

Étude sur le bilan humique des sols dans des systèmes culturaux sous prairies et sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation

M. Quenum¹, *M. Giroux¹ et R. Royer¹

Résumé, M. Quenum¹, *M. Giroux¹ et R. Royer¹. **Étude sur le bilan humique des sols dans des systèmes culturaux sous prairies et sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.** *Agrosol*. 15 (2) : 57-71. Cette étude sur le bilan humique des sols a été réalisée dans le cadre de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec et portait sur les effets des systèmes culturaux (prairies et cultures commerciales) et des modes de fertilisation (engrais de ferme et fumure minérale). Elle visait à comparer l'évolution de la matière organique du sol (MOS) prédite par le bilan humique avec celle mesurée aux champs pendant une période de 10 ans. Dans les systèmes sous prairies, les résultats montrent que le bilan humique net dans la parcelle fertilisée avec du fumier de bovins laitiers est de 14,66 t/ha, comparativement à 8,40 t/ha dans celle avec le fumier de poulets, à 3,06 t/ha dans celle avec le lisier de porcs et à 4,19 t/ha dans celle avec la fumure minérale. Les analyses de la MOS indiquent une augmentation marquée dans toutes les parcelles sous prairies. Comparé aux valeurs mesurées aux champs, le bilan humique prédit correctement l'évolution de la MOS des parcelles sous prairies. Dans les systèmes sous cultures commerciales, le bilan humique net était de -2,55 t/ha dans la parcelle fertilisée avec la fumure minérale, de 5,93 t/ha dans celle fertilisée avec le fumier de bovins laitiers et de -0,60 t/ha dans celle avec le lisier de porcs. Les valeurs mesurées de la MOS indiquent qu'elle se maintient dans la parcelle avec le fumier de bovins laitiers mais diminue lentement dans celles avec la fumure minérale et le lisier de porcs. Le bilan humique calculé dans les cultures commerciales prédit bien l'évolution réelle de la MOS mesurée dans les parcelles. Les apports de pailles de canola et de tiges de maïs n'ont pas suffi à eux seuls à maintenir la MOS malgré des apports importants dans les sols.

Mots clés : Matière organique du sol, bilan humique, résidus de cultures, minéralisation du carbone, prairie, cultures commerciales.

Abstract, M. Quenum¹, *M. Giroux¹ and R. Royer¹. **Humic balance of soil for hay and cash crop systems under different fertilization practices.** *Agrosol*. 15 (2) : 57-71. This study on humic balance of soil was conducted within the *Quebec soil quality Observatory* to evaluate the effects of cultural systems (hay field and cash crops) and fertilization practices (farm manure and mineral fertilizer). Soil organic matter (SOM) predicted by humic balance was compared to SOM measured in the field for a ten year period. In the hay field systems, results showed that humic balance for plot receiving cow manure was 14.66 t/ha compared to 8.40 t/ha for chicken manure, 3.06 t/ha for pig slurry and 4.19 t/ha for mineral fertilizer. An important increase in SOM was measured in all plots. Compared to field values, the humic balance correctly predicts the evolution of SOM. For the cash crop systems, net humic balances of -2.55 t/ha in mineral fertilizer plot, 5.93 in the cow manure plot and -0.60 t/ha in the pig slurry plot were measured. The SOM measured in those plots indicate that it did not change following cow manure application but slowly decreased with mineral fertilizer and pig slurry. These results indicate that the humic balance correctly predict the evolution of SOM. Rape-seed straws and corn residues did not maintain the SOM under cash crop systems despite their input in carbon to the soils.

Key words: Soil organic matter, humic balance, crop residues, humus mineralization, hay field, cash crops.

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2700, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8, Canada

*Auteur pour la correspondance : téléphone (418) 644-6838, télécopieur : (418) 644-6855, Courriel : marcel.giroux@irda.qc.ca

Introduction

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. La spécialisation des cultures, les superficies en monoculture, la diminution des superficies en prairies et le travail excessif du sol peuvent entraîner une perte de la matière organique du sol (MOS) provoquant ainsi la dégradation de la structure, la compaction des sols et une réduction de leur capacité de minéralisation. L'Inventaire des problèmes de dégradations des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990) a mis en évidence les causes de dégradation et a démontré à quel point les systèmes culturaux 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. Ces interactions sont particulièrement reliées à l'influence des pratiques agricoles sur la MOS.

On distingue généralement deux fractions de la MOS, chacune ayant son rôle spécifique. La première fraction, plus abondante, est l'humus proprement dit. Il assure la formation du complexe argilo-humique et la micro-aggrégation des sols. L'autre fraction, dite labile, est constituée de carbone organique jeune et est reliée à la macro-aggrégation des sols, à leur capacité de minéralisation et à leur activité biologique. Lors de la mise en culture intensive des sols, lorsque les apports de matière organique sont insuffisants, la MOS subit une diminution rapide de la fraction labile. Cette diminution va produire à court et moyen terme un ralentissement de l'activité biologique des sols, affecter leur capacité d'agrégation et de minéralisation, occasionnant une diminution du diamètre moyen pondéré des agrégats. 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 propor-

tion des gros agrégats est plus faible comparativement aux fumiers de bovins, ce qui affecte l'écoulement de l'eau, la densité et la proportion de matière organique labile dans les sols. (N'Dayegamiye et Côté, 1996; N'Dayegamiye et al., 1997). La fraction humique, plus stable et protégée par le complexe argilo-humique du sol, va quant à elle subir une diminution beaucoup plus lente. Cet effet n'est perceptible qu'à long terme. C'est souvent la diminution de la fraction labile de la MOS qui est responsable de la dégradation des sols.

On peut agir rapidement sur la réserve de la fraction organique labile des sols, grâce à de bonnes rotations de cultures et à l'apport d'engrais organiques. Il existe par contre des différences très importantes entre les cultures et les types d'engrais organiques relativement à leur influence sur l'évolution de la MOS et sur la qualité des sols. Quant à la fraction humique stable, il faut beaucoup plus de temps pour refaire la réserve d'un sol dégradé. Par exemple, si l'on considère qu'il faut environ 25 t/ha d'humus pour augmenter la MOS de 1 % dans la couche arable les sols, il faudrait apporter de 100 à 200 t/ha de matière organique, selon le facteur d'humification (K1), pour produire cet humus, ce qui représente des apports d'engrais de 20 ans et plus dans les sols.

Selon la texture des sols, les niveaux critiques de la MOS se situent entre 3 et 4 %. Dans les sols lourds, ce sont surtout les problèmes de dégradation de la structure, de compaction et de diminution de la conductivité hydrique qui sont associés à la perte de MOS, alors que dans les sols légers ce sont les problèmes de faible capacité de rétention en eau. (CRAAQ, 2003). Afin de maintenir l'équilibre de la MOS à un niveau adéquat, il est donc nécessaire d'établir des rotations qui procurent des apports suffisants de résidus organiques. Cependant, les rotations des cultures ne peuvent pas toujours à elles seules maintenir un niveau adéquat de la MOS dans les sols, surtout dans les cultures commerciales, lorsqu'elles sont associées au travail intensif du sol. (Giroux, 1991; Mérésier et

al., 1997; N'Dayegamiye et al. 1997). Par contre, les prairies peuvent maintenir un niveau adéquat de la MOS à long terme (Carrier, 1988; Giroux, 1991; N'Dayegamiye, 1996). Les propriétés des sols sous prairies montrent généralement peu de signes de dégradation (Tabi et al., 1990).

