

## **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 (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O).**

### **Résumé**

La contribution de l'agriculture à l'émission de gaz à effets de serre (GES) ne représente qu'environ 10% des émanations totales générées par les divers secteurs de l'économie québécoise, ce qui ne l'a pas empêché de prendre diverses mesures afin de réduire les pertes de carbone et d'azote vers l'atmosphère, sous forme de CO<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>O. Les pertes de C sont souvent associées au travail intensif de sol qui déstabilise la structure, ce qui a pour effet d'accélérer la minéralisation de la matière organique. Au niveau de l'azote, les pertes se manifestent principalement par la dénitrification, phénomène répandu dans les sols soumis au compactage qui présentent souvent une faible aération et un mauvais drainage. Il est aussi reconnu que 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 ces systèmes agricoles, un choix approprié de rotations de cultures pourra contribuer à diminuer l'intensité et la fréquence du travail de sol, diminuant ainsi les taux de minéralisation de la matière organique des sols et les niveaux de compactage. Plusieurs publications effectuées dans le cadre d'essais de longue durée sur les rotations, les modes de fertilisation (engrais minéraux et fumier) et les pratiques culturales sont à l'origine de la présente analyse de synthèse. Il a ainsi pu être démontré que le travail réduit de sol, associé à des rotations judicieuses, permettent l'enrichissement des sols en matière organique. De même, les applications de fumier ont permis la préservation et l'augmentation du C dans les sols. Ces régies agricoles ont favorisé la formation d'agrégats stables de sol qui résistent mieux aux impacts des gouttes de pluie (battance) et à l'agressivité du travail de sol. Ces études ont indiqué que l'agrégation permet de protéger le carbone et l'azote du sol contre la décomposition rapide par la microflore, ce qui constitue l'un des meilleurs moyens d'accroître la séquestration du carbone dans le sol. La matière organique, l'agrégation, la stabilité structurale, ainsi que les microorganismes du sol sont tous interreliés et ils jouent un rôle complémentaire dans la dynamique du C et de N dans les sols agricoles.

## 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<sup>6</sup> tonnes.

Les principaux gaz à effet de serre sont le méthane (CH<sub>4</sub>), le dioxyde de C (CO<sub>2</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Les émissions de GES sont exprimées sous forme d'équivalent CO<sub>2</sub> (Eq-CO<sub>2</sub>). Au Québec, en 1990, le méthane représentait près de 37 % des émissions avec 3460 Gg d'Eq-CO<sub>2</sub>, le protoxyde d'azote représentait 61 % avec 2973 Gg d'Eq-CO<sub>2</sub> et enfin 2,5 % pour le dioxyde de C avec 165 Gg d'Eq-CO<sub>2</sub>.

On estime que le secteur agricole serait responsable d'environ 9,5 % des émissions totales de GES (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>). 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<sub>2</sub>O, 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 (MO) des sols constitue le réservoir le plus important de C 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<sub>2</sub>. Ce phénomène est souvent attribué au travail intensif qui en aérant le sol, accélérerait l'oxydation de la MO. Toutefois, les sols peuvent se réapproprier ce carbone et ainsi inverser ce processus. Cette capacité des sols de séquestrer le carbone organique dépend en partie du climat, des types de sol, des régions agricoles et des pratiques culturales utilisées.

Au Québec, les fermes laitières occupent les trois quarts des superficies cultivées. Ce type de production est avantageux au niveau de la diminution des pertes de C et des émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al,

1990) a démontré que les sols sous prairie ne subissaient pas de pertes de MO, contrairement aux sols intensément cultivés en cultures commerciales.

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 MO. 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 MO du sol.

L'augmentation des quantités de C entreposées dans les sols agricoles, suite à l'adoption de pratiques de conservation, permet de réduire la quantité de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère et contribue significativement à l'amélioration de la fertilité et de la qualité des sols. De plus, l'accumulation de MO résulte en une augmentation de la réserve en éléments nutritifs, plus particulièrement au niveau de l'azote. Cependant, il existe un manque important de données tant au Québec qu'au Canada, sur la capacité de nos sols à séquestrer le carbone, ainsi qu'une incertitude sur ce potentiel réel à la ferme.

L'évaluation du potentiel des sols agricoles du Québec à séquestrer le carbone constitue un besoin prioritaire dans un contexte de réduction du carbone atmosphérique. Cependant, la quantification de l'évolution du carbone du sol en réponse aux changements des modes de gestion des cultures reste problématique. Même si la MO des sols a toujours été un sujet de recherche important, cette fraction du sol demeure difficile à caractériser, en raison de la composition variable des biomasses apportées et de la persistance très variable des produits qui découlent de leur transformation. La teneur des sols en C peut varier de façon importante et ce souvent même à l'intérieur d'un champ et elle est en évolution constante. La difficulté d'estimer avec précision les apports de C en provenance des racines ainsi que des fractions ayant des durées de vie très courtes, tels les exsudats racinaires, n'est pas de nature à permettre la production de bilans très précis de C dans des contextes de modifications fréquentes de régies et pratiques culturales.

Le présent rapport constitue donc une synthèse de la dynamique du C et de l'azote dans le sol, et elle est effectuée à partir des données obtenues d'expériences de moyenne (9 ans) et de longue durée (25 ans) et portant sur des systèmes de rotation et différents modes de fertilisation et de travail de sol.

## **2. Matériel et méthodes**

### **2.1. Essais**

Quatre essais sont à l'origine de cette synthèse. Trois expériences ont été initiées en 1977-1978 à la Station de recherche de l'IRDA à Saint-Lambert - de- Lauzon sur un loam argileux de la série Le Bras. Un essai sur les modes de travail du sol a débuté en 1993 à l'Assomption (Observatoire de la qualité des sols, IRDA).

1. Essai de longue durée portant sur la fertilisation intégrée de l'engrais minéral et du fumier solide de bovins, début 1977.

Le dispositif expérimental utilisé dans cet essai est en split-plot (parcelles partagées) et comporte deux doses de fumier solide de bovins (0, 20 Mg ha<sup>-1</sup>) 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.

2. Essai de longue durée portant sur des rotations de cultures utilisées sur des fermes laitières; début 1978.

Trois systèmes de rotations (Tableau 1) : une monoculture de maïs fourrager (S-I), une rotation maïs fourrager - orge grainée - mil/trèfle -mil/trèfle (S-II), une rotation maïs fourrager- orge – orge - blé (S-III) sont comparés à une rotation témoin, soit une prairie implantée à partir d'une céréale sous-ensemencée avec un mélange mil-trèfle: orge grainée – mil/trèfle–mil/trèfle-mil/trèfle (S-IV). La durée des rotations est de quatre ans.

**Tableau 1. Description des systèmes culturaux.**

Systèmes culturaux	Année de rotation			
	1	2	3	4
S-I	Maïs fourrager	Maïs fourrager	Maïs fourrager	Maïs fourrager
S-II	Maïs fourrager	Orge grainée	Mil et trèfle	Mil et trèfle
S-III	Maïs fourrager	Orge	Orge	Blé
S-IV	Orge grainée	Mil et trèfle	Mil et trèfle	Mil et trèfle

3. Essai de longue durée portant sur la gestion de lisier de porc en culture de maïs; début 1978. Le lisier a été appliqué annuellement à raison de 0, 30, 60, 90 et 120 Mg/ha, sur une culture de maïs fourrager en monoculture; un travail réduit de sol était inclus dans la régie.

4. Observatoire de la qualité des sols; début 1993.

Le travail conventionnel et le semis-direct ont été appliqués dans une rotation de maïs grain-maïs grain-orge-soya, en combinaison avec des doses d'azote complète (180 kg N/ha) et réduite (120 kg N/ha) pour la culture de maïs, et de 75 et 50 kg N/ha pour l'orge. Ces systèmes étaient comparés à une prairie de luzerne-mil.

