

TITRE DE LA PRÉSENTATION :

Les tests de nitrate de sol afin d'ajuster la fertilisation azotée du maïs



AUTEUR : Jean Cantin, M.Sc., agronome, conseiller
MAPAQ, Direction régionale de la Montérégie-Est
Saint-Hyacinthe

INTRODUCTION

La gestion de l'azote (N) dans la production du maïs-grain est un des défis constants de notre agriculture intensive. La dynamique de N, même si elle est assez bien connue, demeure relativement imprévisible par sa dépendance aux conditions climatiques. De ce fait, un haut facteur de sécurité est appliqué lors de l'évaluation des doses à appliquer pour répondre aux besoins des cultures.

L'ENVIRONNEMENT

Selon Alexander *et al.* (2000) l'agriculture fournirait jusqu'à 63 % des nitrates retrouvés dans le fleuve Mississippi. Plusieurs chercheurs américains (Balkcom *et al.*, 2003) et québécois (Delisle *et al.*, 1998) ont établi sans conteste une corrélation hautement significative entre les régions productives de grandes cultures commerciales et les niveaux d'N dans les cours d'eau qui les drainent. D'un point de vue strictement biologique, l'N est considéré comme l'élément limitant pour la contamination des estuaires côtiers se déversant en eau salés, tandis que le phosphore est principalement considéré limitant en eau douce. Des milliards de dollars ont été investis en recherches sur la gestion de l'N dans le « Corn Belt » américain au cours des dernières décennies. Cette région produit 40 % du maïs mondial et 87 % de tout le maïs américain sur plus de 32 millions d'hectares qui se drainent majoritairement dans le bassin versant du Mississippi. Les quelque 1 568 000 tonnes d'N sous formes de N-NO₃ (61 %), d'N organique (37 %), et de N-NH₄ (2 %) (Goolsby *et al.*, 2001) qui se déversent dans le Golf du Mexique inquiètent les scientifiques depuis les années 1980 suite aux évaluations des niveaux d'asphyxie qui atteignent parfois, en saison estivale, une superficie de plus de 15 000 km². Cette zone baptisée « Dead Zone » est observée dans la section nord du golf à l'embouchure du Mississippi. En 1990, la réduction de la contamination des eaux par les N-NO₃ a été décrétée comme étant une priorité nationale pour les États-Unis (Magdoff, 1991).

EN IOWA

Un suivi systématique des N-NO₃ du sol sur un bon nombre d'entreprises agricoles de l'État de l'Iowa durant 12 années consécutives, a permis à Balkcom *et al.* (2003) d'établir une corrélation significative et inversée entre les charges de N-NO₃ transportées par les rivières Iowa et Des Moines, ainsi que les volumes d'eau écoulés, avec les niveaux de N-NO₃ du sol durant la même période (Figures 1 et 2). Il a également corrélié les moyennes des précipitations de mars-avril-mai avec les niveaux de N-NO₃ du sol (Figure 3). Il rapporte que plus la pluie est abondante durant cette période, moins il y a de N-NO₃ dans les sols à la fin du printemps. Selon Alexander *et al.* (2000) chaque hectare de l'Iowa déverse annuellement plus de 2 kg d'N dans le Mississippi. Goolsby *et al.* (2000) a quant à lui évalué des apports de 15 à 31 kg de N par année pour les principaux États producteurs de maïs du Corn Belt. McIsaac *et al.* (2001), dans son étude rétrospective de 1960 à 1998, évalue qu'une réduction de 12 % seulement de la fertilisation appliquée dans le Corn-Belt pourrait réduire de 33 % la charge d'N transportée par le Mississippi. Plus près de chez nous, Tran (1995) rapporte qu'environ 45 kg d'N sont perdus dans l'environnement pour chaque hectare en maïs-grain étudié au Québec. La rivière Yamaska porte cette signature de la fertilisation azotée de notre agriculture. Quelques centaines de tonnes d'N sont transportées annuellement hors du bassin versant sous forme d'NH₃ et quelques milliers de tonnes sous forme de NO₃ mesurées à la station de pompage de la ville de Saint-Hyacinthe (Bernard, G. 2006). (Figure 4).

L'AMORCE D'UNE SOLUTION

Les régions plus arides du Midwest américain (Figure 5) utilisent avec succès les tests de N-NO₃ du sol à partir d'échantillons prélevés à l'automne ou au printemps pour ajuster les applications d'N dans la production du maïs (Hergert, 1987). Pour les régions plus humides du Midwest et du Nord-Est, cette méthode n'a pas connu les mêmes succès. Plusieurs études (Khan *et al.*, 2001) ont proposé bons nombres de méthodes biologiques ou chimiques, d'indices et d'index pour prévoir la minéralisation de N dans les sols agricoles pour ajuster les applications d'azote dans le maïs-grain pour les régions plus humides. Toutes se sont avérées plus ou moins applicables ou bien corrélées avec la réponse du maïs à l'N. Le Dr Fred Magdoff de l'Université du Vermont est le premier à avoir adapté l'approche des régions plus arides et à avoir publié en 1984 (Magdoff *et al.*, 1984) des résultats significatifs. Il rapporte une très bonne corrélation entre les niveaux de N-NO₃ du sol prélevé en postlevée du maïs (PSNT : Pre-Sidedress Nitrate Test) et la réponse de la culture du maïs à l'N. Grâce à des équipements portatifs d'analyse rapide comme le « Quick Test » (Roth *et al.*, 1992; Geneq, 2006) mis au point en Angleterre pour mesurer sur le terrain les NO₃ dans l'eau potable, son approche s'est popularisée comme une traînée de poudre. Plusieurs guides de recommandations d'N basées sur les résultats du PSNT ont par la suite été publiés pour le maïs dans presque tous les États américains où la culture du maïs est importante (Bundy *et al.*, 1999; Agronomic Library, 2006a) ainsi qu'en Ontario (Beauchamp

et Burton, 1992). Son approche du PSNT a également été investiguée avec succès pour plusieurs autres cultures (Agronomic Library, 2006b).

LE PSNT

Le test de nitrate en postlevée du maïs est principalement une photo ponctuelle des niveaux de NO_3 accumulés dans l'horizon des 30 premiers centimètres de sol. Le niveau de NO_3 indique d'une part si l'N résiduel de la culture précédente a pu rester emprisonné dans les micropores du sol et éviter ainsi d'être lessivé (Giroux *et al.*, 2003; Bundy and Malone, 1988; Roth and Fox, 1990; Liang *et al.*, 1991). Mais il indique surtout l'ampleur de la minéralisation de l'N organique telle que les engrais de ferme, les résidus de cultures et la matière organique du sol à un moment où l'accumulation des N- NO_3 est théoriquement à son maximum (Magdoff, 1991; Havlin *et al.*, 1999). Il permet donc d'apprécier si la minéralisation de l'N est bien amorcée et si elle a le potentiel nécessaire pour répondre aux besoins de la culture au cours de la saison de croissance. Les échantillons doivent être prélevés suffisamment tard après les semis pour refléter l'ensemble des conditions climatiques (pluie, et température) qui ont prévalu depuis le début du printemps, et idéalement lorsque les risques de lessivage sont quasi inexistant, c'est-à-dire au moment où l'évapotranspiration tend à être supérieure aux précipitations, ce qui se produit vers la fin juin dans la culture du maïs au Québec (Lagacé, 2006; Innotag, 2006). Il faut également prendre les échantillons avant le début des prélèvements massifs de N- NO_3 par le maïs, et au moment où la culture permet encore aux producteurs d'intervenir et d'appliquer les quantités d'N nécessaires pour combler, ou non, le déficit évalué.

Connaissant la dynamique fluctuante de N, il est donc primordial d'être très rigoureux dans l'exécution et l'interprétation du PSNT.

Méthode d'utilisation (Agronomic Library, 2006a)

1 – Les plantules de maïs doivent avoir entre 15 et 30 cm de hauteur au niveau du cornet, ce qui correspond environ au stade de développement de la 7^e feuille.

2 – Les échantillons de sols doivent être prélevés au centre des entre-rangs pour éviter d'échantillonner l'N appliqué en bandes latérales lors des semis. D'autres procédures d'échantillonnage sont également proposées prenant en compte les quantités d'N appliquées au semis. Dans ces cas, l'espace entre-rang est subdivisé en différentes sections plus ou moins éloignées du rang et chaque prélèvement aléatoire est fait sur chacune des sections en nombre égal.

3 – Un délai de 2 à 3 jours après une pluie abondante doit être respecté avant l'échantillonnage.

4 – La profondeur d'échantillonnage doit être de 30 cm pour permettre de se référer à l'expertise scientifique. Pour des échantillons superficiels sur des sols rocailloux il n'existe

pas d'expertise connue. Il faut également garder en tête que la culture du maïs puisera dans l'horizon sous-jacent à celle échantillonnée, typiquement jusqu'à 60 cm de profondeur. Certaines études ont rapporté une meilleure corrélation entre les niveaux de N-NO₃ à 60 cm et la non-réponse du maïs à l'azote (Hergert, 1987). Beauchamp *et al.* (1992) proposait de calculer tout l'azote potentiellement disponible sur une profondeur de 0-60 cm par l'équation suivante, en considérant une densité de sol de 1,33 g cm⁻³ :

$$\text{N-NO}_3 \text{ (ppm)} \times 4_{(\text{fc densité du sol})} \times 1,62_{(\text{Bundy } et al., 1999)} = \text{N-NO}_3 \text{ (kg/ha)}.$$

5 – Un minimum de 10 sous-échantillons, préférablement 15, prélevés aléatoirement doivent constituer l'échantillon. Pour des champs ayant reçu des applications de fertilisants minéraux ou organiques à la volée, de 20 à 25 sous-échantillons devraient être prélevés pour atténuer la variabilité spatiale des épandages.

6 – La minéralisation des échantillons de sol doit être stabilisée en moins de 24 heures suivant l'échantillonnage par un séchage ventilé du sol déposé en couche mince sur une surface non absorbante, avec ou sans source de chaleur, ou par la congélation (Giroux *et al.*, 1996) (Figure 6).

7 – Le sol doit être passé à travers un tamis de 2 mm pour permettre l'extraction complète des N-NO₃ se trouvant au centre des granules de sol (Roth *et al.*, 1992).

8 – Les échantillons peuvent être analysés selon les procédures et méthodologie de l'analyseur QT, ou expédiés rapidement (avant ou après leur stabilisation) à un laboratoire avisé où le PSNT est pris en charge selon les méthodes analytiques définies en laboratoire.

Interprétation des résultats de N-NO₃

Différentes approches sont vulgarisées pour évaluer les quantités d'N à ajouter à la culture selon les résultats de N-NO₃. Bien qu'il y ait un large consensus à ne pas appliquer d'N supplémentaire lorsque les niveaux de N-NO₃ sont supérieurs aux valeurs critiques de non-réponse situés entre 21 et 30 ppm, 25 ppm étant le seuil le plus couramment utilisé, ce consensus ne tient plus lorsque les résultats sont inférieurs à ce seuil. De façon générale, plus les niveaux de N-NO₃ sont inférieurs au seuil critique, plus grandes sont les quantités d'N à appliquer. La plupart des États américains, ainsi que l'Ontario, proposent une grille de recommandations basée sur leurs recherches locales. Ces grilles sont échelonnées pour chaque ppm en moins de la valeur seuil jusqu'aux valeurs limites inférieures de 5 ou 10 ppm, considérées comme bruit de fond pour la plupart des sols, ou lorsque la dose optimum d'N produisant le rendement économique maximum des courbes de calibration est atteinte. Certains proposent de combler le manque en rajoutant une quantité déterminée (6,7 pour certains ou 9 kg ha⁻¹ pour d'autres (6 ou 8 lb acre⁻¹)) pour chaque ppm en dessous du seuil. Certains résultats en Montérégie, non publiés, ont démontré des augmentations de l'ordre de 1 ppm de N-NO₃ en postlevée du maïs pour chaque tranche de 10 kg ha⁻¹ d'urée appliquée à la volée avant les semis.

