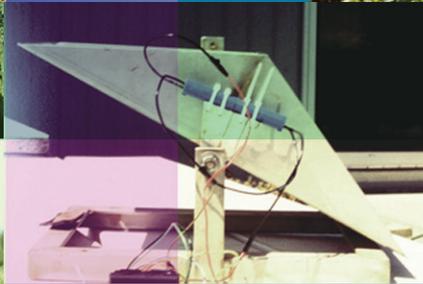
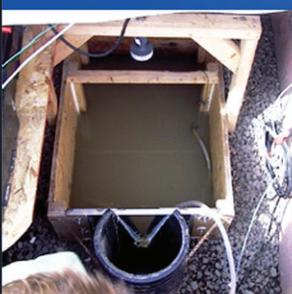


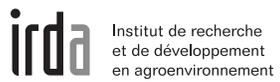
Cahier n° 8

**EFFETS DES ÉPANDAGES D'ENGRAIS MINÉRAUX
ET ORGANIQUES SUR L'ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
ET DE LA TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS
SOUS CULTURES COMMERCIALES**



irda

Partenaires financiers :



EFFETS DES ÉPANDAGES D'ENGRAIS MINÉRAUX ET ORGANIQUES
SUR L'ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET DE LA TENEUR EN MATIÈRE
ORGANIQUE DES SOLS SOUS CULTURES COMMERCIALES

OBSERVATOIRE DE LA QUALITÉ DES SOLS DU QUÉBEC
SITE DE SAINT-LAMBERT DE LAUZON

Cahier no 8



Préparé par :

Marcel Giroux, Jean-Baptiste Sarr, Judith Nyiranneza et Adrien N'Dayegamiye

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, Einstein, Québec (Qc) G1P 3W8

Courriel : marcel.giroux@irda.qc.ca

Octobre 2009

Objectifs poursuivis

L'Observatoire de la qualité des sols est un réseau de sites protégés, établis dans plusieurs régions agricoles du Québec. Son objectif est de suivre l'évolution de la qualité des sols cultivés sous l'influence des activités agricoles incluant principalement les régies de fertilisation, de travail du sol et les systèmes de rotation des cultures. L'étude consiste pour l'essentiel dans la prise régulière de mesures permettant d'évaluer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, les rendements, la qualité et la composition chimique des récoltes ainsi que l'effet sur l'environnement, notamment sur la qualité de l'eau.

La connaissance des changements des caractéristiques du milieu dans le temps permet de juger de la valeur et de la durabilité des systèmes agricoles et d'apporter au besoin les correctifs appropriés. C'est l'objectif poursuivi par ce projet.

Diffusion des résultats

Les résultats de ces études sont publiés dans les cahiers de l'Observatoire de la qualité des sols agricoles du Québec. Il s'agit d'une collection de plusieurs numéros faisant état des changements survenus selon les traitements appliqués aux différents sites de l'Observatoire.

Marcel Giroux

Responsable du site de l'Observatoire de la qualité des sols de Saint-Lambert de Lauzon

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	6
RÉSUMÉ	7
1. INTRODUCTION	9
1.1 Effets des cultures sur la matière organique et les propriétés physiques des sols.....	9
1.2 Effets des apports d'engrais sur la matière organique et les propriétés physiques des sols	10
2. BUTS ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	12
3. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	13
3.1 Dispositif expérimental	13
3.2 Prélèvement des échantillons de sols et préparation.....	13
3.3 Description des méthodes d'analyses physiques des sols	13
3.4 Analyses statistiques.....	14
4. RÉSULTATS	15
4.1 Matière organique et azote total des sols	15
4.2 Densité apparente.....	19
4.3 Porosité	19
4.4 Stabilité des agrégats.....	21
4.5 Diamètre moyen pondéré des agrégats.....	23
5. CONCLUSION.....	25
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	26
7. REMERCIEMENTS	28

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Tableau 1.	Analyse de variance et résultats des propriétés physiques des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	17
Tableau 2.	Matrice des corrélations entre les propriétés des sols à l'étude, tous traitements confondus	18
Figure 1.	Évolution des teneurs en matière organique dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	15
Figure 2.	Évolution des teneurs en azote total dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	16
Figure 3.	Évolution de la densité apparente dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	19
Figure 4.	Évolution de la porosité totale dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	20
Figure 5.	Évolution de la porosité à 100 cm dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	20
Figure 6.	Évolution de la proportion des agrégats stables compris entre 5 et 8 mm dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	22
Figure 7.	Évolution de la proportion des agrégats stables compris entre 2 et 5 mm dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	22
Figure 8.	Évolution de la proportion des agrégats stables compris entre 0,25 et 8 mm dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	23
Figure 9.	Évolution du diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP) dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	24

RÉSUMÉ

Cette étude avait pour but de mesurer les effets des épandages d'engrais minéraux et organiques sur l'évolution des propriétés physiques des sols, de la densité apparente (DA), de la porosité totale, de la porosité à 100 cm de tension hydrique, de la proportion et de la grosseur des agrégats stables dans l'eau et de leur diamètre moyen pondéré (DMP) dans un système comportant des cultures commerciales sous un travail conventionnel du sol, avec un labour annuel. Elle vise aussi à mesurer l'évolution des teneurs en matière organique (MOS) et en azote total (NT) des sols selon les modes de fertilisation.

L'essai s'est déroulé à la ferme expérimentale de Saint-Lambert de Lauzon dans le cadre du réseau d'essai de l'Observatoire de la qualité des sols sur une période de 10 ans entre 1994 et 2004. Des parcelles de 0,12 ha ont été soumises à trois modes distincts de fertilisation avec deux répétitions. La première parcelle a reçu du fumier de bovins laitiers à une dose annuelle entre 20 et 60 T/ha selon les cultures; la seconde a reçu annuellement entre 30 et 50 T/ha de lisier de porcs et finalement; une troisième parcelle a été fertilisée uniquement avec une fumure minérale complète NPK selon le besoin des cultures et l'analyse des sols. La rotation des cultures était la suivante : maïs-grain (2 ans), orge et canola. Les mesures des teneurs en matière organique (MOS), en azote total (NT) et des propriétés physiques des sols ont été réalisées au début de l'essai en 1994 et par la suite en 1997, 2000 et 2004, de manière à suivre les changements dans le temps. Avant 1994, les sols étaient en prairies depuis au moins 10 ans. Il s'agit donc de suivre l'évolution des propriétés d'un sol mis en cultures commerciales et fertilisé avec différents types d'engrais organiques ou une fumure minérale.

En ce qui concerne l'évolution de la MOS selon les engrais apportés, les résultats ne montrent pas de variation significative des teneurs avec le fumier de bovins ($p = 0,246$). Par contre, une diminution de la MOS est obtenue avec le lisier de porcs ($p = 0,001$) et la fumure minérale ($p = 0,120$). Les teneurs moyennes dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 4,57 % en 1994 et de 4,85 % en 2004. Dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs, elles étaient de 3,1 % en 1994 et de 2,6 % en 2004 et dans celles avec la fumure minérale, elles étaient de 2,9 % en 1994 et de 2,6 % en 2004. Pour ce qui est de l'évolution des teneurs en NT pour chacun des engrais apportés, les résultats n'indiquent pas de variation significative avec le fumier de bovins ($p = 0,21$), mais ils montrent une diminution avec le lisier de porcs ($p = 0,04$) et la fumure minérale ($p = 0,11$).

Les résultats ont démontré une diminution de la densité apparente (DA) des sols avec le fumier de bovins ($p = 0,078$) et une augmentation avec le lisier de porcs ($p = 0,004$) et la fumure minérale ($p = 0,004$). Les valeurs moyennes de DA dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 1,35 g/cm³ en 1994 et de 1,30 g/cm³ en 2004. Dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs, elles étaient respectivement de 1,39 g/cm³ en 1994 et de 1,47 g/cm³ en 2004. Dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale, elles étaient respectivement de 1,39 g/cm³ en 1994 et de 1,51 g/cm³ en 2004.

Pour la porosité totale, les résultats indiquent une faible augmentation avec le fumier de bovins ($p = 0,078$) et une faible diminution avec le lisier de porcs ($p = 0,004$) et la fumure minérale ($p = 0,004$). Les valeurs moyennes de la porosité totale dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 48,8 % en 1994 et de 50,9 % en 2004. Avec le lisier de porcs, elles étaient respectivement de 47,3 % en 1994 et de 44,3 % en 2004 et dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale, elles étaient respectivement de 47,5 % en 1994 et de 42,8 % en 2004. Il y a donc une différence entre le fumier de bovins, qui accroît légèrement la porosité totale des sols, et le lisier de porcs et la fumure minérale qui la diminuent. Pour la porosité à 100 cm, correspondant à la macro et la méso-porosité (diamètre plus grand que 30 µm), les résultats indiquent une diminution avec le fumier de bovins ($p = 0,024$), le lisier de porcs ($p = 0,010$) et la fumure minérale ($p = 0,069$).

En ce qui concerne la proportion des gros agrégats, d'un diamètre compris entre 5 et 8 mm, les résultats indiquent une diminution significative de leur proportion avec le fumier de bovins ($p = 0,013$), le lisier de porcs ($p = 0,060$) et la fumure minérale ($p = 0,007$). Les valeurs moyennes des agrégats entre 5 et 8 mm dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 69,6 % en 1994 et de 56,4 % en 2004. Dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs, elles étaient respectivement de 62,7 % en 1994 et de 45,5 % en 2004. Avec la fumure minérale, les agrégats entre 5 et 8 mm étaient respectivement de 53,6 % en 1994 et de 28,6 % en 2004. La baisse est survenue surtout entre 1994 et 2000, soit pendant les 6 premières années de la mise en cultures commerciales, et elle s'est stabilisée par la suite. Elle se produit pour tous les modes de fertilisation mais il y a cependant

des différences entre les engrais. La diminution est plus marquée avec la fumure minérale, intermédiaire avec le lisier de porcs et plus modérée avec le fumier de bovins. Pour les agrégats de 2 à 5 mm, les résultats indiquent une augmentation significative de leur proportion avec le fumier de bovins ($p = 0,011$), le lisier de porcs ($p = 0,11$) et la fumure minérale ($p = 0,076$). L'effet a varié selon les modes de fertilisation. Il est plus marqué avec la fumure minérale et le lisier de porcs et plus modéré avec le fumier de bovins. L'effet est l'inverse de ce qui a été mesuré pour les gros agrégats compris entre 5 et 8 mm. Les changements dans la proportion des agrégats stables sont survenus principalement pendant les six premières années et se sont stabilisés par la suite. Il y a eu un transfert important des agrégats de 5 à 8 mm vers des agrégats de 2 à 5 mm lors de la mise en cultures commerciales de ce sol. Pour ce qui est de la somme des agrégats stables compris entre 0,25 mm et 8 mm, il y a eu une diminution significative avec la fumure minérale mais pas de diminution significative avec le lisier de porcs et le fumier de bovins.