## 2.2. Mesures effectuées

L' étude de la distribution des agrégats en fonction de leur taille ainsi que de leur stabilité à l'eau, a été effectuée par tamisage du sol sur une série de tamis de différents diamètres. 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 gcm<sup>-3</sup>. Les teneurs en C et N du sol et des agrégats ont été extraites selon les techniques Walkley-Black et Kjeldhal, respectivement.

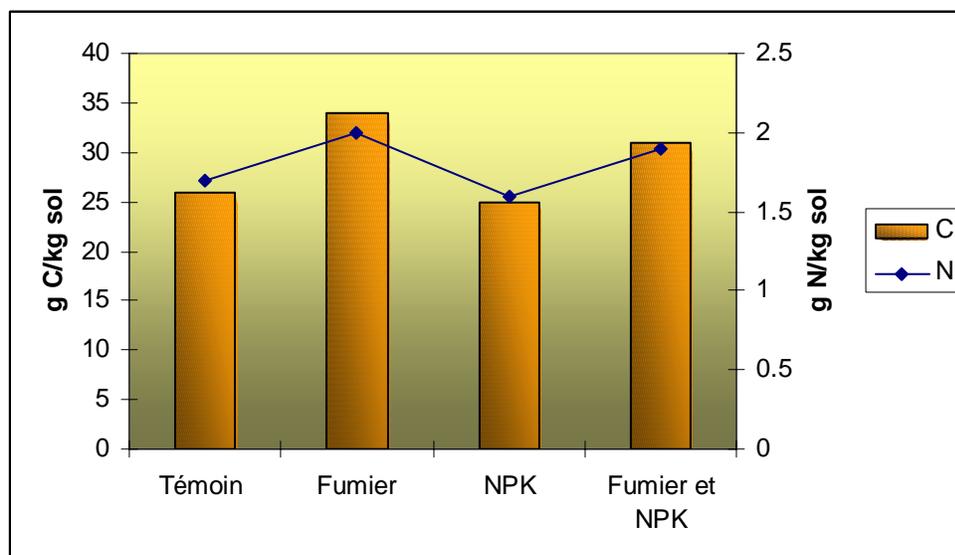
### **3. Synthèse des résultats et discussion.**

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

##### **3.1. 1. Essai 1 portant sur les effets des engrais minéraux et des fumiers**

Les teneurs en C et N du sol après 21 ans de culture (1977-1997) sont présentées à la figure 1. La mise en place de la rotation maïs fourrager – maïs fourrager – orge – blé sur un sol initialement sous prairie, s'est traduite par une diminution de 9% de la teneur initiale en carbone organique dans le témoin (sans fertilisation minérale ou organique), pour atteindre 12% dans le sol ayant reçu une fertilisation complète en N, P et K. Par contre, les applications annuelles de fumier à raison de 20 Mg ha<sup>-1</sup> sur base humide ont accru les niveaux de C de 26% et 10% respectivement, dans les traitements avec fumier seul et avec fumier complétement 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.

Les coefficients annuels de minéralisation nette de la matière organique ( $K_2$ ) ont été de 0,5% et de 0,8% respectivement pour le témoin et le sol fertilisé avec l'engrais NPK (Tableau 2). Dans cette rotation de maïs fourrager-céréales, les coefficients annuels de minéralisation nette ont été similaires à ceux mesurés par Giroux (1991) lors d'une étude portant sur des rotations effectuées sur le même type de sol.



**Figure 1: Effet de fumier de bovins et d'engrais minéraux sur le contenu en C et N du sol entier.**

Les valeurs obtenues se comparent également aux données de référence sur la minéralisation de la matière organique présentées par Soltner (1986) pour des conditions climatiques de régions tempérées. Selon cet auteur, les coefficients de minéralisation ( $K_2$ ) se situent, selon les textures des sols, entre 1 et 3% pour les sols agricoles. Les apports de fumier ont conduit à des taux annuels d'accumulation en matière organique (h) de 3,1% et 7,5%, respectivement pour le fumier avec NPK et le fumier seul.

**Tableau 2. Effets d'apports de fumier de bovins et d'engrais minéraux sur le bilan de la matière organique.**

Traitement	Sans fumier		Avec fumier	
	M.O. (%)	$K_2$	M.O. (%)	h
0	4,4	0,0054	6,0	0,075
PK	4,3	0,0068	5,3	0,031
NPK	4,2	0,0080	5,3	0,031

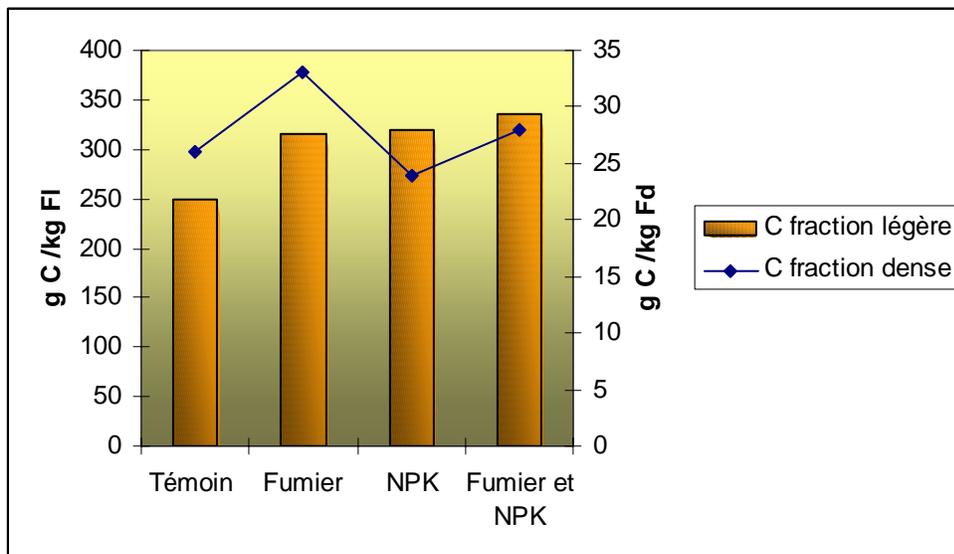
+ taux initial de matière organique: 4,8%

$K_2$ , h = respectivement, coefficient de minéralisation et taux d'accumulation de la matière organique

Dans le type de sol étudié qui présente une texture limono-argileuse, on peut considérer que les coefficients de minéralisation nette ( $K_2$ ) sont faibles dans le témoin (0,5%). Par contre, la fumure minérale NPK a augmenté la minéralisation de MO (0,8%). Même si la fumure minérale a permis d'accroître les rendements pour les cultures de la rotation, aucune accumulation de MO 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 matière organique 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 la matière organique. De plus, cette baisse de MO peut résulter de l'effet cumulatif du travail intensif de sol effectué de 1976 à 1992 (labour d'automne, deux hersages printaniers suivis de un ou deux sarclages mécaniques) sur la décomposition de la MO.

Une étude effectuée en 1997 sur la qualité de MO (N'Dayegamiye et al 1997) a démontré que les apports de fumier ont maintenu ou accru les teneurs totales en C du sol ainsi que les fractions légère et dense de la MO (Figure 2); la fraction dense référant à la fraction humifiée ou plus stable de la MO. La fertilisation minérale a également augmenté les teneurs en C de la fraction légère de la MO, mais non par une accumulation significative de C au niveau de la fraction stable de la MO.

Ces résultats montrent que la fertilisation minérale prolongée, sans retours importants de résidus organiques ou sans ajouts d'amendements organiques, peut diminuer les teneurs du sol en MO stable. Il ressort que le fumier solide de bovins, apporté régulièrement, se traduit par des effets bénéfiques au niveau de la matière organique 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%.



