

Comparaison de différentes méthodes d'évaluation de la fertilité azotée des sols et détermination de la dose N optimale du maïs ensilage

*M. GIROUX¹ ET M. LEMIEUX¹

RÉSUMÉ - M. Giroux et M. Lemieux, Comparaison de différentes méthodes d'évaluation de la fertilité azotée des sols et détermination de la dose N optimale du maïs ensilage. *Agrosol.* 17 (1) : 39-50.

Une expérience de longue durée sur la fertilisation azotée du maïs ensilage a été réalisée dans des parcelles soumises à quatre systèmes de rotation depuis 1978. Ces rotations comportent des prairies, des céréales à paille et du maïs ensilage. Le but de cette étude est de mesurer l'effet des systèmes de rotation sur la fertilité azotée des sols, leur productivité et les besoins en engrais N du maïs ensilage. En 2002, les grandes parcelles de rotation ont été subdivisées en cinq doses croissantes d'azote : 0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha et ont été ensemencées en maïs ensilage. Les rendements du maïs ensilage ont été très affectés par les systèmes de rotation, les doses d'azote et par l'interaction rotation x dose. Les nitrates mesurés après l'incubation des sols à 35 °C pendant deux semaines, la spectroscopie UV des extraits de sol au NaHCO₃ à 220 nm et les nitrates dans les sols (0-20 cm) échantillonnés deux semaines après le semis sont bien reliés aux rendements relatifs et aux prélèvements relatifs de N. Une grille permettant d'établir la dose N optimale en relation avec les indicateurs de fertilité des sols et les rendements relatifs du maïs ensilage a été établie. La détermination de la dose optimale N, basée sur le prélèvement relatif de N et la fourniture N des sols, a également été réalisée à partir des indicateurs de fertilité des sols. L'analyse foliaire constitue un indicateur utile pour déterminer si les apports d'engrais N ont comblé les besoins du maïs. La teneur en N des feuilles de l'épi à l'apparition des soies, associée au rendement optimal, se situait entre 2,75 et 3,0 % N. L'indice de chlorophylle associé au rendement optimal, était de 55 à 57. Le prélèvement d'azote par tonne de maïs ensilage a été d'environ 12,0 kg N/t au point optimal de fertilisation. Le coefficient moyen d'utilisation de l'azote (CUN) des engrais par le maïs ensilage, toutes rotations confondues, a été de 53,0 % pour la dose 50 kg N/ha, 45,9 % pour la dose 100 kg N/ha, 41,0 % pour la dose 150 kg N/ha et 32,6 % pour la dose 200 kg N/ha. Lorsque le niveau optimal de fertilisation est dépassé, le maïs n'utilise plus efficacement l'azote et le

CUN diminue, particulièrement dans les sols de fertilité azotée élevée. Les teneurs en nitrates résiduels après la récolte sont très affectées par les systèmes culturaux et par les doses d'azote. Elles dépassent 100 kg N-NO₃/ha dans la couche 0-60 cm pour les parcelles sur-fertilisées au-delà de la dose optimale N et 15 mg N-NO₃/kg dans la couche 0-20 cm.

Mots clés : *Maïs ensilage, systèmes de rotation, fertilisation azotée, fertilité des sols, test des nitrates, absorbance UV, bilan d'azote.*

ABSTRACT - M. Giroux and M. Lemieux, Comparison of different methods to estimate soil N fertility and predict optimal N requirement of silage corn. *Agrosol.* 17 (1) : 39-50. An experiment on N fertilization of silage corn was carried out on long term fertility plots with different crop rotations. These rotations include meadows, cereals and silage corn. The objective of this study was to measure the effects of crop rotations on soil N fertility, productivity and N fertilizer requirement of silage corn. In 2002, main plots were split with five N rates: 0, 50, 100, 150 and 200 kg N/ha and were seeded with silage corn. Yields were strongly affected by crop rotations, nitrogen rates and crop rotation x N rate interaction. Soil nitrate after incubation at 35 °C during two weeks, UV absorbance at 220 nm and nitrate in soils (0-20 cm) sampled two weeks after seedling were well correlated with relative yield and relative N uptake. A table relating optimal N fertilization with soil N fertility indicators and relative yield of silage corn is presented. Optimal N requirements based on relative N uptake and N soil supply were also determined from soil fertility indicators. Foliar analysis is a useful tool to evaluate if N fertilizer was applied correctly. Sufficient level in ear leaf at silking for optimal yield was between 2,75 and 3,0 % N. Chlorophyll index for optimal yield was between 55 and 57. Nitrogen uptake/ton of silage corn was about 12,0 kg N/t associated with optimal N fertilization. Coefficient of nitrogen utilization (CUN) for silage corn, all crop rotations confounded, was 53 % for 50 kg N/ha rate, 45,9 % for

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

*Auteur pour la correspondance : téléphone : ++1-418-644-6838, télécopieur : ++1-418-644-6855, courriel : marcel.giroux@irda.qc.ca

100 kg N/ha, 41,0 % for 150 kg N/ha and 32,6 % for 200 kg N/ha. When the N fertilization is over the optimal level, corn do not use N efficiently and CUN decrease, specially when soil N fertility is high. Residual post-harvest nitrates are strongly affected by crop rotations and by N rates. Nitrate content of soil is more than 100 kg $\text{NO}_3\text{-N/ha}$ in the 0-60 cm layer in plots over-fertilized with N and more than 15 mg $\text{NO}_3\text{-N/kg}$ in the 0-20 cm layer.

Key words : *Silage corn, crop rotations, nitrogen fertilization, soil fertility, nitrate soil test, UV absorbance, nitrogen balance*

Introduction

La grande variabilité de la fertilité azotée des sols, liée à leurs caractéristiques édaphiques et à l'historique des pratiques agricoles, affecte leur capacité à fournir de l'azote aux cultures et modifie les besoins en engrais N. La dose moyenne optimale du maïs-grain, selon différentes études réalisées au Québec, se situe à 170 kg N/ha avec un écart-type de 40 kg N/ha (Giroux 1999). Dans une étude portant sur 123 sites expérimentaux de maïs-grain, Tremblay (2006) a démontré que 34 % des champs avaient besoin de moins de 70 kg N/ha pour produire la dose optimale, 48 % avaient besoin de 70 à 170 kg N/ha et 18 % des champs nécessitaient plus de 170 kg N/ha. Cette grande variabilité des besoins en engrais N a des conséquences aux plans économique et environnemental, particulièrement pour les coûts de production et les pertes en nitrates, si les apports d'engrais ne sont pas ajustés selon la fertilité des champs. Le précédent cultural et le niveau de matière organique des sols sont actuellement pris en compte dans les recommandations d'azote aux cultures (CRAAQ 2003). Le développement d'indicateurs de la fertilité azotée des sols permettrait de mieux intégrer aux recommandations l'état de la fertilité de chaque champ. Cette fertilité azotée dépend beaucoup de la fraction labile de la matière organique mais également de la fraction minérale résiduelle. Elle dépend également des systèmes de rotation des champs et de l'historique des apports des engrais organiques.

Les systèmes de rotation exercent plusieurs effets sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Ils affectent à long terme le bilan humique des sols, selon les apports de matière qu'ils laissent au sol (Quénum et al. 2004, Bolinder 1994). Les rotations 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. 1991). Ils 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 aussi affecter la productivité. Guertin et al. (1997) ont mesuré l'influence de différents précédents culturaux 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. Il n'y a cependant pas de relation directe entre le rendement du maïs et le besoin en engrais N (Tremblay 2006). Le sol comble généralement la plus grande partie des prélèvements N lorsque les conditions sont propices à la minéralisation.

L'apport régulier d'engrais organique produit aussi des effets sur les teneurs en carbone et en azote dans les fractions labile et stable des sols (Ndayegamiye et al. 1997). Chatigny et al. (2001) ont démontré que l'application répétée de lisier de porcs a causé une accumulation importante de N et P dans les premiers cm de sol sous prairie. Actuellement, les arrière-effets des engrais organiques sont comptabilisés au moyen d'une grille qui tient compte du type d'engrais et de la durée antérieure des apports pour déterminer la contribution en N résiduel (CRAAQ 2003). Ceci permet d'intégrer un aspect important de la fertilité azotée des sols mais peut aussi comporter une marge d'erreur importante. Peu de travaux ont été réalisés au Québec pour préciser ces coefficients. Côté et al. (1996) ont déterminé les arrière-effets des doses de lisier appliquées annuellement après 15 ans. Pour une dose de 60 m^3/ha , ils ont obtenu un coefficient d'arrière-effets de 0,35. Ceci signifie que 35 % de la dose moyenne annuelle d'azote peut être budgétée comme contribution des apports antérieurs des 15 dernières années.

