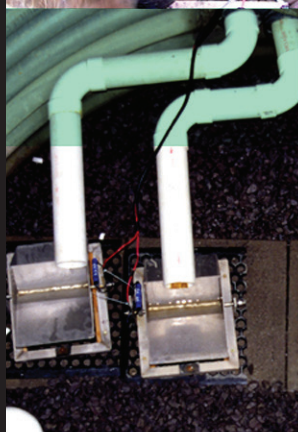
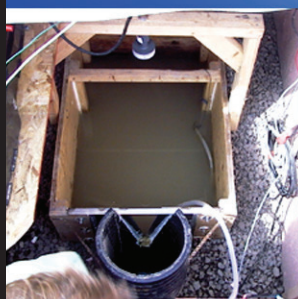




Cahier n° 7

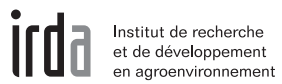
EFFETS DE L'HISTORIQUE DES ÉPANDAGES
D'ENGRAIS MINÉRAUX ET ORGANIQUES ET DES ROTATIONS
DE CULTURE SUR LES RENDEMENTS, LES BESOINS EN ENGRAIS N
DU MAÏS-GRAIN ET LA FERTILITÉ AZOTÉE DES SOLS



irda



Partenaires financiers :



EFFETS DE L'HISTORIQUE DES ÉPANDAGES
D'ENGRAIS MINÉRAUX ET ORGANIQUES ET DES ROTATIONS
DE CULTURE SUR LES RENDEMENTS, LES BESOINS EN ENGRAIS N
DU MAÏS-GRAIN ET LA FERTILITÉ AZOTÉE DES SOLS

SITE DE SAINT-LAMBERT DE LAUZON

Cahier no 7



Préparé par :

Marcel Giroux, agr. M. Sc.

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

Courriel : marcel.giroux@irda.qc.ca

Adrien N'Dayegamiye, Ph. D.,

IRDA, Québec

Courriel : adrien.ndaye@irda.qc.ca

Michel Lemieux, technicien agricole principal,
IRDA, Québec

Juin 2008

Objectifs poursuivis

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

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

Diffusion des résultats

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

Marcel Giroux

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

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	6
RÉSUMÉ	7
1. INTRODUCTION	9
1.1 Historique des épandages d'engrais (HEE) et fertilité des sols	9
1.2 Historique des rotations de culture (HRC) et fertilité des sols	10
1.3 Développement d'indicateurs de fertilité azotée des sols	10
1.4 Buts et objectifs de l'étude	12
2. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	13
2.1 Dispositif expérimental sur les HEE	13
2.2 Dispositif expérimental sur les HRC	13
2.3 Description des indicateurs de la fertilité azotée dans les sols	14
2.4 Description des indicateurs de la fertilité azotée dans les plants de maïs	16
2.5 Analyses statistiques	16
3. RÉSULTATS	17
3.1 Rendements et prélèvements de N selon les HEE et les doses N	17
3.2 Doses N optimales selon les HEE	18
3.3 Indicateurs de fertilité azotée selon les HEE	21
3.4 Rendements et prélèvements de N selon les HRC et les doses N	23
3.5 Doses N optimales selon les HRC	24
3.6 Indicateurs de fertilité azotée selon les HRC	27
3.7 Performance des indicateurs de fertilité azotée	27
4. DISCUSSION	34
4.1 Diagnostic de l'azote dans le sol	34
4.2 Diagnostic de l'azote dans les plants de maïs	34
4.3 Échantillonnage des sols en postlevée du maïs	34
5. CONCLUSION	36
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	37
7. REMERCIEMENTS	39

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 2.1	Historique des rotations de culture	14
Tableau 2.2	Description des méthodes d'analyse des sols et des végétaux utilisées comme indicateurs de fertilité.....	15
Tableau 3.1	Analyse de variance des rendements, des teneurs et des prélèvements en N du maïs selon l'historique des épandages d'engrais (HEE) et les doses N appliquées.....	18
Tableau 3.2	Comparaison de quatre modèles pour établir les relations entre les rendements du maïs-grain et les doses N selon les HEE	19
Tableau 3.3	Fonctions de production de l'azote sur les rendements du maïs-grain et détermination des doses N optimales et maximales selon les HEE.....	19
Tableau 3.4	Résultats des indicateurs de fertilité azotée mesurés dans les sols ou dans les plants de maïs selon les HEE	23
Tableau 3.5	Analyse de variance des rendements, des teneurs et des prélèvements en N du maïs selon les HRC et les doses N appliquées.....	24
Tableau 3.6	Comparaison de quatre modèles pour établir les relations entre les rendements du maïs-grain et les doses N selon l'historique des rotations de culture.....	25
Tableau 3.7	Fonctions de production de l'azote sur les rendements du maïs-grain et détermination des doses N optimales et maximales selon les HRC	25
Tableau 3.8	Résultats des indicateurs de fertilité azotée mesurés dans les sols ou dans les plants de maïs selon les HRC	27
Tableau 3.9	Coefficient de détermination (R^2) entre les rendements relatifs (RR), les doses N optimales (N OPT), les prélèvements en N des parcelles témoins (PNT) et les résultats des indicateurs de fertilité azotée (X)	33
Tableau 4.1	Comparaison des teneurs en nitrates des sols prélevés en postlevée du maïs (PSNT) dans l'entreprang des parcelles témoins sans N et des parcelles fertilisées avec une fumure de démarrage de 50 kg N/ha	35
Figure 3.1	Relations entre les rendements en maïs-grain et les doses N appliquées pour différents historiques d'épandage des engrais.....	20
Figure 3.2	Relations entre les rendements en maïs-grain et les doses N appliquées pour différents historiques des rotations de cultures.....	26
Figure 3.3	Relations entre le rendement relatif (RR), la dose optimale d'azote (N opt) et la fourniture d'azote du sol (PNT) au maïs-grain.....	28
Figure 3.4	Relations entre les rendements relatifs (RR) et les résultats d'analyse de différents indicateurs de fertilité azotée des sols cultivés en maïs-grain.....	30
Figure 3.5	Relations entre les doses optimales (N opt) et les résultats d'analyse de différents indicateurs de fertilité azotée des sols cultivés en maïs-grain.....	31
Figure 3.6	Relations entre la fourniture d'azote du sol (PNT) et les résultats d'analyse de différents indicateurs de fertilité azotée des sols cultivés en maïs-grain.....	32

RÉSUMÉ

Cette étude vise à mesurer les effets de l'historique des épandages d'engrais minéraux et organiques (HEE) et des rotations des cultures (HRC) sur les rendements, les prélèvements en N, la dose N optimale du maïs-grain et la fertilité azotée des sols.

L'essai sur les historiques d'épandage des engrais s'est déroulé à la ferme expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon sur le site de l'Observatoire de la qualité des sols. Entre 1994 et 2006, des parcelles ont été soumises à trois modes de fertilisation distincte. Une parcelle a reçu annuellement entre 20 et 60 t/ha de fumier de bovins laitiers selon les années, une autre parcelle a reçu entre 30 et 50 t/ha de lisier de porcs et finalement une parcelle a été fertilisée uniquement avec une fumure minérale NPK selon les doses prescrites pour les cultures. La rotation des cultures était la suivante : maïs-grain (2 ans), orge et canola. Après 12 années, soit 3 cycles de rotation en 2007, les parcelles ont été ensemencées en maïs-grain et toutes fertilisées avec une fumure minérale complète comportant 5 doses d'azote : 0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha de façon à mesurer les arrière-effets des engrais sur les rendements, la fertilité azotée des sols et les besoins en engrais N du maïs-grain selon les HEE.

Le second essai portait sur l'historique des rotations de culture et s'est déroulé sur un site de longue durée en place depuis 1978 à la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon. Le champ est divisé en quatre grandes parcelles correspondant à quatre historiques de rotation de culture (HRC). La durée des rotations est de quatre ans. La parcelle I était une monoculture de maïs-ensilage. La parcelle II comportait une rotation maïs-ensilage, orge grainée et 2 ans de prairie mil-trèfle. La parcelle III comportait une rotation de maïs-ensilage, blé et orge (2 ans). La parcelle IV a été maintenue en prairie de mil et trèfle, réimplantée tous les 4 ans avec de l'orge grainée. Après 28 années, soit 7 cycles de rotation, en 2007, les parcelles ont été ensemencées en maïs-grain et ont toutes été fertilisées avec une fumure minérale comportant 5 doses d'azote : 0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha de façon à mesurer les arrière-effets des rotations sur les rendements, la fertilité azotée des sols et les besoins en engrais N du maïs-grain selon les HRC.

Dix-huit méthodes d'analyse des sols et des plants de maïs ont été utilisées pour déterminer la fertilité des champs soumis aux différents HEE et HRC. Il s'agit de la matière organique du sol (MOS), de l'azote total Kjeldahl du sol (NTKS), des nitrates du sol après incubation (I-NO₃), de l'azote ammoniacal après une incubation anaérobique (I-NH₄), des nitrates des sols en présemis (PPNT), de l'azote ammoniacal (KCl-NH₄) en présemis, des nitrates des sols en postlevée du maïs (PSNT). Ensuite, nous avons déterminé l'absorbance UV des extraits de sol au NaHCO₃ à la longueur d'onde de 220 nm (UV 220) et l'azote total dans l'extrait (NTK-NaHCO₃). Le carbone soluble (CS) et l'azote soluble (NS) ont été extraits à l'eau chaude. L'azote ammoniacal extrait au KCl 2M a été déterminé après un traitement à l'eau chaude (HKCl-NH₄). L'activité de la déshydrogénase (AD) a été déterminée après incubation des sols à 37 °C.

Enfin, les teneurs en N total Kjeldahl (NTKP) et en nitrates (NO₃P) des plants de maïs au stade V6, l'indice de chlorophylle des feuilles dans les parcelles témoins sans N (ICT) et dans les parcelles ayant reçu une fumure de démarrage de 50 kg N/ha (ICD) ont été mesurés. L'indice relatif de chlorophylle (IRC) correspond au rapport de l'indice des parcelles témoins sur celui des parcelles avec une fumure de démarrage de 50 kg N/ha (ICD).

Le HEE avec fumier de bovins laitiers est celui qui a montré les arrière-effets azotés les plus importants, suivi du lisier de porcs et de la fumure minérale. Les doses N optimales du maïs-grain correspondant à chacun de ces HEE ont été respectivement de 72, 161 et plus de 200 kg N/ha. La fourniture d'azote du sol au maïs, telle que mesurée par les prélèvements totaux en N des parcelles témoins, a été plus élevée pour les HEE avec fumier de bovins (100 kg N/ha), suivi du lisier de porcs (74 kg N/ha) et de la fumure minérale (23 kg N/ha). Le rendement optimal a été de 8868 kg/ha pour le HEE avec fumier de bovins, de 9551 kg/ha pour le HEE avec lisier de porcs et de 7750 kg/ha pour le HEE avec fumure minérale.

L'historique des rotations de culture (HRC) a également présenté des arrière-effets azotés différents. Les deux HRC comportant des prairies sont ceux qui ont montré les arrière-effets azotés les plus importants. Dans les deux parcelles comportant des historiques de prairies, les doses N optimales ont été de 73 et 120 kg N/ha alors que celles-ci ont été de plus de 200 kg N/ha dans les parcelles en monoculture de maïs et en rotation maïs-céréales. La fourniture d'azote du sol au maïs a également été plus élevée dans les deux parcelles avec historique de prairies (81 et 113 kg N/ha) en comparaison avec la monoculture de maïs (34 kg N/ha) et la rotation maïs-céréales (61 kg N/ha).

Les coefficients de détermination entre les rendements relatifs (RR), les doses N optimales (N OPT), les prélèvements en N des parcelles témoins (PNT) et les résultats des divers indicateurs de fertilité ont permis de déterminer les meilleures méthodes d'analyse. Sept méthodes ont été capables de révéler efficacement les différences de fertilité selon les HEE et HRC et sont corrélées significativement à la fois avec RR, N OPT et PNT. Ces méthodes sont l'analyse des nitrates du sol après incubation (I-NO₃), l'analyse des nitrates du sol en postlevée du maïs (PSNT), l'extraction de l'azote ammoniacal après un traitement à l'eau chaude (HKCl-NH₄), l'activité de la déshydrogénase du sol (AD), l'indice de chlorophylle des parcelles témoins (ICT), l'indice relatif de chlorophylle des parcelles sans N sur l'indice avec 50 kg N/ha (IRC) et la teneur en nitrates des plants de maïs au stade V6 dans les parcelles témoins (NO₃P). On retrouve donc des méthodes fiables dans chacun des quatre groupes analytiques : biologique, chimique, biochimique et physiologique. Le diagnostic de la fertilité azotée des sols apparaît comme un élément incontournable d'une fertilisation raisonnée du maïs-grain.

1 - INTRODUCTION

1.1 Historique des épandages d'engrais (HEE) et fertilité des sols

L'historique des épandages d'engrais minéraux et organiques (HEE) est un des facteurs ayant le plus d'effets sur la fertilité des sols et la fourniture d'azote aux cultures. Pourtant les arrière-effets azotés des engrais organiques sont peu considérés dans l'ajustement des doses d'engrais N des cultures. Les HEE fournissent des données essentielles sur l'évolution à long terme de l'humus (fraction stable) et sur l'enrichissement des sols en matière organique nouvelle (fraction labile). La restitution des matières organiques est nécessaire au maintien de la fertilité des sols et à une bonne production (N'Dayegamiye, 1990; N'Dayegamiye et Angers, 1990). Le bilan humique des sols est souvent négatif pour les cultures commerciales sans apport d'engrais organiques. Ce bilan est généralement positif pour les systèmes sous prairies, même fertilisés uniquement avec des engrais minéraux (Giroux *et al.*, 2005). N'Dayegamiye *et al.* (1997) ont démontré que des apports prolongés de fumier de bovins de 20 t/ha annuellement ont accru les teneurs en C et N du sol comparativement aux parcelles fertilisées avec une fumure minérale. Ces apports ont significativement augmenté la biomasse microbienne, la respiration microbienne (CO₂) et la minéralisation de l'azote (NO₃-), comparativement à la fumure minérale seule. Ces mêmes chercheurs rapportent que l'application prolongée d'engrais minéraux a procuré de faibles retours de matière organique et a provoqué une diminution de la matière organique des sols.

