

PROGRAMME CANADIEN D'ADAPTATION AGRICOLE (PCAA)

RAPPORT DE RECHERCHE

Projet No 6177

CHOIX D'INDICATEURS EFFICACES POUR PRÉDIRE LA FERTILITÉ AZOTÉE DES SOLS

Adrien N'Dayegamiye¹, Marc-Olivier Gasser¹, Michèle Grenier¹, Marcel Giroux¹, Christine Landry¹,
Simon P. Guertin¹ et Gilles Tremblay²

Collaborateurs : Jules Blanchette³, Denis Ruel³, Huguette Martel³, Jean Cantin³,
Éric Thibault⁴ et Samuel Comtois⁴

¹Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

²Centre de recherche sur les grains inc. (CEROM)

³Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)

⁴Club Conseil Techno-Champ, Napierville

LISTE DES PARTENAIRES



RÉSUMÉ

Cette étude a été conduite en 2007 et 2008 sur les cultures de maïs et de pommes de terre, afin d'évaluer la réponse de ces cultures aux apports d'engrais azotés, de calculer les doses économiques d'azote et les rendements économiques, et enfin, de connaître les principaux indicateurs du sol et de la plante reliés à la fertilité azotée des sols agricoles. Six doses croissantes d'engrais azotés (0, 50, 100, 150, 200 et 250 kg N/ha) ont été appliquées sur le maïs dans 62 sites répartis dans sept régions agricoles du Québec. Pour la pomme de terre cultivée dans 14 sites, cinq doses d'engrais azotés ont été apportées (0, 50, 100, 150 et 200 kg/ha). Des modèles linéaire, quadratique ou quadratique-plateau ont été utilisés afin de calculer les doses et les rendements économiques pour les deux cultures. Ces paramètres ont été par la suite reliés aux indicateurs azotés du sol et de la plante et aux unités thermiques pour le maïs-grain seulement.

Les rendements économiques du maïs ont varié entre 7,4 et 13,3 tonnes/ha en 2007 et de 5,2 à 11,2 tonnes/ha en 2008. Les rendements économiques étaient légèrement plus faibles en 2008 qu'en 2007, et cela peut être relié aux abondantes précipitations et températures plus froides en 2008. Les doses économiques pour atteindre les rendements économiques du maïs ont varié de 73 à 235 kg N/ha en 2007 pour 30 sites et entre 48 et 200 kg N/ha pour 32 sites en 2008. Ces valeurs reflètent une forte variabilité de la fourniture des sols en azote entre les sites.

Les rendements vendables de la pomme de terre ont varié de 28,5 à 42,2 tonnes/ha. Pour produire des rendements maxima de pommes de terre, les doses économiques d'azote ont varié de 46 à 200 kg N/ha, étant comprises entre 46 et 140 kg N/ha dans 5 sites et entre 180 et 200 kg N/ha pour 9 sites.

Les analyses de corrélation et des composantes principales ont permis de choisir les meilleurs indicateurs de la fertilité azotée des sols agricoles. Pour les deux cultures, les meilleurs indicateurs de la fertilité azotée ont été les suivants : les nitrates du sol en postlevée extraits avec la solution 2M KCl ou avec Nitrachek (0,025M $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O + 0,050M NaCl$), ainsi que les nitrates extraits à l'eau et l'azote total (%) dans les plants en mi-saison. Ces indicateurs ont expliqué une grande variabilité des rendements et des prélèvements en azote ainsi que des doses économiques pour ces deux cultures. Pour la culture de maïs, les résultats ont montré que l'azote et le carbone extraits à l'eau froide et les nitrates en postlevée déterminés avec Nitrachek ou 2M KCl étaient négativement et significativement reliés aux doses économiques d'engrais azotés. Il ressort qu'il est ainsi possible de diminuer les doses d'engrais azotés lorsque des précédents culturaux ont enrichi les sols en azote minéralisable et disponible aux cultures.

Même si la fourniture des sols en azote semble très variable en fonction des conditions spécifiques de chaque ferme (sols et climat), les tests de nitrate en postlevée se sont révélés prometteurs dans la prédiction des doses économiques d'engrais azotés pour les cultures étudiées. Les seuils critiques des nitrates du sol à partir desquels il ne serait plus nécessaire d'apporter de l'engrais azoté ont été variables en 2007 et 2008, étant respectivement de 27 et 64 mg NO_3 avec Nitrachek et de 20 et 23 mg N- NO_3 avec 2M KCl. Pour la culture de pommes de terre, le seuil critique des nitrates dans les sols en postlevée était de 23 mg N- NO_3 avec 2M KCl et de 4,2 % d'azote total dans les feuilles au stade de boutons. Même si les seuils critiques des nitrates semblent variables à cause des conditions climatiques pour chaque année, ces résultats indiquent qu'il est fort probable que, dans la grande majorité des cas, il ne soit pas nécessaire d'ajouter d'engrais azotés au sarclage du maïs ou au renchaussage de la pomme de terre lorsque la teneur en nitrate en postlevée est égale ou supérieure à 20 mg N- NO_3 /kg de sol. Des études de calibration sont cependant encore nécessaires afin de déterminer les doses d'engrais azotés selon les différents niveaux de nitrate des sols.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la contribution financière du Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire (PASCAA). Ce programme d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) est livré par l'intermédiaire du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). Le Conseil agricole du Nouveau-Brunswick (CANB) et l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) ont aussi fourni des contributions financières essentielles à la réalisation de ce projet.

Nous remercions Jules Blanchette, Huguette Martel, Denis Ruel et Jean Cantin, tous du MAPAQ, Éric Thibault et Samuel Comtois du Club-conseil Techno-champ ainsi que Gilles Tremblay du CEROM pour leur expertise et pour le suivi des parcelles mises en place dans leur région. Nous remercions également Anne Drapeau, Michel Noël et Jean-Marie Noël pour les travaux et suivis au champ.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	4
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	5
2.1 Essais aux champs sur culture de maïs (2007 et 2008).....	5
2.2 Essai sur la pomme de terre (2007-2009)	6
2.3 Échantillonnage des sols et des végétaux.....	7
2.4 Analyses statistiques.....	7
3. RÉSULTATS	8
3.1 Réponse du maïs aux apports d'engrais azotés.....	8
3.1.1 Propriétés des sols.....	8
3.1.2 Réponse du maïs-grain aux engrais azotés en 2007 et 2008	9
3.2 Réponse de la pomme de terre aux apports d'engrais azotés	12
3.3. Choix d'indicateurs de la fertilité azotée	16
3.3.1 Corrélations entre les indicateurs azotés du sol et de la plante et les doses économiques pour le maïs en 2007 et 2008.	16
3.3.2 Corrélations entre les indicateurs azotés du sol et de la plante et les rendements économiques de maïs en 2007 et 2008.....	20
3.3.3 Relations entre les composantes principales, les rendements et les doses économiques pour le maïs en 2007 et 2008.	20
3.4. Seuils critiques des nitrates pour les cultures du maïs et de la pomme de terre	23
4. CONCLUSION.....	26
5. LISTE DES RÉFÉRENCES.....	27

1. INTRODUCTION

Une juste recommandation des doses d'azote demeure encore un grand défi. De tous les éléments majeurs (N, P, et K) nécessaires à la nutrition des plantes, l'azote est le plus important, car il détermine la croissance, les rendements et la qualité des récoltes. Cependant, contrairement au phosphore et au potassium, nous ne disposons pas encore d'une grille efficace pour les recommandations d'engrais azotés. Pourtant, les engrais azotés représentent un important coût dans la production du maïs et de la pomme de terre, qui est égal à ceux des herbicides et des cultivars.

Depuis les années 1970, les recommandations de doses d'azote ont été principalement basées sur les rendements visés et les prélèvements d'azote reliés à ces derniers. Cependant, beaucoup de recherches ont démontré que des recommandations basées sur les rendements peuvent surestimer ou sous-estimer le potentiel de production des sols, ceci pouvant entraîner des doses inappropriées d'azote pour les cultures (Vanotti et Bundy, 1994). Une bonne recommandation de doses d'azote devrait se baser sur les conditions spécifiques de sol-climat et cultures (Vanotti et Bundy, 1994). Ces auteurs ont indiqué que les doses économiques d'azote n'étaient pas reliées aux rendements et qu'elles devraient plutôt être basées sur les propriétés et la richesse des sols en azote disponible. Les doses d'azote établies seraient ensuite réduites en considérant les crédits d'azote, tels les apports antérieurs de fumiers, les enfouissements d'engrais verts ou de prairies (Bundy et Andraski, 1995; Scharf, 2001), et enfin les quantités de nitrate résiduel mesurées au printemps (Vanotti and Bundy, 1994).

Le sol constitue la principale source d'azote pour les cultures, pouvant représenter entre 30 et 80 % des besoins (Fageria et Baligar, 2005). Cependant, les quantités d'azote que le sol fournit aux cultures peuvent varier d'un champ à l'autre (entre 15 et 210 kg/ha, selon les cas) et même à travers un même champ (Scharf et Lory, 2001). Ces écarts sont attribuables aux variations des propriétés physiques (texture, structure et divers degrés de compactage) et biologiques des sols, mais également aux différents précédents cultureux (incorporation de prairie, légumineuses dans la rotation des cultures et apports antérieurs de fumiers) qui enrichissent différemment les sols en azote.

Les fournitures des sols en azote et les réponses des cultures aux apports d'engrais azotés varient aussi selon les conditions climatiques qui diffèrent d'une année à l'autre pour une même région et aussi entre les régions agricoles (unités thermiques). Dans leurs études sur la disponibilité de l'azote pour la plante, Kay et al. (2006) ont constaté que la fourniture du sol en azote était principalement influencée par la pluie au début de la saison de croissance. Dans certaines études, les conditions climatiques exercent une influence plus importante sur la fourniture du sol en azote, la réponse des cultures aux engrais azotés ainsi que les taux de minéralisation de l'azote du sol (Sogbedji et al., 2001; Kay et al., 2006). Par conséquent, les recommandations des engrais azotés pour les cultures doivent prendre en considération tous les facteurs affectant la minéralisation et la disponibilité de l'azote du sol comme par exemple, les propriétés du sol et les conditions climatiques (Oberle et Keeney, 1990; Vanotti et Bundy, 1994).