En ce qui concerne le diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP), les résultats indiquent une diminution significative du DMP avec le fumier de bovins ($p = 0,015$), le lisier de porcs ($p = 0,020$) et la fumure minérale ($p = 0,005$). Les valeurs moyennes du DMP dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 5,0 mm en 1994 et de 3,7 mm en 2004. Dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs, elles étaient respectivement de 4,7 mm en 1994 et de 3,0 mm en 2004. Dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale, elles étaient respectivement de 4,9 mm en 1994 et de 2,3 en 2004. La mise en cultures commerciales de ce sol a donc dégradé sa structure, comparativement à son état initial alors qu'il était cultivé sous prairies. Le fumier de bovins a permis d'atténuer considérablement cette dégradation sans l'arrêter complètement. Le lisier de porcs a montré une diminution du DMP moins importante que la fumure minérale.

1. INTRODUCTION

1.1 Effets des cultures sur la MOS et les propriétés physiques des sols

La transformation de l'agriculture québécoise au cours des dernières décennies a suscité beaucoup de questions quant à l'évolution de la qualité des sols. Le développement intensif des cultures commerciales, la diminution des superficies en prairies et l'accroissement des cultures en rangs espacés ont provoqué des changements des propriétés physiques des sols, notamment de leur structure, de leur porosité et de leur densité apparente. L'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990) a mis en évidence les causes de la dégradation des sols et a démontré à quel point les systèmes cultureux peuvent affecter leur qualité. Il devient alors important de connaître l'effet des pratiques agricoles sur l'évolution des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Sous cultures commerciales avec un travail intensif du sol par le labour annuel, la préparation des semis et le désherbage mécanique, une oxydation de la matière organique du sol (MOS) se produit, avec des effets sur les propriétés physiques des sols. Tabi et al. (1990) ont démontré que près de 250,000 ha de sols cultivés au Québec, principalement en maïs et en pommes de terre, avaient subi une diminution de la MOS occasionnant une détérioration de leur structure.

Le déclin de la MOS et la détérioration des propriétés physiques sont accentués dans les systèmes où les résidus de culture sont faibles. Lors de la mise en culture intensive des sols, lorsque les apports de matière organique sont insuffisants, la MOS subit une diminution rapide de sa fraction labile. À court et moyen terme, cette diminution va produire un ralentissement de l'activité biologique des sols et affecter leur capacité d'agrégation. Angers (1992) et Angers et Giroux (1996) ont trouvé une meilleure agrégation des sols sous prairies comparativement au maïs-grain. Ils ont démontré que le carbone labile se trouve en plus forte proportion dans les gros agrégats (>2 mm). Sous cultures commerciales, fertilisées avec des engrais minéraux uniquement, la proportion des gros agrégats est plus faible, ce qui affecte l'écoulement de l'eau, la porosité et la densité apparente dans les sols (N'Dayegamiye et Côté, 1996; N'Dayegamiye et al., 1997). Les systèmes de culture avec un travail intensif du sol entraînent souvent une diminution de la MOS, particulièrement de la fraction labile, pouvant conduire à des problèmes de dégradation des sols (Nyiraneza et al., 2009). Ce déséquilibre peut être corrigé par des apports d'engrais organiques (Estevez et al., 1996) ou en introduisant certaines cultures, comme les légumineuses, dans les cycles de rotation (Rasse et al., 2000). Les rotations des cultures ne peuvent pas toujours à elles seules maintenir un niveau adéquat de la matière organique labile dans les sols, surtout dans les cultures commerciales, lorsqu'elles sont associées au travail intensif (Mérisier et al., 1997; N'Dayegamiye et al., 1997). Par contre, les prairies peuvent maintenir un niveau élevé de matière organique stable et labile dans les sols (Carrier, 1988; Giroux, 1991; N'Dayegamiye, 1996). Afin de maintenir un bon niveau de matière organique stable et labile, il est nécessaire d'établir des rotations qui procurent des apports suffisants de résidus de culture et d'apporter régulièrement des engrais organiques.

Conceptuellement, la MOS intervient dans l'agrégation par ses propriétés de complexation avec les particules minérales du sol, surtout les argiles (Bronick et Lal, 2005; Schulten et Leinweber, 2000). Il y a lieu de distinguer la fraction labile (4-10 % de la MOS), très peu humifiée et la fraction stable (90-96 % de la MOS), beaucoup plus humifiée. C'est cette fraction stable et humifiée qui en se liant aux argiles génère le complexe argilo-humique responsable de la microagrégation des sols. La fraction labile de la MOS stimule la microflore qui favorise le processus de formation des macroagrégats. Les deux fractions de la MOS participent directement à la structuration des sols et sont complémentaires, car si la fraction stable assure la microagrégation des sols, c'est la fraction labile qui produit les conditions nécessaires pour lier ces microagrégats et en faire des macroagrégats stables favorisant ainsi le développement d'une bonne structure. Le carbone du sol agit spécifiquement sur la stabilité structurale du sol. Martens (2000) a démontré l'effet des substances phénoliques comme la lignine dans l'agrégation des sols. L'intérêt de la lignine réside dans le fait qu'elle apporte des fibres qui permettent de lier les agrégats et qu'en se dégradant elle génère des acides humiques et fulviques. Ces acides constituent des ligands favorisant la formation de complexes avec les argiles et les cations polyvalents. La lignine est donc importante pour une bonne structure et pour l'élaboration du complexe argilo-humique (Wright et al., 2005; Jarecki and Lal, 2003; Bronick et Lal, 2005). Martens (2000), Martens et Frankenberger (1992) et N'Dayegamiye et al. (2009) ont démontré que les résidus de culture et les amendements organiques ayant des rapports C/N élevés et qui sont riches en lignine se décomposent lentement et contribuent à la stabilisation de la MOS et à l'agrégation des sols. Par ailleurs, il a été démontré que les cultures de couverture favorisent l'agrégation par leur apport en carbone très fermentescible qui stimule l'activité microbienne (Schutter and Dick, 2002).

Le système racinaire de la culture affecte également les propriétés physiques des sols. Il est établi que certaines cultures, comme la luzerne, améliorent la conductivité hydraulique des sols saturés en eau (Ksat). Rasse et al. (2000) ont rapporté une augmentation de Ksat de 57 % en lien avec le système racinaire de la luzerne. Les racines des plantes fourragères favorisent la macroporosité du sol (Angers et Caron, 1998; Rasse et al., 2000). Avec leur système racinaire très ramifié et l'abondance des racelles, les graminées fourragères présentent aussi l'avantage de favoriser une bonne structure en constituant une maille qui unit les agrégats entre eux (Chantigny et Angers, 2005). Les plantes fourragères produisent aussi une activité biologique accrue qui favorise la formation des agrégats. Les systèmes racinaires émettent des exsudats de natures diverses (protéines, sucres, acides organiques) dont certains jouent un rôle de ligand et favorisent l'agrégation des particules de sol (Chantigny et Angers, 2005). Dans une étude comparative concernant plusieurs cultures (blé, millet, tournesol et maïs), Wright et al. (2000) ont rapporté une différence significative dans la stabilité des agrégats selon divers types de rotation étudiés. Dans cette étude, l'alternance blé-maïs-millet conférait une meilleure stabilité des agrégats contrairement à la rotation blé-tournesol-jachère.

1.2 Effets des apports d'engrais sur la MOS et les propriétés physiques des sols

Les modes de fertilisation des cultures exercent un effet important sur la teneur en matière organique du sol (MOS), particulièrement sur sa fraction labile. Il en résulte des interactions avec les propriétés physiques des sols, telles la capacité de rétention en eau (Hudson, 1994), la formation d'agrégats stables et le diamètre moyen des agrégats (Tisdall et Oates, 1982; Estevez et al., 1996; Whalen et al., 2003), la densité apparente, la porosité des sols (Soane, 1990; Arriaga et Lowery, 2003), la biomasse microbienne et l'activité biologique (Gunapala et Scow, 1998).

Les propriétés physiques du sol affectent sa fertilité en agissant sur la capacité de minéralisation des éléments nutritifs, la rétention et l'infiltration de l'eau, le ruissellement de surface, l'érosion des sols, la battance et les échanges gazeux (Bronick et Lal, 2005). Elles affectent également sa productivité en agissant sur le développement racinaire et la croissance des plantes. La proportion des agrégats stables dans l'eau et leur grosseur sont souvent utilisées pour évaluer l'état de la structure des sols en rapport avec les régies de culture (Angers, 1998; Six et al., 2000). La structure du sol évolue dans le temps selon les pratiques culturales. Une détérioration de la structure est interprétée comme un problème de dégradation des sols et les régies de culture qui y sont associées comme non bénéfiques voire non durables (Chan et al., 2003; Tabi et al., 1990).