L'apport régulier d'engrais organiques accroît le potentiel de minéralisation des sols, ce qui permet une diminution des applications d'engrais N. Tremblay (2006) a démontré que la dose optimale du maïs-grain a été inférieure à 70 kg N/ha dans 34 % des cas, entre 70 et 170 kg N/ha dans 48 % des cas et supérieure à 170 kg N/ha dans 18 % des cas dans une étude comportant 125 champs expérimentaux. Cantin (1995) mentionne que les champs qui répondent le moins aux applications d'azote ont souvent des historiques d'apports de fumiers et contiennent des teneurs élevées en nitrates, supérieures à 20 mg N-NO₃/kg en postlevée du maïs. La contribution de l'azote du sol représente généralement près des deux tiers de l'azote prélevé par le maïs dans les sols fertiles (Tran, 1994; N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Dans les sols peu fertiles, la contribution du sol comble souvent moins du tiers des besoins.

L'azote organique des engrais peut s'accumuler dans les sols et être minéralisé durant les années subséquentes. Selon Ziegler (1987), seulement 22 % de l'azote organique des fumiers de bovins est minéralisé et utilisé par la plante la première année. Une partie importante sera minéralisée les années subséquentes. Il faut donc tenir compte des arrière-effets azotés des apports d'engrais organiques. Les rapports C/N et N-NH₄/N-total des engrais de ferme affectent beaucoup leurs efficacités fertilisantes et leurs arrière-effets azotés. Dans les fumiers de bovins, la proportion d'azote sous forme ammoniacale varie généralement entre 15 et 30 %. Pour les lisiers de porcs, cette proportion varie généralement entre 50 et 80 % selon les catégories d'élevage et selon les fractions prélevées lors de la vidange des fosses (Seydoux *et al.*, 2006). Giroux *et al.* (2007) ont démontré que l'efficacité fertilisante de l'azote des boues de papetières et des fumiers de bovins était plus élevée en première année lorsque leur rapport C/N était plus bas. À l'inverse, les arrière-effets de l'azote en deuxième année étaient plus élevés lorsque leur rapport C/N était plus élevé. La composition des engrais organiques, notamment leur contenu en N et leur rapport C/N, a donc beaucoup d'incidence sur l'évolution de la fertilité azotée des sols et les arrière-effets azotés des engrais. Un engrais riche en azote ammoniacal avec un rapport C/N très bas, comme un lisier de porcs, possède un coefficient d'efficacité de l'azote très élevé en première année, de l'ordre de 60 à 70 %; il aura cependant un coefficient d'arrière-effets assez faible en deuxième année, de l'ordre de 5 % (CRAAQ, 2003).

Le coefficient d'arrière-effets de l'azote des engrais organiques devient plus important à long terme pour des apports d'engrais répétés annuellement. Il a atteint 35 % après 15 ans d'application continue de lisier de porcs sur le maïs-grain (Côté *et al.*, 1996). L'accroissement de la matière organique labile dans les sols est en grande partie responsable de ces arrière-effets. Chantigny *et al.* (2004) et Chantigny (2007) ont étudié la dynamique de l'azote du sol suite aux applications de lisier de porcs. Ils ont démontré que l'azote ammoniacal peut être capté

entre les feuillets des argiles en quantités importantes et constituer ainsi une réserve d'azote disponible dans les sols. Les lisiers de porcs pourraient donc enrichir les sols en azote en favorisant le stockage de N dans la fraction argileuse des sols et dans la fraction organique labile.

1.2 Historique des rotations de culture (HRC) et fertilité des sols

L'historique des rotations de culture (HRC) est un autre facteur qui a beaucoup d'effets sur la fertilité azotée des sols et le besoin en engrais azoté. Les cultures exercent des effets sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Elles affectent à long terme le bilan humique des sols selon les apports de matière organique qu'elles laissent au sol (Bolinder, 2003; Quénum *et al.*, 2004). Les rotations de culture changent les quantités et les proportions de carbone et d'azote dans la fraction humique et dans la fraction labile, modifiant ainsi la capacité de minéralisation et l'activité biologique des sols (Dalal et Mayer, 1987; N'Dayegamiye *et al.*, 1997). Elles affectent également la structure, la densité apparente et la porosité des sols, selon la quantité et la composition des résidus de culture (Angers et Giroux, 1996). L'état des propriétés physiques des sols est en lien avec leur capacité de minéralisation. Les systèmes de rotation vont également affecter les rendements et le besoin en engrais N des cultures. Rivest (2006) a étudié la réponse à l'azote du maïs-grain en Montérégie de 2003 à 2005 dans 189 sites sous différents précédents cultureux. Pour un seuil de productivité de 8 kg de grains/kg de N, la dose N économique optimale moyenne du maïs sur 3 ans a été de 140 kg N/ha pour les précédents céréales, de 145 kg N/ha pour les haricots, de 60 kg N/ha pour les prairies et les pois, de 155 kg N/ha pour le soya et jusqu'à 180 kg N/ha pour le maïs. Guertin *et al.* (1997) ont mesuré l'influence de différents précédents cultureux sur la production du maïs-grain. Sur un retour de soya, ils ont obtenu un rendement de 1 à 1,5 tonne plus élevé que sur un retour de maïs sans toutefois noter de différence dans la dose N optimale requise. Giroux et Lemieux (2006) ont démontré que la présence de prairies dans les rotations a permis d'atteindre un meilleur rendement de maïs-ensilage, de 1,5 à 2,5 tonnes/ha plus élevé, avec une dose moindre d'azote qu'avec des précédents maïs ou céréales. Ils ont obtenu des différences très importantes dans la dose N optimale, supérieures à 100 kg N/ha, selon les rotations. L'interaction entre les rotations et les doses N optimales est très significative. Bélanger *et al.* (2007) ont démontré que les doses N optimales de la pomme de terre étaient fortement influencées par les rotations. Après 8 ans (4 cycles de rotation de 2 ans), les doses N optimales pour la pomme de terre ont varié entre 126 et 171 kg N/ha selon les cultures de rotation. Le maïs et l'orge ont fourni moins d'azote à la pomme de terre alors que l'orge grainée, les pois et les plantes d'enfouissement en ont fourni davantage, ce qui a contribué à réduire les besoins en engrais N.

1.3 Développement d'indicateurs de fertilité azotée des sols

La grande variabilité de la fertilité azotée et du taux de minéralisation de l'azote du sol a incité à développer des indicateurs pour connaître la disponibilité de l'azote du sol aux cultures. Ces méthodes peuvent se regrouper en 4 grandes catégories : chimique, biologique, biochimique et physiologique. Le test d'analyse des nitrates dans les sols est l'outil le plus largement utilisé en Amérique du Nord pour ajuster les apports d'azote. Bundy *et al.* (1995) proposent de déterminer la teneur en nitrates dans les sols en présemis dans la couche 0-30 cm et 30-60 cm (Pre-Plant Nitrate Test - PPNT) pour ajuster les doses d'azote du maïs-grain. Ce test est très affecté par la température des sols en présemis. Il ne permet pas toujours de révéler la capacité de minéralisation de l'azote du sol en condition de sols froids. Magdoff *et al.* (1990) et Blackmer et Mallarino (1993) proposent plutôt de déterminer la teneur en N-NO₃ des sols sur 30 cm en postlevée du maïs-grain, au stade 6 feuilles (V6), (Pre-Sidedress Nitrate Test - PSNT). Une évaluation du test PSNT comme base de recommandations des engrais N du maïs-grain a été faite en Montérégie par Cantin (1995, 2007). En sols lourds, le test PSNT n'a pas toujours bien permis d'anticiper la réponse du maïs aux applications d'azote. Par contre, en sols légers, le test a mieux performé. Ce test serait influencé par la texture des sols. Comme les sols argileux sont plus lents à se réchauffer au printemps, la libération des nitrates est retardée. Le test sous-estimerait alors la fertilité azotée en sols lourds certaines années. La présence de résidus de culture en surface affecte également le réchauffement des sols et

pourrait affecter les résultats du test. Selon Beauchamp *et al.* (2004) et Curtin *et al.* (2006), l'azote ammoniacal extrait au KCl 2M après un traitement à l'eau chaude à 80 °C était bien relié avec la capacité de minéralisation du sol et peut avantageusement remplacer l'analyse des nitrates des sols.

Les travaux de Fox et Piekielek (1983) ont démontré le grand intérêt d'utiliser la spectroscopie UV des extraits de sols au NaHCO₃ 0,01 M à 260 nm pour déterminer leur capacité à fournir l'azote au maïs. Une évaluation concluante de cette méthode a été faite au Québec par Giroux et Tran (1987) et Giroux et Lemieux (2006). Ces études ont démontré un bon potentiel de la méthode d'extraction au NaHCO₃ 0,01 M et de la spectrométrie UV pour prédire la réponse aux engrais azotés. Ces auteurs proposent cependant d'utiliser la lecture à 220 nm plutôt que 260 nm. L'azote total Kjeldahl (NTK - NaHCO₃) de l'extrait corrèle également très bien avec l'azote minéralisé mesuré par incubation.

Plusieurs méthodes biologiques par incubation des sols ont également été mises au point. Sharifi *et al.* (2007) proposent une incubation aérobie des sols à 25 °C et une extraction au CaCl₂ 0,01 M après 2 semaines et à toutes les 4 semaines par la suite jusqu'à 24 semaines pour déterminer les formes d'azote facilement, lentement et potentiellement minéralisables. Curtin *et al.* (2006) ont démontré que l'incubation aérobie des sols à 20 °C pendant 28 jours a constitué le meilleur indicateur de fourniture d'azote aux plantes. Waring et Bremner (1964) ont mis au point un test d'incubation anaérobie suivi d'un dosage du N-HH₄ pour évaluer la capacité de minéralisation des sols. Kenny (1982) mentionne les avantages du test anaérobie sur les tests aérobies. Il n'y a pas de fluctuation d'humidité des sols pendant l'incubation puisqu'ils sont sursaturés en eau. La température élevée (40 °C) utilisée libère plus rapidement l'azote et permet un temps plus court que les tests aérobies à 20 ou 25 °C.

L'activité enzymatique des sols constitue un moyen biochimique pour connaître leur fertilité. L'activité de la déshydrogénase est utilisée pour déterminer l'activité biologique des sols et indirectement leur capacité de minéralisation (Tabatabai, 1982). En effet, cet enzyme est nécessaire à l'oxydation des matières organiques et il est présent dans la majorité des microorganismes du sol. Il agit comme transporteur de protons lors des réactions biochimiques.

En ce qui concerne le diagnostic de l'azote par la plante, Bindford et Blackmer (1992) ont démontré que la teneur en N total des plants de maïs échantillonnés entre 15-30 cm ne constituait pas un indicateur valable de disponibilité de N du sol. Cependant, Ma *et al.* (2007) ont obtenu de très bons résultats dans l'Est de l'Ontario pour expliquer la réponse à l'azote du maïs sucré avec la concentration en N total des plants, tout comme avec le test des nitrates du sol (PSNT) et l'indice de chlorophylle des feuilles. Piekielek et Fox (1992) et Tremblay et Bélec (2006) ont utilisé l'indice de chlorophylle des feuilles de maïs pour préciser les besoins en engrais N du maïs. L'indice de chlorophylle du champ ayant reçu une fumure de démarrage est comparé à celui d'une parcelle saturée avec une forte dose N, de façon à établir un indice de saturation en azote. Cet indice a permis de bien anticiper la courbe de réponse des cultures à l'azote. L'indice de chlorophylle d'une parcelle témoin sans N représente également un indicateur de l'azote intéressant pour le maïs. Une parcelle témoin permet d'évaluer la fourniture d'azote du sol en mesurant directement l'azote disponible aux plantes. On obtient ainsi une bonne indication de leur fertilité azotée (N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Cette fourniture d'azote du sol est également très utile pour établir la performance des indicateurs de fertilité.

Trois paramètres vont servir à établir les relations avec les indicateurs de fertilité et à valider leur performance. Il s'agit du rendement relatif (RR) correspondant au rendement sans N/rendement maximal avec N, de la dose économique optimale d'azote (N OPT) et des prélèvements totaux en N des parcelles témoins (PNT), représentant la fourniture en N du sol au maïs.

1.4 But et objectifs de l'étude

Ce travail a pour but de mesurer l'incidence de l'historique des épandages d'engrais minéraux et organiques (HEE) et des rotations des cultures (HRC) sur les rendements et les prélèvements d'azote par le maïs-grain. L'objectif de cette étude est également de mesurer les effets des HEE et des HRC sur la fertilité azotée des sols. Cette étude vise aussi à comparer la performance de diverses méthodes d'analyse pour prédire la réponse à l'azote du maïs-grain et déterminer sa dose optimale.

2. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

2.1 Dispositif expérimental sur les HEE

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec, initié en 1994 sur un site expérimental de longue durée situé à Saint-Lambert-de-Lauzon, près de Québec. Le sol est un loam limoneux de la série Le Bras. Le champ a été divisé en trois parcelles de 0,12 ha correspondant à trois modes de fertilisation différents. Entre 1994 et 2006, la parcelle I a reçu annuellement entre 20 et 60 t/ha de fumier de bovins laitiers, la parcelle II entre 30 et 50 t/ha de lisier de porcs, et la parcelle III une fumure minérale de 70 à 150 kg N/ha selon les cultures, complétée avec du P et du K. Une description plus détaillée des apports d'engrais est présentée dans le cahier no. 4 de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec (Giroux *et al.*, 2005). La rotation des cultures d'une durée de quatre ans était la même dans chaque parcelle et comportait du maïs-grain (2 ans), de l'orge et du canola. Ces trois parcelles constituent donc trois historiques d'épandage des engrais (HEE) entre 1994 et 2006.