Le bilan humique des systèmes de production végétale est de première importance pour juger de leur effet sur la qualité des sols. Ces bilans comportent des données essentielles d'une part, sur l'évolution à long terme de l'humus (fraction stable) et d'autre part, sur l'apport d'une matière organique nouvelle au sol (fraction labile). Dans la mesure où l'agriculteur axe la fertilisation de ses terres sur le bon fonctionnement du cycle de décomposition-restitution des matières organiques, il maintient ou améliore progressivement de façon durable leur aptitude à produire et leur qualité. Dans le cas où les restitutions organiques ne sont qu'occasionnelles, l'agriculteur risque de voir décroître progressivement la qualité de ses sols et même les rendements de ses cultures. (N'Dayegamiye, 1990; N'Dayegamiye et Angers, 1990). Le niveau de la MOS va tendre vers un équilibre en fonction des entrées et des sorties du carbone des sols. Les propriétés physiques, chimiques et biologiques vont évoluer en conséquence.

Au Québec, on constate généralement que sans apport d'engrais organiques, le bilan humique est négatif pour les cultures qui laissent peu de résidus au sol (Carrier, 1988). Plusieurs cultures maraîchères, dont la pomme de terre, sont dans cette situation. Le bilan humique des rotations maïs-grain-soya est déficitaire malgré l'abondance des tiges de maïs qui retournent au sol. Le bilan est généralement positif pour les systèmes sous prairies. Bien qu'il existe déjà beaucoup d'études relatives à l'effet des cultures et des engrais sur le bilan humique des sols, on trouve encore peu de travaux au Québec ayant comparé à long terme ces bilans théoriques avec l'évolution réelle de la MOS selon diverses cultures et modes de fertilisation (Carrier, 1988; CPVQ, 2000; Clément et N'Dayegamiye, 2000; Bolinder, 2003). Le bilan humique

se veut actuellement estimatif, puisque certains facteurs influençant les résultats, en particulier les coefficients de formation (K1) et de minéralisation de l'humus (K2), ne sont pas très bien connus sous nos conditions climatiques et édaphiques. L'importance des biomasses racinaires enfouies constitue également un élément d'incertitude du modèle.

Le but de cette étude est de comparer l'évolution de la MOS prédite à partir d'un modèle de calcul du bilan humique avec les valeurs réelles mesurées aux champs dans des systèmes culturaux sous prairies et sous cultures commerciales soumis à divers modes de fertilisation pendant 10 années.

Méthodologie expérimentale

Protocole expérimental

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec, initié en 1994 sur deux sites expérimentaux situés à Saint-Lambert de Lauzon, près de Québec. Le sol est un loam limoneux gleysolique de la série Le Bras. Le premier site, constitué de systèmes sous prairies de fléole ou de luzerne-fléole réimplantées tous les 4 ans, comporte 4 modes de fertilisation : fumier de bovins laitiers, fumier de poulets, lisier de porcs et une fumure minérale NPK. Chaque parcelle a une superficie de 0,22 ha. Le second site

comporte des systèmes sous cultures commerciales : maïs-grain, orge, blé et canola. Ce champ est fertilisé avec du fumier de bovins laitiers, du lisier de porcs et une fumure minérale NPK. La superficie des parcelles est de 0,12 ha.

Dans la prairie fertilisée avec des engrais minéraux, une dose annuelle d'azote variant de 30 à 70 kg N (selon le pourcentage de luzerne), 50 kg P₂O₅ et 100 kg K₂O/ha a été appliquée à la volée en surface au printemps. Lors de la réimplantation des prairies avec de l'orge, les engrais ont été incorporés en pré-semis de la céréale. Dans la parcelle d'orge grainée, une dose de 80 kg N, 50 kg P₂O₅ et 90 kg K₂O/ha a été apportée. Pour les parcelles fertilisées avec des engrais organiques sous prairies, les doses appliquées en surface au printemps sont présentées à l'annexe 2.

Dans les systèmes sous cultures commerciales, toutes les parcelles ont bénéficié d'un travail complet du sol avec un labour à l'automne et un passage de vibroculteur au printemps avant le semis. Les engrais organiques et minéraux ont été apportés au printemps en pré-semis et incorporés dans la couche 0-10 cm. Dans la parcelle fertilisée avec une fumure minérale, une dose de 80 kg N, 60 kg P₂O₅ et 60 kg K₂O/ha pour l'orge, le blé et le canola a été appliquée en pré-semis et incorporée sur 10 cm. Une dose de 100 N/ha a été appliquée en bande en post-levée du maïs-grain lorsque les plants ont 15-20 cm de hauteur dans la parcelle sous fumure minérale. Un en-

grais minéral de démarrage de 50 kg N, 80 kg P₂O₅ et 60 kg K₂O/ha a également été appliqué dans cette parcelle. Le maïs-grain sous fumure organique a aussi reçu une fumure minérale de démarrage de 50 kg N et 35 P₂O₅/ha. Les doses apportées des différents engrais de ferme sont présentées à l'annexe 5 pour les cultures commerciales.

Les mesures des rendements des grains et des pailles laissées aux champs dans les systèmes sous cultures commerciales ont été prises sur une superficie de 15 m² en prélevant la biomasse à quatre points d'échantillonnage de 3,75 m². Dans les systèmes sous prairies, deux coupes sont effectuées annuellement. Les rendements sont mesurés en recueillant la biomasse à quatre points d'échantillonnage d'un mètre carré. Les pailles de l'orge grainée lors de la réimplantation des prairies ont été retirées du champ. Dans les cultures commerciales, les pailles du canola et les tiges de maïs-grain ont été laissées au champ alors que celles de l'orge et du blé ont été retirées, ceci afin de s'ajuster aux pratiques les plus courantes de la région. Nous en avons tenu compte dans le calcul du bilan humique. Les tableaux 1 et 2 présentent les séquences culturales dans les systèmes sous prairies et sous cultures commerciales.