**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).**

### 3.1. 2. Essai 2 portant sur les effets d'apports de lisier et de travail réduit de sol

Un essai sur les apports de lisier en culture de maïs fourrager, soumise à un travail réduit de sol, a été mis sur pied en 1978, afin d'évaluer la valeur fertilisante du lisier, ainsi que les impacts du travail réduit sur certaines propriétés du sol. Les données obtenues sur l'enrichissement du sol en matière organique et en azote sont présentées dans les tableaux 3 et 4.

**Tableau 3. Teneur du sol en C en fonction de la profondeur, après 24 ans d'apport de lisier (Mg/ha/an) ou de fumure minérale, sur une culture de maïs fourrager.**

		Teneur du sol en C (%)				
Dose de lisier (Mg/ha)	NPK	30	60	90	120	
0-10 cm	2.1	2.2	2.6	2.5	2.4	
10-20 cm	2.2	2.0	2.5	2.4	2.4	
20-30 cm	1.7	1.5	1.8	2.3	2.4	
30-40 cm	0.64	0.64	0.93	1.0	0.87	
40-50 cm	0.20	0.19	0.27	0.28	0.38	
		Quantité de C accumulé dans le sol (kg/ha)				
0-30 cm	78000	74000	86000	86000	92000	

Tout comme pour l'engrais minéral, les apports de lisier ont rapidement diminué les niveaux de MO du sol qui était sous prairie avant le début de l'expérimentation (Denis Côté, communication personnelle). Cependant, on observe que les niveaux actuels du sol en MO et en azote sont légèrement plus élevés (Tableaux 3 et 4) dans les sols fertilisés avec 60 jusqu'à 120 Mg/ha de lisier, en comparaison avec l'engrais minéral NPK ou la plus faible dose de lisier (30 Mg/ha). L'accumulation du sol en MO variait de 8600 à 92000 kg C/ha avec les apports de 60 à 120 Mg/ha de lisier ce qui pourrait être attribuable aux résidus de culture (racines), ainsi qu'au C en provenance des microorganismes (C de la biomasse microbienne); le lisier stimulant fortement leur croissance.

**Tableau 4. Teneur du sol en N-total en fonction de la profondeur, après 24 ans d'apport de lisier (Mg/ha/an) ou de fumure minérale, sur une culture de maïs fourrager.**

Teneur du sol en N-total (%)					
Dose de lisier (Mg/ha)	NPK	30	60	90	120
0-10 cm	0.15	0.16	0.18	0.18	0.17
10-20 cm	0.14	0.14	0.16	0.17	0.15
20-30 cm	0.12	0.11	0.12	0.15	0.10
30-40 cm	0.06	0.06	0.07	0.09	0.06
40-50 cm	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Quantité de N-total stocké dans le sol (kg/ha)					
0-30 cm	5200	5200	5800	5900	5900

Ces résultats tendent aussi à montrer que le travail réduit de sol peut diminuer l'importance des pertes de MO et d'azote dans une monoculture de maïs fourrager fertilisée avec le lisier. Cependant, il apparaît beaucoup plus recommandable d'apporter les lisiers dans le cadre de rotations qui laissent d'importantes quantités de résidus organiques au sol, telles les prairies implantées à partir de céréales grainées ou maïs grain – céréales.

### 3.1.3. Rotations des cultures.

Les rotations des cultures sont essentielles pour assurer le maintien de la productivité des sols agricoles. Leurs rôles sont multiples : diminuer l'infestation de mauvaises herbes et couper les cycles des maladies et insectes, enrichir les sols en matière organique grâce aux résidus de

récolte laissés sur place, ce qui permet l'amélioration des propriétés des sols. Par ailleurs, la succession de différentes cultures dans les rotations permet souvent l'alternance et/ou la réduction du travail de sol; certaines cultures exigeant un travail intensif (ex. maïs, pomme de terre..), tandis que d'autres nécessitent un nombre réduit d'opérations (céréales, prairie), influençant ainsi le taux de décomposition de la MO.

Certaines cultures de la rotation ont également la capacité de capter des quantités plus importantes de C de l'atmosphère et peuvent en retourner une grande proportion aux sols par le biais des résidus de cultures. Ces derniers incluant racines, tiges ou pailles, constituent une source majeure de MO qui permet d'en maintenir ou d'accroître le niveau dans le sol. Une partie de cette matière organique est décomposée par les microorganismes du sol, tandis que l'autre évolue vers la formation de la MO organique stable, ou l'humus. Les quantités de résidus de récolte et de C stable générées dans le sol dépendent donc des cultures et du système de rotation utilisé. Au Québec, certaines rotations peuvent maintenir un bilan positif d'humus (maïs grain - céréales), tandis que d'autres peuvent appauvrir les sols en MO, si des amendements organiques n'y sont pas périodiquement apportés. Ces rotations incluent souvent une fréquence plus grande de cultures maraîchères (ex. pomme de terre) ou de maïs fourrager reconnues pour le peu de résidus laissés au sol après la récolte. Les rotations incluant la culture du soya sont de plus en plus fréquentes; tout comme la pomme de terre, cette culture laisse peu de résidus organiques au sol.

Une étude du bilan de la MO des sols a été effectuée à partir de quatre systèmes de rotations (Tableau 5).

**Tableau 5. Bilan de la matière organique – Système de culture (1978-1990).**

Systèmes culturels	M.O.	M.O.	Perte annuelle	Perte M.O.	Coefficient de minéralisation
	(%)	(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha/an)	(%)
S-I	5,01	130260	20540	1710	1,21
S-II	5,43	141180	9620	800	0,50
S-III	5,20	135200	15600	1300	0,98
S-IV	5,80	150800	---	---	---

Les résultats obtenus et publiés par Giroux (1991) font référence à l'essai 2 présenté à la sous-section 2.1 et au Tableau 1, et ils démontrent que la monoculture de maïs fourrager (S-I) a diminué les niveaux de matière organique du sol. Par contre, les systèmes de prairie (S-IV) ou des rotations incluant les cultures fourragères (S-II) ont permis le maintien de niveaux élevés de matière organique, comparativement à la rotation de maïs fourrager-céréales (S-III) et à la monoculture de maïs fourrager (S-I).

La rotation de cultures incluant maïs fourrager et céréales (avec paille récoltée), laisserait très peu de résidus organiques (2.5 à 3 t/ha), alors que les prairies en génèrent des quantités nettement supérieures qui sont précurseurs d'humus (Soltner 1986). Dans la monoculture de maïs fourrager, les pertes annuelles en matière organique ont été élevées (1710 kg/ha), alors qu'elles étaient de 1300 kg/ha pour la rotation maïs fourrager – céréales (Tableau 5). Par contre, la rotation maïs fourrager incluant des cultures fourragères, a contribué à réduire la perte en matière organique à 800 kg/ha. Les coefficients de minéralisation nette de MO étaient de 1,21, 0,50 et 0,98% respectivement pour les systèmes S-I, II et III (Tableau 5).

En extrapolant les données obtenues après 12 ans sur une plus longue période, Giroux (1991) a démontré qu'il faudrait environ 54 ans à la monoculture de maïs fourrager (S-I) pour amener le niveau de matière organique du sol à 3%, de 5,8% qu'il était en début de projet (Tableau 6). Pour le système de rotation incluant maïs fourrager et cultures fourragères (S-II), ce niveau critique de MO dans le sol serait atteint après 120 ans. Ces résultats démontrent qu'à long terme, une fréquence élevée de maïs fourrager dans une rotation affecte négativement le bilan de la matière organique des sols. Par contre, une fréquence accrue de plantes fourragères et de prairie tend à favoriser l'accumulation de carbone dans les sols.

Cette évolution estimée de la MO a été confirmée par les données analytiques obtenues sur les changements de niveaux de la MO de 1978 à 2002 dans le cadre de cet essai (Tableau 7). En effet, les niveaux de matière organique du sol étaient de 4,3% après 24 ans, sous la culture continue de maïs fourrager (S-I). On a donc observé une diminution graduelle et significative des niveaux de MO dans le sol sous monoculture de maïs fourrager qui s'est échelonnée de 1978 à 2002. Dans la rotation de maïs fourrager avec blé et orge (S-III), la diminution de la MO du sol était beaucoup plus faible, probablement en raison de l'importance des résidus de récolte (racines). Il est aussi possible que les coefficients d'humification des racines soient plus élevés pour les céréales que pour le maïs-fourrager.

