemble des cultures et des types de sol, la minéralisation de l'azote du sol a été accrue particulièrement par des apports annuels des biosolides en comparaison avec les applications bisannuelles. Il ressort que les apports de biosolides ont permis une minéralisation de l'azote accrue dans les sols par une activation des microorganismes présents et, par conséquent, des quantités importantes de nitrates étaient alors disponibles aux cultures. Ce phénomène a entraîné des prélèvements plus élevés de l'azote par les plantes ce qui a favorisé des augmentations de rendements.

Tableau 10: Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les activités enzymatiques et le pouvoir de minéralisation d'un loam limono-argileux sous précédent de maïs-maïs-maïs (0-20 cm).

Traitements	Phosphatase acide		Phosphatase alcaline		Uréase		Pouvoir de minéralisation	
	A	B	A	B	A	B	A	B
	(ug P.N.P./g)				(ug N-NH4/g)		(mg N-NO3/kg)	
Témoin	267,00 a	272,33 a	245,80 ab	237,03 a	36,94 c	47,16 a	14,28 c	13,98 a
NPKMg	286,50 a	284,00 a	208,70 b	215,97 a	43,30 bc	41,28 a	32,47 bc	15,28 a
20 t/ha	246,07 a	247,80 a	238,57 ab	239,30 a	43,96 abc	38,32 a	16,27 c	19,32 a
40 t/ha	258,97 a	259,00 a	264,27 a	254,63 a	49,50 ab	43,29 a	21,89 bc	21,58 a
60 t/ha	285,53 a	278,13 a	250,80 ab	254,37 a	56,14 a	52,85 a	29,48 bc	11,88 a
20 t/ha + 3/4 NPKMg	272,63 a	245,43 a	240,33 ab	254,47 a	52,39 ab	47,22 a	39,19 ab	24,92 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	290,40 a	244,40 a	243,77 ab	238,37 a	54,75 ab	47,73 a	52,02 a	18,89 a
PPDS	50,632	56,536	46,458	64,124	12,206	17,16	18,573	16,122

A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

B : Application bisannuelle de biosolides en 1997 et 1999.

Tableau 11: Effet d'apport de biosolides et d'engrais minéraux sur l'activité enzymatique et le pouvoir de minéralisation d'un loam limoneux sous précédent de maïs-maïs-maïs (0-20 cm)

Traitements	Phosphatase acide		Phosphatase alcaline		Uréase		Pouvoir de minéralisation	
	A	B	A	B	A	B	A	B
	(ug P.N.P./g)				(ug N-NH4/g)		(mg N-NO3/kg)	
Témoin	317,93c	344,37a	181,00ab	135,53c	41,83c	53,47ab	18,65b	22,21b
NPKMg	346,40 ab	343,10 a	200,50 ab	138,43 c	56,05 abc	46,45 b	22,97 ab	26,20 b
30 t/ha	334,10 b	329,23 a	186,33 ab	229,00 b	45,71 c	48,58 b	22,18 ab	23,53 b
60 t/ha	346,37 ab	341,93 a	262,03 a	277,50 ab	62,72 ab	65,25 ab	27,11 a	35,80 b
90 t/ha	348,70 a	337,27 a	202,13 ab	297,97 a	65,10 a	76,47 a	28,13 a	54,31 a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	347,97 ab	334,60 a	194,53 ab	244,90 ab	53,62 abc	54,45 ab	23,68 ab	34,69 b
60 t/ha + 1/2 NPKMg	344,47 ab	333,30 a	136,10 b	258,20 ab	48,56 bc	66,17 ab	20,81 b	58,70 a
PPDS	14,376	25,586	84,921	66,928	15,987	23,612	6,1716	18,023

A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999

B : Application bisannuelle de biosolides en 1997 et 1999

Tableau 12 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les activités enzymatiques et le pouvoir de minéralisation d'un loam limono-argileux sous précédent de soya-soya-orge (0-20 cm).

Traitements	Phosphatase acide		Phosphatase alcaline		Uréase		Pouvoir de minéralisation	
	A	B	A	B	A	B	A	B
	(ug P.N.P./g)				(ug N-NH ₄ /g)		(mg N-NO ₃ /kg)	
Témoin	281,10 a	274,07 a	237,40 ab	250,90 a	46,57 b	41,95 b	13,91 a	11,08 b
NPKMg	281,23 a	255,23 a	215,80 b	225,57 a	45,38 b	42,20 b	18,69 a	10,02 b
20 t/ha	252,07 b	263,93 a	242,67 ab	240,40 a	47,51 b	41,71 b	15,92 a	11,67 b
40 t/ha	275,13 a	276,43 a	261,27 a	255,40 a	62,38 a	48,21 ab	20,63 a	11,80 b
60 t/ha	276,37 a	274,23 a	261,70 a	259,87 a	52,76 ab	50,27 ab	22,32 a	11,43 b
20 t/ha + 3/4 NPKMg	281,97 a	278,83 a	255,07 a	269,10 a	49,95 ab	47,54 ab	27,20 a	11,34 b
40 t/ha + 1/2 NPKMg	282,07 a	280,07 a	237,67 ab	257,07 a	51,28 ab	54,98 a	19,52 a	16,47 a
PPDS	17,363	28,320	37,473	58,311	14,159	11,724	18,283	4,3745

A : Application annuelle de biosolides en 1997 et 1998.

B : Application unique de biosolides en 1997.

Effets des biosolides de papetières sur la structure du sol.

Les effets d'apports annuels de biosolides (A) sur la répartition des agrégats et leur stabilité dans l'eau (DMP) ont été mesurées dans les sols cultivés en maïs-grain (Tableaux 13 et 14). En 1999, les résultats montrent que la stabilité structurale (DMP) a été significativement influencée par l'apport de biosolides de papetières (40 et 60 t/ha) seulement dans le loam limono-argileux de la série Nicolet, contrairement aux données de 1997. De même, les apports de biosolides ont augmenté de façon significative la proportion d'agrégats de 5 mm sur ce même type de sol. Ces résultats indiquent que les effets durables de biosolides sur l'agrégation et la stabilité structurale des sols peuvent dépendre du type de sol. La structure du loam limoneux a également été améliorée en 1997 par les premiers apports de biosolides dans le sol, mais cet effet n'a pas pu être mesuré en 1999. La formation de gros agrégats s'explique en partie par la stimulation de la microflore du sol à la fois par les éléments nutritifs ainsi que par des quantités de carbone facilement minéralisable apportées par les biosolides frais de papetières dans le sol. L'augmentation de la stabilité structurale influence directement les propriétés physiques des sols (porosité, aération, rétention en eau) et indirectement les propriétés biologiques des sols (activité enzymatique, vie microbienne). Ces impacts sur ces principales propriétés des sols permettent à long terme l'amélioration notable des rendements des cultures à condition de faire de bons choix de rotations et d'apporter régulièrement des amendements organiques de qualité.

Tableau 13 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur la stabilité de la structure d'un loam limono-argileux sous précédent de maïs-maïs-maïs.

Traitements	5 mm (%)	2 mm	1 mm	0.25 mm	DMP (mm)
Volet A					
Témoin	32.61 d	27.31 abc	6.01 a	6.24 a	3.21 d
NPKMg	40.00 bcd	25.21 bc	4.28 ab	4.86 ab	3.57 cd
20 t/ha	36.15 cd	31.11 a	4.89 ab	4.66 ab	3.54 cd
40 t/ha	50.10 ab	22.63 c	3.02 b	3.94 b	4.12 ab
60 t/ha	42.74 abc	28.07 ab	3.40 b	4.53 ab	3.84 abc
20 t/ha + 3/4 NPKMg	50.36 a	25.20 bc	3.09 b	3.70 b	4.23 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	42.32 abcd	24.69 bc	4.35 ab	5.16 ab	3.71 bcd
PPDS	10,121	4,9043	2,0242	2,0305	0,5097

Volet A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 14 : Effet d'apport de biosolides de papetière et d'engrais minéraux sur la stabilité de la structure d'un loam limoneux sous précédent de maïs-maïs-maïs.