Méthodologie de calcul du bilan humique

Le bilan humique du sol permet d'estimer l'évolution de la MOS à partir des

Tableau 1. Description des cultures dans les systèmes sous prairies

Traitements	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Fumure minérale	Fléole	Fléole	Fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole
Fumier bovins	Fléole	Fléole	Fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole
Fumier poulets	Fléole	Fléole	Fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole
Lisier porcs	Fléole	Fléole	Fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Luzerne fléole	Orge grainée	Luzerne fléole	Luzerne fléole

Tableau 2. Description des cultures dans les systèmes sous cultures commerciales

Traitements	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Fumure minérale	Orge	Blé	Orge	Canola	Maïs-grain	Maïs-grain	Orge	Canola	Maïs-grain	Maïs-grain
Fumier bovins laitiers	Orge	Blé	Orge	Canola	Maïs-grain	Maïs-grain	Orge	Canola	Maïs-grain	Maïs-grain
Lisier porcs	Orge	Blé	Orge	Canola	Maïs-grain	Maïs-grain	Orge	Canola	Maïs-grain	Maïs-grain

gains en humus provenant des résidus de cultures, des engrais de ferme ou autres amendements organiques et des pertes liées à la minéralisation microbienne de la MOS. Il consiste à faire le calcul des entrées et des sorties de la MOS pour un champ donné ou encore pour une ferme globale. Cependant, de nombreux facteurs influencent les calculs, particulièrement les coefficients d'humification (K1), des engrais et de minéralisation (K2) de l'humus. (Soltner, 1994; CRAAQ, 2003). Les hypothèses de calcul utilisées pour mesurer les bilans humiques des parcelles des deux systèmes culturaux se retrouvent dans ces deux documents. D'après Bolinder (2003) et Bolinder et al. (2004), les biomasses racinaires sous prairies pourraient varier entre 6 et 14 t/ha dans les premiers 45 cm de sol. Elles demeurent difficiles à estimer mais elles seraient liées à l'âge des prairies et seraient en relation avec la biomasse aérienne produite. De plus, pour les prairies qui ne sont pas labourées, il est difficile d'établir le taux de remplacement annuel de la biomasse racinaire. Gill et al. (2002) évalue la proportion de racine vivante par rapport à la biomasse racinaire totale produite annuellement entre 30 et 65 % dans les prairies des régions tempérées. Un taux de remplacement des biomasses racinaires (turnover) de 50 % est réaliste sous nos conditions. Il permet d'établir la proportion de la biomasse racinaire détruite qui produira de l'humus par rapport à celle vivante qui n'en produira pas. La plus forte contribution des racines à la formation d'humus survient lors du labour des prairies. Dans cette étude, la biomasse racinaire produisant de l'humus a été estimée à 5 t/ha pour les prairies de 1^{ère} année, à 6 t/ha pour les prairies de 2^e année et à 10 t/ha pour les prairies de 3^e année qui sont labourées. La matière organique apportée par les engrais de ferme a été mesurée par perte au feu. Pour les cultures commerciales, les biomasses enfouies provenant des pailles ou des tiges de maïs ont été mesurées au champ. Pour la partie racinaire, elles ont été estimées selon les valeurs proposées par Soltner (1994). Les annexes 1 et 4 présentent le détail des calculs des gains en humus par les résidus de cultures.

Pour la minéralisation, un coefficient K2 de 1,2 a été utilisé dans la prairie et de 1,5 pour les cultures commerciales. Le

travail annuel du sol et des propriétés physiques plus propices à la minéralisation du sol sous cultures commerciales

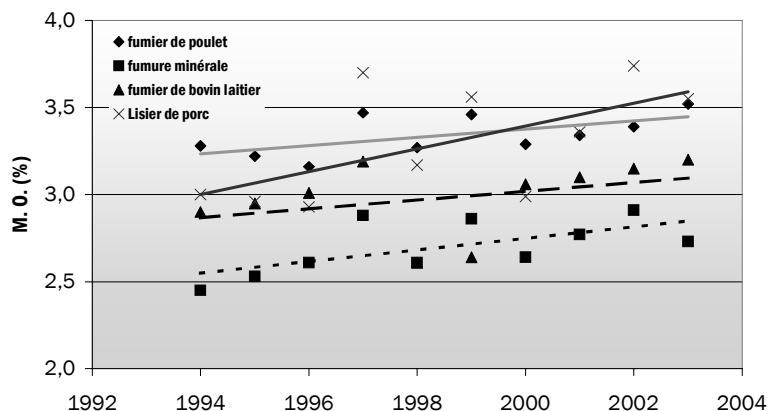


Figure 1. Évolution de la matière organique du sol mesurée sous prairies selon les modes de fertilisation.

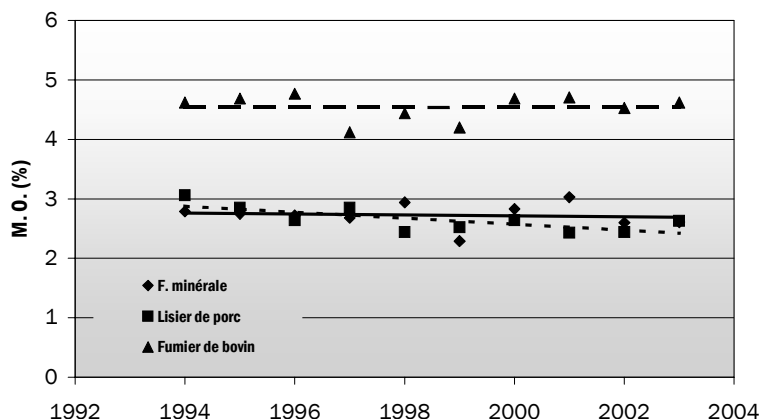


Figure 2. Évolution de la MOS mesurée sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation.

Tableau 3. Bilan humique des sols sous prairies fertilisées avec une fumure minérale.

Années	Cultures	Gain d'humus par les cultures	Gain d'humus par les engrais	Gain total d'humus	Perte d'humus par minéralisation
		(t/ha)			
1994	Fléole	0,99	0	0,99	0,82
1995	Fléole	1,14	0	1,14	0,85
1996	Fléole	1,74	0	1,74	0,88
1997	Orge grainée	0,90	0	0,90	0,97
1998	Luzerne/ fléole	1,24	0	1,24	0,88
1999	Luzerne/ fléole	1,44	0	1,44	0,96
2000	Luzerne/ fléole	2,24	0	2,24	0,89
2001	Orge grainée	0,90	0	0,90	0,93
2002	Luzerne/ fléole	1,24	0	1,24	0,98
2003	Luzerne/fléole	1,44	0	1,44	0,92
Total 10 ans		13,27	0	13,27	9,08
Bilan net : Apport - perte : 4,19 t/ha					

Tableau 4. Bilan humique des sols sous prairies fertilisées avec du lisier de porcs.

Années	Cultures	Gain d'humus par les cultures	Gain d'humus par les engrais	Gain total d'humus	Perte d'humus par minéralisation
		------(t/ha)-----			
1994	Fléole	0,99	0,21	1,20	1,01
1995	Fléole	1,14	0,13	1,27	0,99
1996	Fléole	1,74	0,06	1,80	0,98
1997	Orge grainée	0,90	0,06	0,96	1,24
1998	Luzerne/fléole	1,24	0,07	1,31	1,07
1999	Luzerne/fléole	1,44	0,04	1,48	1,20
2000	Luzerne/ fléole	2,24	0,04	2,28	1,00
2001	Orge grainée	0,90	0,05	0,95	1,13
2002	Luzerne/ fléole	1,24	0,16	1,40	1,26
2003	Luzerne/ fléole	1,44	0,04	1,48	1,19
Total 10 ans		13,27	0,86	14,13	11,07
Bilan net : Apport - perte : 3,06 t/ha					

Tableau 5. Bilan humique des sols sous prairies fertilisées avec du fumier de poulet.

