

IMPACTS DES RÉGIES AGRICOLES SUR LA SÉQUESTRATION DU CARBONE ET DE L'AZOTE DANS LES SOLS POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE (CO₂, N₂O)



Adrien N'Dayegamiye¹ et Anne Vanasse²

¹ Institut de recherche et développement en Agroenvironnement, 2700 Einstein, Sainte-Foy, Québec, Canada G1P 3W8;

² Département de Phytologie, Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4

La contribution de l'agriculture à l'émission de gaz à effets de serre (GES) ne représente que seulement 10 % des émanations totales générées par les divers secteurs de l'économie québécoise. Toutefois, diverses mesures ont été prises afin de réduire les pertes de carbone et d'azote vers l'atmosphère, sous forme de CO₂ et de N₂O. Les pertes de carbone en agriculture sont souvent associées au travail intensif de sol qui déstabilise la structure, ce qui a pour effet d'accroître la minéralisation de la matière organique et les émissions de CO₂ au niveau du sol. Les pertes d'azote se manifestent principalement par la dénitrification et le dégagement de N₂O, phénomène répandu dans les sols soumis au compactage qui présentent souvent une faible aération et un mauvais drainage. Les sols cultivés en maïs, pomme de

terre et cultures maraîchères sont soumis à un nombre plus important de passages de machineries que les sols sous céréales et prairies. Dans de tels systèmes agricoles, un choix approprié de rotations de cultures pourra contribuer à diminuer l'intensité et la fréquence du travail de sol, réduisant ainsi les taux de décomposition du carbone organique des sols et les niveaux de compactage. Une synthèse de résultats provenant des essais de longue durée sur les rotations et les modes de fertilisation (engrais minéraux et fumier) est présentée dans cette analyse. Il a été démontré que dans des rotations déficientes en résidus organiques retournés au sol, les apports réguliers de fumier à la dose annuelle de 20t/ha sur base humide, permettraient d'accroître ou préserver les réserves de carbone et d'azote dans le sol entier

et dans les différents macro-agrégats de sol (0,25 mm - 6 mm de diamètre). Les apports de fumier ont également augmenté les tailles d'agréats de sol stables à l'eau, qui de cette façon résistent mieux aux impacts des gouttes de pluie (battance) et aux effets du travail intensif du sol. L'agrégation du sol réduit le compactage des sols et, par conséquent, diminue les phénomènes de dénitrification et de volatilisation de l'azote des engrais ou du sol. Cette recherche de longue durée a démontré que l'agrégation du sol permet de protéger le carbone et l'azote du sol contre la décomposition rapide par les micro-organismes, ce qui peut ainsi accroître la séquestration du carbone dans les sols et réduire les émanations de CO₂ et de N₂O dans l'air.



1. PROBLÉMATIQUE

La Convention cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) constitue le résultat de l'effort au niveau planétaire en vue de réduire les quantités de gaz à effet de serre (GES) qui peuvent conduire aux changements climatiques. Dans le cadre de l'Accord de Kyoto, qui vise à stabiliser les émissions de GES, le Canada s'est engagé à réduire ses émissions entre 2008-2012 à un niveau de 6 % inférieur à celui de 1990, ce qui représente une diminution d'environ 240×10^6 tonnes.

Les principaux gaz à effet de serre sont le méthane (CH_4), le dioxyde de C (CO_2) et le protoxyde d'azote (N_2O). Les émissions de GES sont exprimées sous forme

d'équivalent CO_2 (EQ- CO_2). Au Québec, en 1990, le méthane représentait près de 37 % des émissions avec 3460 Gg d'Eq- CO_2 , le protoxyde d'azote représentait 61 % avec 2973 Gg d'Eq- CO_2 et enfin 2 % pour le dioxyde de C avec 165 Gg d'Eq- CO_2 . (1 Gg = 1 gigagramme = 1 milliard de grammes = 1000 tonnes).

On estime que le secteur agricole serait responsable d'environ 9,5 % des émissions totales de GES (CH_4 , N_2O et CO_2). La principale source de méthane viendrait de l'industrie de l'élevage et de la fermentation des fumiers. Par ailleurs, les sols cultivés sont la principale source de N_2O , par les processus de dénitrification et de volatilisation de l'azote à partir de la matière organique, des engrais azotés et des fumiers.