Traitements	5 mm (%)	2 mm	1 mm	0.25 mm	DMP (mm)
Volet A					
Témoin	28.35 a	21.81 b	4.69 b	7.89 a	2.72 a
NPKMg	21.48 a	26.94 ab	5.67 ab	10.06 a	2.48 a
30 t/ha	22.75 a	27.52 ab	5.39 ab	8.97 a	2.58 a
60 t/ha	18.45 a	21.55 b	6.31 ab	10.64 a	2.11 a
90 t/ha	25.08 a	28.72 ab	6.31 ab	8.66 a	2.78 a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	21.62 a	33.70 a	7.41 a	8.94 a	2.75 a
60 t/ha + 1/2 NPKMg	21.89 a	30.29 ab	7.04 a	8.70 a	2.64 a
PPDS	10,7650	9,2218	2,0397	3,4041	0,8049

Volet A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999

Effets des biosolides de papetières sur la matière organique et la masse volumique apparente.

La matière organique et la masse volumique apparente des sols ont été mesurées seulement dans les sols cultivés en maïs-grain. Les résultats présentés dans les tableaux 15 et 16 montrent en général que les apports annuels de biosolides de papetières ont accru les teneurs en matière organique dans les profondeurs de 0 à 10 cm des deux types de sols en étude. L'apport annuel de biosolides de papetières a augmenté d'environ 30% les teneurs en matière organique des sols. Les apports annuels de 40 et 60 t/ha sur la série Nicolet, et de 60 et 90 t/ha ont permis une augmentation significative de la teneur en matière organique en comparaison avec le témoin et l'engrais minéral. On observe également une augmentation significative de la matière organique

dans la couche 10-20 cm du loam limono-argileux de la série Nicolet, suite aux applications répétées de biosolides de papetières.

Cette étude démontre que les biosolides qui contiennent des teneurs importantes de lignine (Tableau 3) permettent une accumulation rapide de matière organique stable dans le sol (humus). En effet, il est connu que la lignine est formatrice d'humus dans les sols. Les biosolides de papetières apportent également des quantités importantes de sucres facilement minéralisables (cellulose, hemicellulose) qui stimulent la prolifération des microorganismes dans les sols, permettant une décomposition et humification rapide des biomasses végétales. L'humus des sols provient également en partie des tissus microbiens, particulièrement des champignons.

Les applications de biosolides de papetières ont amélioré la masse volumique apparente dans la couche de surface (0-10 cm) du sol de la série Baudette. Cependant cet effet a été significatif seulement avec la dose la plus élevée (90 t/ha) qui a favorisé la diminution de ce paramètre physique dans ce sol. Même si les apports de biosolides ont amélioré la structuration du sol de la série Nicolet (Tableau 13), ces effets ne se sont pas encore traduits par une amélioration de la masse volumique apparente de ce sol initialement compacté.

Tableau 15. Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en matière organique et sur la masse volumique apparente d'un loam limono-argileux sous précédent de maïs-maïs-maïs (volet A).

Traitements	M.O.		Masse volumique apparente	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
	(%)		(g/cm ³)	
Témoin	4,05 b	2,26 b	1,23 a	1,37 a
NPKMg	4,03 b	2,57 b	1,28 a	1,39 a
20 t/ha	3,96 b	2,32 b	1,26 a	1,33 a
40 t/ha	5,23 a	2,68 a	1,21 a	1,29 a
60 t/ha	5,96 a	2,78 a	1,25 a	1,37 a
20 t/ha + 3/4 NPKMg	4,57 b	3,48 a	1,23 a	1,29 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	4,65 b	2,52 b	1,25 a	1,35 a
PPDS	0,834	0,4779	0,1281	0,1333

Volet A : application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 16. Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en matière organique et sur la masse volumique apparente d'un loam limoneux sous précédent de maïs-maïs-maïs (volet A).

Traitements	M.O.		Masse volumique apparente	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
	(%)		(g/cm ³)	
Témoin	4,12 b	1,07 a	1,24 a	1,26 a
NPKMg	4,47 b	0,91 a	1,20 ab	1,20 a
30 t/ha	4,24 b	1,01 a	1,30 a	1,27 a
60 t/ha	4,75 a	1,20 a	1,22 ab	1,31 a
90 t/ha	5,46 a	1,80 a	1,09 b	1,26 a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	5,09 a	1,84 a	1,08 b	1,20 a
60 t/ha + 1/2 NPKMg	4,98 a	1,38 a	1,21 ab	1,30 a
PPDS	0,5894	0,9916	0,1442	0,1985

Volet A : application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

- Fertilité et analyse environnementale -

Les données relatives à l'évolution de la fertilité et à l'accumulation des éléments traces dans le sol sont présentées en annexe dans les tableaux 20 à 31.

Fertilité

N-NH₄

De façon générale, les teneurs en ammonium (N-NH₄) dans les sols n'ont pas été augmentées par l'apport répété de biosolides de papetières, à l'exception du loam limoneux où un apport de 90 t/ha a augmenté significativement les valeurs de N-NH₄ par rapport au témoin et à l'engrais minéral. Globalement, les teneurs en N-NH₄ ont toujours été très faibles dans les trois sols à l'étude. Ceci s'explique par le fait que lors du processus de minéralisation, l'azote se transforme en N-NH₄ puis, par la suite, cet azote ammoniacal est très rapidement converti en nitrites et en nitrates. Ainsi, les concentrations en N-NH₄ étaient très faibles dans les sols pour l'ensemble des traitements étant donné une transformation très rapide de cet ion.

N-NO₃

Les teneurs en nitrates (N-NO₃) dans les sols ont augmenté suivant des apports répétés de biosolides de papetières. Toutefois, ces augmentations en N-NO₃ n'étaient pas significatives au seuil de probabilité $P < 0,05$. L'augmentation des teneurs en nitrates dans les deux sols à l'étude suivant des apports de biosolides a ainsi permis une disponibilité plus grande de cet élément aux cultures et, par conséquent, a favorisé un prélèvement plus élevé de l'azote par les plantes sans toutefois permettre son accumulation significative dans le profil du sol.

pH

L'application de biosolides de papetières n'a pas eu d'impact significatif sur le pH du sol, pour les trois cultures à l'étude. Il existe généralement une légère diminution de pH des sols qui survient pendant la phase de décomposition des amendements organiques appliqués. Cependant, ce processus est temporaire et n'influence pas l'évolution du pH du sol, comme le montrent les résultats obtenus. Par ailleurs, les boues de papetières contiennent également des quantités importantes de Ca qui peuvent contribuer à maintenir le pH optimal du milieu.

Éléments majeurs et mineurs

Deux ou trois applications de biosolides de papetières à raison de doses variant de 20 à 90 t/ha n'ont pas encore conduit à un enrichissement significatif des sols en éléments majeurs (N, P, K, Ca et Mg) et mineurs (B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Cr et Co) utiles pour la croissance et les rendements des cultures. Les prélèvements en éléments majeurs et mineurs élevés obtenus lors de cette étude expliquent en grande partie le faible effet d'accumulation de ces éléments minéraux dans ces sols. Ainsi, les résultats obtenus ont démontré que l'apport de biosolides de papetières ne favorisait pas à court terme un enrichissement significatif en éléments minéraux dans le profil du sol. En effet, les valeurs de concentrations des sols en éléments nutritifs obtenues dans les traitements avec biosolides sont égales à celles des traitements témoin et de l'engrais minéral. Toutefois, comme pour les fumiers, les biosolides de papetières pourraient conduire à un enrichissement important du sol en tous ces éléments minéraux, après plusieurs applications. Les plans de fertilisation devront ainsi tenir compte de cet enrichissement progressif en éléments nutritifs suite aux apports répétés de biosolides de papetières.