Certains guides écartent l'usage du PSNT pour les champs en monoculture de maïs ou sur précédent soya s'ils n'ont pas d'antécédent d'application d'EO. D'autres proscrivent le PSNT si de l'N minéral a été appliqué avant les semis, tandis que d'autres encore évaluent les pertes potentielles d'N minéral épandu à l'automne ou au printemps.

Plusieurs États appliquent une approche « On/Off », c'est-à-dire « Off » pour des résultats de N-NO₃ supérieurs au seuil, et « On » indique que l'on peut considérer une application supplémentaire d'N. Dans ce dernier cas, plutôt que d'utiliser leur charte préétablie pour chaque ppm inférieur au seuil, ils proposent de se référer à l'expertise agronomique standard basée sur les coefficients de valorisation des engrais organiques (EO), des précédents culturels et de la minéralisation de la matière organique. Dans ces cas, il faut adapter les recommandations là où de l'N a été épandu sous forme d'urée, de fumier ou d'engrais vert. Puisque ces formes d'azote n'ont pas encore entièrement été transformées en NO₃, elles ne peuvent donc pas être décelées par l'analyse. Cet outil est d'abord et avant tout un outil efficace pour gérer les excès d'N, ce pourquoi il y a convergence d'opinion. Par contre, lorsqu'il s'agit de gérer de faibles niveaux de NO₃, il est très difficile de bâtir une logique de recommandations qui soit acceptable pour toutes les situations, les conseillers doivent se référer à leur expertise agronomique.

L'azote organique

Les quantités d'N provenant des formes organiques sont très importantes pour combler les besoins des cultures dites de longue durée comme le maïs-grain. La plante parvient à peine à prélever 50 % des applications annuelles d'engrais minéraux azotés (Thibodeau *et al.*, 2006), l'autre fraction provient de la minéralisation des sources organiques présentes dans le sol générées en partie par les applications d'engrais minéraux des années précédentes. Le lessivage n'a aucune emprise sur cette portion organique dont la minéralisation est assujettie aux conditions d'humidité et de température du sol. Burton et Turner (2003) indique que 90 % de l'N total du sol se retrouve dans l'horizon superficiel du sol et se partage en deux catégories : (i) les résidus de cultures et d'animaux non décomposés, (ii) la matière organique et l'humus. De 1 à 5 % de ces sources d'N seront minéralisées chaque année. En ce qui concerne les EO, ils se composent de plusieurs fractions reliées à différentes dynamiques de minéralisation. (i) Une partie sera immédiatement disponible pour la plante (NH₄ et NO₃), (ii) une autre facilement minéralisable, tels l'urée et les acides uriques, qui pourra être disponible en quelques jours seulement suivant leur application et les conditions physiques du sol, (iii) une troisième sera minéralisée lentement au cours de l'année d'application, (iv) et une dernière se minéralisera en partie durant les années subséquentes. Des applications annuelles d'EO dont près de 60 à 75 % de la fraction organique résistent à la minéralisation (Burton et Turner, 2003) conduisent à une accumulation dans le sol dont la minéralisation sera difficilement évaluable. Le PSNT pourra dans ces cas fournir une évaluation du potentiel de minéralisation de cet N accumulé.

Les engrais minéraux azotés sous forme d'urée ont également un certain délai de minéralisation. Sous de bonnes conditions de croissance lorsque les températures du sol sont supérieures à 20 °C, ce délai peut être de moins de 48 heures selon James (1993). YARA (2006) mentionne que la transformation de l'urée en NO₃ sera complète en moins d'une dizaine de jours après son application lorsque les températures sont supérieures à 15 °C. Toutefois, si les températures demeurent sous les normales et qu'elles avoisinent plutôt les 5 °C, ce délai peut s'étirer au-delà de six semaines (Piagran, 2006). De fortes pluies donc, lors d'un printemps froid, ne conduiront pas forcément à des pertes énormes d'N.

Toutes ces considérations doivent être prises en compte lorsque le PSNT est visé comme outil diagnostique dans l'évaluation des pertes d'N provoquées par le lessivage. Une valeur basse du PSNT n'indiquera pas forcément un manque d'azote à la suite d'un risque prolongé de lessivage. Les NO₃ peuvent également migrer sous la profondeur d'échantillonnage, et bien qu'ils ne soient pas révélés par l'analyse, il n'en demeure pas moins qu'ils seront accessibles aux racines du maïs.

Les premiers essais au Québec

Dès le début des années 1990, plusieurs chercheurs et conseillers au Québec se sont approprié cette méthode d'analyse. Les résultats ont été similaires à ceux publiés dans la plupart des guides de fertilisation américains. Le seuil critique de non-réponse à l'N se situe entre 21 et 25 ppm de N-NO₃ pour l'ensemble des essais réalisés au Québec. Les premières mentions du test PSNT dans les publications officielles au Québec se retrouvent dans le guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2003).

Parmi les 251 résultats qui sont présentés dans ce document, 114 ont été obtenus dans les années 1993 à 1996 et 137 proviennent de 2003 à 2005. La très grande majorité de ces essais ont été établis et suivis par les conseillers des clubs agroenvironnementaux et ceux du MAPAQ sur des fermes se situant principalement dans la grande Montérégie. Les évaluations de performance du PSNT ont été jumelées à des essais de calibration en fertilisation N pour la production de maïs-grain. Le dispositif des essais pour les 4 premières années consistait en une seule répétition de bandes d'application de 4 ou 5 doses d'N en grandes parcelles de plus de 2000 m², tandis que les essais de 2003 à 2005 ont été réalisés suivant un protocole expérimental en petites parcelles de 15 m² selon un dispositif en 4 blocs complets aléatoires de 6 applications d'N en postlevée, totalisant avec le démarreur, environ 40 à 240 kg N ha⁻¹. Ces parcelles expérimentales ont été supervisées par M. Gilles Tremblay, agronome chercheur au Centre de Recherche sur les Grains (CÉROM).

Les résultats de N-NO₃ ont tous été analysés selon la procédure de l'analyseur QT compte tenu de sa facilité d'utilisation et de ses coûts minimes d'environ 1 \$ l'analyse. Les résultats de Beauchamp et Burton (1992) et de Giroux *et al.* (1996) avaient démontré une corrélation

hautement significative de $R = 0,98$ et $0,97$ respectivement entre les résultats de l'analyseur QT et ceux des laboratoires de recherches (Figure 7).

Résultats au Québec

Les résultats des 251 essais sont présentés dans un graphique « Cate-Nelson » (Figure 8). Les rendements relatifs se réfèrent aux rendements économiques optimums (100 %) qui sont calculés à partir de la courbe de régression obtenue pour chacun des sites d'essais. Lorsque le rendement sans N est supérieur ou égal à 94 %, il est considéré comme ayant atteint son plein potentiel et aucune réponse à des applications d'N supplémentaire n'est considérée. Ces rendements relatifs sont fondés sur un ratio azote/maïs de 6,6, c'est-à-dire un coût d'azote évalué à 0,90 \$/kg d'azote élémentaire et un prix de vente du maïs égal à 0,135 \$/kg, soit 135 \$/t (MAAARO, 2002).

D'un point de vue général, peu de champs de maïs au Québec atteignent des niveaux de N-NO₃ supérieurs au seuil de non-réponse à l'N (SNRN) établi à 25 ppm. Parmi les 251 champs, 28 seulement (11 %) ont obtenu ou dépassé ce seuil. Par contre, 119 champs sur 251 (47 %) n'ont obtenu aucune réponse à l'application d'N supplémentaire à celui du démarreur et ont produit des rendements relatifs de 94 % ou plus. Les niveaux de N-NO₃ du PSNT obtenu ont permis de bien identifier seulement 19 % (23/119) des champs qui n'ont obtenu aucune réponse à l'N. Ces derniers avaient majoritairement des antécédents d'applications d'engrais de ferme annuelle, ponctuelle ou pour l'année en cours (17/23), (Figure 9), et bon nombre d'entre eux (13/23) avaient des textures de sol plutôt légères. Aucun sol très lourd n'a livré de performance intéressante lors de ces essais (Figure 10). Les valeurs du PSNT pour tous les sols lourds confondus (avec et sans applications d'EO) se situent aux environs de 10 ppm, tandis que pour les sols légers les valeurs passent de 26 à 16 ppm pour les sites avec et sans applications d'engrais organiques respectivement (Figure 14). Compte tenu qu'il existe une corrélation hautement significative entre les niveaux d'argile et de magnésium pour les sols de la Montérégie (Figure 15), et que les granulométries n'étaient pas toutes disponibles pour les sols des différents essais, les textures de sols ont été séparées selon les niveaux de magnésium : Mg < 500 kg ha⁻¹ pour les sols légers, et Mg > 1000 kg ha⁻¹ pour les sols lourds.

Parmi les 28 champs qui n'indiquaient aucune réponse prévisible à l'N, et dont les résultats du PSNT étaient supérieurs au SNRN, 5 champs ont tout de même répondu à une application supplémentaire d'N. Ce type d'erreur « A » représente 2 % (5/251) de l'ensemble des résultats obtenus, et a conduit à des pertes de rendements de moins de 11 % dans la plupart des cas. L'ensemble des résultats indique que le SNRN pourrait être abaissé sous les 20 ppm à environ 19 ppm sans que cette erreur de type A n'augmente significativement. À ce nouveau SNRN, l'erreur de type-A passe à 4,4 %, les pertes de rendements demeurent sous les 11 %; par contre, le nombre de champs bien ciblés par le PSNT passe de 23 à 33 (de 19 % : 23/119 à 27 % : 33/119), soit une augmentation de 43 %.

Environ 89 % (223/251) des niveaux de N-NO₃ pour les autres champs n'atteignaient pas le SNRN. Pour ces champs, le PSNT recommandait de rajouter de l'N et une réponse en rendement était prévisible. Environ 43 % (96/223) de ces champs n'ont toutefois pas eu de réponse à l'ajout d'N. Trente-sept d'entre eux avaient des antécédents d'application d'EO dont les textures de sol se répartissent uniformément de légères à lourdes. L'utilisation du PSNT pour ces champs a donc conduit à un autre type d'erreur « B » (Figure 8). Hormis l'impact financier non négligeable pour le producteur agricole en frais d'analyse et d'N appliqué en trop, cette erreur est sans conséquence sur les rendements. Cette surfertilisation en N rehausse toutefois les risques de contamination des eaux.

Il y a forcément un potentiel réel pour réduire les quantités d'N utilisées dans la production du maïs-grain. Mais la technique du PSNT n'a pas toute la sensibilité nécessaire pour y parvenir et les champs qui ne répondent pas à la fertilisation azotée au-delà du démarreur trouveraient avantage à être mieux caractérisés.

Les précédents cultureux

Selon les essais réalisés au Québec, les cultures précédentes ont un impact limité lorsqu'aucun EO n'est appliqué l'année même des essais. Les précédents cultureux qui n'ont pas obtenu de réponse à l'N et qui offrent le plus de possibilités de réduction d'N en utilisant le PSNT se présentent comme suit : maïs (27 %), soya (34 %), céréales à pailles (40 %), haricots secs (50 %), pois verts (56 %) et prairies (73 %). Près des trois quarts des essais sur précédents prairies n'ont pas livré de réponse à l'N, mais le PSNT n'a pu en prévoir qu'un seul correctement sur un total de 25 essais. La partie de l'N labile (facilement minéralisable) des prairies est, en toute proportion, moins élevée que pour un enfouissement d'engrais vert immature ou de résidus de cultures. L'N organique prendra plus de temps à se minéraliser et le PSNT ne pourra pas, dans bien des cas, même à un stade avancé de la culture du maïs, révéler tout le potentiel du champ à livrer tout l'N au maïs au cours de la saison de croissance. Se référer à l'expertise agronomique relative aux précédents prairies, en considérant l'état de la prairie avant l'enfouissement ainsi que la proportion de légumineuse enfouie, demeurera sans doute le meilleur outil dont les conseillers disposent.