La variation de la fertilité azotée entre les champs a incité à développer des indicateurs permettant de connaître la disponibilité de l'azote du sol pour les plantes. Ces méthodes peuvent se regrouper en 4 grandes catégories : chimique, biologique, physico-chimique et physiologique. Des méthodes d'extraction chimique capables de mettre en évidence le potentiel de fertilité azotée des sols ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le principe que les formes d'azote facilement oxydable ou hydrolysable chimiquement seraient liées à la matière organique labile rapidement minéralisable, fournissant ainsi un indice de minéralisation des sols et de disponibilité de N pour les plantes. Mentionnons parmi ces méthodes, celle développée par MacLean (1964) utilisant du NaHCO_3 0,1M, celle de Gianello et Bremner (1986) avec du KCl 2N bouillant et celle de Stanford et Smith avec du permanganate de potassium 0,01 M en milieu acide. Fox et Piekielek (1978 a et b) ont démontré qu'il existait une relation entre l'azote organique des extraits de sol avec NaHCO_3 0,01 M, l'absorbance de cet extrait dans la zone ultraviolette (260 nm) et la capacité du sol à fournir de l'azote au maïs-grain.

Une comparaison de ces différentes méthodes chimiques d'évaluation de la disponibilité de l'azote pour les plantes a été réalisée par Giroux et al. (1987). Cette étude a démontré la supériorité de la méthode d'extraction au NaHCO_3 0,01 N sur les autres méthodes chimiques pour sa capacité à prédire la réponse aux engrais azotés et les prélèvements de l'azote du sol par les plantes. L'azote organique extrait avec cette méthode corrèle très bien avec l'azote minéralisé mesuré par incubation. L'étude a également démontré le grand intérêt d'utiliser la spectroscopie UV des extraits de sol au NaHCO_3 0,01M pour déterminer leur capacité à fournir l'azote aux cultures tel que proposé par Fox et Piekielek (1978 a et b). Des chercheurs de l'Illinois ont mis au point une méthode basée sur la détermination des sucres aminés dans les sols pour prédire la réponse à l'azote du maïs-grain (Khan et al. 2001, Mulvaney et Khan 2001). Ces molécules seraient reliées à l'activité biologique des sols et à la disponibilité de l'azote. Une évaluation de cette méthode a été faite en Iowa dans 43 sites expérimentaux fertilisés à des doses croissantes d'azote (Sawyer et al. 2003).

Cette étude n'a pu établir de lien entre la teneur en sucres aminés des sols et la réponse du maïs-grain à l'azote.

Le test des nitrates en pré-semis ou en post-levée des cultures est l'outil le plus largement utilisé en Amérique du Nord pour ajuster les apports d'azote. Une évaluation de ce test comme base de recommandation des engrais N du maïs-grain a été faite en Montérégie par Cantin (1995). Les résultats ont démontré qu'en début de saison, la libération des nitrates est très affectée par la texture du sol. Le test des nitrates montrait une bonne capacité pour préciser le besoin en engrais azoté dans les sols légers mais dans les sols lourds, il ne reflète pas toujours le plein potentiel de minéralisation de l'azote au printemps. Les résultats ont également démontré que la plupart des champs qui contiennent des teneurs élevées en nitrates, de 20 mg N-NO₃/kg et plus, ont souvent des antécédents d'apport de fumier. Certains états américains et l'Ontario se servent de ce test dans le maïs-grain (Magdoff et al. 1990, Blackmer et Mallarino 1993, Schmitt et al. 1998). Une grille de fertilisation pour l'orge et le blé, basée sur le test des nitrates, a été réalisée au Québec par Giroux et al. (1993). Selon ces auteurs, le test des nitrates a expliqué 46 % de la réponse des céréales aux apports d'engrais mais il peut facilement être perturbé par les conditions climatiques au moment de l'échantillonnage et les conditions de séchage des échantillons. De plus, les résultats indiquent que de petites variations de la teneur en nitrates des sols sont associées à de fortes variations dans la recommandation d'azote. Painchaud (1997) a élaboré une grille de fertilisation pour la pomme de terre basée sur la teneur en nitrates dans la couche 0-60 cm au moment du rehaussement pour ajuster le fractionnement d'azote. Cette grille explique 44 % des variations de la réponse de la pomme de terre aux apports d'engrais N selon la teneur en nitrates des sols. Le test des nitrates ne peut être considéré comme un indicateur performant de la fertilité azotée des sols mais il peut aider à ajuster la dose N dans les sols riches qui répondent peu ou pas aux apports d'engrais N.

D'autres indicateurs, basés sur une approche physico-chimique, ont été mis au point. Les membranes échangeuses d'ions placées dans un sol sont capables d'adsorber

les nitrates libérés par les sols pendant une période prolongée. Cette technique a fourni des résultats très intéressants pour les fourrages, le maïs-grain et le blé panifiable (Ziadi et al. 2000 et 2006, Cambouris et al. 2006). Ces travaux ont démontré l'importance d'intégrer la texture des sols à la réponse des cultures à l'azote. D'autres méthodes misent sur l'état physiologique et le statut nutritif des plantes, déterminés par le diagnostic foliaire ou la teneur en chlorophylle des feuilles pour ajuster la fertilisation azotée des cultures. Tremblay et Bélec (2006) ont évalué l'indice de chlorophylle pour ajuster les applications d'azote du maïs-grain. Cet indice a permis de bien anticiper la courbe de réponse des cultures à l'azote. Denuit et al. (2002) ont combiné l'approche du bilan prévisionnel d'azote avec des lectures de l'indice de chlorophylle afin d'améliorer la précision du fractionnement des apports N du blé d'hiver et de la pomme de terre.

Plusieurs méthodes biologiques ont également été mises au point. Eagle et Matthews (1958) ont démontré que l'incubation des sols sous des conditions de température et d'humidité contrôlées avec un suivi de la libération des nitrates constitue un indicateur très valable de la capacité des sols à fournir l'azote aux plantes. N'Dayegamiye (2006) a mesuré la relation existant entre la minéralisation de C et N et le contenu en matière organique labile des sols. Les méthodes basées sur l'activité enzymatique et biologique, la biomasse microbienne et la respirométrie des sols peuvent également être utiles pour déterminer le taux de minéralisation des sols.

Certaines techniques, telles l'utilisation d'un engrais marqué avec l'isotope N¹⁵ ou l'implantation d'une parcelle témoin sans N, ont permis de préciser la provenance de l'azote dans le maïs-grain (Tran et Giroux 1998). Il est possible de réaliser un bilan

prévisionnel de l'azote pour une culture et de déterminer la fraction qui sera fournie par le sol et celle qui devra être comblée par les engrais. La fourniture en N du sol demeure la partie la plus difficile à évaluer dans ce bilan. Malgré tout le potentiel de l'approche du bilan prévisionnel d'azote, son usage encore très limité au Québec vient du fait qu'on ne dispose pas d'une méthode fiable pour déterminer la fourniture en N des sols. L'approche du bilan N combinée à des indicateurs de fertilité azotée des sols permettrait un développement intéressant à cet effet.

Le but de cette étude est de mesurer l'effet de différents systèmes de rotation sur la fertilité azotée des sols, leur productivité et leur besoin en engrais azoté. Elle vise également à tester la capacité de certaines méthodes, dont l'incubation des sols, les tests de nitrates et la spectroscopie UV des extraits de sol au NaHCO₃, comme indicateurs de la fertilité azotée et comme outils de prédiction des besoins en engrais N du maïs ensilage. Enfin, l'étude vise à évaluer une approche combinant le bilan prévisionnel d'azote avec des indicateurs de fertilité azotée des sols pour déterminer la dose N optimale du maïs ensilage.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

Cet essai sur la fertilité des sols s'est déroulé sur un site de longue durée implanté en 1978 à la station de recherche de l'IRDA à Saint-Lambert de Lévis. Il s'agit d'un loam limoneux de la série Le Bras qui possède un pH faiblement acide, une capacité d'échange cationique de 15,6 meq/100 g et un niveau élevé de fertilité en P et K (tableau 1). Il possède un niveau de drainage naturel modérément bon

Tableau 1. Analyse chimique des sols au début de l'expérience en 1978 et à la fin en 2002 selon les systèmes de rotation.

Rotations	M.O.		N total		P		K		Ca	
	%		%		kg/ha					
	1978	2002	1978	2002	1978	2002	1978	2002	1978	2002
I	5,78	4,26	0,232	0,152	115	225	96	323	3650	2783
II	5,80	4,88	0,234	0,180	65	110	79	235	3690	3286
III	5,83	4,67	0,239	0,161	140	170	146	315	3490	3032
IV	5,80	5,75	0,235	0,205	88	103	93	177	3510	2467

mais un réseau de drainage souterrain a été implanté en 1987.

Le champ a été divisé en quatre systèmes de rotation présentés au tableau 2. La durée de rotation est de quatre ans. Le système I consiste en une monoculture de maïs ensilage. Le système II comporte une rotation maïs ensilage, orge grainée et 2 ans de prairie mil-trèfle. Le système III comporte du maïs ensilage, blé et orge (2 ans). Les pailles de céréales ont été retirées des parcelles. Le système IV comporte une prairie permanente réimplantée tous les 4 ans avec de l'orge grainée. Les parcelles en céréales et en maïs ensilage sont labourées annuellement et celles en prairies le sont à la fin de chacun des cycles de 4 ans sur une profondeur de 20 cm. Les parcelles ont été fertilisées selon les besoins des grilles de fertilisation en usage.