Années	Cultures	Gain d'humus par les cultures	Gain d'humus par les engrais	Gain total d'humus	Perte d'humus par minéralisation
		------(t/ha)-----			
1994	Fléole	0,99	0,48	1,47	1,10
1995	Fléole	1,14	1,99	3,13	1,08
1996	Fléole	1,74	0,83	2,57	1,06
1997	Orge grainée	0,90	0,58	1,48	1,17
1998	Luzerne/ fléole	1,24	0,60	1,84	1,10
1999	Luzerne / fléole	1,44	0,46	1,90	1,16
2000	Luzerne /fléole	2,24	0,37	2,61	1,11
2001	Orge grainée	0,90	0,36	1,26	1,12
2002	Luzerne/fléole	1,24	0,37	1,61	1,14
2003	Luzerne/fléole	1,44	0,31	1,75	1,18
Total 10 ans		13,27	6,35	19,62	11,22
Bilan net : Apport - perte : 8,40 t/ha					

Tableau 6. Bilan humique des sols sous prairies fertilisées avec du fumier de bovins laitiers.

Années	Cultures	Gain d'humus par les cultures	Gain d'humus par les engrais	Gain total d'humus	Perte d'humus par minéralisation
		------(t/ha)-----			
1994	Fléole	0,99	3,19	4,18	0,97
1995	Fléole	1,14	1,00	2,14	0,99
1996	Fléole	1,74	1,00	2,74	1,01
1997	Orge grainée	0,90	0,75	1,65	1,07
1998	Luzerne/ fléole	1,24	0,95	2,19	0,88
1999	Luzerne/ fléole	1,44	1,46	2,90	0,89
2000	Luzerne/ fléole	2,24	0,94	3,18	1,03
2001	Orge grainée	0,90	0,80	1,70	1,04
2002	Luzerne/ fléole	1,24	0,60	1,84	1,06
2003	Luzerne / fléole	1,44	0,72	2,16	1,08
Total 10 ans		13,27	11,41	24,68	10,02
Bilan net : Apport - perte : 14,66 t/ha					

nous ont guidés dans ce choix. Les annexes 3 et 6 présentent le détail des calculs des pertes par minéralisation.

Suivi de l'évolution de la matière organique du sol

Des échantillons composés de 15 prélèvements de sol ont été pris annuellement dans la couche arable de chacun des systèmes sous prairies et sous cultures commerciales à une profondeur de 20 cm. Le carbone organique a été dosé par la méthode Walkley et Black (Allison et al, 1965). Un graphique présentant la teneur en matière organique des sols en fonction du temps a été préparé pour chacun des systèmes culturaux et des modes de fertilisation (figures 1 et 2). L'évolution mesurée de la MOS, mise en évidence par ces graphiques, a été comparée à celle prédite par la méthode du bilan humique.

Résultats

Les bilans humiques sous prairies

À partir des matières organiques apportées aux sols, nous avons déterminé la quantité totale d'humus produite par les résidus de cultures et les engrais organiques. Sur une période de 10 ans, les résultats montrent que la prairie a produit 13,27 t/ha d'humus grâce aux résidus racinaires et aériens laissés aux sols (tableaux 3 à 6). De la même façon, les gains d'humus produits par les engrais de ferme ont été calculés en considérant les doses appliquées, leur teneur en matière organique et leur coefficient d'humification (tableaux 3 à 6). Les résultats démontrent que le lisier est un faible producteur d'humus. Des apports de 10 ans n'ont produit que 0,86 t/ha d'humus contre 6,35 t/ha pour le fumier de poulets et 11,41 t/ha pour le fumier de bovins laitiers. Du point de vue de la valeur des engrais organiques sur le gain en humus, le classement par ordre décroissant est le suivant :

Fumier de bovins > fumier de poulets > lisier de porcs

Sur une période de 10 ans, la production totale d'humus de la prairie a été de 13,27 t/ha dans la parcelle avec une fumure minérale, de 14,13 t/ha dans celle avec le lisier de porcs, de 19,62 t/ha dans celle avec le fumier de poulets et de 24,68 t/ha dans celle avec le fumier de bovins (tableaux 3 à 6). Ces valeurs sont de bons indicateurs de l'aptitude des systèmes à fournir une matière organique labile au sol. La prairie produit beaucoup de matière organique labile. Par contre, les modes de fertilisation affectent de façon très variable le gain en humus de la prairie.

De la même façon qu'un sol est appelé à accumuler de l'humus par l'apport des matières organiques, il est aussi appelé à en perdre par le processus de minéralisation. Pendant une période de 10 ans, une perte d'humus par minéralisation de 10,02 t/ha a été mesurée dans la parcelle avec le fumier de bovins laitiers, de 11,22 t/ha dans celle avec le fumier de poulets, de 11,07 t/ha dans celle avec le lisier de porcs et de 9,08 t/ha dans celle fertilisée avec la fumure minérale (tableau 3, annexe 3).

Le bilan net des gains moins les pertes d'humus est de 14,66 t/ha dans la parcelle avec le fumier de bovins, de 8,40 t/ha dans celle avec le fumier de poulets, de 3,06 t/ha dans celle avec le lisier de porcs et de 4,19 t/ha dans celle fertilisée avec la fumure minérale (tableau 3). Le bilan humique indique donc un redressement de la MOS pour toutes les parcelles, spécialement celles sous fumier de bovins et de poulets.

Évolution de la matière organique du sol dans le système sous prairies

Les mesures de la MOS effectuées dans les parcelles indiquent une augmentation pour tous les modes de fertilisation (figure 1). Les calculs des bilans humiques sur 10 ans démontrent effectivement que la MOS devrait s'accroître selon les modes de fertilisation de 0,1 à 0,6 %. Par exemple, le bilan humique de la parcelle fertilisée avec le fumier de bovins est de 14,66 t/ha. Comme il faut

environ 25 t/ha d'humus pour accroître la MOS de 1 % dans 20 cm de sol, la MOS devrait s'accroître, selon la prédiction du bilan humique, d'environ 0,6 % (14,66/25). De même, la parcelle au lisier de porcs, avec un bilan de 3,06 t/ha, devrait s'accroître proportionnellement d'environ 0,12 % (3,06/25). Globalement, les calculs du bilan humique reflètent bien la tendance à l'accroissement de la MOS des champs sous prairies et prédisent correctement la production d'humus de ces systèmes, selon les hypothèses établies. L'accroissement réel de la MOS, mesuré sur 10 ans, varie de 0,2 à 0,6 % selon les traitements et il est effectivement du même ordre de grandeur que celui prédit par les calculs du bilan humique, soit de 0,12 à 0,6 % (figure 1).