Dans la détermination des doses optimales d'engrais azotés, il est donc nécessaire de tenir compte de ces paramètres qui influencent la minéralisation et la disponibilité de l'azote des sols. Cette recherche de 3 ans (2007-2009) a porté sur les cultures de maïs-grain et de pommes de terre qui sont parmi les cultures les plus exigeantes en azote. Au Québec seulement, la culture de maïs-grain occupe plus de 450 000 ha et reçoit des quantités importantes d'engrais azotés. Afin de connaître les meilleurs indicateurs de la fertilité azotée des sols, nous avons effectué des analyses de corrélation entre certains paramètres du sol et de la plante et les doses d'azote et les rendements économiques du maïs ou de la pomme de terre.

Les unités thermiques ont également été considérées comme facteurs qui pourraient affecter les doses économiques d'engrais azotés et les rendements du maïs. Les objectifs de cette étude conduite sur les cultures de maïs et de pommes de terre consistaient à : i) évaluer l'importance de l'azote fourni par le sol dans la nutrition de ces cultures; ii) connaître les réponses de ces cultures aux apports d'azote; iii) identifier un ou des indicateurs efficaces pour prédire la fertilité azotée des sols ainsi que les rendements et les doses économiques, et; iv) déterminer les valeurs critiques pour les indicateurs les plus performants.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Essais aux champs sur culture de maïs (2007 et 2008)

Les essais en maïs grain ont été implantés sur 30 et 32 sites respectivement en 2007 et 2008 (Tableau 1). Afin d'être représentative, cette étude a intégré plus de 20 séries de sol, 5 systèmes de rotation, 8 textures de sol contrastantes allant de l'argile lourde au loam sableux. De plus, cette étude couvrait plusieurs régions agricoles situées dans des zones agroclimatiques variant de 2100 à 3000 unités thermiques (UTM). La figure 1 montre la répartition des différents sites d'essais selon les régions.

Dans chaque site, l'essai comprenait 6 traitements en trois répétitions. Les traitements consistaient en 6 doses croissantes d'engrais azotés pour la culture de maïs, soit 0, 50, 100, 150, 200 et 250 kg N/ha. Les engrais de P_2O_5 et de K_2O ont été apportés au semis à raison de 50 kg de P_2O_5 et 75 kg de K_2O . À l'exception du témoin, une partie de l'azote a été appliquée comme démarreur (50 kg N/ha) au semis et la différence a été appliquée au stade de 6 feuilles (V_6) de la culture, selon les différents traitements.

Dans les sites choisis pour les essais, les modes de travail du sol étaient le labour ou le semis direct. Pendant la période des essais, les autres régies du maïs, principalement les applications des herbicides, étaient effectuées par les producteurs qui collaboraient au projet. À l'automne de chaque année, les épis de maïs ont été cueillis manuellement dans chaque parcelle expérimentale et ensuite battus à l'aide d'une moissonneuse-batteuse. Un sous-échantillon de 500 g a été prélevé pour déterminer la teneur en eau ainsi que la teneur en azote total des grains. Les tiges ont été coupées manuellement à 5 cm de la base puis ensilées pour déterminer la biomasse de la partie aérienne. Un sous-échantillon de 500 g a également été prélevé pour déterminer la teneur en matière sèche et la teneur en azote total des tiges. Les rendements en grains et la biomasse totale (grains + tiges) ont été exprimés sur une base de matière sèche. Les prélèvements en azote du grain et des tiges ont été obtenus en multipliant la teneur en azote par la biomasse totale en matière sèche.

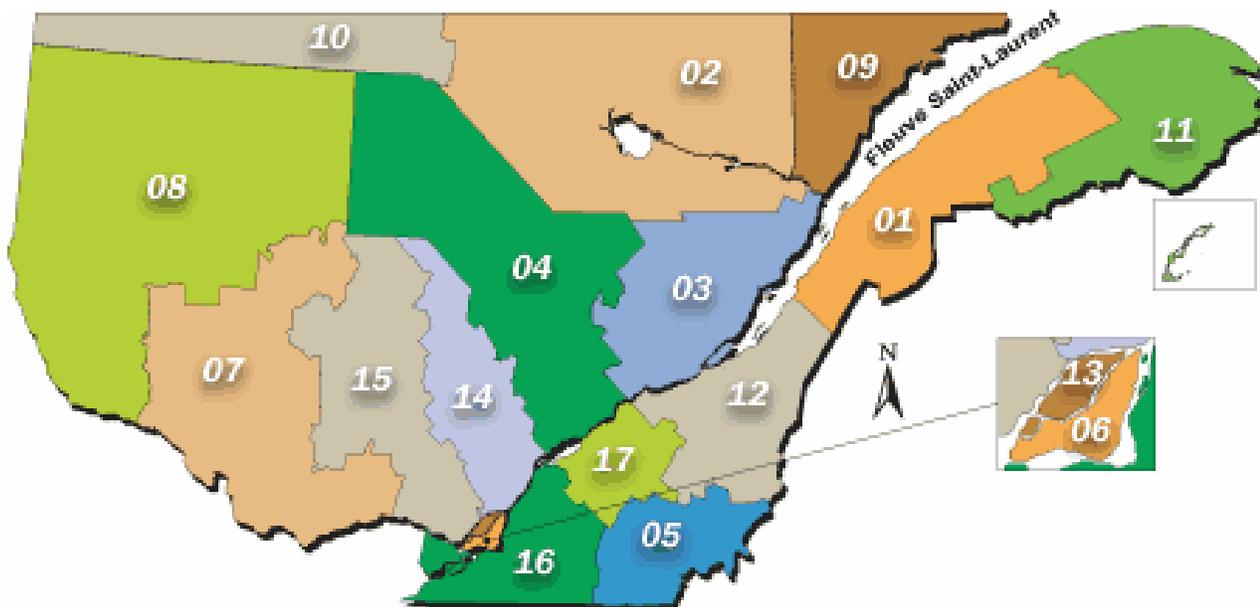


Figure 1. Carte du Québec montrant les régions étudiées.

Régions	Numéros des régions	Sites d'essais	
		2007	2008
Montérégie Ouest	16	7	10
Montérégie Est	16	6	5
Lanaudière	04	5	5
Centre du Québec	17	2	2
Capitale Nationale	03	2	2
Etrie	05	1	2
Chaudière/Appalaches	12	7	6
Total		30	32

2.2 Essai sur la pomme de terre (2007-2009)

Le dispositif expérimental utilisé était en blocs aléatoires complets avec trois répétitions et consistait en cinq traitements, soit cinq doses croissantes d'azote (0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha). Le type d'engrais apporté était sous forme de nitrate d'ammonium calcique. Le phosphore et le potassium ont été apportés sous forme de superphosphate (60 kg N/ha) et de muriate de potassium (100 kg/ha) et tous les types d'engrais étaient apportés à la plantation.

2.3 Échantillonnage des sols et des végétaux

Dans chacun des sites destinés aux essais de maïs et de pommes de terre, un échantillon de sol a été prélevé à la profondeur de 0-30 cm en présemis (PPNT) avant toute application d'engrais. Lorsque le maïs avait atteint environ 20 cm de hauteur, c'est-à-dire au stade V_6 (5-6 feuilles), un échantillon de sol à la profondeur de 0-30 cm a de nouveau été prélevé dans les traitements témoins (0 kg N/ha) (PSNT). Au même moment, quatre plants de 5-6 feuilles ont été échantillonnés dans ces mêmes parcelles. Les mêmes échantillonnages de sols et de végétaux ont été effectués au stade boutons de la pomme de terre.

Chaque année, plusieurs analyses ont été effectuées sur les sols et les plants de maïs et de pommes de terre. Il s'agit du pH du sol, de la texture, du carbone organique, de l'azote total Kjeldahl du sol (NT), des teneurs en nitrate du sol après incubation aérobie, de l'azote ammoniacal après une incubation anaérobie, des taux de nitrate des sols en présemis (PPNT) et en postlevée du maïs (stade de 5 à 6 feuilles) et au stade boutons de la pomme de terre (PSNT) et des quantités de nitrate des sols déterminées avec Nitrachek en postlevée. Les nitrates du sol en présemis ont été extraits avec la solution 2M KCl, tandis que les teneurs du sol en nitrate en postlevée ont été déterminées avec 2M KCl et avec Nitrachek ((0,025M $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ + 0,050M NaCl). Nous avons également déterminé le carbone et l'azote ainsi que les nitrates du sol extraits à l'eau froide et chaude. Une extraction à l'eau a permis de mesurer les teneurs en nitrate ($N-NO_3$) des jeunes plants et une digestion Kjeldahl a permis de mesurer les teneurs en N total des plants de maïs et des feuilles de pommes de terre. Pour les échantillons de récolte, c'est-à-dire les grains et les tiges de maïs ainsi que les tubercules de pommes de terre, une digestion Kjeldahl a permis de mesurer les teneurs en azote total.

2.4 Analyses statistiques

Pour les essais aux champs sur maïs et pomme de terre, l'analyse de variance avec PROC MIXED a été utilisée afin de déterminer si l'apport de différentes doses d'engrais azotés avait un effet significatif sur les rendements et les prélèvements en azote des cultures étudiées. Dans les cas où l'effet du facteur dose était significatif, nous avons déterminé si cet effet était linéaire ou quadratique à l'aide de contrastes.

Les modèles de réponse aux apports d'engrais azotés dans chaque site ont par la suite été ajustés en utilisant les procédures REG et NLIN de SAS. Les doses économiques qui permettent de déterminer les rendements économiques ont été calculées pour le maïs en considérant le rapport entre le prix du maïs et celui de l'engrais azoté qui était de 10 (1,75 \$/0,175 \$). Pour le modèle quadratique-plateau, l'optimum économique correspond ainsi au point où la dérivée première de la courbe atteint 10. En résolvant l'équation ($b + 2cx = 10$), on calcule X (dose économique). En substituant les valeurs de x dans l'équation ($Y = a + bx + cx^2$) représentant la réponse quadratique, nous avons calculé les rendements économiques du maïs.

Pour la culture de la pomme de terre, les doses économiques associées aux rendements économiques ont été déterminées au point d'inflexion de la courbe lorsque la réponse aux engrais était selon le modèle quadratique. Les doses et les rendements économiques ont été calculés de la même manière que pour le maïs, mais en considérant que la dérivée première de la courbe est égale à 0.

Les données de production pour les deux cultures (rendements économiques et doses économiques) ont par la suite été corrélées aux propriétés des sols étudiés et aux indicateurs azotés du sol et de la plante. L'analyse en composantes principales combinée à la régression « stepwise » a été utilisée pour les données du maïs afin de déterminer la relation entre les principales propriétés des sols, les indicateurs azotés et les différentes données de production de maïs-grain.