Améliorer l'efficacité du PSNT

Plusieurs facteurs peuvent interférer dans l'évaluation des N-NO₃ du sol et conduire à une mauvaise recommandation d'N correspondant à l'erreur de type-B. Nous avons déjà souligné que les sols légers avec antécédents EO favorisaient les niveaux de N-NO₃ plus élevés; or donc, si nous laissons plus de temps à l'N organique de se minéraliser et aux sols lourds de se réchauffer davantage, nous favoriserons l'accumulation des N-NO₃ et pourrons ainsi augmenter l'efficacité du PSNT. Les processus de minéralisation et la croissance du maïs dépendent des mêmes conditions d'humidité et de température du sol, donc pour avoir du succès avec le PSNT, il est prioritaire que la culture ait atteint le bon stade de développement, soit entre 15 et 30 cm. Lorsque Magdoff *et al.* (1984) a publié ses premiers

résultats significatifs, il proposait d'échantillonner le sol au moment où les plants avaient entre 20 et 30 cm (8 et 12 po). Plus les échantillons de sol seront prélevés tardivement, voire jusqu'à ce que la culture atteigne la limite de 30 cm, permettant encore aux équipements d'application d'N de circuler sans briser les plants, plus les niveaux de N-NO₃ pourront être élevés et pourront mieux caractériser les sols qui ont un réel potentiel de minéralisation. Les résultats d'un des suivis de minéralisation où les échantillons étaient prélevés à chaque semaine sur une profondeur de 15 cm (± 120 % de l'horizon 0-30 cm), nous révèlent qu'en 7 jours les niveaux de N-NO₃ sont passés rapidement de 16 à 23 ppm (Figure 12), soit en moyenne près de 1 ppm par jour (Havlin *et al.*, 1999), ou environ 5 kg de N-NO₃ ha⁻¹ jour⁻¹ en considérant un profil de sol de 0-60 cm. Si un plant de maïs produit à ce stade de croissance environ une feuille à tous les deux jours, c'est la différence qu'il faut pour qu'une recommandation d'N basée sur le PSNT passe de plusieurs kg à « 0 » kg ha⁻¹. Peu de conseillers ou d'entreprises agricoles attendent que les plants atteignent une hauteur de 30 cm pour évaluer les N-NO₃. La croissance du maïs est très rapide à ce stade et, dans la pratique, le risque est élevé de ne pas pouvoir appliquer l'N à temps si les conditions météo se détériorent. C'est d'autant plus vrai et important pour les entreprises qui ont de grandes superficies de maïs à fertiliser. Si nous pouvions garantir les applications d'N nécessaires après l'évaluation des N-NO₃, l'efficacité ainsi que la popularité du PSNT s'y trouveraient grandement améliorées. Au cours des essais, la hauteur des plants n'a pas été rigoureusement contrôlée puisque que le but premier des essais était la calibration des besoins d'N; les sols ont donc plutôt été précocement échantillonnés.

Les études américaines

Les valeurs de N-NO₃ rapportées dans l'étude synthèse de Bundy *et al.* (1999) pour 307 sites d'études dans les 12 principaux États américains producteurs de maïs, sont en moyenne du même ordre de grandeur que celles que nous avons obtenues au Québec. La moyenne de N-NO₃ des 307 sites donne 13,4 ppm comparativement à 14,7 au Québec (Figure 13), et 24,6 ppm pour tous les sites ayant reçu des EO durant l'année d'étude comparativement à 20,3 au Québec. 12,4 % des champs US atteignent et dépassent le SNRN comparativement à 11 % (9 + 2) au Québec (Figure 13). Selon le même critère de rendements relatifs supérieurs ou égaux à 94 %, 35 % des sites US n'ont eu aucune réponse à l'N comparativement à 47 % au Québec. Les sols ayant des antécédents d'application d'EO se démarquent aussi favorablement de la compilation des résultats réalisée par Bundy *et al.* (1999). Seulement deux résultats du PSNT sur sols lourds argileux atteignent le seuil de non-réponse à l'N déterminé à 16,9 par les analyses statistiques (Figure 17).

Il est fréquent de retrouver des études américaines où les résultats rapportés de N-NO₃ sont plus élevés que ceux que nous obtenons. Les moyennes annuelles de N-NO₃ publiées pour l'État de l'Iowa par Balkcom *et al.* (2003) sont de 21 à 53 et de 16 à 42 ppm pour les champs avec et sans application de fumiers respectivement. Ces résultats reflètent la régie de l'azote appliquée par plusieurs producteurs américains. Les producteurs de l'Iowa

appliquent de l'N sous formes d' NH_3 (ammoniaque anhydre) ou de CAN (calcium ammoniate) à l'automne. Dans l'étude citée, 25 % des champs avaient reçu toute leur fertilisation azotée sous forme de NH_3 à l'automne et un autre 25 % au printemps avant les semis pour des moyennes de 164 et de 146 kg de N ha^{-1} respectivement. L'autre 50 % des champs ont reçu en moyenne 153 kg de N ha^{-1} en applications fractionnées entre l'automne et le printemps. Tout compte fait, dans l'Iowa très peu d'entreprises semblent appliquer l'N basé sur les résultats du PSNT. Malgré plusieurs résultats de recherches concluantes, et un potentiel de réduction du tiers des quantités d'N durant certaines années totalisant plus de 100 millions de dollars en économie (Magdoff, 1991) pour le seul État de l'Iowa, il apparaît difficile de mesurer l'ampleur de son utilisation réelle. L'application du PSNT est assez contraignante puisqu'il nécessite un échantillonnage laborieux dans une période qui coïncide avec la fin des applications d'herbicides et le sarclage dans le maïs et le début de la récolte du foin pour les fermes laitières. Les recherches se poursuivent dans le but de trouver une analyse efficace pour les régions humides dont les échantillons de sol pourront être prélevés en tout temps de l'année. En 2001, l'équipe de chercheurs de Mulvaney *et al.* a publié des résultats qui semblaient très prometteurs, le ISNT (Illinois Soil Nitrate Test). Plus récemment, le ASNT (Amino Sugar-Nitrogen Test) de Baker *et al.* (2006) analyse les mêmes fractions d'N organique labile sans toutefois pouvoir livrer les résultats tant espérés.

L'impact d'une analyse diagnostique efficace

Les essais ont démontré que 47 % des champs n'ont pas répondu aux différentes applications d'N autre que celui fourni par les engrais de démarrage. Si ce haut taux de non-réponse à l'N pouvait être diagnostiqué avant les applications d'N, cela conduirait à des économies importantes. Ces non-réponses à l'N proviennent en partie de ce que plusieurs des 251 champs qui ont été préalablement ciblés avaient des antécédents d'engrais organiques, et que les parcelles ont été établies au centre des champs où les sols sont bien souvent en meilleures conditions. Toutefois, pour donner un aperçu des quantités d'engrais et des valeurs monétaires en cause, transposons ce constat sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Yamaska qui compte une production annuelle d'environ 100 000 ha sur les quelque 450 000 ha en maïs-grain au Québec. Si 47 % des champs qui ne répondent pas à l'N pouvaient être détectés par le PSNT, c'est une surfertilisation d'environ 12 000 tonnes d'urée qui serait épargnée. À un prix de vente au détail d'environ 500 \$ la tonne, c'est une facture de 6 millions de dollars que les producteurs agricoles n'auraient pas à acquitter chaque année. Considérant que la moitié de ces champs mettent en valeur des applications d'N organique provenant des fermes d'élevages, les baisses d'engrais minéraux se situeraient plus justement entre 3 et 6 millions de dollars. Selon les résultats publiés par Thibodeau *et al.* (2006) où il est fait mention que 34 % des champs étudiés sans apport d'EO ont obtenu leur meilleur rendement économique uniquement avec un démarreur de moins de 70 kg ha^{-1} d'N, les économies d'engrais pour le même bassin de la Yamaska, pourraient s'élever à plus de 4,6 millions de dollars.

L'utilisation du PSNT en Montérégie

L'utilisation du PSNT en Montérégie a connu une croissance fulgurante à la suite de la création des nombreux clubs agroenvironnementaux aux cours des dix dernières années. Cet engouement s'est un peu essoufflé depuis face aux faibles niveaux de N-NO₃ mesurés année après année. Cet outil diagnostique fait partie de l'expertise des conseillers, mais est plutôt considéré pour évaluer de manière générale le potentiel de la minéralisation de la saison en cours, et pour jauger si la saison nécessite un facteur de sécurité « élevé » ou « bas » en ce qui concerne la valorisation des N organiques. Tout comme l'a présenté Balkcom *et al.* (2003), il existe également une corrélation significative au Québec entre les niveaux de N-NO₃ du PSNT et les précipitations du printemps (avril-mai-juin) (Figure 3). Le PSNT permet donc d'obtenir des évaluations très localisées de l'impact des conditions météo printanières, et des conditions physiques du sol reliées aux différentes gestions de travail du sol et différentes rotations des cultures.

Comme présenté précédemment, 90 % des niveaux de N-NO₃ sont sous la barre du SNRN et aucune équation ou grille de recommandations n'est proposée, et avec raison, pour le Québec. Les résultats du PSNT relèguent donc les conseillers à leur expertise en fertilisation, aux coefficients d'efficacité des EO et aux apports d'N des précédents culturaux. Le potentiel de réduction d'N peut sembler énorme de prime abord avec l'approche du PSNT; toutefois, il faut considérer que les quantités d'N peuvent déjà être réduites puisqu'une expertise sur les fournitures d'N organiques est déjà accessible et relativement fiable lorsque le conseiller agricole responsable s'assure d'en maîtriser la connaissance. Plus une culture dépend de l'N des sources organiques, plus la variabilité spatiale des rendements est élevée pour un même champ (Cantin, 2006), (Figure 16). L'évaluation des N-NO₃ par le PSNT peut donc en tout temps ajuster la confiance accordée à la valorisation de l'N organique et l'augmenter considérablement lors de certaines années, comme celles de 1996 et 2003 qui ont livré à elles seules la majeure partie des bonnes performances des essais du PSNT au cours des sept années de suivi (Figure 11).

CONCLUSION

Beaucoup d'argent a été dépensé à la suite des premières publications concernant le PSNT, mais le taux de pénétration chez les producteurs agricoles ne semble pas refléter tout le travail investi. Il n'en demeure pas moins que le PSNT a beaucoup de potentiel lorsque son application est bien ciblée, par exemple sur des sols de textures plutôt moyennes à légères ayant des antécédents d'application d'EO. Certains niveaux de N-NO₃ peuvent être excessifs dans ces conditions, et le PSNT demeure un outil diagnostique convainquant pour démontrer qu'il y a eu surfertilisation. Si nous pouvions garantir les applications d'N en postlevée tardive du maïs lorsque la culture atteint une hauteur de 30 cm et plus, lorsque l'accumulation des N-NO₃ est à son maximum et que les risques de lessivage deviennent quasi improbables, le PSNT pourrait occuper toute la place qu'il lui revient pour augmenter

l'efficacité de nos recommandations et ainsi réduire considérablement les quantités d'azote appliquées à la culture du maïs.