La matière organique (M.O.) des sols constitue le réservoir le plus important de carbone de l'écosystème terrestre et a donc un impact significatif sur la régulation des émissions des GES vers l'atmosphère. Son oxydation, suite à la mise en culture des sols vierges ou sous prairies permanentes, libère des quantités importantes de carbone vers l'atmosphère sous forme de CO_2 . Ce phénomène est souvent attribué au travail intensif, qui en aérant le sol, accélérerait l'oxydation de la M.O. Toutefois, les sols peuvent se réapproprier ce carbone et ainsi inverser ce processus. Cette capacité des sols d'accumuler ou séquestrer le carbone organique dépend en partie du climat, des types de sol, des régions agricoles et des pratiques culturales utilisées.

Il a été démontré que le travail de sol affecte non seulement le nombre de micro-organismes, mais également la composition et la distribution des populations dans le sol (Doran, 1980); il accroît aussi l'activité des ammonificateurs et des nitrificateurs, conduisant à une intense nitrification dans le sol. On

remarque ainsi que le travail de sol joue un rôle important dans la fertilité du sol, en favorisant une meilleure décomposition de la matière organique, ainsi qu'une plus grande disponibilité de l'azote aux plantes.

Le travail de sol influence aussi la dynamique de la structure des sols. Le travail intensif de sol a tendance à détruire les agrégats, exposant ainsi le C et le N initialement protégés à l'intérieur de ces particules, à la décomposition microbienne ou à des pertes par érosion. En détruisant la structure du sol, le travail intensif favorise également le compactage, ce qui crée des conditions anaérobies dans le sol, conduisant aux pertes de N par dénitrification.

Il existe actuellement au Québec un effort vers la diversification des cultures par le biais des rotations, ce qui peut réduire la fréquence du travail du sol et l'oxydation de la matière organique du sol. De plus, il existe des cultures qui peuvent absorber plus de carbone en provenance de l'atmosphère, carbone qui sera par la suite retourné au sol sous forme de résidus organiques. Enfin, un nombre important d'entreprises agricoles ont adopté le travail réduit ou minimal de sol, ou encore alternent périodiquement le labour profond avec charrues à versoirs et le travail superficiel avec chisel en fonction des cultures implantées. De même, on observe un certain accroissement des superficies en semis-direct, ce qui constitue la pratique la moins susceptible de provoquer une minéralisation accélérée de la matière organique du sol.

Le présent rapport constitue une synthèse sur les effets des apports prolongés d'engrais minéraux NPK et du fumier solide de bovins sur les réserves en carbone et en azote des sols agricoles. De même, nous examinerons l'influence de ces régions agricoles sur la formation et la stabilité des macro-agrégats de sol, ainsi

que l'inclusion du carbone et de l'azote dans ces divers agrégats.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Essais

Les données présentées dans cette synthèse proviennent des essais de longue durée débutés en 1977 et portant sur les apports annuels de l'engrais minéral et du fumier solide de bovins. Ces essais sont situés sur un loam limoneux de la série Le Bras, à la Station de recherche de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon. Les traitements sont disposés en split-plot (parcelles partagées) et comportent deux doses de fumier solide de bovins (0, 20 Mg ha⁻¹) en parcelles principales et différentes fumures minérales (0, PK, NP, NK, NPK et NPKMg) en parcelles secondaires. Ces fumures sont intégrées dans une rotation de quatre ans : maïs fourrager-maïs fourrager-orge-blé. La paille des céréales est enlevée après les récoltes.

Les résultats présentés portent sur des échantillonnages de sol effectués en 1997. La plupart des données ont été publiées dans la Revue Canadienne de Science du sol (N'Dayegamiye *et al.*, 1997; Aoyama *et al.*, 1999).