Pour le calcul des seuils critiques des indicateurs azotés les plus performants, des modèles linéaire et quadratique ont d'abord été ajustés avec la procédure REG de SAS pour exprimer le rendement relatif maximum en fonction des valeurs mesurées pour ces indicateurs. Dans les cas où le modèle quadratique était justifié, les valeurs maximales de ces indicateurs ont été calculées pour la valeur de la dérivée égale à 0 à l'aide de la procédure NLMIXED de SAS.

3. RÉSULTATS

3.1 Réponse du maïs aux apports d'engrais azotés

3.1.1 Propriétés des sols

Cette étude a été conduite dans les principales régions agricoles du Québec situées entre les latitudes 45° 18' N et 46° 48' N (Figure 1). Les sites sous essais en 2007 étaient différents de ceux de 2008. Ces sites couvraient 7 régions agricoles ayant différentes conditions climatiques et les unités thermiques pour le maïs variaient de 2 000 à 3 000 UTM. De plus, les précipitations étaient beaucoup plus abondantes et la température de l'air plus froide en 2008 qu'en 2007. Les propriétés des sols étudiés sont présentées au tableau 1. Les types de sol étaient aussi très variés, allant de sols sablonneux, loam et loam argileux, ces derniers types de sol étant les plus dominants. Les valeurs de pH du sol variaient de 5,5 à 7,8 en 2007 et de 5,3 à 7,5 en 2008. Les teneurs du sol en N variaient de 0,09 à 0,26 % et celles du carbone entre 0,9 à 3 % en 2007, soit 1,5 à 5,2 % de matière organique.

Tableau 1. Propriétés et indicateurs azotés de sols et de plantes dans 62 sites cultivés en maïs-grain (2007 et 2008).

Indicateurs	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne
	2007			2008		
pH eau	5,5	7,8	6,6	5,3	7,5	6,6
Argile (%)	12	68	31	8	64	32
N total (g kg ⁻¹)	0,87	2,6	1,6	0,6	3,5	1,7
CO (g kg ⁻¹)	9,5	30,2	20,1	6,1	35,3	18,3
TOC-F (mg kg ⁻¹)	87	301	166	68	247	135
TOC-C (mg kg ⁻¹)	319	913	517	218	623	391
N soluble-F (mg kg ⁻¹)	6,1	37,7	17,9	0,1	32,5	13,3
N soluble-C (mg kg ⁻¹)	22,4	102,0	48,6	10,3	76,8	31,3
PPNT (mg kg ⁻¹ N-NO ₃)	1,79	24,20	6,41	1,23	13,40	4,13
PSNT (mg kg ⁻¹ N-NO ₃)	2,75	38,23	11,05	1,57	23,27	7,85
Nitrachek (mg kg ⁻¹ NO ₃)	9,54	114,22	31,76	3	64	28
NO ₃ plants (mg kg ⁻¹ N-NO ₃)	4	4932	1111	1	3 320	806
N total plants (g kg ⁻¹)	22,7	39,4	31,9	19,1	41,9	30,5

CO : carbone organique; TOC-F : carbone extrait à l'eau froide; TOC-C : carbone extrait à l'eau chaude; N soluble-F : N extrait à l' eau froide; N soluble-C : N extrait à l'eau chaude; PPNT : N-N NO₃ en présemis; PSNT : N- NO₃ en postlevée; Nitrachek : NO₃ en postlevée mesuré avec le test Nitrachek; NO₃ plants : teneur en NO₃ des plants au stade 6 feuilles; N total plants : teneur en NO₃ des plants au stade 6 feuilles

En 2008, les contenus en N des sols variaient de 0,06 à 0,35 % et ceux de carbone de 0,06 et 0,35 % (tableau 1). Les teneurs du sol en nitrate mesurées avant le semis (PPNT) ont varié de 1,8 à 24,20 mg kg⁻¹ en 2007 et de 1,23 à 13,40 mg kg⁻¹ en 2008. Pendant les deux années d'étude, les teneurs du sol en nitrate en postlevée (PSNT) étaient plus élevées que celles mesurées en présemis. Les quantités de nitrate mesurées en postlevée étaient généralement deux fois plus élevées que celles qui étaient déterminées sur des sols prélevés avant le semis, ce qui reflète l'azote minéralisable de la MO des sols ou des précédents culturaux. Les plus faibles teneurs de nitrate sur les sols échantillonnés en présemis indiquent probablement qu'une partie de l'azote minéralisé de la MO ou des précédents culturaux au cours de l'automne précédant a pu subir un lessivage printanier. Lorsqu'elles étaient exprimées sous forme de NO₃-N, les teneurs en nitrate mesurées en postlevée avec Nitratechek étaient similaires à celles des nitrates extraits avec la solution 2M KCl.

Les quantités de C extrait à l'eau froide et chaude représentaient respectivement 0,7 à 0,8 % et 2,1 à 2,5 % du carbone du sol. Les teneurs en N extrait à l'eau froide et chaude représentaient respectivement 0,7 à 1,1 % et 1,8 à 3,0 % de l'azote total du sol. Ces fractions de la matière organique constituent la principale source de l'azote qui est facilement minéralisable et disponible aux cultures au cours de la saison de végétation.

3.1.2 Réponse du maïs-grain aux engrais azotés en 2007 et 2008

La réponse du maïs-grain était variable selon les sites étudiés (tableaux 2 et 3). Dans cette étude, le rendement du maïs dans le traitement témoin sans engrais azotés a varié de 0,5 à 9,6 tonnes/ha en 2007 et de 0,3 à 10,3 tonnes/ha en 2008. Les rendements moyens du maïs-grain (moyenne des traitements) variaient de 4,3 tonnes/ha à 11,1 tonnes/ha en 2007 et à partir de 1,5 à 11,0 tonnes/ha en 2008. Ce dernier paramètre a exprimé le potentiel de chaque sol étudié à fournir de l'azote aux cultures. Les rendements moyens du maïs-grain étaient aussi variables selon les régions, étant supérieurs à 5 t/ha en Montérégie Ouest et en Montérégie Est, régions ayant des unités thermiques plus élevées en comparaison à d'autres régions à plus faibles unités thermiques.

Tableau 2. Rendements et prélèvements en azote de la culture de maïs en 2007 (30 sites).

Sites	Rend. max (t /ha)	Rend. écon. (t /ha)	Dose écon. (kg N/ha)	Prél. N témoin (kg /ha)	Prél. N moyen (kg /ha)	Rend. relatif (%)
Ferme M. Deslauriers	10,8	10,7	200	74	142	87
Ferme Gfeller	11,5	11,3	170	80	154	85
Ferme R. Lamoureux	11,6	11,5	222	55	127	75
Ferme B. Lamoureux	10,3	9,8	200	42	88	70
Ferme H. Landry	11,6	11,4	107	144	188	96
Ferme J-F Riendeau	8,5	8,8	175	69	123	84
Ferme E. Bernard	10,8	(1)		136	192	98
IRDA ch. 8	13,3	13,3	200	68	129	71
IRDA ch 10	12,8	12,7	166	106	169	87
Ferme Hélyon	11,9	11,6	205	66	144	80
CEROM*	10,2	10,0	166	78	145	88
Ferme J. Hamel	11,7	11,4	170	70	151	85
Ferme Guilbert	10,8	10,9	216	45	132	75
Ferme Bonneterre	10,2	10,0	156	58	139	86
Ferme Roch	9,5	(1)		132	167	96
Ferme Jojo	9,4	(1)		179	171	94
Ferme Bonneterre (Boisjoli)	10,4	(1)		126	160	91
CIEL**	12,2	12,1	157	148	217	91
Ferme Tourigny	11,0	10,7	215	70	130	78
Ferme Amiénoise	12,3	12,0	124	118	181	93
Ferme Paré & Fils	8,3	8,2	133	79	146	90
IRDA Deschambault ch D6-2	9,0	9,0	196	36	99	55
IRDA Deschambault ch D2-2	9,0	9,4	233	23	95	64
IRDA Saint-Lambert 58A	9,1	8,6	150	100	148	75
IRDA Saint-Lambert 58C	9,5	9,6	160	74	134	76
IRDA Saint-Lambert 58D	7,0	7,7	231	23	85	54
IRDA Saint-Lambert mono	6,9	7,4	235	34	90	60
IRDA Saint-Lambert rot. 2	7,5	7,4	124	81	130	86
IRDA Saint-Lambert rot. 3	7,9	8,4	232	61	113	65
IRDA Saint-Lambert rot. 4	7,6	7,4	73	113	138	91

CEROM : Centre de recherche sur les grains, St-Mathieu de Beloeil; ** CIEL : Carrefour industriel expérimental de Lanaudière, L'Assomption; (1) : apport d'azote non significatif; Rend. max. : rendement maximum obtenu (t/ha); Prél. N témoin : prélèvement en N du traitement sans azote; Prél. N moyen : prélèvement moyen en N.

Les variations des rendements du maïs-grain sont attribuables à plusieurs facteurs. Dans cette étude, les différences entre les types de sol, les teneurs en matière organique, les unités thermiques, les précipitations et l'historique des précédents culturaux expliquent probablement cette grande variabilité. Les variations des rendements des cultures dépendent principalement de la disponibilité des éléments nutritifs, des unités thermiques et des régimes de précipitations (Schmidt et al., 2002). Dans les sols témoins sans apport d'azote, les prélèvements en azote du maïs (grain et tiges) ont varié de 22 à 179 kg N/ha, avec une moyenne de 82 kg N/ha en 2007 et de 10 à 139 kg N/ha avec une moyenne de 60 kg N/ha en 2008 (tableaux 2 et 3).

Tableau 3. Rendements et prélèvements en azote de la culture de maïs en 2008 (32 sites).