En 2007, ces grandes parcelles, correspondant aux divers HEE, ont toutes étéensemencées en maïs-grain et fertilisées chacune avec des doses variables d'azote minéral afin de déterminer les courbes de réponse à l'azote et les arrière-effets des engrais selon les HEE. Ces parcelles de 0,12 ha ont été subdivisées en cinq sous-parcelles correspondant à 0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha. Le dispositif expérimental est un *split-block* avec trois HEE x cinq doses N x trois répétitions. À l'exception du témoin sans N, toutes les parcelles ont reçu une dose de 50 kg N/ha en bandes 5 cm à côté et 5 cm sous la semence au moment du semis. Le reste de l'azote a été appliqué en bande en postlevée à 20 cm des plants au stade V6 (5-6 feuilles du maïs). La source d'azote utilisée est le nitrate d'ammonium calcique à 27 %N. Une fumure P et K de 50 kg/ha P₂O₅ et K₂O a été appliquée également en bandes au semis. Toutes les parcelles ont été préparées avec un travail complet du sol comportant un labour à l'automne et un passage de vibroculteur au printemps avant le semis effectué le 21 mai avec l'hybride HL 2017. Les sous-parcelles avaient trois mètres de large, huit mètres de long et comportaient quatre rangs de maïs. La population finale a été de 78,000 plants/ha.

La récolte a été effectuée le 1^{er} novembre. Un des rangs du centre de 8 mètres a été récolté avec une ensileuse commerciale pour déterminer la biomasse totale (tiges + épis) de la partie aérienne et les prélèvements totaux d'azote. Un échantillon de 500 g a été prélevé dans chacune des parcelles pour déterminer la teneur en N total et la teneur en matière sèche des plants. Les prélèvements en azote ont été déterminés en multipliant la biomasse aérienne totale par la teneur en N de la biomasse. Les rendements en grains ont été mesurés sur l'autre rang de 8 mètres au centre des parcelles avec une moissonneuse-batteuse conçue pour les parcelles expérimentales. Un échantillon de 500 g a été prélevé pour déterminer la teneur en N total et la teneur en eau des grains. Les rendements sont exprimés sur une base de matière sèche. Les rendements relatifs (RR) correspondant au rendement du témoin sans N/rendement maximum avec N ont été calculés à partir des fonctions de production de l'azote.

2.2 Dispositif expérimental sur les HRC

Le deuxième dispositif étudié portait sur les effets de l'historique des rotations de culture sur la fertilité azotée des sols. Cet essai s'est déroulé sur un site de longue durée implanté en 1978 à la station de recherche à Saint-Lambert-de-Lauzon sur un loam limoneux de la série Le Bras. Le champ comportait quatre grandes parcelles correspondant à quatre historiques des rotations de culture (HRC) présentés au tableau 1. La durée de rotation est de quatre ans. Le HRC I consistait en une monoculture de maïs-ensilage. Le HRC II comportait une rotation maïs-ensilage, orge grainée et 2 ans de prairie mil-trèfle. Le HRC III comportait une rotation de maïs-ensilage, blé et orge (2 ans). Les pailles de céréales ont été retirées des parcelles. Le HRC IV consistait en une prairie réimplantée tous les 4 ans avec de l'orge grainée.

Tableau 2.1 Historique des rotations de culture

Rotations	Années de rotation			
	1	2	3	4
I	Mais ensilage	Mais ensilage	Mais ensilage	Mais ensilage
II	Mais ensilage	Orge grainée	Mil-trèfle	Mil-trèfle
III	Mais ensilage	Orge	Orge	Blé
IV	Orge grainée	Mil-trèfle	Mil-trèfle	Mil-trèfle

En 2007, toutes les grandes parcelles correspondant aux divers HRC ont été ensemencées en maïs-grain. Elles ont été chacune subdivisées en cinq sous-parcelles correspondant à cinq doses croissantes d'azote minéral de 0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha, appliquées 50 kg N/ha au semis et le reste en postlevée à 20 cm des plants au stade V6 sauf pour le témoin sans N. Ces sous-parcelles mesuraient trois mètres de large, huit mètres de long et comportaient quatre rangs de maïs. La source d'azote utilisée était le nitrate d'ammonium calcique à 27 %N. Une fumure P et K de 50 kg/ha P₂O₅ et K₂O a été appliquée également en bandes au semis. Toutes les parcelles ont été préparées avec un travail complet du sol comportant un labour à l'automne et un passage de vibroculteur au printemps. La récolte a été effectuée le 2 novembre. Un des rangs du centre de 8 mètres a été récolté avec une ensileuse commerciale pour déterminer la biomasse totale (tiges + épis) de la partie aérienne et les prélèvements totaux d'azote. Un échantillon de 500 g a été prélevé pour déterminer la teneur en N total et la teneur en matière sèche des plants. Les prélèvements en azote ont été déterminés en multipliant la biomasse aérienne totale par la teneur en N de la biomasse. Les rendements en grains ont été mesurés sur l'autre rang de 8 m au centre des parcelles avec une moissonneuse-batteuse conçue pour les parcelles expérimentales. Un échantillon de 500 g a été prélevé dans chacune des parcelles pour déterminer la teneur en N total et la teneur en eau des grains. Les rendements sont exprimés sur une base de matière sèche. Les rendements relatifs (RR) correspondant au rendement du témoin sans N/rendement maximum avec N ont été calculés à partir des fonctions de production de l'azote.

2.3 Description des indicateurs de la fertilité azotée dans les sols

Dix-huit indicateurs de fertilité ont été étudiés dans les sols ou dans les plants. Leur abréviation et leur description sont présentées au tableau 2.2. La matière organique des sols (MOS) prélevés en présemis sur 30 cm a été dosée par voie humide selon la procédure décrite par Allison *et al.* (1965). L'azote total des sols (NTKS) prélevés en présemis sur 30 cm a été dosé après une digestion Kjeldahl (Bremner, 1965). Des sols prélevés en présemis sur 30 cm ont été placés dans une chambre d'incubation pendant 20 jours à 20 °C et maintenus à environ 70 % de la capacité au champ. Les nitrates des sols après incubation (I-NO₃) ont été extraits au KCL 2M et le dosage a été fait sur un appareil Technicon auto-analyseur. Les résultats sont exprimés sur base sèche en mg N-NO₃/kg. Une incubation anaérobique des sols maintenus à 40 °C pendant 10 jours a également été réalisée. L'extraction de l'azote ammoniacal après incubation (I-NH₄) a été réalisée avec du KCL 2M et les résultats sont exprimés en mg N-NH₄/kg. Les nitrates (PPNT) et l'azote ammoniacal (KCI-NH₄) des sols prélevés en présemis ont été extraits avec du KCL 2M. Le test des nitrates (PSNT) des sols prélevés en postlevée sur 30 cm au stade V6 du maïs (5-6 feuilles) a été réalisé avec une extraction au KCI 2M.

L'absorbance UV des sols prélevés en présemis et extraits au NaHCO₃ 0,01 M à la longueur d'onde de 220 nm (UV220) a été déterminée avec un spectromètre UV Milton Roy, modèle spectronic 1201, selon la procédure décrite par Fox et Piekielek (1983). L'azote total Kjeldahl dans l'extrait (NTK-NaHCO₃) a été déterminé avec un appareil CNS.

Dans un premier temps, le carbone soluble a été extrait à l'eau froide en prenant 4 g de sol avec 30 mL d'eau déminéralisée pendant 30 minutes, suivi d'une centrifugation à 2600 g et d'une filtration avec un filtre Whatman 42 prélavé, tel que décrit dans la procédure de Curtin *et al.* (2006). Le sol a été repris pour une autre extraction avec 30 ml d'eau mais cette fois dans un bain-marie à 80 °C pendant 16 heures, centrifugé à nouveau et filtré. Le carbone soluble à froid et à chaud a été déterminé dans chaque extrait avec un appareil TOC (Total organic carbon analyseur). Les résultats présentés dans cette étude pour le carbone soluble (CS) correspondent à la somme de l'extraction à froid et à chaud.

L'azote total soluble dans les extraits à froid et à chaud a été déterminé en utilisant le persulfate pour oxyder l'azote organique et ammoniacal en nitrates. Les résultats de l'azote soluble (NS) présentés dans cette étude correspondent à la somme de l'extraction à froid et à chaud. L'azote ammoniacal a été déterminé après traitement à l'eau à 80 °C suivi d'une extraction au KCl (HKCl-NH₄), selon la procédure décrite par Curtin *et al.* (2006).

L'activité de la déshydrogénase (AD) a été déterminée selon la méthode décrite par Tabatabai (1982) suite à la production de TPF (triphenyl formazan) après 24 heures d'incubation des sols à 37 °C. Les résultats ont été ramenés sur base sèche et exprimés en ug TPF/g 24 heures.

Tableau 2.2. Description des méthodes d'analyse des sols et des végétaux utilisées comme indicateurs de fertilité

Nos	Code	
1	MOS	Matière organique des sols prélevés en présemis sur 20 cm et dosée par Walkley et Black
2	NTKS	Azote total Kjeldahl des sols prélevés en présemis sur 20 cm
3	I-NO ₃	Nitrate extrait au KCl 2M des sols après une incubation aérobie de 20 jours à 20° C sur des sols prélevés en présemis sur 30 cm
4	I-NH ₄	N-NH ₄ extrait au KCl 2M après une incubation anaérobie de 10 jours à 40° C sur des sols prélevés en présemis sur 30 cm
5	PPNT	Nitrate extrait au KCl 2M sur des sols prélevés en présemis sur 30 cm
6	PSNT	Nitrate extrait au KCl 2M sur des sols prélevés en post-levée sur 30 cm au stade V6 du maïs
7	UV220	Absorbance UV à 220 nm des extraits au NaHCO ₃ 0,05 N de sols prélevés en présemis sur 30 cm
8	NTK-NaHCO ₃	Azote total Kjeldahl des extraits au NaHCO ₃ des sols prélevés en présemis sur 30 cm
9	KCl-NH ₄	N-NH ₄ extrait au KCl 2M sur des sols prélevés en présemis sur 30 cm
10	HKCl-NH ₄	N-NH ₄ extrait au KCl 2M sur des sols prélevés en présemis sur 30 cm et traités à l'eau chaude à 80 °C
11	CS	Carbone soluble extrait à l'eau chaude dans les sols prélevés en présemis sur 30 cm
12	NS	Azote minéral et organique extrait à l'eau chaude dans les sols prélevés en présemis sur 30 cm
13	AD	Activité de la déshydrogénase des sols prélevés en présemis sur 30 cm
14	NTKP	Azote total Kjeldahl mesuré dans les plants de maïs au stade 5-6 V6
15	NO ₃ P	Nitrate mesuré dans les plants de maïs au stade V6
16	ICT	Indice de chlorophylle des feuilles de maïs au stade V6 mesuré avec l'appareil Spad 502 (Minolta co.) dans les parcelles témoins sans azote
17	ICD	Indice de chlorophylle des feuilles de maïs au stade V6 mesuré avec le chlorophylle-mètre Spad 502 (Minolta co.) dans les parcelles ayant reçu une fumure de démarrage de 50 kg N/ha
18	IRC	Indice relatif de chlorophylle correspondant au rapport de l'indice des parcelles témoins sans N sur celui des parcelles avec fumure de démarrage x 100

2.4 Description des indicateurs de la fertilité azotée dans les plants de maïs

Les teneurs en N total Kjeldahl des plants de maïs (NTKP) au stade V6 ont été déterminées sur un appareil Technicon après digestion sulfurique. La teneur en nitrates des plants de maïs (NO₃P) au stade V6 a été déterminée sur Technicon après une extraction au KCl 2M.

L'indice de chlorophylle a été déterminé sur 30 feuilles de maïs au stade V6 avec le chlorophylle-mètre SPAD 502 dans les parcelles témoins sans N (ICT) et dans les parcelles ayant reçu une fumure de démarrage de 50 kg N/ha (ICD). L'indice relatif de chlorophylle (IRC) correspond au rapport de l'indice moyen des parcelles témoins (ICT) sur celui des parcelles avec une fumure de démarrage de 50 kg N/ha (ICD).

2.5 Analyses statistiques

Le dispositif expérimental de l'essai sur l'historique des épandages d'engrais est un *split-block* avec les 3 HEE comme parcelles principales et les 5 doses N comme sous-parcelles. Il comporte 3 répétitions. Le dispositif expérimental de l'essai sur l'historique des rotations est un *split-block* avec les quatre systèmes de rotation comme parcelles principales et les 5 doses N comme sous-parcelles. Il comporte 4 répétitions. Pour les deux dispositifs, une analyse de variance Proc Mix sur SAS a été effectuée pour déterminer les niveaux de probabilité des effets des facteurs principaux, des doses N et des interactions sur chacun des paramètres mesurés. Ces paramètres sont le rendement en grains, sa teneur en N, son humidité, la biomasse totale aérienne (grains + tiges), sa teneur en N et les prélèvements totaux en N. Les plus petites différences significatives (ppds) des paramètres mesurés au seuil statistique 5 % ont été déterminées selon les HEE, les HRC et les doses N. Les coefficients de variation ont été déterminés pour chacun des paramètres comme indicateur de la précision de l'essai. Une comparaison de quatre modèles reliant les rendements en grains avec les doses N a été effectuée afin d'établir celui fournissant le coefficient de détermination le plus élevé et les résidus les plus faibles. Les fonctions de production reliant les rendements et les doses d'azote de chacun des HEE et des HRC ont été établies selon le modèle sélectionné qui s'est avéré être le modèle quadratique-plateau. Les doses de N produisant les rendements économiques optimaux (N OPT) ont été déterminées à partir de la dérivée des fonctions de production du modèle retenu, en considérant une productivité limite de 8. La productivité limite détermine combien il faut de kg de grains pour rentabiliser l'achat d'un kg d'azote selon leur prix respectif. En 2007, le kg d'azote moyen des engrais a été estimé à 1,35 \$ et le prix du grain à 0,17 \$ pour une productivité limite près de 8 (1,35 \$/0,17 \$).

