

Les membres fondateurs de l'IRDA :

Québec 

- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
- Ministère du Développement économique et régional et de la Recherche
- Ministère de l'Environnement



**INFLUENCE DES SYSTÈMES CULTURAUX ET DES MODES DE FERTILISATION
SUR LE BILAN DE LA MATIÈRE ORGANIQUE, DU PHOSPHORE ET DU
POTASSIUM, L'ÉVOLUTION DE TENEURS EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS DES
SOLS ET LES RENDEMENTS DES CULTURES**

SITE DE SAINT-LAMBERT DE LAUZON

Cahier no 4



Préparé par :

Marcel Giroux, agr. M. Sc.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Courriel : marcel.giroux@irda.qc.ca

Mathieu Quénum , stagiaire,
IRDA, Sainte-Foy

Raynald Royer, technicien agricole principal,
IRDA, Sainte-Foy

Juin 2005

Objectifs poursuivis

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

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

Diffusion des résultats

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

Michel Rompré

coordonnateur du réseau de l'Observatoire de la qualité de sols agricoles du Québec

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	6
RÉSUMÉ	7
1. INTRODUCTION	9
1.1 Importance de la matière organique du sol	9
1.2 Bilan humique des sols	9
1.3 Bilan du P et du K et évolution des teneurs dans les sols.....	10
1.4 Potentiel de minéralisation des sols	11
1.5 Rendements des cultures selon les modes de fertilisation	12
2. BUT ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	14
3. MÉTHODOLOGIE	15
3.1 Description du protocole expérimental	15
3.2 Méthodologie de calcul du bilan humique	16
3.3 Suivi de l'évolution de la matière organique des sols.....	17
3.4 Suivi de l'évolution des teneurs en P et K des sols et des bilans d'apport.....	17
3.5 Suivi de l'évolution de la teneur en azote total des sols.....	17
3.6 Suivi du soufre disponible dans les sols.....	17
4. RÉSULTATS DES BILANS D'APPORT ET DES TENEURS DANS LES SOLS.....	18
4.1 Bilan humique des sols sous prairies	18
4.2 Évolution de la matière organique des sols sous prairies	20
4.3 Bilan humique des sols sous cultures commerciales	20
4.4 Évolution de la matière organique des sols sous cultures commerciales	22
4.5 Discussion sur le bilan humique des sols.....	23
4.6 Bilan du P sous prairies et évolution des teneurs dans les sols.....	23
4.7 Bilan du P sous cultures commerciales et évolution des teneurs dans les sols.....	25
4.8 Bilan du K sous prairies et évolution des teneurs dans les sols.....	27
4.9 Bilan du K sous cultures commerciales et évolution des teneurs dans les sols.....	29
4.10 Évolution des teneurs en N total dans les sols sous prairies	31
4.11 Évolution des teneurs en N total dans les sols sous cultures commerciales	31
4.12 Teneurs en sulfate des sols selon les systèmes culturaux et les modes de fertilisation	32
5. RENDEMENTS DES CULTURES SELON LES MODES DE FERTILISATION	34
6. CONCLUSION.....	35
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	36
8. REMERCIEMENTS	39

9. ANNEXES

9.1 Annexe 1 Gain d'humus par les résidus de culture dans les sols sous prairies	40
9.2 Annexe 2 Gain d'humus par les engrais organiques dans les sols sous prairies	41
9.3 Annexe 3 Perte d'humus par minéralisation dans les sols sous prairies	42
9.4 Annexe 4 Gain d'humus par les résidus de culture dans les sols sous cultures commerciales.....	44
9.5 Annexe 5 Gain d'humus par les engrais organiques dans les sols sous cultures commerciales ..	45
9.6 Annexe 6 Perte d'humus par minéralisation dans les sols sous cultures commerciales	46

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1.	Description des cultures dans les systèmes sous prairies	16
Tableau 2.	Description des cultures dans les systèmes sous cultures commerciales	16
Tableau 3.	Bilan humique des sols sous prairies fertilisées avec une fumure minérale	18
Tableau 4.	Bilan humique des sols sous prairies fertilisées avec du lisier de porcs	19
Tableau 5.	Bilan humique des sols sous prairies fertilisées avec du fumier de poulets.....	19
Tableau 6.	Bilan humique des sols sous prairies fertilisées avec du fumier de bovins laitiers	19
Tableau 7.	Bilan humique des sols sous cultures commerciales fertilisées avec une fumure minérale	21
Tableau 8.	Bilan humique des sols sous cultures commerciales fertilisées avec du fumier de bovins laitiers.....	21
Tableau 9.	Bilan humique des sols sous cultures commerciales fertilisées avec du lisier de porcs	22
Tableau 10.	Bilan d'apport du phosphore sous prairies	24
Tableau 11.	Bilan d'apport du phosphore sous cultures commerciales	26
Tableau 12.	Bilan d'apport du potassium dans sous prairies	28
Tableau 13.	Bilan d'apport de potassium sous cultures commerciales.....	30
Tableau 14.	Évolution des teneurs en azote total des sols sous prairies selon les modes de fertilisation	31
Tableau 15.	Évolution des teneurs en azote total des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	32
Tableau 16.	Teneurs en sulfate des sols sous prairies selon les modes de fertilisation	32
Tableau 17.	Teneurs en sulfate des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	33
Figure 1.	Évolution de la matière organique des sols sous prairies selon les modes de fertilisation	20
Figure 2.	Évolution de la matière organique des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	22
Figure 3.	Évolution des teneurs en phosphore des sols sous prairies selon les modes de fertilisation	25
Figure 4.	Évolution des teneurs en phosphore des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	27
Figure 5.	Évolution des teneurs en potassium des sols sous prairies selon les modes de fertilisation.....	29
Figure 6.	Évolution des teneurs en potassium des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation	31
Figure 7.	Rendements des prairies selon les modes de fertilisation	34
Figure 8.	Rendements des cultures commerciales selon les modes de fertilisation	34

RÉSUMÉ

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. Elle portait sur les effets des systèmes culturaux (prairies et cultures commerciales) et des modes de fertilisation (engrais de ferme et fumure minérale) sur le bilan humique, le bilan du P et du K, l'évolution des teneurs en éléments nutritifs dans les sols et les rendements des cultures. Un suivi des teneurs en matière organique du sol (MOS), en P Mehlich-3 (P-M3), en K Mehlich-3 (K-M3), en N total et soufre disponible (S-SO₄) a été réalisé dans des sols sous prairies et sous cultures commerciales soumises à divers modes de fertilisation : fumure minérale, fumier de bovins laitiers, fumier de poulets et lisier de porcs.

Dans les sols sous prairies, les résultats montrent que le bilan humique net sur dix ans est positif pour tous les modes de fertilisation. Dans la parcelle fertilisée avec du fumier de bovins laitiers, il 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 la parcelle 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 sur 10 ans a été 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 elle 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 résidus de culture n'ont pas suffi à eux seuls à maintenir la MOS malgré des apports importants dans les sols.

Les bilans nets d'apport du P ont varié selon les cultures et les modes de fertilisation. Dans la prairie, le bilan net cumulatif sur dix ans (apport P – exportation P) a été de 58 kg P₂O₅/ha avec la fumure minérale, de 352 kg P₂O₅/ha avec le fumier de bovins laitiers, de 626 kg P₂O₅/ha avec le fumier de poulets et de 380 kg P₂O₅/ha avec le lisier de porcs. La teneur en P-M3 des sols était initialement faible. Elle s'est enrichie modérément avec le fumier de poulets et elle est demeurée relativement stable pour les autres types d'engrais. Globalement, les bilans excédentaires du P ont eu peu d'effets sur l'enrichissement en P-M3 des sols. Ce fait démontre que le phénomène de rétroversion du P est très actif dans ce sol, ce qui contribue à rendre non labile le phosphore excédentaire. Dans les cultures commerciales le bilan net cumulatif du P sur dix ans a été de 424 kg P₂O₅/ha avec la fumure minérale, de 747 kg P₂O₅/ha avec le lisier de porcs et de 816 kg P₂O₅/ha avec le fumier de bovins laitiers. Ces bilans excédentaires du P ont accru modérément les teneurs en P-M3 des sols. Un enrichissement se produit pour tous les modes de fertilisation mais aucune parcelle n'a atteint une teneur supérieure à 100 kg P/ha après dix années de culture.

Pour le potassium, l'étude a démontré que les prairies exportent beaucoup de K et que le bilan est négatif. Le bilan net cumulatif du K sur 10 ans a été de -573 kg K₂O/ha avec la fumure minérale, de -43 kg K₂O/ha avec le fumier de bovins laitiers, de -586 kg K₂O/ha avec le fumier de poulets et de -439 kg K₂O/ha avec le lisier de porcs. La teneur initiale en K des sols était moyenne. Elle a diminué légèrement après dix ans suite au bilan du K très déficitaire. Les cultures commerciales exportent moins de K. Le bilan net cumulatif du K sur dix ans a été de 213 kg K₂O/ha avec la fumure minérale, de 370 kg K₂O/ha avec le lisier de porcs et de 1804 kg K₂O/ha avec le fumier de bovins laitiers. La teneur en K des sols s'est accrue pour tous les modes de fertilisation. Avec la fumure minérale et le lisier de porcs, elle est passée de 100 à près de 200 kg K/ha. Avec le fumier de bovins laitiers, la teneur en K du sol est passée de 100 à près de 800 kg K/ha, soit une augmentation de près de 700 kg K/ha sur 10 ans. Le fumier de bovins a produit un accroissement excessif du K du sol dans les cultures commerciales. Les doses élevées de fumiers, combinées à de fortes teneurs en K et des exportations faibles par les grains expliquent ces résultats.

Les teneurs en azote total des sols mesurées sous prairies s'accroissent dans toutes les parcelles. Le taux d'accroissement varie cependant selon les modes de fertilisation. Il est plus élevé pour le fumier de bovins et le fumier de poulets, comparé à la fumure minérale et au lisier de porcs. Dans les parcelles sous cultures commerciales, on observe un maintien des teneurs en azote total avec le fumier de bovins et une légère diminution avec la fumure minérale et le lisier de porcs. Ces résultats sont tout à fait similaires à ce qui a été observé pour l'évolution de la matière organique des sols.