Bilan humique des sols sous cultures commerciales

La quantité d'humus produit chaque année par chaque traitement a été calculée dans les systèmes sous cultures commerciales. Les résidus de cultures ont contribué à produire de 8,96 à 9,42 t/ha d'humus pendant la période de 10 ans, selon les modes de fertilisation (tableaux 7 à 9). La présence des pailles de canola et des tiges de maïs-grain a contribué de façon importante à la production d'humus des systèmes sous cultures commerciales. Les calculs montrent que le fumier de bovins laitiers a produit 15,02 t/ha d'humus sur une période de 10 ans alors que le lisier de porcs en a laissé 1,21 t/ha pendant la même période (tableaux 7 à 9). Le fumier de bovins est nettement supérieur au lisier de porcs quant à l'humus produit.

Le sol est également soumis à des pertes d'humus par minéralisation. Les calculs montrent que dans les systèmes sous cultures commerciales, sur une période de 10 ans, il y a eu une perte d'humus par minéralisation de 18,38 t/ha dans la parcelle fertilisée avec le fumier de bovins laitiers, de 11,22 t/ha dans celle avec le lisier de porcs et de 11,51 t/ha dans celle avec la fumure minérale (tableaux 7 à 9). La quantité d'humus

perdu est semblable pour le lisier de porcs et la fumure minérale mais plus importante pour le fumier de bovins.

Le bilan humique net des parcelles est de -2,55 t/ha dans la parcelle avec la fumure minérale, de -0,60 t/ha dans celle avec le lisier de porcs et de 5,93 t/ha dans celle avec le fumier de bovins laitiers (tableaux 7 à 9). Pour les cultures commerciales, les calculs du bilan prédisent un faible gain d'humus dans les parcelles avec le fumier de bovins laitiers et une légère perte dans celles avec la fumure minérale et le lisier de porcs.

Évolution de la matière organique du sol dans les systèmes sous cultures commerciales

L'évolution de la matière organique des sols, telle que mesurée annuellement au champ, montre une diminution lente dans les parcelles avec une fumure minérale et le lisier de porcs (figure 2). Ces résultats concordent avec ceux prédits par le calcul du bilan humique des parcelles. Pour ce qui est du fumier de bovins laitiers, les résultats analytiques indiquent un maintien de la MOS à un niveau de 4,6 % environ. Le bilan humique prévoyait une légère augmentation. Le sol de la parcelle sous fumier de bovins avait une teneur initiale plus élevée qu'avec les autres modes de fertilisation. Sans s'accroître, la MOS s'est maintenue à un niveau plus élevé. La production accrue d'humus a compensé pour la plus forte minéralisation mesurée dans ce traitement, ce qui a permis de maintenir la MOS à près de 4,6 %. Sans ces apports de fumier, une diminution appréciable de la MOS aurait été mesurée.

Discussion

Les observations de notre étude rejoignent celles de Bolinder (2003) qui a indiqué que ce sont les apports de matière organique par les systèmes culturaux et les engrais organiques qui ont le

Tableau 7. Bilan humique des sols sous cultures commerciales fertilisées avec une fumure minérale.

Années	Cultures	Gain	Gain	Gain total	Perte d'humus
		d'humus par	d'humus par		
		les cultures	les engrais	d'humus	par
		------(t/ha)-----			
1994	Orge	0,53	0,00	0,72	1,18
1995	Blé	0,38	0,00	2,16	1,16
1996	Orge	0,53	0,00	1,42	1,15
1997	Canola	1,16	0,00	1,16	1,13
1998	Maïs-grain	1,31	0,00	1,31	1,24
1999	Maïs-grain	1,54	0,00	1,54	0,97
2000	Orge	0,38	0,00	0,38	1,20
2001	Canola	0,97	0,00	0,97	1,28
2002	Maïs-grain	1,04	0,00	1,04	1,10
2003	Maïs-grain	1,12	0,00	1,12	1,10
Total 10 ans		8,96	0,00	8,96	11,51
Bilan net : Apport - perte : -2,55 t/ha					

Tableau 8. Bilan humique des sols sous cultures commerciales fertilisées avec du fumier de bovins laitiers.

Années	Cultures	Gain	Gain	Gain total	Perte d'humus
		d'humus par	d'humus par		
		les cultures	les engrais	d'humus	par
		------(t/ha)-----			
1994	Orge	0,53	1,44	1,97	1,87
1995	Blé	0,38	0,79	1,17	1,90
1996	Orge	0,53	0,79	1,32	1,93
1997	Canola	1,08	1,78	2,86	1,67
1998	Maïs-grain	1,42	1,79	3,21	1,80
1999	Maïs-grain	1,70	1,39	3,09	1,70
2000	Orge	0,38	1,98	2,36	1,90
2001	Canola	0,92	1,87	2,79	1,91
2002	Maïs-grain	1,15	1,61	2,76	1,83
2003	Maïs-grain	1,20	1,58	2,78	1,87
Total 10 ans		9,29	15,02	24,31	18,38
Bilan net : Apport - perte : 5,93 t/ha					

Tableau 9. Bilan humique des sols sous cultures commerciales fertilisées avec du lisier de porcs.

Années	Cultures	Gain	Gain	Gain total	Perte d'humus
		d'humus par	d'humus par		
		les cultures	les engrais	d'humus	par
		------(t/ha)-----			
1994	Orge	0,53	0,11	0,64	1,29
1995	Blé	0,38	0,13	0,51	1,21
1996	Orge	0,53	0,05	0,58	1,12
1997	Canola	1,09	0,10	0,81	1,21
1998	Maïs-grain	1,42	0,13	1,48	1,03
1999	Maïs-grain	1,61	0,12	1,73	1,07
2000	Orge	0,38	0,05	0,43	1,12
2001	Canola	1,03	0,07	1,10	1,03
2002	Maïs-grain	1,20	0,32	1,52	1,03
2003	Maïs-grain	1,25	0,12	1,37	1,11
Total 10 ans		9,42	1,20	10,62	11,22
Bilan net : Apport - perte : - 0,60 t/ha					

plus d'incidence sur le bilan humique des sols. La différence entre les systèmes culturaux et les modes de fertilisation est considérable. Selon cet auteur, l'approche de calcul du bilan humique proposée par Soltner (1994) peut rendre compte, moyennant certains ajustements, des apports de carbone aux sols aussi bien que des modèles plus élaborés, tel le modèle de simulation Century. Parmi les ajustements proposés par Bolinder (2003), mentionnons la révision du facteur K1 de 0,15 à 0,21 pour les racines de maïs-grain, la prise en compte du carbone extra-racinaire et la modélisation de la biomasse racinaire à partir de la biomasse aérienne, particulièrement pour les plantes fourragères. L'estimation des biomasses racinaires est vraisemblablement le paramètre comportant le plus d'imprécision dans les calculs. Dans les prairies non labourées, le taux de renouvellement des biomasses racinaires complique encore davantage les estimations des entrées de carbone. Le taux de renouvellement de 50 % utilisé dans cette étude paraît approprié pour calculer la formation d'humus par les racines des prairies en production.