2.2 Méthodologie analytique

La répartition et le DMP (diamètre moyen pondéré) des agrégats stables à l'eau ont été déterminés par tamisage humide d'un échantillon de sol frais déposé sur une série de tamis de mailles décroissantes : 5 mm, 2 mm, 1 mm et 0,25 mm. Les agrégats récupérés sur chaque tamis ont été ensuite séchés à 60 °C pendant 24 heures, permettant ainsi de calculer le DMP (Kemper et Roseneau, 1986). Les poids d'agrégats utilisés pour calculer le DMP ont été corrigés selon la présence des sables (Elliott, 1986). Le DMP des agrégats stables à l'eau était calculé selon la formule suivante :

$$DMP = (\sum X_i S_i / W)$$

où X_i est le poids du sol restant sur le

tamis de taille donnée, S_i le poids du sol corrigé selon la présence des sables, et W le poids total du sol utilisé moins le poids total des sables (Haynes et Beare, 1997).

Les échantillons du sol entier et des différentes fractions d'agrégats > 5 mm, 2 - 5 mm et < 0,25 - 2 mm ont été séchés à la température de laboratoire pendant 72 h et ensuite broyés à un tamis de 0,25 mm. Les fractions de la MO du sol (fraction légère, fraction dense humifiée) ont été séparées à partir d'une extraction avec une solution de NaI ayant une densité de 1,53 g·cm⁻³ (N'Dayegamiye *et al.*, 1997). Les teneurs en C et N du sol entier, des fractions de la M.O. (dense et légère) et des agrégats ont été extraites respectivement selon les techniques Walkley-Black (Allison, 1965) et par digestion Kjeldahl (Bremner and Mulvaney, 1982).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 La dynamique du carbone et de l'azote dans le sol.

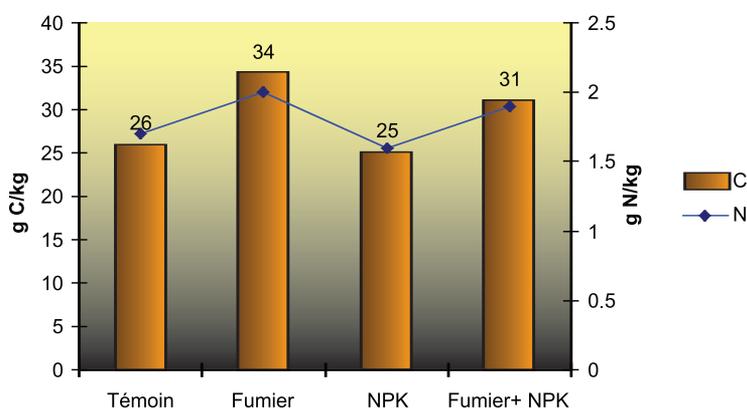
Les teneurs initiales du sol en carbone étaient en 1977 de 28 g C/kg de sol (2,8 %). La mise en place de la rotation maïs fourrager-maïs fourrager-orge-blé sur un

sol initialement sous prairie, s'est traduite, après vingt ans (1977-1997), par une diminution de 7,1 % de la teneur initiale en carbone organique dans le témoin (sans fertilisation minérale ou organique) pour atteindre 10,7 % dans le sol ayant reçu une fertilisation complète en N, P et K (Figure 1). Par contre, les applications annuelles de fumier à raison de 20 t/ha sur base humide ont accru les niveaux de carbone de 21,4 % et 10,7 % respectivement, dans les traitements avec fumier seul et avec fumier complété d'engrais minéral. Les effets d'apports d'engrais minéral et du fumier sur l'enrichissement en azote du sol ont été similaires à ceux observés pour le carbone. De façon générale, l'apport annuel de fumier a enrichi le sol en azote total.

Dans le type de sol étudié qui présente une texture limono-argileuse, on peut considérer que le taux de minéralisation nette de carbone est faible dans le témoin, à cause d'une baisse de productivité dans ce sol après vingt ans de culture, sans apports d'engrais minéraux ou de fumier. Par contre, la fumure minérale NPK a augmenté le rythme de minéralisation de carbone. Même si la fumure minérale a permis d'accroître les rendements pour les cultures de la rotation, aucune accumu-

FIGURE 1

FIGURE 1. EFFET DE FUMIER DE BOVINS ET D'ENGRAIS MINÉRAUX SUR LE CONTENU EN C ET N DU SOL ENTIER (g/kg) (LE NIVEAU INITIAL DE C EN 1977 ÉTAIT DE 28 g C/kg).



lation de carbone reliée aux retours de résidus de récoltes (racines) n'a été observée, le maïs fourrager laissant peu de résidus de récolte et la paille des céréales ayant été ramassée en fin de saison.