Aspect environnemental

Teneur en nitrates, phosphore soluble et en éléments traces

Afin d'évaluer l'impact environnemental des apports annuels de diverses doses de biosolides de papetières, des analyses ont été effectuées sur des échantillons prélevés à l'automne 1999 dans tous les traitements ayant reçu de l'engrais minéral et/ou des biosolides, à deux profondeurs (0-20 et 20-40 cm). Les applications de biosolides de papetières n'ont pas significativement enrichi le profil du sol en nitrates, en phosphore biodisponible (Mehlich-III), ni en éléments traces (B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Cr et Co, Cd, Pb). Il ressort que trois applications de biosolides même à des doses élevées (60 et 90 t/ha) n'ont pas conduit à l'enrichissement excessif du sol en éléments traces.

Cette étude a indiqué que l'application de biosolides de papetières a amélioré les propriétés de sol propices à la croissance optimale des cultures et à la valorisation élevée des éléments nutritifs du sol et des biosolides, ce qui a accru les coefficients d'utilisation des éléments minéraux et par conséquent diminué leur accumulation dans le sol. Comme pour les fumiers, l'enrichissement du sol en éléments nutritifs s'effectuera graduellement, suite aux apports répétés de biosolides de papetières, selon les doses et /ou les compléments minéraux appliqués. Une bonne gestion de ces biosolides en agriculture exigera donc un suivi périodique de l'évolution dans le profil du sol et les eaux de drainage des teneurs en éléments nutritifs, plus particulièrement le contenu en azote, en

nitrate, en phosphore biodisponible et P total, ainsi qu' en certains éléments traces susceptibles de s'accumuler ou de migrer vers les nappes. Cet exercice va permettre d'établir des recommandations judicieuses en fertilisation intégrée des cultures, ainsi qu'un suivi environnemental adéquat à la ferme.

Microorganismes pathogènes

Des analyses microbiologiques effectuées annuellement depuis 1997 ont démontré que les applications de biosolides de papetières n'ont pas conduit à une augmentation de microorganismes pathogènes dans les sols étudiés (Tableau 33, en annexe). En effet, le nombre de coliformes totaux était généralement faible dans les traitements recevant des biosolides, ce nombre étant parfois inférieur aux parcelles sans aucune application d'amendement organique. Le nombre de E.coli était souvent inférieur à 10 ufc/100ml dans les deux types de sol et n'a pas non plus été influencé par des applications de biosolides de papetières. Bien que certains biosolides, comme les fumiers, contiennent naturellement ces pathogènes, la forte stimulation de la croissance et le développement des microorganismes du sol (augmentation en nombre et en diversité d'espèce) par les applications de biosolides a pu créer une forte compétition entre les microorganismes du sol et les microorganismes pathogènes introduits. En effet, les résultats obtenus depuis 1997 ont indiqué que les applications de biosolides avaient fortement augmenté les activités biologiques et enzymatiques dans les sols étudiés.

- Évaluation économique -

L'évaluation des bénéfices a été effectuée pour les récoltes de maïs-grain obtenues de 1997 à 1999, en tenant compte du prix des engrais et des frais d'épandage des biosolides de papetières ainsi que du prix du marché pour le maïs-grain (Tableaux 32 a, b et c , en annexe) . Les prix présentés ont été extraits des références économiques pour les trois années étudiées. En 1997, les bénéfices réels, obtenus en soustrayant le prix de la récolte du sol témoin, ont été plus élevés avec les applications de 40 t/ha de biosolides complétées par des quantités réduites à 50 % d'engrais minéral (282,3\$). Les gains obtenus avec l'apport de 20 t/ha de biosolides seuls étaient supérieurs à l'engrais minéral, alors que l'application de 40 à 60 t de biosolides seuls n'a pas permis de gains significatifs en première année (Tableau 32a, en annexe).

Pendant la deuxième année (1998), les bénéfices obtenus ont été dans l'ensemble plus élevés suite à l'apport annuel de biosolides (A), comparativement aux apports bisannuels (B). De même, les gains étaient plus élevés suite à l'application combinée de biosolides et d'engrais minéral, comparativement à l'engrais ou aux biosolides seuls (Tableau 32b, en annexe).

En troisième année, les bénéfices élevés, comparables à l'engrais minéral, ont été obtenus avec trois applications annuelles et bisannuelles de biosolides de papetières à raison de 40 et 60 t /ha (A). Toutefois, les apports annuels ou bisannuels de 40 et 60 t/ha de biosolides complétés avec l'engrais minéral ont conduit à des bénéfices similaires dans A et B. Cette évaluation économique permet de démontrer que l'effet cumulatif des biosolides sur la fertilité et leur effet indirect sur les propriétés des sols sont à la base des augmentations soutenues de rendements en grains de maïs.

En résumé, les résultats de rendements ont démontré que les applications annuelles ou bisannuelles de biosolides de papetières ont augmenté significativement les productions de maïs et d'orge. Cependant, les rendements très élevés, égaux ou supérieurs à la fertilisation minérale complète (NPKMg) ont été obtenus lorsque les biosolides de papetières étaient complétés par des engrais minéraux en doses réduites, d'où l'importance d'apporter en complément des doses réduites de fumure minérale afin d'offrir aux cultures des éléments minéraux rapidement disponibles. L'apport de biosolides a donc stimulé la croissance des cultures, le développement optimal des racines et par conséquent une meilleure absorption des éléments nutritifs. L'application de biosolides de papetières de façon bisannuelle a également permis l'obtention de rendements élevés bien qu'inférieurs comparativement à ceux obtenus suite aux apports annuels de biosolides de papetières, ce qui démontre des arrières-effets importants provenant de cet amendement

organique. Ces résultats indiquent l'importance d'apporter des doses répétées de biosolides de papetières lors des premières années de culture et d'appliquer, par la suite, les biosolides de façon bisannuelle étant donné un effet résiduel important provenant de ces biosolides. Ainsi, afin de maximiser les rendements des cultures, il est donc essentiel d'apporter les biosolides de papetières en doses modérées selon des fréquences d'application variables basées sur les cultures et de compléter cet amendement par des formulations réduites d'engrais minéral. Cette fertilisation intégrée va comporter un avantage économique et environnemental dans la gestion agricole des biosolides. Cette recherche a démontré que les augmentations de rendements suite aux applications de biosolides de papetières sont dues aux coefficients d'efficacité élevés des éléments nutritifs des biosolides et, également à l'amélioration des conditions physiques du sol (structure, aération, température) et aux activités biologiques et enzymatiques favorables au recyclage des éléments nutritifs.

- Conclusion -

Les résultats obtenus dans cette étude permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La valeur fertilisante élevée (coefficients d'efficacité, arrières-effets) des biosolides de papetières et leurs effets positifs sur le sol et, par conséquent sur les productions, ont démontré qu'ils constituent un fertilisant et amendement organique de grande qualité.
- L'action bénéfique des biosolides de papetières sur la structure et les activités biologiques et enzymatiques des sols a été très rapide, probablement à cause des rapports C/N faibles, de leur équilibre nutritif et de leur composition chimique (cellulose, hémicellulose) favorables à l'activité de la microflore.
- À cause de l'efficacité élevée des éléments nutritifs des biosolides de papetières, il est recommandable d'ajuster la fertilisation minérale (réduction de doses) suite à leurs applications répétées, en vue d'assurer des bénéfices à la ferme et de préserver la qualité des sols et de l'environnement.
- Le choix de la culture détermine la valorisation optimale des biosolides de papetières. Il est recommandable de les appliquer sur des cultures ayant une longue période de végétation (maïs, pomme de terre, prairies) qui sont plus exigeantes en éléments nutritifs et qui pourraient davantage valoriser les biosolides de papetières. Par ailleurs, les cultures de céréales ou d'orge peuvent mieux bénéficier des arrières-effets importants des biosolides de papetières.
- Les biosolides de papetières constituent une avenue intéressante pour une agriculture durable compétitive et désirant préserver la qualité du sol et du milieu.

- Annexes du rapport 2000 -

Tableau 17 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les prélèvements de maïs-grain en éléments nutritifs majeurs et mineurs (Loam limono-argileux).