En ce qui concerne le taux de minéralisation de l'humus (K2), une valeur de 1,50 pour le loam limoneux Le Bras sous cultures commerciales a donné des résultats satisfaisants. La région où s'est déroulée l'expérience comporte 2300 utm, ce qui limite la période de minéralisation. Les conditions climatiques des régions doivent donc être intégrées aux calculs du bilan humique afin de tenir compte des températures et de la durée de la période de minéralisation. Les utm des régions pourraient servir d'indice à cet effet. La forte proportion de limon de ce sol ne permet pas d'obtenir une très bonne structure ni une bonne agrégation, ce qui justifie l'utilisation d'un coefficient de minéralisation moyen. L'examen attentif des propriétés physiques des sols, particulièrement la texture et la structure, permet de mieux prédire leur comportement sur le plan de la minéralisation puisqu'il existe un lien entre ces facteurs (N'Dayegamiye et Angers, 1990). L'approche de calcul du bilan humique est donc valable mais ses

limites sont liées à la capacité d'obtenir une information valide des paramètres agronomiques requis. Le calcul du bilan humique peut être un bon outil de gestion agricole pour l'entreprise, nécessaire dans le choix des types de rotation et des pratiques de fertilisation.

Conclusion

Les résultats de cette étude ont mis en évidence un bilan humique positif dans les prairies pour tous les modes de fertilisation, spécialement pour le fumier de bovins et le fumier de poulets. L'évolution de la MOS prédite par le calcul du bilan humique a été semblable à celle mesurée au champ. Le bilan humique constitue donc un moyen utile pour estimer les changements de la MOS. Dans les cultures commerciales, le bilan humique a indiqué une lente diminution de la MOS pour les parcelles fertilisées avec le lisier de porcs et la fumure minérale. Ces résultats sont conformes à l'évolution de la MOS mesurée au champ.

Cette étude démontre que le fumier de bovins laitiers est l'engrais ayant laissé le plus de matière organique au sol. Le fumier de poulets produit également un apport intéressant d'humus mais ses fortes teneurs en azote et en phosphore obligent à limiter les doses d'application sur les sols. Le lisier de porcs a produit peu d'humus. L'absence de litière dans cet engrais a comme effet de produire une matière organique fortement minéralisable et de faibles rendements en humus. Les résultats indiquent que les systèmes culturaux ont autant d'importance sur l'évolution de la MOS que la nature des engrais appliqués. La prairie est un excellent système à ce point de vue. Sous cultures commerciales, les pailles ont eu une contribution très appréciable au bilan humique mais globalement, le bilan humique a été déficitaire sauf dans la parcelle recevant du fumier de bovins.

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe de la Station de recherche et du Laboratoire d'analyse des sols de l'IRDA, spécialement MM. Pierre Audesse, Gérard Fortin et Michel Noël pour la mise en place des parcelles, l'acquisition des données, les travaux aux champs et les analyses en laboratoire. Je désire aussi souligner la précieuse collaboration et les judicieux conseils de MM. Adrien N'Dayegamiye et Denis Côté de l'IRDA. Je tiens à remercier également Agriculture et Agroalimentaire Canada (programme Stratégie emploi jeunesse) et l'IRDA pour leur support financier.

Références bibliographiques

Allison, L.E., Bollen, W.B. 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 Giroux, M. 1996. Recently deposited organic matter in soil water-stable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1547-1551.

Bolinder, M.A., Angers, D.A., et Voroney, R.P. 1994. Analyse de la dynamique de la matière organique des sols du Québec sous différents systèmes culturaux à l'aide du modèle de simulation Century. *Agrosol*. Vol.7 :12-16.

Bolinder, M.A. 2003. Contribution aux connaissances de la dynamique du C dans les systèmes SOL- PLANTE de l'Est du Canada. Thèse de doctorat. Université Laval.

Carrier, D. Octobre 1988. La matière organique du sol. *Agrosol* pp 15-20.

Clément, M.F et N'Dayegamiye, A. 2000. Le bilan humique : L'application à la ferme. Colloque sur la biologie des sols : les amendements organiques pour la santé des sols. Sainte-Foy, 22 février, 2000.

CPVQ. 2000. Gestion de la matière organique. Dans *Guide des pratiques de conservation en grandes cultures*. Module 3. 12 p.

CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation 2000. 1^{ère} édition. Chapitre 2. p. 20-29.

Gill, R.A., R.H. Kelly, W. Parton, K.A. Day, R.B. Jackson et J.A. Morgan. 2002. Using simple environmental variables to estimate below-ground productivity in grasslands. *Global Ecology and Biogeography*. 11:79-86

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. (2) : 7-16.

Mérisier, M.J., N'Dayegamiye, A. et Karam, A. 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.

N'Dayegamiye, A. 1990. Effets à long terme d'apports de fumier solide de bovins sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol et de la production de maïs-ensilage. *Can. J. Plant Sci.* 70: 767-775.

N'Dayegamiye, A et Angers, D.A. 1990. Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés. *Can. J. Soil Sci.* 70: 259-262.

N'Dayegamiye A. et Côté. D 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* vol (9) No. 1 : 31-45.

- N'Dayegamiye, A., Goulet, M. et Laverdière, M.
R. 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.
- Soltner, D. 1994. Les bases de la production
végétale, Tome 1, Le sol. 20^e édition. 467
p.
- Tabi, M, Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G.
et Rompré, M. 1990. Inventaire des
problèmes de dégradation des sols agri-
coles du Québec. Rapport synthèse. MA-
PAQ et Agriculture Canada, Québec,
Can. 133 pp.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L. et Beaton, J.D.
1985. Soil fertility and fertilizers. 4th ed.
New York. USA. Chap. 8: 292-328.

Annexe 1

Gain d'humus par les résidus de cultures dans les sols sous prairies.

Années	Cultures	Traitements	Gain d'humus racine			Gain d'humus partie aérienne			Gain d'humus des résidus de cultures (t/ha)
			Coeff.	Biomasse apportée		Coeff.	Biomasse apportée		
			K1	M. S.	Humus	K1	M. S.	Humus	
			(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	
1994	Fléole	Fumure minérale	0,15	5,00	0,75	0,12	2,00	0,24	0,99
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
1995	Fléole	Fumure minérale	0,15	6,00	0,90	0,12	2,00	0,24	1,14
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
1996	Fléole	Fumure minérale	0,15	10,00	1,50	0,12	2,00	0,24	1,74
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
1997	Orge grainée	Fumure minérale	0,15	4,00	0,60	0,15	2,00	0,30	0,90
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
1998	Luzerne fléole	Fumure minérale	0,20	5,00	1,00	0,12	2,00	0,24	1,24
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
1999	Luzerne fléole	Fumure minérale	0,20	6,00	1,20	0,12	2,00	0,24	1,44
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
2000	Luzerne fléole	Fumure minérale	0,20	10,00	2,00	0,12	2,00	0,24	2,24
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
2001	Orge grainée	Fumure minérale	0,15	4,00	0,60	0,15	2,00	0,30	0,90
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
2002	Luzerne fléole	Fumure minérale	0,20	5,00	1,00	0,12	2,00	0,24	1,24
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
2003	Luzerne fléole	Fumure minérale	0,20	6,00	1,20	0,12	2,00	0,24	1,44
		Fumier de bovins							
		Fumier de poulets							
		Lisier de porcs							
Total 10 ans : 13,27 t/ha									

Annexe 2

Gain d'humus par les engrais organiques dans les sols sous prairies.