En 2002, après six cycles de rotation qui se sont échelonnés de 1978 à 2001, toutes les grandes parcelles ont été ensemencées en maïs ensilage et elles ont été subdivisées en cinq sous-parcelles comportant cinq doses croissantes d'azote. Ces sous-parcelles ont trois mètres de large, huit mètres de long et comportent quatre rangs de maïs. On peut ainsi comparer les systèmes de rotation entre eux et établir des différences entre la fertilité des sols, la productivité et les besoins en engrais N selon les rotations. Les doses variables d'azote sont : 0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha. Elles sont appliquées à la volée en présemis et incorporées avec un vibroculteur dans les 10 premiers cm du sol. Une dose de 80 kg/ha P₂O₅ et 80 kg/ha K₂O a également été incorporée au sol en présemis. Le semis avec l'hybride HL 2017 a été effectué le 21 mai 2002 suite à un printemps tardif.

Indicateurs de fertilité azotée des sols et nitrates résiduels après la récolte

Des sols ont été prélevés dans la couche 0-20 des parcelles témoins sans N de chaque rotation le 6 juin, soit deux semaines après le semis. Les teneurs en nitrates de ces sols ont été déterminées en laboratoire immédiatement après leur prélèvement aux champs. Les sols ont également été mis à incuber pendant 2 semaines à 35 °C (Eagle et Matthews

Tableau 2. Description des systèmes de rotation des cultures.

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

1958) à une teneur en eau correspondant à 70 % de la capacité aux champs. Les nitrates ont été extraits au KCl 2N et le dosage a été fait sur un appareil Technicon auto-analyseur. Les résultats sont exprimés sur base sèche en mg N-NO₃/kg. L'absorbance UV des extraits de sol au NaHCO₃ 0,01 aux longueurs d'onde de 205, 220 et 260 nm a également été déterminée immédiatement après leur prélèvement aux champs sur un spectromètre UV Milton Roy, modèle spectronic 1201 selon la procédure décrite par Fox et Piekielek (1978 a et b).

Les nitrates résiduels ont été mesurés dans les sols de chacune des parcelles échantillonnées le 20 octobre 2002, soit 2 semaines après la récolte, dans les couches de sol 0-20, 20-40 et 40-60 cm. Les résultats ont été exprimés en mg N-NO₃/kg dans la couche arable (0-20 cm) et en kg N-NO₃/ha pour une profondeur 0-60 cm.

Analyses des végétaux

Les feuilles de l'épi à l'apparition des soies ont été prélevées le 10 août 2002 sur 25 plants dans les deux rangs du centre des parcelles. L'indice de chlorophylle a été déterminé sur ces feuilles avec le chlorophylle-mètre SPAD 502 de la compagnie Minolta. Par la suite, elles ont été séchées et broyées pour analyse de l'azote total par digestion Kjeldahl. Les rendements d'ensilage ont été mesurés le 6 octobre 2002 sur les deux rangs de 8 m au centre des parcelles en récoltant la biomasse aérienne des plants coupés à 10 cm du sol avec une ensileuse commerciale et rapportés sur une base de matière sèche par hectare. Un échantillon de 500 g a été prélevé dans chacune des parcelles pour déterminer la teneur en matière sèche de la récolte et la composition chimique.

Les prélèvements en N/ha de la récolte ont été calculés en multipliant la teneur en N de l'ensilage par le rendement. Le coefficient d'utilisation de l'azote (CUN) des engrais a été déterminé pour chacune des doses d'azote dans chacun des systèmes de rotation. Cette valeur est déterminée par la différence entre le prélèvement de la parcelle avec N moins le prélèvement sans N divisée par la dose N correspondante (Giroux et al. 2000).

$$\text{CUN} = (\text{prélèvement avec N} - \text{prélèvement sans N}) / \text{dose N} \times 100$$

Les rendements relatifs (R.R.) correspondant au rendement du témoin sans engrais N/rendement maximum mesuré avec N x 100 ont fourni une indication relative de la réponse du maïs aux apports d'engrais N et ont servi à calibrer les indicateurs de fertilité azotée des sols. Les prélèvements relatifs (P.R.) correspondant au prélèvement en N du témoin sans engrais N/prélèvement N maximal mesuré avec N x 100 ont fourni une indication relative de la capacité des sols à fournir l'azote au maïs ensilage et ont servi à calibrer les indicateurs de fertilité des sols utilisés dans l'approche du bilan prévisionnel N.

Analyses statistiques

Le dispositif expérimental est un split-plot avec les 4 systèmes de rotation comme grandes parcelles et les 5 doses d'azote en sous-parcelles. Il comporte 4 répétitions. Nous avons effectué une analyse de variance Proc Mix sur SAS pour déterminer les niveaux de probabilité des effets des rotations, des doses N et de l'interaction rotation x dose N sur chacun des paramètres mesurés. Ces paramètres sont le rendement en ensilage, la teneur en matière sèche, en N total, le prélèvement en N/ha de la récolte, la teneur en N total de la feuille de l'épi et son indice de chlorophylle. Nous avons déterminé la plus petite

différence significative (ppds) des paramètres mesurés au seuil statistique 5 % selon les rotations (ppds rotation) et les doses N (ppds dose). Le coefficient de variation est déterminé pour chacun des paramètres comme indication de la précision de l'essai. Pour mesurer l'effet des doses N sur les rendements, les effets linéaire, quadratique et cubique de ces relations ont été déterminés. Les fonctions de production reliant les rendements et les doses d'azote de chacun des systèmes de rotation ont été établies avec le logiciel EXCEL. Les doses de N produisant les rendements économiques optimaux ont été déterminées à partir de la dérivée de ces fonctions de production en considérant divers scénarios de productivité limite déterminés à partir du prix du kilogramme d'azote et du prix d'un kilogramme d'ensilage (base sèche). La productivité limite détermine combien il faut de kg d'ensilage pour rentabiliser l'achat d'un kg d'azote selon leur prix respectif. Une productivité limite de 10 signifie qu'il faut 10 kg de maïs ensilage (base sèche) pour rentabiliser un kg N. Les productivités limites considérées pour les calculs sont : 8, 10, 12 et 14.

Productivité limite = \$ kg N/\$ kg ensilage (base sèche)

y = rendement (kg/ha)

x = dose N (kg/ha)

$y = c + bx + ax^2$

$dy/dx = 2ax + b$

Dose optimale N = (productivité limite - b)/2a

Une matrice des corrélations a été établie entre la réponse en azote du maïs, déterminée par le rendement relatif, le prélèvement relatif, les différents indicateurs de fertilité azotée du sol et des plantes décrits à la section précédente et la dose optimale d'azote. Seize données pour chacun des paramètres mesurés (4 rotations x 4 répétitions) ont servi pour établir les coefficients de corrélation entre ces valeurs. Le coefficient de détermination des régressions (R²) et l'intervalle de prédiction de Y (IP), calculé sur la valeur moyenne de X au seuil de probabilité 95 % sont fournis pour chacune des régressions (Christensen 1986).

Une évaluation de la capacité des indicateurs de fertilité à prédire la dose optimale N du maïs ensilage a été réalisée à partir de leur relation avec les rendements relatifs. Une grille de fertilisation du maïs ensilage

a été déterminée à partir des résultats des différents indicateurs de fertilité azotée sélectionnés. Une évaluation de la dose optimale N, déterminée par un bilan prévisionnel N et basée sur les relations entre les indicateurs de fertilité et les prélèvements relatifs, a également été réalisée.

Résultats

Rendements

Le tableau 3 indique que les rendements en maïs ensilage sont très affectés par les systèmes de rotation ($P = 0,006$) et par les doses d'azote ($P < 0,0001$). L'interaction rotation x dose est également très significative ($P < 0,0001$). Ceci signifie que les doses d'azote n'ont pas le même effet dans chacun des systèmes et que des ajustements doivent être apportés selon les rotations. Les rendements moyens, toutes doses d'azote confondues, ont été de 9,67 t/ha pour la monoculture de maïs (rotation I), de 12,66 t/ha pour la rotation maïs-orge grainée-prairie (rotation II), de 11,37 t/ha pour la rotation maïs-céréales (rotation III)

Tableau 3. Analyses de variance des paramètres mesurés sur le maïs ensilage et les nitrates du sol en fonction des rotations et des doses d'azote.