**Tableau 6. Évolution à long terme de la matière organique dans 3 systèmes culturaux, calculée à partir d'un modèle de premier ordre et des coefficients de perte mesurés après 12 ans.**

M.O (%)	S – I	S – II	S – III
	temps (ans)	temps (ans)	temps (ans)
5,8	0	0	0
5,5	4,4	9,7	5,8
5,0	12,3	27,1	16,3
4,5	20,9	46,3	27,9
4,0	30,6	67,8	40,8
3,5	41,6	92,1	55,4
3,0	54,2	120,2	72,4
2,5	69,1	153,3	92,3
demi-vie	57,0	126,4	76,1

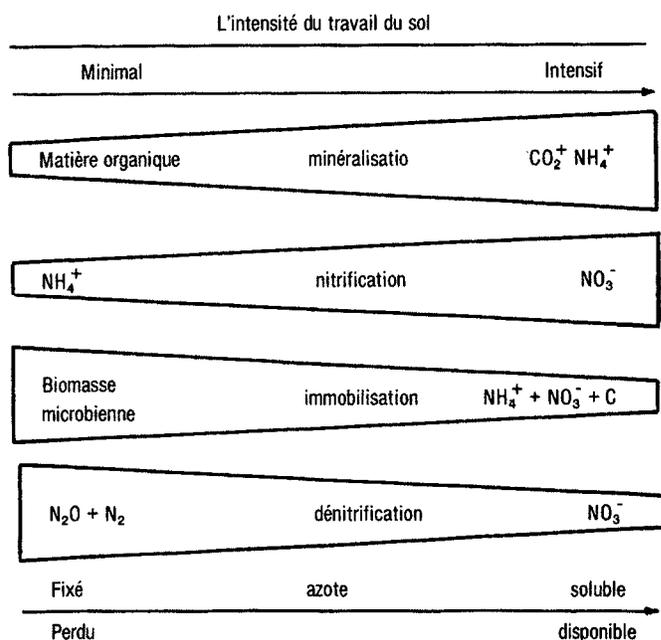
**Tableau 7. Évolution de la matière organique des sols selon les systèmes culturaux.**

Systèmes culturaux	1978	1990	1998	2002
S-I	5,78	5,01	4,56	4,26
S-II	5,80	5,43	5,00	4,88
S-III	5,83	5,20	4,83	4,67
S-IV	5,80	5,80	5,20	5,54

### 3.1. 4. Influence du travail de sol sur la dynamique du C et de N

Le travail de sol a été pendant des décennies et est encore aujourd'hui utilisé par plusieurs producteur/trices(s) en vue de préparer un meilleur lit de semence tout en améliorant l'aération du sol et en augmentant le volume de sol disponible à l'enracinement. Le travail de sol influence aussi le développement et les activités de la microflore du sol. Par contre, le travail fréquent ou intensif de sol peut aérer excessivement le sol, augmenter l'importance des populations microbiennes, ce qui se traduit par une activité accrue et à une minéralisation plus intense de la matière organique (Figure 3).

Le travail de sol affecte non seulement le nombre de microorganismes, mais également la composition et la distribution des populations dans le sol (Doran 1980); il accroît également 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.



**Figure 3. Impact de l'intensité du travail de sol sur la minéralisation du carbone et de l'azote du sol.**

Toutefois, un travail excessif de sol conduit à la diminution rapide de la matière organique. D'autre part, un travail réduit pourrait conduire à une plus grande accumulation de résidus organiques au sol, à l'immobilisation d'azote et aux pertes de l'azote du sol ou de l'engrais minéral ou organique par dénitrification. Le travail de sol détermine ainsi la dynamique des microorganismes du sol et par conséquent la dynamique de la MO. Les pertes rapides de MO dépendent de l'intensité du travail de sol, ainsi que de l'intensité de fertilisation, de la quantité de résidus organiques retournés au sol, incluant les apports d'amendements organiques (Rasmussen et Collins 1991). Le travail minimal et le semis-direct peuvent permettre l'accumulation de MO, comparativement au travail conventionnel (Havlin et al. 1990; Carter

1992). Par exemple, dans un même sol, les niveaux de MO étaient de 30,7 Mg C ha<sup>-1</sup> en travail minimal, comparativement à 26,1 Mg C ha<sup>-1</sup> en travail conventionnel.

Le travail du sol détermine aussi l'accumulation et la disponibilité de l'azote. Dans les sols soumis au travail minimal, le nombre de microorganismes augmente en surface (0-10 cm) et diminue rapidement en profondeur de la couche arable (10-20cm). En effet, Doran (1980) a observé une diminution significative des microorganismes aérobies et des nitrificateurs, et une augmentation des dénitrificateurs dans la couche 10-20 cm du sol.

Dans le cadre des travaux menés au site de l'Observatoire de l'Assomption (IRDA) sur la qualité des sols, les changements au niveau de la MO et de l'azote ainsi que l'évolution des propriétés physiques du sol, sous divers modes de travail du sol et de fertilisation sont indiqués au tableau 8. Les résultats présentés indiquent que pendant une période de 9 ans, les pratiques culturales n'ont pas significativement diminué les niveaux de MO et d'azote total, comparativement à ceux mesurés dans la prairie.

De même, le travail intensif (labour et hersage) n'a pas conduit à une diminution de la MO et de l'azote par rapport au travail réduit de sol. De même, les applications de fumure minérale complète (180 kg N/ha) associées au travail conventionnel de sol ne se sont pas traduites par une réduction des teneurs en MO et en azote. Ces résultats suggèrent que les cultures de rotation (maïs grain – orge-soya) ont permis des retours suffisants de résidus organiques, maintenant un bilan positif de C dans le sol.

Cependant la dynamique du C et de N est influencée à long terme par les modes de travail de sol. Ces variations sont attribuables à la composition différente des communautés microbiennes et à leur action différente sur la décomposition de la MO (Gupta et Germida 1988). Ces auteurs ont indiqué que les champignons décomposent surtout la MO localisée en surface (0-5 cm), tandis que les bactéries décomposent plus la MO incorporée entre 5 à 15 cm.

**Tableau 8. Effet du travail de sol et de la fertilisation azotée sur l'évolution du C et N du sol (LSM des effets).**

		% N	N t/ha	% C	C t/ha	Densité
Prairie	1994	0,078	2,60	0,94	31,2	1,57
	1998	0,100***	3,25**	1,08	35,2	1,58
	2001	0,091**	2,91	1,09	35,1	1,50
Semis- direct N+.	1994	0,081	2,64	0,89	28,9	1,63
	1998	0,097***	3,20	0,98	32,1	1,64
	2001	0,092	3,03	1,08	35,8	1,65
Labour N+	1994	0,098	2,94	1,29	38,6	1,49
	1998	0,111**	3,49	1,19	37,2	1,56
	2001	0,102	3,04	1,22	36,3	1,49
Semis-direct N-	1994	0,130	3,93	1,02	35,6	1,51
	1998	0,122	3,65	1,09	31,5	1,50
	2001	0,121	3,79	1,14	34,9	1,57
Labour N-	1994	0,108	2,85	1,24	32,8	1,31
	1998	0,114	3,40	1,22	36,5	1,50
	2001	0,106	3,22	1,25	38,0	1,52
% CV		3,85	6,84	8,29	10,46	5,22

*Lsm : \*\*; \*\*\* : différence significative à  $p > 0.05$  et  $0.01$ , respectivement, selon les années.*

*N+ et N- : doses de 180 et 120 kg N/ha pour le maïs-grain, et de 75 et 50 kg N/ha pour les céréales.*

Le travail de sol détermine donc le profil des communautés microbiennes, et par conséquent la dynamique de la MO et de l'azote dans les sols. Sous le travail réduit et minimal, les populations fongiques qui sont dominantes par rapport à celles des bactéries, avec un ratio bactéries-champignons de 0.57, conduisent à une plus faible décomposition de C et N, et ainsi à une plus grande accumulation de ces éléments. En travail conventionnel, les populations de bactéries sont plus nombreuses que celles des champignons et elles sont actives durant toute la saison de végétation, ce qui favorise une décomposition plus élevée de la MO. Avec le travail conventionnel, on retrouve aussi des populations élevées d'ammonificateurs et de nitrificateurs, associées à la fertilité azotée des sols et à la disponibilité de cet élément nutritif. Par contre,

avec le travail minimal de sol où il y a prédominance de champignons en surface, on peut retrouver une accumulation de résidus organiques et une plus faible disponibilité d'azote.