Sites	Rend. max	Rend. écon. (t/ha)	Dose écon. (kg N/ha)	Prél. N témoin (kg/ha)	Prél. N moyen (kg/ha)	Rend. relatif (%)
Ferme J. Letellier	11,1	11,1	241	74	142	74
Ferme Landry	9,2		(3)	21	90	62
Ferme M. Deslauriers	12,7	(2)	(3)	73	145	73
Ferme R. Lamoureux	10,8	10,7	169	58	128	83
Ferme B. Lamoureux	12,5	10,0 (2)	150	60	129	88
Ferme J. Dumesnil	13,7	9,5 (2)	150	n.d.	n.d.	86
Ferme Dubuc	11,4	11,2	151	52	139	83
Ferme G. Huot	11,0	10,8	194	54	118	80
IRDA ch 15	11,9	10,8 (2)	150	34	106	73
IRDA ch 10	11,4		(3)	37	112	72
IRDA ch 8	12,4	(2)	(3)	22	96	64
CEROM	10,8	10,6	111	83	154	91
Ferme Hélyon	10,1	10,1	132	106	174	88
CIEL	10,6	10,5	157	28	191	90
Ferme Roch	8,0	7,7	137	92	130	108
Ferme Pagé	9,7	9,5	191	67	147	80
Ferme Bonneterre	9,4	9,3	137	112	164	92
Ferme Lafortune	9,3	9,2	176	71	133	82
Ferme Amiénoise	10,5	10,1	200	90	156	89
Ferme Tourigny	9,0	8,4	116	68	130	90
Ferme Paré & Fils	7,0	6,9	129	86	153	88
Ferme Enright	8,5	8,0	116	139	171	86
IRDA Deschambault ch D6-2	6,1	6,0	200	13	71	73
IRDA Deschambault ch D2-2	5,3	5,2	137	10	62	58
IRDA Saint-Lambert 58A	4,1	4,1 (2)	(3)	15	44	51
IRDA Saint-Lambert 58C	5,3	5,3 (2)	(3)	27	67	28
IRDA Saint-Lambert 58D	3,9	3,9 (1)		16	55	10
Irda St-Lambert mono	3,2	3,2 (4)		18	47	9
Irda St-Lambert rot. céréales	5,2	(1)		95	126	83
IRDA Saint-Lambert rot. prairies	3,0	3,0 (1)		50	61	53

CEROM : Centre de recherche sur les grains, Saint-Mathieu de Beloeil; ** CIEL : Carrefour industriel expérimental de Lanaudière, L'Assomption; (1) : apport d'azote non significatif; (2) : Effet quadratique non significatif; (3) : Plateau non atteint; (4) Modèle ni linéaire ni quadratique; Prél. N témoin : prélèvement en N du traitement sans azote; Prél. N moyen : prélèvement moyen en N.

Les rendements économiques du maïs ont varié entre 7,4 et 13,3 tonnes/ha en 2007 et de 5,2 à 11,2 tonnes/ha en 2008 (tableaux 2 et 3). Les rendements économiques étaient légèrement plus faibles en 2008 qu'en 2007, et cela peut être relié aux plus grandes précipitations et températures plus froides survenues au moment où le maïs était dans une phase cruciale de croissance en 2008. Ces conditions ont probablement affecté la disponibilité et l'absorption de l'azote du sol et réduit par conséquent la croissance du maïs. Des pertes de rendement supérieures ou égales à 1,3 tonnes /ha ont également été observées par Scharf (2001) au cours des années plus humides, en comparaison avec les conditions climatiques favorables.

Les doses économiques pour atteindre les rendements économiques du maïs ont varié de 73 à 235 kg N/ha en 2007 pour 30 sites et entre 48 et 200 kg N/ha pour 32 sites en 2008 (tableaux 2 et 3). Ces valeurs reflètent une forte variabilité de la fourniture de l'azote entre les sites. Ces larges variations de la fourniture des sols en azote ont aussi été observées dans une étude effectuée en Caroline du Nord (Williams et al., 2007). Ces résultats signifient que les doses d'engrais azotés peuvent être diminuées selon la richesse des sols en azote disponible.

Parmi les 26 sites qui ont répondu à la fertilisation azotée en 2007, plus de la moitié (14/26) a présenté des doses économiques d'engrais azotés (73 à 175 kg N/ha) inférieures ou égales à celle qui est actuellement recommandée pour le maïs-grain au Québec (170 kg N/ha; CRAAQ, 2003). Pour 8 autres sites, les doses économiques ont varié de 196 à 235 kg N/ha. En 2008, les doses économiques ont varié entre 48 à 165 kg N/ha pour 15 sites et elles étaient supérieures à 170 kg N/ha pour 6 sites. Ces résultats démontrent des réductions des doses d'engrais azotés dans 70 % des sites étudiés où les sols avaient des teneurs élevées en matière organique et en azote disponibles. Ces sites avaient des précédents qui ont enrichi les sols en azote minéralisable (prairie, apports antérieurs de fumiers). Des recherches ont en effet indiqué qu'on peut obtenir entre 30 et 75 \$ de profit supplémentaire à l'hectare si on considère les crédits de l'azote dérivé de la MO des sols et des précédents culturaux (Bundy, 2000).

Les doses d'engrais azotés ont varié entre 180 et 225 kg N/ha dans 10 % des sites étudiés. Les tableaux 2 et 3 montrent que dans les sites avec des doses économiques supérieures à 180 kg N/ha, certains champs présentaient des rendements maxima parmi les plus élevés alors que d'autres ont donné des rendements et des prélèvements en N plus faibles. Parmi ces sites avec des doses économiques supérieures à 180 kg N/ha, 3 possédaient une bonne structure et étaient situés dans une région ayant des unités thermiques élevées. Dans ce cas, ces conditions ont favorisé une meilleure efficacité des engrais azotés apportés. Parallèlement, des doses économiques supérieures à 180 kg N/ha ont aussi été retrouvées dans des sols mal drainés à cause du compactage, ce qui a réduit la fourniture du sol en azote ainsi que les coefficients d'utilisation des engrais azotés. Ces situations ont par conséquent nécessité de fortes doses d'engrais azotés pour atteindre les rendements maxima.

Parmi les sites étudiés en 2007 et 2008, environ 10 % n'ont pas répondu aux apports d'engrais azotés, ce qui signifie que les apports d'engrais azotés n'avaient pas augmenté les rendements en maïs. Parmi ces sites, certains, qui étaient cultivés en choux-fleurs (Ferme Jojo 2007) l'année précédant la culture de maïs, avaient des teneurs élevées en azote résiduel à cause d'apports élevés en engrais azotés. D'autres sols avaient reçu régulièrement des fumiers ou des lisiers pendant les années qui ont précédé la culture de maïs dans cette étude. Enfin, trois de ces sites avaient des précédents de prairies qui avaient enrichi les sols en azote facilement minéralisable et par conséquent disponible au maïs comme culture suivante.

[Bien que les estimations des quantités d'azote provenant de la MO du sol ou de divers précédents culturaux ne sont pas toujours précises (Lory et Scharf, 2003), les résultats de cette recherche valident les recommandations du CRAAQ qui suggère de considérer l'azote de la matière organique et des précédents culturaux (cultures de rotation, apports antérieurs de fumiers) dans l'établissement des doses optimales d'engrais azotés.]

3.2 Réponse de la pomme de terre aux apports d'engrais azotés

L'apport d'engrais azotés joue un rôle important dans la production de pommes de terre. Par contre, en cas d'excès, l'azote favorise la croissance végétative au détriment de la tubérisation. Pour cette culture, les quantités d'azote à appliquer sont très importantes et dépendent de plusieurs facteurs du sol (texture, structure et degré de compactage, pH, cultures précédentes, disponibilité de l'azote du sol ou des matières organiques enfouies).

Cette étude a été effectuée sur une période de trois ans pour connaître les réponses de la pomme de terre aux apports d'engrais azotés sous différents précédents culturaux et divers types de sol. Entre 2007 à 2009, des essais de fertilisation de la pomme de terre ont ainsi été conduits sur 14 sites situés à l'Île d'Orléans et à Deschambault. Ces sites appartenaient aux séries Île d'Orléans et Batiscan et leurs textures étaient principalement le loam argileux et le loam sableux (tableau 4). Les valeurs de pH variaient de 5,6 à 6,3, celles du carbone de 1,36 à 2,64 % et celles de l'azote total entre 0,13 et 0,25 %. Les précédents culturaux étaient la pomme de terre, l'orge, la céréale grainée, le maïs ensilage, l'avoine, le millet perlé, le millet sibérien, la moutarde et le maïs (tableau 4).

Tableau 4. Propriétés des sols cultivés en pomme de terre (2007 à 2009).

Sites	Cultivar	Série de sol	Précédent cultural	Texture	pH	C (%)	N total (%)
2007							
Île d'Orléans 1	AC Chaleur	Île d'Orléans	Pomme de terre	Loam argileux	6,1	2,58	0,25
Ile d'Orléans 2	Nordonna	Île d'Orléans	Pomme de terre	Loam sablo-argileux	5,6	1,89	0,16
Ile d'Orléans 3	Goldrush	Batiscan	Pomme de terre	Loam sablo-argileux	6,4	1,36	0,13
Deschambault 1	Andover	Batiscan	Orge	Loam	5,9	1,69	--
2008							
Deschambault 2	Andover	Batiscan	Orge	Loam sableux très fin	6,0	1,91	0,18
Deschambault 3	Goldrush	Batiscan	Orge	Loam sableux fin	6,0	2,34	0,20
2009							
Deschambault 4	Goldrush	Batiscan	Céréales grainées	Loam sableux	6,2	2,16	0,17
Deschambault 5	Goldrush	Batiscan	Maïs ensilage	Loam sableux	5,7	1,67	0,14
Deschambault 6	Snowden	Batiscan	Avoine	Loam sableux	6,3	1,98	0,18
Deschambault 7	Snowden	Batiscan	Millet perlé	Loam sableux	6,3	2,62	0,20
Deschambault 8	Snowden	Batiscan	Moutarde	Loam sableux	6,3	2,64	0,21
Deschambault 9	Snowden	Batiscan	Orge	Loam sableux	6,3	2,41	0,19
Deschambault 10	Snowden	Batiscan	Maïs	Loam sableux	6,3	1,90	0,16
Deschambault 11	Snowden	Batiscan	Millet sibérien	Loam sableux	6,3	2,17	0,17

Les principaux indicateurs d'azote étudiés étaient les teneurs du sol en nitrate en présemis (PPNT) et en postlevée (PSNT) déterminées avec une solution de 2M KCl, les nitrates déterminés avec Nitrachek en postlevée, ainsi que les teneurs en nitrate et en azote total dans les plants au stade boutons de la culture. En présemis, les teneurs en nitrate (N-NO₃) dans le sol ont varié de 3,06 à 12,70 mg N-NO₃/kg et elles variaient de 5,45 à 21,47 mg N-NO₃/kg en postlevée (tableau 5). De façon générale, les teneurs en nitrate étaient plus élevées en postlevée qu'en présemis. Les concentrations en nitrate (NO₃) mesurées avec Nitrachek ont varié de 17 à 74 mg NO₃/kg. Au stade boutons de la culture, les nitrates dans les plants ont varié de 36 à 3891 mg N-NO₃/kg et le pourcentage de N total variait de 3,09 à 5,05 % (tableau 5).

Tableau 5. Principaux indicateurs d'azote analysés dans les sites étudiés sur la pomme de terre.