La baisse de carbone mesurée dans ce sol fertilisé à long terme, peut être attribuable à la stimulation de la microflore suite aux apports d'engrais minéraux, et par conséquent à la minéralisation accrue de carbone. De plus, cette baisse de carbone peut résulter de l'effet cumulatif du travail intensif de sol généralement effectué de 1977 à 1992 (labour d'automne, deux hersages printaniers suivis de un ou deux sarclages mécaniques) sur la décomposition de la M.O. du sol. Ces résultats montrent que la fertilisation minérale prolongée, sans retours importants de résidus organiques ou sans ajouts de

fumiers ou d'autres amendements organiques, peut diminuer les teneurs du sol en M.O. stable. Il ressort que le fumier solide de bovins, apporté annuellement à une dose de 20 t/ha sur base humide, se traduit par des effets bénéfiques au niveau des bilans du carbone et de l'azote du sol. En effet, N'Dayegamiye et Angers (1990) ont estimé que chaque tonne de fumier solide de bovins (apportée sur base fraîche) pouvait accroître le niveau de matière organique du sol de 0,026 %.

Les quantités de fumier apportées pendant vingt ans s'élèvent à 400 t/ha sur base humide. En considérant des valeurs moyennes de 30 % pour la matière sèche et de 42 % pour les concentrations en C des fumiers, les quantités totales de C apportées au sol s'élèvent à 50,4 t C/ha. Les apports de fumier ont accru de 8 g

C/kg de sol les teneurs en carbone organique du sol (Figure 1), et cette accumulation de C représente 19 t C/ha (8 g C x masse de sol sur 17 cm de la couche arable x superficie de 1 ha x 1,4 la densité du sol). Ces données indiquent des coefficients isohumiques de 0,38 (19 t C/ha de gain/sur 50,4 t C/ha de C apporté par les fumiers pendant vingt ans), ce qui signifie que 38 % des quantités de C apportées se sont transformées en humus stable dans le sol.

Les apports de fumier solide de bovins ont accru de façon significative les teneurs en C des fractions légère et dense de la M.O. (Figure 2) (N'Dayegamiye *et al.*, 1997); la fraction dense référant à la fraction humifiée ou plus stable de la M.O., indiquée aussi par le coefficient isohumique. La fertilisation minérale a

Instruments d'analyse et d'échantillonnage eau - air - sol

DAVISE
Stations météo

Thermo Orion
pH mètres, conductimètres, titrateurs,
oxymètres et colorimètres

HORIBA
Systèmes portatifs multi-paramètres
d'analyse de l'eau



Bouteilles
d'échantillonnage
d'eau et bennes

DEXSIL
Ensemble de détection des
hydrocarbures dans les sols

waterra
Bailers, pompes et filtres pour
eaux sous-terraines

Manning
ENVIRONMENTAL INC.
Échantillonneurs portatifs /
permanents pour eaux usées



pH mètres, oxymètres
et systèmes multi-
paramètres de l'eau

Également fier distributeur des
grandes marques suivantes

LaMotte
Solinst

HANNA
instruments

Global Water
INSTRUMENTATION, INC.