Cas du lisier de porcs.

Année	Doses d'engrais	M.S.	M.S.	M.O.	K1	Gain d'humus
	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(t/ha)		
1994	116	2,58	2,99	2,04	0,10	0,21
1995	50	3,87	1,94	1,32	0,10	0,13
1996	60	1,60	0,96	0,65	0,10	0,06
1997	30	2,95	0,89	0,60	0,10	0,06
1998	30	3,45	1,04	0,70	0,10	0,07
1999	30	1,82	0,55	0,37	0,10	0,04
2000	30	2,14	0,64	0,44	0,10	0,04
2001	30	2,41	0,72	0,49	0,10	0,05
2002	30	7,74	2,32	1,58	0,10	0,16
2003	30	1,98	0,59	0,40	0,10	0,04
Total 10 ans : 0,86 t/ha						

Cas du fumier de bovins laitiers.

Année	Doses d'engrais	M.S.	M.S.	M.O.	K1	Gain d'humus
	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(t/ha)		
1994	76	21,00	15,96	12,77	0,25	3,19
1995	25	20,00	5,00	4,00	0,25	1,00
1996	25	20,00	5,00	4,00	0,25	1,00
1997	25	15,00	3,75	3,00	0,25	0,75
1998	25	19,00	4,75	3,80	0,25	0,95
1999	28	26,00	7,28	5,82	0,25	1,46
2000	28	16,81	4,71	3,77	0,25	0,94
2001	25	15,96	3,99	3,19	0,25	0,80
2002	17	17,50	2,98	2,38	0,25	0,60
2003	19	18,90	3,59	2,87	0,25	0,72
Total 10 ans : 11,40 t/ha						

Cas du fumier de bovins laitiers.

Année	Doses d'engrais	M.S.	M.S.	M.O.	K1	Gain d'humus
	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(t/ha)		
1994	5,00	56,25	2,81	2,39	0,20	0,48
1995	15,00	78,00	11,70	9,95	0,20	1,99
1996	7,50	65,00	4,88	4,14	0,20	0,83
1997	5,00	68,00	3,40	2,89	0,20	0,58
1998	5,00	71,00	3,55	3,02	0,20	0,60
1999	3,80	71,89	2,73	2,32	0,20	0,46
2000	3,80	57,35	2,18	1,85	0,20	0,37
2001	3,50	60,61	2,12	1,80	0,20	0,36
2002	3,40	63,40	2,16	1,83	0,20	0,37
2003	4,10	44,00	1,80	1,53	0,20	0,31
Total 10 ans : 6,35 t/ha						

Annexe 3

Perte d'humus par minéralisation dans les sols sous prairies.

Cas de la fumure minérale.

Année	M. O. (%)	Profondeur de labour (m)	Densité (t/m ³)	M. O. (t/ha)	Coefficient K2	Perte d'humus (t/ha)
1994	2,45	0,20	1,40	68,60	1,20	0,82
1995	2,53	0,20	1,40	70,84	1,20	0,85
1996	2,61	0,20	1,40	73,08	1,20	0,88
1997	2,88	0,20	1,40	80,64	1,20	0,97
1998	2,61	0,20	1,40	73,08	1,20	0,88
1999	2,86	0,20	1,40	80,08	1,20	0,96
2000	2,64	0,20	1,40	73,92	1,20	0,89
2001	2,77	0,20	1,40	77,56	1,20	0,93
2002	2,91	0,20	1,40	81,48	1,20	0,98
2003	2,73	0,20	1,40	76,44	1,20	0,92
Total 10ans : 9,08 t/ha						

Cas du fumier de poulets.

Année	M.O. (%)	Profondeur de labour (m)	Densité (t/m ³)	M.O. (t/ha)	Coefficient K2	Perte d'humus (t/ha)
1994	3,28	0,20	1,40	91,84	1,2	1,10
1995	3,22	0,20	1,40	90,16	1,2	1,08
1996	3,16	0,20	1,40	88,48	1,2	1,06
1997	3,47	0,20	1,40	97,16	1,2	1,17
1998	3,27	0,20	1,40	91,56	1,2	1,10
1999	3,46	0,20	1,40	96,88	1,2	1,16
2000	3,29	0,20	1,40	92,12	1,2	1,11
2001	3,34	0,20	1,40	93,52	1,2	1,12
2002	3,39	0,20	1,40	94,92	1,2	1,14
2003	3,52	0,20	1,40	98,56	1,2	1,18
Total 10 ans : 11,22 t/ha						

Cas du fumier de bovins.

Année	M.O. (%)	Profondeur de labour (m)	Densité (t/m ³)	M.O. (t/ha)	K2	Perte d'humus (t/ha)
1994	2,90	0,20	1,40	81,20	1,2	0,97
1995	2,95	0,20	1,40	82,60	1,2	0,99
1996	3,01	0,20	1,40	84,28	1,2	1,01
1997	3,19	0,20	1,40	89,32	1,2	1,07
1998	2,61	0,20	1,40	73,08	1,2	0,88
1999	2,64	0,20	1,40	73,92	1,2	0,89
2000	3,06	0,20	1,40	85,68	1,2	1,03
2001	3,10	0,20	1,40	86,80	1,2	1,04
2002	3,15	0,20	1,40	88,20	1,2	1,06
2003	3,20	0,20	1,40	89,60	1,2	1,08
Total 10 ans : 10,02 t/ha						

Cas du lisier de porcs.

Année	M.O.	Profondeur de labour (m)	Densité (t/m ³)	M.O.	K2	Perte d'humus (t/ha)
	(%)			(t/ha)		
1994	3,00	0,20	1,40	84,00	1,2	1,01
1995	2,96	0,20	1,40	82,88	1,2	0,99
1996	2,93	0,20	1,40	82,04	1,2	0,98
1997	3,70	0,20	1,40	103,60	1,2	1,24
1998	3,17	0,20	1,40	88,76	1,2	1,07
1999	3,56	0,20	1,40	99,68	1,2	1,20
2000	2,99	0,20	1,40	83,72	1,2	1,00
2001	3,36	0,20	1,40	94,08	1,2	1,13
2002	3,74	0,20	1,40	104,72	1,2	1,26
2003	3,55	0,20	1,40	99,40	1,2	1,19
Total 10 ans : 11,07 t/ha						

Annexe 4

Gain d'humus par les résidus de cultures dans les sols sous cultures commerciales.