Sites	N-NO ₃ PPNT (mg/kg)	N-NO ₃ PSNT (mg/kg)	Nitrachek NO ₃ (mg/kg)	Stade boutons NO ₃ (mg/kg)	Stade boutons N total (%)
2007					
Île d'Orléans 1	6,26	21,47	74	3891	4,66
Ile d'Orléans 2	10,50	11,46	45	1531	4,17
Ile d'Orléans 3	6,37	10,07	32	2693	4,68
Deschambault 1	4,88	6,94	18	463	3,59
2008					
Deschambault 2	3,09	6,5	36	666	3,41
Deschambault 3	3,06	7,27	51	108	3,09
2009					
Deschambault 4	4,14	5,45	26	36	3,35
Deschambault 5	6,19	7,99	36	1372	5,05
Deschambault 6	6,27	8,83	29	960	4,47
Deschambault 7	8,56	9,56	35	1161	4,60
Deschambault 8	12,70	12,90	39	1172	4,63
Deschambault 9	5,84	12,47	41	871	4,43
Deschambault 10	4,72	7,87	27	333	4,19
Deschambault 11	4,88	5,62	17	498	4,24

Les rendements de la pomme de terre sont présentés au tableau 6. À l'exception de trois sites, les apports d'engrais azotés ont accru de façon significative les rendements en pomme de terre. La réponse de la pomme de terre à l'apport d'engrais azotés a été généralement de type quadratique, ce qui signifie que les rendements se sont accrus avec les doses d'azote et ont cessé de croître après l'atteinte du rendement maximum. Les rendements vendables de la pomme de terre ont varié de 28,5 à 42,2 tonnes/ha.

Pour produire des rendements maxima de pommes de terre, les doses économiques d'azote ont varié de 46 à 200 kg N/ha. Dans la plupart des sites étudiés, le sol a fourni une importante quantité d'azote à la culture de pommes de terre, ce qui a permis d'obtenir des rendements maxima avec seulement des doses réduites d'azote. En effet, les doses optimales étaient inférieures à 150 kg N/ha (dose recommandée par le CRAAQ, 2003) dans cinq sites et on remarque que, de façon générale, les quantités d'azote total et la matière organique étaient plus élevées dans ces sols (tableau 4). Les doses optimales étaient supérieures à 150 kg N/ha dans les sites où, généralement, les teneurs en azote et en matière organique étaient les plus faibles. Ces résultats démontrent qu'il est possible de diminuer les doses d'engrais azotés pour la pomme de terre en fonction de la richesse du sol en azote.

Tableau 6. Niveaux des rendements de la pomme de terre et paramètres de régression suivant les applications d'engrais azotés (2007, 2008 et 2009).

Sites	Effet de la dose	Effet linéaire de la dose	Effet quadratique de la dose	Paramètres de régression			Rend. écon. (t/ha)	Dose écon. (kgN/ha)	Rend. relatif (%)
				a	b	c			
2007									
Île d'Orléans 1	0,2886	0,0691	0,3320	27,77	0,0995	-0,00044	33,4	114	96
Île d'Orléans 2	0,0002	<,0001	0,0332	17,91	0,1720	-0,00065	29,3	132	89
Île d'Orléans 3	0,0005	<,0001	0,0077	16,91	0,2326	-0,00087	32,4	133	86
Deschambault 1	0,0546	0,0351	0,0487	16,59	0,6314	-0,00690	31,0	46	91
2008									
Deschambault 2	0,0008	<,0001	0,0542	11,97	0,2146	-0,00057	32,0	187	78
Deschambault 3	0,0002	<,0001	0,0988	6,31	0,1828	-0,00038	28,5	242	66
2009									
Deschambault 4	<,0001	<,0001	0,0097	12,84	0,2676	-0,00061	42,2	219	72
Deschambault 5	<,0001	<,0001	0,0010	13,27	0,2752	-0,00073	39,3	189	76
Deschambault 6	0,0118	0,0022	0,7133	29,80	0,05077	---	41,8	200	83
Deschambault 7	0,0034	0,0008	0,0287	23,88	0,2187	-0,00097	36,2	112	91
Deschambault 8	0,0727	0,0281	0,4263	24,38	0,4954	-0,00533	35,9	46	94
Deschambault 9	0,0343	0,0040	0,7712	26,85	0,05463	---	37,9	200	85
Deschambault 10	0,0961	0,0129	0,5893	22,34	0,04461	---	29,9	200	90
Deschambault 11	0,0011	0,0001	0,0172	19,94	0,2179	-0,00078	33,2	140	86

Les analyses de corrélation ont également démontré que les doses économiques dans le cas de la pomme de terre étaient significativement et inversement corrélées aux teneurs du sol en nitrate déterminées en présemis (PPNT) ou en postlevée (PSNT) (tableau 7). Ces résultats indiquent que les doses optimales d'azote ont diminué avec les augmentations de l'azote disponible dans les sols. Par ailleurs, les rendements relatifs ont aussi été fortement corrélés aux teneurs de nitrate du sol mesurées en postlevée. Comme pour le maïs, les rendements vendables de pommes de terre n'étaient pas significativement corrélés aux teneurs en nitrate des sols.

Tableau 7. Coefficients de corrélation (Spearman) entre les rendements de pommes de terre et les différents indicateurs de la fertilité azotée.

	Rend. écon.	Dose écon.	Rend. relatif	NO ₃ présemis	NO ₃ postlevée	Nitrachek	NO ₃ plants	N tot plants	Prél. N
Rend. écon.	1,00	0,201	0,01	0,09	-0,04	-0,18	-0,06	0,32	0,55*
Dose écon.	0,20	1,00	-0,44	-0,62*	-0,59*	-0,64*	-0,36	-0,32	0,12
Rend. relatif	0,01	-0,44	1,00	0,47	0,63*	0,58*	0,45	0,59*	0,45
NO₃ présemis	0,08	-0,62*	0,47	1,00	0,45	0,18	0,33	0,58*	0,25
NO₃ postlevée	-0,04	-0,35	0,63*	0,45	1,00	0,82**	0,84**	0,50	-0,03
Nitrachek	-0,18	0,44	0,58*	0,18	0,82**	1,00	0,65*	0,16	-0,21
NO₃ plants	-0,06	-0,36	0,45	0,33	0,84**	0,65*	1,00	0,61*	-0,27
N tot plants	0,32	-0,32	0,59*	0,58*	0,50	0,16	0,61*	1,00	0,36
Prél. N	0,55*	0,12	0,45	0,25	-0,03	-0,21	-0,27	0,36	1,00

3.3. Choix d'indicateurs de la fertilité azotée

3.3.1 Corrélations entre les indicateurs azotés du sol et de la plante et les doses économiques pour le maïs en 2007 et 2008

Les résultats ont montré une variation importante de la disponibilité de l'azote entre les deux saisons étudiées. Cette variation saisonnière dépend en bonne partie des conditions climatiques différentes observées. Par conséquent, les paramètres du sol et de la culture qui pourraient être reliés à la disponibilité de l'azote du sol pour les cultures ont été choisis et évalués pour leur capacité à prédire les doses et les rendements économiques. Les coefficients de corrélation de Pearson entre les doses économiques, de même que les paramètres du sol et de la culture en 2007 et 2008 sont présentés aux tableaux 8 et 9. En 2007, des corrélations négativement significatives ont été trouvées entre les doses économiques et les nitrates extraits en présemis avec 2M KCl (PPNT) ($r = -0,46^*$), les nitrates extraits en postlevée avec Nitrachek ($r = -0,60^{**}$), la concentration en nitrate de la plante ($r = -0,58^{**}$) et l'azote total de la plante aux stades V₅ à V₆ ($r = -0,50^*$) à la mi-saison (tableau 4). Des relations négatives entre les teneurs de nitrate dans les sols et les doses économiques ont également été observées par Bélanger et al. (2001), Scharf (2001) et Schmidt et al. (2009) pour les cultures de pommes de terre et de maïs. De même, des relations significatives ont été observées entre les doses économiques et les prélèvements de l'azote par le maïs dans le traitement témoin sans engrais azotés (données non présentées).

Tableau 8. Corrélations Pearson entre les propriétés du sol, les doses économiques d'azote et les rendements économiques en 2007 (n = 22).

	Dose N écon.	Rend. écon.	UTM	C. O.	N tot	TOC-F	TOC-C	N soluble-F	N soluble-C	PPNT	PSNT	Nitrachek	NO ₃ plants	N total plants
Rend. écon.	0,02													
UTM	0,12	0,82***												
C. O.	0,01	-0,47*	-0,23											
N total	-0,05	-0,27	-0,05	0,92***										
TOC-F	0,52*	-0,14	-0,18	0,59**	0,62**									
TOC-C	-0,27	-0,49**	-0,41*	0,83***	0,71***	0,69***								
N soluble-F	-0,45*	0,15	0,23	0,59**	0,70***	0,76***	0,62**							
N soluble-C	-0,33	-0,14	-0,03	0,76***	0,80***	0,69***	0,83***	0,82***						
PPNT	-0,46*	0,10	0,21	0,59**	0,70***	0,64**	0,59**	0,94***	0,74***					
PSNT	-0,16	-0,06	0,09	0,05	0,09	-0,30	0,01	0,02	0,04	0,19				
Nitrachek	-0,60**	-0,09	0,02	0,43*	0,40	0,51**	0,61**	0,68***	0,58**	0,70***	0,32			
NO₃ plants	-0,58**	-0,33	-0,58**	0,30	0,18	0,37	0,61**	0,19	0,28	0,24	0,11	0,54**		
N total plants	-0,50**	-0,27	-0,28	0,26	0,14	0,34	0,52*	0,26	0,26	0,27	0,07	0,59**	0,69***	

UTM : unités thermiques maïs; C.O. : carbone organique; TOC-F : carbone soluble à l'eau froide; TOC-C : carbone soluble à l'eau chaude; N soluble-F : N extrait à l'eau froide; N soluble-C : N extrait à l'eau chaude; PPNT : N-NO₃ présemis avec 2M KCl; PSNT : N-NO₃ postlevée avec 2M KCl; Nitrachek : NO₃ avec Nitrachek en postlevée; NO₃ plants : teneur en nitrate du plant de maïs au stade 6 feuilles; N total plants : teneur en N total du plant de maïs au stade 6 feuilles; *, **, ***, significat à P > 0,05, 0,01, et 0,001 respectivement.

Tableau 9. Corrélations Pearson entre les propriétés du sol, les doses économiques d'azote et les rendements économiques en 2008 (n = 19).