D'un point de vue pratique, la composition des engrais de ferme, le type de culture et la gestion des résidus de culture vont déterminer l'évolution de la teneur en matière organique stable et labile et, par conséquent, vont affecter la structure du sol. N'Dayegamiye et Côté (1996) ont observé une réduction de la teneur en MOS de sols qui recevaient des apports continus d'engrais minéraux et de lisier de porcs sous culture de maïs. Sur une période de 15 ans, ils ont observé une réduction de 9 à 30 % de la teneur en MOS des sols de la série Le Bras. Par contre, le fumier de bovins a entraîné une augmentation de la MOS de 27 % durant la même période. Ces auteurs en ont conclu que le fumier de bovins améliore le bilan humique des sols alors que le lisier de porcs et les engrais minéraux n'ont pu enrayer la baisse de la MOS générée par le système cultural, ce qui a entraîné une dégradation de la structure. Le type d'engrais organiques est donc très important et les effets obtenus sont variables d'un engrais organique à l'autre. Le carbone présent dans les engrais organiques est associé à différentes fractions chimiques comme les protéines, les sucres, la cellulose, l'hémi-cellulose et les substances phénoliques dont la lignine. La composition chimique des engrais va affecter leur vitesse de décomposition et le devenir du carbone dans les sols. Les engrais organiques riches en fibres sont plus lentement dégradés et produisent un effet plus important sur l'agrégation des sols. Nyiraneza et al. (2009) ont mesuré un effet positif à long terme des applications de fumier frais de bovins sur les agrégats stables $>0,25$ mm ($p = 0,045$) et sur le DMP ($p = 0,139$) mais pas sur la densité apparente des sols ($p = 0,408$), ni sur la porosité totale ($p = 0,320$). Bipfubusa et al. (2008) ont démontré que les amendements organiques plus humifiés, comme les composts, jouaient un rôle significatif dans la production d'agrégats stables et que les amendements frais stimulaient les hyphes fongiques, ce qui favorisait également la formation des agrégats stables.

La fertilisation minérale permet de couvrir les besoins en nutriments de la plante de façon à assurer un bon développement des cultures et un rendement de qualité (Campbell et al., 1995). Cette fertilisation n'apporte pas de carbone au sol mais elle contribue à accroître les résidus de culture et la biomasse racinaire. Il semble que ce ne soit pas toujours suffisant pour maintenir la matière organique et l'azote total à un niveau adéquat et pour assurer une bonne qualité des sols (Nyiraneza et al., 2009; Mulvaney et al.,

2009). Des engrais ou des amendements organiques sont nécessaires en plus de la fertilisation minérale (N'Dayegamiye et Côté, 1996; Estevez et al., 1996). N'Dayegamiye et Côté (1996) ont rapporté une diminution de la qualité structurale des sols avec la fumure minérale sous cultures de maïs.

Les lisiers de porcs constituent une importante source de nutriments disponibles pour les cultures, mais comme ils contiennent un carbone très fermentescible avec moins de fibres que les fumiers, ils produisent moins d'effets favorables sur les propriétés physiques des sols. N'Dayegamiye et Côté (1996), Chantigny et Angers (2005) ont démontré que les doses de lisier de porcs ont produit peu d'effets sur la production d'agrégats stables et sur le diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP). Ils peuvent toutefois agir indirectement sur la formation des agrégats en stimulant l'activité microbienne du sol (Côté et Seydoux, 1990; N'Dayegamiye et Côté, 1989). De façon générale, le maintien d'un niveau de MOS capable d'entretenir une bonne structure du sol, requiert des amendements organiques riches en lignine (N'Dayegamiye et Côté, 1996; Estevez et al., 1996). Les fumiers de bovins, riches en fibres provenant des litières mais aussi des aliments non digérés, contribuent efficacement à la formation des agrégats (Bissonnette et al., 2001). Des études ont montré un effet significatif des fumiers de bovins sur la proportion de gros agrégats (5-8 mm), lesquels étaient fortement corrélés à la stabilité structurale (N'Dayegamiye et Côté, 1996; Nyiraneza et al., 2009). Quant aux fumiers de monogastriques, ils contiennent généralement moins de fibres. De ce fait, leur effet sur la formation des agrégats est moindre (Chantigny et Angers, 2005). Le rôle des microorganismes provient des sécrétions qu'ils produisent et qui lient les particules de sol. Ces microorganismes sécrètent un mucilage qui sert de ligand entre la MOS et les particules minérales. Cette agglutination autour des organismes microbiens stimule la formation des agrégats (Chantigny et Angers, 2005). Il semble cependant que cet effet soit de courte durée puisque les essais à long terme montrent peu d'effets du lisier de porcs sur les agrégats stables (N'Dayegamiye et Côté, 1996). Il est difficile de séparer le rôle de chacun des microorganismes dans la formation des agrégats mais il semble que les champignons, de par leurs hyphes, contribuent de façon importante à la formation de macroagrégats (Schutter and Dick, 2002; Tisdall and Oades, 1982; *in* Bronick et Lal, 2005). Les champignons saprophytes et les mycorhizes forment des hyphes fongiques qui constituent une sorte de filet qui accroît la stabilité des agrégats du sol (Chantigny et Angers, 2005). La mésofaune du sol, en particulier les vers de terre, est également très active dans la dégradation des engrais organiques et des résidus de culture. Elle améliore ainsi la porosité du sol et favorise la formation de gros agrégats. Il faut cependant apporter régulièrement une source de carbone labile pour stimuler l'activité biologique et bénéficier ainsi des effets des organismes du sol.

2. BUTS ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Cette étude a pour but de mesurer les effets des modes de fertilisation organique et minérale sur l'évolution des propriétés physiques d'un sol cultivé sous cultures commerciales avec un mode de travail du sol conventionnel. Les propriétés physiques mesurées sont la densité apparente (DA), la porosité totale, la porosité à 100 cm, les agrégats stables de différents calibres et leur diamètre moyen pondéré (DMP). Elle vise aussi à mesurer l'évolution de la matière organique (MOS) et de l'azote total (NT) des sols selon les modes de fertilisation.

Les modes de fertilisation étudiés sont la fumure minérale, le lisier de porcs et le fumier de bovins laitiers. Avant le début de l'essai en 1994, ce sol était cultivé en prairies depuis au moins 10 ans. À partir de 1994, il a été cultivé selon une rotation de quatre ans comportant deux années de maïs-grain, une année d'orge et une année de canola. Nous désirons savoir comment ce système cultural avec un labour annuel évolue au plan de ses propriétés physiques et de sa matière organique et dans quelle mesure les modes de fertilisation peuvent interagir sur ces changements. Un nouvel équilibre structural est susceptible de s'installer dans le sol selon les modes de fertilisation. L'évolution à long terme des propriétés physiques des sols et le temps nécessaire pour atteindre ce nouvel équilibre sont encore assez mal connus selon les modes de fertilisation. Cette étude permettra donc de mieux comprendre les changements qui surviennent dans un sol lors de sa mise en cultures commerciales selon les modes de fertilisation. Si on connaît son évolution, il est alors possible d'apporter des corrections pour éviter la dégradation des sols.

3. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

3.1 Dispositif expérimental

Cette étude a été réalisée dans le cadre du réseau d'essai de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. L'étude a été initiée en 1994 sur un site expérimental de longue durée situé à Saint-Lambert de Lauzon, près de Québec. Le sol est un loam limoneux de la série Le Bras avec 25 % de sable, 55 % de limon et 20 % d'argile. Sa CEC est de 17 meq/100 g. Les teneurs initiales en P, K et Al mesurées avec la méthode Mehlich-3 étaient respectivement de 40 kg P/ha, de 100 K/ha et de 1118 mg Al/ha et le pH de 6,5. La pente moyenne du site est de 0,6 %.

Le champ a été divisé en trois parcelles de 0,12 ha correspondant à trois différents modes de fertilisation avec deux répétitions. Entre 1994 et 2004, la parcelle 1 a reçu annuellement entre 20 et 60 T/ha (base humide) de fumier de bovins laitiers, en moyenne 42 T/ha. La parcelle 2 a reçu annuellement entre 30 et 50 T/ha (base humide) de lisier de porcs, en moyenne 47 T/ha. La parcelle 3 a reçu une fumure minérale de 80 kg N/ha pour le blé et le canola et 150 kg N/ha pour le maïs-grain, complétée avec une dose annuelle moyenne de 80 kg P₂O₅/ha et 70 kg K₂O/ha. Une description plus détaillée des apports d'engrais et de leur composition chimique est présentée dans le cahier no 4 de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec (Giroux et al., 2005). La rotation des cultures d'une durée de quatre ans était la même dans chaque parcelle et comportait du maïs-grain (2 ans), de l'orge et du canola. Ces trois parcelles constituent donc trois historiques différents d'épandage des engrais entre 1994 et 2004. Avant 1994, le champ était maintenu en prairies depuis au moins 10 ans.

3.2 Prélèvement des échantillons de sols et préparation

Les échantillons de sols servant aux analyses physiques et chimiques ont été prélevés dans la couche de labour de 20 cm au cours des mois d'octobre de 1994, 1997, 2000 et 2004. Dans chaque parcelle, l'échantillonnage a été réalisé à quatre points préalablement établis et une moyenne a été calculée pour chaque parcelle. Ces points d'échantillonnage ont été géopositionnés de manière à toujours échantillonner les sols au même endroit. Cette façon de faire permet d'éliminer en bonne partie les effets de la variabilité spatiale et assure une meilleure homogénéité des résultats.

Pour les mesures de la porosité et de la densité apparente des sols, un cylindre de 6,5 cm de diamètre est enfoncé verticalement dans le sol à partir d'une profondeur de 5 cm (McKeague, 1978). Pour les mesures des agrégats stables et de leur diamètre moyen pondéré, un bloc de sol de 10 cm de côté est prélevé entre 5 et 15 cm en évitant la compaction. L'échantillon est enveloppé d'une pellicule de plastique pour conserver la structure et l'humidité du sol et il est gardé au frais à 4 °C jusqu'à sa préparation. Le sol est alors tamisé humide à travers un tamis d'un diamètre de 8 mm. L'échantillon de sol est alors envoyé immédiatement au laboratoire d'analyse physique pour la détermination des agrégats stables par tamisage dans l'eau.

Pour les déterminations de la matière organique et de l'azote total, les échantillons ont été prélevés avec une sonde sur une profondeur de 20 cm au quatre points d'échantillonnage en prélevant quatre carottes par point d'échantillonnage. Les teneurs en C et N total ont été mesurées respectivement par la méthode Walkley-Black (Allison, 1965) et par la digestion Kjeldahl (Bremner, 1965).