Systèmes rotation	Doses N	Rendement	Teneur N	Prélèvement N	Matière sèche	Feuille de l'épi	Indice de chlorophylle	Nitrates post-récolte	N minéral résiduel post-récolte
	kg/ha	Ensilage (M. S.) kg/ha	Ensilage % N	Ensilage kg N/ha	Ensilage %	% N		0-20 cm mg N-NO ₃ /kg	0-60 cm kg N-NO ₃ /ha
I	0	5962	0,82	49,3	37,6	1,67	35,5	7,0	34,9
I	50	8262	0,87	72,1	40,0	2,14	44,8	9,0	38,9
I	100	10583	1,02	108,5	42,8	2,56	50,8	9,2	47,7
I	150	11455	1,04	118,9	44,3	2,77	53,7	15,9	83,3
I	200	12092	1,14	138,2	43,9	2,91	54,9	23,4	119,4
II	0	10924	1,05	116,3	44,4	2,47	49,8	9,1	45,0
II	50	12391	1,19	147,5	47,0	2,81	54,2	8,9	51,8
II	100	12766	1,20	153,6	46,2	2,86	55,8	17,1	94,4
II	150	13788	1,28	176,9	45,9	3,11	57,1	16,1	110,9
II	200	13451	1,31	175,5	46,1	2,97	57,3	18,6	151,6
III	0	8370	1,12	94,0	37,9	2,01	42,0	9,6	41,9
III	50	10615	1,15	122,3	40,0	2,51	49,0	8,4	39,4
III	100	12948	1,20	154,9	42,0	2,66	53,0	10,6	53,7
III	150	12519	1,34	168,7	41,0	3,00	56,3	10,5	66,8
III	200	12400	1,40	173,1	39,2	2,86	57,2	12,4	101,2
IV	0	13447	1,25	168,1	45,0	2,97	56,5	14,1	67,4
IV	50	14024	1,37	191,7	43,8	3,08	57,7	11,7	67,7
IV	100	14051	1,38	194,2	46,0	3,09	58,2	20,7	123,1
IV	150	14688	1,42	209,1	45,9	3,26	58,9	21,2	144,1
IV	200	14284	1,41	201,8	46,6	3,34	59,3	29,7	183,1
P > F rotations		0,0006	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0015	0,0083
P > F doses		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
P > F doses x rotations		< 0,0001	0,031	0,015	< 0,0001	0,018	< 0,0001	0,284	0,223
C. V. %		6,97	5,20	9,75	2,99	7,00	3,62	39,685	26,90
ppds rotations		530	0,0396	9,1	0,822	0,1225	1,222	3,573	14,25
ppds doses		592	0,0442	10,2	0,919	0,1369	1,366	3,995	

et de 14,10 t/ha pour la prairie permanente (rotation IV). Les rendements moyens, toutes rotations confondues, sont de 9,68 t/ha pour la dose 0 kg N/ha, de 11,32 t/ha pour la dose 50 kg N/ha, de 12,59 t/ha pour la dose 100 kg N/ha, de 13,11 t/ha pour la dose 150 kg N/ha et de 13,06 t/ha pour la dose 200 kg N/ha. La dose optimale d'azote, toutes rotations confondues, a été de 110 kg N/ha avec un écart-type de 56 kg N/ha (tableau 6). Il faut cependant déterminer la dose optimale N pour chaque rotation suite aux interactions rotation x dose N très significatives.

L'analyse de variance a démontré un effet quadratique des doses d'azote sur les rendements en ensilage ($P = 0,090$) avec des différences importantes entre les rotations. Les fonctions quadratiques de production ont donc été déterminées pour chacun des systèmes de rotation (figure 1 a). La dose d'azote produisant le rendement optimal a été déterminée pour différentes productivités limites à partir de la dérivée des

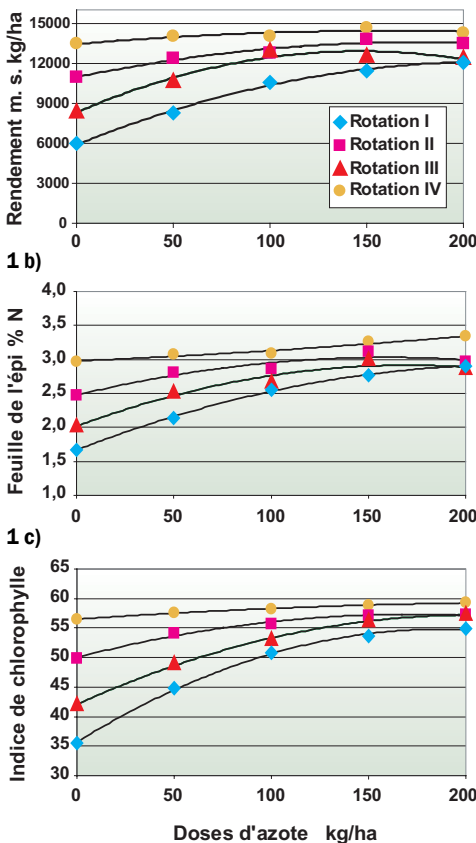


Figure 1. Relation entre les rendements du maïs-ensilage (1 a), l'azote foliaire (1 b), l'indice de chlorophylle (1 c) des feuilles et les doses d'azote selon les divers systèmes de rotation.

fonctions de production (tableau 4). Pour la rotation I, correspondant à la monoculture de maïs ensilage, les rendements ont été moindres et la dose N requise pour atteindre le niveau optimal de fertilisation N a été beaucoup plus élevée. Selon la productivité limite considérée, elle a varié entre 161 et 183 kg N/ha. Pour la rotation II, avec maïs-orge grainée-prairie (2 ans), la dose N optimale a varié de 93 à 128 kg N/ha, selon la productivité limite considérée. Pour la rotation III, avec maïs-blé-orge (2 ans), la dose N a varié de 114 à 128 kg N/ha, selon la productivité limite considérée. Pour la rotation IV, correspondant à un retour de maïs ensilage sur vieille prairie, la dose optimale N a varié de 0 à 57 kg N/ha, selon la productivité limite considérée. Les systèmes de rotation et les aspects économiques liés au prix du kilogramme d'azote et de l'ensilage doivent être considérés dans les recommandations en N du maïs ensilage. Les rotations comportant des prairies montrent une fertilité azotée plus élevée et exigent une fertilisation plus réduite. Les prélèvements en N des parcelles témoins sans N de chacune des rotations révèlent bien l'aptitude des sols à fournir l'azote au maïs. Ces valeurs sont de 49,3 kg N/ha dans la rotation I, de 116,3 kg N/ha dans la rotation II, de 94,0 kg N/ha dans la rotation III et de 168,1 kg N/ha dans la rotation IV. Ces résultats démontrent que la fourniture N des sols varie considérablement selon les rotations et que des ajustements très importants doivent être apportés à la fertilisation N du maïs ensilage.

Tableau 4. Fonction de production de l'azote dans le maïs ensilage selon les différents systèmes de rotation et détermination des doses économiques optimales pour différentes productivités limites.

Rotations	Fonctions de production	R ²	R. R.* (%)	Productivité limite**			
				8	10	12	14
				Doses N optimales (kg N/ha)			
I	$y = 5898 + 58,20x - 0,137x^2$	0,77	48,8	183	176	169	161
II	$y = 10951 + 29,82x - 0,085x^2$	0,43	80,7	128	117	105	93
III	$y = 8317 + 62,56x - 0,213x^2$	0,70	64,4	128	123	119	114
IV	$y = 13438 + 12,41x - 0,039x^2$	0,11	93,2	57	31	5	0

* R.R. : rendement relatif : (rendement sans engrais N / rendement maximal avec N) x 100

** La productivité limite est le rapport du prix de l'azote des engrais sur celui du maïs ensilage (base sèche) : \$ kg N / \$ kg d'ensilage.

Tableau 5. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la partie aérienne du maïs ensilage selon les systèmes de rotation et les doses de N appliquées.

Doses N kg/ha	Rotation I	Rotation II	Rotation III	Rotation IV	Moyenne
50	45,61	62,42	56,61	47,35	53,00
100	59,12	37,30	60,92	26,20	45,89
150	46,39	40,39	49,76	27,39	40,98
200	44,42	29,56	39,54	16,86	32,60
moyenne	48,89	42,42	51,71	29,45	

Teneurs et prélèvements en azote total de l'ensilage

Le tableau 3 indique que les teneurs en azote total dans l'ensilage sont très affectées par les systèmes de rotation ($P < 0,0001$) et par les doses d'azote ($P < 0,0001$). L'interaction rotation x dose est également très significative ($P = 0,031$). Les teneurs en N dans l'ensilage, toutes doses d'azote confondues, ont été de 0,98 % N pour la monoculture de maïs (rotation I), de 1,21 % N pour la rotation maïs-orge grainée-prairie (rotation II), de 1,24 % N pour la rotation maïs-céréales (rotation III) et de 1,37 % N pour la prairie permanente (rotation IV). Les teneurs moyennes en N, toutes rotations confondues, sont de 1,06 % N pour la dose 0 kg N/ha, de 1,14 % N pour la dose 50 kg N/ha, de 1,20 % N pour la dose 100 kg N/ha, de 1,27 % N pour la dose 150 kg N/ha et de 1,31 % N pour la dose 200 kg N/ha.

Le tableau 3 indique que les prélèvements en N total de l'ensilage sont très affectés par les systèmes de rotation ($P < 0,0001$) et par les doses d'azote ($P < 0,0001$). L'interaction rotation x dose est significative ($P = 0,015$). Les prélèvements en N de l'ensilage, toutes doses d'azote confondues, ont été de 97,4 kg N/ha pour la monoculture de maïs (rotation I), de 154,0 kg N/ha pour la rotation maïs-orge grainée-prairie (rotation II), de 142,6 kg N/ha pour la rotation maïs-orge (rotation III) et de 193,0 kg N/ha pour la prairie permanente (rotation IV). Les prélèvements en N, toutes rotations

Tableau 6. Rendements et prélèvements relatifs de l'azote par le maïs ensilage en relation avec la dose optimale N, les résultats de différents indicateurs de fertilité azotée des sols et les analyses foliaires dans les parcelles sans engrais N.