Le soufre disponible ($S-SO_4$) est plus élevé dans les parcelles fertilisées avec les fumiers de bovins et de poulets que dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale et le lisier de porcs.

Dans les prairies, les rendements avec les engrais de ferme sont souvent supérieurs, parfois identiques à ceux obtenus avec la fumure minérale uniquement. Les divers engrais de ferme ont généralement fourni des rendements semblables. Dans les cultures commerciales, la fumure minérale a généralement fourni un rendement identique à celui des engrais de ferme.

1 - INTRODUCTION

1.1 Importance de la matière organique du sol

La transformation de l'agriculture québécoise au cours des dernières décennies a suscité beaucoup de questions quant à l'évolution de la qualité des sols. Le développement intensif des cultures commerciales, la diminution des superficies en prairies et 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 dégradation 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'aggrégation 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 proportion 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.

On peut agir rapidement sur la réserve de la fraction organique labile des sols, grâce à de bonnes rotations des 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. 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; Mérisier 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). 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 des 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. 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 matière organique et d'apporter régulièrement des engrais organiques.

1.2 Bilan humique des sols

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 sur l'évolution à long terme de l'humus (fraction stable) d'une part, 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 organique, 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; Clément et N'Dayegamiye, 2000; Bolinder et al., 1994; Bolinder, 2003).

Un des buts de cette étude est de mieux connaître l'effet des cultures et des modes de fertilisation sur le bilan humique des sols. On désire également 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.

1.3 Bilan des éléments P et K et évolution des teneurs dans les sols

Il est utile de dresser le bilan des apports et des exportations des éléments nutritifs des champs, notamment en ce qui concerne le phosphore et le potassium. Dans le cas de notre étude, il s'agit d'un bilan à la surface du sol qui permet de comparer les exportations de P et K par les cultures avec les apports associés aux matières fertilisantes (engrais minéraux et engrais de ferme). Ces bilans aident à établir si la fertilisation excède ou non les exportations des cultures et ils permettent de mieux comprendre l'évolution des teneurs dans les sols. Les bonnes pratiques de fertilisation ne supposent pas que les bilans du P ou du K doivent nécessairement être équilibrés. Si on examine les grilles de fertilisation en grandes cultures, on observe qu'en sols pauvres, les bilans sont généralement positifs, c'est-à-dire que les apports de P et de K excèdent les exportations. Pour le phosphore, le phénomène de fixation des phosphates et la pauvreté des sols font en sorte que les besoins en engrais dépassent les exportations de P. Dans les sols de bonne fertilité, les apports de P visent à combler les besoins en P de la culture. Ces apports sont assez près des exportations de P pour plusieurs cultures. Comme la rétroversion des phosphates est toujours présente dans les sols, un bilan du phosphore équilibré ne peut maintenir la teneur en P des sols à long terme, même s'il peut suffire aux besoins des cultures à court terme. Pour les sols riches et très riches, les recommandations en P des grilles de fertilisation sont inférieures aux exportations. On vise à mettre à profit les réserves disponibles du P du sol. Pour les engrais de ferme, on préconise une approche de bilan du P au niveau des plans de fertilisation.

Le taux d'enrichissement des teneurs en phosphore (P) du sol suite à des applications de fertilisants dépend beaucoup des caractéristiques chimiques du sol et de sa nature pédologique. Le phosphore soluble des engrais organiques ou minéraux se présente principalement sous forme H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} . On trouve dans les sols d'importantes quantités d'oxydes de fer et d'aluminium, de l'ordre de 0,2 à 0,7 % de Fe et de Al, soit plusieurs tonnes par hectare. Il va s'établir un équilibre entre le P du sol et le P en solution qui va dépendre de la nature chimique des produits de réaction et du pH. Cet équilibre est dynamique; il va changer dans le temps. À plus long terme, les phosphates précipités vont évoluer sur le plan chimique vers des formes de plus en plus stables. Pour le calcium, ces formes peuvent être des phosphates dicalciques, tricalciques, octocalciques et apatitiques. Pour le fer et l'aluminium, les phosphates vont être transformés en minéraux très stables : strengite et variscite. La mesure du phosphore disponible dosée avec la méthode Mehlich-3 va fluctuer dans le temps selon l'évolution des formes de phosphore. Comme cette évolution tend à rendre de moins en moins disponible le phosphore du sol et celui résiduel des engrais, on appelle ce phénomène la rétroversion des phosphates.

Plusieurs travaux réalisés au Québec ont démontré que la capacité de fixation du phosphore est particulièrement influencée par la teneur en aluminium libre des sols. L'aluminium extrait avec Mehlich-3 donne une bonne indication de la capacité de fixation du P. La nature pédologique des sols est également révélatrice du phénomène. Vézina et al. (2000) ont établi un groupement des séries de sols quant à leur aptitude à fixer le phosphore en faisant intervenir les grands groupes pédologiques, soit les podzols, les brunisols et les gleysols, de même que leur texture. Les engrais phosphatés appliqués vont donc réagir différemment, être plus ou moins disponibles aux cultures, enrichir plus ou moins les sols selon leur nature pédologique, plus spécifiquement selon leur teneur en aluminium libre et leur texture. Ces notions ont été validées par Khiari et al. (2000) et par Pellerin (2003) et sont incluses dans les nouvelles grilles de fertilisation des prairies, du maïs-grain et de la pomme de terre (CRAAQ, 2003).

Les essais sur l'enrichissement en phosphore des sols montrent des niveaux d'application très variables pour les enrichir. Au Québec, les résultats de recherche indiquent qu'il faut appliquer généralement entre 2 et 5 kg, exceptionnellement 7 kg P/ha, pour enrichir les sols de 1 kg P-M3/ha. Zhang et al. (1995) ont obtenu des valeurs de 3,2 à 5,3 kg P en excès des exportations pour enrichir le sol de 1 kg P-M3/ha dans la région de Montréal sur le loam sablo-argileux Chicot. Par contre, dans des sols sableux très pauvres, Rehm et al. (1984) ont trouvé des rapports beaucoup plus élevés qui variaient de 5,6 à 9,3 kg P/ha pour chaque augmentation de 1 kg P-M3/ha. Certains sols sont donc difficiles à enrichir et on ne peut prédire l'accroissement des teneurs en P d'un sol sans examiner ses caractéristiques.

L'absence de fertilisation phosphatée va provoquer une diminution progressive de la teneur en P disponible dans le sol. La vitesse d'épuisement dépend des exportations par les cultures et de la teneur initiale en P du sol. Plus les sols sont riches en P, plus la diminution de leur teneur est rapide lorsqu'on cesse les applications de P. Dans une expérience à long terme sur une rotation maïs-soya, McCollum (1991) a suivi pendant 30 ans l'épuisement du P disponible dans un loam sableux. Dans les parcelles ayant des teneurs initiales de 350 à 430 kg P/ha, le taux de diminution suite à l'arrêt de la fertilisation a été de 23 kg P/ha par an. Dans les parcelles dont la teneur initiale en P-Mehlich-3 est plus faible, soit de 78 à 200 kg P/ha, le taux de diminution est respectivement de 3,2 et 11,7 kg P/ha par an. Webb et al. (1992) ont démontré que la dose de P nécessaire pour maintenir la teneur en P des sols a varié de 34 à plus de 70 kg P₂O₅/ha selon la richesse des sols. Plus la teneur en P des sols est élevée, plus la dose de P nécessaire à son maintien est élevée. Il semble donc que pour enrichir la teneur en P des sols, des bilans fortement excédentaires soient requis et qu'à l'inverse, un bilan du P équilibré réduit les teneurs dans les sols. Ces faits ont été démontrés au Québec par Giroux et al. (2002) en établissant une relation entre le bilan du P et l'évolution des teneurs en P des sols dans plusieurs champs expérimentaux provenant de différentes études.

La disponibilité du potassium du sol dépend de la teneur en K échangeable, de la texture, de la capacité tampon, de la capacité de fixation, des formes de réserves non-échangeables et de la nature minéralogique des sols (Simard et al., 1989; Giroux et Tran, 1991). Le type de culture et son niveau d'intensification ont beaucoup d'incidence sur le bilan du K. Les prairies exportent beaucoup de potassium, surtout si la fumure azotée est élevée (Giroux et Lemieux, 2000). Pour les céréales à paille, le maïs-grain et le canola, les exportations du K par les grains sont faibles et le potassium se concentre dans les pailles ou les tiges (Giroux et Tran, 1994). La récolte des pailles va donc avoir des incidences sur le bilan du K.

L'un des objectifs de cette étude est de réaliser le bilan des entrées et des sorties du phosphore et du potassium et de suivre leur évolution à long terme dans les sols afin de mieux comprendre l'incidence des systèmes culturaux et des modes de fertilisation sur ces aspects.

1.4 Potentiel de minéralisation des sols

Un autre aspect important de la fertilité des sols concerne leur capacité de minéralisation, liée à leur activité biologique. Cette capacité de minéralisation concerne le carbone, l'azote et le soufre. Les engrais de ferme contiennent des teneurs très variables en azote minéral et organique. Dans les fumiers solides de bovins, la proportion d'azote sous forme ammoniacale (NH₄⁺) peut varier de 16,8 à 28 % (N'Dayegamiye, 1990). Pour les lisiers de porcs, cette proportion se

situé à environ 70 % (Côté et Tran, 1996). L'azote organique peut s'accumuler dans les sols et être minéralisé durant les années subséquentes. Selon Ziegler (1987), seulement 22 % de l'azote organique du fumier de bovins est minéralisé la première année, une partie importante sera minéralisée dans les années subséquentes. Il faut donc tenir compte des arrières-effets des apports répétitifs de fumier (CRAAQ, 2003). Les sols contiennent des proportions variables de matière organique labile selon les systèmes culturaux et les modes de fertilisation, ce qui va affecter leur capacité de minéralisation.