	Dose N écon.	Rend. écon.	UTM	C. O.	N tot	TOC-F	TOC-C	N soluble-F	N soluble-C	PPNT	PSNT	Nitrachek	NO ₃ plants
Rend. écon.	-0,16												
UTM	-0,13	0,74***											
C. O.	-0,45*	-0,05	-0,29										
N total	-0,45*	-0,04	-0,28	0,98***									
TOC-F	-0,54*	0,38	0,24	0,64**	0,65**								
TOC-C	-0,27	-0,23	-0,42*	0,71***	0,67**	0,18							
N soluble-F	-0,48*	0,25	0,08	0,63**	0,71***	0,49*	0,34						
N soluble-C	-0,34	-0,21	-0,48*	0,79***	0,78***	0,21	0,91***	0,55*					
PPNT	-0,24	-0,06	-0,33	0,74***	0,77***	0,19	0,69**	0,71***	0,86***				
PSNT	-0,53*	-0,09	-0,42*	0,67**	0,70***	0,49*	0,61**	0,53*	0,74***	0,72**			
Nitrachek	-0,65**	-0,03	-0,23	0,53*	0,55*	0,40	0,48*	0,42*	0,53*	0,53*	0,91***		
NO₃ plants	-0,29	-0,08	-0,26	0,20	0,21	0,10	0,51*	0,05	0,47*-	0,27	0,59**	0,61**	
N total plants	-0,29	0,37	0,14	0,19	0,21	0,43*	0,27	0,08	0,18	0,11	0,53*	0,66**	0,71***

Voir légende sous le tableau 8.

En 2008, des corrélations négatives significatives ont été obtenues entre les doses économiques et le carbone organique ($r = -0,45 *$), l'azote total ($r = -0,45 *$), l'azote ($r = -0,48 *$) et le carbone ($r = -0,54 *$) extraits à l'eau froide, ainsi que les nitrates extraits en postlevée avec 2M KCl ($r = -0,53 *$) et avec Nitrachek ($r = -0,65 **$) (tableau 9). Ces résultats démontrent que les doses d'engrais azotés moins élevées sont nécessaires pour atteindre les rendements maxima économiques lorsque les sols contiennent des teneurs élevées en carbone et en azote facilement minéralisables au cours de la saison de végétation, ainsi que des teneurs en nitrate élevées à la mi-saison.

Contrairement à l'azote et au carbone extraits à l'eau chaude, les doses économiques étaient significativement reliées aux teneurs de ces éléments extraits à l'eau froide (tableaux 8 et 9), ce qui indique que l'eau chaude (bouillante) extrait probablement plus de carbone et d'azote que l'eau froide. Une partie de cet azote extrait à l'eau chaude est difficilement minéralisable par les microorganismes du sol, et elle est par conséquent moins disponible aux cultures (Davidson et al., 1987). Nous pouvons alors conclure que les teneurs en C et en N extraits à l'eau froide représentent la proportion labile de la matière organique qui est facilement minéralisable par les microorganismes du sol.

Cette étude montre que les relations entre les doses économiques et les indices d'azote choisis n'étaient pas similaires d'une année à l'autre. Par exemple, les doses économiques et les nitrates en présemis étaient bien corrélés ($r = 0,46 *$) en 2007, mais une faible corrélation ($r = -0,24$) était obtenue en 2008 (tableaux 8 et 9). Cela peut être relié aux conditions climatiques pluvieuses qui ont caractérisé l'année 2008 en comparaison avec 2007. Ces résultats sont conformes aux observations de Bilbao et al. (2004), qui ont rapporté une bonne corrélation entre les teneurs en nitrate du sol en présemis et les doses économiques ($r^2 = 0,93$) lorsque les problèmes de lessivage et de stress hydrique ne sont pas rencontrés. Dans la présente étude, les teneurs des sols en nitrate extrait avec 2M KCl en postlevée (au stade V_5 à V_6) étaient également reliées aux doses économiques en 2008 mais pas en 2007. Par exemple, Andraski et Bundy (2002) ont signalé que la relation entre les nitrates en postlevée (au stade V_5 à V_6) et les doses économiques était dépendante de la température de l'air qui affecte la minéralisation de l'azote.

Des relations significatives ont également été observées entre les doses économiques, les nitrates et l'azote total dans la plante au stade de V_5 à V_6 du maïs en 2007, mais pas en 2008 (tableaux 8 et 9).

Pendant les deux années de notre étude, le seul indicateur de l'azote du sol qui a été relié aux doses économiques pour les deux années (2007 et 2009) était le test des nitrates en postlevée extraits avec Nitrachek (tableaux 8 et 9). Un bon prédicateur des doses économiques doit être rapide et efficace pour une large gamme de types de sol, de climats, de rotations, de systèmes de labour et d'hybrides (Scharf, 2001). L'analyse des nitrates du sol avec Nitrachek est un test rapide, facile à manipuler et portable qui permet d'obtenir rapidement les résultats. Ce test pourrait fournir une correction rapide des besoins en engrais azotés basés sur la fourniture du sol en azote. Comme il a été rapporté dans les études précédentes (Jemison et Fox, 1988; Roth et al., 1991; Schmidhalter, 2005), ce test semble prometteur.

[En résumé, les résultats de cette étude ont démontré que les relations entre les doses économiques et certains indicateurs de sol et de culture ont été variables d'une année à l'autre, à l'exception des analyses de nitrate en postlevée. Les tests de nitrate en postlevée étaient meilleurs que les analyses de nitrate en présemis.]

3.3.2 Corrélations entre les indicateurs azotés du sol et de la plante et les rendements économiques de maïs en 2007 et 2008

Les relations entre les indicateurs azotés du sol et de la plante et les rendements économiques du maïs sont présentées aux tableaux 8 et 9. Les rendements économiques du maïs ne sont pas corrélés aux doses économiques d'engrais azotés. Cela a été également observé dans des études menées depuis de nombreuses années et dans de nombreux endroits au nord des États-Unis d'Amérique et dans la province de l'Ontario au Canada (Kachanoski et al., 1996; Bundy, 2000; Lory et Scharf, 2003).

Pendant les deux années de notre étude, seules les unités thermiques ont été constamment reliées aux rendements économiques du maïs en 2007 ($r = 0,82^{***}$) et en 2008 ($r = 0,74^{***}$). Les fortes relations entre les variations climatiques et les rendements économiques pour ces deux années démontrent que les conditions climatiques peuvent expliquer une partie importante de la variation des rendements des cultures, car elles déterminent la croissance des plantes ainsi que la minéralisation de l'azote de la matière organique des sols ou des précédents culturels. Ces résultats sont identiques à ceux de Lobell et Asner (2003), qui ont démontré que la variation climatique était la seule variable corrélée avec les rendements des cultures. De même, Almaraz et al. (2008) ont démontré que les températures du mois de juillet et les précipitations du mois de mai étaient fortement associées à la variabilité du rendement de maïs, expliquant plus de la moitié de la variabilité des rendements. Il a aussi été rapporté que ces variations climatiques ont un effet sur la minéralisation de la matière organique et de l'azote dans les sols (Honeycutt et Potaro, 1990). Notre étude confirme que les variations climatiques entre les régions agricoles sont parmi les facteurs qui ont influencé la minéralisation de l'azote du sol et la disponibilité de l'azote pour la plante, et déterminé par conséquent les niveaux des rendements du maïs.

3.3.3 Relations entre les composantes principales, les rendements et les doses économiques pour le maïs en 2007 et 2008

Pour évaluer la proportion de la variation des doses économiques d'engrais azotés et des rendements économiques du maïs, nous avons effectué une analyse en composantes principales qui regroupait les paramètres corrélés ensemble. Les groupes de paramètres créés (composantes principales) ont par la suite été utilisés comme variables indépendantes (Nyiraneza et al., 2009) pour prédire les doses économiques d'engrais azotés et les rendements économiques du maïs.

En 2007, quatre composantes principales ont été retenues et représentaient 87 % de la variance totale (tableau 10). La première composante principale (CP_1) qui représentait 52 % de la variance totale regroupait les paramètres suivants : le carbone organique, l'azote total, l'azote dissous à l'eau froide et à l'eau chaude, le carbone dissous à l'eau froide et à l'eau chaude et les nitrates en présemis. La deuxième composante (CP_2) a représenté 17 % de la variance totale et incluait les nitrates du sol en postlevée avec Nitratechek et les nitrates et l'azote total de la plante au stade V_5 à V_6 . La troisième composante (CP_3) représentait 12 % de la variance totale et incluait les unités thermiques pour le maïs. Enfin, la quatrième composante (CP_4) représentait 8 % de la variance totale et incluait les nitrates en postlevée extraits avec une solution de 2M KCl.

Tableau 10. Analyse en composantes principales (essai maïs 2007).

Paramètres	Composante₁	Composante₂	Composante₃	Composante₄	CE*
UTM			0,89		0,88
C. O.	0,91				0,91
N total	0,95				0,92
TOC-F	0,71				0,86
TOC-C	0,79				0,92
N soluble-F	0,79				0,96
N soluble-C	0,89				0,86
PPNT	0,79				0,89
PSNT				0,96	0,95
Nitrachek		0,74			0,88
NO₃ plants		0,81			0,87
N total plants		0,87			0,79
Valeur propre (Eigen values)	6,2	2,04	1,44	1,00	
Proportion de la variance	0,52	0,17	0,12	0,08	
Proportion de la variance cumulée	0,52	0,69	0,81	0,89	

* Proportion de variance commune

En 2008, seules trois composantes principales ont été retenues et elles représentaient 83 % de la variabilité totale (tableau 11). La première composante (CP₁) représentait 54 % de la variance totale et regroupait les paramètres suivants : le carbone organique, l'azote total, l'azote et le carbone dissous à l'eau froide et à l'eau chaude, ainsi que les nitrates du sol extraits avec 2M KCL avant le semis. La deuxième composante (CP₂) a expliqué 15 % de la variabilité totale et regroupait les indicateurs du sol et de la plante à la mi-saison : les nitrates extraits avec 2M KCl et avec Nitrachek en postlevée, ainsi que les nitrates et l'azote total de la plante au stade de 5 à 6 feuilles. La troisième composante (CP₃) représentait 14 % de la variabilité totale et contenait les unités thermiques du maïs.

Tableau 11. Analyse en composantes principales (essai maïs 2008).