ROT.-REP.	R.R. %	P.R. %	N. OPT kg N/ha	PRELEV. N kg N/ha	N-FEUILLE %	INDICE CHLORO.	INCUBATION mg N-NO ₃ /kg	CHAMP mg N-NO ₃ /kg	ABS.205	ABS.220	ABS.260
I A	35,6	23,9	188	30,9	1,45	31,6	26,0	9,2	1,14	0,693	0,297
I B	56,1	45,0	164	56,8	1,66	35,5	28,1	7,6	1,23	0,74	0,313
I C	46,9	34,8	180	48,3	1,88	39,9	29,9	8,3	1,37	0,793	0,312
I D	54,8	38,8	170	61,3	1,71	35,1	36,0	9,5	1,53	0,901	0,368
II A	72,6	57,5	105	94,5	2,14	46,8	39,4	15,3	1,58	0,908	0,352
II B	73,5	53,4	127	89,7	2,19	48,2	36,4	15,6	1,39	0,823	0,338
II C	82,2	75,6	33	148,5	2,87	52,7	63,8	13,5	2,29	1,179	0,329
II D	83,7	70,7	114	132,6	2,67	51,5	56,5	10,9	2,21	1,105	0,275
III A	73,9	62,5	125	118,2	2,38	47,7	29,5	9,8	1,35	0,804	0,345
III B	48,3	41,4	140	67,5	1,68	37,1	32,5	9,1	1,60	0,931	0,37
III C	65,6	52,7	119	94,2	2,08	43,7	34,5	12,3	1,34	0,79	0,325
III D	66,2	56,5	110	96,2	1,92	39,4	32,5	10,9	1,34	0,785	0,321
IV A	85,7	72,2	79	145,0	3,02	57,5	52,7	18,0	2,04	1,16	0,442
IV B	84,3	68,8	16	165,8	2,83	55,2	62,5	19,2	2,28	1,255	0,443
IV C	100,0	91,9	0	186,6	3,02	57	70,0	25,0	2,35	1,284	0,435
IV D	82,8	75,3	94	174,8	3,02	56,2	51,1	23,1	1,95	1,144	0,479
Moyenne	69,52	57,55	110,16	106,93	2,28	45,94	42,59	13,57	1,69	0,96	0,36
Ecart-Type	17,39	17,93	56,07	47,94	0,55	8,67	14,48	5,35	0,43	0,20	0,06
C.V. %	25,01	31,15	50,90	44,83	24,18	18,87	33,99	39,43	25,25	20,78	16,67

confondues, sont de 106,9 kg N/ha pour la dose 0 kg N/ha, de 133,0 kg N/ha pour la dose 50 kg N/ha, de 152,8 kg N/ha pour la dose 100 kg N/ha, de 168,4 kg N/ha pour la dose 150 kg N/ha et de 172,1 kg N/ha pour la dose 200 kg N/ha.

Coefficients d'utilisation de l'azote des engrais

Le coefficient moyen d'utilisation de l'azote des engrais par le maïs ensilage, toutes rotations confondues, a été de 53,0 % pour la dose 50 kg N/ha, 45,9 % pour la dose 100 kg N/ha, 41,0 % pour la dose 150 kg N/ha et 32,6 % pour la dose 200 kg N/ha (tableau 5). Il décroît proportionnellement avec les doses d'azote. Ce phénomène a été également mesuré dans le maïs-grain par Tran (1994). Il existe par contre des différences importantes entre les rotations. La monoculture de maïs ensilage n'a pas montré de diminution du CUN avec les doses d'azote alors que la prairie permanente montre une diminution très considérable. La fourniture d'azote par le sol et la dose optimale d'engrais N sont très différentes dans ces deux systèmes de rotation. Lorsque le niveau optimal de fertilisation est dépassé, les kilogrammes de N en excès ne servent plus à l'élaboration du rendement; les plantes n'utilisent plus efficacement cet azote et les reliquats dans le sol s'accroissent. Les coefficients d'utilisation plus faibles sur un retour de prairie s'expliquent par une fourniture d'azote plus

élevée par le sol et un faible besoin en engrais N. Pour des doses d'azote au-delà de la fertilisation optimale, une réduction marquée de CUN est observée.

Teneurs en azote et indices chlorophylliens des feuilles de l'épi

Le tableau 3 indique que les teneurs en azote total de la feuille de l'épi à l'apparition des soies sont très affectées par les systèmes de rotation ($P < 0,0001$) et par les doses d'azote ($P < 0,0001$). L'interaction rotation x dose est également significative ($P = 0,018$). Les teneurs moyennes en N des feuilles, toutes doses d'azote confondues, ont été de 2,40 % N pour la monoculture de maïs (rotation I), de 2,61 % N pour la rotation maïs-orge grainée-prairie (rotation II), de 2,84 % N pour la rotation maïs-céréales (rotation III) et de 3,15 % N pour la prairie permanente (rotation IV). Les teneurs moyennes en N des feuilles, toutes rotations confondues, sont de 2,28 % N pour la dose 0 kg N/ha, de 2,63 % N pour la dose 50 kg N/ha, de 2,79 % N pour la dose 100 kg N/ha, de 3,02 % N pour la dose 150 kg N/ha et de 3,03 % N pour la dose 200 kg N/ha. L'analyse foliaire constitue un indicateur utile pour déterminer si les besoins en N ont été comblés adéquatement. La teneur en N des feuilles de l'épi associée au rendement optimal se situe entre 2,75 et 3 % N. La figure 1 b montre les teneurs en N foliaire en fonction des doses d'azote pour chacune des rotations.

Le tableau 3 indique que les indices de chlorophylle de la feuille de l'épi à l'apparition des soies sont très affectés par les systèmes de rotation ($P < 0,0001$) et par les doses d'azote ($P < 0,0001$). L'interaction rotation-dose est également très significative ($P < 0,0001$). Les indices chlorophylliens moyens des feuilles, toutes doses d'azote confondues, ont été de 47,9 pour la monoculture de maïs (rotation I), de 54,8 pour la rotation maïs-orge grainée-prairie (rotation II), de 51,5 pour la rotation maïs-céréales (rotation III) et de 58,1 pour la prairie permanente (rotation IV). Les indices chlorophylliens moyens des feuilles, toutes rotations confondues, sont de 45,9 pour la dose 0 kg N/ha, de 51,4 pour la dose 50 kg N/ha, de 54,4 pour la dose 100 kg N/ha, de 56,5 pour la dose 150 kg N/ha et de 57,2 pour la dose 200 kg N/ha. L'indice chlorophyllien constitue un indicateur utile pour déterminer si les besoins en N ont été comblés adéquatement. L'indice associé au rendement optimal pour une productivité limite de 10 se situe entre 55 et 57. Les relations entre l'indice de chlorophylle et les doses d'azote appliquées sont présentées à la figure 1 c.

Indicateurs de fertilité azotée des sols et capacité de prédiction de la dose optimale N

Les indicateurs de fertilité azotée évalués sont le test des nitrates par incubation des sols témoins, l'absorbance des extraits de

sol au NaHCO_3 0,01 M déterminée à 205, 220 et 260 nm et le test des nitrates aux champs. Pour déterminer le potentiel de ces indicateurs de fertilité, nous avons déterminé le rendement relatif (R. R.) et mesuré les relations entre R. R. et ces indicateurs de fertilité dans les 16 unités expérimentales (4 rotations x 4 répétitions) (tableau 6). Le coefficient de corrélation (r) entre R. R. et chacun des indicateurs a été par ordre décroissant de 0,85 pour le test d'incubation, de 0,81 pour l'absorbance UV à 220, de 0,80 pour l'absorbance UV à 205, de 0,79 pour le test des nitrates aux champs et de 0,54 pour l'absorbance UV à 260 (tableau 7). Les résultats confirment la supériorité de la méthode d'incubation pour expliquer les variations des rendements relatifs avec un R^2 de 0,74 et un intervalle de prédiction (IP) de $\pm 21,1$ (figure 2 a). En ce qui concerne l'absorbance UV, la longueur d'onde 220 nm est la plus appropriée. La relation avec R. R. et l'absorbance UV 220 est également bonne avec un R^2 de 0,66 et un IP de $\pm 23,4$ (figure 2 b). Pour le test des nitrates aux champs, la relation avec R.R. est comparable à celle de l'absorbance UV, avec un R^2 de 0,66 et un IP de 24,3 (figure 2 c). Les nitrates aux champs sont fortement corrélés avec les valeurs d'absorbance UV, ce qui indique que ce sont principalement les nitrates du sol qui affectent l'absorbance UV des extraits, cela expliquerait la similitude des résultats.