Dans une expérience comprenant successivement le maïs-ensilage, le blé et l'orge, N'Dayegamiye et al. (1997) rapportent que l'application prolongée d'engrais minéraux peut procurer de faibles retours de matière organique et conduire à la diminution de la MOS. Ces mêmes chercheurs ont démontré que des apports prolongés de fumier de bovins ont accru les teneurs en C et N du sol comparativement aux parcelles fertilisées avec une fumure minérale. L'apport de fumier de bovins a significativement augmenté la biomasse microbienne, la respiration microbienne (CO_2) et la minéralisation de l'azote (NO_3^-) comparativement à la fumure minérale seule.

La teneur en N disponible du sol est influencée par la quantité de matière organique labile, par la capacité de minéralisation de l'azote du sol et par l'activité biologique. C'est de la minéralisation de l'azote organique du sol pendant la période de croissance, que dépendra en grande partie la fourniture d'azote aux plantes. Ainsi, les engrais azotés devraient être considérés comme le complément à la fourniture d'azote par le sol. Giroux et Guertin (1998), dans une étude portant sur l'effet de la fertilisation N et les interactions sur le rendement du maïs-grain, ont démontré qu'il existe des différences dans la dose optimale d'azote selon les saisons et selon l'importance de la minéralisation de l'azote du sol. Dans un sol ayant une bonne capacité de minéralisation, la contribution de l'azote du sol représente environ les deux tiers de l'azote prélevé par les cultures (Tran, 1995).

Le soufre est absorbé par les plantes sous forme de sulfate. Tout comme l'azote, on en retrouve une importante quantité dans les sols sous forme organique. Une étude menée par N'Dayegamiye et al. (1994) montre que le potentiel de minéralisation de l'azote est également un bon indicateur du soufre minéralisable. Une incubation du sol à température et humidité contrôlées permet de connaître le potentiel de minéralisation du S des sols. La baisse des niveaux de MOS entraîne généralement une diminution de la disponibilité du soufre pour les cultures. En effet, la quantité de soufre organique est fortement corrélée à la teneur en MOS (Kamprath et Jones, 1986). Le soufre a depuis longtemps occupé une place non négligeable dans la fertilisation des plantes. Durant les dernières décennies, on a cependant assisté à une fertilisation des cultures avec des engrais minéraux N, P, K, contenant de très faibles teneurs en soufre. Des études ont aussi indiqué que le soufre pouvait être déficient dans les sols du Québec (Martel et Zizka, 1977; Delisle, 1990). Cette déficience se manifeste non seulement par la diminution des rendements mais aussi par une diminution de la qualité des récoltes (Blagrove et al., 1976). On assiste aujourd'hui à un regain d'intérêt pour évaluer les besoins des plantes en soufre en vue d'augmenter à la fois les rendements et la qualité des récoltes. Les engrais de ferme peuvent contribuer à accroître la teneur en soufre organique et disponible dans les sols.

C'est pourquoi nous avons suivi le soufre disponible dans les sols selon les modes de fertilisation des cultures. Nous avons procédé à l'analyse des sols à la fin du deuxième cycle de rotation en 2000, pour connaître la teneur en soufre disponible (S-SO_4) selon les systèmes culturaux et les modes de fertilisation.

1.5 Rendements des cultures selon les modes de fertilisation

Selon une étude menée par N'Dayegamiye (1996) sur la réponse du maïs-ensilage et du blé à la fertilisation minérale et organique dans les essais de longue durée avec fumiers et engrais minéraux, les effets sont principalement reliés aux types de culture, aux modes de fertilisation et à l'apport prolongé de fumier. Les rendements des cultures sont souvent plus élevés lorsqu'une fumure organique est utilisée (Magdoff et Amadon, 1980). Cet effet n'est pas dû seulement à l'apport des éléments nutritifs mais à un effet indirect des engrais organiques sur l'amélioration des propriétés physiques

(meilleure aération, capacité d'égouttement et rétention en eau) en lien avec l'activité biologique des sols suite à l'apport d'une matière organique labile.

En raison de leurs effets bénéfiques sur la qualité des sols, les engrais de ferme permettent de hausser le potentiel de rendement des cultures. Toutefois, il faut bien connaître leurs caractéristiques et adopter de bonnes pratiques de gestion pour en retirer les bénéfices escomptés et minimiser les risques d'accumulation excessive d'éléments nutritifs dans les sols (Giroux et al, 1996).

2 - BUT ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le but visé de cette étude est d'améliorer les connaissances sur l'influence des systèmes culturaux et des pratiques de fertilisation avec les engrais de ferme et la fumure minérale sur la fertilité et la productivité des sols. Nous voulons particulièrement approfondir les connaissances sur les bilans du carbone, du phosphore et du potassium en lien avec l'accumulation de ces éléments dans les sols. Deux systèmes culturaux, l'un sous prairies et l'autre sous cultures commerciales, ont été soumis à divers modes de fertilisation avec des engrais de ferme et une fumure minérale pendant une période de dix ans afin d'en mesurer les effets sur la fertilité des sols et les rendements des cultures.

3. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

3.1 Description du 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 de la série Le Bras. Le premier site, constitué de systèmes sous prairies de fléole ou de luzerne-fléole réimplantées tous les quatre ans, comporte quatre 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. Les teneurs initiales en P, K et Al de ce sol, mesurées avec la méthode Mehlich-3, étaient respectivement de 80 kg P/ha, de 152 kg K/ha et de 1272 mg Al/kg. Sa teneur en matière organique était de 3 %. La pente moyenne est de 1,5 %. 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. La teneur initiale en P était de 40 kg/ha, en K de 100 kg/ha et en Al de 1118 mg/kg. La teneur en matière organique était de 2,7 % avec cependant une teneur plus élevée, de 4,5 %, dans la parcelle avec fumier de bovins laitiers. La pente moyenne est de 0,6 %. Les tableaux 1 et 2 présentent les séquences culturales dans les systèmes sous prairies et sous cultures commerciales.

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) a été appliquée. Le phosphore et le potassium ont été appliqués à la volée en surface au printemps; les doses d'applications annuelles sont présentées aux tableaux 10 et 12. Lors de la réimplantation des prairies avec de l'orge, les engrais ont été incorporés en pré-semis de la céréale. Pour les parcelles fertilisées avec des engrais organiques sous prairies, les doses d'engrais appliquées 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 pour l'orge, le blé et le canola a été appliquée en présemis et incorporée sur 10 cm. Une dose de 100 N/ha avec P et K 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 engrais minéral de démarrage de 50 kg N/ha et 35 kg P₂O₅/ha a également été appliqué dans cette parcelle. Les doses de P et K dans les cultures commerciales sont présentées aux tableaux 11 et 13. 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. Lors de la réimplantation des prairies, les pailles de l'orge grainée 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 des bilans humiques, du P et du K.

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	Mais-grain	Mais-grain	Orge	Canola	Mais-grain	Mais-grain
Fumier bovins laitiers	Orge	Blé	Orge	Canola	Mais-grain	Mais-grain	Orge	Canola	Mais-grain	Mais-grain
Lisier porcs	Orge	Blé	Orge	Canola	Mais-grain	Mais-grain	Orge	Canola	Mais-grain	Mais-grain

3.2 Méthodologie de calcul du bilan humique

Le bilan humique du sol permet d'estimer l'évolution de la MOS à partir des gains en humus provenant des résidus de culture, 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 une parcelle donnée. Cependant, de nombreux facteurs influencent les calculs, particulièrement les coefficients d'humification des engrais (K1) et de minéralisation de l'humus (K2) (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), 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) évaluent la proportion de racines vivantes, 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 culture.

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

3.3 Suivi de l'évolution de la matière organique du sol

Des échantillons composés de 15 prélèvements de sols 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.

3.4 Suivi de l'évolution des teneurs en P et K des sols et des bilans d'apport

Les analyses du P et du K ont été faites annuellement en prélevant 15 échantillons de sols par parcelle dans la couche arable de chacune des parcelles sur une profondeur de 20 cm. La détermination a été faite avec la méthode Mehlich-3. Un graphique de l'évolution des teneurs en P et K des sols sur 10 ans a été présenté.

Nous avons mesuré la composition des engrais et des récoltes afin d'établir le bilan des éléments P et K apportés et exportés dans les parcelles selon les modes de fertilisation. Nous avons voulu comprendre comment ces bilans influencent l'évolution des teneurs en P et K des sols en établissant des liens entre les bilans et les changements qui sont survenus aux teneurs en P et K dans les sols.

3.5 Suivi de l'évolution de l'azote total des sols

L'analyse des teneurs en azote total a été déterminée annuellement en prélevant 15 échantillons de sols par parcelle sur une profondeur de 20 cm. L'azote total a été déterminé par la procédure Kjeldahl. Nous voulons établir un lien entre l'évolution des teneurs en azote total et celle de la matière organique des sols.

3.6 Suivi du soufre disponible dans les sols

Nous avons procédé à l'analyse du soufre disponible ($S-SO_4$) des sols à la fin du deuxième cycle de rotation en 2000, dans les prairies et les cultures commerciales pour chacun des modes de fertilisation. La méthode d'extraction utilisée est le $Ca(H_2PO_4)_2$ dans un rapport sol-solution de 2,5 (Kovalenko, 1993).

4. RÉSULTATS DES BILANS D'APPORT ET DES TENEURS DANS LES SOLS

4.1 Bilan humique des sols sous prairies

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 produit 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 de matière organique, 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.

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
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 poulets

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

4.2 Évolution de la matière organique des sols 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, celle 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).