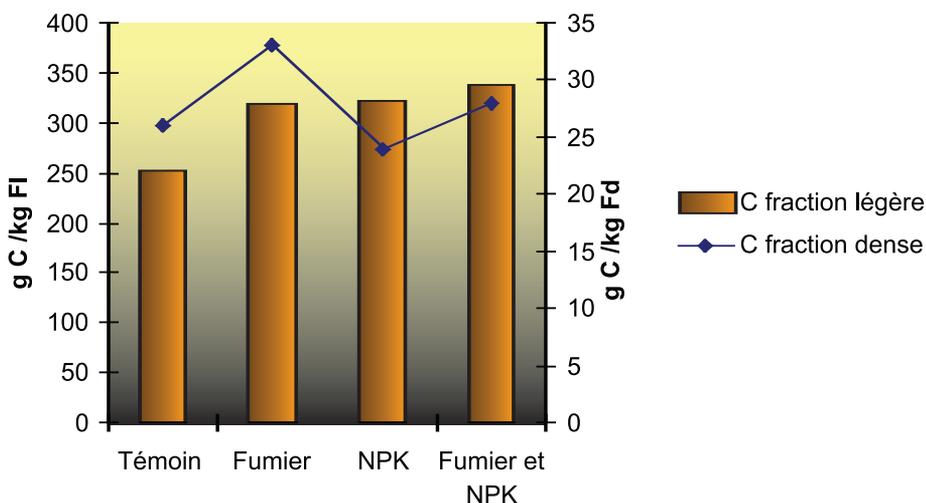
GENEQ inc.
1-800-463-4363
info@geneq.com

Catalogue internet montrant tous ces produits à
www.geneq.com

Pour trouver tous ces produits, il n'y a qu'une source, un site, une force ; GENEQ

FIGURE 2

EFFETS DE FUMIER DE BOVINS ET D'ENGRAIS MINÉRAUX SUR LES TENEURS EN CARBONE DES FRACTIONS DENSIMÉTRIQUES DE LA MATIÈRE ORGANIQUE (0-10 cm).



également augmenté les teneurs en C de la fraction légère de la M.O., mais pas par celles de la fraction stable de la M.O.

3.2 La structure protège le carbone et l'azote du sol

Le mode de fertilisation minérale et organique a influencé également la dynamique de la structure, et l'inclusion ou accumulation du carbone et de l'azote dans les agrégats de sol. Dans la rotation maïs fourrager-céréales, la fertilisation minérale NPK pendant 20 ans (1977-1997) n'a pas augmenté les tailles de macro-agrégats du sol stables à l'eau (< 0,25 mm - 6 mm), en comparaison avec le témoin sans apports d'engrais minéraux ou de fumier (Figures 3 et 4).

Par contre, les apports annuels de fumier de bovins, seul ou complété d'engrais minéraux, ont significativement augmenté la proportion d'agrégats de 5 - 8 mm (N'Dayegamiye *et al.*, 1997). Ces macro-agrégats représentent 34 % dans les sols ayant reçu le fumier (Figures 3 et 4), comparativement au sol témoin et au sol fertilisé avec les doses d'engrais NPK

recommandées pour les cultures (21,4 à 23,6 % respectivement). La proportion de macro-agrégats (> 0,25 mm), qui constituent un indice pour une bonne structure des sols, est plus élevée dans les sols ayant reçu le fumier solide de bovins (86 %), en comparaison avec 74 % en moyenne pour le sol témoin et celui qui a été fertilisé avec NPK. De façon générale, la fertilisation minérale NPK a diminué la proportion de macro-agrégats de sol, en comparaison avec les apports de fumier.

Les données présentées dans les figures 3

et 4 indiquent que les apports de fumier ont augmenté les proportions des macro-agrégats de diamètres 2-5 mm et 5-8 mm, en réduisant celles des agrégats de dimensions inférieures (0,25 mm - 2 mm). Suivant la schématisation du processus de structuration des sols donnée par Tisdall et Oades (1982), la structure de base pour la formation des agrégats est constituée par les micro-agrégats : particules de sols-métaux-complexes humiques. Ces micro-agrégats inférieurs à 0,25 mm en diamètre représentent en moyenne entre 40 et 60 % des agrégats du sol et ne sont pas rapidement affectés par les pratiques culturales. Cependant, une proportion plus élevée de micro-agrégats dans le sol est un signe d'un sol dégradé, sujet à la compaction et présentant de mauvaises conditions de croissance pour les plantes. Par contre, l'augmentation de macro-agrégats (> 0,25 mm) qui résultent d'un assemblage de micro-agrégats par les agents liants, tels les polysaccharides et les substances humiques, est le reflet d'un sol amélioré par de bonnes régies agricoles (travail optimal du sol, rotations et apports de fumiers ou autres amendements organiques).