À défaut de cette garantie, le PSNT doit être utilisé comme toute autre analyse de sol, comme un guide accessoire à l'expertise, et non comme une garantie de réussite. Son usage ne doit pas être simplifié à l'extrême au point de devenir une simple recette à suivre ou une équation mathématique déterminant les doses d'N à appliquer. Le PSNT doit s'intégrer en tant qu'outil diagnostique parmi d'autres dans le processus complexe de la gestion de l'azote des cultures, et ce, par des conseillers soucieux ou entièrement dédiés à l'agroenvironnement et idéalement sans lien direct avec le commerce des engrais minéraux. Son utilisation doit davantage cibler les 47 % des champs qui ne répondent pas aux applications d'N, et doit contribuer à l'effort collectif pour diminuer l'impact de notre agriculture sur l'environnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agronomic Library 2006a. *Presidedress Nitrate Nitrogen Test for Corn University Summary Summary*. Spectrum Analytic Inc. 1087 Jamison Rd. Washington Court House, OH 43160.

http://www.spectrumanalytic.com/support/library/rf/Presidedress_Nitrate_Nitrogen_Test_University_Summary.htm

Agronomic Library 2006b. *Presidedress Soil Nitrogen Test for Field Corn, Sweet Corn, Bell Peppers, Tomatoes, Pumpkins and Squash, and Onions*. Spectrum Analytic Inc. 1087 Jamison Rd. Washington Court House, OH 43160.

http://www.spectrumanalytic.com/support/library/ff/Presidedress_Soil_Nitrate_Test_Corn.htm

ALEXANDER, R. B., R.A. SMITH and G.E. SCHWARZ. 2000a. *Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico*. Nature vol. 403 pages 758-761.

ALEXANDER, R. B., R.A. SMITH and G.E. SCHWARZ. 2000b. *Supplementary Information for "Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico"*. U.S. Geological Survey, 413 National Center, Reston, Virginia USA 20192.

BALCOM, K. S., A.M. BLACKMER, D.J. HANSEN, T.F. MORRIS, and A.P. MALLARINO. 2003. *Testing Soils and Cornstalks to Evaluate Nitrogen Management on the Watershed Scale*. J. Environ. Qual. 32:1015–1024.

BARKER, D.W., J.E. SAWYER, M.M. KAISI, and J.P. LUNDVALL. 2006. *Assessment of the amino sugar-nitrogen test on Iowa soils: II. Field correlation and calibration*. Agron. J. 98: 1352-1358.

- BEAUCHAMP, E.G. and D.L. BURTON. 1992. *Update on the soil nitrogen test for corn*. University of Guelph, Dept. Land Resource Science.
- BERNARD, G. 2006. Station de pompage pour la ville de Saint-Hyacinthe. Communication personnelle.
- BLACKMER, A.M., R.D. VOSS and A.P. MALLARINO. 1997. *Nitrogen Fertilizer Recommendations for Corn in Iowa*. Iowa State University extension, Publication; Pm-1714. <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1714.pdf>
- BUNDY, L.G. and MALONE. 1988. *Effect of residual profile nitrate on corn response to applied nitrogen*. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:1377-1383.
- BUNDY, L.G., D.T. WALTERS, and A.E. OLNESS. 1999. *Evaluation of Soil Nitrate Tests for Predicting Corn Nitrogen Response in the North Central Region*. North Central Regional Research Publication No. 342. Wisconsin Agricultural Experiment Station, College of Agricultural and Life Sciences, University of Wisconsin-Madison.
http://www.soils.wisc.edu/extension/Word_Documents_PDF2/soilnitrate.pdf
- BURTON, C.H., and C. TURNER. 2003. *Manure management: Treatment strategies for sustainable agriculture*. Silsoe Research Institute. Wrest Park, Silsoe, Bedford, UK.
- CANTIN, J. 1995. *Résultats des parcelles d'azote dans le maïs-grain : résultats 1993-1995*. Rapport interne non publié. MAPAQ, Direction régionale Montérégie-Est.
- CANTIN, J. 2006. *The environmental risks linked to different manure application periods, (literature review) et Application de fumier de bovins laitiers selon trois périodes d'épandage dans la production de maïs-grain*. Mémoire de maîtrise. Department of Natural Resource Sciences, McGill University.
http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/These_sur_les%20periodes_d'epandage-JC2.pdf
- CATE, R.B., Jr., and L.A. NELSON. 1965. *A rapid method for correlation of soil test analyses with plant response data*. Tech. Bull. 1. Int. Soil Testing Ser. North Carolina State Univ., Raleigh.
- CRAAQ. 2003. *Guide de référence en fertilisation*. 1^{re} édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.
- DELISLE, F., S. GARIÉPY et Y. BÉDARD, 1998. *Bassin versant de la rivière Yamaska : l'activité agricole et ses effets sur la qualité de l'eau*. Ministère de l'Environnement et de la Faune et Saint-Laurent Vision 2000, 107 pages. Dépôt légal Bibliothèque nationale du Québec, Bibliothèque nationale du Canada ISBN 2-550-32495-1.

GENEQ inc. 2006. *Soil test kit – nitrate quick test...*

http://www.geneq.com/catalog/en/soil_test_kit-nitrate_qui.html

GIROUX, M., A.R. MICHAUD, C. CÔTÉ, N. ZIASDI, S. GUERTIN, S. QUESSY. 2003. *Stratégies de réduction à la ferme des risques environnementaux liés à la fertilisation avec des engrais de ferme*. Colloque en agroenvironnement. IRDA, pp. 73-99.

GOOLSBY, DA, W.A. BATTAGLIN, B.T. AULENBACH, and R.P. HOOPER. 2000. *Nitrogen flux and sources in the Mississippi River Basin*. US Geological Survey, Water Resources Division, Denver, CO 80225, USA. *Sci. Total Environ*, 5;248(2-3):75-86.
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?itool=abstractplus&db=pubmed&cmd=Retrieve&dopt=abstractplus&list_uids=10805229

GOOLSBY, DA, W.A. BATTAGLIN, B.T. AULENBACH, and R.P. HOOPER . 2001. *Nitrogen input to the Gulf of Mexico U.S. Geological Survey*, MS406, DFC, Lakewood, CO 80225, USA. *J Environ Qual*. 2001 Mar-Apr; 30(2):329-36.
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?itool=abstractplus&db=pubmed&cmd=Retrieve&dopt=abstractplus&list_uids=11285892

HERGERT, G.W. 1987. *Status of residual nitrate-nitrogen soil tests in the United States*. p. 73-88. In J.R. Brown (ed.) *Soil testing : Sampling, correlation, calibration, and interpretation*. ASA Special Publ. 21 ASA, CSSA, and SSSA, Madison, Wis.

HAVLIN, J.L., J.D. BEATON, S.L. TISDALE, and W.L. NELSON. 1999. *Soil fertility and fertilizers*. 6th ed. Macmillan Publishing Co. New York, NY. USA.

INNOTAG, 2006. *Système de contrôle de drainage*.

http://www.innotag.com/gestion_eau.htm

JAMES, D.W. 1993. *Urea : A low cost nitrogen fertilizer with special management requirements*. Fertilizer fact sheet, Utah State University.

http://extension.usu.edu/files/publications/publication/AG_283.pdf

LAGACÉ, R. 2006. Chercheur-enseignant à l'Université Laval, Québec. Communication personnelle.

LIANG, B.C., M. REMILLARD, and A.F. MACKENZIE. 1991. *Influence of fertilizer, irrigation, and non-growing season precipitation on soil nitrate-nitrogen under corn*. *J. Environ. Qual*. 20 :123-128.

MAAARO. 2002. *Guide agronomique des grandes cultures*. Publication 811F. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario.

[Guide agronomique des grandes cultures](#) > [Publication 811F : Maïs](#)

- McISAAC, GF, M.B. DAVID, G.Z. GERTNER, and D.A. GOOLSBY. 2002. *Relating net nitrogen input in the Mississippi River basin to nitrate flux in the lower Mississippi River : a comparison of approaches*. University of Illinois, Department of Natural Resources and Environmental Sciences, W-503 Turner Hall, 1102 S. Goodwin Ave., Urbana, IL 61801, USA. A quantitative understanding. *J Environ Qual*. 31(5):1610-22.
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?itool=abstractplus&db=pubmed&cmd=Retrieve&dopt=abstractplus&list_uids=12371178
- MAGDOFF, F.R. 1991. *Understanding the Magdoff pre-sidedress nitrate test for corn*. *J. Prod. Agric*. 4:297–305.
- MAGDOFF, F.R., D. ROSS, and J. AMADON. 1984. *A soil test for nitrogen availability to corn*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1301-1304.
- MULVANEY, R.L. and S.A. KHAN, R.G. HOEFT, and H.M. BROWM. 2001. *A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1164-1172.
- PIAGRAN, 2006. Principe d'action du Piagran® 46.
<http://www.skwp.de/tce/frame/main/286.htm>
- ROTH, G.W., D.B. Beegle, and P.J. Bohn. 1992. *Field evaluation of a pre-sidedress soil nitrate test and quick-test for corn in Pennsylvania*. *J. Prod. Agric*. 5:476-481.
- ROTH, G.W. and Fox.1990. *Soil nitrate accumulations following nitrogen-fertilized corn in Pennsylvania*. *J. Environ. Qual*. 19:243-248.
- THIBODEAU, S., J. CANTIN, P. FILION, D. GUAY, R. RIVEST, É. THIBAUT, et G. TREMBLAY. 2006. *Fertilisation azotée dans le maïs-grain*. Programme d'atténuation des gaz à effets de serre. Brochure. 8 p.
http://www.cdaq.gc.ca/content_Documents/PAGES_Fiche_azote_avril_2006.pdf
- TRAN, T.S., 1995. *Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué (¹⁵N) appliqué à la culture de maïs (Zea Mays L.)*. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval (Ph.D.), Département des sols, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation.
- USDA. 2006. *Crop Production 2005 Summary*. Agricultural Statistics Board, NASS, USDA.
<http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/nass/CropProdSu//2000s/2006/CropProdSu-01-12-2006.pdf>
- YARA, 2006. Essais YARA : *Fertilisation azotée du maïs, comparaison Ammonitrate/Urée*. Brochure.
http://www.yara.fr/library/attachments/crop_fertilization/plant_nutrition_guide/ferti_azote_maïs.pdf

Les tests de nitrates du sol

en post-levée du maïs
pour ajuster la fertilisation azotée

Jean Cantin, agronome, M.Sc.