Paramètres	Composante ₁	Composante ₂	Composante ₃	CE*
UTM			0,85	0,73
C. O.	0,92			0,90
N total	0,94			0,94
TOC-F	0,64			0,82
TOC-C	0,57			0,76
N soluble-F	0,85			0,74
N soluble-C	0,72			0,93
PPNT	0,79			0,82
PSNT		0,65		0,87
Nitrachek		0,77		0,81
NO ₃ plants		0,87		0,85
N total plants		0,93		0,92
Eigen values	6,50	1,87	1,74	
Proportion de la variance	0,54	0,15	0,14	
Proportion de la variance cumulée	0,54	0,69	0,83	

* : Proportion de variance commune

Lorsque les composantes principales choisies ont été utilisées comme variables indépendantes pour prédire les doses économiques (DE) et le rendement économique (RE) en 2007, les relations suivantes ont été observées :

$$DE = 181 - 31,8 \times CP_2 \quad (r^2 = 0,49; P = 0,0002) \quad [5]$$

$$RE = 10105 + 1473 \times CP_3 \quad (r^2 = 0,68; P < 0,0001) \quad [6]$$

$$RE = 10105 + 1473 \times CP_3 - 419,8 \times CP_1 \quad (r^2 = 0,74; P = 0,0569) \quad [7]$$

$$RE = 10105 + 1473 \times CP_3 - 419,8 \times CP_1 - 375 \times PC_2 \quad (r^2 = 0,78; p = 0,0680) \quad [8]$$

En 2007, le modèle de régression pour prédire la dose économique ne comprenait que la deuxième composante principale (les nitrates en postlevée extraits au Nitrachek, les teneurs en nitrate et en azote total de la plante au stade 5 à 6 feuilles à la mi-saison) et représentait 49 % de la variabilité des doses économiques (Eq. 5). Le modèle de régression pour les rendements économiques ne comprenait que la troisième composante principale (unités thermiques du maïs) et représentait 68 % de la variabilité des rendements économiques (Eq. 6). Bien que non significatif à P = 0,05 (5 %), l'ajout des composantes principales 1 et 2 au modèle (Eq. 8) a augmenté la proportion de la variabilité expliquée à 74 et 78 % (Eq. 7 et 8).

Comme en 2007, la variation des doses économiques et des rendements économiques a été évaluée en 2008 en utilisant les composantes principales retenues comme variables indépendantes et les relations suivantes ont été obtenues :

$$- DE = 148,8 - 17,6 \times PC_1 \quad (r^2 = 0,22; P = 0,042) \quad [9]$$

$$- DE = 148,8 - 17,6 \times PC_1 - 14,8 \times PC_2 \quad (r^2 = 0,38; P = 0,061) \quad [10]$$

$$- RE = 9180 + 1212 \times PC_3 \quad (r^2 = 0,49; P = 0,0007) \quad [11]$$

Le modèle de régression pour les doses économiques en 2008 comprenait la première composante principale (carbone organique, azote total, azote total extrait à l'eau froide et à l'eau chaude, carbone total extrait à l'eau froide et à l'eau chaude, ainsi que les nitrates extraits avec 2M KCl avant le semis), qui expliquait 22 % de la variation des doses économiques (Eq. 9). L'ajout de la deuxième composante principale, significative à 6 % de probabilité, a augmenté la proportion de la variabilité expliquée à 38 % (Eq. 10). Comme en 2007, le modèle de régression pour les rendements économiques incluait uniquement les unités thermiques du maïs et expliquait 49 % de la variabilité des rendements économiques (Eq. 11).

Pour les deux années, deux composantes principales (CP₁ et CP₂) ont été significativement reliées aux doses économiques d'engrais azotés. Les paramètres de la première composante représentent le carbone et l'azote potentiellement minéralisable, tandis que ceux de la deuxième composante indiquent les nitrates minéralisables de la matière organique labile, facilement minéralisable.

Pendant les deux années, les doses économiques étaient inversement reliées aux composantes principales retenues (Eq. 5, 9 et 10). Cela signifie que les doses d'engrais azotés peuvent être diminuées dans les sols riches en azote. En effet, les tests reliés à la disponibilité de l'azote du sol à la mi-saison (nitrates en postlevée au stade V₅ à V₆ extraits avec 2M KCl ou avec Nitrachek, ainsi que les nitrates et l'azote total dans la plante au stade V₅ à V₆) étaient reliés aux doses économiques en 2007, tandis que plusieurs paramètres du sol (matière organique, azote total, carbone total, carbone extrait à l'eau froide, azote total extrait à l'eau chaude et les nitrates avant le semis) étaient inclus dans le modèle de régression en 2008.

[Ces résultats indiquent que les paramètres qui sont regroupés dans les composantes CP₁ et CP₂ constituent les principaux indicateurs de la fertilité azotée des sols agricoles].

3.4. Seuils critiques des nitrates pour les cultures du maïs et de la pomme de terre

Les rendements relatifs indiquent le potentiel de production pour chaque sol, sans ajout d'engrais azotés. Pour les essais en maïs, les rendements relatifs ont varié de 54 à 98 % en 2007 et de 9 à 91 % en 2008 (tableaux 2 et 3). Pour la culture de la pomme de terre, les rendements relatifs ont varié de 66 à 96 %. Pour les deux cultures, les rendements relatifs étaient significativement corrélés aux teneurs en nitrate du sol mesurées en postlevée avec 2M KCl et avec Nitrachek. Ils étaient aussi significativement et inversement corrélés aux doses économiques d'engrais azotés (données non présentées). Ces résultats montrent que dans les sols riches en nitrate à la mi-saison, les rendements relatifs étaient élevés, le sol était ainsi productif, ce qui réduisait les doses d'engrais azotés nécessaires pour une production maximale.

Les seuils critiques sont les niveaux de nitrate pour lesquels les rendements relatifs étaient supérieurs à 85 % et à partir desquels il ne serait plus nécessaire d'apporter d'engrais azotés en postlevée. Pour le maïs, les seuils critiques des nitrates du sol ont été calculés avec les teneurs en nitrate des sols extraites avec 2M KCl ou la solution de Nitrachek car celles-ci étaient les plus corrélées avec les doses économiques d'engrais azotés. Les seuils de nitrate des sols obtenus avec le test Nitrachek étaient de 26,6 mg NO₃/kg en 2007 pour 28 sites de recherche répartis dans différentes régions agricoles du Québec et ils étaient de 62,8 mg NO₃/kg pour 30 sites en 2008 (tableau 12). Les seuils de nitrate extrait avec 2 M KCl en postlevée variaient de 19,8 à 22,7 mg N-NO₃/kg respectivement en 2007 et 2008.

Les résultats obtenus pour la culture de maïs indiquent que les seuils critiques ont été très différents d'une année à l'autre, car ils sont influencés par plusieurs facteurs, et plus particulièrement par les conditions climatiques. Contrairement à la saison de végétation de 2007, celle de 2008 s'est caractérisée par beaucoup de précipitations et des températures plus froides, ce qui expliquerait les seuils critiques des nitrates plus élevés.

Pour la pomme de terre, les seuils de nitrate ont été calculés avec les nitrates du sol extraits en postlevée avec 2M KCl et avec la teneur en N dans les feuilles de la culture au stade boutons (tableau 12). Ces paramètres étaient les plus significativement corrélés aux rendements relatifs de la pomme de terre. Pour cette culture, les seuils critiques étaient de 23 mg N-NO₃/kg (nitrates en postlevée avec 2M KCl) et de 4,2 % d'azote total dans les feuilles des plants.

Dans beaucoup d'états américains, les seuils de nitrate extrait en postlevée varient de 20 à 30 mg N-NO₃/kg de sol pour la culture de maïs. Ces valeurs sont proches des seuils de nitrate mesurés dans cette présente étude réalisée dans les conditions québécoises. Les analyses de nitrate en postlevée servent avant tout à connaître la disponibilité de l'azote minéralisable de la matière organique du sol, des fumiers appliqués ou des incorporations de prairies. Si les conditions de minéralisation sont favorables, on recommande ensuite de tenir compte des crédits d'azote de ces différentes sources. Les seuils critiques indiquent qu'à ce niveau de nitrate dans les sols, il y a une faible réponse aux applications d'engrais azotés. Des études de calibration sont nécessaires pour établir une grille des doses d'engrais azotés selon les teneurs en nitrate des sols. De telles grilles basées sur différentes teneurs en nitrate du sol sont déjà utilisées dans cinq états américains et les doses d'engrais azotés sont réduites proportionnellement avec les augmentations des teneurs en nitrate dans les sols.

Tableau 12. Seuils critiques des nitrates pour les cultures de maïs et de pommes de terre.

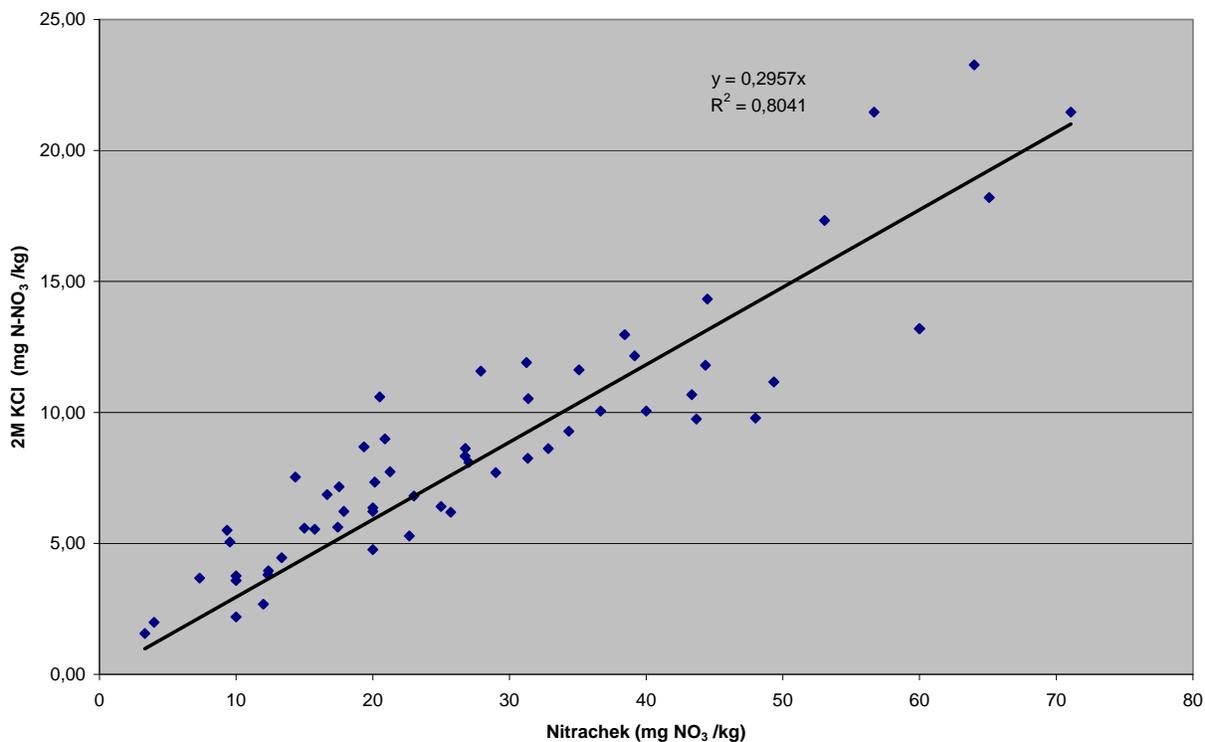
Maïs			
2007 (n = 28)			
PSNT	Rendement relatif = $53,0781 + 4,1032 x - 0,1043 x^2$	$r^2 = 0,41$	$X_0 = 19,7^{**}$
Nitrachek	Rendement relatif = $6,2048 + 5,9764 x - 0,1121 x^2$	$r^2 = 0,40$	$X_0 = 26,6$ mg NO ₃ /kg
2008 (n = 30)			
PSNT	Rendement relatif = $47,80736 + 4,652696x - 0,10184 x^2$	$r^2 = 0,19$	$X_0 = 22,8$
Nitrachek	Rendement relatif = $55,32133 + 0,777567x - 0,00615 x^2$	$r^2 = 0,32$	$X_0 = 63,2$ mg NO ₃ /kg
Pomme de terre (2007 à 2009) (n = 14)			
N-NO₃-2N KCl	Rendement relatif = $64,4496 + 2,7798x - 0,06074 x^2$	$r^2 = 0,36$	$X_0 = 22,9$ mg N-NO ₃ /kg
N (%) feuilles	Rendement relatif = $-677,51 + 352,1 x - 41,478 x^2$	$r^2 = 0,79$	$X_0 = 4,2 \%$