Traitements	Prélèvements									
	N		P		K		Ca		Mg	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	(kg/ha)									
Témoin	44,3 c	46,3 d	9,7 b	12,2 d	11,8 b	14,7 d	0,23 b	0,23 d	3,29 d	4,22 c
NPKMg	120,1 a	142,1 a	14,0 ab	24,5 a	17,7 ab	28,1 a	0,31 ab	0,37 a	5,15 abc	9,43 a
20 t/ha	77,5 b	74,1 c	12,0 ab	13,7 d	15,1 ab	16,9 cd	0,26 ab	0,26 cd	3,80 cd	4,52 c
40t/ha	105,5 ab	91,5 c	19,4 a	19,7 bc	22,9 a	24,1 ab	0,36 a	0,31 abc	3,92 bcd	6,67 b
60 t/ha	113,2 a	95,3 bc	15,2 ab	16,3 cd	19,1 ab	20,5 cd	0,30 ab	0,27 bcd	5,16 abc	5,58 bc
20 t/ha + 3/4 NPKMg	129,1 a	120,5 ab	15,5 ab	23,7 ab	19,0 ab	28,0 a	0,33 ab	0,35 ab	5,56 ab	8,42 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	125,7 a	126,7 a	16,4 ab	19,0 c	20,0 ab	23,4 ab	0,37 a	0,29 abcd	6,08 a	6,69 b
PPDS	29,25	27,552	8,1537	4,3248	9,2018	4,7885	0,1237	0,0826	1,7095	1,6806
	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	(mg/ha)									
Témoin	6,9 c	8,1 d	5,8 c	10,4 c	87,0 b	79,2 d	12,4 a	15,2 c	69,0 a	84,2 ab
NPKMg	9,7 bc	15,2 a	15,1 abc	21,4 a	160,4 ab	232,0 a	19,3 a	35,4 a	70,9 a	120,2 a
20 t/ha	7,5 c	10,3 cd	8,9 bc	13,3 bc	107,4 b	129,5 c	14,3 a	16,1 c	66,5 a	74,9 b
40t/ha	15,5 a	12,4 abc	18,6 ab	18,5 ab	146,8 ab	167,1 bc	22,8 a	23,0 bc	101,8 a	110,0 ab
60 t/ha	8,8 bc	11,0 bcd	12,4 abc	16,3 ab	129,4 ab	135,7 c	19,7 a	20,5 bc	81,1 a	89,6 ab
20 t/ha + 3/4 NPKMg	11,9 ab	14,0 ab	11,4 abc	19,9 a	206,3 a	232,0 a	21,2 a	30,1 ab	80,4 a	103,3 ab
40 t/ha + 1/2 NPKMg	15,4 a	12,0 bc	21,0 a	19,8 a	166,8 ab	198,0 ab	21,5 a	22,6 bc	86,1 a	86,5 ab
PPDS	3,8656	3,0682	10,638	5,7012	81,509	49,587	11,567	9,8603	59,549	37,561

A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

B : Application bisannuelle de biosolides en 1997 et 1999.

Tableau 18 : Effet d'apport de biosolides de papeteries et d'engrais minéraux sur les prélèvements de maïs-grain en éléments nutritifs majeurs et mineurs (Loam limoneux).

Traitements	Prélèvements									
	N		P		K		Ca		Mg	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	(kg/ha)									
Témoin	67,8b	68,1 b	8,7b	6,4 c	11,0b	9,2 c	0,16b	0,13 b	3,43b	2,52 c
NPKMg	122,6a	120,7 a	11,37ab	9,7 bc	15,8ab	13,4 bc	0,15b	0,10 b	4,78ab	3,85 bc
30 t/ha	129,6a	119,2 a	12,4ab	12,9 ab	17,2a	16,9 ab	0,17b	0,23 a	5,24ab	5,35 a
60t/ha	136,3a	121,8 a	14,8a	15,3 ab	18,7a	19,0 ab	0,17b	0,26 a	5,56a	5,79 a
90 t/ha	136,0a	136,4 a	15,9a	19,0 a	19,1a	22,4 a	0,25a	0,28 a	5,91a	5,54 a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	107,4a	125,2 a	9,6b	12,6 bc	13,8ab	17,1 ab	0,22ab	0,25 a	4,11ab	5,20 ab
60 t/ha + 1/2 NPKMg	114,5a	118,2 a	12,2ab	12,9 ab	16,8a	17,4 ab	0,28a	0,25 a	5,13ab	5,11 ab
PPDS	29,037	25,504	4,541	6,2123	5,5899	6,4391	0,0781	0,0591	1,9101	1,3957
	(mg/ha)									
	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Témoin	7,1b	11,9 bc	8,5b	14,9 a	68,6c	55,8 b	15,7b	11,6 b	72,1a	53,9 b
NPKMg	8,0b	5,6 c	12,5ab	13,8 a	101,5bc	107,0 ab	23,6ab	19,1 a	98,5a	89,9 ab
30 t/ha	6,9b	8,0 bc	12,1ab	13,0 a	193,7a	118,5 a	25,5a	24,6 a	112,6a	109,0 a
60t/ha	9,7b	20,5 a	18,5a	10,3 a	169,0ab	142,8 a	21,3ab	21,5 a	103,5a	107,0 ab
90 t/ha	14,4a	13,5 ab	17,5a	15,5 a	141abc	142,0 a	23,2ab	25,8 a	109,5a	127,7 a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	9,0b	9,1 bc	12,7ab	11,1 a	109abc	117,2 a	16,6b	23,7 a	92,3a	134,2 a
60 t/ha + 1/2 NPKMg	10,2b	11,8 bc	16,3a	10,5 a	126abc	125,9 a	22,8ab	22,0 a	110,2a	94,3 ab
PPDS	3,498	7,6762	6,7698	9,052	84,988	58,715	8,1097	7,4566	47,338	54,062

A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.
B : Application bisannuelle de biosolides en 1997 et 1999.

Tableau 19 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les prélèvements du soya en éléments nutritifs majeurs et mineurs (Loam limono-argileux).

Traitements	Prélèvements									
	N		P		K		Ca		Mg	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	(kg/ha)									
Témoin	39,8 c	36,2 b	13,0 b	10,7 b	15,1 b	12,4 b	1,49 b	1,09 bc	3,55 b	2,77 bc
NPKMg	54,4 abc	50,8 ab	14,4 b	13,03 ab	16,7 b	15,2 ab	1,61 ab	1,37 abc	3,81 ab	3,35 abc
20 t/ha	45,8 bc	48,0 ab	12,0 b	13,1 ab	14,7 b	15,2 ab	1,19 b	1,22 abc	3,25 b	3,46 abc
40t/ha	51,0 abc	40,1 b	14,9 ab	10,4 b	18,3 ab	11,7 b	1,45 b	0,85 c	4,01 ab	2,60 c
60 t/ha	56,0 ab	48,8 ab	17,2 ab	15,6 ab	21,5 ab	19,0 a	1,85 ab	1,60 ab	4,75 ab	4,28 ab
20 t/ha + 3/4 NPKMg	58,9 ab	62,6 a	14,7 ab	16,8 a	16,5 b	19,6 a	1,46 b	1,73 a	3,71 b	4,44 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	62,0 a	56,8 ab	20,1 a	15,9 ab	24,0 a	19,2 a	2,26 a	1,73 a	5,37 a	4,34 a
PPDS	15,931	21,006	5,3845	5,6625	7,1731	6,5227	0,7041	0,5242	1,6438	1,5707

	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	(mg/ha)									
Témoin	6,84 a	3,61 a	17,9 b	15,1 abc	258,8 ab	163,0 a	27,5 ab	18,89 a	144,7 ab	83,4 b
NPKMg	4,58 ab	4,64 a	20,4 ab	17,8 ab	227,5 ab	181,4 a	31,3 ab	25,7 a	112,9 b	94,7 ab
20 t/ha	2,81 b	4,43 a	18,4 b	10,7 bc	169,3 b	187,1 a	19,9 b	21,2 a	104,0 b	103,0 ab
40t/ha	3,57 b	3,98 a	22,7 ab	8,0 c	207,4 ab	167,4 a	27,3 ab	19,6 a	120,9 ab	72,0 b
60 t/ha	5,44 ab	5,99 a	29,0 a	17,4 ab	286,6 ab	254,3 a	40,2 ab	33,8 a	141,9 ab	118,7 ab
20 t/ha + 3/4 NPKMg	4,21 ab	5,30 a	15,9 b	16,3 ab	189,3 ab	222,7 a	28,8 ab	34,9 a	104,1 b	121,5 ab
40 t/ha + 1/2 NPKMg	6,87 a	5,77 a	28,5 a	20,7 a	317,4 a	228,5 a	46,7 a	33,4 a	208,3 a	144,6 a
PPDS	2,8007	3,0914	9,1708	8,0048	129,34	117,86	20,251	16,204	88,647	54,586

A : Application annuelle de biosolides en 1997 et 1998.