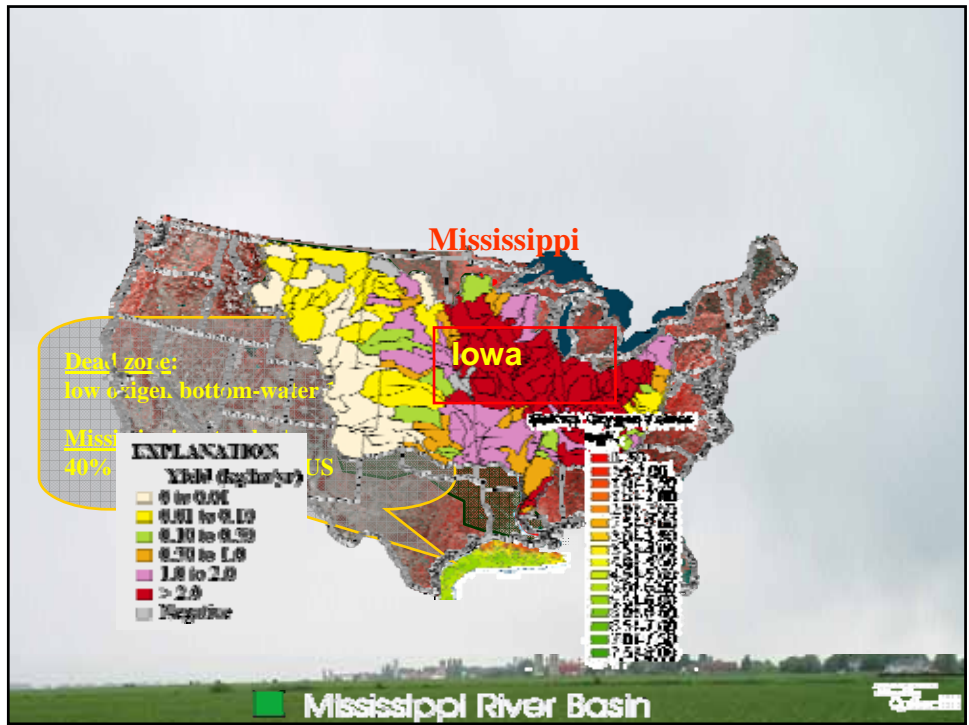
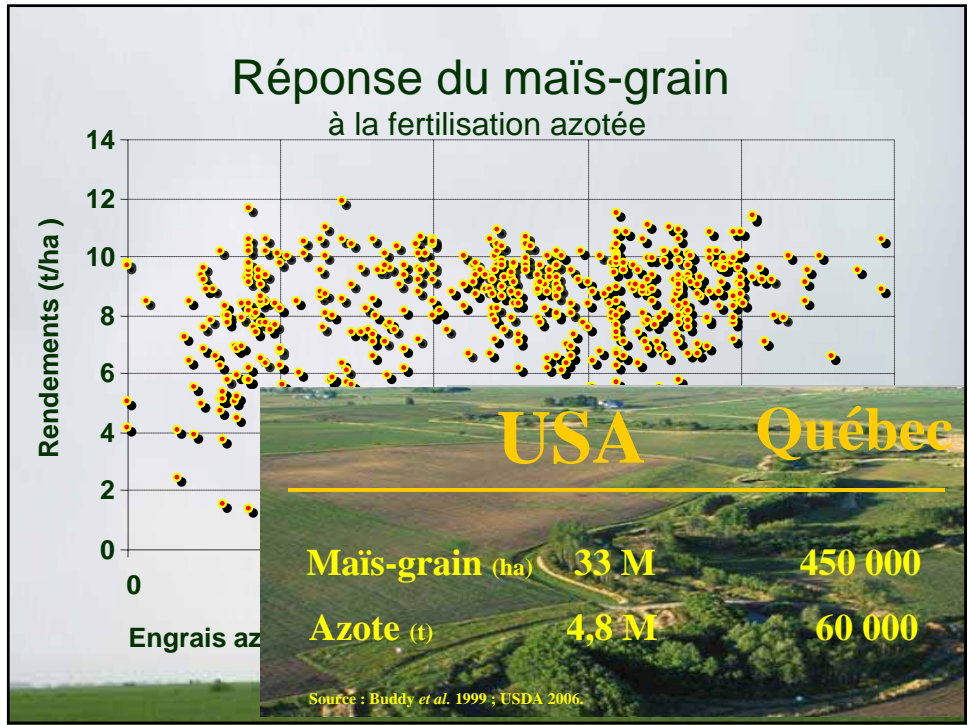
Le Centre de recherche en matière de fertilisation
et d'engrais minéraux du Québec

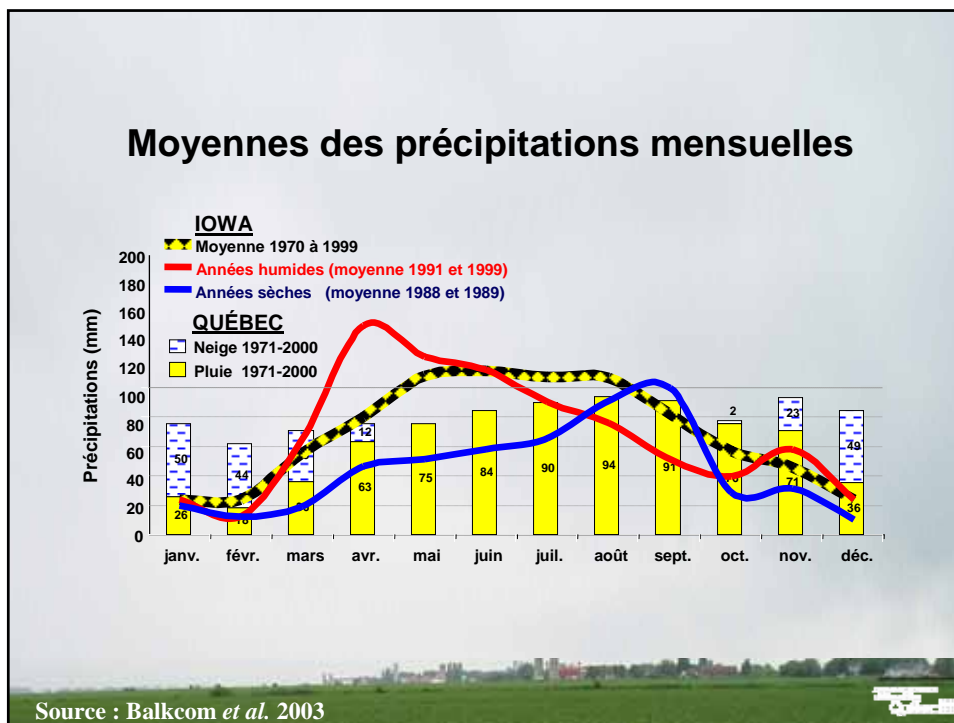
Colloque sur l'azote – 28 mars 2007 - Drummondville

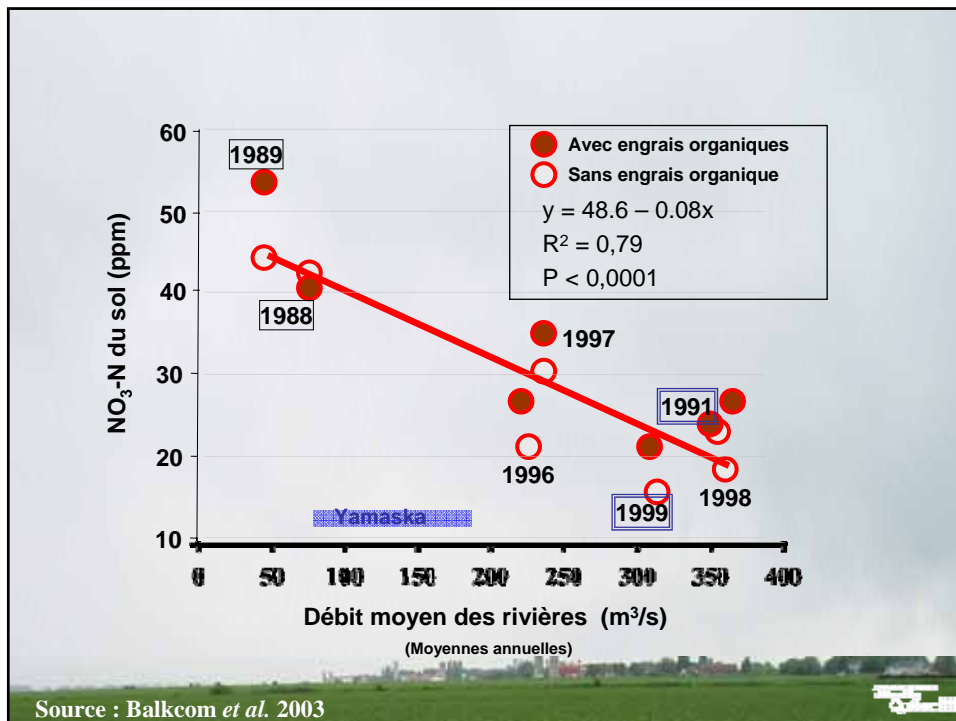
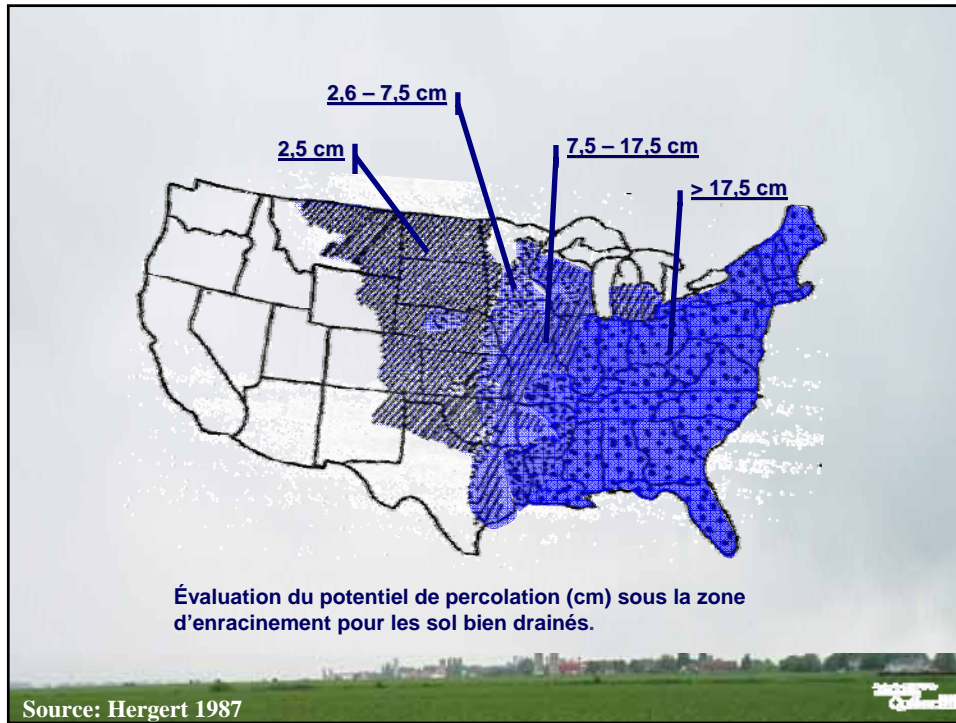