** X_0 : seuil critique de nitrates calculé avec les équations obtenues

Les analyses de nitrate en postlevée sont effectuées avec 2 M KCl ou avec Nitrachek (0,025M Al₂(SO₄)₃ · 18 H₂O + 0,050M NaCl). Ces deux méthodes n'ont pas la même molarité et le test de Nitrachek extrait beaucoup moins de nitrates que 2 N KCl. Cependant, les teneurs en nitrate extrait avec les deux méthodes sont significativement reliées ($r^2 = 0,80$) (figure 2). Les seuils critiques utilisés aux États-Unis et au Québec ont généralement été établis avec la méthode de 2M KCl. Pour connaître les seuils critiques lorsque le test Nitrachek est utilisé, on doit ainsi multiplier les teneurs en NO₃ mesurées avec Nitrachek par 0,2957.

[Les résultats de notre étude montrent que sous des conditions climatiques favorables, il n'y aurait pas de réponse aux apports d'engrais azotés et il ne serait donc plus nécessaire d'ajouter d'engrais azotés lorsque les teneurs en nitrate en postlevée sont supérieures à 20 mg N-NO₃/kg de sol ou plus (Nitrates PSNT ou Nitrachek)]

Figure 2: Relations entre les valeurs de nitrates extraits avec Nitrachek et avec 2M KCl



4. CONCLUSION

Cette étude réalisée dans différentes régions du Québec et sous différentes conditions climatiques a démontré que les réponses aux apports d'engrais azotés, les doses économiques d'engrais azotés ainsi que les rendements économiques étaient variables selon les sites et les conditions climatiques des régions. Ces résultats suggèrent que les propriétés spécifiques des sites étudiés ont joué un rôle important dans la disponibilité de l'azote du sol pour les cultures. Les indicateurs de la fertilité azotée qui ont expliqué une plus grande variabilité des rendements et des doses économiques pour les cultures de maïs et de pommes de terre sont les suivants : les nitrates extraits à la mi-saison avec 2M KCl et avec Nitrachek, ainsi que les nitrates et l'azote total dans les plants au stade V₅ et V₆ du maïs et au stade boutons pour la pomme de terre. Ces indicateurs étaient significativement reliés à la matière organique labile, facilement minéralisable (fractions de C et N extraites à l'eau froide) et semblent ainsi refléter l'influence des précédents de culture sur la disponibilité de l'azote du sol.

Les analyses de nitrate en postlevée semblent donc prometteuses pour évaluer la fourniture du sol en azote pour les cultures. Pour la culture de maïs, les seuils critiques des nitrates avec 2 M KCl ont varié de 19,8 à 22,7 mg N-NO₃ et de 26,6 et de 62,6 mg NO₃/kg avec Nitrachek en 2007 et 2008, respectivement. Pour la pomme de terre, le seuil critique était de 22,9 mg N-NO₃/kg avec 2M KCl en postlevée et de 4,2 % en azote total des feuilles au stade boutons. Cette étude démontre que sous des conditions favorables de sol et de climat, il ne serait plus nécessaire d'apporter d'engrais minéraux azotés en postlevée lorsque les nitrates du sol sont supérieurs à 20 mg N-NO₃/kg de sol. Les résultats de cette étude suggèrent que les recommandations optimales d'engrais azotés devraient être établies selon les conditions spécifiques de chaque ferme (conditions physiques et fertilité des sols, précédents de culture et unités thermiques de la région) qui influencent à la fois la fourniture de l'azote du sol et la productivité du sol. Des études de calibration sont donc encore nécessaires sous diverses conditions de sol et de climat du Québec, afin de déterminer les doses d'engrais azotés selon différents teneurs des sols en nitrate (classes de la fertilité azotée).

5. LISTE DES RÉFÉRENCES

- Almaraz, J. J., F. Mabook, X. Zhou, E. G. Gregorich et D. L. Smith. 2008. Climate change, weather variability and corn yield at a higher latitude locale: southwestern Quebec. *Climatic Change*. 88: 187-197.
- Andraski, T. O. et L. G. Bundy. 2002. Using the pre-sidedress soil nitrate test and organic nitrogen crediting to improve corn nitrogen recommendation. *Agron. J.* 94: 1411-1418.
- Bélangier, J., R. Walsh, J. E. Richards, P. H. Milburn et N. Ziadi. 2001. Predicting nitrogen fertilizer requirements of potatoes in Atlantic Canada with soil nitrate determinations. *Canadian. J. Soil Sci.* 81: 535-544.
- Bilbao, M., J. J. Martinez et A. Delgado. 2004. Evaluation of soil nitrate as predictor of nitrogen requirement for sugar beet grown in a Mediterranean climate. *Agron. J.* 96: 18-25.
- Bundy, L. G. 2000. Nitrogen recommendations and optimum nitrogen rates: how do they compare? p. 5-13 In Proc. North Central Ext. Industry Soil Fertil. Conf., St Louis, MO. Vol. 16. Potash and Phosphate Inst., Brookings, SD.
- Bundy, L. G. et T. W. Andraski. 1995. Soil yield potential effects on performance of soil nitrate tests. *J. Prod. Agric.* 8: 561-568.
- CRAAQ, 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^{ère} édition, p. 294.
- Davidson, E. A., L. F. Galloway et M. K. Strand. 1987. Assessing available carbon: comparison of techniques across selected forest soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 18: 45-64.
- Fageria, N. K. et V. C. Baligar. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, Vol. 88: 97-132.
- Honeycutt, C. W. et L. J. Potaro. 1990. Field evaluation of heat units for predicting crop residue carbon and nitrogen mineralization. *Plant and Soil* 125: 213-220.
- Jemison, J. M. et R. H. Fox. 1988. A quick-test procedure for soil and plant tissue nitrates using test strips and a hand-held reflectometer. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19 :1569-1582.
- Kachanoski, R. G., I. P. O'Halloran, D. Aspinall et P. V. Bertoldi. 1996. Delta yield: Mapping fertilizer nitrogen requirement for crops. *Better Crops* 80: 20-23.
- Kay, B. D., A. A. Mahboubi, E. G. Beauchamp et R. S. Dharmakeerthi. 2006. Integrating soil and weather data to describe variability in plant available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1210-1221.
- Lobell, D. B. et G. P. Asner. 2003. Climate and management contributions to recent trends in U.S agricultural yields. *Science* 299: 1032-1032.
- Lory, J. A. et P. C. Scharf. 2003. Yield goal versus delta yield for predicting fertilizer nitrogen need in corn. *Agron. J.* 95 : 994-999.
- Nyiraneza, J., A. N'Dayegamiye, M. H. Chantigny et M. R. Laverdière. 2009. Variations in corn yield and N uptake in relation to soil attributes and nitrogen availability indices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 317-327.
- Oberle, S. L. et D. R. Keeney. 1990. Factors influencing corn fertilizer N requirements in the Northern Corn Belt. *J. Prod. Agric.* 3: 522-527.
- Pages J. 2005. Statistiques générales pour utilisateurs. Tome 1, Méthodologie. Presses universitaires de Rennes 2005. 212 p.

- Ramousse R., M. Le Berre et L. Le Guelte. 1996. Introduction aux statistiques - ©. <http://www.cons-dev.org/elearning/stat/>.
- Roth, G. W., D. B. Beegle, R. H. Fox., J. D. Toth et W. P. Piekielek. 1991. Development of a quicktest kit method to measure soil nitrate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22: 191-200.
- Scharf, P. C. 2001. Soil and plant tests to predict optimum nitrogen rates for corn. *Journal of Plant Nutrition* 24 (6): 805-826.
- Schmidt, J. P., A. J. DeJoia, R. B. Ferguson, R. K. Taylor, R. K., Young et J. L. Havlin. 2002. Corn yield response to nitrogen at multiple in field locations. *Agron. J.* 94: 798-806.
- Schmidt, J. P., A. E. Dellinger et D. B. Beegle. 2009. Nitrogen recommendations for corn: an On-The- Go sensor compared with current recommendation methods. *Agron. J.* 101: 916-924.
- Schmidhalter, U. 2005. Development of a quick on-farm test to determine nitrate levels in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168: 432-438.
- Shröder, J. J., J. J. Neeteson, O. Oenema et P. C. Struik. 2000. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field crops Research* 66: 151-164.
- Sogbedji, J. M., H. M. Van Es, S. D. Klausner, D. R. Bouldin et W. J. Cox. 2001. Spatial and temporal processes affecting nitrogen availability at the landscape scale. *Soil tillage Res.* 58: 233-244.
- Vanotti, M. B. et L. G. Bundy 1994. Corn nitrogen recommendations based on yield response data. *J. Prod. Agric.* 7: 249-256.
- Williams, J. D., C. R. Crozier, J. G. White, R. P. Sripada et D. A. Crouse. 2007. Comparison of soil nitrogen tests for corn fertilizer recommendations in the humid southeastern USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 171-180.