B : Application unique de biosolides en 1997.

Tableau 20 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments majeurs d'un loam limono-argileux sous précédent de maïs-maïs-maïs (Volet A).

Traitements	P		K		Ca		Mg	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
	(mg/kg)							
Témoin	130,80 ab	64,05 a	148,86 b	96,68 a	2408,7 a	1617,5 a	124,33 a	101,48 a
NPKMg	123,10 b	54,95 a	152,73 b	92,52 a	2118,3 a	1513,0 a	147,65 a	104,01 a
20 t/ha	139,73 ab	88,25 a	141,84 b	111,03 a	2875,4 a	1938,4 a	115,57 a	93,38 a
40t/ha	145,44 ab	76,02 a	162,10 ab	109,00 a	2539,3 a	1786,7 a	126,30 a	117,07 a
60 t/ha	152,90 a	77,16 a	172,73 ab	108,22 a	2642,1 a	1835,2 a	136,97 a	110,75 a
20 t/ha + 3/4 NPKMg	156,12 a	102,11 a	186,12 ab	120,85 a	2479,8 a	2156,8 a	144,70 a	108,59 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	147,67 ab	73,66 a	209,09 a	109,35 a	2223,5 a	1745,4 a	148,26 a	116,57 a
PPDS	29,072	64,058	48,999	59,344	884,55	1003,2	44,977	33,307

Volet A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 21 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments mineurs d'un loam limono-argileux sous précédent de maïs-maïs-maïs (Volet A).

Traitements	Al		B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
	(mg/kg)											
Témoin	1005,0 a	916,0 a	0,49 ab	0,10 b	4,54 a	4,43 a	355,3 ab	317,8 a	5,85 abc	3,37 ab	1,26 a	1,12 ab
NPKMg	1061,4 a	935,3 a	0,46 b	0,17 ab	4,55 a	4,52 a	336,5 b	335,7 a	5,38 bc	2,10 b	1,23 a	1,23 a
20 t/ha	949,9 a	862,5 a	0,53 ab	0,28 ab	4,34 a	3,88 a	385,4 a	382,6 a	6,63 ab	4,51 a	1,41 a	1,13 ab
40t/ha	1007,7 a	941,7 a	0,59 a	0,28 ab	4,62 a	4,26 a	364,8 ab	376,7 a	6,85 a	3,69 ab	1,63 a	1,09 ab
60 t/ha	1034,8 a	969,0 a	0,55 ab	0,25 ab	4,56 a	4,44 a	364,7 ab	372,3 a	7,08 a	3,41 ab	1,63 a	1,09 ab
20 t/ha + 3/4 NPKMg	1053,3 a	1016,9 a	0,51 ab	0,35 a	4,63 a	4,29 a	377,4 a	372,5 a	5,35 bc	3,23 ab	1,56 a	0,96 b
40 t/ha + 1/2 NPKMg	1066,1 a	943,2 a	0,45 b	0,28 ab	4,32 a	4,49 a	361,6 ab	376,2 a	5,16 c	2,83 ab	1,42 a	1,04 ab
PPDS	123,11	180,11	0,1241	0,1924	0,7759	0,7043	39,317	79,894	1,4241	1,8903	0,5625	0,263

Volet A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 22 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments mineurs d'un loam limono-argileux sous précédent de maïs-maïs-maïs (Volet A).

Traitements	Mo		Na		Ni		Cd		Cr		Co		Pb	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
(mg/kg)														
Témoin	0,51 a	0,43 b	12,22 ab	9,80 b	0,55 b	0,61 a	0,210 a	0,14 c	0,65 ab	0,76 a	0,113 a	0,107 ab	4,27 a	3,27 b
NPKMg	0,54 a	0,46 b	10,77 b	10,88 b	0,61 ab	0,70 a	0,203 a	0,15 bc	0,67 a	0,76 a	0,117 a	0,103 b	4,39 a	3,38 ab
30 t/ha	0,49 a	0,43 b	11,03 b	9,94 b	0,59 b	0,73 a	0,207 a	0,16 abc	0,64 ab	0,72 a	0,117 a	0,143 a	4,27 a	3,57 ab
60t/ha	0,49 a	0,47 ab	13,08 ab	11,31 ab	0,58 b	0,79 a	0,203 a	0,17 abc	0,60 b	0,79 a	0,097 a	0,127 ab	4,33 a	3,61 ab
90 t/ha	0,50 a	0,49 ab	16,32 a	13,65 a	0,56 b	0,81 a	0,197 a	0,17 abc	0,62 ab	0,79 a	0,093 a	0,120 ab	4,36 a	3,83 ab
30 t/ha + 3/4 NPKMg	0,53 a	0,54 a	10,61 b	11,49 ab	0,58 b	0,76 a	0,217 a	0,200 a	0,64 ab	0,77 a	0,093 a	0,120 ab	4,40 a	4,26 a
60 t/ha + 1/2 NPKMg	0,54 a	0,53 a	13,83 ab	12,34 ab	0,73 a	0,81 a	0,213 a	0,193 ab	0,67 a	0,83 a	0,113 a	0,137 ab	4,56 a	3,90 ab
PPDS	0,0657	0,744	4,2414	2,5926	0,1427	0,2396	0,0242	0,0407	0,0604	0,1493	0,0241	0,3680	0,5319	0,9801

Volet A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 23 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments majeurs d'un loam limoneux sous précédent de maïs-maïs-maïs (Volet A).

Traitements	P		K		Ca		Mg	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
(mg/kg)								
Témoin	59,48 bc	23,19 a	149,03 a	84,57 a	968,6 cd	956,6 a	114,11 a	284,47 a
NPKMg	80,95 a	18,90 a	159,49 a	83,54 a	965,1 d	1139,2 a	119,45 a	335,75 a
30 t/ha	50,31 c	14,07 a	137,47 a	90,19 a	1017,5 bcd	883,4 a	121,93 a	285,21 a
60t/ha	57,60 bc	21,86 a	133,11 a	70,69 a	1199,5 abc	1024,7 a	144,71 a	338,91 a
90 t/ha	67,03 abc	24,13 a	138,82 a	93,95 a	1279,8 a	969,0 a	131,33 a	255,93 a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	60,99 bc	22,90 a	168,61 a	99,49 a	1226,1 ab	1050,3 a	113,51 a	275,06 a
60 t/ha + 1/2 NPKMg	70,09 ab	27,54 a	169,73 a	105,74 a	1126,5 abcd	1051,7 a	122,61 a	310,87 a
PPDS	18,589	18,386	43,631	36,603	232,35	267,75	70,443	176,65

Volet A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 24 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments mineurs d'un loam limoneux sous précédent de maïs-maïs-maïs (Volet A).