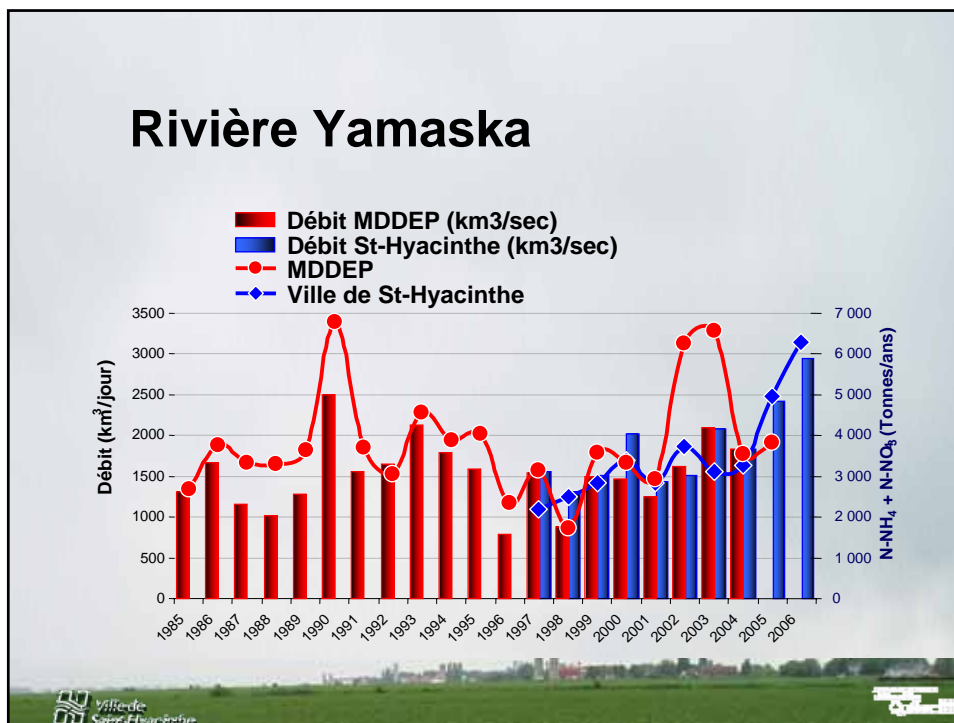
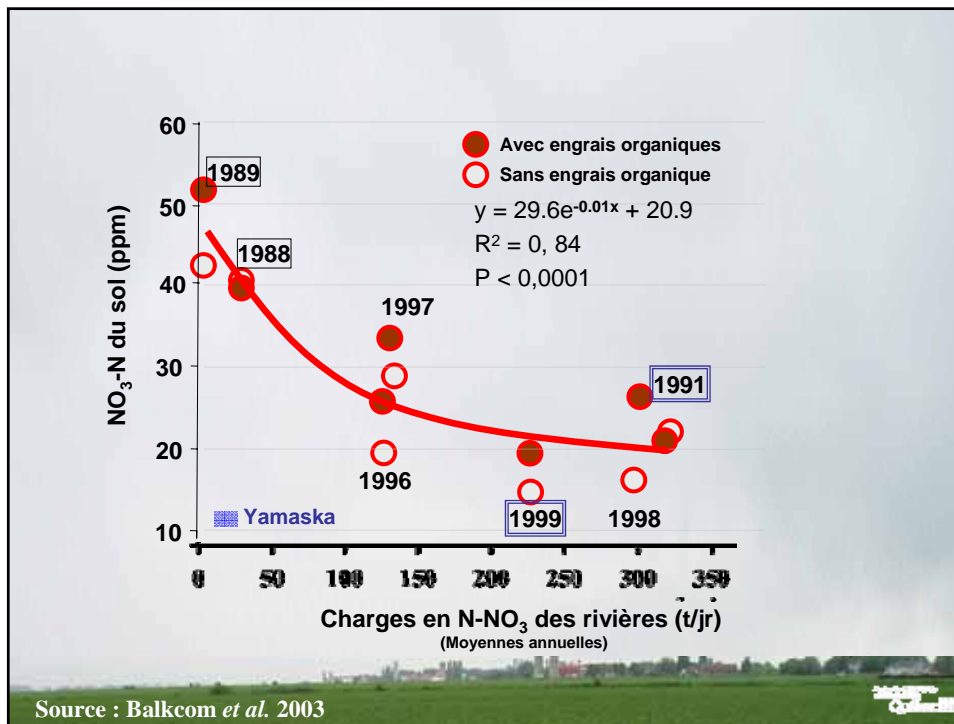
Plan de la présentation

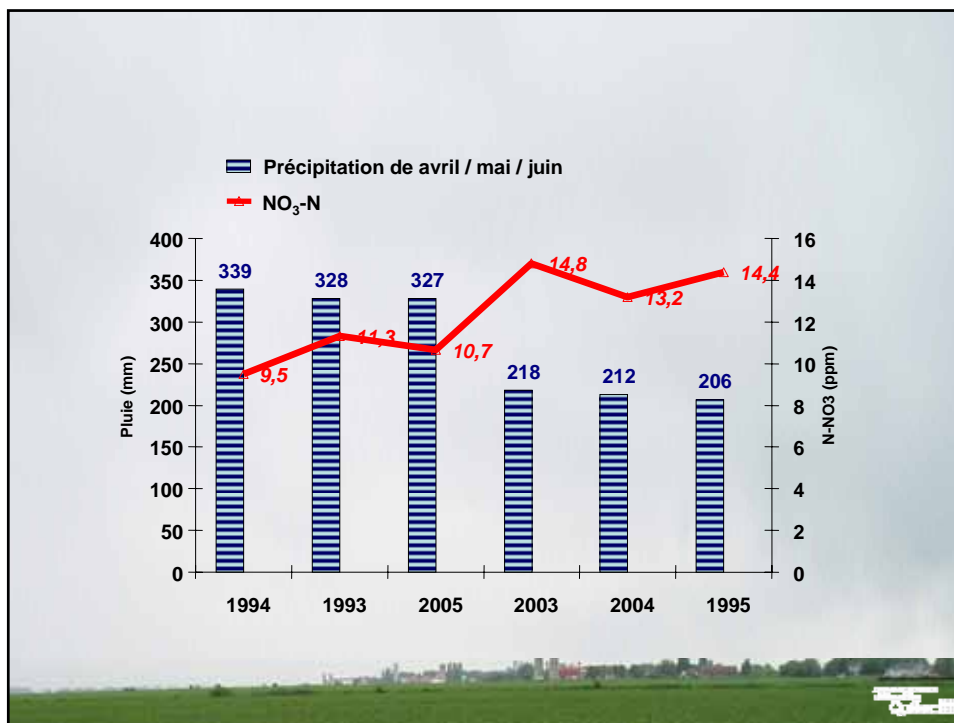
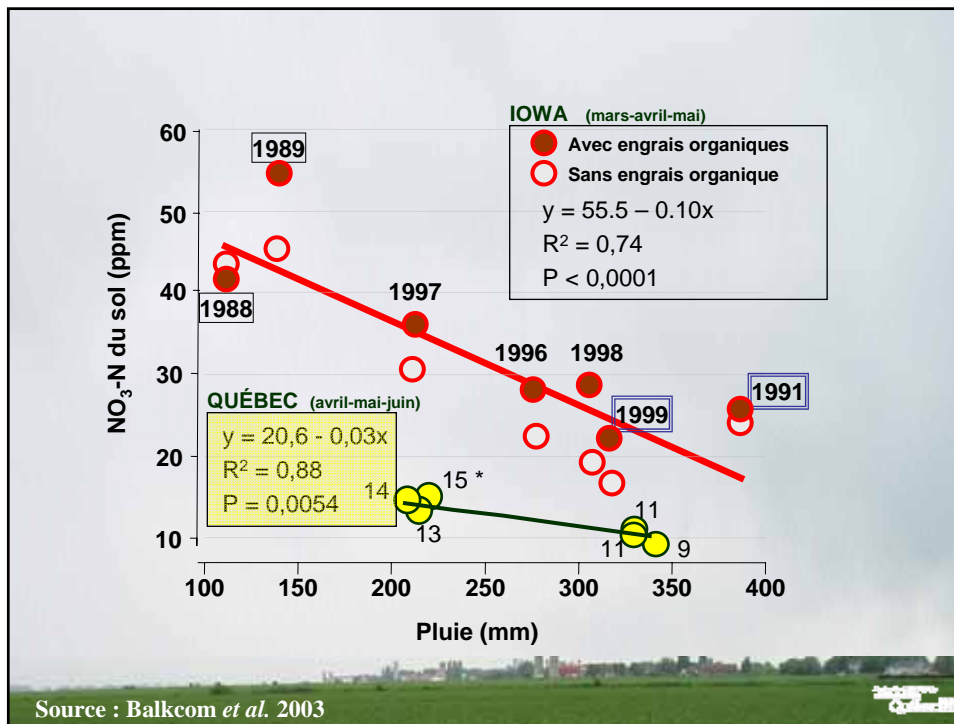
1. Azote et pollution diffuse au USA
2. Quelques milliards \$ en recherche
3. L'IOWA
4. Au Québec ?
5. **PSNT (Pre-Sidedress Nitrate Test)**
 - Où, Quand, Comment, Pourquoi ?
 - Mise en garde
 - Le potentiel du test
6. Utiliser avec d'autres outils diagnostiques
7. Sur le terrain en Montérégie
8. Conclusion











Plusieurs méthodes biologiques et chimiques ont été proposées pour évaluer la disponibilité de l'azote du sol

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Bremner, 1965 | Nitrogen availability index |
| 2. Stanford, 1968 | Nitrogen availability indexes |
| 3. Keeney, 1982 | Nitrogen availability indice |
| 4. Bundy and Meisinger, 1994 | Nitrogen availability indices |
| 5. Keeney and Bremner, 1964 | Nitrogen distribution in soil |
| 6. Porter et al. 1964 | Hydrolysable N org. fractions |
| 7. Khan, 1971 | Long term cropping systems |
| 8. Smith and Young, 1975 | N in virgin and cultivated soils |
| 9. Meints and Peterson, 1977 | Nitrogen distribution in soil |
| 10. Mulvaney et al. 2004 | amino-sugar |

Source : Khan *et al.* 2001



Dr Fred Magdoff

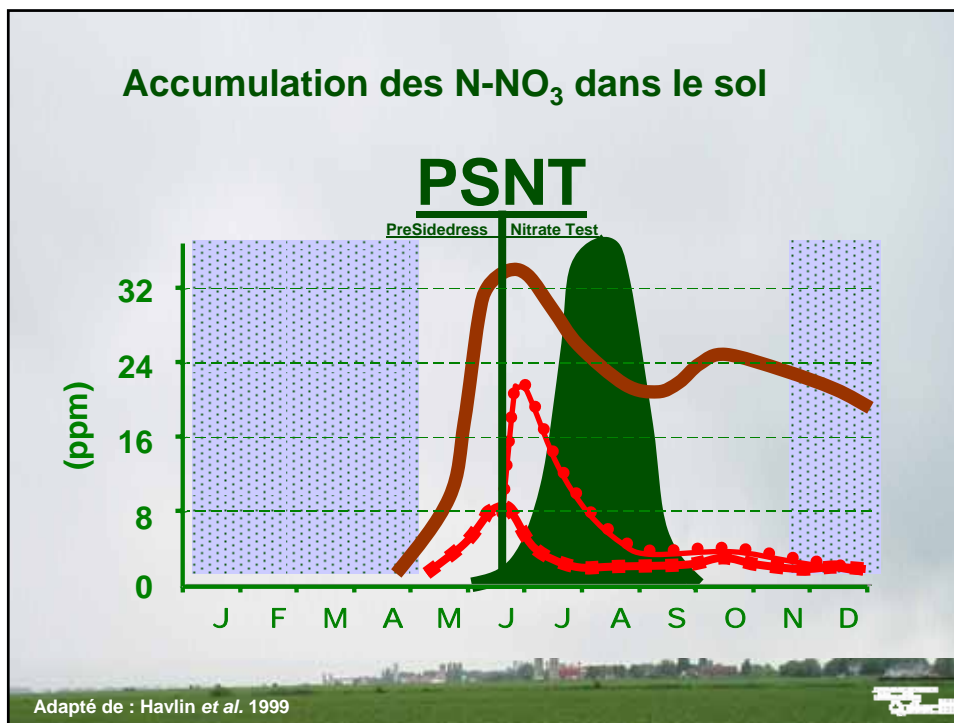
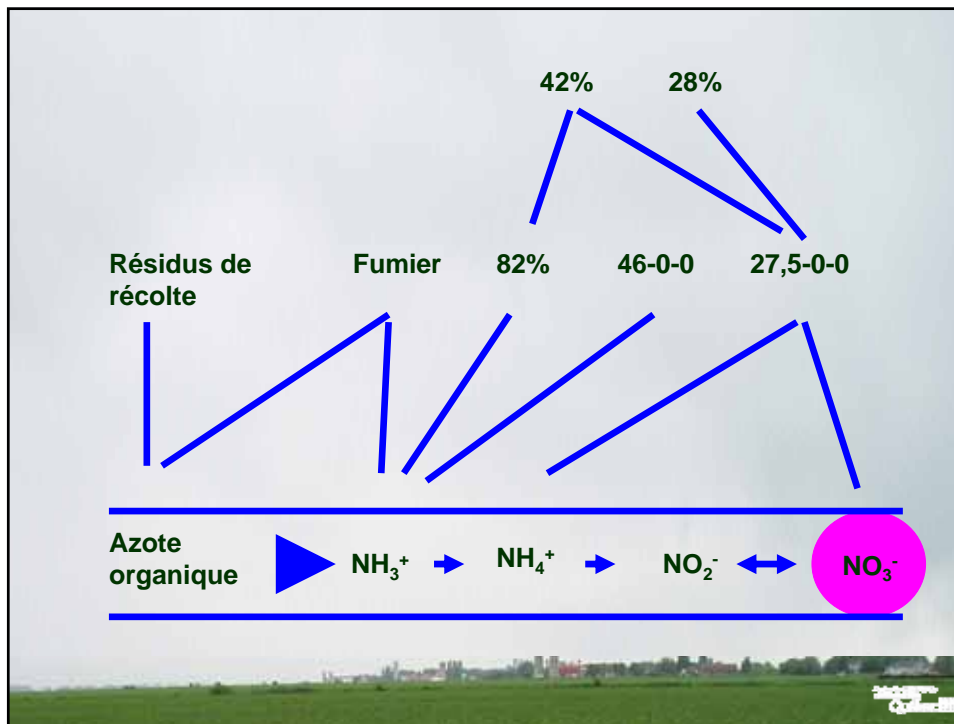
- Professeur à l'Université du Vermont en plantes et sciences du sol
- Coordonnateur des 12 états du Nord-Est des US pour
 - Department of Agriculture's Sustainable
 - Agriculture Research and
 - Education Program.
- Membre American Society of Agronomy
- PSNT : Northeast – Mid-Atlantic – Midwestern and Eastern Canada, and also for use with a number of vegetable crops
- Auteur : *Building Soils for Better Crops (2000)*
- Principal éditeur : *Hungry for Profit: The Agribusiness Threat to Farmers, Food, and the Environment (2000)*