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent que les apports de fumier ont favorisé la formation de la structure du sol étudié. En effet, une grande partie du carbone minéralisable du fumier a stimulé

FIGURE 3

EFFET DE LA FUMURE MINÉRALE SUR LA DISTRIBUTION DES AGRÉGATS DU SOL

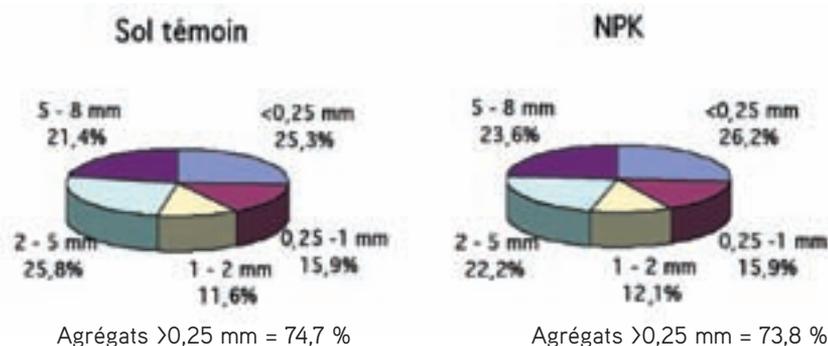
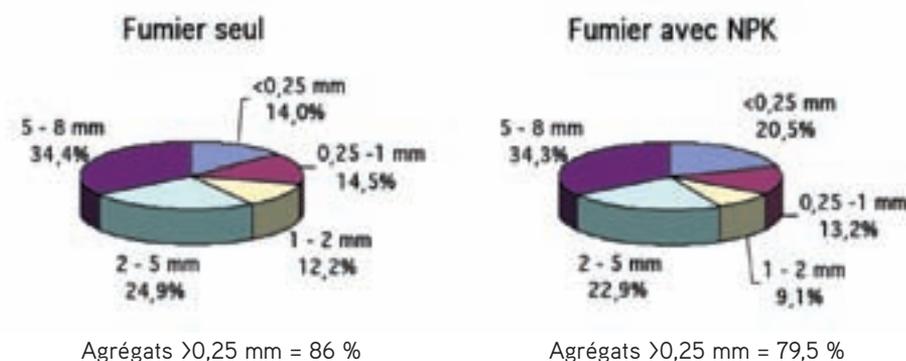


FIGURE 4**EFFET DU FUMIER DE BOVINS SUR LA DISTRIBUTION DES AGRÉGATS DU SOL**

la microflore du sol, celle-ci jouant un rôle important dans les processus d'agrégation ou de formation de la structure grâce aux filaments des champignons, mais aussi grâce à leurs produits métaboliques (polysaccharides). Les apports de fumier ont également enrichi le sol en substances humiques, tel que démontré par les niveaux élevés de carbone dans la fraction dense de la matière organique du sol (Figure 2). Les substances humiques forment et stabilisent la structure des sols. Plusieurs études effectuées dans le cadre de ces essais (Angers et N'Dayegamiye, 1991; N'Dayegamiye *et al.*, 1997; Estevez *et al.*, 1996; Aoyama *et al.*, 1999;) ont démontré que l'apport de fumier solide de bovins a augmenté le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau.

L'apport de fumier de bovins a également enrichi en carbone et en azote tous les agrégats du sol, contrairement à la fumure minérale (Figures 5 et 6) (N'Dayegamiye *et al.* 1997). Dans le cadre de ces essais, il a également été observé que le bris mécanique des agrégats par le travail de sol, favorisait la décomposition de la M.O. généralement protégée entre les agrégats (Aoyama *et al.*, 1999). Mais ces auteurs ont également mis en évidence que les taux de pertes de carbone étaient plus faibles dans les sols ayant reçu le fumier solide de

bovins pendant une longue période. La quantité de substances humiques formée a ainsi pu jouer un rôle important dans la protection des agrégats.