Comprendre les effets du travail de sol et de la dynamique des espèces de microorganismes peut ainsi aider à connaître ou à prévoir la dynamique et la distribution de MO, ainsi que celle de la structure des sols.

#### **4. La structure protège le C et N du sol**

Les dynamiques du C et de N dépendent de la structure du sol. Pour comprendre la dynamique du C, il importe de connaître la hiérarchisation de l'agrégation et la distribution du C dans les agrégats. Ainsi, on distingue trois types de liants organiques qui interviennent : (1) les polysaccharides et produits microbiens qui tendent à former des liens entre les microagrégats pour former les macroagrégats (Elliot 1986), (2) une autre fraction de cette matière organique localisée entre les agrégats qui est très vulnérable aux travaux de sol; (3) une dernière fraction sous forme de substances humiques et de C des champignons, qui forme les associations avec les particules minérales et qui est plus résistante aux travaux de sol et à la décomposition microbienne (Oades and Waters 1991) et intervient au niveau de la stabilisation de la structure.

Les filaments des champignons et les produits bactériens jouent un rôle important dans la formation d'agrégats et leur stabilisation, grâce à la production de polysaccharides et aux liens entre microagrégats et filaments fongiques. Lorsque les agrégats de sol ne sont pas perturbés, les sites d'échange des argiles et les micropores sont enveloppés de liants organiques (polysaccharides microbiens), réduisant ainsi l'accès aux microorganismes et à leurs activités enzymatiques (Foster 1981). La contribution des bactéries et des actinomycètes à l'agrégation, serait attribuable à la production de polysaccharides, mais celle des champignons serait plus reliée aux substances humiques provenant des corps fongiques contenant la chitine, assurant ainsi une structuration plus forte (Aspiras 1971). C'est pourquoi la stabilisation des macroagrégats (>0,250mm) qui protège la MO et la structure est principalement attribuable aux champignons (Burns et Davies 1986).

Les vers de terre participent également à la formation et à la stabilisation des agrégats grâce au mélange de particules de sol, de matières organiques et de microorganismes à travers leur tube digestif (action physique), stimulant ainsi le développement de la microflore, particulièrement

celle des champignons (Marinissen et Dexter 1990). Dans un sol avec applications fréquentes de fumier solide de bovins, Estevez et al. (1996) ont également démontré que les populations de vers de terre étaient significativement corrélées aux activités biologiques et à la proportion d'agrégats stables du sol.

Le travail du sol influence la dynamique de la structure, de la matière organique et de l'azote dans les sols agricoles. 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.

Dans l'essai mené à l'Observatoire de l'Assomption sur la qualité des sols, les pratiques culturales étudiées n'ont pas négativement affecté la structure du sol (Tableau 9). En effet, même si le sol n'était pas très riche en MO, les proportions de macroagrégats (>0,25 mm) représentaient de 51 à 65% des agrégats des sols. Les valeurs les plus élevées (65 et 67%) étaient mesurées dans la prairie et dans le sol sous semis-direct et fumure minérale réduite (120 kg N/ha). Ces proportions de macroagrégats tendent à diminuer avec le travail conventionnel et la fertilisation minérale complète (180 kg N/ha). L'indice de la stabilité à l'eau tel que fourni par le DMP (Diamètre Moyen Pondéré) était plus élevé pour le sol sous prairie que pour le sol sous la rotation maïs-grain-orge-soya, mais aucune différence significative n'était enregistrée entre les pratiques culturales étudiées.

Ce maintien d'une bonne structure pourrait être relié à la disponibilité de sources carbonées découlant des cultures de maïs grain et d'orge, qui étaient les principales cultures de rotation. Dans ces cultures, les quantités de résidus organiques retournées au sol sont généralement proportionnelles aux rendements des cultures et représentent en moyenne 8 et 5 tonnes/ha pour le maïs et les céréales. Dans un bon système de rotation, l'utilisation occasionnelle du travail conventionnel en alternance avec le travail réduit et surtout le travail minimal, pourrait permettre d'éviter certains problèmes tel la stratification des nutriments tout en maintenant un niveau élevé de matière organique dans la couche supérieure du sol et maintenir une bonne structure.

**Tableau 9. Effet du travail du sol et de la fertilisation azotée sur la répartition des agrégats selon leur taille.**

Traitements	Agrégats (%)					
	5 mm	2 mm	1 mm	0,25 mm	<0,25 mm	D.M.P. mm
Prairie permanente	39,42	15,35	5,06	5,94	34,22	3,21
Semis-direct N+	17,22	24,13	5,51	9,16	43,96	2,15
Labour N+	21,22	18,40	4,34	7,08	48,95	2,44
Semis-direct N-	26,05	22,98	8,99	9,06	32,92	2,69
Labour N-	27,52	14,20	5,50	7,78	45,01	2,41

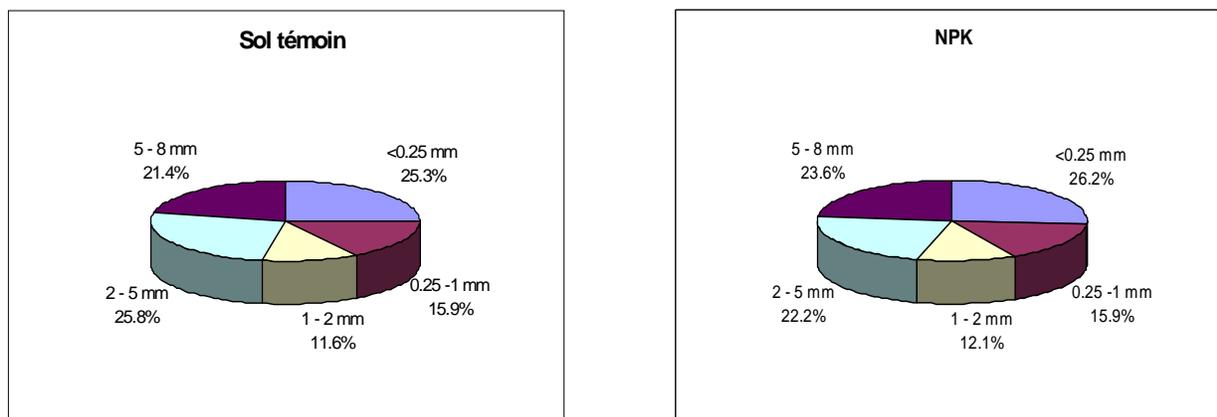
*N+ et N- : doses de 180 et 120 kg N/ha pour le maïs-grain, et de 75 et 50 kg N/ha pour les céréales.*

Tisdall et Oades (1982) ont indiqué que le taux de destruction des agrégats par le travail de sol dépendait de leur taille. Si on revient à la schématisation du processus de structuration des sols donnée par ces auteurs, on remarque que la structure de base pour la formation des agrégats est constituée par les microagrégats : particules de sols-métaux-complexes humiques. Ces microagrégats inférieurs à 0,250 mm en diamètre représentent en moyenne entre 40 et 60% des agrégats du sol et ne sont pas affectés par les pratiques culturales (Tisdall et Oades 1982).