Traitements	Al		B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
	(mg/kg)											
Témoin	1184,5 a	944,9 a	0,17 bcd	0,02 a	2,68 a	2,15 a	290,8 a	252,5 a	10,66 a	9,39 ab	2,75 b	1,61 ab
NPKMg	1212,0 a	891,0 a	0,17 bcd	0,02 a	1,91 b	2,19 a	274,4 a	234,4 a	18,18 a	8,71 ab	2,85 b	1,64 ab
30 t/ha	1052,7 a	893,4 a	0,02 d	0,02 a	2,73 a	2,09 a	290,5 a	216,2 a	13,33 a	13,37 ab	2,84 b	1,53 ab
60t/ha	1053,3 a	863,4 a	0,12 cd	0,12 a	2,76 a	2,09 a	299,6 a	234,2 a	14,37 a	19,46 a	3,34 ab	1,84 a
90 t/ha	1157,6 a	1025,5 a	0,26 bc	0,02 a	2,46 a	1,80 ab	274,0 a	221,8 a	14,03 a	12,26 ab	4,07 a	1,84 a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	1316,8 a	1202,9 a	0,50 a	0,02 a	2,55 a	1,56 b	253,9 a	215,1 a	13,75 a	6,71 b	2,96 b	1,38 b
60 t/ha + 1/2 NPKMg	1301,2 a	1100,3 a	0,37 ab	0,02 a	2,59 a	1,93 ab	262,7 a	248,6 a	17,25 a	11,79 ab	2,88 b	1,52 ab
PPDS	328,57	360,63	0,2179	0,1203	0,4305	0,4219	84,598	40,479	7,8677	11,067	1,0027	0,3202

Volet A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 25 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments mineurs d'un loam limono-argileux sous précédent de maïs-maïs-maïs (Volet A).

Traitements	Mo		Na		Ni		Cd		Cr		Co		Pb	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm						
	(mg/kg)													
Témoin	0,61 ab	0,47 b	14,16 c	26 b	0,55 a	0,43 b	0,2 bc	0,12 cd	0,30 a	0,34 ab	0,230 a	0,217 a	3,75 a	2,22 bc
NPKMg	0,61 ab	0,45 b	13,8 c	30 ab	0,53 a	0,44 b	0,2 bc	0,11 d	0,23 a	0,33 ab	0,275 a	0,165 a	3,70 a	2,09 c
30 t/ha	0,53 b	0,45 b	20 abc	35 ab	0,51 a	0,51 b	0,19 c	0,11 d	0,27 a	0,34 ab	0,230 a	0,250 a	3,49 a	2,15 bc
60t/ha	0,55 b	0,46 b	23,61 a	42 a	0,57 a	0,76 a	0,20 b	0,13bcd	0,29 a	0,41 a	0,230 a	0,320 a	3,65 a	2,23 bc
90 t/ha	0,60 ab	0,52 ab	22,4 ab	35,6 ab	0,54 a	0,50 b	0,223 a	0,13 ³ abc	0,27 a	0,32 b	0,223 a	0,243 a	3,90 a	2,63 ab
30 t/ha + 3/4 NPKMg	0,67 a	0,61 a	15,8 bc	28,2 ab	0,56 a	0,52 b	0,205 b	0,13 ⁵ ab	0,25 a	0,33 ab	0,215 a	0,170 a	4,00 a	2,82 a
60 t/ha + 1/2 NPKMg	0,62 ab	0,58 ab	15,7 bc	30,9 ab	0,55 a	0,58 ab	0,190 c	0,145 a	0,23 a	0,35 ab	0,250 a	0,295 a	3,70 a	2,85 a
PPDS	0,1152	0,1292	7,2512	16,106	0,1299	0,2118	0,0142	0,0199	0,0802	0,0804	0,1077	0,1781	0,5109	0,5178

Volet A : Application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 26 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments majeurs d'un loam limono-argileux sous précédent de soya-soya-orge (0-20 cm).

Traitements	P		K		Ca		Mg	
	A	B	A	B	A	B	A	B
(mg/kg)								
Témoin	93,56 ab	95,37 a	152,29 a	140,51 a	1813,33 ab	1924,33 a	126,27 a	139,22 a
NPKMg	87,18 b	98,52 a	133,54 a	142,96 a	1793,33 b	1938,67 a	137,99 a	139,71 a
20 t/ha	91,18 b	93,94 a	132,07 a	133,07 a	2111,00 ab	2024,33 a	119,06 a	125,20 a
40t/ha	93,60 ab	88,29 a	137,63 a	128,00 a	2223,67 a	2194,67 a	119,34 a	138,15 a
60 t/ha	86,80 b	83,65 a	136,42 a	114,14 a	2078,67 ab	1946,67 a	133,21 a	133,83 a
20 t/ha + 3/4 NPKMg	110,58 a	95,44 a	146,63 a	129,53 a	2101,33 ab	2059,33 a	131,55 a	130,61 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	99,16 ab	88,51 a	147,22 a	143,61 a	1925,00 ab	1890,00 a	142,65 a	143,67 a
PPDS	18,824	37,622	28,517	44,488	416,19	473,61	34,614	28,318

A : Application annuelle de biosolides en 1997 et 1998.
B : Application unique de biosolides en 1997.

Tableau 27 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments mineurs d'un loam limono-argileux sous précédent de soya-soya-orge (0-20 cm).

Traitements	Al		B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
(mg/kg)												
Témoin	901,8 ab	911,07 a	0,26 ab	0,31 a	2,23 c	2,42 c	263,7 b	297,1 ab	3,84 ab	3,38 b	0,89 ab	0,86 b
NPKMg	921,5 a	931,70 a	0,28 a	0,27 ab	2,58 abc	2,93 bc	277,8 ab	289,53 b	3,34 b	3,44 b	0,86 ab	0,90 b
20 t/ha	844,4 b	878,17 a	0,19 bc	0,18 bc	2,32 bc	2,49 c	282,7 ab	283,17 b	4,70 a	4,19 ab	0,92 ab	0,90 b
40t/ha	885,2 ab	895,50 a	0,26 ab	0,25 abc	2,43 abc	2,86 bc	282,4 ab	284,10 b	4,17 ab	4,91 a	0,81 b	0,91 b
60 t/ha	916,9 ab	893,37 a	0,22 abc	0,15 c	2,72 ab	3,12 b	276,8 ab	285,00 b	3,71 b	3,55 ab	0,99 ab	0,92 b
20 t/ha + 3/4 NPKMg	929,43 a	908,40 a	0,15 c	0,17 bc	2,70 ab	3,05 b	272,00 b	279,90 b	3,81 ab	4,07 ab	0,89 ab	0,98 b
40 t/ha + 1/2 NPKMg	897,9 ab	875,77 a	0,23 ab	0,21 abc	2,83 a	3,80 a	296,20 a	318,33 a	4,03 ab	4,39 ab	1,07 a	1,49 a
PPDS	72,666	98,738	0,0747	0,1074	0,4508	0,5475	21,055	25,477	0,9587	1,4746	0,2307	0,2378

A : Application annuelle de biosolides en 1997 et 1998.
B : Application unique de biosolides en 1997.

Tableau 28 : Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les teneurs en éléments mineurs d'un loam limono-argileux sous précédent de soya-soya-orge (0-20 cm).