Une relation a également été déterminée entre le rendement relatif et la dose optimale N mesurée dans chacune des 16 unités expérimentales basée sur une productivité limite de 10 (figure 3). Le coefficient de détermination de cette régression est de $R^2 = 0,80$ avec un

intervalle de prédiction de $\pm 62,3$. Nous avons établi une grille de fertilisation azotée du maïs ensilage fournissant le besoin optimal en engrais N selon les niveaux des différents indicateurs de fertilité azotée des sols de ce site. La grille de fertilisation a été calibrée en fonction des relations entre les rendements relatifs et les indicateurs de fertilité du sol, ce qui a permis de déterminer une dose optimale de N associée aux valeurs de ces indicateurs et aux rendements relatifs (tableau 8). Les résultats ont démontré qu'il est possible de déterminer à priori la dose optimale en azote du maïs ensilage en se basant sur des indicateurs de fertilité du sol qui expriment la capacité de minéralisation des sols. Ceci confirme les résultats de recherche de N'Dayegamiye (2006) sur la libération de l'azote observée suite à une incubation prolongée des sols. Des rajustements sont possibles en cours de saison, avec des outils diagnostiques, pour tenir compte plus spécifiquement des particularités des sols, de la saison de végétation et personnaliser davantage les recommandations d'azote (Tremblay et Bélec 2006)

Bilan prévisionnel d'azote

Il est possible d'établir la dose optimale N en combinant une approche de bilan prévisionnel d'azote avec les indicateurs de fertilité azotée des sols. Le bilan prévisionnel évalue les besoins en azote de la plante associés à un rendement visé et détermine la proportion de l'azote qui sera comblée par le sol et par les engrais. Pour appliquer cette technique de calcul, il faut connaître certains paramètres dont l'objectif de rendement, le besoin en N/tonne, la fourniture d'azote par le sol et le coefficient d'utilisation de l'azote des engrais. Dans le cas du

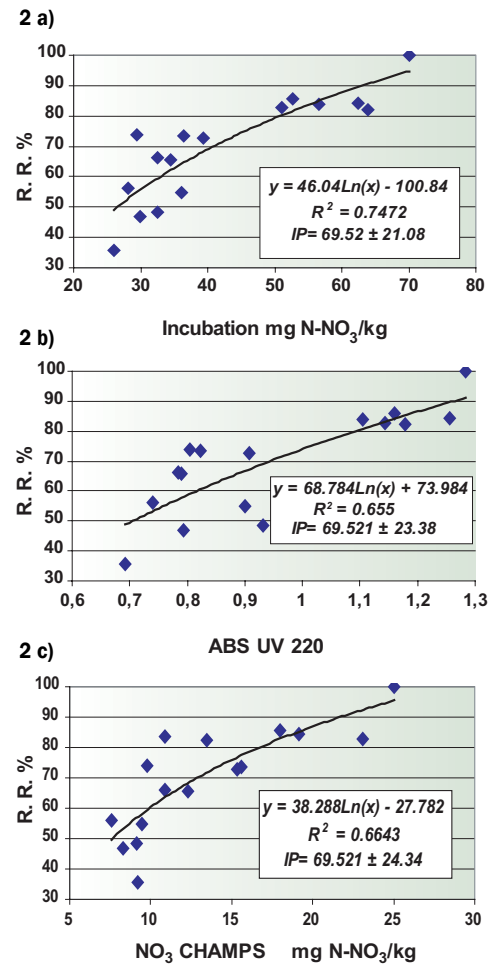


Figure 2. Relation entre le rendement relatif (R. R.) du maïs-ensilage et la teneur en nitrate des sols après 2 semaines d'incubation à 35 °C (2 a), l'absorbance UV des extraits de sol à 220 nm (2 b) et la teneur en nitrate aux champs deux semaines après le semis (2 c).

bilan prévisionnel, ce sont les relations entre les prélèvements relatifs et les indicateurs de fertilité des sols qui ont servi à déterminer la contribution de l'azote du sol et la dose optimale d'engrais N.

Tableau 7. Matrice des corrélations entre les rendements et les prélèvements relatifs de l'azote, les doses optimales N, les résultats de différents indicateurs de fertilité azotée des sols et les analyses foliaires dans les parcelles sans engrais N.

ROT.-REP.	R.R	P.R.	N. OPT	PRELEV. N	N-FEUILLE	INDICE CHLORO.	INCUBATION N-NO ₃	CHAMP N-NO ₃	ABS.205	ABS.220	ABS.260
R. R	1,00										
P. R.	0,98	1,00									
N. OPT	-0,87	-0,89	1,00								
PRELEV. N	0,95	0,97	-0,91	1,00							
N-FEUILLE	0,93	0,93	-0,84	0,96	1,00						
I. CHLORO.	0,94	0,92	-0,84	0,94	0,98	1,00					
NO ₃ INC	0,85	0,86	-0,90	0,88	0,88	0,84	1,00				
NO ₃ CHAMP	0,79	0,78	-0,79	0,84	0,80	0,82	0,76	1,00			
ABS.205	0,80	0,82	-0,85	0,86	0,86	0,82	0,98	0,68	1,00		
ABS.220	0,81	0,83	-0,86	0,88	0,88	0,84	0,96	0,77	0,98	1,00	
ABS.260	0,54	0,55	-0,58	0,67	0,63	0,62	0,53	0,82	0,53	0,68	1,00

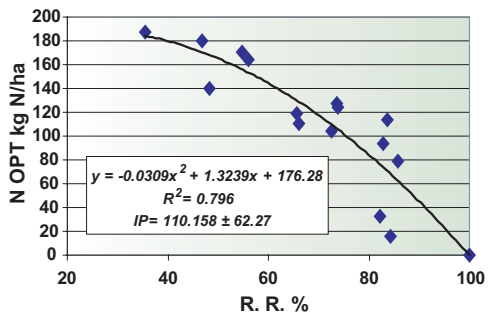


Figure 3. Relation entre la dose optimale d'azote (N OPT) du maïs-ensilage et le rendement relatif.

Pour connaître la capacité du sol à fournir l'azote, nous avons utilisé les trois indicateurs de fertilité : incubation, absorbance UV à 220 et le test des nitrates. Nous avons déterminé la relation entre ces indicateurs et les prélèvements relatifs. La relation entre les prélèvements relatifs (P.R.) et l'incubation des sols est la plus significative avec un coefficient $R^2 = 0,74$ et un intervalle de prédiction de $\pm 20,8$ (figure 4 a), suivi de l'absorbance UV 220 nm avec $R^2 = 0,69$ et un intervalle de prédiction de $\pm 22,8$ (figure 4 b) et finalement, pour le test des nitrates, une valeur R^2 est de 0,61 et un intervalle de prédiction de $\pm 25,6$ (figure 4 c). Le test d'absorbance UV s'est

montré supérieur au test des nitrates mais il est moins précis que le test d'incubation.

Les équations du bilan d'azote utilisées dans les calculs sont les suivantes :

- (1) Besoin N = fourniture N (sol) + fourniture N (engrais)
- (2) Besoin N = rendement visé x prélèvement N/tonne
- (3) Fourniture N (sol) = besoin N x prélèvement relatif (P.R.)
- (4) Rendement visé x prélèvement N/tonne = (besoin N x P.R.) + dose N x CUN

Notre étude a démontré que le prélèvement en N/tonne du maïs ensilage est d'environ 12,0 kg N/t au point optimal de fertilisation (tableau 9). Le coefficient moyen d'utilisation de l'azote varie considérablement selon la dose N et les systèmes de rotation. Au point optimal de fertilisation, il se situe entre 45 et 50 % (tableau 5).

L'équation du bilan prévisionnel d'azote a été résolue pour un rendement visé en maïs ensilage de 12 tonnes/ha et en considérant un prélèvement optimal de 12,0 kg N/t, soit un besoin N à combler de 144 kg N/ha (équation 2). La fourniture N (sol) est

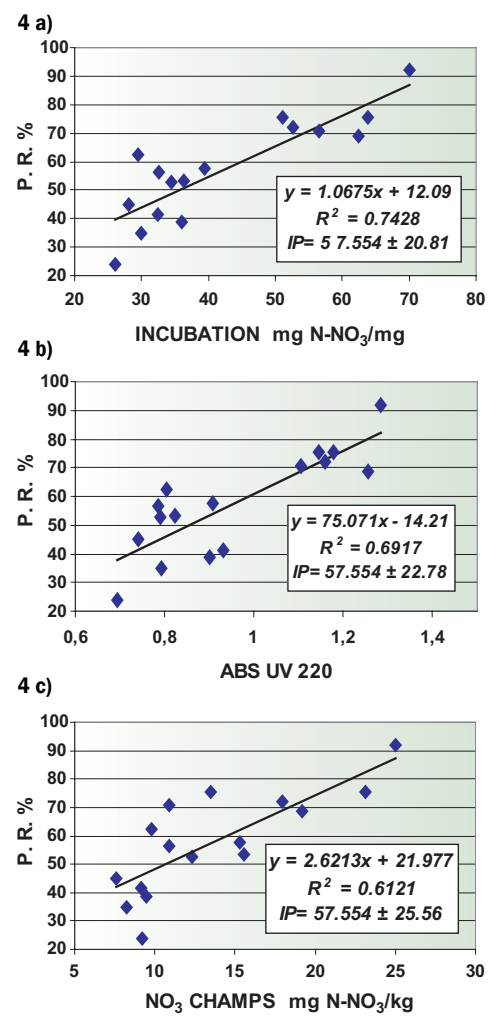


Figure 4. Relation entre le prélèvement relatif (P. R.) de l'azote du maïs-ensilage et la teneur en nitrate des sols après 2 semaines d'incubation à 35 °C (4 a), l'absorbance UV des extraits de sol à 220 nm (4 b) et la teneur en nitrate aux champs deux semaines après le semis (4 c).