La dose N produisant le rendement optimal (N OPT) a été calculée en égalant la dérivée de la fonction de production à 8 et la dose N produisant le rendement maximal (N max.) a été calculée en égalant la dérivée de la fonction de production à 0.

Productivité limite = \$ kg N/\$ kg grain

y = rendement (kg/ha)

y = c + bx + ax²

N opt. = (productivité limite – b)/2a

x = dose N (kg/ha)

dy/dx = 2ax + b

N max. = -b/2a

La fourniture d'azote du sol a été déterminée à partir des prélèvements en N des plants entiers de maïs (grains + tiges) des parcelles témoins sans N (PNT). Les coefficients de détermination ont été établis entre RR, N OPT, PNT et les différents indicateurs de fertilité azotée mesurés dans les sept champs expérimentaux (3 champs avec HEE et 4 champs avec HRC). Les coefficients de détermination des régressions (R²) les plus élevés et significativement corrélés avec RR, N OPT et PNT ont permis d'identifier les méthodes analytiques les plus performantes pour révéler la fertilité azotée des sols selon les HEE et les HRC.

3. RÉSULTATS

3.1 Rendements et prélèvements de N selon les HEE et les doses N

L'historique des épandages des engrais minéraux et organiques (HEE) et les doses N ont exercé un effet très significatif sur les rendements en grains (tableau 3.1). Cet effet est de type quadratique et il s'atténue à mesure que les doses N augmentent. L'interaction HEE x doses N a été également très significative, ce qui démontre que des ajustements aux doses de N doivent être apportés selon les HEE.

L'humidité du grain à la récolte est également affectée par les HEE. Avec les doses d'azote les plus importantes, l'humidité des grains est plus élevée d'environ 2 % pour le HEE de fumier de bovins. La teneur en eau des grains est plus élevée dans les parcelles témoins, comparées aux fortes doses N pour les HEE lisier et fumure minérale (tableau 3.1). La dose N optimale permet généralement d'atteindre le niveau minimal d'humidité des grains pour un champ donné.

Les effets des HEE et des doses N sur la biomasse aérienne ont été très significatifs et semblables à ceux observés pour les rendements en grains. Les effets sont également de type quadratique. Les biomasses aériennes et les prélèvements en N ont été très affectés par les HEE, les doses N et par leur interaction. La teneur en azote des grains est également reliée très significativement aux doses de N, mais pas aux HEE ni à l'interaction HEE x doses N (tableau 3.1)

Tableau 3.1. Analyse de variance des rendements, des teneurs et des prélèvements en N du maïs selon l'historique des épandages d'engrais (HEE) et les doses N appliquées

HEE	Doses N kg/ha	Grain kg/ha	Humidité %	Grain % N	Prélev. grain kg N/ha	Biomasse aérienne kg/ha	Biomasse % N	Prélev. N biomasse kg/ha
Fumier de bovins	0	4 865	32,3	1,37	66,7	9 638	1,03	100
	50	8 382	32,8	1,44	120,6	13 053	1,17	154
	100	8 614	32,8	1,43	122,8	13 319	1,16	155
	150	9 099	32,6	1,40	127,5	14 298	1,11	159
	200	8 963	32,8	1,52	136,3	14 483	1,19	172
Lisier de porcs	0	3 241	32,1	1,30	42,1	7 864	0,94	74
	50	5 927	32,1	1,36	80,7	11 341	0,96	109
	100	8 499	30,6	1,37	116,7	14 053	1,07	149
	150	9 525	30,7	1,47	139,6	14 833	1,14	169
	200	9 539	30,7	1,52	145,3	14 925	1,12	167
Fumure minérale	0	877	34,7	1,37	12,1	2 671	0,88	23
	50	2 067	28,5	1,37	28,3	7 061	0,95	67
	100	4 788	31,1	1,37	65,5	10 244	0,93	97
	150	7 049	30,2	1,43	100,6	11 427	1,03	117
	200	6 869	29,5	1,49	102,1	12 142	1,00	122
F (HEE)		170,3	8,68	2,52	182,5	70,9	13,3	105,7
Pr (HEE) > F		0,0001	0,035	0,196	< 0,0001	0,0008	0,017	0,0003
F (N)		111,1	3,48	13,8	153,2	46,1	5,22	31,5
Pr (N) > F		< 0,0001	0,022	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0036	< 0,0001
F (HEE x N)		6,0	2,14	1,56	8,0	2,01	1,12	1,12
Pr (HEE x N) > F		0,0003	0,072	0,189	< 0,0001	0,088	0,386	0,382
F (N lin.)		345,8	3,67	12,1	435,0	134,6	14,7	90,1
Pr (N lin.) > F		< 0,0001	0,068	0,002	< 0,0001	< 0,0001	0,0008	< 0,0001
F (N quad.)		7,3	4,66	0,00	6,9	10,33	0,46	5,32
Pr (N quad.) > F		0,012	0,041	1,00	0,015	0,004	0,504	0,0292
ppds 5 % (HEE)		504	1,17	0,038	6,6	978	0,06	14,5
ppds 5 % (N)		650	1,51	0,04	8,5	1 262	0,08	18,7
C.V. %		10,2	4,9	3,5	9,3	11,4	7,8	15,7

3.2 Doses N optimales selon les HEE

Une comparaison de quatre modèles reliant les rendements avec les doses N a permis de démontrer que les modèles quadratique-plateau et exponentiel sont ceux qui dans l'ensemble ont offert les meilleurs coefficients de détermination R^2 et minimisé les résidus. Le modèle quadratique-plateau a été retenu dans cette étude pour établir les doses N et les rendements optimaux et maximaux.

Tableau 3.2. Comparaison de quatre modèles pour établir les relations entre les rendements du maïs-grain et les doses N selon les HEE

Modèles	Linéaire	Quadratique	Quadratique-plateau	Exponentiel
Fumier de bovins				
Somme carrés des résidus	18,56 M	7,90 M	5,32 M	5,20 M
Coefficient détermination R ²	0,56	0,81	0,88	0,88
Lisier de porcs				
Somme carrés des résidus	14,42 M	4,25 M	4,28 M	5,22 M
Coefficient détermination R ²	0,85	0,95	0,95	0,94
Fumure minérale				
Somme carrés des résidus	11,14 M	8,95 M	8,95 M	9,42 M
Coefficient détermination R ²	0,89	0,91	0,91	0,90

L'historique des épandages d'engrais (HEE) a exercé un effet très significatif sur les besoins en engrais azoté du maïs-grain. La dose N économique optimale a été de 72, 161 et plus de 200 kg N/ha respectivement pour les HEE avec fumier de bovins, lisier de porcs et fumure minérale (tableau 3.3, figure 3.1). Les arrière-effets de l'azote, plus élevés pour les fumiers de bovins, ont permis d'atteindre le rendement optimal en grains avec moins d'azote comparativement au HEE de lisier de porcs et surtout avec le HEE de fumure minérale. Le rendement optimal économique a été de 8868, 9551 et 7750 kg/ha respectivement pour les HEE avec fumier de bovins, lisier de porcs et fumure minérale. Dans le cas de la fumure minérale, il n'est pas possible d'établir avec précision le rendement optimal car la dose N optimale se situe au-delà de la dose maximale de N testée, soit 200 kg N/ha. Les apports réguliers d'engrais organiques ont permis au sol de maintenir une très bonne productivité; par contre, la parcelle avec un historique de fumure minérale a produit un rendement inférieur aux HEE avec fumier et lisier pour la dose maximale testée.

Le rendement des parcelles témoins sans azote est également révélateur de la fertilité des sols et de leur capacité de minéralisation. Le rendement en grains des parcelles témoins sans apport d'azote a été de 4865, 3241 et 877 kg/ha respectivement pour les HEE avec fumier de bovins, lisier de porcs et fumure minérale (tableau 3.1). L'absence d'apports réguliers d'engrais organiques à long terme a eu pour effet de diminuer fortement la fertilité des sols, de limiter leur productivité et d'accroître les besoins en engrais azoté.

Tableau 3.3. Fonctions de production de l'azote sur les rendements du maïs-grain et détermination des doses N optimales et maximales selon les HEE

HEE	Fonctions de production	R ²	R.R. %	Dose N		Rendement	
				Opt.	Max.	Opt.	Max.
				-----kg/ha-----			
Fumier de bovins	$y = 4865 + 104 x - 0,6700 x^2$	0,88	54,7	72	78	8 868	8 892
Lisier de porcs	$y = 3129 + 71,76 x - 0,1969 x^2$	0,95	32,5	161	182	9 551	9 633
Fumure minérale	$y = 526 + 48,16 x - 0,0602 x^2$	0,94	6,8	+200	ND	7 750	7 750

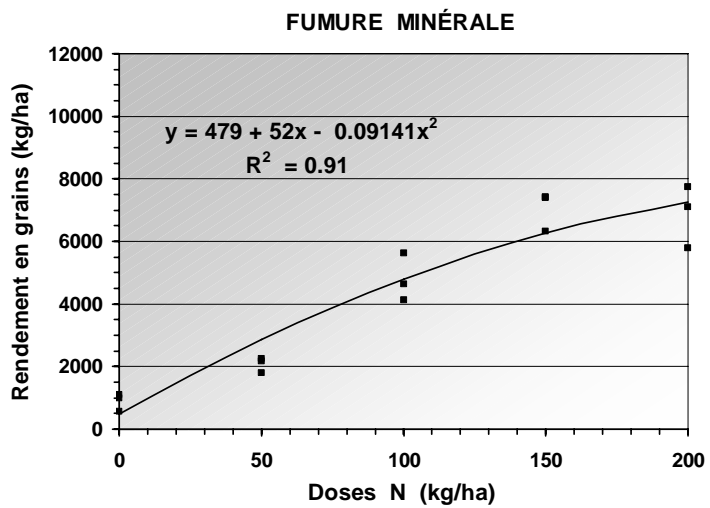
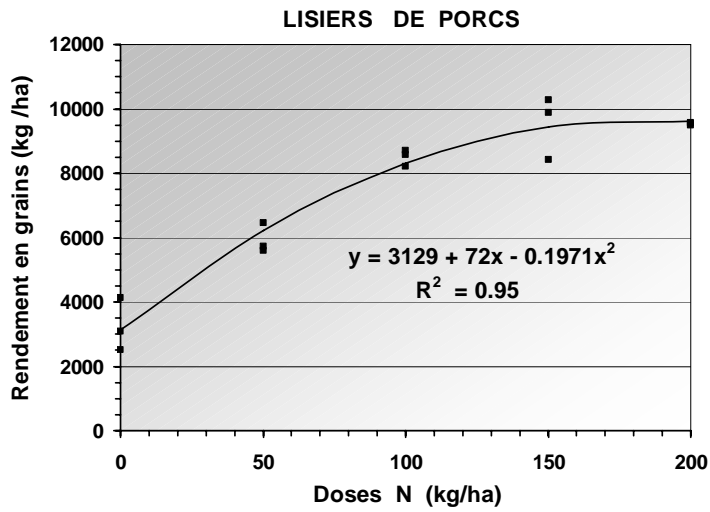
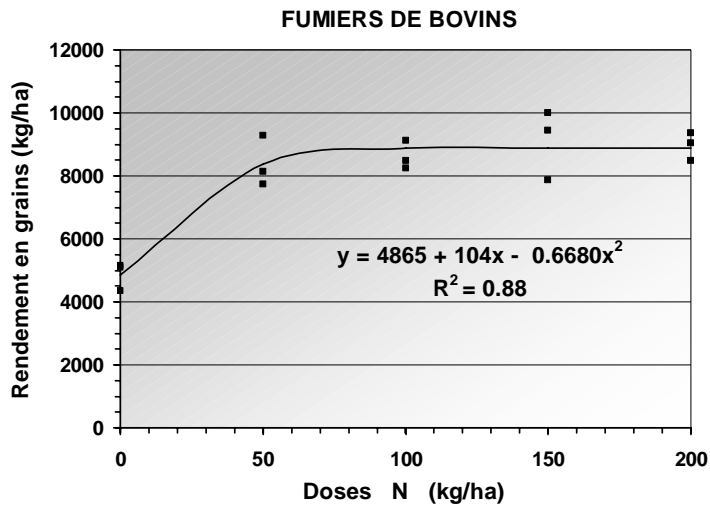


Figure 3.1. Relations entre les rendements en maïs-grain et les doses N appliquées pour différents historiques d'épandage des engrais

3.3 Indicateurs de fertilité azotée selon les HEE

Le tableau 3.4 présente les résultats des tests de fertilité azotée effectués dans les sols ou dans les végétaux selon les historiques d'épandage des engrais. Les résultats montrent que la teneur en nitrates après incubation (NO_3^-) est affectée par les HEE. Elle est de 18,3, 12,5 et 6,1 mg $\text{N-NO}_3/\text{kg}$ respectivement pour les historiques de fumier de bovins, lisier de porcs et fumure minérale. Il est intéressant de noter que la teneur en nitrates des sols après une incubation de 20 jours à 20 °C se compare à celle aux champs en postlevée (PSNT). Ce test révèle donc les différences dans l'azote minéralisable des sols selon les HEE. L'autre test d'incubation, réalisé en milieu anaérobie à une température de 40 °C pendant 10 jours (I-NH_4) a également démontré que les HEE ont un effet important sur la minéralisation de l'azote des sols. Les valeurs N-NH_4 mesurées après incubation ont été de 59,8, 49,4 et 24,9 mg $\text{N-NH}_4/\text{kg}$ respectivement pour les HEE de fumier de bovins, lisier de porcs et fumure minérale. Ce test a montré des résultats nettement plus élevés que le test précédent à 20 °C. Il met donc en évidence des formes de N plus lentement minéralisables mais très différentes selon les HEE (tableau 3.4).