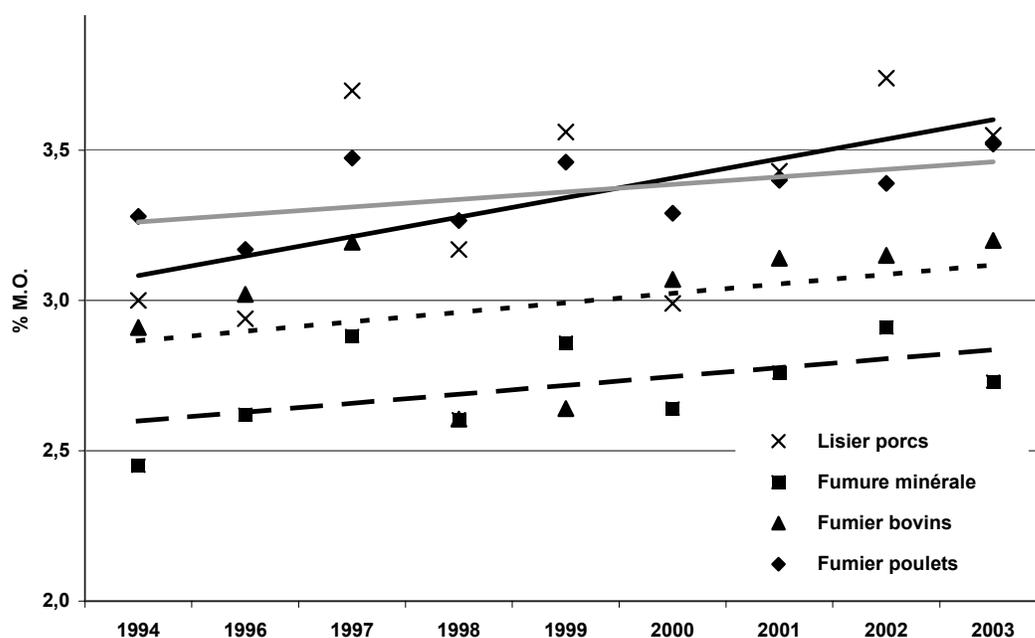


Figure 1. Évolution de la matière organique des sols sous prairies selon les modes de fertilisation

4.3 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 culture 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.

Tableau 7. Bilan humique des sols sous cultures commerciales 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	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 d'humus par les cultures	Gain d'humus par les engrais	Gain total d'humus	Perte d'humus par minéralisation
		------(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 d'humus par les cultures	Gain d'humus par les engrais	Gain total d'humus	
				Perte d'humus par minéralisation	
-----(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	Mais-grain	1,42	0,13	1,48	1,03
1999	Mais-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	Mais-grain	1,20	0,32	1,52	1,03
2003	Mais-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

4.4 Évolution de la matière organique des sols sous cultures commerciales

L'évolution de la matière organique des sols, telle que mesurée annuellement au champ, montre une lente diminution 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 d'environ 4,6 %. 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.

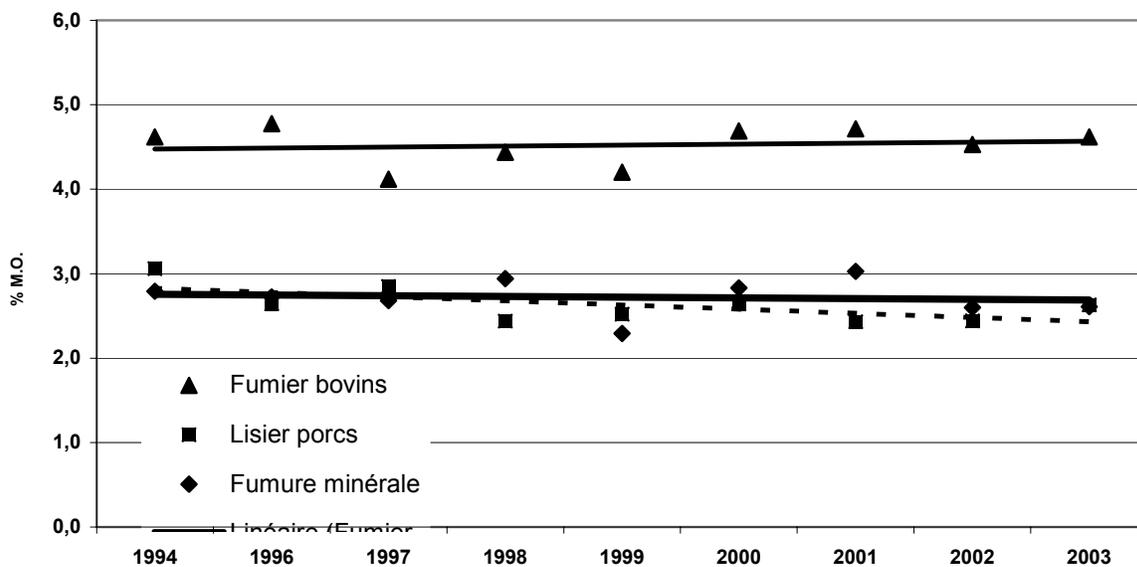


Figure 2. Évolution de la matière organique des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation

4.5 Discussion sur le bilan humique des sols

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 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.

4.6 Bilan du P sous prairies et évolution des teneurs dans les sols

Un bilan annuel du P apporté par les engrais et exporté par les récoltes a été calculé annuellement pour chacun des modes de fertilisation des prairies (Tableau 10). On constate que, sur une période de 10 ans, le bilan du phosphore est positif pour les trois engrais de ferme : fumier de bovins laitiers (352 kg P₂O₅/ha), fumier de poulets (626 kg P₂O₅/ha) et lisier de porcs (380 kg P₂O₅/ha). Il est faiblement positif dans le cas de la fumure minérale avec un excédent de 58 kg P₂O₅/ha sur 10 ans. Les apports d'engrais de ferme ont été effectués sur la base des besoins en engrais azoté. Il en a résulté un bilan du P excédentaire. Les apports de phosphore provenant des engrais minéraux ont été effectués sur la base des grilles de fertilisation qui tiennent compte des analyses de sols et du besoin en phosphore de la culture. Le bilan du P est alors près de l'équilibre pour ce sol.

Les analyses de P-M3 des sols ont fluctué annuellement pendant la période mais ont peu changé entre le début et la fin de l'expérience, sauf pour le fumier de poulets (Figure 3). Dans la parcelle fertilisée au fumier de bovins laitiers, la teneur initiale en P-M3 était de 80 mg P/kg. Elle ne s'est pas accrue pendant l'expérience malgré un bilan annuel moyen de 35,2 kg P₂O₅/ha. Un bilan annuel moyen de 38,0 kg P₂O₅/ha avec le lisier de porcs a maintenu la teneur en P des sols. Un bilan annuel moyen de 62,6 kg P₂O₅/ha avec le fumier de poulets a augmenté modérément la teneur en P-M3. Ces résultats rejoignent les conclusions de Giroux et al. (2002) qui ont établi qu'un bilan annuel du P de 35 kg P₂O₅/ha maintient la teneur en P-M3 des sols, qu'un bilan supérieur à cette valeur l'accroît et qu'un bilan équilibré la réduit.

Tableau 10. Bilan d'apport du phosphore sous prairies

Années	Cultures	Traitements	Apport annuel	Exportation annuelle	Bilan P annuel
			-----P ₂ O ₅ (kg/ha)-----		
1994	Fléole	Fumure minérale	90	31	59
		Fumier de bovins	243	24	219
		Fumier de poulets	93	27	66
		Lisier de porcs	139	26	113
1995	Fléole	Fumure minérale	55	55	0
		Fumier de bovins	66	53	13
		Fumier de poulets	354	46	308
		Lisier de porcs	160	46	114
1996	Fléole	Fumure minérale	0	44	-44
		Fumier de bovins	62	34	28
		Fumier de poulets	172	39	133
		Lisier de porcs	59	25	34
1997	Orge grainée	Fumure minérale	108	36	72
		Fumier de bovins	43	39	4
		Fumier de poulets	97	53	44
		Lisier de porcs	90	44	46
1998	Luzerne-fléole	Fumure minérale	42	48	-6
		Fumier de bovins	58	55	3
		Fumier de poulets	123	65	58
		Lisier de porcs	119	51	68
1999	Luzerne-fléole	Fumure minérale	48	55	-7
		Fumier de bovins	112	64	48
		Fumier de poulets	111	70	41
		Lisier de porcs	43	69	-26
2000	Luzerne-fléole	Fumure minérale	48	59	-11
		Fumier de bovins	114	65	49
		Fumier de poulets	60	73	-13
		Lisier de porcs	54	62	-8
2001	Orge grainée	Fumure minérale	58	60	-2
		Fumier de bovins	52	50	2
		Fumier de poulets	60	50	10
		Lisier de porcs	21	40	-19
2002	Luzerne-fléole	Fumure minérale	48	39	9
		Fumier de bovins	51	44	7
		Fumier de poulets	51	57	-6
		Lisier de porcs	158	60	98
2003	Luzerne-fléole	Fumure minérale	48	60	-12
		Fumier de bovins	50	71	-21
		Fumier de poulets	58	73	-15
		Lisier de porcs	40	80	-40

Traitements	Apport total	Exportation totale	Bilan P	
	10 ans			
-----P ₂ O ₅ (kg/ha)-----				
TOTAL SUR 10 ANS	Fumure minérale	545	487	58
	Fumier de bovins	851	499	352
	Fumier de poulets	1179	553	626
	Lisier de porcs	883	503	380

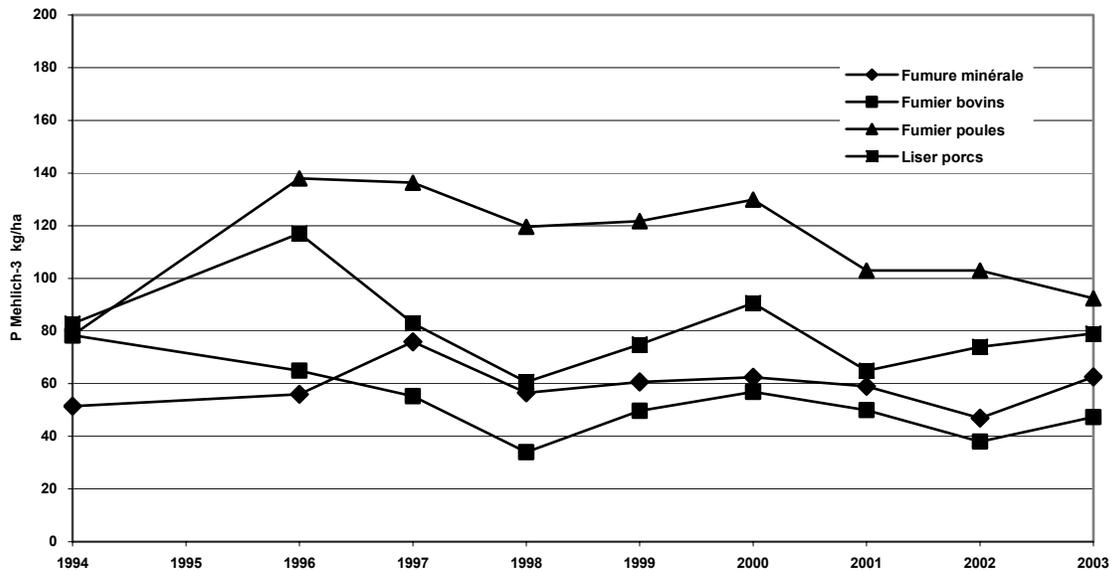


Figure 3. Évolution des teneurs en phosphore des sols sous prairies selon les modes de fertilisation