Années	Cultures	Traitements	Gain d'humus racine			Gain d'humus partie aérienne			Gain d'humus des résidus de cultures (t/ha)		
			Coeff.	Biomasse apportée		Coeff.	Biomasse apportée				
				K1	M.S.		Humus	K1		M.S.	Humus
					(t/ha)		(t/ha)			(t/ha)	(t/ha)
1994	Orge	Fumure minérale	0,15	3,50	0,53	0,15	0,00	0,00	0,53		
		Fumier de bovins									
		Lisier de porcs									
1995	Blé	Fumure minérale	0,15	2,50	0,38	0,15	0,00	0,00	0,38		
		Fumier de bovins									
		Lisier de porcs									
1996	Orge	Fumure minérale	0,15	3,50	0,53	0,12	0,00	0,00	0,53		
		Fumier de bovins									
		Lisier de porcs									
1997	Canola	Fumure minérale	0,15	2,50	0,38	0,15	5,20	0,78	1,16		
		Fumier de bovins					4,64	0,70	1,08		
		Lisier de porcs					4,74	0,71	1,09		
1998	Maïs-grain	Fumure minérale	0,15	3,00	0,45	0,12	7,16	0,86	1,31		
		Fumier de bovins					8,06	0,97	1,42		
		Lisier de porcs					7,45	0,89	1,34		
1999	Maïs-grain	Fumure minérale	0,15	3,00	0,45	0,12	9,09	1,09	1,54		
		Fumier de bovins					10,40	1,25	1,70		
		Lisier de porcs					9,56	1,15	1,61		
2000	Orge	Fumure minérale	0,15	2,50	0,38	0,15	0,00	0,00	0,38		
		Fumier de bovins									
		Lisier de porcs									
2001	Canola	Fumure minérale	0,15	2,50	0,38	0,15	3,94	0,59	0,97		
		Fumier de bovins					3,60	0,54	0,92		
		Lisier de porcs					4,32	0,65	1,03		
2002	Maïs-grain	Fumure minérale	0,15	3,00	0,45	0,12	4,90	0,59	1,04		
		Fumier de bovins					5,80	0,70	1,15		
		Lisier de porcs					6,22	0,75	1,20		
2003	Maïs-grain	Fumure minérale	0,15	3,00	0,45	0,12	5,62	0,67	1,12		
		Fumier de bovins					6,26	0,75	1,20		
		Lisier de porcs					6,66	0,80	1,25		

Annexe 5

Gain d'humus par les engrais organiques dans les sols sous cultures commerciales.

Cas du lisier de porcs.

Années	Doses d'engrais	M.S.	M.S.	M.O.	K1	Gain d'humus
	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(t/ha)		
1994	40	4,03	1,61	1,10	0,10	0,11
1995	50	3,87	1,94	1,32	0,10	0,13
1996	30	2,61	0,78	0,53	0,10	0,05
1997	50	2,95	1,48	1,00	0,10	0,10
1998	50	3,73	1,87	1,27	0,10	0,13
1999	50	3,59	1,80	1,22	0,10	0,12
2000	50	1,37	0,69	0,47	0,10	0,05
2001	50	1,92	0,96	0,65	0,10	0,07
2002	50	9,34	4,67	3,18	0,10	0,32
2003	50	3,39	1,70	1,15	0,10	0,12
Total 10 ans : 1,21 t/ha						

Cas du fumier de bovins.

Années	Doses d'engrais	M.S.	M.S.	M.O.	K1	Gain d'humus
	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(t/ha)		
1994	36	19,99	7,20	5,76	0,25	1,44
1995	20	19,83	3,97	3,17	0,25	0,79
1996	20	19,83	3,97	3,17	0,25	0,79
1997	45	19,83	8,32	7,14	0,25	1,78
1998	45	19,91	8,96	7,17	0,25	1,79
1999	45	15,39	6,93	5,54	0,25	1,39
2000	60	16,47	9,88	7,91	0,25	1,98
2001	60	15,57	9,34	7,47	0,25	1,87
2002	47	17,11	8,04	6,43	0,25	1,61
2003	44	17,98	7,91	6,33	0,25	1,58
Total 10 ans : 15,02 t/ha						

Annexe 6

Perte d'humus par minéralisation dans les sols sous cultures commerciales.

Cas du fumier de bovins laitiers.

Année	M.O. (%)	Profondeur de labour (m)	Densité (t/m ³)	M.O. (t/ha)	Coefficient K2	Perte d'humus (t/ha)
1994	4,62	0,20	1,35	124,74	1,50	1,87
1995	4,69	0,20	1,35	126,63	1,50	1,90
1996	4,77	0,20	1,35	128,79	1,50	1,93
1997	4,12	0,20	1,35	111,24	1,50	1,67
1998	4,44	0,20	1,35	119,88	1,50	1,80
1999	4,20	0,20	1,35	113,40	1,50	1,70
2000	4,69	0,20	1,35	126,63	1,50	1,90
2001	4,71	0,20	1,35	127,17	1,50	1,91
2002	4,53	0,20	1,35	122,31	1,50	1,83
2003	4,62	0,20	1,35	124,74	1,50	1,87
Total 10 ans : 18,38 t/ha						

Cas du lisier de porcs.

Année	M.O. (%)	Profondeur de labour (m)	Densité (t/m ³)	M.O. (t/ha)	Coefficient K2	Perte d'humus (t/ha)
1994	3,06	0,20	1,41	86,29	1,50	1,29
1995	2,85	0,20	1,41	80,37	1,50	1,21
1996	2,64	0,20	1,41	74,45	1,50	1,12
1997	2,85	0,20	1,41	80,37	1,50	1,21
1998	2,44	0,20	1,41	68,81	1,50	1,03
1999	2,52	0,20	1,41	71,06	1,50	1,07
2000	2,64	0,20	1,41	74,45	1,50	1,12
2001	2,43	0,20	1,41	68,53	1,50	1,03
2002	2,44	0,20	1,41	68,81	1,50	1,03
2003	2,63	0,20	1,41	74,17	1,50	1,11
Total 10 ans : 11,22 t/ha						

Cas de la fumure minérale.

Année	M.O. (%)	Profondeur de labour (m)	Densité (t/m ³)	M.O. (t/ha)	K2	Perte d'humus (t/ha)
1994	2,79	0,20	1,41	78,68	1,50	1,18
1995	2,75	0,20	1,41	77,55	1,50	1,16
1996	2,72	0,20	1,41	76,70	1,50	1,15
1997	2,68	0,20	1,41	75,58	1,50	1,13
1998	2,94	0,20	1,41	82,91	1,50	1,24
1999	2,29	0,20	1,41	64,58	1,50	0,97
2000	2,83	0,20	1,41	79,81	1,50	1,20
2001	3,03	0,20	1,41	85,45	1,50	1,28
2002	2,60	0,20	1,41	73,32	1,50	1,10
2003	2,61	0,20	1,41	73,60	1,50	1,10
Total 10 ans : 11,51 t/ha						