Le test des nitrates du sol en présemis (PPNT) dans la couche 0-30 cm a montré peu de différences entre les parcelles selon les HEE. La teneur en nitrates des sols est de 5,7, 4,5 et 2,0 mg $\text{N-NO}_3/\text{kg}$ respectivement dans les parcelles avec un HEE de fumier de bovins, de lisier de porcs et de fumure minérale. Ce test mesure surtout l'azote nitrique résiduel dans les sols au printemps mais beaucoup moins leur capacité de minéralisation. Le test des nitrates du sol en postlevée (PSNT) dans la couche 0-30 cm de sol reflète davantage la différence de fertilité des parcelles selon les HEE. La teneur en nitrates des sols est de 15,2, 7,5 et 5,1 mg $\text{N-NO}_3/\text{kg}$ respectivement dans les parcelles avec un HEE de fumier de bovins, de lisier de porcs et de fumure minérale. Le test indique une bonne fertilité dans la parcelle avec un HEE de fumier de bovins, une fertilité moyenne dans celle avec lisier de porcs et une faible fertilité dans celle avec la fumure minérale. La similitude des résultats avec le test d'incubation I-NO_3 nous permet d'affirmer que le test PSNT est capable de mettre en évidence les formes d'azote minéralisable dans les sols (tableau 3.4).

L'absorbance UV des extraits à 220 nm est plus élevée avec le HEE de bovins laitiers avec une valeur de 0,80, mais il n'y a pas de différence significative entre le HEE de lisier de porcs et de fumure minérale avec des absorbances respectives de 0,43 et 0,46. Ces résultats indiquent que ce test manque de sensibilité pour révéler les différences de fertilité azotée des sols selon les HEE.

L'azote total Kjeldahl (NTK) dans les extraits de sol au bicarbonate constitue une mesure intéressante de l'azote labile dans les sols. La teneur est de 136,0, 66,2 et 45,6 mg N/kg respectivement pour les HEE de fumier de bovins, de lisier de porcs et de fumure minérale. L'azote organique extrait par le bicarbonate est facilement minéralisable, ce qui permet d'obtenir un indice de minéralisation du sol capable de mettre en évidence les arrière-effets des épandages d'engrais.

L'azote ammoniacal extrait au KCl 2 M varie peu selon les HEE, soit respectivement 3,1, 1,9 et 2,3 mg $\text{N-NH}_4/\text{kg}$ pour le fumier de bovins, le lisier de porcs et la fumure minérale. Cette méthode d'extraction ne révèle pas le potentiel de minéralisation de l'azote du sol. Elle a donc peu d'intérêt pour l'étude de la fertilité azotée des sols. Par contre, la méthode d'extraction de l'azote ammoniacal après un traitement à l'eau chaude exprime davantage la fertilité azotée des sols. Les résultats sont en relation avec les HEE, soit 13,0, 9,1 et 6,5 mg $\text{N-NH}_4/\text{kg}$ respectivement pour les fumiers de bovins, les lisiers de porcs et la fumure minérale.

Le C soluble à l'eau chaude a varié beaucoup selon les HEE. La teneur en C total soluble est de 923, 579 et 427 mg C/kg respectivement dans les parcelles avec un HEE de fumier de bovins, de lisier de porcs et de fumure minérale. L'azote total soluble à l'eau chaude, composé de la fraction minérale et organique soluble, est

également très affecté par les HEE. Elle est de 69,9, 54,8 et 28,5 mg N/kg respectivement dans les parcelles avec un HEE de fumier de bovins, de lisier de porcs et de fumure minérale. La matière organique des sols (MOS) et la teneur en azote total Kjeldahl (NTKS) ont également été affectées par les HEE. L'apport à long terme de fumier et à un degré moindre de lisier a augmenté la teneur en matière organique et en azote total des sols et leur capacité de minéralisation.

En ce qui concerne l'activité de la déshydrogénase, elle est très affectée par les HEE avec 144 ug/g-24h pour le fumier de bovins, 83 ug/g-24h pour le lisier de porcs et 33 ug/g-24h pour la fumure minérale. Cet enzyme est impliqué dans les processus d'oxydation de la matière organique des sols et de la respiration microbienne. Son activité est donc liée à l'activité biologique du sol et indirectement à la quantité d'azote minéralisé.

L'indice de chlorophylle des feuilles dans les parcelles témoins (ICT) sans azote est affecté par les HEE. Il est respectivement de 37,4, 34,2 et 29,0 pour les HEE de fumier de bovins, de lisier de porcs et de fumure minérale. Les plants de maïs expriment relativement tôt le manque d'azote, ce qui permet de diagnostiquer les carences au stade V6 avec le chlorophylle-mètre dans les parcelles témoins. L'indice de chlorophylle de la parcelle avec une fumure de démarrage de 50 kg N/ha n'est cependant pas affecté par les HEE et ne constitue pas un indice valable de la fertilité azotée. L'azote apporté au semis a comblé la plus grande partie des besoins en N des plants, ce qui empêche un diagnostic valable de l'azote des plants. L'indice relatif de chlorophylle, fourni par l'indice de la parcelle témoin par rapport à celui de la parcelle avec une fumure de démarrage, révèle cependant très bien la différence de fertilité des sols selon les HEE. L'indice relatif de chlorophylle est de 91,4, 81,0 et 70,7 % respectivement dans les parcelles avec un HEE de fumier de bovins, de lisier de porcs et de fumure minérale. De plus, l'indice relatif peut contribuer à atténuer les effets annuels dus aux températures, aux précipitations et aux conditions de croissance spécifiques à chaque champ (tableau 3.4).

L'application des fumiers de bovins a fourni la fertilité azotée la plus élevée. Les lisiers de porcs ont produit une fertilité intermédiaire et la fumure minérale seule a produit à long terme une faible fertilité azotée des sols et une fourniture minimale d'azote au maïs-grain. La majorité des indicateurs étudiés ont permis de bien distinguer ces différences selon les HEE. Les méthodes UV220, KCl-NH₄ et ICD n'ont toutefois pas bien décelé les différences dans la fertilité azotée des sols selon les HEE.

Tableau 3.4. Résultats des indicateurs de fertilité azotée mesurés dans les sols ou dans les plants de maïs selon les HEE

Méthodes	Unités	Historiques		
		Fumier de bovins	Lisier de porcs	Fumure minérale
1 MOS	%	4,30	2,21	1,92
2 NTKS	%	0,178	0,119	0,088
3 I-NO ₃	mg N-NO ₃ /kg	18,3	12,5	6,1
4 I-NH ₄	mg N-NH ₄ /kg	59,8	49,4	24,9
5 PPNT	mg N-NO ₃ /kg	5,7	4,5	2,0
6 PSNT	mg N-NO ₃ /kg	15,2	7,5	5,1
7 UV220	---	0,80	0,43	0,46
8 NTK-NaHCO ₃	mg N/kg	136,0	66,2	45,6
9 KCl-NH ₄	mg N-NH ₄ /kg	3,1	1,9	2,3
10 HKCl-NH ₄	mg N-NH ₄ /kg	13,0	9,1	6,5
11 CS	mg C/kg	923	579	427
12 NS	mg N/kg	69,9	54,8	28,5
13 AD	ug/g 24 h ⁻¹	144	83	33
14 ICT	---	37,4	34,2	29,0
15 ICD	---	40,9	42,2	41,0
16 IRC	%	91,6	81,0	70,7
17 NTKP	%	3,47	2,96	2,69
18 NO ₃ P	mg N-NO ₃ /kg	3 096	1 654	460

* Pour connaître la description de la méthode correspondante, voir le tableau 2.2

3.4 Rendements et prélèvements de N selon les HRC et les doses N

L'historique des rotations de culture (HRC) et les doses N ont produit des effets très significatifs sur les rendements en grains. Cet effet est de type quadratique et décroît avec les doses N (tableau 3.5). L'interaction HRC x doses N est également très significative, ce qui démontre que des ajustements aux doses de N doivent être apportés selon les HRC.

L'humidité des grains à la récolte est également affectée par les HRC (tableau 3.5). Les rotations II et IV comportant des prairies ont fourni une humidité des grains environ 2 % plus élevée que les rotations I et III respectivement en monoculture de maïs et en rotation maïs-céréales. L'humidité des grains est également plus élevée dans les parcelles témoins sans N, comparativement aux doses N plus élevées. Les effets des HRC et des doses N sur la biomasse aérienne ont été très significatifs et semblables à ceux observés pour les rendements en grains. Les effets sont également de type quadratique. Les biomasses aériennes et les prélèvements en N sont très affectés par les HRC, les doses N et par leur interaction. Les teneurs en azote des grains ont été affectées très significativement par les doses de N mais pas par les HRC ni par l'interaction HRC x doses N (tableau 3.5)

Tableau 3.5. Analyse de variance des rendements, des teneurs et des prélèvements en N du maïs selon les HRC et les doses N appliquées

HRC	Doses N kg/ha	Rend. kg/ha	Humidité %	Grain % N	Prélev. grain kg N/ha	Biomasse aérienne kg/ha	Biomasse % N	Prélev. N kg/ha
I	0	1 718	25,2	1,45	24,9	3 788	0,89	34
	50	3 210	23,7	1,41	45,0	6 398	0,87	56
	100	5 080	23,8	1,42	72,2	9 420	0,95	89
	150	6 031	24,4	1,48	89,2	11 306	1,12	126
	200	6 919	24,8	1,54	106,4	12 879	1,13	146
II	0	4 445	27,3	1,43	63,4	7 810	1,00	81
	50	6 248	27,5	1,39	86,6	11 183	1,03	116
	100	6 994	27,2	1,40	98,2	12 493	1,09	136
	150	7 401	25,9	1,49	109,9	13 081	1,17	154
	200	7 534	25,9	1,53	115,0	13 453	1,22	164
III	0	2 754	26,5	1,45	40,0	5 728	1,05	61
	50	4 178	24,9	1,43	53,3	8 491	1,01	86
	100	6 027	25,0	1,45	87,4	11 119	1,02	114
	150	7 376	26,4	1,47	108,2	13 459	1,15	155
	200	7 922	25,5	1,51	119,6	13 691	1,13	155
IV	0	5 052	27,2	1,39	70,2	10 973	1,00	113
	50	6 987	27,8	1,43	99,8	12 090	1,09	131
	100	7 157	26,3	1,43	102,1	12 670	1,12	143
	150	7 370	25,9	1,49	109,5	12 823	1,11	141
	200	7 614	25,2	1,48	112,8	13 306	1,20	160
F (HRC)		47,3	3,40	0,31	39,1	32,8	2,99	17,1
Pr (HEE) > F		< 0,0001	0,067	0,815	< 0,0001	< 0,0001	0,088	0,0005
F (N)		107,3	1,52	25,2	135,9	47,4	11,8	46,5
Pr (N) > F		< 0,0001	0,213	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
F (HRC x N)		5,0	1,09	1,51	5,1	3,30	1,25	2,23
Pr (HEE x N) > F		< 0,0001	0,388	0,152	< 0,0001	0,002	0,281	0,025
F (N lin.)		288,5	3,35	18,0	342,5	128,3	24,7	118,5
Pr (N lin.) > F		< 0,0001	0,073	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
F (N quad.)		9,01	0,79	17,6	4,0	2,75	3,09	0,02
Pr (N quad.) > F		0,0043	0,379	0,0001	0,050	0,104	0,0852	0,897
ppds 5 % (HRC)		396	0,95	0,022	5,6	937	0,06	12,6
ppds 5 % (N)		442	1,06	0,025	6,2	1 048	0,07	14,1
C.V. %		10,5	5,8	2,4	10,2	13,6	8,6	16,8

3.5 Doses N optimales selon les HRC

Une comparaison de quatre modèles reliant les rendements avec les doses N a permis de démontrer que le modèle quadratique-plateau était, soit égal, soit supérieur aux modèles linéaire, quadratique ou exponentiel (tableau 3.6). Il a donc été choisi pour établir les relations entre les rendements en grains et les doses N. Il a également servi à établir les doses N et les rendements optimaux et maximaux selon les HRC.

Tableau 3.6. Comparaison de quatre modèles pour établir les relations entre les rendements du maïs-grain et les doses N selon l'historique des rotations des cultures

Modèles	Linéaire	Quadratique	Quadratique-plateau	Exponentiel
Rotation I				
Somme carrés des résidus	5,49 M	4,20 M	4,20 M	4,26 M
Coefficient détermination R ²	0,93	0,94	0,94	0,94
Rotation II				
Somme carrés des résidus	13,36 M	9,49 M	9,38 M	9,22 M
Coefficient détermination R ²	0,62	0,73	0,73	0,74
Rotation III				
Somme carrés des résidus	9,14 M	7,68 M	7,68 M	7,83 M
Coefficient détermination R ²	0,89	0,91	0,91	0,91
Rotation IV				
Somme carrés des résidus	12,03 M	8,84 M	7,78 M	7,63 M
Coefficient détermination R ²	0,89	0,91	0,91	0,90

L'historique de rotation des cultures (HRC) exerce un effet très significatif sur les besoins en engrais azoté du maïs-grain (tableau 3.7, figure 3.2). Les doses N économiques optimales ont été de 73 et 120 kg N/ha dans les parcelles II et IV qui comportent des prairies dans les rotations, et plus de 200 kg N/ha pour les parcelles I et III avec des historiques de maïs en monoculture et de maïs-céréales. Les arrière-effets de l'azote ont été plus élevés pour les parcelles comportant des prairies dans les rotations. Ceci a permis d'atteindre le rendement optimal en grains avec moins d'azote comparé au HRC avec maïs-céréales et au HRC en monoculture de maïs. Le rendement des parcelles témoins sans azote est également révélateur de la fertilité des sols et de leur capacité de minéralisation. Les rendements en grains des parcelles témoins sans apport d'azote ont été de 4445 et de 5052 kg/ha, respectivement pour les HRC II et IV comportant des prairies, et 1718 et 2754 kg/ha respectivement pour les HRC en monoculture de maïs et en rotation avec les céréales (tableau 3.5). La présence de prairies dans les rotations a eu pour effet d'accroître fortement la fertilité des sols et de diminuer les besoins en engrais azoté.