Traitements	Mo		Na		Ni		Cd		Cr		Co		Pb	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
(mg/kg)														
Témoin	0,45 ab	0,47 ab	7,80 c	9,58 bcd	0,48 b	0,54 b	0,143 b	0,15 ab	0,48 ab	0,49 ab	0,080 b	0,087 a	2,87 bc	3,12 a
NPKMg	0,48 a	0,49 a	8,46 bc	8,93 cd	0,57 ab	0,64 a	0,160 a	0,16 a	0,53 a	0,54 a	0,100 a	0,087 a	3,14 a	3,32 a
20 t/ha	0,42 b	0,44 b	9,82 bc	8,17 d	0,48 b	0,54 b	0,140 b	0,14 b	0,44 b	0,44 b	0,090 ab	0,047 b	2,71 c	2,87 a
40t/ha	0,44 ab	0,46 ab	10,40 bc	10,2 abc	0,53 ab	0,54 b	0,150 ab	0,15 ab	0,47 ab	0,46 b	0,080 b	0,093 a	2,87 bc	3,03 a
60 t/ha	0,47 a	0,46 ab	13,73 a	11,64 a	0,51 ab	0,56 ab	0,150 ab	0,14 ab	0,46 ab	0,46 b	0,083 ab	0,083 a	2,93 abc	2,88 a
20 t/ha + 3/4 NPKMg	0,46 ab	0,45 ab	9,84 bc	9,38 cd	0,47 b	0,51 b	0,147 ab	0,14 ab	0,45 ab	0,45 b	0,060 c	0,070 ab	3,01 ab	2,91 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	0,47 a	0,46 ab	11,05 ab	11,43 ab	0,62 a	0,65 a	0,160 a	0,163 a	0,48 ab	0,48 ab	0,093 ab	0,093 a	3,19 a	3,08 a
PPDS	0,0421	0,0413	2,7934	1,9554	0,1144	0,0914	0,0152	0,0198	0,0821	0,0665	0,0199	0,0279	0,2612	0,5302

A : Application annuelle de biosolides en 1997 et 1998.
B : Application unique de biosolides en 1997.

Tableau 29. Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les concentrations de N-NH₄ et de N-NO₃ et sur le pH d'un loam limono-argileux sous précédent de maïs-maïs-maïs (volet A).

Traitements	N-NH ₄		N-NO ₃		pH	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
------(mg/kg)-----						
Témoin	1,21 a	0,69 ab	10,51 a	3,56 a	7,07 a	7,10 a
NPKMg	1,14 a	0,55 b	9,11 a	4,40 a	6,86 a	6,66 a
20 t/ha	1,03 a	0,62 ab	12,08 a	4,96 a	7,24 a	7,11 a
40 t/ha	1,15 a	0,78 a	17,88 a	4,79 a	7,09 a	7,05 a
60 t/ha	1,05 a	0,68 ab	19,53 a	5,80 a	7,07 a	6,88 a
20 t/ha + 3/4 NPKMg	0,94 a	0,64 ab	12,70 a	8,23 a	7,09 a	6,84 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	0,99 a	0,57 ab	13,16 a	10,26 a	6,87 a	6,77 a
PPDS	0,2989	0,2135	13,232	8,1652	0,4513	0,5495

Volet A : application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 31. Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les concentrations de N-NH₄ et de N-NO₃ et sur le pH d'un loam limono-argileux sous précédent de soya-soya-orge (0-20 cm).

Traitements	N-NH ₄		N-NO ₃		pH	
	A	B	A	B	A	B
	----- (mg/kg) -----				----- (%) -----	
Témoin	1,51 a	1,14 a	11,22 ab	9,73 a	6,79 b	6,86 a
NPKMg	0,99 a	1,05 a	8,53 b	10,99 a	6,85 ab	6,82 a
20 t/ha	1,27 a	1,10 a	12,77 a	11,40 a	7,06 a	7,05 a
40 t/ha	0,81 a	1,05 a	12,54 ab	11,85 a	7,05 a	7,05 a
60 t/ha	0,76 a	0,90 a	12,85 a	8,82 a	6,95 ab	6,96 a
20 t/ha + 3/4 NPKMg	0,74 a	0,79 a	11,77 ab	9,44 a	6,96 ab	7,01 a
40 t/ha + 1/2 NPKMg	0,77 a	0,78 a	11,04 ab	10,11 a	6,87 ab	6,87 a
PPDS	0,7856	0,6119	4,0401	4,3869	0,2178	0,2499

A : application annuelle de biosolides en 1997 et 1998.

B : application unique de biosolides en 1997.

Tableau 30. Effet d'apport de biosolides de papetières et d'engrais minéraux sur les concentrations de N-NH₄ et de N-NO₃ et sur le pH d'un loam limoneux sous précédent de maïs-maïs-maïs (volet A).

Traitements	N-NH ₄		N-NO ₃		pH	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
	----- (mg/kg) -----				----- (%) -----	
Témoin	0,88 bc	0,59 a	10,50 c	4,19 d	5,79 a	6,20 a
NPKMg	0,84 c	0,51 abc	20,08 bc	21,04 bc	5,49 a	6,00 a
30 t/ha	0,84 c	0,54 ab	20,41 bc	11,65 cd	5,84 a	6,22 a
60 t/ha	0,99 bc	0,52 abc	24,73 bc	15,85 bcd	5,82 a	6,19 a
90 t/ha	1,38 a	0,52 abc	24,39 bc	21,65 bc	5,79 a	6,08 a
30 t/ha + 3/4 NPKMg	1,17 ab	0,40 c	58,15 a	65,70 a	5,60 a	5,82 a
60 t/ha + 1/2 NPKMg	1,05 bc	0,44 bc	41,71 ab	30,53 ab	5,59 a	5,79 a
PPDS	0,3050	0,1429	27,543	14,771	0,3628	0,4998

Volet A : application annuelle de biosolides en 1997, 1998 et 1999.

Tableau 32a : Évaluation économique des applications de biosolides de papetières et de l'engrais minéral sur la culture de maïs-grain (1997).

Traitements	Prix intrants (\$/kg ou t)	Dose (t/ha ou kg/ha)	Prix X Dose (\$/ha)	Rendements (kg/ha)	Prix du marché (\$/kg)	Prix de la récolte (\$/ha)	Revenus bruts (\$/ha)	Gains réels (\$/ha)
Témoin	0	0	0	8218	0,16801	1380,71	1380,71	---
NPKMg N=180 Kg/ha (34-0-0)	0,464	180	83,52	9942	0,16801	1670,36	1491,5	110,8
P2O5=80 Kg/ha (0-46-0)	0,474	100	47,4					
K2O+Mg=100 Kg/ha (0-0-22- 11)	0,400	120	48,0					
20 T/ha boues	3*	20	60,00	9553	0,16801	1605,00	1545,00	164,29
40 T/ha boues	3	40	120,00	9607	0,16801	1614,07	1494,07	113,37
60 T/ha boues	3	60	180,00	9502	0,16801	1596,43	1416,43	35,72
20 T/ha boues + 75% NPKMg	3 + 75% NPKMg	20 + 75% NPKMg	194,2	9868	0,16801	1657,92	1463,7	83,0
40 T/ha boues + 50% NPKMg	3 + 50% NPKMg	40 + 50% NPKMg	209,5	11145	0,16801	1872,47	1663,0	282,3

* : coût forfaitaire d'épandage

Tableau 32b : Évaluation économique des applications de biosolides de papetières et de l'engrais minéral sur la culture de maïs-grain (1998).

Traitements	Prix Intransit (\$/kg ou t)	Dose (t/ha ou kg/ha)	Prix X Dose (\$/ha)	RDTs		Prix du marché (\$/Kg)	Prix de la récolte		Bénéfices		Gains réels	
				A	B		A	B	A	B	A	B
				(kg/ha)	(\$/kg)		(\$/ha)	(\$/ha)	(\$/ha)	(\$/ha)	(\$/ha)	(\$/ha)
Témoin	0	0	0	4582	4585	0,16293	746,55	747,03	746,55	747,03	---	---
NPKMg N=180 kg/ha (34-0-0)	0,429	180	157,94 77,22	8828	8710	0,16293	1438,35	1419,12	1280,41	1261,18	534	514
P2O5=80 kg/ha (0-46-0)	0,484	80	38,72									
K2O+Mg=100 kg/ha (0-0-22-11)	0,420	100	42,00									
20 t/ha boues	3*	20	60,00	6465	6364	0,16293	1053,34	1036,89	993,34	976,89	247	230
40 t/ha boues	3	40	120,00	7456	7614	0,16293	1214,81	1240,55	1094,81	1120,55	348	374
60 t/ha boues	3	60	180,00	9078	7920	0,16293	1479,08	1290,41	1299,08	1110,41	553	363
20 t/ha boues + 75 % NPKMg	3 + 75% NPKMg	20 + 75% NPKMg	178,46	9448	7435	0,16293	1539,36	1211,38	1360,91	1032,93	614	286
40 t/ha boues + 50 % NPKMg	3 + 50% NPKMg	40 + 50% NPKMg	198,97	9310	7457	0,16293	1516,88	1214,97	1317,91	1016,00	571	269

* : coût forfaitaire d'épandage

A = Parcelles ayant reçu annuellement des résidus mixtes.