4.7 Bilan du P sous cultures commerciales et évolution des teneurs dans les sols

Le bilan de phosphore est fortement positif pour tous les modes de fertilisation dans les cultures commerciales. Il est respectivement de 816, 747 et 424 kg P₂O₅/ha sur 10 ans avec le fumier de bovins, le lisier de porcs et la fumure minérale (Tableau 11). Les apports d'engrais de ferme ont été élaborés sur la base des besoins en azote des cultures, ce qui a conduit à des apports de P supérieurs aux exportations. Une fumure de démarrage de 35 kg P₂O₅/ha est ajoutée en plus pour le maïs-grain. Dans la parcelle avec la fumure minérale, le bilan est également positif parce que ce sol est pauvre en P. Les apports de P recommandés dans les grilles de fertilisation des cultures commerciales dépassent les exportations en sols pauvres. C'est ce qui explique le bilan du P positif mesuré avec la fumure minérale.

La teneur en P-M3 des sols s'est accrue pour tous les engrais (Figure 4). Elle est passée de 50 à 60 kg P/ha pour le fumier de bovins, de 35 à 92 kg P/ha pour la fumure minérale et de 40 à 90 kg P/ha pour le lisier de porcs. Un redressement modéré des teneurs en P des sols est observé. Les analyses de sols des parcelles à la fin de l'expérience en 2003 ne montrent aucun signe d'enrichissement excessif et se situent à moins de 100 kg P/ha, malgré des bilans du P fortement excédentaires. Ces résultats démontrent que le phénomène de rétroversion des phosphates est très actif dans ce sol et vient atténuer l'effet du bilan excédentaire du P sur l'enrichissement en P-M3. Le bilan du P et la rétroversion des phosphates sont deux facteurs importants à prendre en compte dans une stratégie d'enrichir, maintenir ou de réduire la teneur en P des sols agricoles. Mentionnons encore une fois que les bonnes pratiques agricoles ne supposent pas que le bilan du P doit nécessairement être équilibré. Une réduction des teneurs en P des sols trop riches peut être atteinte avec un bilan du P équilibré. Un maintien des teneurs dans les sols est obtenu avec un bilan annuel moyen de 35 kg P₂O₅/ha et un enrichissement avec un bilan supérieur à cette valeur.

Tableau 11. Bilan d'apport du phosphore sous cultures commerciales

Années	Cultures	Traitements	Apport annuel	Exportation annuelle	Bilan P annuel
			-----P ₂ O ₅ kg/ha)-----		
1994	Orge	Fumier bovins	159	35	124
		Lisier de porcs	107	31	76
		Fumure minérale	78	29	49
1995	Blé	Fumier bovins	52	21	31
		Lisier de porcs	159	21	138
		Fumure minérale	79	21	58
1996	Orge	Fumier bovins	52	69	-17
		Lisier de porcs	30	61	-31
		Fumure minérale	82	63	19
1997	Canola	Fumier bovins	77	38	39
		Lisier de porcs	57	39	18
		Fumure minérale	81	46	35
1998	Maïs-grain	Fumier bovins	160	42	118
		Lisier de porcs	119	44	75
		Fumure minérale	79	58	21
1999	Maïs-grain	Fumier bovins	137	46	91
		Lisier de porcs	111	50	61
		Fumure minérale	83	43	40
2000	Orge	Fumier bovins	133	35	98
		Lisier de porcs	65	56	9
		Fumure minérale	80	47	33
2001	Canola	Fumier bovins	119	23	96
		Lisier de porcs	63	33	30
		Fumure minérale	84	29	55
2002	Maïs-grain	Fumier bovins	146	27	119
		Lisier de porcs	256	34	222
		Fumure minérale	86	25	61
2003	Maïs-grain	Fumier bovins	141	24	117
		Lisier de porcs	182	33	149
		Fumure minérale	81	28	53

Traitements		Apport total	Exportation totale	Bilan P
		10 ans		
		-----P ₂ O ₅ (kg/ha)-----		
TOTAL SUR 10 ANS	Fumier bovins	1176	360	816
	Lisier de porcs	1 149	402	747
	Fumure minérale	813	389	424

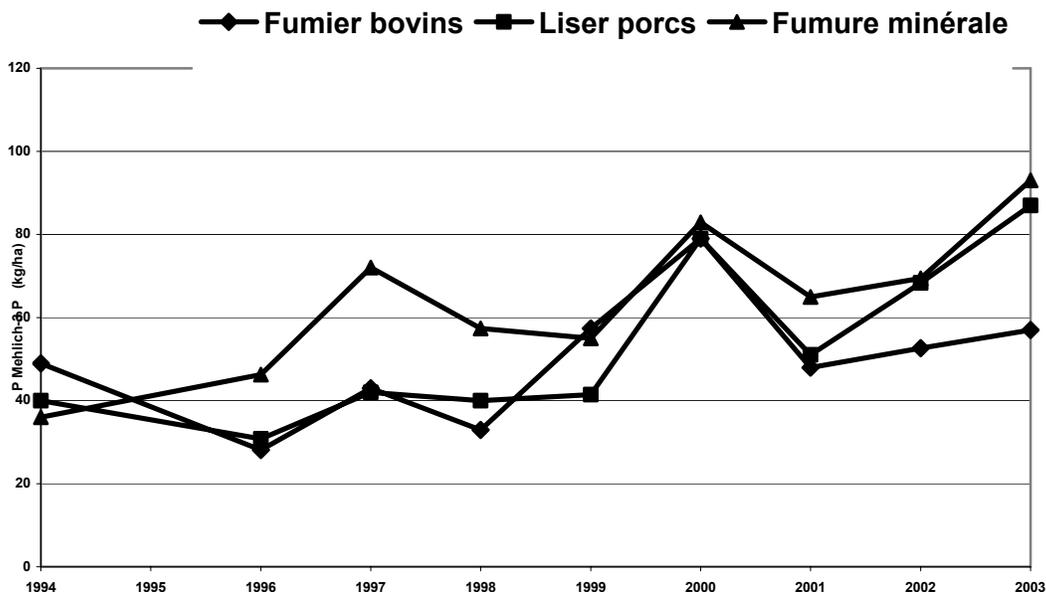


Figure 4. Évolution des teneurs en phosphore des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation

4.8 Bilan du K sous prairies et évolution des teneurs dans les sols

Pour le potassium, l'étude a démontré que les prairies exportent beaucoup de K et que le bilan est négatif. Le bilan net cumulatif du K sur 10 ans a été de -573 kg K₂O/ha avec la fumure minérale, de -43 kg K₂O/ha avec le fumier de bovins laitiers, de -586 kg K₂O/ha avec le fumier de poulets et de -439 kg K₂O/ha avec le lisier de porcs (Tableau 12). La teneur initiale en K des sols était moyenne. Elle a diminué légèrement après dix ans suite au bilan déficitaire (Figure 5). Les formes de réserves non-échangeables ont sans doute contribué grandement à rétablir les teneurs de K échangeable des sols et à assurer une disponibilité à la culture, comme l'ont démontré Simard et al. (1989). Le K dans les couches plus profondes du sol contribue également à la nutrition des plantes (Giroux et Tran, 1994). Une prise en compte des exportations de K des prairies doit cependant être faite afin d'obtenir un bilan du K davantage équilibré. À long terme, le déséquilibre du bilan K des prairies peut conduire à un épuisement des sols parce que les exportations par les prairies sont alors comblées en bonne partie par les réserves des sols.

Tableau 12. Bilan d'apport du potassium sous prairies

Années	Cultures	Traitements	Apport annuel	Exportation annuelle	Bilan K annuel
			-----K ₂ O (kg/ha)-----		
1994	Fléole	Fumure minérale	110	83	27
		Fumier de bovins	240	56	184
		Fumier de poulets	87	65	22
		Lisier de porcs	54	100	-46
1995	Fléole	Fumure minérale	55	220	-165
		Fumier de bovins	273	238	35
		Fumier de poulets	220	201	19
		Lisier de porcs	256	212	44
1996	Fléole	Fumure minérale	0	183	-183
		Fumier de bovins	115	145	-30
		Fumier de poulets	184	169	15
		Lisier de porcs	135	113	22
1997	Orge grainée	Fumure minérale	172	36	136
		Fumier de bovins	321	67	254
		Fumier de poulets	174	92	82
		Lisier de porcs	248	77	171
1998	Luzerne-fléole	Fumure minérale	112	175	-63
		Fumier de bovins	163	244	-81
		Fumier de poulets	125	212	-87
		Lisier de porcs	46	161	-115
1999	Luzerne-fléole	Fumure minérale	153	214	-61
		Fumier de bovins	163	314	-151
		Fumier de poulets	133	277	-144
		Lisier de porcs	171	294	-123
2000	Luzerne-fléole	Fumure minérale	87	230	-143
		Fumier de bovins	284	299	-15
		Fumier de poulets	105	248	-143
		Lisier de porcs	49	220	-171
2001	Orge grainée	Fumure minérale	58	79	-21
		Fumier de bovins	151	79	72
		Fumier de poulets	58	80	-22
		Lisier de porcs	82	72	10
2002	Luzerne-fléole	Fumure minérale	147	174	-27
		Fumier de bovins	99	246	-147
		Fumier de poulets	99	239	-140
		Lisier de porcs	108	215	-107
2003	Luzerne-fléole	Fumure minérale	147	220	-73
		Fumier de bovins	126	290	-164
		Fumier de poulets	42	230	-188
		Lisier de porcs	122	246	-124