Tableau 3.7. Fonctions de production de l'azote sur les rendements du maïs-grain et détermination des doses N optimales et maximales selon les HRC

HRC	Fonctions de production Quadratique-plateau	R ²	R.R. %	Dose N		Rendement	
				Opt.	Max.	Opt.	Max.
				-----kg/ha-----			
I	$y = 1643 + 38,61 x - 0,0608 x^2$	0,94	23,7	+200	ND	6 933	6 933
II	$y = 4485 + 39 x - 0,1351 x^2$	0,73	60,2	120	151	7 326	7 448
III	$y = 2622 + 39,96 x - 0,0645 x^2$	0,91	32,6	+200	ND	8 034	8 034
IV	$y = 5052 + 55 x - 0,3200 x^2$	0,68	68,5	73	85	7 331	7 380

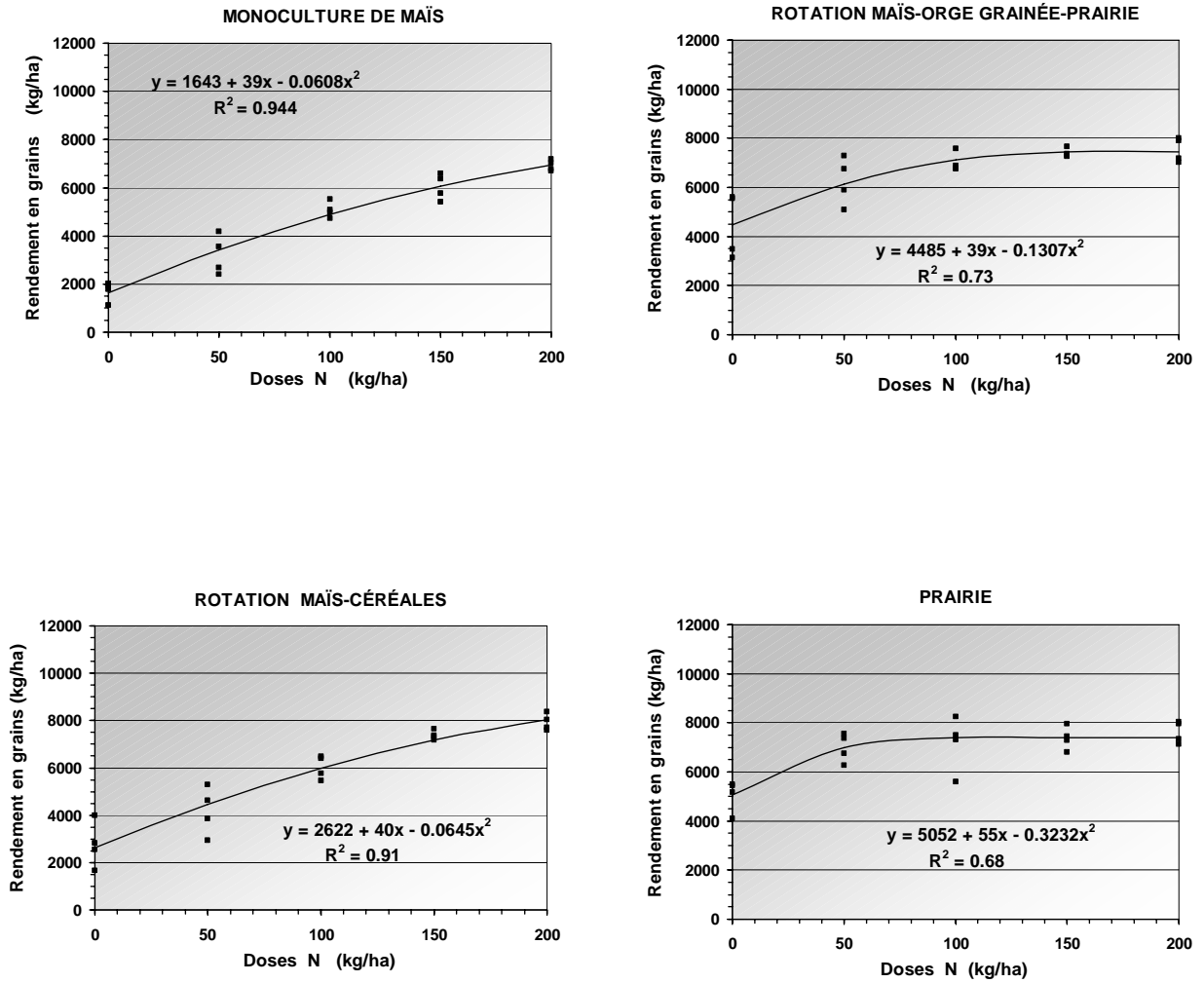


Figure 3.2. Relations entre les rendements en maïs-grain et les doses N appliquées pour différents historiques de rotations de culture

3.6 Indicateurs de fertilité azotée selon les HRC

Comme le contraste de fertilité azotée des sols est associé à la présence de prairies dans les rotations (parcelles II et IV), versus l'absence de prairies (parcelles I et, III). Les meilleurs indicateurs de fertilité seront ceux qui révéleront le mieux les différences entre ces deux groupes de parcelles. Les méthodes les plus performantes sont : I-NO₃, PPNT, PSNT, ICT, IRC, NTKP et NO₃P. La matière organique des sols (MOS) n'a pas montré de différence selon les HRC. La présence des céréales dans les rotations n'améliore, ni ne permet, de maintenir une bonne fertilité azotée des sols. La présence des prairies est associée à une fertilité élevée. Plusieurs indicateurs ont démontré cet effet dans la capacité de minéralisation des sols, la teneur en matière organique labile, la teneur en nitrates aux champs, l'activité enzymatique des sols, la teneur en azote des plants de maïs et l'indice de chlorophylle des feuilles dans les parcelles témoins au stade V6.

Tableau 3.8. Résultats des indicateurs de fertilité azotée mesurés dans les sols ou dans les plants de maïs selon les HRC

Méthodes	Unités	Rotations			
		I	II	III	IV
1 MOS	%	4,04	4,57	4,44	4,45
2 NTKS	%	0,175	0,202	0,172	0,192
3 I-NO ₃	mg N-NO ₃ /kg	13,0	23,1	12,7	22,5
4 I-NH ₄	mg N-NH ₄ /kg	34,3	57,1	52,5	52,6
5 PPNT	mg N-NO ₃ /kg	4,8	8,9	4,7	9,1
6 PSNT	mg N-NO ₃ /kg	7,2	11,6	8,1	14,3
7 UV220	---	0,73	0,77	0,63	0,88
8 NTK-NaHCO ₃	mg N/kg	134	127	106	161
9 KCl-NH ₄	mg N-NH ₄ /kg	3,4	3,9	3,0	5,4
10 HKCl-NH ₄	mg N-NH ₄ /kg	10,4	12,8	11,1	13,5
11 CS	mg C/kg	866	851	814	870
12 NS	mg N/kg	65,7	73,7	68,3	76,9
13 AD	ug/g 24 h ⁻¹	52	109	110	137
14 ICT	---	32,9	41,1	34,0	42,4
15 ICD	---	42,9	42,1	42,1	43,5
16 IRC	%	76,6	97,6	80,9	97,5
17 NTKP	%	3,09	3,90	3,36	3,94
18 NO ₃ P	mg N-NO ₃ /kg	581	2 794	1 090	2 630

* Pour connaître la description de la méthode correspondante, voir le tableau 2.2

3.7 Performance des indicateurs de fertilité azotée

Afin de déterminer le potentiel des indicateurs de fertilité, les équations reliant le rendement relatif (RR), la dose N optimale (N OPT), la fourniture d'azote du sol au maïs (PNT) avec les résultats d'analyses des divers indicateurs de fertilité ont été établies (figures 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6). Le coefficient de détermination de ces équations a servi à évaluer la performance des méthodes pour révéler la fertilité azotée des sols.

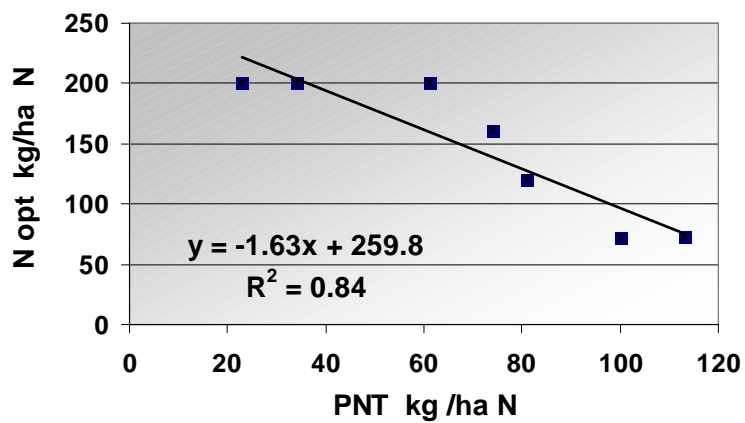
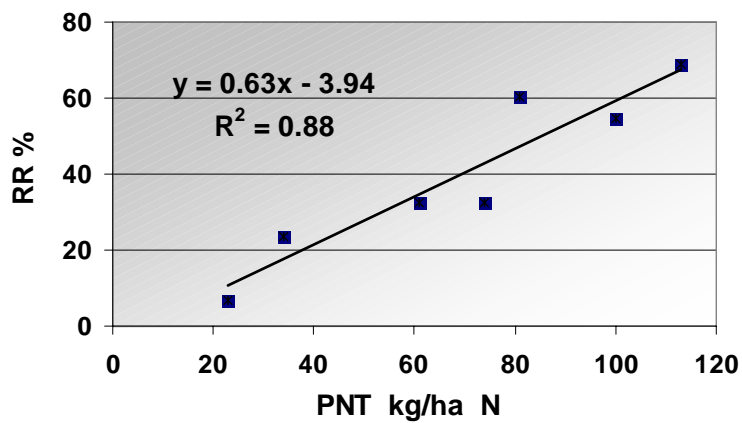
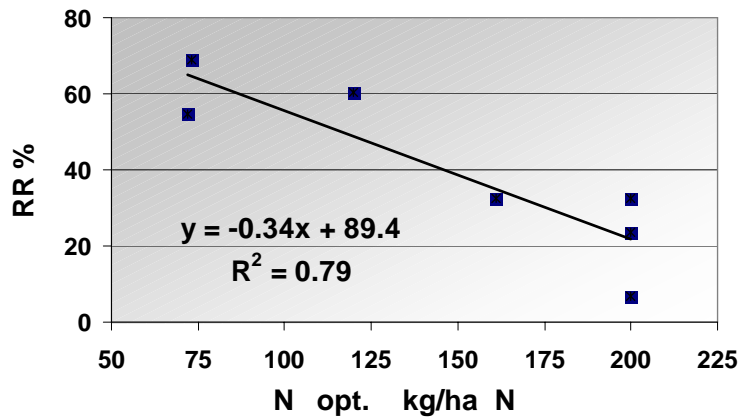


Figure 3.3. Relations entre le rendement relatif, la dose optimale d'azote (N opt) et la fourniture d'azote du sol (PNT) au maïs-grain

Les méthodes suivantes montrent des corrélations très significatives à $P = 0,01$ avec les rendements relatifs (RR) :

- I-NO₃ ($R^2 = 0,95$)
- PPNT ($R^2 = 0,88$)
- PSNT ($R^2 = 0,85$)
- HKCl-NH₄ ($R^2 = 0,87$)
- AD ($R^2 = 0,80$)
- ICT ($R^2 = 0,97$)
- IRC ($R^2 = 0,97$)
- NTKP ($R^2 = 0,90$)
- NO₃P ($R^2 = 0,85$)

Les méthodes suivantes montrent des corrélations significatives ($P = 0,05$) ou très significatives ($P = 0,01$) avec les doses optimales d'azote (N opt) :

- I-NO₃ ($R^2 = 0,67$)
- PSNT ($R^2 = 0,92$)
- HKCl-NH₄ ($R^2 = 0,59$)
- AD ($R^2 = 0,69$)
- ICT ($R^2 = 0,69$)
- IRC ($R^2 = 0,77$)
- NO₃P ($R^2 = 0,89$)

Les méthodes suivantes montrent des corrélations très significatives ($P = 0,01$) avec la fourniture d'azote du sol (PNT) :

- I-NO₃ ($R^2 = 0,70$)
- I-NH₄ ($R^2 = 0,76$)
- PSNT ($R^2 = 0,84$)
- HKCl-NH₄ ($R^2 = 0,70$)
- AD ($R^2 = 0,88$)
- ICT ($R^2 = 0,78$)
- IRC ($R^2 = 0,81$)
- NO₃P ($R^2 = 0,85$)