Tableau 8. Doses optimales d'azote selon les rendements relatifs du maïs ensilage et les valeurs de divers indicateurs de fertilité azotée des sols.

R. R. (%)	Doses N (kg/ha)	Incubation (mg/kg)	Abs UV 220 nm	Champs (mg/kg)
30	188	17,1	0,528	4,5
35	185	19,1	0,567	5,2
40	180	21,3	0,610	5,9
45	173	23,8	0,656	6,7
50	165	26,5	0,706	7,6
55	156	29,5	0,759	8,7
60	144	32,9	0,816	9,9
65	132	36,7	0,878	11,3
70	118	40,9	0,944	12,9
75	102	45,6	1,015	14,7
80	84	50,8	1,091	16,7
85	66	56,6	1,174	19,0
90	45	63,1	1,262	21,7
95	23	70,4	1,357	24,7
100	0	78,4	1,460	28,1

Tableau 9. Prélèvement d'azote par tonne de maïs ensilage selon les rotations et les doses d'azote.

Doses N kg/ha	Rotation I	Rotation II	Rotation III	Rotation IV	Moyenne
0	8,23	10,54	11,23	12,49	10,62
50	8,68	11,87	11,47	13,66	11,42
100	10,17	12,02	11,95	13,84	12,00
150	10,35	12,83	13,44	14,22	12,71
200	11,42	13,06	13,95	14,09	13,13
moyenne	9,77	12,06	12,41	13,66	

déterminée par l'équation 3. Elle est calculée en multipliant le besoin N de la culture par le prélèvement relatif. La dose optimale d'azote correspondant à chaque valeur de P.R. a été calculée à partir de l'équation 4 en supposant une valeur de 0,50 pour CUN et un besoin N à combler de 144 kg N/ha (12 t/ha x 12 kg N/t). Le tableau 10 présente les doses optimales N associées aux différentes valeurs P.R. et aux valeurs correspondantes des indicateurs de fertilité. Avec la méthode du bilan, il est possible d'ajuster l'objectif de rendement de la culture et le coefficient d'utilisation de l'azote des engrais. La capacité prédictive de la dose optimale d'azote déterminée à partir du bilan N dépend directement de la capacité des indicateurs de fertilité à

Tableau 10. Doses optimales d'azote déterminées par la méthode du bilan prévisionnel selon les prélèvements relatifs du maïs ensilage et les valeurs de divers indicateurs de fertilité azotée des sols.

P. R. (%)	Doses optimales N (kg/ha)	Incubation N-NO ₃	Abs UV 220 nm (mg/kg)	Champs N-NO ₃
30	202	16,8	0,589	3,1
35	187	21,5	0,656	5,0
40	173	26,1	0,722	6,9
45	158	30,8	0,789	8,8
50	144	35,5	0,855	10,7
55	130	40,2	0,922	12,6
60	115	44,9	0,989	14,5
65	101	49,6	1,055	16,4
70	87	54,2	1,122	18,3
75	72	58,9	1,188	20,2
80	58	63,6	1,255	22,1
85	43	68,3	1,322	24,0
90	29	73,0	1,388	26,0
95	14	77,7	1,455	27,9
100	0	82,4	1,521	29,8

fournir une indication valable du prélèvement relatif. Il faut également fournir des valeurs réalistes du rendement visé, du besoin N/tonne et du coefficient d'utilisation d'azote.

Nitrates résiduels à la récolte

Le tableau 3 indique que les teneurs en nitrates résiduels à l'automne dans la couche arable des sols (0-20 cm) sont très affectées par les systèmes culturaux ($P = 0,0015$) et par les doses d'azote ($P < 0,0001$). L'interaction rotation x dose n'est pas significative ($P = 0,284$). Les teneurs résiduelles en N-NO₃ dans la couche arable, toutes doses d'azote confondues, ont été de 12,9 mg N-NO₃/kg pour la monoculture de maïs (rotation I), de 14,0 mg N-NO₃/kg pour la rotation maïs-orge grainée-prairie (rotation II), de 10,3 mg N-NO₃/kg pour la rotation maïs-blé-orge (rotation III) et de 19,5 mg N-NO₃/kg pour la prairie permanente (rotation IV). Les teneurs en nitrates résiduels, toutes rotations confondues, sont de 9,5 mg N-NO₃/kg pour la dose 0 kg N/ha, de 10,0 mg N-NO₃/kg pour la dose 50 kg N/ha, de 14,4 mg N-NO₃/kg pour la dose 100 kg N/ha, de 15,9 mg N-NO₃/kg pour la dose 150 kg N/ha et de 21,0 mg N-NO₃/kg pour la dose 200 kg N/ha. Elles dépassent 15 mg N-NO₃/kg dans les parcelles sur-fertilisées au-delà de la dose optimale N dans la couche 0-20 cm (figure 5 a).

Les teneurs en nitrates résiduels dans la couche 0-60 cm des sols sont également très affectées par les rotations ($P = 0,008$) et par les doses d'azote ($P < 0,0001$).

L'interaction rotation x dose n'est pas significative ($P = 0,223$). Les teneurs en nitrates résiduels dans le profil de sol (0-60 cm), toutes doses d'azote confondues, ont été de 64,8 kg N-NO₃/ha pour la monoculture de maïs (système I), de 90,7 kg N-NO₃/ha pour la rotation maïs-orge grainée-prairie (système II), de 60,6 kg N-NO₃/ha pour la rotation maïs-orge (système III) et de 117,1 kg N-NO₃/ha pour la prairie permanente (système IV). Les teneurs en nitrates résiduels, toutes rotations confondues, sont de 47,3 kg N-NO₃/ha pour la dose 0 kg N/ha, de 49,5 kg N-NO₃/ha pour la dose 50 kg N/ha, de 79,7 kg N-NO₃/ha pour la dose 100 kg N/ha, de 101,3 kg N-NO₃/ha pour la dose 150 kg N/ha et de 138,8 kg N-NO₃/ha pour la dose 200 kg N/ha. Tant les doses d'azote que les systèmes de rotation affectent les teneurs en nitrates résiduels des sols. Elles dépassent 100 kg N-NO₃/ha dans les parcelles sur-fertilisées au-delà de la dose optimale N dans la couche 0-60 cm (figure 5 b). Les plus fortes teneurs en nitrates résiduels sont observées dans les sols de fertilité azotée élevée combiné à de fortes applications d'engrais N. Sur un retour de vieilles prairies (rotation IV), des doses supérieures à 50 kg N/ha ont laissé les quantités de nitrates résiduels les plus élevées.

Conclusions

Les résultats de cette étude démontrent que la dose optimale d'azote varie considérablement selon les systèmes de rotation

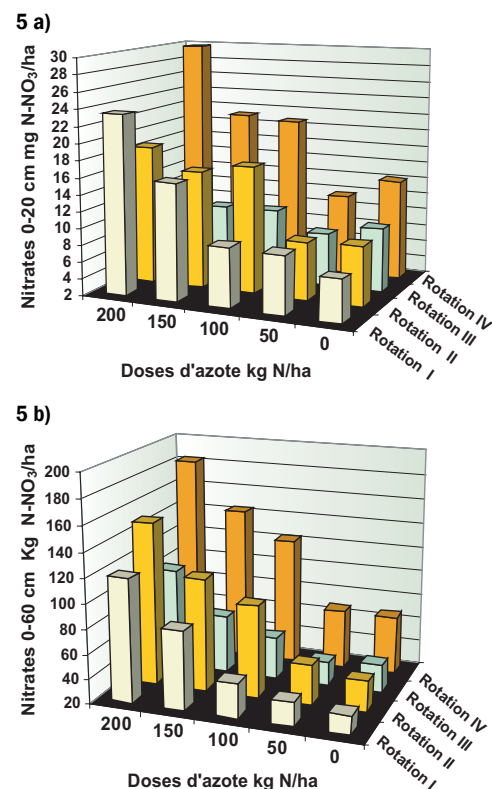


Figure 5. Teneurs en nitrate résiduel dans la couche 0-20 cm (5 a) et dans la couche 0-60 cm (5 b) des sols deux semaines après la récolte.

des cultures et la fertilité azotée des sols. Pour la rotation I, correspondant à la monoculture de maïs ensilage, la production a été beaucoup moindre et la dose N optimale a varié entre 161 et 183 kg N/ha selon la productivité limite considérée. Pour la rotation II, avec maïs-orge grainée-prairie (2 ans), elle a varié de 93 à 128 kg N/ha. Pour la rotation III, avec maïs-blé-orge (2 ans), elle a varié de 114 à 128 kg N/ha. Pour la rotation IV, correspondant à un retour de maïs sur une vieille prairie, elle a varié de 0 à 57 kg N/ha. L'analyse de la feuille de l'épi à l'apparition des soies et l'indice de chlorophylle sont des moyens utiles pour déterminer si le maïs ensilage a eu suffisamment d'azote.