Traitements		Apport total	Exportation totale	Bilan K
		10 ans		
		-----K ₂ O (kg/ha)-----		
TOTAL SUR 10 ANS	Fumure minérale	1041	1614	-573
	Fumier de bovins	1935	1978	-43
	Fumier de poulets	1227	1813	-586
	Lisier de porcs	1271	1710	-439

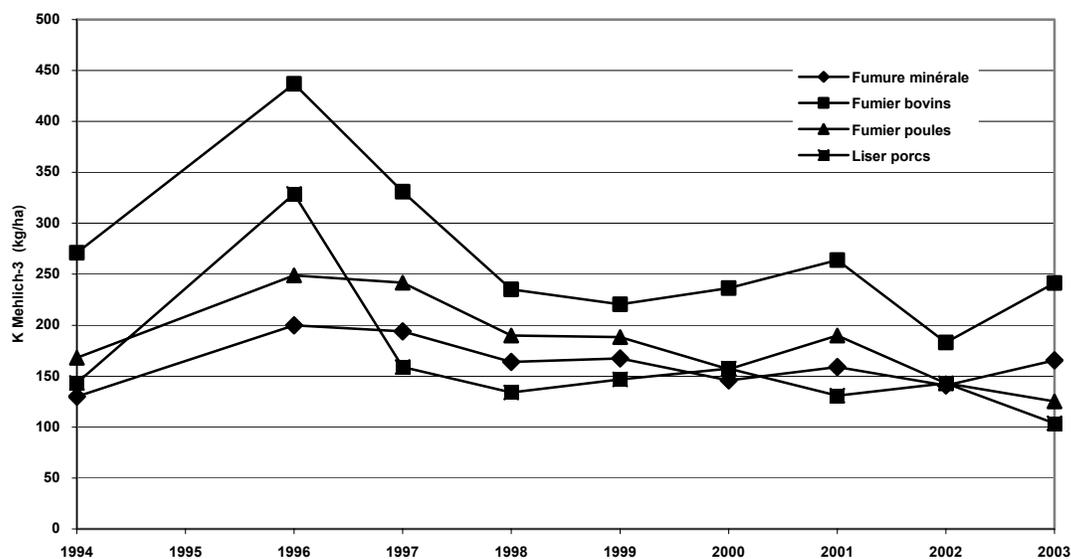


Figure 5. Évolution des teneurs en potassium des sols sous prairies selon les modes de fertilisation

4.9 Bilan du K sous cultures commerciales et évolution des teneurs dans les sols

Les cultures commerciales exportent moins de K que les prairies parce que les grains en contiennent peu et que les tiges de maïs et de canola retournent aux sols. Les pailles de l'orge et du blé ont été retirées des champs et contribuent aux exportations. Les bilans du K mesurés sont positifs pour tous les modes de fertilisation. Le bilan net cumulatif sur 10 ans a été de 213 kg K₂O/ha avec la fumure minérale, de 370 kg K₂O/ha avec le lisier de porcs et de 1804 kg K₂O/ha avec le fumier de bovins laitiers (Tableau 13). La teneur en K des sols s'est accrue d'environ 100 kg K/ha pour la fumure minérale et le lisier de porcs, passant de 100 à près de 200 kg K/ha. Pour le fumier de bovins laitiers, la teneur en K du sol est passée de 100 à près de 800 kg K/ha, soit une augmentation de près de 700 kg K/ha (Figure 6). Le fumier de bovins a produit un accroissement excessif du K du sol dans les cultures commerciales. Les doses élevées de fumiers, combinées à de fortes teneurs en K et des exportations faibles par les grains, expliquent ces résultats.

Tableau 13. Bilan d'apport de potassium sous cultures commerciales

Années	Cultures	Traitements	Apport annuel	Exportation annuelle	Bilan K annuel
			-----K ₂ O (kg/ha)-----		
1994	Orge	Fumier bovins	216	63	153
		Lisier de porcs	105	59	46
		Fumure minérale	70	65	5
1995	Blé	Fumier bovins	48	100	-52
		Lisier de porcs	78	120	-42
		Fumure minérale	73	100	-27
1996	Orge	Fumier bovins	48	124	-76
		Lisier de porcs	50	109	-59
		Fumure minérale	70	104	-34
1997	Canola	Fumier bovins	267	38	229
		Lisier de porcs	43	20	23
		Fumure minérale	70	21	49
1998	Maïs-grain	Fumier bovins	190	42	148
		Lisier de porcs	64	26	38
		Fumure minérale	71	33	38
1999	Maïs-grain	Fumier bovins	318	46	272
		Lisier de porcs	128	32	96
		Fumure minérale	93	27	66
2000	Orge	Fumier bovins	327	65	262
		Lisier de porcs	58	103	-45
		Fumure minérale	56	66	-10
2001	Canola	Fumier bovins	340	23	317
		Lisier de porcs	75	21	54
		Fumure minérale	55	20	35
2002	Maïs-grain	Fumier bovins	283	27	256
		Lisier de porcs	254	23	231
		Fumure minérale	60	17	43
2003	Maïs-grain	Fumier bovins	319	24	295
		Lisier de porcs	55	26	29
		Fumure minérale	70	22	48

Traitements	Apport total	Exportation totale	Bilan K	
	10 ans			
----- (kg K ₂ O/ha) -----				
TOTAL SUR 10 ANS	Fumier de bovins	2356	522	1804
	Lisier de porcs	910	540	370
	Fumure minérale	688	475	213

Ces bilans indiquent que les engrais de ferme appliqués à fortes doses sur les cultures contribuent à enrichir les sols en potassium. Si les bilans sont trop excédentaires, comme dans le cas du fumier de bovins, il en résulte une augmentation excessive de la teneur en K échangeable des sols. Ceci peut conduire à des déséquilibres cationiques pour les cultures. Il faut viser à réduire les bilans du K et surveiller les équilibres cationiques des cultures lorsqu'une accumulation excessive de K est constatée dans les analyses de sols.

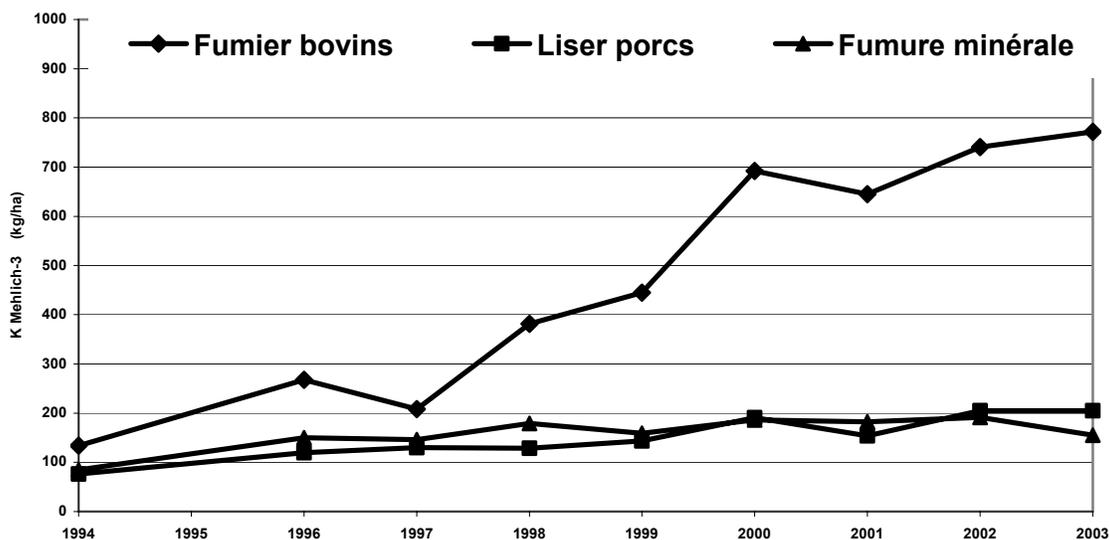


Figure 6. Évolution des teneurs en potassium des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation

4.10 Évolution des teneurs en azote total dans les sols sous prairies

Les teneurs en azote total des sols mesurées sous prairies s'accroissent dans toutes les parcelles (Tableau 14). Le taux d'accroissement varie cependant selon les modes de fertilisation. Il est plus élevé pour le fumier de bovins et le fumier de poulets comparativement à la fumure minérale et au lisier de porcs. L'augmentation des teneurs en N reflète les mêmes effets que ce qui a été mesuré pour la matière organique des sols. Les prairies et les fumiers de bovins et de poulets laissent beaucoup de carbone et d'azote au sol. Lors du processus d'humification, de l'azote est intégré aux substances humiques en formation augmentant ainsi la teneur en azote total des sols. C'est ce qui explique les similitudes observées entre l'évolution des teneurs en matière organique et en azote total des sols.

Tableau 14. Évolution des teneurs en azote total des sols sous prairies selon les modes de fertilisation

Années	1994	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Traitements	-----N total (%)-----								
Fumure minérale	0,128	0,130	0,127	0,126	0,139	0,145	0,138	0,138	0,141
Fumier bovins	0,134	0,138	0,137	0,132	0,136	0,146	0,142	0,155	0,165
Fumier poulets	0,137	0,134	0,143	0,158	0,156	0,141	0,142	0,162	0,164
Lisier porcs	0,134	0,128	0,144	0,155	0,141	0,138	0,138	0,141	0,149

4.11 Évolution des teneurs en azote total dans les sols sous cultures commerciales

Dans les parcelles sous cultures commerciales, on observe un maintien des teneurs en azote total avec le fumier de bovins et une légère diminution avec la fumure minérale et le lisier de porcs (Tableau 15). Cet appauvrissement de N dans le sol peut s'expliquer par le fait qu'il n'y a pas assez d'azote organique apporté par les engrais et les résidus de culture pour compenser la minéralisation de l'azote. Ces résultats sont tout à fait similaires à ce qui a été observé pour l'évolution de la matière organique des sols.