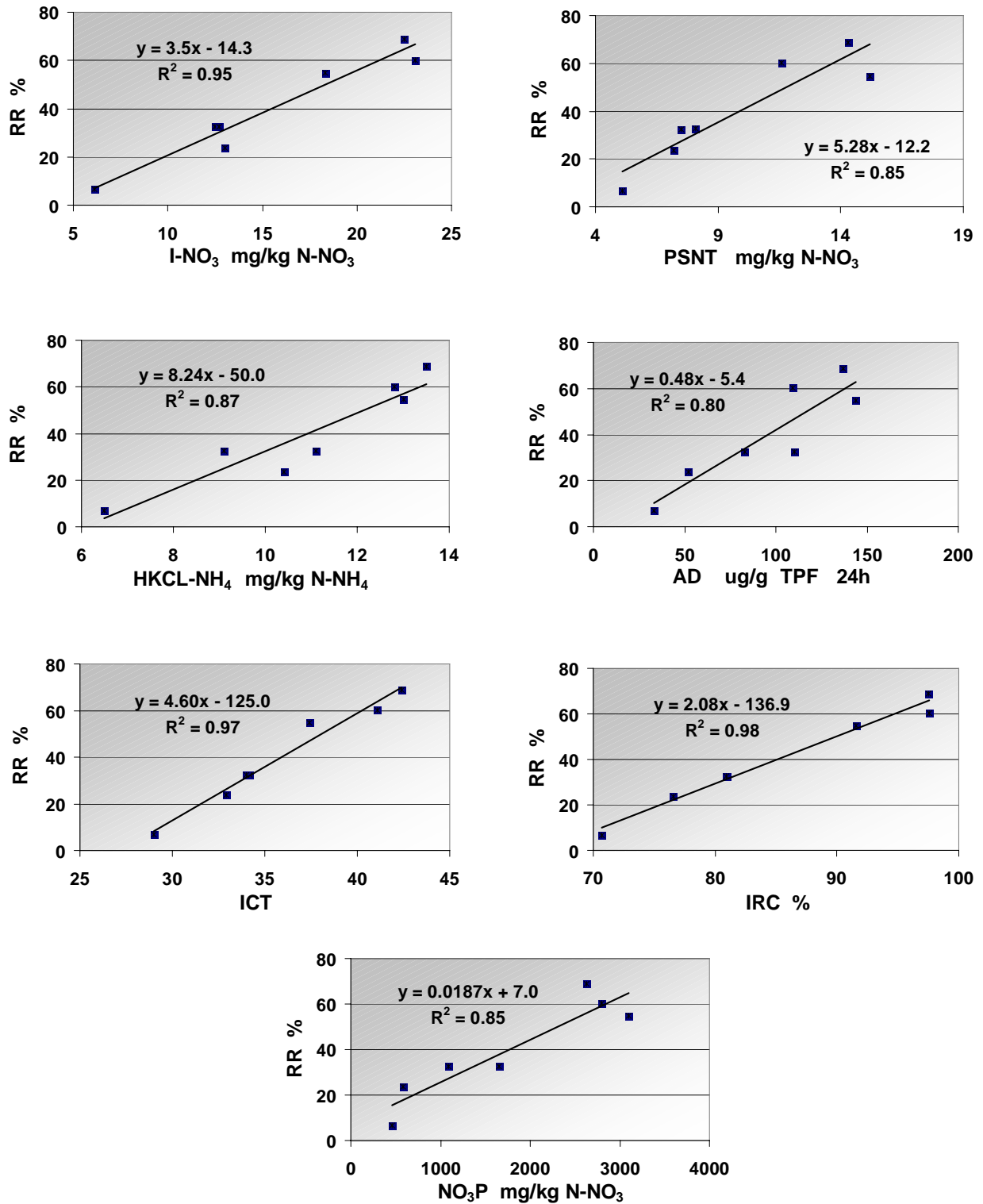


Figure 3.4. Relations entre les rendements relatifs (RR) et les résultats d'analyse de différents indicateurs de fertilité azotée des sols cultivés en maïs-grain

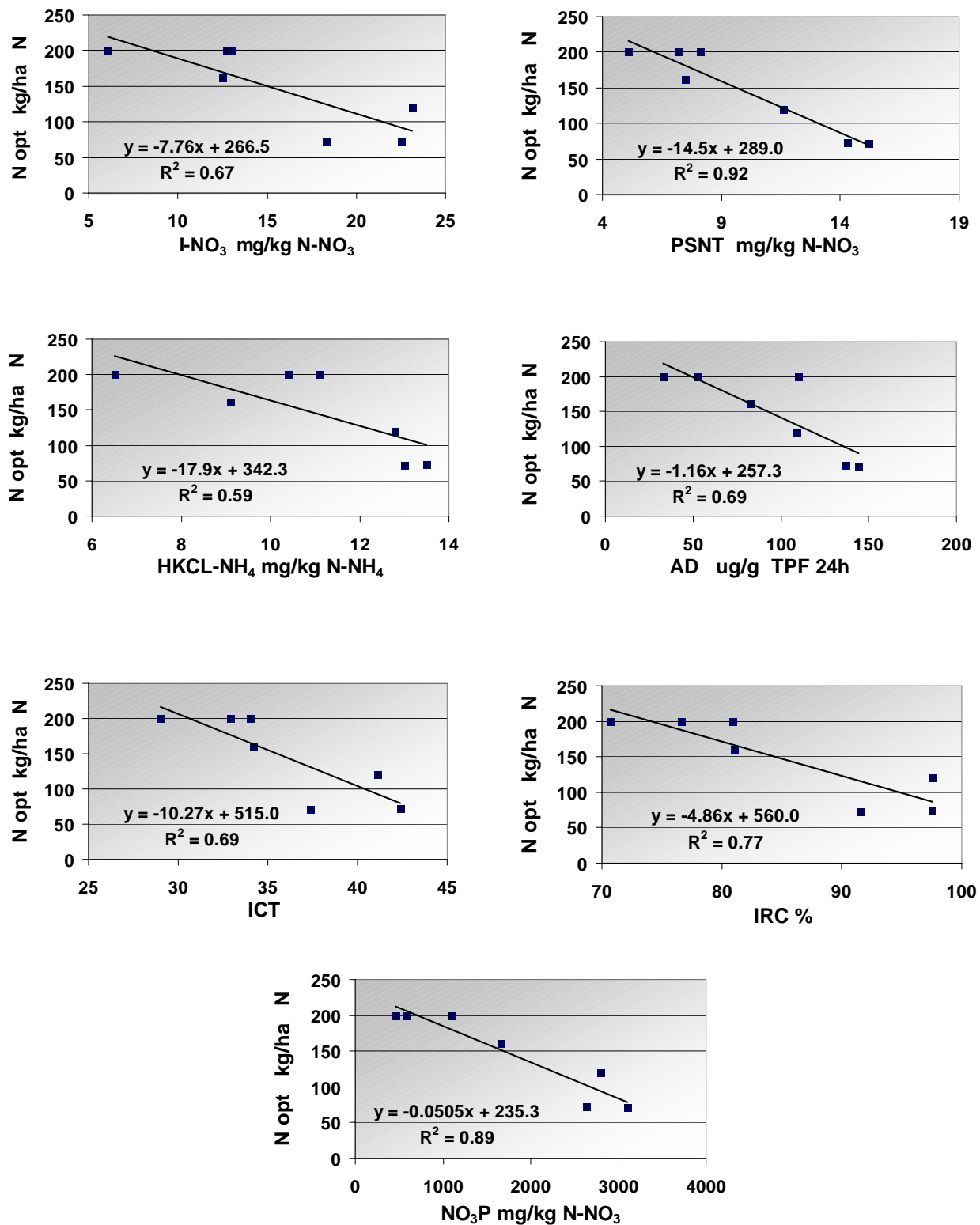


Figure 3.5. Relations entre les doses optimales (N opt) et les résultats d'analyse de différents indicateurs de fertilité azotée des sols cultivés en maïs-grain

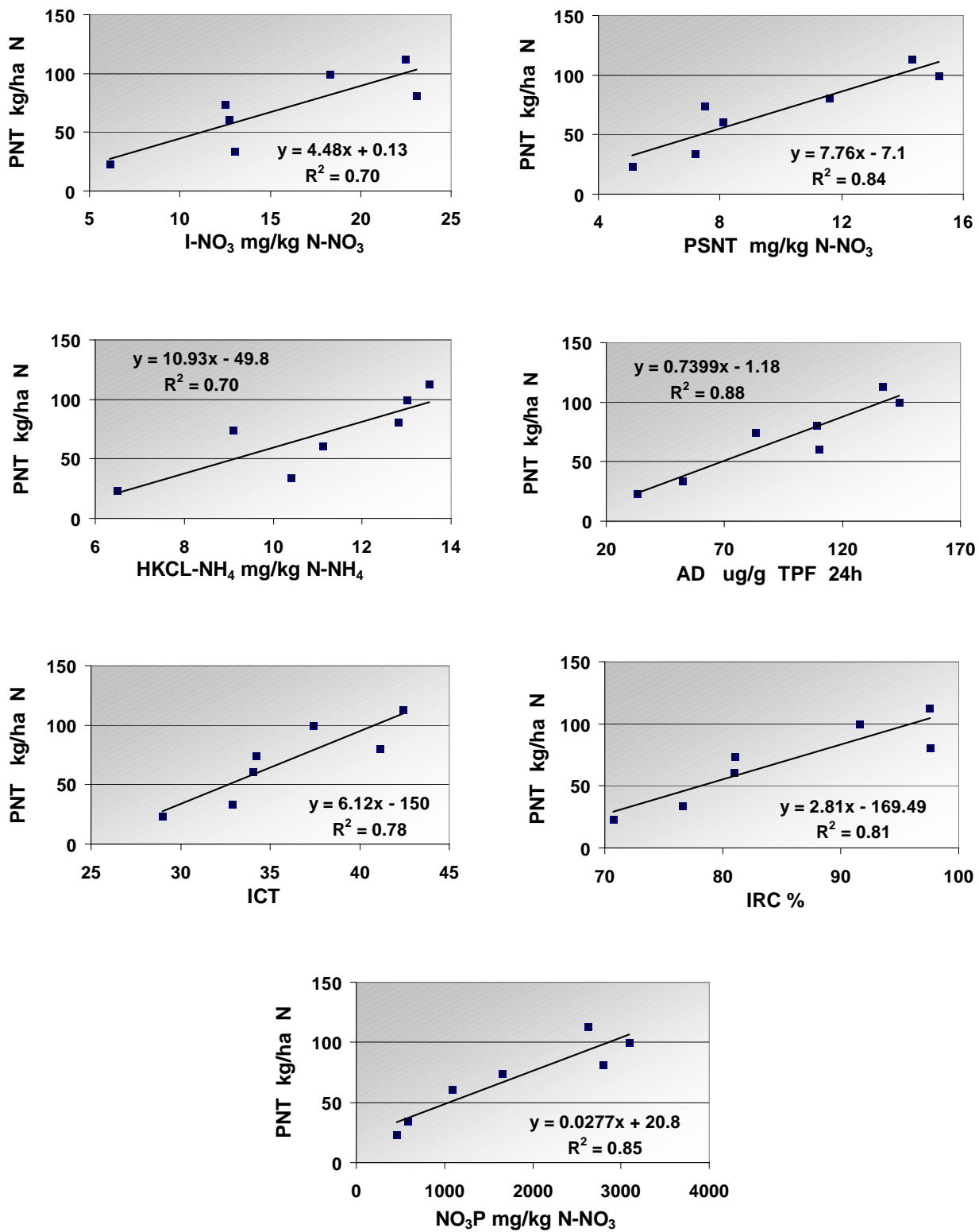


Figure 3.6. Relations entre la fourniture d'azote du sol et les résultats d'analyse de différents indicateurs de fertilité azotée des sols cultivés en maïs-grain

Un diagnostic de la fertilité azotée des sols peut être établi de façon adéquate par des tests effectués dans le sol ou dans les plants de maïs. Sept méthodes ont montré un coefficient de détermination significatif ($P = 0,05$) ou très significatif ($P = 0,01$) à la fois avec le rendement relatif (RR), la dose optimale d'azote (N OPT) et la fourniture de l'azote du sol (PNT) (figures 3.4, 3.5 et 3.6). Ces méthodes sont I-NO₃, PSNT, HKCl-NH₄, AD, ICT, IRC et NO₃P. On retrouve donc des méthodes fiables dans chacun des quatre groupes de méthodes : biologique, chimique, biochimique et physiologique.

Tableau 3.9. Coefficient de détermination (R^2) entre les rendements relatifs (RR), les doses N optimales (N OPT), les prélèvements en N des parcelles témoins (PNT) et les résultats des indicateurs de fertilité azotée (X)

		RR	N opt.	PNT		
		R^2	R^2	R^2		
(X)		Bonne corrélation			X min.	X max.
I-NO ₃	mg/kg	0,95**	0,67*	0,70*	6,1	23,1
PSNT	mg/kg	0,85**	0,92**	0,84**	5,1	15,2
HKCl-NH ₄	mg/kg	0,87**	0,59*	0,70*	6,5	13,5
AD	ug/g 24 h ⁻¹	0,80**	0,69*	0,88**	33	144
ICT	---	0,97**	0,69*	0,78**	29,0	42,4
IRC	%	0,97**	0,77**	0,81**	70,7	97,6
NO ₃ P	mg/kg	0,85**	0,89**	0,85**	460	3 096
Corrélation moyenne						
I-NH ₄	mg/kg	0,72*	0,50	0,76**	24,9	59,8
PPNT	mg/kg	0,88**	0,54	0,61*	2,0	9,1
UV220	---	0,63*	0,37	0,38	0,43	0,88
NTKP	%	0,90**	0,54	0,64*	2,96	3,94
NTK-NaHCO ₃	mg/kg	0,62*	0,40	0,41	46	161
NTKS	%	0,59*	0,25	0,32	0,088	0,202
NS	mg/kg	0,70*	0,33	0,52	28,5	76,9
Faible corrélation						
CS	mg/kg	0,52	0,28	0,34	427	923
KCl-NH ₄	mg/kg	0,54	0,36	0,34	1,9	5,4
MOS	%	0,51	0,21	0,28	1,92	4,57
ICD	---	0,13	0,01	0,07	40,9	43,5

* : significatif à $P = 0,05$

** : significatif à $P = 0,01$

4. DISCUSSION

4.1 Diagnostic de l'azote dans le sol

Cette étude démontre que le diagnostic de la fertilité azotée des sols est un élément incontournable pour une fertilisation à l'azote précise pour le maïs-grain. Les HEE et les HRC affectent de façon considérable la fourniture de l'azote des sols au maïs et les besoins en engrais N de sorte que sans une évaluation de la fertilité des sols, il devient hasardeux de formuler une recommandation d'azote. Les méthodes performantes doivent avoir la capacité d'intégrer les arrière-effets des applications d'engrais et des rotations de culture. Notre étude a démontré que plusieurs méthodes sont capables de révéler ces effets. Le diagnostic de l'azote peut se faire aussi bien par l'analyse des sols que des plants de maïs au stade V6. L'incubation des sols constitue un test fiable mais difficilement applicable en routine dans les laboratoires. Il laisse peu de temps pour les opérations aux champs. Ce test peut cependant servir de méthode de référence pour évaluer la performance et calibrer des méthodes rapides. Le test des nitrates du sol en postlevée du maïs (PSNT) s'est révélé un bon indicateur de fertilité. Cependant, d'après Cantin (2007), il serait sensible à l'effet des variations de température du sol selon les textures. Le test des nitrates en présemis s'est montré moins performant que celui en postlevée.