3.3 Description des méthodes d'analyses physiques des sols

Pour mesurer la porosité totale, un cylindre rempli de sol humide (6,5 cm de hauteur x 6,5 cm de diamètre), a été saturé en eau par immersion totale pendant 24 h. Le cylindre a été pesé et placé sur une table à tension correspondant à une colonne d'eau de 100 cm pendant 24 h. Cette tension de 100 cm est capable d'extraire l'eau des pores > 30 µm correspondant à la macro et à la mésoporosité des sols. Le cylindre a été pesé, séché à 105 °C pendant 24 h et pesé à nouveau. La porosité est calculée comme suit :

Porosité totale = (A - C / E)

Porosité à 100 cm (macro + mésoporosité) = (A - B / E)

A correspond au poids (g) du sol du cylindre saturé en eau

B correspond au poids (g) du sol du cylindre après 24 h sous une tension de 100 cm

C correspond au poids (g) du sol du cylindre séché à 105 °C

E correspond au volume du cylindre rempli de sol (215,6 cm³)

La densité apparente (DA) a été mesurée à partir des mêmes cylindres qui ont servi pour la porosité du sol. Le poids du sol séché à l'étuve à 105 °C pendant 24 h a été divisé par le volume du cylindre.

Densité apparente = C / E

Les agrégats stable (> 0,25 mm) ont été déterminés par tamisage dans l'eau (Angers et Mehuys, 1993). Un échantillon de 40 g de sol humide préalablement tamisé à 8 mm est placé sur une série de tamis de diamètre décroissant de 5 mm, 2, 1 et 0,25 mm. Les tamis sont immergés dans l'eau et agités lentement pendant 10 min. Le sol récupéré dans chacun des tamis a été séché à 65 °C jusqu'à un poids constant. Le diamètre moyen pondéré a été calculé selon la méthode de Kemper et Roseneau (1986) à partir des proportions respectives de sols dans chacun des tamis. La texture des sols a été déterminée au moyen de l'hydromètre Bouyoucos.

3.4 Analyses statistiques

Le dispositif expérimental visait à suivre l'évolution des propriétés physiques, de la MOS et NT pendant dix ans dans trois parcelles soumises à divers modes de fertilisation organique ou minérale. Dans chaque parcelle, quatre mesures de chacun des paramètres ont été prises en 1994, 1997, 2000 et 2004. Une moyenne a été établie à chacune des périodes. Une analyse de variance Proc Mix sur SAS a été effectuée pour déterminer les niveaux de probabilité statistique des changements survenus dans le temps pour chacun des modes de fertilisation. Le test LSD a été appliqué à chacun des paramètres pour chacune des périodes d'échantillonnage lorsque l'effet mesuré était significatif à $p = 0,05$.

4. RÉSULTATS

4.1 Matière organique et azote total des sols

En ce qui concerne l'évolution des teneurs en matière organique des sols (MOS) pendant la période de 10 ans, les résultats ne montrent pas d'effet significatif avec le fumier de bovins ($p = 0,246$) (tableau 1). Par contre, une diminution de la MOS est obtenue avec le lisier de porcs ($p = 0,001$) et avec la fumure minérale ($p = 0,12$). Les teneurs moyennes dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 4,57 % en 1994 et de 4,85 % en 2004. Dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs, elles étaient de 3,1 % en 1994 et de 2,6 % en 2004. Dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale, elles étaient de 2,9 % en 1994 et de 2,6 % en 2004 (tableau 1, figure 1).

Les conditions initiales de la MOS étaient différentes dans les parcelles avec le fumier de bovins comparativement à celles avec le lisier et la fumure minérale (figure 1). La MOS était plus élevée dans la parcelle avec le fumier de bovins. Cet écart s'est maintenu tout au long de l'expérience de sorte que les différences observées entre les modes de fertilisation sont avant tout attribuables à ces conditions initiales différentes. Il faut souligner que le fumier de bovins a permis de maintenir la MOS à un niveau très élevé et même de l'accroître légèrement alors que la fumure minérale et le lisier de porcs ont produit une baisse légère de la MOS.

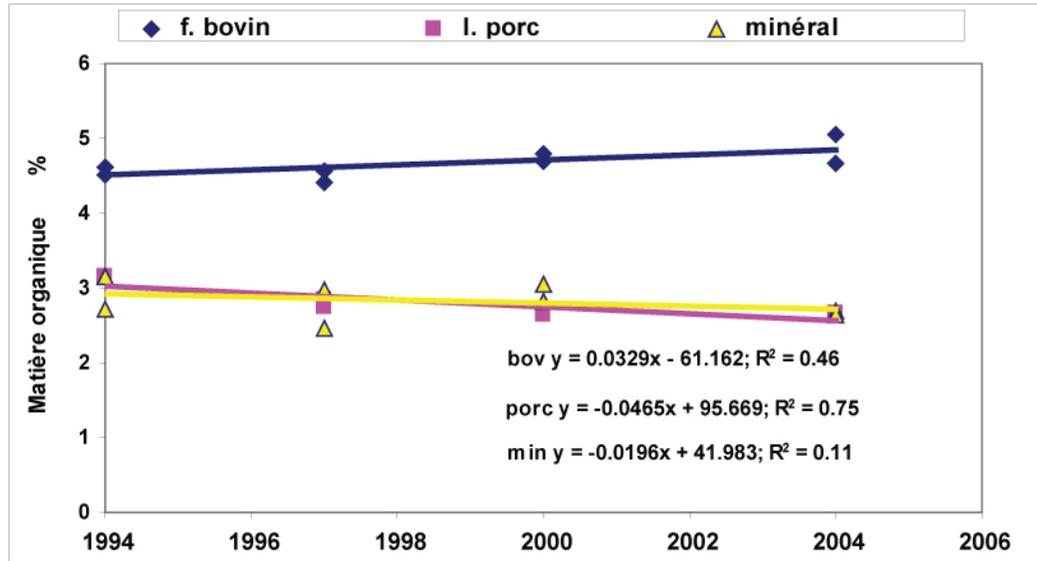


Figure 1. Évolution des teneurs en matière organique dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

Dans une étude antérieure portant sur le bilan humique de ces parcelles, la parcelle avec le fumier de bovins a produit un bilan positif, avec 5,93 t/ha sur une période de 10 ans, alors qu'il a été négatif avec -0,60 t/ha pour le lisier de porcs et -2,55 t/ha pour la fumure minérale, confirmant ainsi les tendances observées dans l'évolution de la MOS (Giroux et al., 2005). Dans une étude de longue durée portant sur l'application de fumier de bovins à la dose de 20 t/ha pendant 28 ans, Nyiraneza et al. (2009) ont également démontré une tendance à l'accroissement de la MOS ($p = 0,096$). La teneur en carbone des sols ayant reçu du fumier était en moyenne 27 % plus élevée (25 à 29 g C/kg), comparativement aux sols non-amendés (21 g C/kg).

Les corrélations mesurées entre la MOS et les propriétés physiques des sols sont les suivantes : densité apparente ($r = -0,86$), porosité totale ($r = 0,86$), porosité 100 cm ($r = 0,42$), somme des agrégats $>0,25$ mm ($r = 0,65$), agrégats 5-8 mm ($r = 0,66$), agrégats 2-5 mm ($r = -0,27$), agrégats 1-2 mm ($r = -0,18$), agrégats 0,25-1 mm ($r = -0,12$) et diamètre moyen pondéré des agrégats ($r = 0,46$) (tableau 2). Ces corrélations indiquent que la perte de matière organique peut occasionner une augmentation de la densité apparente

et des agrégats de 2 à 5 mm, mais une diminution de la porosité totale, de la macro et de la mésoporosité, des agrégats stables, des gros agrégats (5 à 8 mm), et de leur diamètre moyen pondéré.

Il y a beaucoup de similitude entre l'évolution des teneurs en azote total (NT) des sols des parcelles et celle de la MOS. Ces deux facteurs sont très corrélés entre eux ($r = 0,93$) (tableau 2). Les conditions initiales des teneurs en NT sont différentes dans les parcelles avec le fumier de bovins comparativement à celles avec le lisier et la fumure minérale (figure 2). Cet écart s'est maintenu tout au long de l'expérience de sorte que les différences observées entre les modes de fertilisation sont en partie attribuables à ces conditions initiales différentes. En ce qui concerne l'évolution des teneurs en NT pour chacun des engrais apportés, les résultats n'indiquent pas de variation significative avec le fumier de bovins ($p = 0,21$) mais une diminution avec le lisier de porcs ($p = 0,04$) et la fumure minérale ($p = 0,11$) (tableau 1, figure 2). Les teneurs moyennes en NT dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 0,18 % en 1994 et de 0,21 % en 2004. Les teneurs moyennes en NT dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs étaient respectivement de 0,14 % en 1994 et de 0,12 % en 2004. Les teneurs moyennes en NT dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale étaient respectivement de 0,16 % en 1994 et de 0,13 % en 2004.