Les fonctions de production de l'azote sur le rendement du maïs ensilage ont été déterminées dans 16 unités expérimentales correspondant aux 4 systèmes de rotation et aux 4 répétitions. La dose économique optimale associée à une productivité limite de 10 a été déterminée. Les rendements relatifs, les prélèvements relatifs et la dose optimale d'azote ont été mis en relation

avec différents indicateurs de fertilité azotée des sols. Le test des nitrates par incubation, la spectroscopie UV des extraits de sol au NaHCO_3 à 220 nm et le test des nitrates aux champs ont bien révélé les différences de fertilité azotée entre des systèmes de rotation et ont pu servir à moduler les applications d'azote. Cette étude a démontré le potentiel d'une approche simple de bilan prévisionnel d'azote, basée sur la relation entre les prélèvements relatifs et les indicateurs de fertilité des sols, pour déterminer la dose optimale d'azote au maïs ensilage.

Une diminution importante du coefficient d'utilisation de l'azote des engrais a été mesurée à mesure que la dose d'azote s'accroît, spécialement dans les parcelles fertilisées au-delà de la dose optimale de fertilisation. Pour une dose optimale d'azote, le CUN se situe entre 45 et 50 %. Le besoin optimal N pour produire une tonne de maïs ensilage a été de 12,0 kg N/t.

Les teneurs en nitrates résiduels à l'automne dans la couche des sols à la récolte sont très affectées par les systèmes culturaux et par les doses d'azote. Des teneurs en nitrates très élevées, supérieures à 15 mg $\text{N-NO}_3/\text{kg}$ dans la couche 0-20 cm et supérieures à 100 kg $\text{N-NO}_3/\text{ha}$ dans la couche 0-60 cm, ont été mesurées dans les parcelles fertilisées au-delà de la dose optimale d'azote, particulièrement dans les sols de fortes fertilités azotées.

Remerciements

Je tiens à remercier M. Michel Lemieux, pour le suivi des parcelles aux champs, la compilation et le traitement des données. Je remercie M^{me} Michèle Grenier pour la supervision du traitement statistique et M^{me} Carole Dion pour son aide. Je remercie également le personnel technique du laboratoire d'analyse de l'IRDA pour la qualité de leurs analyses.

Références

- Angers, D.A., et M. Giroux. 1996. Recently deposited organic matter in soil water stable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1547-1551.
- Blackmer, A.M. et A.P. Mallarino. 1993. Soil testing to optimize nitrogen management for corn. Iowa State University Extension.
- Cambouris, A., N. Ziadi, M.C. Nolin, C. Bélec et N. Tremblay. Influence de la texture de surface des sols sur la réponse du blé panifiable à la fertilisation azotée. *Bulletin AQSSS.* 16(1) : 47.
- Cantin, J. 1995. Résultats des parcelles d'azote dans le maïs-grain. Programme Plan vert du Canada. Réalisé en collaboration avec la Société d'agriculture du comté de Verchères et du Bureau de renseignements agricoles de Saint-Hyacinthe (MAPAQ). 44 p.
- Chatigny, M., M. Bolinder, D. Angers, R. Simard, P. Rochette, G. Bélanger, et S. Beauchemin. 2001. Devenir agronomique et environnemental de l'azote (N), du phosphore (P) et de la matière organique suite au labour d'une prairie fertilisée avec du lisier de porc. Rapport de recherche. Agr. et Agroalim. Canada et IRDA. 70 p.
- Christenson H.B. 1986. La statistique : démarche pédagogique programmée. G. Morin ed. Montréal. 656 p.
- Côté, D., T.S. Tran et A. Ndayegamiye. 1996. Évaluation des coefficients d'efficacité directe et des arrière-effets, suite à l'apport à long terme de lisier de porc en post-levée sur le maïs. *Agrosol* 9(1) : 14-20.
- CRAAQ (2003). Guide de référence en fertilisation. 1^{ère} éd. 295 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.
- Denuit, J.P., M. Oliver, M.J. Goffaux, J.L. Herman, J.P. Goffart, J.P. Destain et M. Frankinet. 2002. Management of nitrogen fertilization of winter wheat and potato crops using the chlorophyll meter for crop nitrogen status assessment. *Agronomie* 22 : 847-853.
- Eagle, D.J. et B.C. Matthews. 1958. Measurement of nitrate-supplying power of soils by an incubation method and correlation with crop yield response. *Can. J. Soil Sci.* 38: 161-170.
- Fox, R.H., et W.P. Piekielek. 1978 (a). A rapid method for estimating the nitrogen-supplying capacity of a soil. *Soil. Soc. Am. J.* 42: 747-750.
- Fox, R.H., et W.P. Piekielek. 1978 (b). Field testing of several nitrogen availability indexes. A rapid method for estimating the nitrogen-supplying capacity of a soil. *Soil. Soc. Am. J.* 42: 751-753.
- Gianello, C. et J.M. Bremner. 1986. A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 17: 195-214.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1987. Comparaison de différentes méthodes d'analyses de l'azote du sol en relation avec la disponibilité pour les plantes. *Can. J. Soil Sci.* 67 : 521-531.
- Giroux, M. 1991. Effet de différents systèmes culturaux sur l'évolution à long terme des propriétés biologiques, la fertilité et la productivité des sols. *Agrosol.* 4(2) : 7-15.
- Giroux, M., T.S. Tran, M. Lemieux et P. Audesse. 1993. Utilisation du test des nitrates en vue d'une recommandation d'azote pour les céréales. *Agrosol* 6(2) : 3-8.
- Giroux, M. (1999). Les effets d'applications d'azote sur le maïs-grain. Compte-rendu du colloque AFEQ « Bien nourrir le sol, c'est mieux gérer l'azote ». Salon de l'agriculteur. Janvier 1999. p. 38-54.
- Giroux, M., R. Morin et M. Lemieux. 2000. Effet des doses d'engrais N, P, et K sur les rendements, les prélèvements en éléments nutritifs et la teneur en huile du canola. *Agrosol* 11(1) : 4-14.
- Guertin, S.P., G.M. Barnett, M. Giroux, A.F. MacKenzie, A. Pesant et L. E. Parent. 1997. Évaluation des besoins N, P, K dans la culture du maïs selon les caractéristiques du sol et des systèmes culturaux. Entente Canada-Québec pour un environnement durable.

- Khan, S.A., R.L. Mulvaney et R.G. Hoef. 2001. A simple soil test for detecting sites that are nonresponsive to nitrogen fertilization. Illinois fertilizer conference proceedings. 10 p.
- MacLean, A.A. 1964. Measurement of nitrogen supplying power of soils by extraction with sodium bicarbonate. *Nature*. 203:1307-1309.
- Magdoff, F., W.E. Jokela et G. Griffin. 1990. A soil test for nitrogen availability in the north-eastern United States. *Comm. Soil Sc. Plant Anal.* 21 : 1103-1115.
- Mulvaney, R.L. et S.A. Khan. 2001. Diffusion methods to determine different forms of nitrogen in soil hydrolysates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1284-1292.
- N'Dayegamiye, A. et D. Angers. 1990. Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés physiques et biologiques d'un loam limoneux Neuboiss sous cultures de maïs. *Can. J. Soil Sci.* 70 : 259-262.
- 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. (2006). Le sol et les systèmes culturaux : facteurs de personnalisation des apports d'azote. Conférence présentée lors de la journée d'échange sur l'azote organisée par le CRAAQ. Mars 2006.
- Painchaud, J. 1997. La gestion de l'azote dans les pommes de terre. *Compte-rendu du colloque sur la pomme de terre : « Cultiver la précision » CPVQ.* p. 43-54.
- Quénum, M. et M. Giroux. 2004. Étude sur le bilan humique des sols dans des systèmes culturaux sous prairies et sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation. *Agrosol* 15(2) : 57-72.
- Sawyer, J.E., D.W. Barker, J.P. Lundvall et M. Al-Kaisi. 2003. Evaluation of the amino-sugar-N based soil test in Iowa corn production. *North Central Extension-Industry Soil fertility conference.* Des Moines IA. Vol. 19 : 125-136.
- Schmitt, M.A., G.W. Randall and G.W. Rehm. 1998. A soil nitrogen test option for N recommendation with corn. *University of Minnesota extension service.* 7 p.
- Standford, G. et S.J. Smith. 1972. Oxydative release of potentially mineralisable soil nitrogen by acid permanganate extraction. *Soil Sci.* 126: 210-218.
- Tran, T.S. 1994. Efficacité et devenir de l'engrais marqué (15N) appliqué à la culture de maïs (*Zea May L.*). Thèse de doctorat. *Fac. Sci. Agr. Alim. U. Laval. Québec.* 132 p.
- Tran, T.S. et M. Giroux. 1998. Étude du bilan de l'engrais azoté (15N) pour le maïs cultivé dans différents types de sol. *Agrosol* 10(2) : 5063.
- Tremblay, G. 2006. Les besoins en azote du maïs-grain. Conférence présentée lors de la journée d'échange sur l'azote organisée par le CRAAQ. Mars 2006.
- Tremblay, N. et C. Bélec. 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.
- Ziadi, N., R.R. Simard, G. Allard, et G. Parent. 2000. Yield response of grass forage to N fertilizer as related to spring soil nitrate sorbed on anionic exchange membranes (AEM). *Can. J. Soil Sci.* 80 : 203-213.
- Ziadi, N., A. Cambouris, M.C. Nolin, C. Bélec et N. Tremblay. 2006. Influence de la texture de surface des sols sur la réponse du maïs-grain à la fertilisation azotée. *Bulletin AQSSS.* 16(1) : 46.