Tableau 15. Évolution des teneurs en azote total des sols dans les systèmes sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation

Années	1994	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Traitements	-----N total (%)-----								
Fumier bovins	0,192	0,204	0,172	0,183	0,180	0,182	0,211	0,192	0,201
Lisier porcs	0,141	0,128	0,135	0,120	0,122	0,115	0,130	0,118	0,125
Fumure minérale	0,131	0,129	0,134	0,126	0,120	0,121	0,128	0,120	0,123

4.12 Teneurs en sulfate dans les sols selon les systèmes culturaux et les modes de fertilisation

Nous avons effectué des analyses de sols dans la prairie et dans les cultures commerciales pour l'année 2000 après deux cycles de rotation. Les résultats sont présentés aux tableaux 16 et 17. Le soufre disponible (S-SO₄) est plus élevé dans les parcelles fertilisées avec les fumiers de bovins et de poulets que dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale et le lisier de porcs. Comme c'est le cas pour l'azote, certains engrais comme les fumiers de bovins et de poulets accroissent la teneur en soufre des sols. Ceci a des effets sur la minéralisation du soufre et donc sur les teneurs en sulfate des sols. Des valeurs inférieures à 10 mg/kg de S-SO₄ sont considérées comme faibles pour la luzerne et inférieures à 6 mg/kg pour le maïs et les céréales (CRAAQ, 2003).

Tableau 16. Teneurs en sulfate des sols sous prairies selon les modes de fertilisation

Traitements	S-SO ₄ (mg/kg)	
Fumure minérale	Rep 1	9,19
	Rep 2	7,08
	Rep 3	6,24
	Rep 4	9,05
	Moyenne	7,89
Fumier de bovins	Rep 1	11,63
	Rep 2	11,14
	Rep 3	13,00
	Rep 4	15,73
	Moyenne	12,88
Fumier de poulets	Rep 1	12,20
	Rep 2	12,20
	Rep 3	10,08
	Rep 4	12,18
	Moyenne	11,67
Lisier de porcs	Rep 1	7,34
	Rep 2	11,17
	Rep 3	11,38
	Rep 4	8,55
	Moyenne	9,61

Tableau 17. Teneurs en sulfate des sols sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation

Traitements		S-SO ₄ (mg/kg)
Fumier de bovins	Rep1	15,34
	Rep 2	16,13
	Rep 3	12,49
	Rep 4	12,56
	Moyenne	14,13
Lisier de porcs	Rep1	8,53
	Rep 2	8,90
	Rep 3	8,09
	Rep 4	7,61
	Moyenne	8,28
Fumure minérale	Rep 1	8,57
	Rep 2	7,38
	Rep 3	8,18
	Rep 4	7,20
	Moyenne	7,83

5. RENDEMENTS DES CULTURES SELON LES MODES DE FERTILISATION

Dans les prairies, les rendements avec les engrais de ferme sont souvent supérieurs, et parfois identiques à ceux obtenus avec la fumure minérale uniquement. Les divers engrais de ferme ont généralement fourni des rendements semblables (Figure 7).

Dans les cultures commerciales, la fumure minérale a généralement fourni un rendement identique à celui des engrais de ferme (Figure 8). Pour connaître la culture présente selon les années, il faut consulter le tableau 1 pour les prairies et le tableau 2 pour les cultures commerciales.

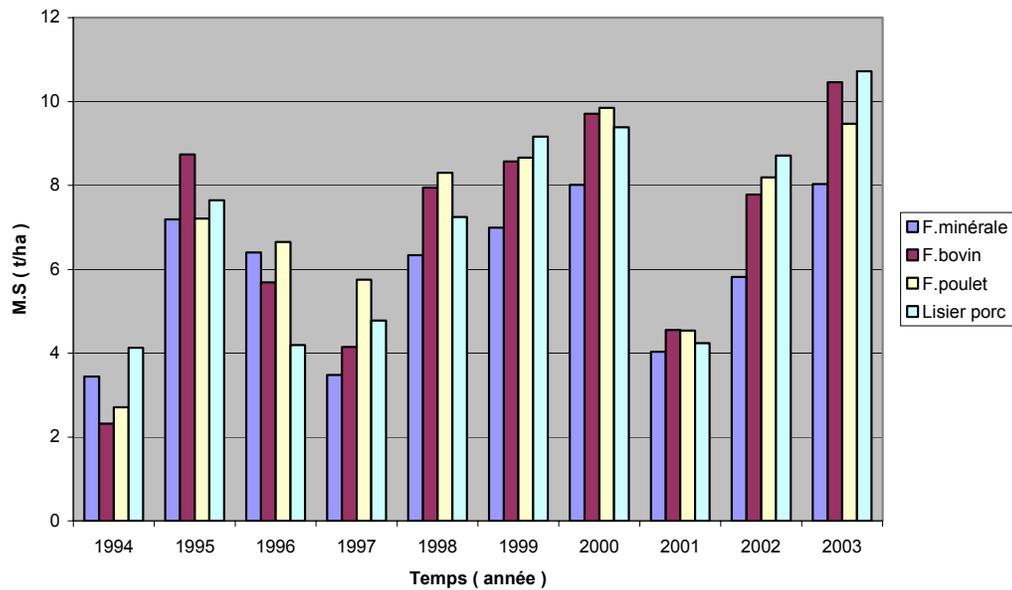


Figure 7. Rendements des prairies selon les modes de fertilisation

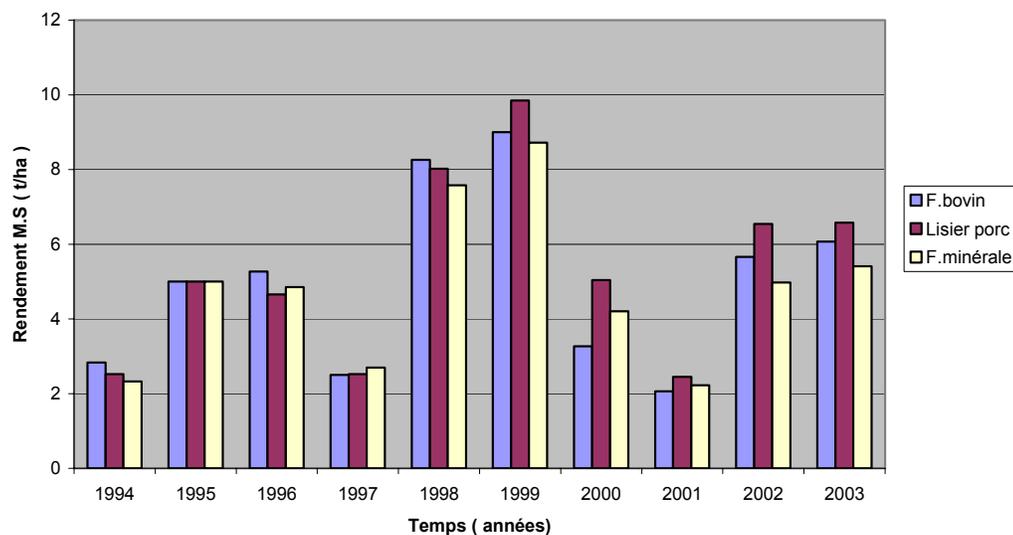


Figure 8. Rendements des cultures commerciales selon les modes de fertilisation

6. 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.

Les bilans nets d'apport du P ont varié selon les cultures et les modes de fertilisation. Dans la prairie, le bilan net cumulatif sur dix ans (apport P – exportation P) a été de 58 kg P₂O₅/ha avec la fumure minérale, de 352 kg P₂O₅/ha avec le fumier de bovins laitiers, de 626 kg P₂O₅/ha avec le fumier de poulets et de 380 kg P₂O₅/ha avec le lisier de porcs. La teneur en P-M3 des sols était initialement faible. Elle s'est enrichie modérément avec le fumier de poulets et elle est demeurée relativement stable pour les autres types d'engrais. Globalement, les bilans excédentaires du P ont eu peu d'effets sur l'enrichissement en P-M3 des sols. Ce fait démontre que le phénomène de rétroversion du P est très actif dans ce sol, ce qui contribue à rendre non labile le phosphore excédentaire. Dans les cultures commerciales, le bilan net cumulatif du P sur dix ans a été de 424 kg P₂O₅/ha avec la fumure minérale, de 747 kg P₂O₅/ha avec le lisier de porcs et de 816 kg P₂O₅/ha avec le fumier de bovins laitiers. Ces bilans excédentaires du P ont modérément accru les teneurs en P-M3 des sols. Un enrichissement se produit pour tous les modes de fertilisation mais aucune parcelle n'a atteint une teneur supérieure à 100 kg P/ha après dix années de culture.

Pour le potassium, l'étude a démontré que les prairies exportent beaucoup de K et que le bilan est négatif. Le bilan net cumulatif du K sur 10 ans a été de -573 kg K₂O/ha avec la fumure minérale, de -43 kg K₂O/ha avec le fumier de bovins laitiers, de -586 kg K₂O/ha avec le fumier de poulets et de -439 kg K₂O/ha avec le lisier de porcs. La teneur en K des sols a diminué légèrement après dix ans suite au bilan du K très déficitaire. Les cultures commerciales exportent moins de K. Le bilan net cumulatif du K sur dix ans a été de 213 kg K₂O/ha avec la fumure minérale, de 370 kg K₂O/ha avec le lisier de porcs et de 1804 kg K₂O/ha avec le fumier de bovins laitiers. La teneur en K des sols s'est accrue pour la fumure minérale et le lisier de porcs, passant de 100 à près de 200 kg K/ha. Pour le fumier de bovins laitiers, la teneur en K du sol est passée de 100 à près de 800 kg K/ha, soit une augmentation de près de 700 kg K/ha. Le fumier de bovins a produit un accroissement excessif du K du sol dans les cultures commerciales. Les doses élevées de fumiers, combinées à de fortes teneurs en K et des exportations faibles par les grains expliquent ces résultats.

Les teneurs en azote total des sols mesurées sous prairies s'accroissent dans toutes les parcelles. Le taux d'accroissement varie cependant selon les modes de fertilisation. Il est plus élevé pour les fumiers de bovins et de poulets comparativement à la fumure minérale et au lisier de porcs. Dans les parcelles sous cultures commerciales, on observe un maintien des teneurs en azote total avec le fumier de bovins et une légère diminution avec la fumure minérale et le lisier de porcs. Ces résultats sont tout à fait similaires à ce qui a été observé pour l'évolution de la matière organique des sols.