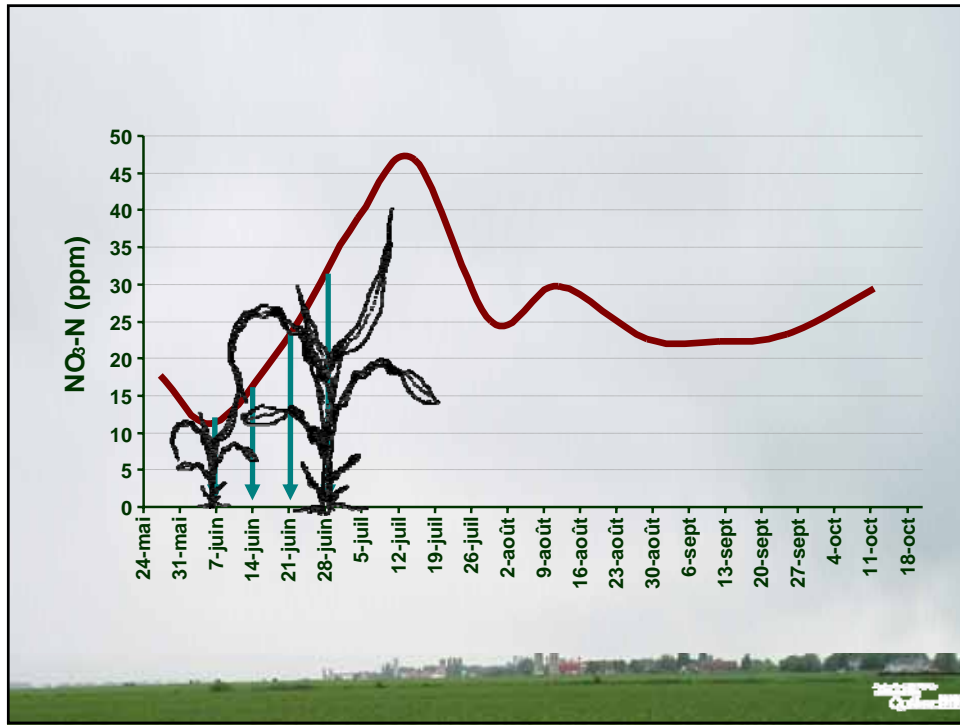
Les recherches menées aux US suggèrent que le PSNT est efficace pour prédire la réponse du maïs à l'application d'azoté en post-levé, et que la valeur critique de 20 à 25 ppm est relativement uniforme à travers un très vaste territoire agricole.

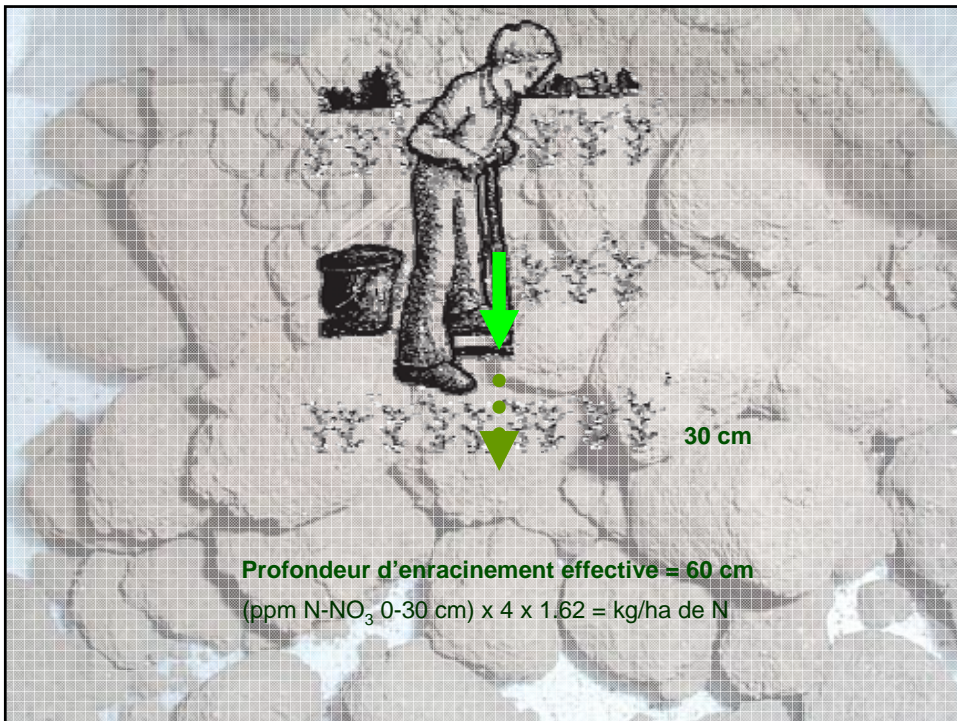
		<i>NO₃-N (ppm)</i>
➤ <i>Magdoff et al. (1984)</i>	<i>Vermont</i>	<i>21-25</i>
➤ <i>Sims et al. (1995)</i>	<i>Delaware</i>	<i>17</i>
➤ <i>Blackmer et al. (1989)</i>	<i>Iowa</i>	<i>20-25</i>
➤ <i>Klausner et al. (1993)</i>	<i>New York</i>	<i>21</i>
➤ <i>Meisinger et al. (1992)</i>	<i>Maryland</i>	<i>22</i>
➤ <i>Fox et al. (1989)</i>	<i>Pennsylvania</i>	<i>21</i>
➤ <i>Bundy and Andraski (1995)</i>	<i>Wisconsin</i>	<i>21</i>
➤ <i>Magdoff et al. (1993)</i>	<i>Northeast USA</i>	<i>18</i>
➤ <i>Beauchamp (1992)</i>	<i>Ontario</i>	<i>18</i>
➤ <i>CRAAQ (2003)</i>	<i>Québec</i>	<i>25-30</i>

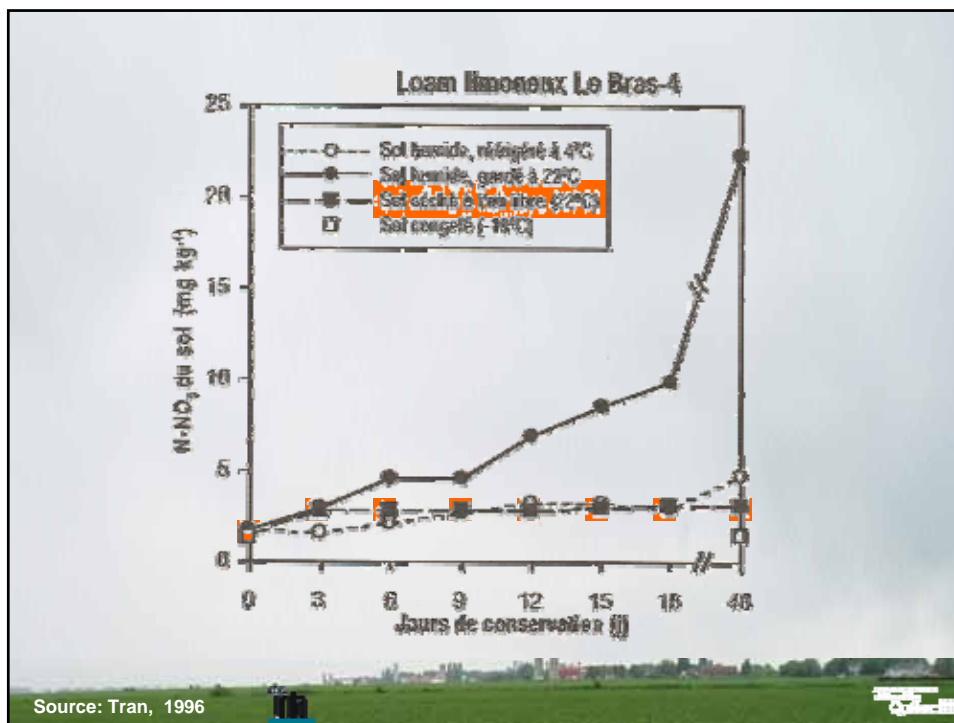
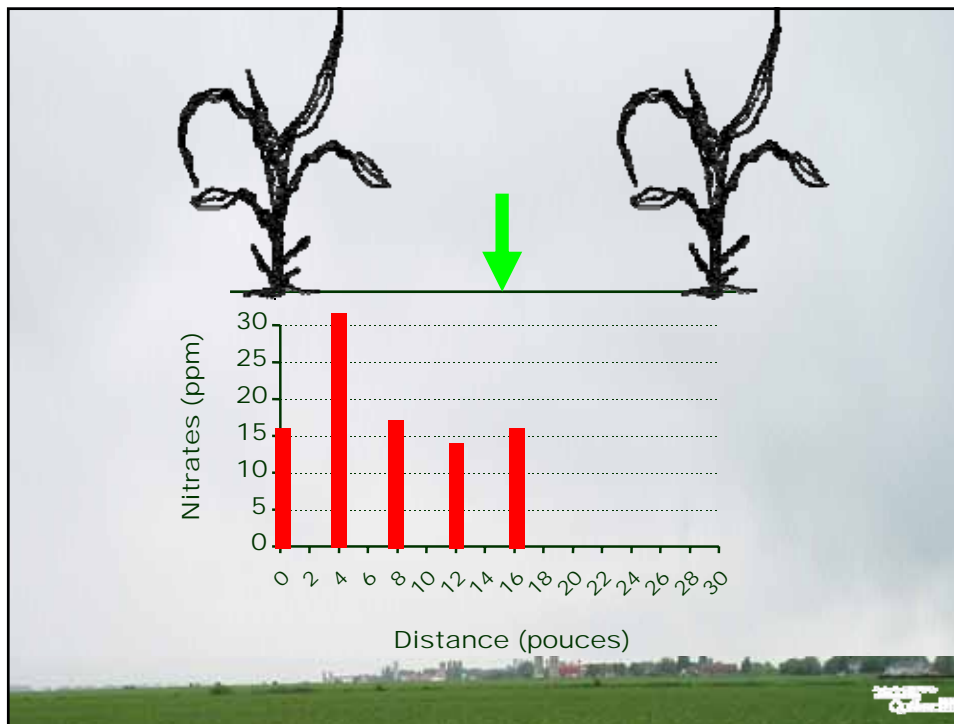
Source: Bundy *et al.* 2001