B = Parcelles n'ayant pas reçu de résidus mixtes en 1998.

Tableau 32c : Évaluation économique des applications de biosolides de papetières et de l'engrais minéral sur la culture de maïs-grain (1999).

Traitements	Prix intrants (\$/kg ou t)	Dose (t/ha ou kg/ha)	Prix X Dose (\$/ha)	Rendements		Prix du marché (\$/Kg)	Prix de la récolte		Revenus bruts		Gains réels	
				A	B		A	B	A	B	A	B
				(kg/ha)	(\$/kg)		(\$/ha)	(\$/ha)	(\$/ha)	(\$/ha)	(\$/ha)	(\$/ha)
Témoin	0	0	0	3939	3896	0,152	598,73	592,19	598,73	592,19	---	---
NPKMg N=180 Kg/ha (34-0-0)			164,62	8067	8608	0,152	1226,18	1308,42	1061,56	1143,80	463	552
P2O5=80 Kg/ha (0-46-0)	0,428	180	77,04									
K2O+Mg=100 Kg/ha (0-0-22-11)	0,526	80	42,08									
	0,455	100	45,50									
20 T/ha boues	3*	20	60,00	6005	5642	0,152	912,76	857,58	852,76	797,58	254	205
40 T/ha boues	3	40	120,00	7432	6868	0,152	1129,66	1043,94	1009,66	923,94	411	332
60 T/ha boues	3	60	180,00	7857	7091	0,152	1194,26	1077,83	1014,26	897,83	416	306
20 T/ha boues + 75% NPKMg	3 + 75% NPKMg	20 + 75% NPKMg	183,47	8600	8446	0,152	1307,20	1283,79	1123,74	1100,33	525	508
40 T/ha boues + 50% NPKMg	3 + 50% NPKMg	40 + 50% NPKMg	202,31	8305	7934	0,152	1262,36	1205,97	1060,05	1003,66	461	411

* : coût forfaitaire d'épandage

A = Parcelles ayant reçu annuellement des résidus mixtes.

B = Parcelles ayant reçu des résidus mixtes en 1997 et 1999 (effet résiduel en 1998).

Tableau 33. Effets d'applications de biosolides de papetières sur le nombre de micro-organismes pathogènes

Traitements	Série de sol	Coliformes totaux (ufc/100 ml)	Coliformes fécaux (ufc/100 ml)	E. coli (ufc/100 ml)
Fertilisation NPKMg 60t/ha	Baudette-1997	1 300	< 10	n/d
Fertilisation NPKMg 60t/ha	Baudette-1997	2 500	440	n/d
Fertilisation NPKMg 60t/ha	Nicolet-1997	130 000	3 200	n/d
Fertilisation NPKMg 60t/ha	Nicolet-1997	1 800	10	n/d
Fertilisation NPKMg 20t/ha +NPKMg 60t/ha	Nicolet-1997	180	< 10	n/d
Fertilisation NPKMg 40t/ha+NPKMg 60t/ha	Nicolet-1998	> 8 000	5 400	2 400
Fertilisation NPKMg 40t/ha+NPKMg 60t/ha	Nicolet-1998	> 8 000	10	< 10
Engrais rés. Amendement rés.	Baudette-1998	750 000	50	20
Engrais rés. 60t/ha	Baudette-1998	160	< 10	< 10
Engrais rés. 60t/ha	Nicolet-1999	250 000	40	20
Engrais rés. 60t/ha	Nicolet-1999	190 000	20	< 10
Engrais 60t/ha	Baudette-1999	260 000	40 000	n/d
Engrais 60t/ha	Baudette-1999	600	40	n/d

- Bibliographie -

- 1- **Huard, S. 1997.** Quantités de boues mixtes produites par des usines de papetières de la Mauricie. Communication personnelle.
- 2- **Pèlerin, J.L. 1997.** Politiques environnementales des usines de papiers d'Abitibi Consolidated inc. Communiqué de presse et Conférence- Journées champêtre sur un projet de conservation des sols par l'application de biosolides de papetières (9 et 11 juillet 1997)
- 3- **Angers, D.A., A. N'Dayegamiye and D.Côté. 1993.** Tillage-induced differences in organic matter of particle size fractions and microbial biomass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 512-516.
- 4- **N'Dayegamiye, A. et Armand Dubé. 1986.** L'effet de l'incorporation de matières ligneuses sur l'évolution des propriétés chimiques du sol et sur la croissance des plantes. *Can. J. Soil Sci.* 66 : 623-631.
- 5- **Beauchemin, S, A. N'Dayegamiye et M.R. Laverdière 1990.** Effets d'apport d'amendements ligneux frais et préhumifiés sur la production de pomme de terre et la disponibilité de l'azote en sol sableux. *Can. J. Soil Sci.* 70 : 555-564.
- 6- **N'Dayegamiye, A. et D.A. Angers 1990.** Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés physiques et biologiques d'un loam limoneux Neubois sous culture de maïs. *Can. J. Soil Sci.* 70 : 259-262.
- 7- **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.
- 8- **N'Dayegamiye, A. and D.A. Angers 1992.** Organic matter characteristics and water-stable aggregation of a sandy loam soil after 9 years of wood-residue applications. *Can. J. Soil Sci.* 73 : 115-122.
- 9a- **N'Dayegamiye, A. et T.S. Tran 2000.** Effects of green manures on some soil properties, on wheat yields and N nutrition. *Can. J. Soil Science* (sous presse).
- 9b- **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 Science* 80 : 81-89
- 10- **Beauchamp, C. 1998.** La valorisation agricole des résidus papetiers. Le cas de Daishowa inc. Document de synthèse (1992-1998).
- 11- **Estevez, B., A. N'Dayegamiye and D. Coderre. 1996.** The effect on earthworm abundance and selected soil properties after 14 years of soil cattle manure and NPKMg fertilizer application. *Can. J. Soil Sci.* 76 : 351-355.

- 12- **Hébert, M. 1998.** Critères environnementaux pour la valorisation des biosolides et autres matières résiduelles fertilisantes, dans Colloque sur l'utilisation agricole de résidus de papetières. Shawinigan, septembre 1998.
- 13- **N'Dayegamiye, A. 1996.** Response of silage corn and wheat to dairy manure and fertilizers in long-term fertilized and manured trials. Can.J. Soil Science. 76: 357-363.
- 14- **N'Dayegamiye, A, S. Huard et Thibault 1998.** Valorisation agricole de résidus mixtes de papetières dans les cultures de maïs-grain et de soya, dans Colloque sur l'utilisation agricole de résidus de papetières. Shawinigan, septembre 1998.
- 14- **Simard, S. 1998.** Valorisation des résidus de papetières dans les cultures fourragères et horticoles., dans Colloque sur l'utilisation agricole de résidus de papetiers. Shawinigan, septembre 1998.

Remerciements

Les auteurs remercient principalement la Compagnie **Abitibi Consolidated inc.** ainsi que les **Partenaires financiers de l'IRDA**, qui ont contribué au financement de cette présente recherche. Les auteurs remercient également M. **Marc Laverdière** (Ph.D.) pour les analyses physiques du sol nécessaires dans ce projet, ainsi que pour la lecture de différentes versions du rapport. De vifs remerciements sont enfin adressés à M. **Marcel Giroux** (M.Sc.) pour la lecture attentive du rapport final et pour ses suggestions très constructives.

Membres fondateurs de l'IRDA

L'institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) a été créé suite à la Conférence sur l'agriculture et l'agroalimentaire québécois tenue en mars 1998 à Saint-Hyacinthe.

Ses membres fondateurs sont :