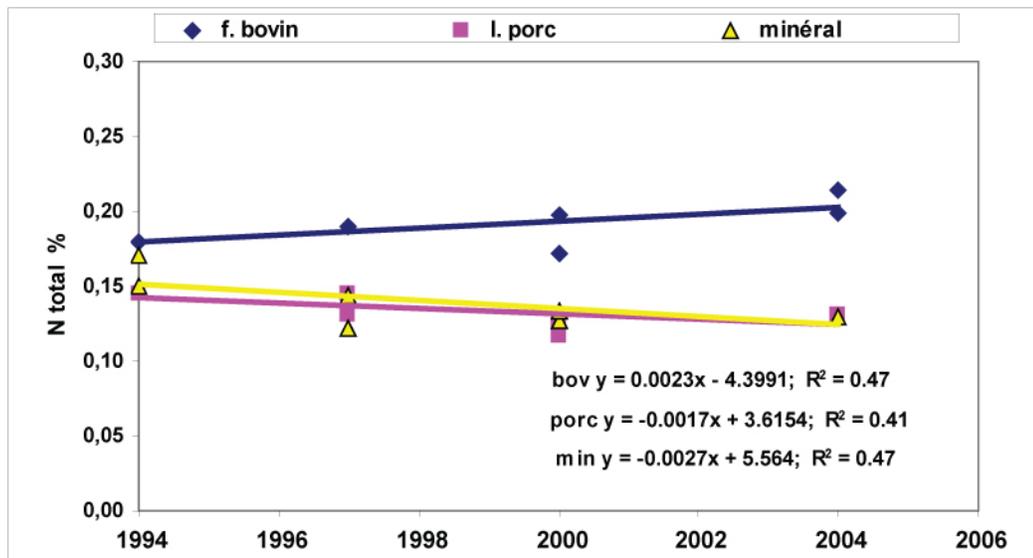


Figure 2. Évolution des teneurs en azote total dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

Dans une étude antérieure sur ces mêmes parcelles portant sur la minéralisation de l'azote, il a été démontré que les fumiers de bovins ont produit une fraction plus importante de carbone et d'azote labile dans les sols que le lisier de porcs et la fumure minérale (Giroux et al., 2008). Par exemple, après 10 années de fertilisation annuelle, le carbone soluble à l'eau chaude a été respectivement de 923 mg C/kg avec le fumier de bovins, de 579 mg C/kg avec le lisier de porcs et de 427 mg C/kg avec la fumure minérale en 2004. Toujours en 2004, après une incubation de 20 jours à 20 °C, les nitrates ont été respectivement de 18,3 mg N-NO₃/kg avec le fumier de bovins, de 12,5 N-NO₃/kg avec le lisier de porcs et de 6,1 N-NO₃/kg avec la fumure minérale. La fraction labile du carbone et de l'azote est très affectée par les modes de fertilisation, ce qui entraîne des effets sur l'activité biologique et sur les propriétés physiques des sols selon les modes de fertilisation. Certaines études indiquent en effet que la fraction labile de la matière organique est très corrélée avec les propriétés physiques des sols notamment leur agrégation (Nyiraneza et al., 2009).

Tableau 1. Analyse de variance et résultats des propriétés physiques des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

	DA	DMP	MOS	N total	Porosité 100 cm	Porosité totale	Agréats			
	(g/cm ³)	(mm)					0,25-8 mm	5-8 mm	2-5 mm	1-2 mm
	------(%)-----									
Fumier de bovins										
1994	1,35	5,0 a*	4,57	0,18	34,2 a	48,8	74,7 b	69,6 a	2,1 b	1,4 b
1997	1,34	3,9 b	4,49	0,19	27,3 ab	49,4	86,2 a	57,3 b	13,9 a	5,7 a
2000	1,31	4,3 b	4,73	0,18	22,1 b	50,5	75,5 b	56,1 b	14,9 a	1,9 b
2004	1,30	3,7 b	4,85	0,21	21,9 b	50,9	73,8 b	56,4 b	14,6 a	1,0 b
p	0,078	0,015	0,246	0,216	0,024	0,078	0,001	0,013	0,011	0,003
Lisier de porcs										
1994	1,39 c	4,7 a	3,1 a	0,14 a	27,5 a	47,3 a	73,5	62,7 a	5,4	2,8b
1997	1,43 b	3,6 b	2,8 b	0,14 a	24,4 b	45,8 b	70,6	42,4 b	15,3	4,9a
2000	1,42 bc	3,4 b	2,7 bc	0,13 ab	21,7 b	46,4 ab	66,8	42,5 b	16,8	3,0b
2004	1,47 a	3,0 b	2,6 c	0,12 b	21,9 b	44,3 c	65,8	45,5 b	17,7	1,5b
p	0,004	0,02	0,001	0,04	0,01	0,004	0,528	0,006	0,11	0,001
Engrais minéral										
1994	1,39 c	4,9 a	2,9	0,16	25,5	47,5 a	73,5 a	53,6 a	9,9	4,8
1997	1,41 bc	3,5 b	2,7	0,13	22,4	46,6 ab	62,1 b	35,9 b	13,6	4,7
2000	1,44 b	2,8 bc	2,9	0,13	22,3	45,6 b	58,3 bc	31,8 b	18,8	3,4
2004	1,51 a	2,3 c	2,6	0,13	18,1	42,8 c	49,0 c	28,6 b	17,1	1,3
p	0,004	0,005	0,12	0,11	0,069	0,004	0,01	0,007	0,076	0,13

p: niveau de probabilité statistique du test F de Fisher

* Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les années au seuil $p = 0,05$ d'après le test LSD

Tableau 2. Matrice des corrélations entre les propriétés des sols à l'étude, tous traitements confondus.

	x 1	x 2	x 3	x 4	x 5	x 6	x 7	x 8	x 9	x 10	x 11	x 12
x 1	1,00											
x 2	0,93	1,00										
x 3	-0,86	-0,85	1,00									
x 4	0,86	0,85	-1,00	1,00								
x 5	0,42	0,40	-0,41	0,41	1,00							
x 6	0,07	0,09	-0,18	0,18	-0,83	1,00						
x 7	0,66	0,67	-0,72	0,72	0,69	-0,30	1,00					
x 8	-0,27	-0,29	0,37	-0,37	-0,68	0,51	-0,76	1,00				
x 9	-0,18	-0,08	0,01	-0,01	0,22	-0,24	-0,18	0,20	1,00			
x 10	-0,12	-0,03	-0,01	0,01	0,12	-0,12	-0,24	0,26	0,93	1,00		
x 11	0,65	0,69	-0,75	0,75	0,60	-0,19	0,79	-0,33	0,34	0,30	1,00	
x 12	0,46	0,52	-0,60	0,60	0,73	-0,42	0,82	-0,69	0,20	0,02	0,73	1,00

x 1	MOS
x 2	Azote total
x 3	Densité apparente
x 4	Porosité tot.
x 5	Porosité 100 cm
x 6	Microporosité
x 7	Agrégats 5-8 mm
x 8	Agrégats 2-5 mm
x 9	Agrégats 1-2 mm
x 10	Agrégats 0,25-1 mm
x 11	Agrégats 0,25-8 mm
x 12	DMP

4.2 Densité apparente

En ce qui concerne l'évolution de la densité apparente (DA) des sols pour chacun des modes de fertilisation apportés, les résultats indiquent une diminution avec le fumier de bovins ($p = 0,078$) et une augmentation avec le lisier de porcs ($p = 0,004$) et la fumure minérale ($p = 0,004$) (tableau 1, figure 3). Les valeurs moyennes de DA dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de $1,35 \text{ g/cm}^3$ en 1994 et de $1,30 \text{ g/cm}^3$ en 2004. Les valeurs moyennes de DA dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs étaient respectivement de $1,39 \text{ g/cm}^3$ en 1994 et de $1,47 \text{ g/cm}^3$ en 2004. Les valeurs moyennes de DA dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale étaient respectivement de $1,39 \text{ g/cm}^3$ en 1994 et de $1,51 \text{ g/cm}^3$ en 2004. Il y a donc une différence importante entre le fumier de bovins, qui diminue la densité apparente des sols, et le lisier et la fumure minérale qui l'augmentent. La diminution de la matière organique totale et de la fraction labile du C dans les parcelles fertilisées au lisier de porcs et avec la fumure minérale est vraisemblablement en cause dans cette diminution de la DA. En effet, une corrélation négative ($r = -0,86$) a été mesurée entre la teneur en MOS et les valeurs de DA (tableau 2).

Ces variations de la DA vont affecter l'agrégation des sols, notamment les macroagrégats compris entre 5 et 8 mm ($r = -0,72$) et le diamètre moyen pondéré des agrégats ($r = -0,60$) (tableau 2).

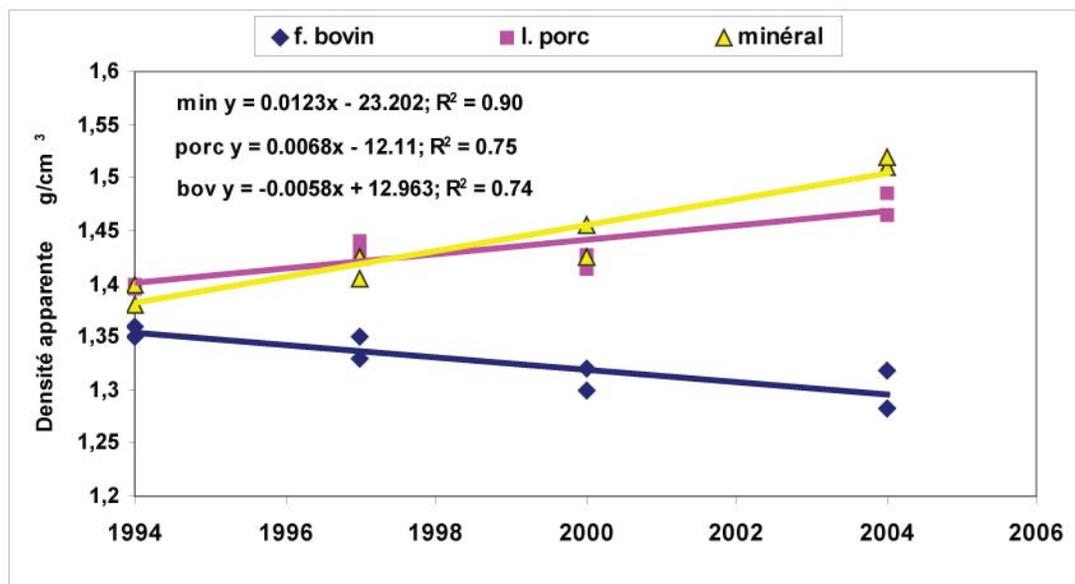


Figure 3. Évolution de la densité apparente dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

4.3 Porosité

En ce qui concerne l'évolution de la porosité totale des sols pour chacun des modes de fertilisation apportés, les résultats indiquent une faible augmentation avec le fumier de bovins ($p = 0,078$) et une faible diminution avec le lisier de porcs ($p = 0,004$) et la fumure minérale ($p = 0,004$) (tableau 1, figure 4). Les valeurs moyennes de la porosité totale dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 48,8 % en 1994 et de 50,9 % en 2004. Les valeurs moyennes de la porosité totale dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs étaient respectivement de 47,3 % en 1994 et de 44,3 % en 2004. Les valeurs moyennes de la porosité totale dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale étaient respectivement de 47,5 % en 1994 et de 42,8 % en 2004. Il y a donc une différence entre le fumier de bovins, qui accroît légèrement la porosité totale des sols, et le lisier de porcs et la fumure minérale qui la diminuent. L'effet est très similaire mais l'inverse de ce qui a été mesuré avec DA. Ceci est normal puisqu'il existe une relation inverse entre la densité apparente d'un sol et sa porosité totale. D'autre part, l'effet des modes de fertilisation sur la matière organique des sols est vraisemblablement en cause pour expliquer les variations de la porosité totale. En effet, une corrélation très significative ($r = 0,86$) a été mesurée entre la MOS et les valeurs de la porosité totale (tableau 2).