La matière organique localisée entre et dans les macro-agrégats est généralement protégée contre la minéralisation microbienne, et seulement un travail intensif de sol peut conduire rapidement à son exposition aux micro-organismes. La décomposition des matières organiques entre les agrégats peut être plus lente lorsqu'il s'agit de substances humiques récalcitrantes à la décomposition. En

raison de leur lien avec les colloïdes du sol (Aita, 1997), les substances humiques entre les agrégats sont lentement décomposées par les micro-organismes.

Plusieurs études (Simard et N'Dayegamiye, 1993; Sbih *et al.*, 2003) ont démontré que les particules fines des sols argileux du Québec assuraient une excellente protection du carbone et de l'azote présents, contre la décomposition microbienne. Dans ces sols, il a été observé que ces éléments se minéralisaient moins rapidement que dans les sols sablonneux. Dans ses travaux récents, Angers (1998) concluait que le Québec dispose d'un nombre important de sols qui peuvent à la fois protéger et accumuler le carbone. Le pouvoir de stockage du carbone et de l'azote est ainsi plus élevé dans les sols de texture fine (les sols argileux), comparativement à ceux de texture grossière (les sols sablonneux). De même, plusieurs études ont démontré que les sols argileux ou limono-argileux avaient accumulé plus de carbone et d'azote suite aux apports fréquents de fumiers que les sols sablonneux (N'Dayegamiye *et al.*, 1997; Aoyama *et al.*, 2000).

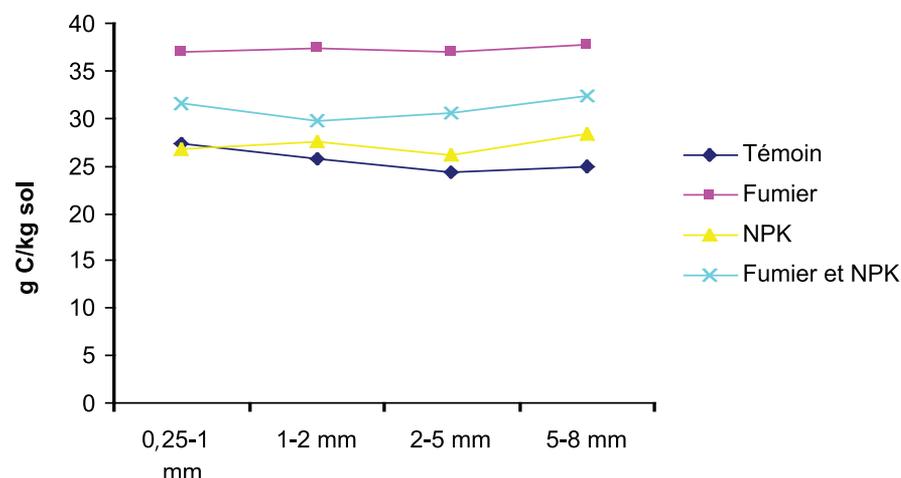
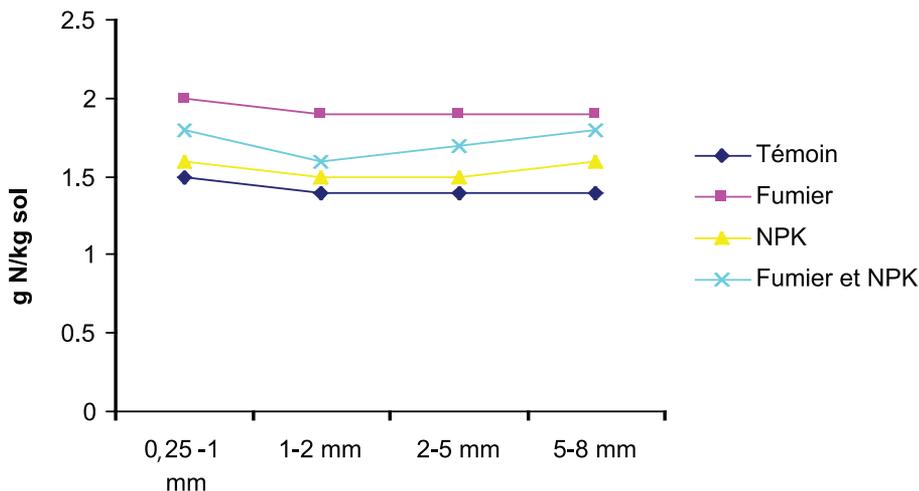
FIGURE 5**INFLUENCE DES ENGRAIS MINÉRAUX ET DU FUMIER SOLIDE DE BOVINS SUR L'ENRICHISSEMENT EN CARBONE DES DIVERSES TAILLES D'AGRÉGATS DU SOL.**