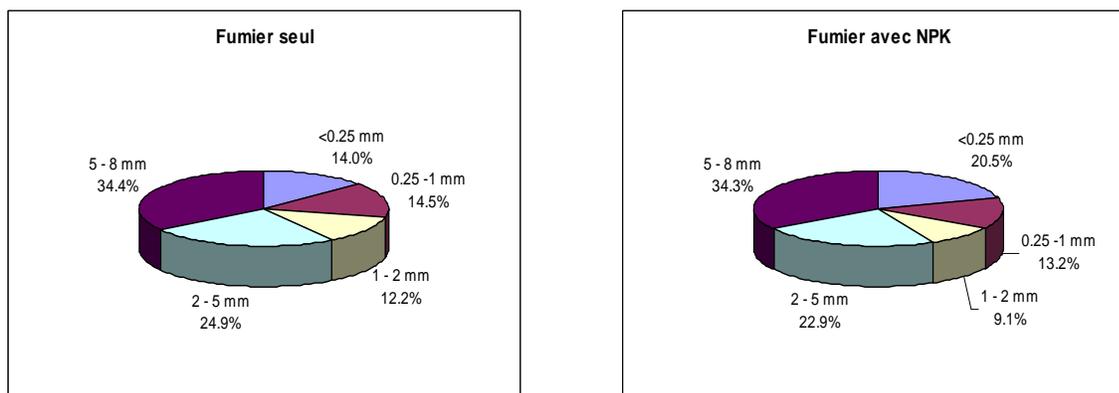
Cependant, une proportion plus élevée de microagrégats dans le sol est un signe d'un sol dégradé, sujet à la compaction et présentant de mauvaises conditions de croissance pour les végétaux. Par contre, l'augmentation de macroagrégats (> 0,250 mm) qui résultent d'un

assemblage de microagrégats par les agents liants, tels les polysaccharides et les substances humiques, est le reflet d'un sol amélioré par de bonnes régies agricoles.

Le mode de fertilisation influence également la dynamique de la structure, de la matière organique et de l'azote dans les sols. Les essais de longue durée ont démontré que dans la rotation maïs fourrager-céréales, la fertilisation minérale à long terme n'avait pas eu d'effets positifs sur la stabilité structurale du sol, contrairement aux apports de fumier solide de bovins (Figures 4 et 5).

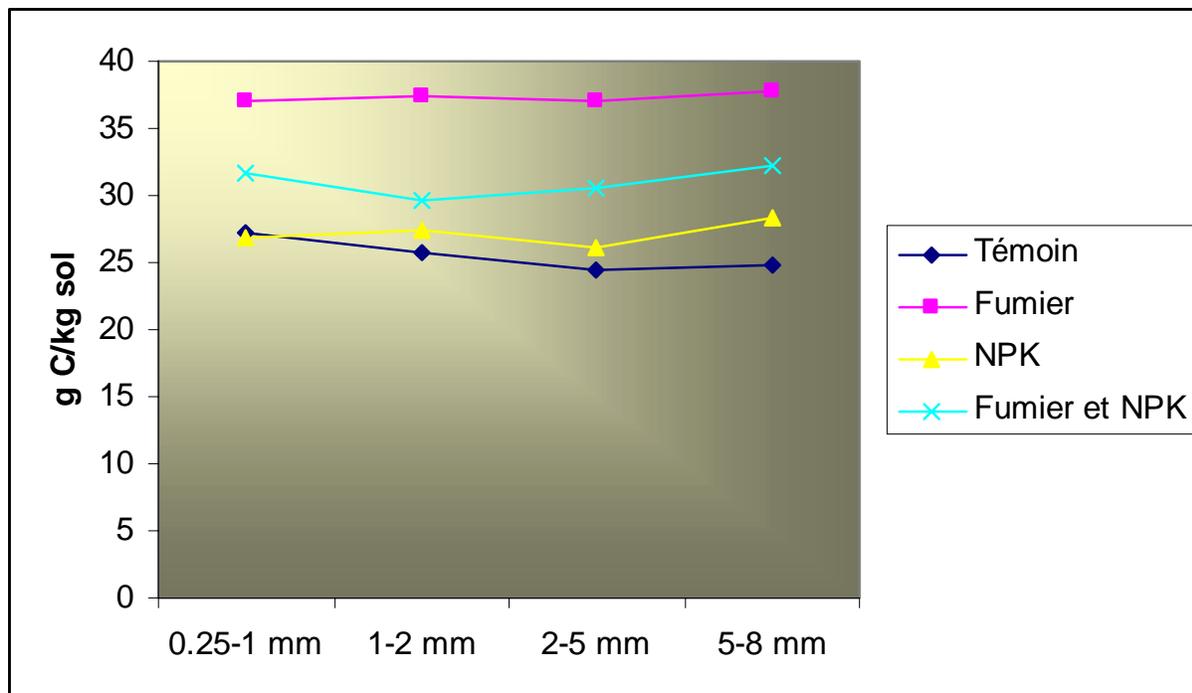


**Figure 4: Effet de la fumure minérale sur la distribution des agrégats du sol**



**Figure 5: Effet du fumier de bovins sur la distribution des agrégats du sol**

En effet, l'apport de fumier solide de bovins a significativement augmenté la proportion d'agrégats de 5-8mm. Ces macroagrégats représentent 34% dans les sols ayant reçu le fumier, comparativement au sol témoin et au sol fertilisé avec les doses recommandées pour les cultures (21,4 à 23,6% respectivement).



**Figure 6. Influence des engrais minéraux et du fumier solide de bovins sur l'enrichissement en carbone des diverses tailles d'agrégats du sol.**

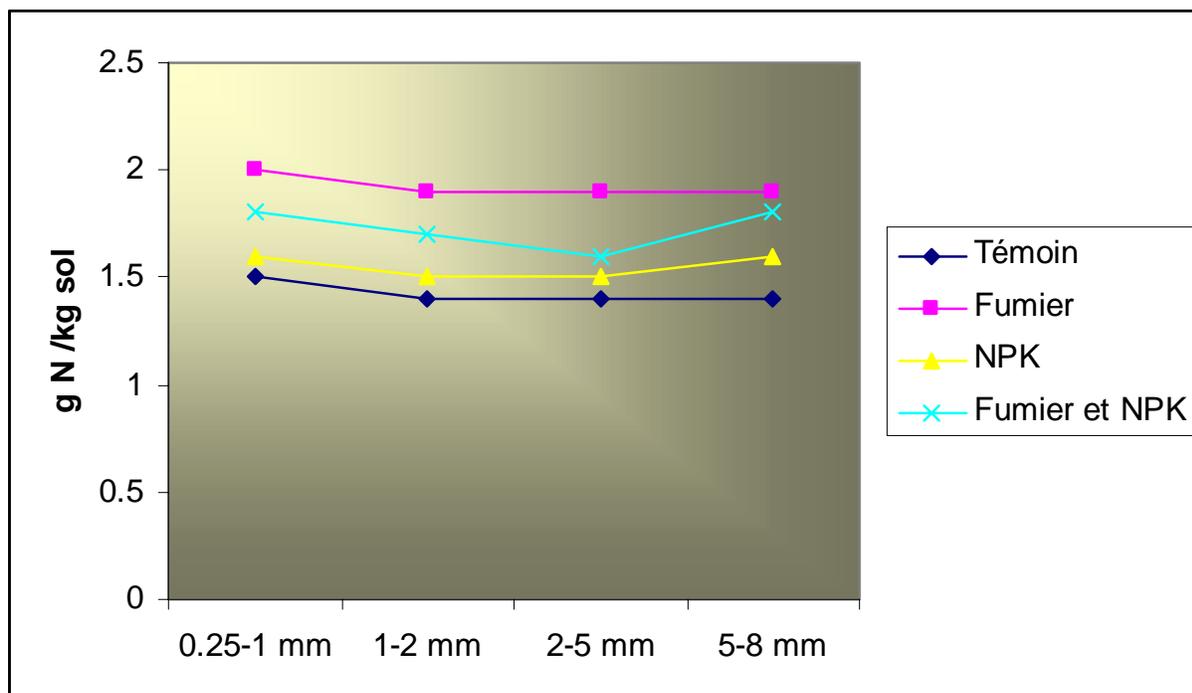
Plusieurs études effectuées dans le cadre de ces essais (Estevez et al. 1996; N'Dayegamiye et al. 1997; Angers et N'Dayegamiye 1991) ont démontré que l'apport de fumier a augmenté la proportion d'agrégats stables à l'eau telle qu'estimée par le DMP. L'apport de fumier de bovins a également enrichi en C et N tous les agrégats du sol, contrairement à la fumure minérale (Figures 6 et 7).