La porosité à 100 cm représente la fraction de la porosité du sol constituée de pores d'un diamètre plus grand que 30 μm , et correspond à la macro et la mésoporosité des sols. L'évolution de la porosité à 100 cm pour chacun des modes de fertilisation apportés indiquent une diminution avec le fumier de bovins ($p = 0,024$), le lisier de porcs ($p = 0,010$) et la fumure minérale ($p = 0,069$) (tableau 1, figure 5). Les valeurs moyennes de la porosité à 100 cm dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 34,2 % en 1994 et de 21,9 % en 2004. Les valeurs moyennes de la porosité à 100 cm dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs étaient respectivement de 27,5 % en 1994 et de 21,9 % en 2004. Les valeurs moyennes de la porosité totale dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale étaient respectivement de 25,5 % en 1994 et de 18,1 % en 2004. Il y a donc une diminution importante de la macro et de la mésoporosité pour tous les modes de fertilisation, plus marquée encore que celle de la porosité totale. Il semble que le système cultural lui-même soit en cause dans cette diminution de la porosité.

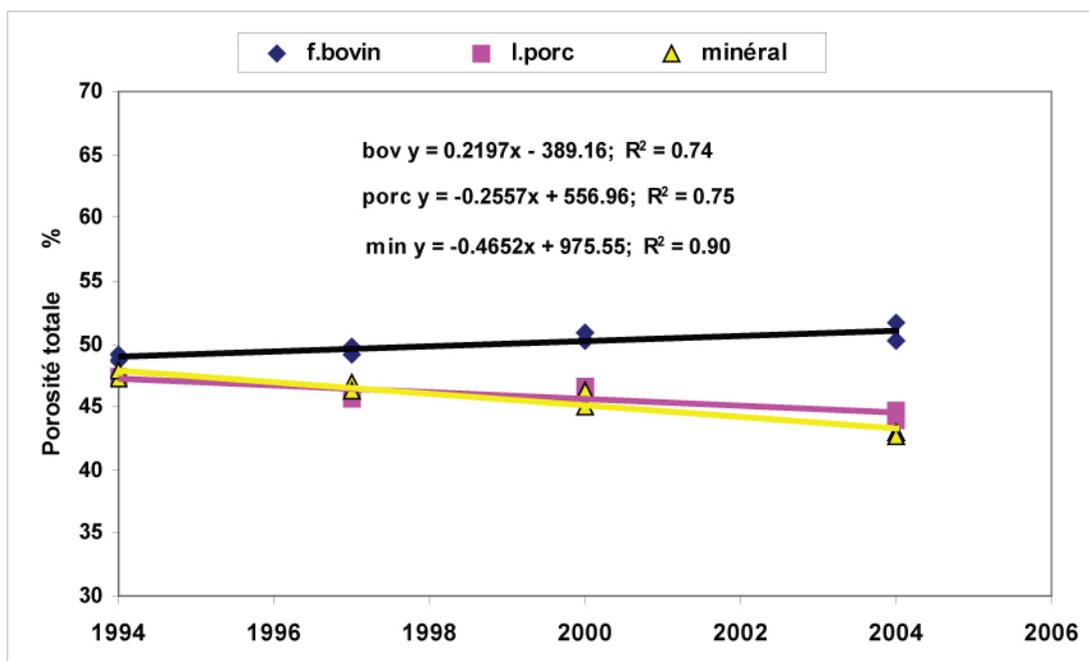


Figure 4. Évolution de la porosité totale dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

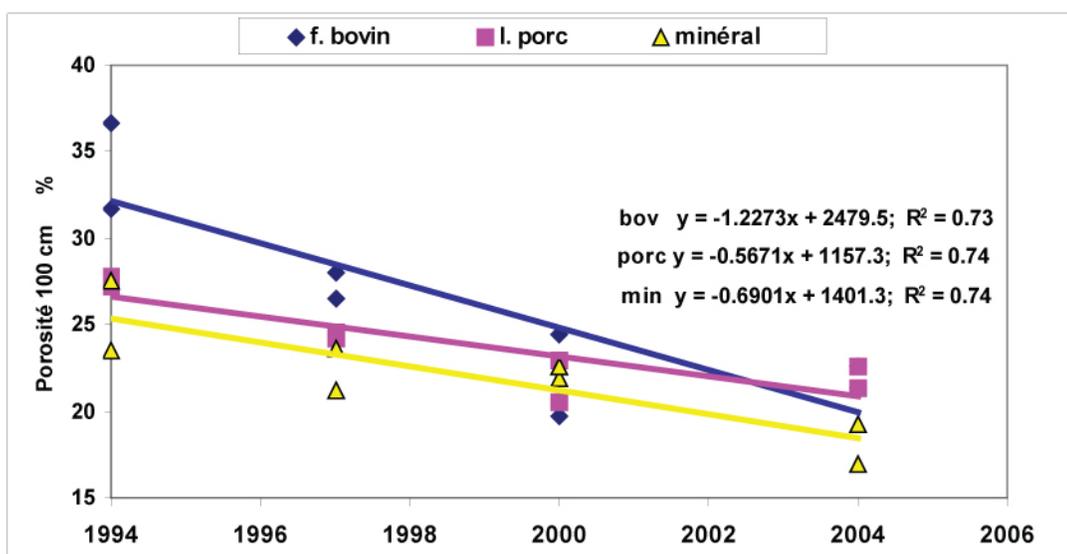


Figure 5. Évolution de la porosité à 100 cm dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

4.4 Stabilité des agrégats

En ce qui concerne la proportion des gros agrégats d'un diamètre compris entre 5 et 8 mm, les résultats indiquent une diminution significative de leur proportion avec le fumier de bovins ($p = 0,013$), le lisier de porcs ($p = 0,060$) et la fumure minérale ($p = 0,007$) (tableau 1, figure 6). Les valeurs moyennes des agrégats entre 5 et 8 mm dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 69,6 % en 1994 et de 56,4 % en 2004. Les valeurs moyennes des agrégats entre 5 et 8 mm dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs étaient respectivement de 62,7 % en 1994 et de 45,5 % en 2004. Les valeurs moyennes des agrégats entre 5 et 8 mm dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale étaient respectivement de 53,6 % en 1994 et de 28,6 % en 2004. La baisse des gros agrégats survient surtout entre 1994 et 2000, soit pendant les 6 premières années de la mise en cultures commerciales des sols et se stabilise par la suite (figure 6). La différence est significative pour tous les modes de fertilisation mais l'effet varie selon le type d'engrais. Il est plus marqué avec la fumure minérale, intermédiaire avec le lisier de porcs et plus modéré avec le fumier de bovins.

La diminution de la proportion des gros agrégats entre 5 et 8 mm mesurés dans cette étude pour tous les modes de fertilisation s'explique donc par le fait d'un changement de cultures initialement sous prairies avant 1994 vers des cultures commerciales avec un labour annuel. Le changement est relativement rapide puisqu'après 6 années un nouvel équilibre est établi dans les sols et il y a peu de variations par la suite. Les résultats de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990), ont démontré pour plusieurs séries de sol des résultats comparables dans la proportion des agrégats compris entre 5 et 8 mm sous cultures commerciales.

En ce qui concerne la proportion des agrégats compris entre 2 et 5 mm, les résultats indiquent une augmentation de leur proportion avec le fumier de bovins ($p = 0,011$), le lisier de porcs ($p = 0,11$) et la fumure minérale ($p = 0,076$) (tableau 1, figure 7). Les valeurs moyennes des agrégats entre 2 et 5 mm dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 2,1 % en 1994 et de 14,6 % en 2004. Les valeurs moyennes des agrégats entre 2 et 5 mm dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs étaient respectivement de 5,4 % en 1994 et de 17,7 % en 2004. Les valeurs moyennes des agrégats entre 2 et 5 mm dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale étaient respectivement de 9,9 % en 1994 et de 17,1 % en 2004. L'augmentation de la proportion des agrégats entre 2 et 5 mm survient surtout entre 1994 et 2000, soit pendant les 6 premières années de la mise en cultures commerciales des sols et se stabilise par la suite. L'effet varie selon les modes de fertilisation (figure 7). Il est plus marqué avec la fumure minérale et le lisier de porcs et plus modéré avec le fumier de bovins. L'effet est l'inverse de ce qui a été mesuré pour les gros agrégats compris entre 5 et 8 mm. La mise en cultures commerciales des sols a provoqué une diminution des gros agrégats compris entre 5 et 8 mm mais une augmentation de ceux compris entre 2 et 5 mm.

En ce qui concerne la somme des agrégats stables de toutes dimensions, entre 0,25 mm et 8 mm, les résultats indiquent une diminution avec la fumure minérale ($p = 0,010$) mais pas d'effet avec le lisier de porcs ($p = 0,528$) et le fumier de bovins ($p = 0,70$) (tableau 1, figure 8). Les valeurs moyennes des agrégats entre 0,25 et 8 mm dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 74,7 % en 1994 et de 73,8 % en 2004. Avec le lisier de porcs, elles étaient respectivement de 73,5 % en 1994 et de 65,8 % en 2004 et avec la fumure minérale, elles étaient de 73,5 % en 1994 et de 49,0 % en 2004. Il y a donc des signes évidents de dégradation de la structure avec la fumure minérale puisqu'une proportion de 50 % du poids du sol est structuré à un niveau inférieur à 0,25 mm.