Le soufre disponible (S-SO₄) est plus élevé dans les parcelles fertilisées avec les fumiers de bovins et de poulets que dans les parcelles fertilisées avec la fumure minérale et le lisier de porcs.

Dans les prairies, les rendements avec les engrais de ferme sont souvent supérieurs, et parfois identiques à ceux obtenus avec la fumure minérale uniquement. Les divers engrais de ferme ont généralement fourni des rendements semblables. Dans les cultures commerciales, la fumure minérale a généralement fourni un rendement identique à celui des engrais de ferme.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allison, L.E., W.B. Bollen et C.D. Moodie. 1965. Total carbon. Dans *Methods of soil analysis*. Am. Soc. of agronomy. Madisson. Pages 1346-1366.
- Angers, D.A. 1992. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Soil Sci. Am. J.* 56 (4) 1244-1249.
- Angers, D.A. and M. Giroux. 1996. Recently deposited organic matter in soil water-stable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1547-1551.
- Blagrove, R.J., J.M. Gillespie, et P.J. Randall. 1976. Effect of sulphur supply on the seed globulin composition of *Lupinus angustifolius*. *J. Plant physiol.* 3: 173-184.
- Bolinder, M.A., D.A. Angers et R.P. Voroney. 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. 1988. La matière organique du sol. *Agrosol* 1(1) : 15-20.
- Clément, M.F et A. N'Dayegamiye. 2000. Le bilan humique : l'application à la ferme. Colloque sur la biologie des sols : les amendements organiques pour la santé des sols. CPVQ. Sainte-Foy, 22 février, 2000.
- Côté, D. et T.S. Tran., 1996. Effet de seize années de fertilisation en post-levée du maïs avec du lisier de porcs sur le rendement de la récolte et sur la teneur du sol en C et en N. Séminaire du Centre de recherche et d'expérimentation en sols. MAPAQ. Avril 1996. Sainte-Foy, Québec.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^e édition. 294 p.
- Delisle, F. 1990. Réévaluation des besoins des plantes en soufre. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maîtrise ès Sciences. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Université Laval.
- 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* 4 (2): 7-16.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1991. Évaluation de la disponibilité du potassium du sol et des engrais en relation avec les propriétés des sols. *Agrosol* 4(1) : 30-38.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1994. Étude des facteurs affectant l'évolution de la fertilité des sols agricoles. *Agrosol* 7 (2) : 23.

- Giroux, M. et T.S. Tran. 1996. Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation du phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol* 9 (2) : 51-57.
- Giroux, M. et S.P. Guertin. 1998. Effets des doses N, P, K et leur interaction sur le rendement, la qualité et la nutrition minérale du maïs-grain. *Agrosol* 10 (2) : 33-40.
- Giroux, M et M. Lemieux. 2000. Effets de la fertilisation N, P et K et leurs interactions sur le rendement d'une prairie à dominance de mil (*Phleum pratense* L.), la teneur en éléments nutritifs de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols. *Agrosol* 11 (1) : 40-47.
- Giroux, M., J. Cantin, R. Rivest, et G. Tremblay. 2002. Évolution des teneurs en phosphore dans les sols selon leur fertilité, leur richesse en phosphore et les types de sols. Colloque sur le phosphore, une gestion éclairée. 20 pp.
- Kamprath, E.J et U.S. Jones. 1986. Plant response to sulfur in southeastern United States. In *Sulfur in agriculture* in M.A. Tabatabai (ed.) ASA, Agronomy. 27: 323-343.
- Khiari, L, L.E. Parent, A. Pellerin, A.R.A. Alini, C. Tremblay, R.R. Simard et J. Fortin. 2000. An agri-environmental phosphorus saturation index for acid coarse-textured soils. *J. Environ. Qual.* 29: 1561-1567.
- Kovalenko, C.G. 1993. Extraction of available sulphur. Dans : *Soil sampling and methods of soil analysis*. M.R. Carter ed.
- Magdoff, F.R et J.F. Amadon. 1980. Yield trends and soil chemical changes resulting from N and manure application to continuous corn. *Agron. J.* 72: 161-164.
- Martel, Y.A. et J. Zizka. 1977. Effet de l'addition de soufre à une fertilisation N, P et K sur les rendements et la qualité de l'orge cultivée en serre. *Can. J. Plant Sci.* 57 : 597-606.
- McCollum, R.E. 1991. Build-up and decline in soil phosphorus: 30 year trends on a typical Umprabuilt. *Agronomy J.* 83: 77-85.
- Mérisier, M.J., A. N'Dayegamiye et A. Karam. 1997. Effet de la fréquence de maïs fourrager dans la rotation et de divers amendements organiques sur l'évolution de la matière organique des sols. Congrès conjoint ORSTOM-AQSSS, août 1997.
- N'Dayegamiye, A. and D. Côté. 1989. Effect of long term pig slurry and solid cattle manure application on soil chemical and biological properties. *Can. J. Soil Sci.* 69: 39-47.
- N'Dayegamiye, A. 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 D.A. Angers. 1990. Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés. *Can. J. Soil Sci.* 70 : 259-262.
- N'Dayegamiye, A., R.R. Simard and F. Delisle. 1994. Potentiel de minéralisation du soufre dans les sols de prairie. *Can. J. Soil Sci.* 74: 259-265.
- N'Dayegamiye A. et D. Côté. 1996. Effet d'application à long terme de fumier de bovins, de lisier de porcs et de l'engrais minéral sur la teneur en matière organique et la structure du sol. *Agrosol* 9 (1) : 31-45.

- N'Dayegamiye, A., M. Goulet et M.R. Laverdière. 1997. Effet à long terme d'apports d'engrais minéraux et de fumier sur les teneurs en C et en N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. *Can. J. Soil Sci.* 77 : 351-358.
- Pellerin, A. 2003. Études agroenvironnementales sur des sols cultivés en maïs-grain (*Zea mays L.*). Thèse de doctorat. Université Laval, Québec.
- Rehm, G.W., R.C. Sorenson et R.A. Wiese. 1984. Soil test values for phosphorus, potassium and zinc as affected by rate applied to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 814-818.
- Simard, R.R., C.R. De Kimpe et J. Zizka. 1989. The kinetics of non-exchangeable potassium and magnesium release from Quebec soils. *Can. J. Soil Sci.* 69: 663-675.
- Soltner, D. 1994. Les bases de la production végétale. Tome 1: Le sol. 20^e éd. 467 p.
- Tabi, M, L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme. et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. MAPAQ, Québec. 133 p.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson et J.D. Beaton. 1985. Soil fertility and fertilizers. 4^e ed. New York. USA. Chap. 8: 292-328.
- Tran, T.S. 1995. Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué (15 N) appliqué à la culture de maïs (*Zea may L.*). Thèse de doctorat. Université Laval. Sainte-Foy, Québec. 132 p.
- Vézina, L., D. Carrier, M. Giroux, M. Rompré, G. Laflamme et A. Moreau. 2000. Proposition de regroupement des sols du Québec selon leur capacité de fixation du phosphore en relation avec leurs caractéristiques pédologiques. *Agrosol* 11(1) : 15-39.
- Webb, J.R., A.P. Mallarino et A.M. Blackmer. 1992. Effects of residual and annually applied phosphorus on soil test values and yields of corn and soybean. *J. Prod. Agric.* 5 (1) : 148-152.
- Zhang, T.Q., A.F. MacKenzie et B.C. Liang. 1995. Long-term changes in Mehlich-3 extractable P and K in a sandy clay loam soil under continuous corn (*Zea mays L.*). *Can. J. Soil Sci.* 75 : 361-367.
- Ziegler, D. 1987. Azote et déjections animales. « Valeur azotée des engrais de ferme ». *Perspectives agricoles* 115 : 159-164.

8. REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement M. Raynald Royer pour la mise en place et le suivi des parcelles, l'acquisition et le traitement des données. Je tiens aussi à remercier l'équipe du laboratoire d'analyse des sols de l'IRDA et de la Station de recherche de Saint-Lambert pour l'aide apportée pour les analyses et les travaux aux champs. Mes remerciements vont aussi à Mmes Claudine Jomphe, Frédérique Maranda et Julie Nadeau pour la mise en page et la présentation du texte. Je désire aussi souligner la précieuse collaboration et les judicieux conseils de MM. Adrien N'Dayegamiye et Denis Côté de l'IRDA. Je tiens également à remercier le MAPAQ, Agriculture et Agroalimentaire Canada (programme Stratégie emploi jeunesse) et l'IRDA pour leur support financier.

9. ANNEXE

Annexe 1. Gain d'humus par les résidus de culture dans les sols sous prairies

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

Années	Doses d'engrais (t/ha)	M.S. (%)	M.S. (t/ha)	M.O. (t/ha)	K1	Gain d'humus (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

Années	Doses d'engrais (t/ha)	M.S. (%)	M.S. (t/ha)	M.O. (t/ha)	K1	Gain d'humus (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 poulets

Années	Doses d'engrais (t/ha)	M.S. (%)	M.S. (t/ha)	M.O. (t/ha)	K1	Gain d'humus (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

Années	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 10 ans : 9,08 t/ha						

Cas du fumier de poulets

Années	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

Années	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

Années	M.O. (%)	Profondeur de labour (m)	Densité* (t/m ³)	M.O. (t/ha)	K2	Perte d'humus (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 culture dans les sols sous cultures commerciales

Années	Cultures	Traitements	Gain d'humus racine			Gain d'humus partie aérienne			Gain d'humus des résidus de culture (t/ha)
			Coeff. K1	Biomasse apportée M.S. (t/ha)	Humus (t/ha)	Coeff. K1	Biomasse apportée M.S. (t/ha)	Humus (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	Mais-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	Mais-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	Mais-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	Mais-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 (t/ha)	M.S. (%)	M.S. (t/ha)	M.O. (t/ha)	K1	Gain d'humus (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 (t/ha)	M.S. (%)	M.S. (t/ha)	M.O. (t/ha)	K1	Gain d'humus (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

Années	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

Années	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

Années	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						