Par ailleurs, il a été observé que le bris mécanique des agrégats par le travail de sol, favorisait la décomposition de la MO généralement protégée entre les agrégats (Aoyama et al. 2000). Mais ces auteurs ont également mis en évidence que les taux de pertes de C étaient plus faibles dans les sols amendés pendant une longue période avec du fumier; la quantité d'humus pouvant jouer un rôle important dans la protection des agrégats. Les résultats obtenus dans cette étude démontrent ainsi que la fumure minérale et le fumier agissent différemment à long terme sur la dynamique de la structure et de la MO des sols.

De même, une étude effectuée par Angers et Giroux (1996) a démontré que la prairie (S-IV) avait amélioré la structure du sol et enrichi les macroagrégats en C et N. (Figure 8). Au

contraire, les teneurs en C et N étaient plus élevées dans les agrégats de plus petite taille, dans le sol cultivé en maïs fourrager (S-I).

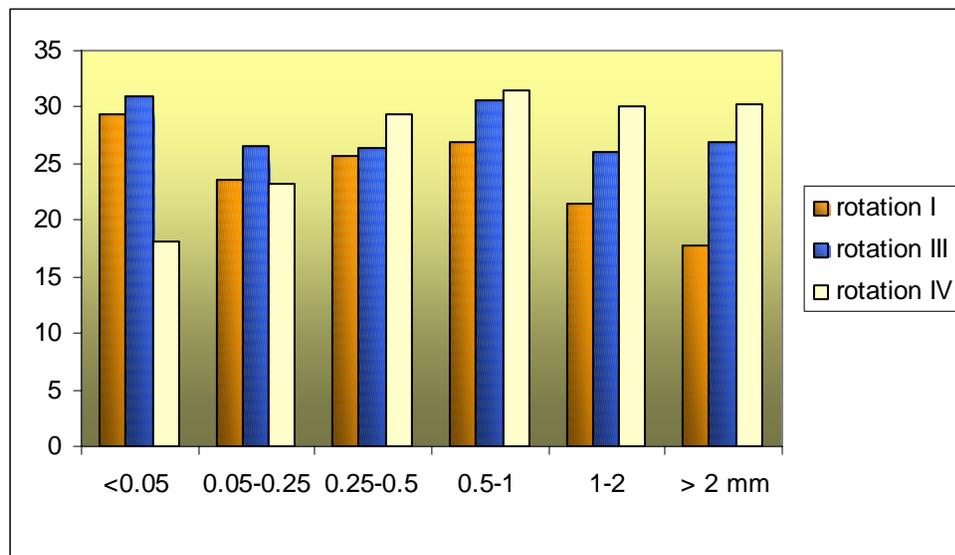
Plusieurs autres mécanismes ont été avancés comme étant susceptibles de protéger la MO; parmi ceux-ci on retrouve la protection physique : le C et le N étant associés aux particules de sol. La localisation de MO et de N à l'intérieur des pores tant à l'intérieur qu'entre les agrégats assure aussi une protection de la matière organique et de l'azote contre la décomposition microbienne.



**Figure 7: Influence d'apports d'engrais minéraux et de fumier solide de bovins sur l'enrichissement en azote des diverses tailles d'agrégats du sol.**

Dans de bons systèmes de rotation, une partie des résidus organiques retournés au sol se décomposent et stimulent la microflore, favorisant l'agrégation, l'autre fraction résiduelle se transforme peu à peu en substances humiques qui s'associent à l'argile et au limon. Les agents liant les agrégats sont donc de deux types : les produits labiles, facilement minéralisables (polysaccharides d'origine végétale et des microorganismes); leur rôle sur l'agrégation est temporaire (Golchin et al 1997; Aita et al. 1997; Puget et al. 1995; Angers et Giroux 1996), et les substances humiques. Dans d'autres rotations générant de faibles quantités de résidus organiques, des ajouts fréquents d'amendements organiques contribuent donc à maintenir une

meilleure dynamique d'agrégation, une stabilité de la structure et par conséquent une plus grande protection de C et de l'azote, tel que rapporté pour les sols ayant reçu des apports de fumiers solides de bovins (N'Dayegamiye et al. 1997).



**Figure 8: Effet des systèmes de rotation sur l'enrichissement en carbone (g C/kg sol) des diverses tailles d'agrégats du sol.**

La MO localisée entre les macroagrégats est généralement protégée contre la minéralisation microbienne, et seulement un travail excessif de sol peut conduire rapidement à son exposition aux microorganismes. Dans les microagrégats, la décomposition des matières organiques est plus lente, car il s'agit soit de substances humiques récalcitrantes à la décomposition ou en raison de leur lien avec les colloïdes du sol (Aita 1997).

La formation de la structure et sa stabilité ainsi que la séquestration de la matière organique sont également influencées par la texture des sols. Les sols à texture fine se structurent plus facilement et plus rapidement, comparativement aux sols à texture plus grossière et on retrouve une proportion plus grande d'agrégats plus gros dans les sols fins. Une étude de Christensen (1986) a montré que les microagrégats (0,050-0,250mm) sont dominants dans les sols sablonneux et que ces sols sont généralement faiblement structurés. D'autre part, d'après Elliott (1986) dans les sols loameux et argileux, les macroagrégats (>0, 250mm) devraient représenter en moyenne 50% du poids total des agrégats. Ainsi, la matière organique peut être séquestrée

tant dans les microagrégats qui demeurent importants dans les sols à texture fine que dans les micropores entre ces agrégats. Les accumulations de C et de N seraient directement reliées aux teneurs en argile des sols selon Amado et Ladd (1992). Dans les sols sablonneux, la seule protection du C et de N découlerait de leur association avec les faibles teneurs en argile et limon présentes.

Pour leur part, Simard et N'Dayegamiye (1993) et Sbih et al (2003) ont démontré que les particules fines des sols argileux du Québec assuraient une excellente protection à la MO et à 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, cependant les quantités totales minéralisées y étaient plus élevées, car ces sols présentent généralement de plus grandes réserves en C et N. Dans ses travaux récents, Angers (1998) concluait que le Québec dispose d'un nombre important de sols qui peuvent à la fois protéger la MO et en accumuler. Le pouvoir de stockage de C et de N est ainsi plus élevé dans les sols de texture fine, comparativement à ceux de texture grossière. De même, plusieurs études ont démontré que les sols argileux ou limono-argileux avaient accumulé plus de C et de N suite aux apports fréquents de fumiers que les sols de texture grossière (Jenkinson 1988; Gregorich et al. 1991; N'Dayegamiye et al. 1997; Aoyama et al. 2000).

Il semble donc exister un lien étroit entre la nature des sols, les régions agricoles auxquelles ils sont soumis ainsi que le niveau de structuration et de protection de la MO et de l'azote. Cependant, l'accumulation du C dans les sols se réaliserait principalement à partir des résidus de récolte ou des amendements organiques maintenus ou apportés aux sols. Un choix judicieux de cultures de rotation permettra ainsi de capter le C de l'atmosphère et de le retourner au sol sous forme de résidus de récolte et ainsi de l'accumuler. Ainsi, de bons systèmes de rotations de cultures, intégrés aux pratiques culturales optimales constitueront des outils en vue du maintien à long terme de la productivité des sols et de la qualité de l'eau et de l'air.