4.2 Diagnostic de l'azote dans les plants de maïs

L'indice de chlorophylle des parcelles témoins sans N (ICT) et l'indice relatif de chlorophylle (IRC) ont bien révélé la réponse à l'azote (rendement relatif) et la dose N optimale. L'indice de chlorophylle des feuilles dans les parcelles avec une fumure de démarrage (ICD) n'a pas été un indicateur valable de fertilité azotée. La teneur en nitrates des plants de maïs des parcelles témoins sans N au stade V6 s'est montrée également un bon indicateur de la fertilité azotée. L'analyse des plants de maïs permet donc un diagnostic efficace de l'azote mais nécessite la mise en place d'une parcelle témoin sans N. Cette parcelle témoin nous apparaît très pertinente pour l'évaluation de la fertilité N des sols.

4.3 Échantillonnage des sols en postlevée du maïs

Un diagnostic de la fertilité azotée des sols peut être établi de façon convenable par un test des nitrates du sol effectué en postlevée du maïs. Comme de l'azote minéral est apporté avec la fumure de démarrage près des rangs au semis, nous avons voulu savoir si la teneur en nitrates des sols prélevés dans l'entrerang est affectée par la fertilisation de démarrage. Les résultats des teneurs en nitrates des parcelles témoins au stade V6 dans le milieu des rangs à 38 cm des plants ont été comparés avec ceux des parcelles ayant reçu une fumure de démarrage de 50 kg N/ha dans les sept champs étudiés (tableau 4.1).

Tableau 4.1. Comparaison des teneurs en nitrates des sols prélevés en post-levée du maïs (PSNT) dans l'entrerang des parcelles témoins sans N et des parcelles fertilisées avec une fumure de démarrage de 50 kg N/ha

Parcelles	N-NO ₃ (témoin)		N-NO ₃ (50 kg N/ha)	
	mg/kg	É.T.	mg/kg	É.T.
HEE1	15,2	4,33	16,3	3,80
HEE2	7,5	0,42	8,8	1,98
HEE3	5,1	2,08	5,1	3,37
R-I	7,2	1,20	7,4	2,46
R-II	11,6	2,71	14,0	1,80
R-III	8,1	0,48	10,1	2,31
R-IV	14,3	2,35	15,2	1,72
MOY.	9,9	1,94	11,0	2,52

Les teneurs en nitrates des sols en postlevée dans les parcelles témoins sans N ont été en moyenne de 9,9 mg N-NO₃/kg, comparativement à 11,0 mg N-NO₃/kg pour les parcelles avec 50 kg N/ha au semis. Cet écart peut s'expliquer par la variation des teneurs en nitrates des sols puisque l'écart-type moyen entre les répétitions est de 1,94 mg N-NO₃/kg dans les parcelles témoins et de 2,52 mg N-NO₃/kg dans les parcelles avec démarreur. Il semble donc possible d'effectuer un diagnostic des nitrates du sol en postlevée dans les parcelles ayant reçu une fumure de démarrage localisée au semis en prélevant les sols dans l'entrerang. Il faut éviter d'échantillonner les sols près des bandes d'engrais.

5. CONCLUSIONS

Les historiques des épandages d'engrais minéraux et organiques (HEE) exercent beaucoup d'effets sur la fertilité des sols. Le HEE avec fumier de bovins laitiers est celui qui montre les meilleurs arrière-effets azotés sur la fertilité des sols et le besoin en engrais N, suivi du lisier de porcs et de la fumure minérale. La dose N optimale du maïs-grain a été de 72, 161 et plus de 200 kg N/ha respectivement pour les HEE de fumier de bovins, de lisier de porcs et de fumure minérale. La meilleure fertilité azotée est obtenue dans le HEE avec fumier de bovins, suivi du lisier de porcs et beaucoup moins dans le HEE avec une fumure minérale.

Les historiques des rotations de culture (HRC) produisent également des effets importants sur la fertilité des sols. Les HRC comportant des prairies sont ceux qui ont montré les meilleurs arrière-effets sur la fertilité des sols et les besoins en engrais N les plus faibles. Dans les deux HRC comportant des prairies, les doses N optimales ont été de 73 et 120 kg N/ha alors qu'elles ont été de plus de 200 kg N/ha dans les HRC en monoculture de maïs et en rotation maïs-céréales.

Pour l'ensemble des champs, sept méthodes ressortent particulièrement pour le diagnostic de la fertilité et la détermination de la dose N optimale. Il s'agit de l'analyse des nitrates après incubation des sols (I-NO₃), de l'analyse des nitrates du sol en postlevée (PSNT), de l'extraction de l'azote ammoniacal après un traitement à l'eau chaude (HKCl-NH₄), de l'activité de la déshydrogénase, de l'indice de chlorophylle des parcelles témoins, de l'indice relatif de chlorophylle (IRC) et de la teneur en nitrates des plants au stade V6. L'analyse des plants de maïs permet un diagnostic efficace de l'azote mais nécessite la mise en place d'une parcelle témoin sans N. Dans le cas de l'analyse des nitrates des sols en postlevée (PSNT), la teneur en nitrates des parcelles témoins était semblable à celle obtenue dans l'entrecroisement des parcelles fertilisées avec une fumure de démarrage de 50 kg N/ha.

Cette étude a démontré que l'analyse de la fertilité azotée des sols était un élément incontournable d'une fertilisation précise du maïs-grain. Le diagnostic de fertilité azotée peut être établi à partir des analyses de sols ou des plants de maïs. La mise en place d'une parcelle témoin a permis de déterminer la fourniture d'azote du sol au maïs et de confirmer le diagnostic de la fertilité azotée des sols concernant l'effet des HEE et des HRC.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allisson, L.E., W.B. Bollen, C.D. Moodie. 1965. Total carbon. Dans *Methods of soil analysis*. Am. Soc. of Agronomy. Madison Wisc. USA. Pages 1346-1366.
- Angers, D.A. et M. Giroux. 1996. Recently deposited organic matter in soil water stable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1547-1551.
- Beauchamp, E.G., B.D. Kay et R. Pararajasingham. 2004. Soil tests for predicting the N requirement of corn. *Can. J. Soil Sci.* 84:103-113.
- Bélanger, B., M. Giroux, R. Morin et D. Pagé. 2007. Effets de huit précédents culturaux sur le rendement et la fertilisation azotée de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), cv. Sahepody. Rapport de recherche IRDA. 50 p.
- Blackmer, A.M. et A.P. Mallarino. 1993. Soil testing to optimize nitrogen management for corn. Iowa State University Extension.
- Binford, G.D. et A.M. Blackmer. 1992. Nitrogen concentration of young corn plants as an indicator of nitrogen availability. *Agron. J.* 84:219-223.
- Bolinder, M. 2003. Contribution aux connaissances de la dynamique du C dans les systèmes sol-plante de l'Est du Canada. Thèse Ph.D. Univ. Laval, Québec. 124 p.
- Bremner, J.M., 1965. Total Nitrogen. Dans *Methods of soil analysis*. Am. Soc. of Agronomy. Madison Wisc. USA. Pages 1149-1178.
- Bundy, L.G., S.J. Sturgul et R.W. Schmidt. 1995. Wisconsin's preplant soil nitrate test. U. Wisc. Extension. # A3512.
- Cantin, J. 1995. Résultats des parcelles d'azote dans le maïs-grain. MAPAQ et Soc. agr. du comté de Verchères. Programme Plan vert du Canada. 44 p.
- Cantin, J. 2007. Les tests de nitrate de sol afin d'ajuster la fertilisation azotée du maïs. Colloque sur l'azote. CRAAQ-OAQ.
- Chantigny, M.H., D.A. Angers, T. Morvan et C. Pomar. 2004. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with ¹⁵N. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:637-643.
- Chantigny, M.H. 2007. Mythes et réalité sur l'azote du sol et des fumiers. Colloque sur l'azote CRAAQ-OAQ.
- Côté, D., T.S. Tran et A. N'Dayegamiye. 1996. Évaluation des coefficients d'efficacité directe et des arrière-effets, suite à l'apport à long terme de lisier de porc en postlevée sur le maïs. *Agrosol* 9(1) :14-20.
- Curtin, D., C.E. Wright, M.H. Beare et F.M. McCallum. 2006. Hot water-extractable nitrogen as an indicator of soil nitrogen availability. *Soil Sc. Soc. Am. J.* :1512-152.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^e édition. 294 p.
- Dalal, R.C. et R.J. Mayer. 1987. Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. *Aust.J. Soil Res.* 25:83-93.
- Fox, R.H. et W.P. Piekielek. 1983. Response of corn to nitrogen fertilizer and the prediction of soil nitrogen availability with chemical tests in Pennsylvania. *Bull.* 843. Penn. State Univ. Park Univ. Penn. USA. 32 p.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1987. Comparaison de diverses méthodes d'analyse de l'azote du sol en relation avec la disponibilité pour les plantes. *Can. J. Soil Sci.* 67:521-531.
- Giroux, M., M. Quénun et R. Royer. 2005. Influence des systèmes culturaux et des modes de fertilisation sur le bilan de la matière organique, du phosphore et du potassium, l'évolution des teneurs en éléments nutritifs des sols et les rendements des cultures. Cahier no. 4 de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. IRDA, Québec.
- Giroux, M. et M. Lemieux. 2006. Comparaison de diverses méthodes d'évaluation de la fertilité azotée des sols et détermination de la dose N optimale du maïs-ensilage. *Agrosolutions* 17(1) :39-50.
- Giroux, M., A. N'Dayegamiye et R. Royer. 2007. Effet des apports d'automne et de printemps de fumiers et de boues mixtes de papeteries sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et l'efficacité de l'azote. *Agrosolutions* 18(1) : 25-34.

- Guertin, S.P., G.M. Barnett, M. Giroux, A.F. MacKenzie, A. Pesant et L.E. Parent. 1997. Évaluation des besoins NPK dans la culture du maïs selon les caractéristiques du sol et des systèmes culturaux. Entente Canada-Québec pour un environnement durable.
- Keeney, D. 1982. Nitrogen – Availability indices. Dans *Methods of soil analysis, Part 2*. Am. Soc. of Agronomy. Madison Wisc. USA. Pages 711-733.
- Ma, B.L., Subedi, K.D. et T.Q. Zhang. 2007. Pre-sidedress nitrate test and other crop-based indicators for fresh market and processing sweet corn. *Agron. J.* 99:174-183.
- Magdoff, F., W.E. Jokela, R. Fox et G. Griffin. 1990. A soil test for nitrogen availability in the northeastern United States. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 21 :1103-1115.
- N'Dayegamiye, A. et D.A. Angers. 1990. Effets de l'apport prolongé de fumiers de bovins sur quelques propriétés. *Can. J. Soil Sci.* 70 :259-262.
- N'Dayegamiye, A. 1990. Effets à long terme d'apports de fumier solide de bovins sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol et la production du maïs-ensilage. *Can. J. Soil Sci.* 70 :767-775.
- 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 N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. *Can J. Soil Sci.* 77 :351-358.
- N'Dayegamiye, A., M. Giroux et M.O. Gasser. 2007. La contribution en azote du sol relié à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. Colloque sur l'azote CRAAQ-OAQ.
- Piekielek, W.P. et R.H. Fox. 1992. Use a chlorophyll meter to predict PSNT N requirements for maize. *Agron. J.* 84:59-65.
- Quénum, M., M. Giroux et R. Royer. 2004. Étude sur le bilan humique des sols dans les systèmes culturaux sous prairies et sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation. *Agrisol* 15(2) :57-72.
- Rivest, R. 2006. Parcelles de confirmation des besoins d'azote du maïs réalisées avec les équipements de fermes sous divers précédents. Programme d'atténuation des gaz à effet de serre. Rapport d'analyse des résultats du réseau d'essais sur l'azote. 39 p.
- Seydoux, S., D. Côté, M. Grenier et Comité technique-porc. 2006. Caractérisation des volumes et des concentrations en éléments fertilisants des déjections animales liquides en Chaudière-Appalaches. Rapport scientifique. Fédération de l'UPA de la Beauce-IRDA. 75 p. plus annexes.
- Sharifi, M., B.J. Zebarth, D.L. Burton, C.A. Grant et J.M. Cooper. 2007. Evaluation of some indices of potentially mineralisable nitrogen in soil. *Soil Sci. Soc Am. J.* 71(4):1233-1239.
- Tabatabai, M.A. 1982. Soil enzymes. Dans *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. No 9. SSSA Madison, Wisc. USA. Pages 903-948.
- Tran, T.S. 1994. Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué (¹⁵N) appliqué à la culture de maïs (*Zea mays* L.). Thèse Ph.D. Univ. Laval, Québec. 132 p.
- Tremblay, G. 2006. Les besoins en azote du maïs-grain. Journée d'échange sur l'azote. CRAAQ.
- Tremblay, N. et C. Belec. 2006. L'indice de saturation en chlorophylle : un moyen d'ajuster les applications d'azote au maïs selon les caractéristiques de la saison. *Bulletin AQSSS* 16(1) : 45.
- Waring, S.A. et Bremner. J.M. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature, London.* 201:951-952.
- Ziegler, D. 1987. Azote et déjections animales. Perspectives agricoles, juin 159-164.

7. REMERCIEMENTS

Je remercie le docteur Marton Tabi, grâce à qui les parcelles expérimentales de longue durée sur les historiques d'épandage des engrais et les rotations de culture ont été mises en place. Ces sites ont constitué des champs précieux pour cette étude.

Je remercie aussi M. Raynald Royer, technicien agricole à l'IRDA pour la mise en place des parcelles et la prise des données aux sites de l'Observatoire de la qualité des sols et M. Michel Lemieux pour sa contribution à l'étude sur les rotations des cultures. Mes remerciements vont également au personnel du laboratoire de l'IRDA pour la qualité de leurs analyses et la Direction de l'IRDA qui a supporté financièrement les parcelles de longue durée sur les rotations de culture et les sites de l'Observatoire de la qualité des sols. Je remercie également M. Marc-Olivier Gasser pour son aide dans la comparaison des modèles de fonctions de production de l'azote.

Ce projet de recherche a pu être réalisé grâce à une subvention de recherche du CEDAQ et de l'IRDA. Nous sommes reconnaissant pour l'aide financière apportée à ce projet.

Partenaires financiers :