FIGURE 6**INFLUENCE DES ENGRAIS MINÉRAUX ET DU FUMIER SOLIDE DE BOVINS SUR L'ENRICHISSEMENT EN AZOTE DES DIVERSES TAILLES D'AGRÉGATS DU SOL.****4. CONCLUSION**

Les données obtenues dans ces essais de longue durée indiquent que les modes de fertilisation minérale ou organique influencent de façon différente la dynamique de la structure des sols et le niveau de protection du carbone et de l'azote de la matière organique et des agrégats du sol. L'accumulation du carbone dans les sols se réaliserait principalement à partir des résidus de récolte ou des amendements organiques tels les fumiers, maintenus ou apportés aux sols. Un choix judicieux de cultures de rotation permettra ainsi de capter le carbone de l'atmosphère et de le retourner au sol sous forme de résidus de récolte et ainsi de l'y accumuler. Il ressort que de bons systèmes de rotations de cultures, intégrés à des modes optimaux de travail du sol, constituent des meilleurs outils en vue de séquestrer le carbone et l'azote dans les agrégats des sols. Dans des sols ayant des rotations déficientes en résidus organiques retournés au sol, il est recommandé d'apporter régulièrement des amendements organiques, afin de stabiliser la structure qui protège par conséquent le carbone contre la

décomposition rapide. En améliorant la structure et en réduisant ainsi le compactage des sols, ces régies agricoles permettent également de réduire les pertes d'azote des engrais minéraux, des fumiers et du sol, par dénitrification et volatilisation sous forme de NO_2 .

Le sol est dynamique et les connaissances des mécanismes qui y interviennent permettent d'établir de bons choix de régies agricoles. ::

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aita, C., S. Recous and D.A. Angers. 1997. Short-term kinetics of residual wheat straw C and N under field conditions : characterization by $^{13}\text{C}^{15}\text{N}$ tracing and soil particle size fractionation. *Eur. J. Soil Sci.* 48 : 283-294.
- Allison, L.E., W.B. Bollen and C.D. Moodie. 1965. Total carbon. Pages 1346-1365 in C.A. Black *et al.*, eds. *Methods of soil analysis*. Agronomy no. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Angers, D.A. 1998. Water-stable aggregation of Québec silty-clay soils : some factors controlling its dynamics. In *Soil & Tillage Research*. pp 91- 96.
- Angers, D.A. et A. N'Dayegamiye, 1991. Effects of manure application on carbon, nitrogen and

carbohydrate contents of a silt loam and its particle size fractions. *Biol. Fertil. Soils* 11: 79-82.

Aoyama, M., D.A. Angers, A. N'Dayegamiye et N. Bissonnette. 1999. Protected organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Can. J. Soil Sci.* 79: 419-425.

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

Doran, J.W. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 765-771.

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

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

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

Kemper, W.O. and R.C. Roseneau, 1986. Aggregate stability. Pages 511-519. in C.A. Black *et al.*, eds. *Methods of soil analysis*. Agronomy no. 9, Part. 1. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.

N'Dayegamiye, A., M. Goulet et M. Laverdière. 1997. Effet à long terme d'apports d'engrais minéraux et de fumier sur les teneurs en C et N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. *Can. J. Soil Sci.* 77 : 351-358.

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

Sbih, M., A. N'Dayegamiye et A. Karam. 2003. Evaluation of carbon and nitrogen mineralization rates in meadow soils from dairy farms under transit to biological cropping systems. *Can. J. Soil Sci.* 83: 25-33.

Simard, R.R. et A. N'Dayegamiye. 1993. Nitrogen mineralization potential of meadow soils. *Can. J. Soil Sci.* 73: 27-38.

Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-161.