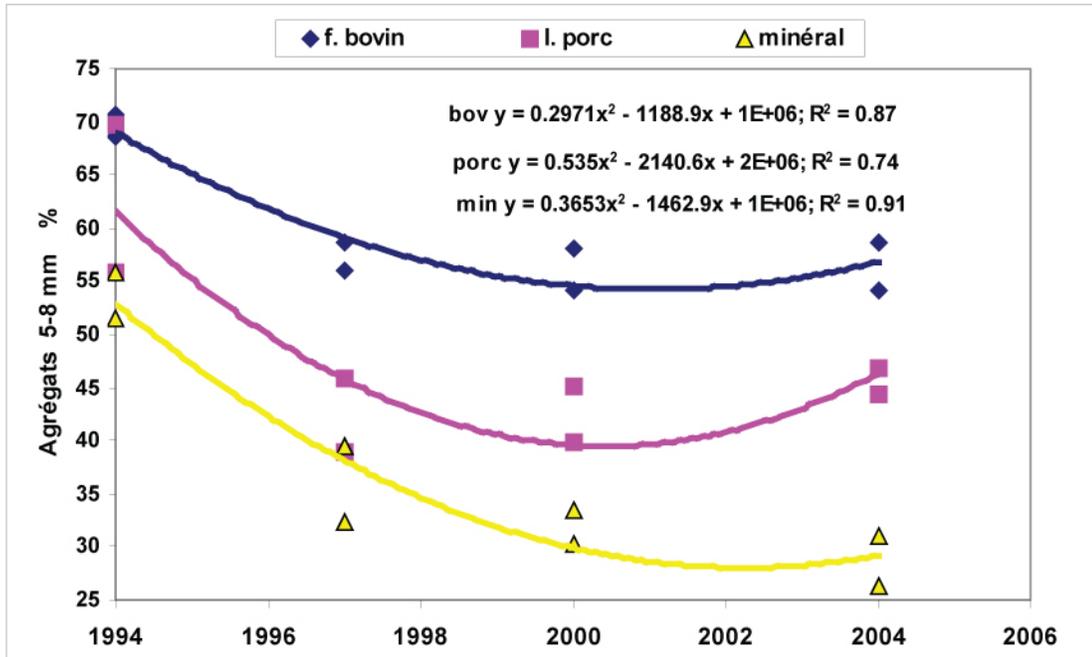


Figure 6. Évolution de la proportion des agrégats stables compris entre 5 et 8 mm dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

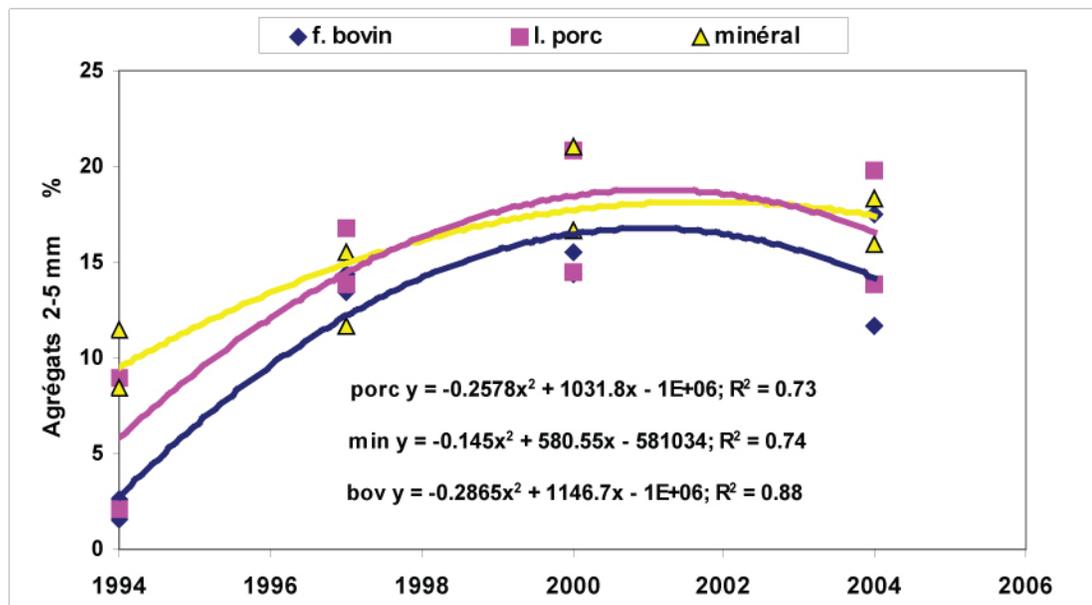


Figure 7. Évolution de la proportion des agrégats stables compris entre 2 et 5 mm dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

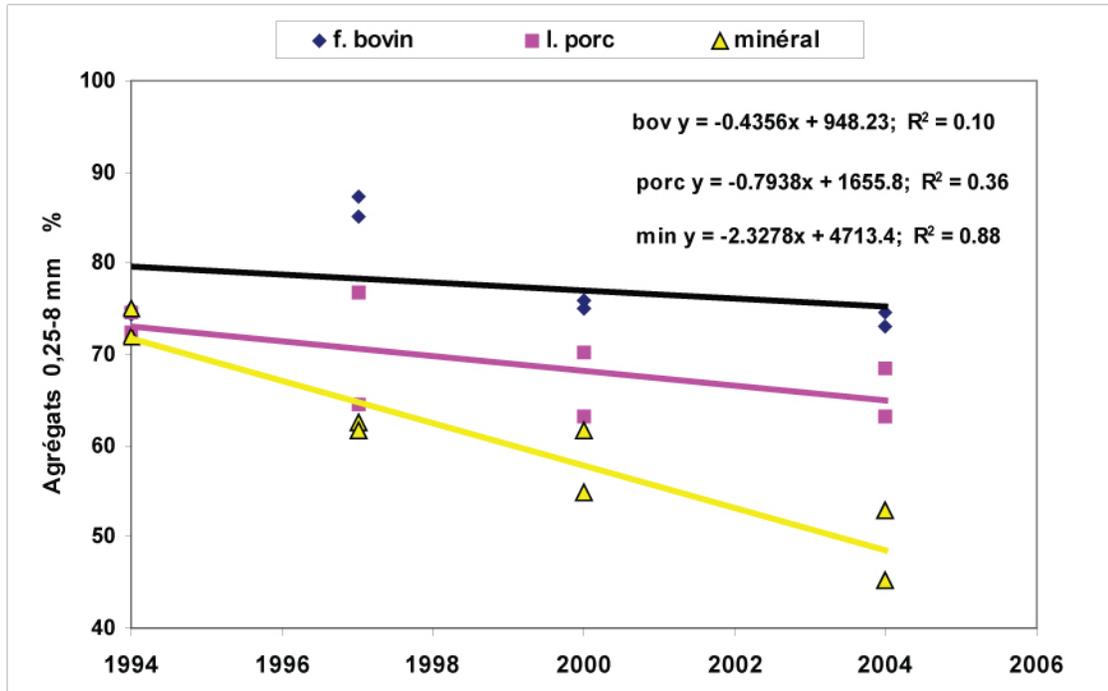


Figure 8. Évolution de la proportion des agrégats stables compris entre 0,25 et 8 mm dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

4.5 Diamètre moyen pondéré des agrégats

En ce qui concerne l'évolution du diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP) pour chacun des modes de fertilisation apportés, les résultats indiquent une diminution significative du DMP avec le fumier de bovins ($p = 0,015$), le lisier de porcs ($p = 0,020$) et la fumure minérale ($p = 0,005$) (tableau 1, figure 9). Les valeurs moyennes du DMP dans les parcelles fertilisées avec du fumier de bovins étaient respectivement de 5,0 mm en 1994 et de 3,7 mm en 2004. Les valeurs moyennes du DMP dans les parcelles fertilisées avec du lisier de porcs étaient respectivement de 4,7 mm en 1994 et de 3,0 mm en 2004. Les valeurs moyennes du DMP dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale étaient respectivement de 4,9 mm en 1994 et de 2,3 en 2004. Il y a donc une différence significative pour tous les modes de fertilisation. Ceci nous indique que la mise en culture de sols historiquement cultivés sous prairies vers des cultures commerciales a beaucoup d'incidence sur le diamètre moyen pondéré des agrégats. La pente est très différente selon les modes de fertilisation. Le fumier de bovins produit une diminution plus lente du DMP suivi du lisier de porcs et de la fumure minérale (figure 9). Il existe une relation directe entre le DMP d'un sol et sa densité apparente ($r = -0,60$), la porosité totale ($r = 0,73$), la somme des agrégats stables ($r = 0,73$) et les gros agrégats de 5 à 8 mm ($r = 0,82$) (tableau 2).

La mise en cultures commerciales des sols avec un labour annuel ne permet pas une aussi bonne agrégation des sols que sous prairies et un rajustement dans la taille des agrégats se produit dans les sols. Ceci démontre le caractère dynamique et évolutif de la structure du sol. Les engrais organiques ne peuvent enrayer cette tendance mais ils peuvent l'atténuer. Avant la mise en place de l'essai en 1994, le site avait été maintenu en prairies pendant plusieurs années. Les conditions initiales s'apparentaient donc à ce qui est généralement mesuré sous prairies, soit une densité apparente faible, une bonne porosité et beaucoup de gros agrégats stables. À partir de 1994, suite à l'implantation des cultures commerciales, plusieurs propriétés physiques ont subi des changements importants.