## **5. Perspectives et conclusion**

Il existe depuis environ une décennie une volonté de tous les intervenants agricoles pour promouvoir une agriculture durable qui garantit à long terme la productivité et la conservation de la qualité des sols, de l'eau et de l'air, et par voie de conséquence, la viabilité des entreprises.

Pour atteindre ces objectifs, de nouveaux modes de production sont envisagés. Il est d'abord question de l'ajustement de la fertilisation azotée, en tenant compte des arrières-effets des fumiers, de l'azote minéralisé en provenance de la matière organique des sols et des précédents culturels (i.e cultures précédentes fixatrices d'azote, labours de prairie etc..). Ces modes de production visent aussi la réduction des quantités de pesticides, grâce aux programmes adéquats de rotations de cultures à la ferme. De même, le choix de rotations laissant d'importantes quantités de résidus organiques ou permettant des apports d'amendements organiques sont privilégiés, en vue de maintenir les bilans positifs de matière organique. Enfin, la réduction de la fréquence et de l'intensité de travail de sol est de plus en plus adoptée, afin de favoriser un plus large profil de microorganismes capables d'accomplir les fonctions diverses, telles la minéralisation de la matière organique, l'ammonification et la nitrification de l'azote. La fréquence et la profondeur du travail de sol déterminent ainsi le profil microbien et le rythme de décomposition et d'humification de la matière organique dans les sols; ces mécanismes concourent par la suite à l'agrégation des sols et à la stabilisation de la structure

La connaissance des divers mécanismes intervenant dans les sols, telle la dynamique de la matière organique, de la structure et de la microflore du sol sous diverses régies agricoles, permet de faire des choix judicieux de production et d'établir des recommandations au niveau des modes de production.

La productivité des sols n'est pas uniquement reliée aux éléments nutritifs contenus dans les sols, mais aussi à leurs propriétés physiques et biologiques. En effet, de bonnes pratiques agricoles améliorent la structure et l'agrégation des sols, augmentant ainsi la porosité, l'infiltration et la rétention en eau et réduisant les pertes d'engrais minéraux ou organiques, de pesticides et de sol. Une bonne structure de sol favorise également le développement d'une microflore diversifiée, permettant aux microorganismes de jouer plusieurs rôles spécifiques tant au niveau de la minéralisation de la matière organique, que de l'ammonification et de la nitrification et de la formation d'agrégats dans les sols. Une meilleure structure permet également une croissance maximale des plantes et des racines, une exploration accrue du sol et une absorption plus élevée des éléments nutritifs.

Le travail de sol tout comme la fertilisation, constitue une composante importante des régies de production agricole. Il influence de façon importante les bilans de matière organique et la

dynamique de l'azote dans les sols. Il a été démontré qu'un travail intensif conduit à l'oxydation rapide de la matière organique des sols ce qui se traduit par une baisse importante de leur fertilité; la matière organique jouant un rôle crucial à ce niveau. Le travail de sol détermine également le profil des microorganismes du sol, pouvant en augmenter ou en réduire la diversité. Un travail superficiel ou l'absence de travail de sol (semis-direct) favorise le développement des champignons et réduit les populations de bactéries. Par contre, un travail plus profond favorise les populations bactériennes au détriment des champignons. Or les deux espèces de microorganismes jouent des rôles complémentaires et successifs dans la décomposition de la MO et la minéralisation d'azote.

Un travail intensif de sol détruit également les agrégats des sols, provoquant une dégradation de leur structure et conduisant par conséquent au compactage et à une mauvaise circulation de l'air et de l'eau, et à une mauvaise croissance des racines des plantes sans oublier les pertes en azote suite au dégagement de  $\text{NO}_2$  associées au phénomène de dénitrification très souvent observé. La dégradation de la structure conduit aux pertes de sols, de nutriments et de pesticides par érosion et ruissellement.

De bonnes régies agricoles améliorent non seulement la qualité des sols et de l'eau, mais également celle de l'air, en réduisant également les pertes de l'azote par lessivage, ruissellement et érosion. On réduit également les pertes de  $\text{CO}_2$  vers l'atmosphère grâce à l'amélioration de la structure qui protège de façon durable le C. De même, dans un sol structuré, les pertes d'azote du sol par lessivage, ruissellement ou dénitrification à partir des engrais minéraux ou organiques sont faibles.

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

## Références citées

**Aita, C., Recous, S. and Angers, D.A. 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.

**Amado, M. and Ladd, J.N. 1992.** Decomposition of 14 C-labelled glucose and legume materials in soil: properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* **24** : 455-464.

**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. and Giroux, M. 1996.** Recently deposited organic matter in soil water-stable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60** : 1547-1551.

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

**Aoyama, M., Angers, D., and N'Dayegamiye, A. 1999.** Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Can. J. Soil Sci.* **79**: 295-302.

**Aspiras, R.B., Alen, O.N., Harris, R.F., and Chester, G. 1971.** The role of microorganisms in the stabilization of soil aggregates. *Soil Biol. Biochem.* **3**: 347- 353.

**Burns, R.G. and Davies, J.A. 1986.** The microbiology of soil structure, in *The role of microorganisms in a Sustainable Agriculture*, Lopez- Real, J.M. and Hodges, R.D., Eds., A. B. Academic Publishers, Berkhamstead, pp 9-27.

**Cambardella, C.A., and Elliott, E.T. 1993.** Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**: 1071-1076.

**Carter, M. R. 1992.** Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macro-aggregate distribution and structural stability of the surface soil in a humid climate. *Soil Til. Res.* **23**: 361- 372.

**Christensen, B.T. 1986.** Straw incorporation and soil organic matter in macro-aggregates and particle size separates. *J. Soil Sci.* **37**: 125-135.

- 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., N'Dayegamiye, A. and Coderre, D.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.
- 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*, vol. 4 (2): 7-15.
- Golchin, A., Baldock, J.A., and Oades, J.M. 1997.** A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. p 245-266 *in* R. Lal et al. (ed.) *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Gregorich, E.G., Voroney, R.P., and Kachanoski, R. G. 1991.** Turnover of carbon through the microbial biomass in soils with different textures. *Soil Biol. Biochem.* **23**: 799- 805.
- Gupta, V.V. S. R., and Germida, J. J. 1988.** Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.* **20 (6)**: 777-786.
- Havlin, J.L., Kissel, D.E., Maddux, L.D., Claassen, M.M., and Long, J.H. 1990.** Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**: 448-452.
- Jenkinson, D.S. 1988.** Soil organic matter and its dynamics, in *Russel's Soil Conditions and Plant Growth*, 11<sup>th</sup> ed., Wild, A., Ed., Longman, New York, pp 564-607.
- Marinissen, J.C.Y. and Dexter, A.R. 1990.** Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts. *Biol. Fert. Soils* **9**: 163-167.
- N'Dayegamiye, A., Goulet, M. and Laverdière, M. 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.
- Oades, J.M., and Waters, A. G. 1991.** Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.* **3** : 53-67.
- Rasmussen, P.E. and Collins, H.P. 1991.** Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* **45**: 93-134.

**Sbih, M., N'Dayegamiye, A. and Karam, A. 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. and N'Dayegamiye, A. 1993.** Nitrogen mineralization potential of meadow soils. *Can. J. Soil Sci.* **73**: 27-38.

**Soltner, D. 1986.** Les bases de la production végétale. Tome 1. 14<sup>e</sup> éd. Coll. Science et Techniques agricoles. 464p.

**\*Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G. et Rompré, M. 1990.** Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. Entente auxiliaire Canada-Québec. 71 p.

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