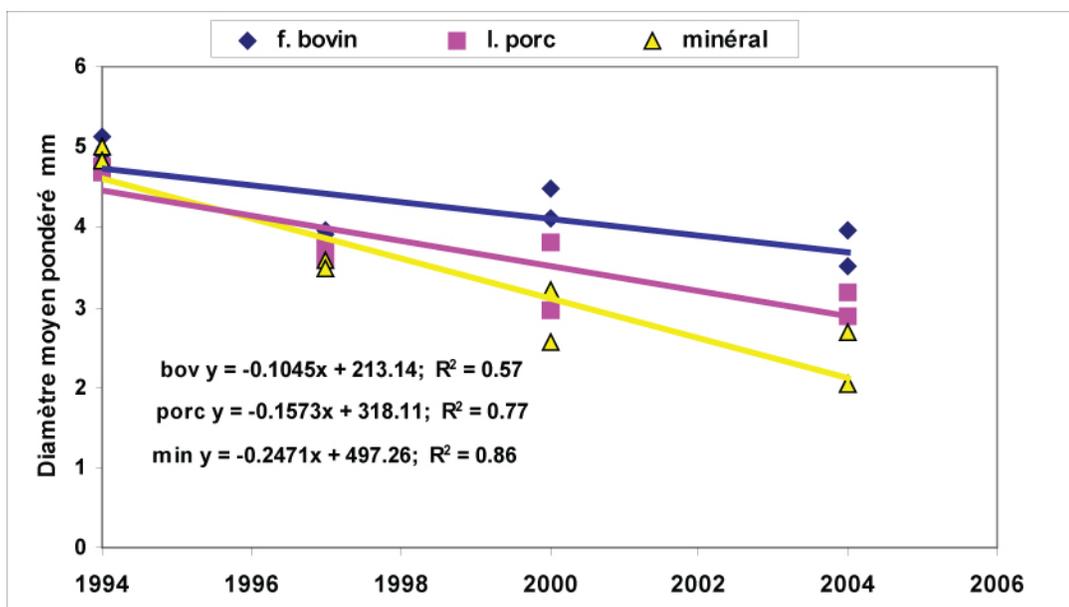


Figure 9. Évolution du diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP) dans un sol sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

5. CONCLUSIONS

La mise en cultures commerciales de ce sol a entraîné des changements dans plusieurs de ses propriétés physiques mais de façon variable selon les modes de fertilisation. Ce sont les effets combinés du système cultural et des modes de fertilisation qui sont responsables des changements survenus. Le fumier de bovins a permis de maintenir les propriétés physiques et la MOS en meilleur état, comparativement aux parcelles fertilisées avec le lisier de porcs et avec la fumure minérale. Un bilan humique positif avec le fumier de bovins a permis de maintenir une teneur élevée en matière organique et en azote total dans le sol alors que ces teneurs ont eu tendance à diminuer avec le lisier de porcs et la fumure minérale. Les résultats ont démontré une diminution de la densité apparente des sols avec le fumier de bovins et une augmentation avec le lisier de porcs et la fumure minérale. Pour la porosité totale, les résultats indiquent une faible augmentation avec le fumier de bovins et une faible diminution avec le lisier de porcs et la fumure minérale. Pour la porosité à 100 cm, correspondant à la macro et la méso-porosité, les résultats indiquent une diminution pour tous les modes de fertilisation.

En ce qui concerne la proportion des gros agrégats, d'un diamètre compris entre 5 et 8 mm, les résultats indiquent une diminution significative de leur proportion avec des différences entre les modes de fertilisation. La diminution est plus marquée avec la fumure minérale, intermédiaire avec le lisier de porcs et plus modérée avec le fumier de bovins. Pour les agrégats compris entre 2 et 5 mm, les résultats indiquent une augmentation significative de leur proportion pour tous les modes de fertilisation. Elle est plus marquée avec la fumure minérale et avec le lisier de porcs et plus modérée avec le fumier de bovins. L'effet est l'inverse de ce qui a été mesuré pour les gros agrégats compris entre 5 et 8 mm. Les changements dans la taille des agrégats sont survenus principalement pendant les six premières années et se sont stabilisés par la suite. Il y a eu un transfert important des gros agrégats compris entre 5 à 8 mm vers des agrégats de 2 à 5 mm lors de la mise en cultures commerciales de ce sol. En ce qui concerne la somme des agrégats stables compris entre 0,25 mm et 8 mm, il y a eu une diminution pour tous les modes de fertilisation. Elle est particulièrement importante avec la fumure minérale. Il en va de même pour ce qui est du diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP), les résultats indiquent une diminution significative du DMP directement attribuable à la mise en cultures commerciales des sols pour tous les modes de fertilisation, particulièrement importante dans le cas de la fumure minérale.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allison, L.E., W.B. Bollen et C.D. Moodie. 1965. Total carbon. *Dans* Methods of soil analysis. Am. Soc. of Agronomy. Madison Wisconsin. Pages 1346-1366.
- Angers, D.A. 1992. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Soil Sci. Am. J.* 56 (4) 1244-1249.
- Angers, D.A. and M. Giroux. 1996. Recently deposited organic matter in soil water-stable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1547-1551.
- Angers, D.A. 1998. Water-stable aggregation of Quebec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. *Soil and Tillage Research* 47: 91-96.
- Angers, D.A. et J. Caron. 1998. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochemistry* 42:55-72.
- Bissonnette, N., D.A. Angers, R.R. Simard et J. Lafond. 2001. Interactive effects of management practices on water-stable aggregation and organic matter of a humic gleysol. *Canadian Journal of Soil Science* 81: 545-551.
- Bronick, C.J. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Campbell, C.A., R.J.K. Myers et D. Curtin. 1995. Managing nitrogen for sustainable crop production. *Fert. Res.* 42 :277-296.
- Campbell, C.A., F. Selles, G.P. Lafond, V.O. Biederbeck and R.P. Zenter. 2001. Tillage-fertilizer changes: Effects on some soil quality attributes under long-term crop rotations in a thin black chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 81:157-165.
- Chan, K.Y., D.P. Heenan and H.B. So. 2003. Sequestration of carbon and changes of soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: a review. *Aust. J. Exp. Agric.* 43 : 325-334.
- Chantigny, M. et D. Angers. 2005. Activité microbologique et qualité des sols : quoi de neuf sous nos pieds? Colloque en agroenvironnement, CRAAQ. 10 p.
- Côté, D. and S. Seydoux. 1990. Effect of liquid manure management on soil structure in various cultural systems. In proceedings of Eastern Canada Soil Structure Workshop Stone et al. ed. 163-173.
- Côté, D. et T.S. Tran. 1996. Effet de seize années de fertilisation en post-levée du maïs avec du lisier de porcs sur le rendement de la récolte et sur la teneur du sol en C et en N. Séminaire du Centre de recherche et d'expérimentation en sols. MAPAQ. Avril 1996. Sainte- Foy, Québec.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^{ère} édition. 294 p.
- Estevez, B.A., A. N'Dayegamiye and D. Coderre. 1996. The effect of earthworm abundance and selected soil properties after 14 years of solid cattle manure and NPKMg fertilizer application. *Can. J. Soil Sci.* 76:351-355.
- Giroux, M. 1991. Effets de différents systèmes culturaux sur l'évolution à long terme des propriétés biologiques, la fertilité et la productivité des sols. *Agrosol* 4 (2): 7-16.
- Hooker, B.A., T.F. Morris, R. Peters and Z.G. Gardon. 2005. Long-term effects of tillage and corn stalk return on soil carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. of Amer. J.* 69 :188-196.
- Jarecki, M. and R. Lal. 2003. Crop management for soil carbon sequestration. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22:1-32.
- Lal, R. 1991. Soil structure and sustainability. *J. Sustain. Agriculture* 1 : 67-92.
- Lal, R., J.M. Kimble, R.F. Follett and C.V. Cole. 1998. The SOC pool in U.S. soils and SOC loss from cultivation, p. 18-21. // The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Ann Arbor Press, Chelsea, MI.
- Martens, D.A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 32:361-369.
- Martens, D.A., and W.T. Frankenberger Jr. 1992. Modification of infiltration rates in an organic-amended irrigated soil. *J. Agron.* 84: 707-717.

- Mérisier, M.J., A. N'Dayegamiye et A. Karam. 1997. Effet de la fréquence de maïs fourrager dans la rotation et de divers amendements organiques sur l'évolution de la matière organique des sols. Congrès conjoint ORSTOM-AQSSS, août 1997.
- Mulvaney, R.L., S.A., Khan et T.R. Ellsworth. 2009. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen : A global dilemma for sustainable cereal production. *J. Environ. Qual.* 38 (nov.-dec.). 20 p.
- N'Dayegamiye, A et D.A. Angers. 1990. Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés. *Can. J. Soil Sci.* 70 : 259-262.
- N'Dayegamiye, A. et D. Côté. 1996. Effet d'application à long terme de fumier de bovins, de lisier de porc et de l'engrais minéral sur la teneur en matière organique et la structure du sol. *Agrosol* 9 (1): 31-45.
- N'Dayegamiye, A. and D. Côté. 1989. Effect of long-term pig slurry and solid cattle manure application on soil chemical and biological properties. *Can. J. Soil Sci.* 69:39-47.
- N'Dayegamiye, A., M. Goulet et M.R. Laverdière. 1997. Effet à long terme d'apports d'engrais minéraux et de fumier sur les teneurs en C et en N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. *Can. J. Soil Sci.* 77 : 351-358.
- N'Dayegamiye, A. et A. Drapeau. 2009. Influence de la nature des engrais organiques et du type de sol sur la dynamique de la structure et les teneurs en carbone et des substances humiques. *Agrosolutions* 20 (1): 15-22.
- Nyiraneza, J., M.H. Chantigny, A. N'Dayegamiye and M.R. Laverdière. 2009. Dairy cattle manure improves soil productivity in low residue rotation systems. *Agronomy Journal* 101:207-214.
- Rasse, D.P., A.J.M. Smucker and D. Santos. 2000. Alfalfa root and shoot mulching effects on soil hydraulic properties and aggregation. *Soil Sci. Soc. of Amer. J.* 64:725-731.
- Schulten, H.-R. and P. Leinweber. 2000. New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. *Biol. and Fertil. of Soils* 30:399-432.
- Schutter, M.E. and R.P. Dick. 2002. Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:142-153.
- Six, J., E.T. Elliot and K. Paustian. 2000. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1042-1049.
- Six, J., R.T. Conant, E.A. Paul and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241:155-176.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire. 133 p.
- Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. of Soil Sci.* 33:141-163.
- Wright, S.F. and R.L. Anderson. 2000. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains. *Biology and Fertility of Soils*. Vol. 31, 3-4: 249-253.

7. REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement M. Raynald Royer pour avoir effectué l'implantation, le suivi et la récolte des parcelles, de même que l'échantillonnage et la compilation des données d'analyse pendant les 10 années qu'a duré cette étude. Je tiens aussi à remercier l'équipe du laboratoire d'analyse des sols de l'IRDA et le personnel ouvrier de la Station de recherche de Saint-Lambert pour l'aide apportée pour les analyses en laboratoire et les travaux aux champs. Mes remerciements vont aussi à Mmes Claudine Jomphe et Julie Nadeau pour la lecture, la mise en page et la présentation du texte.