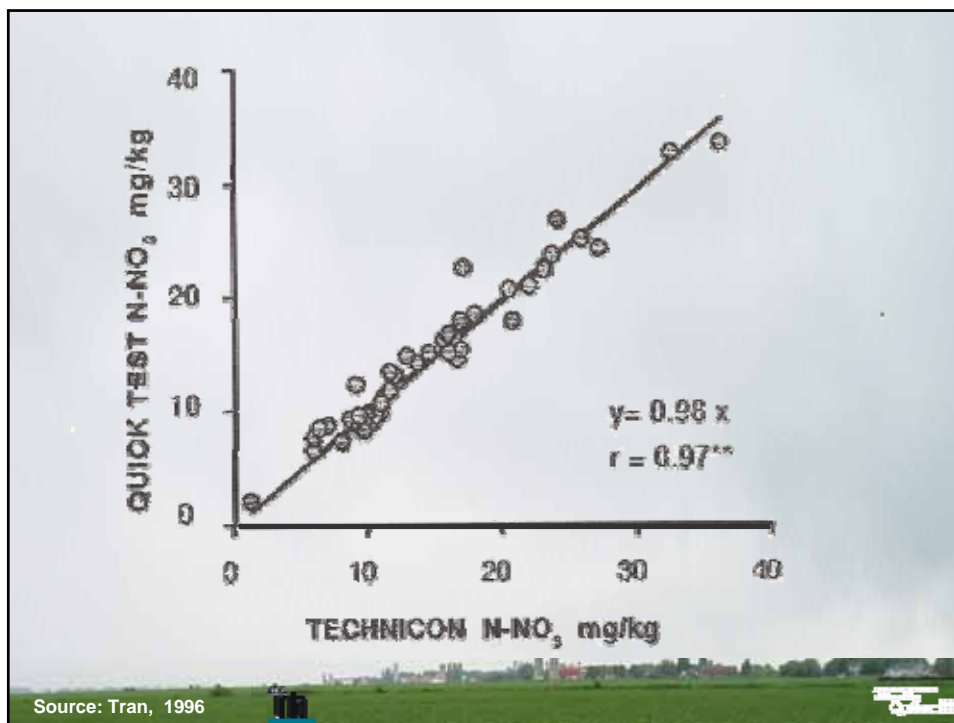
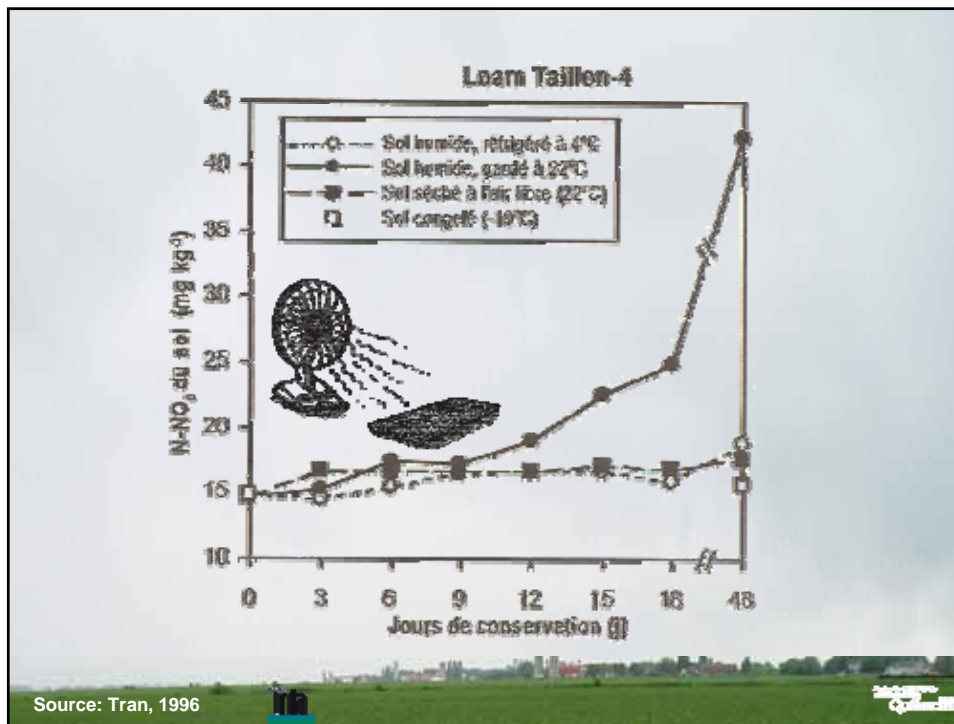


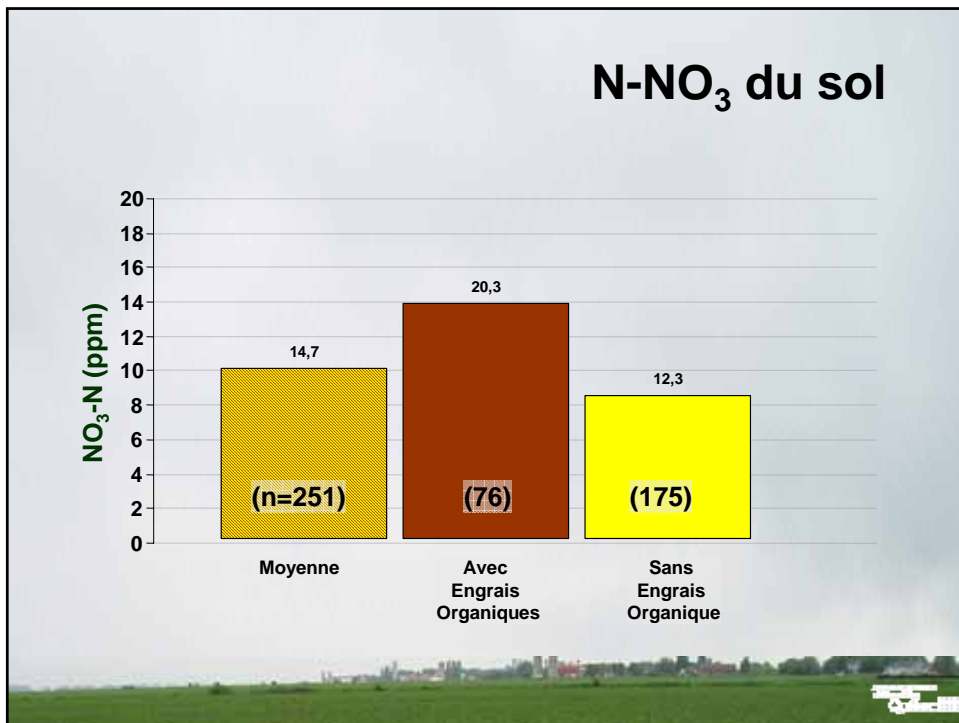


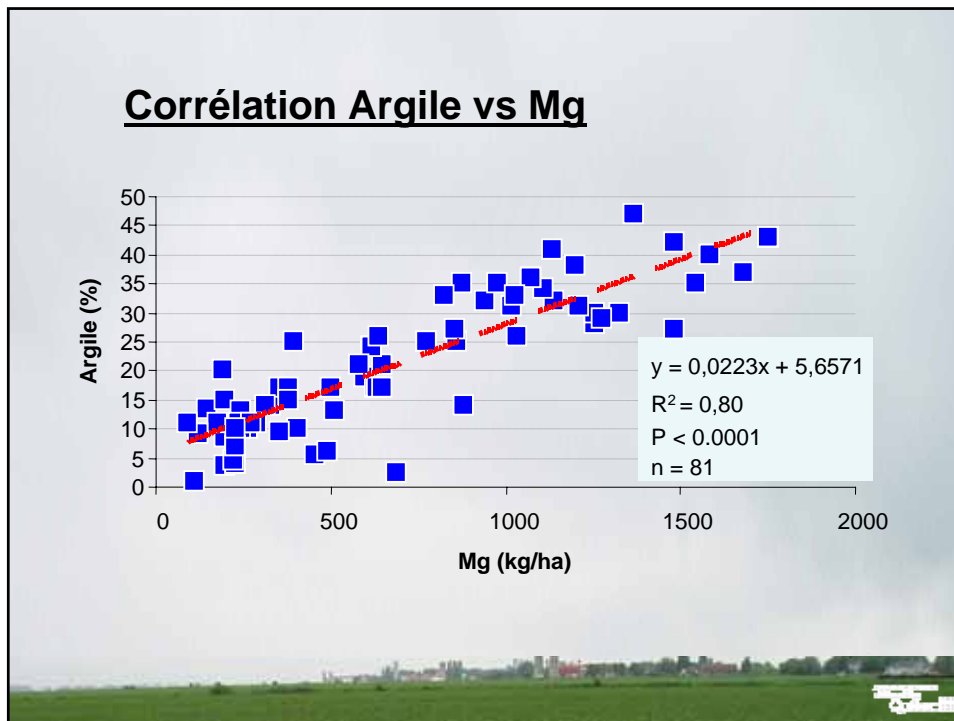
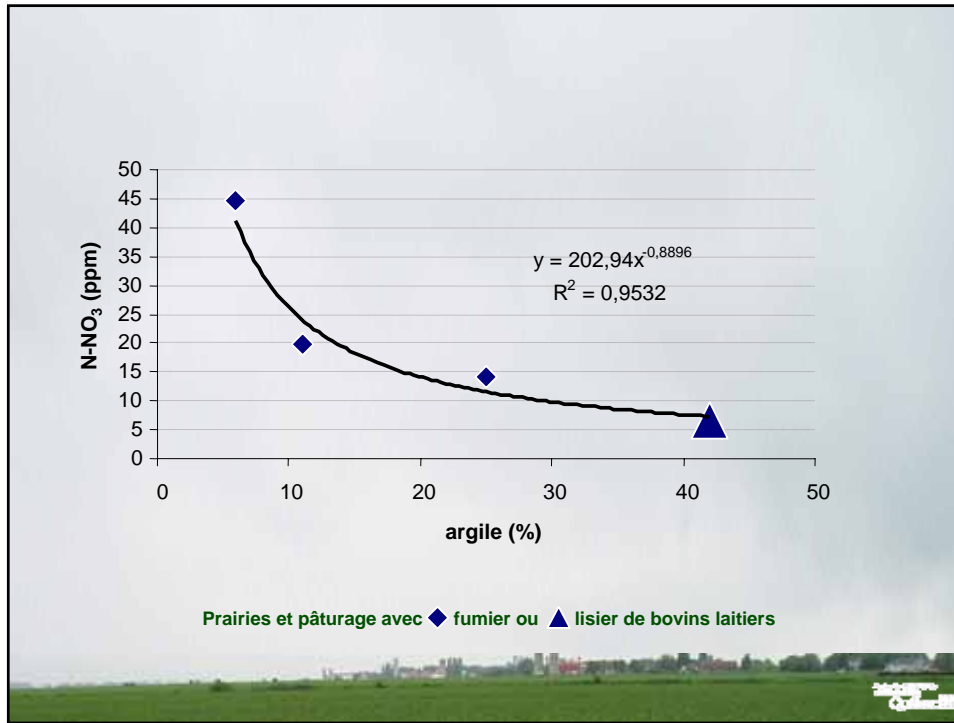


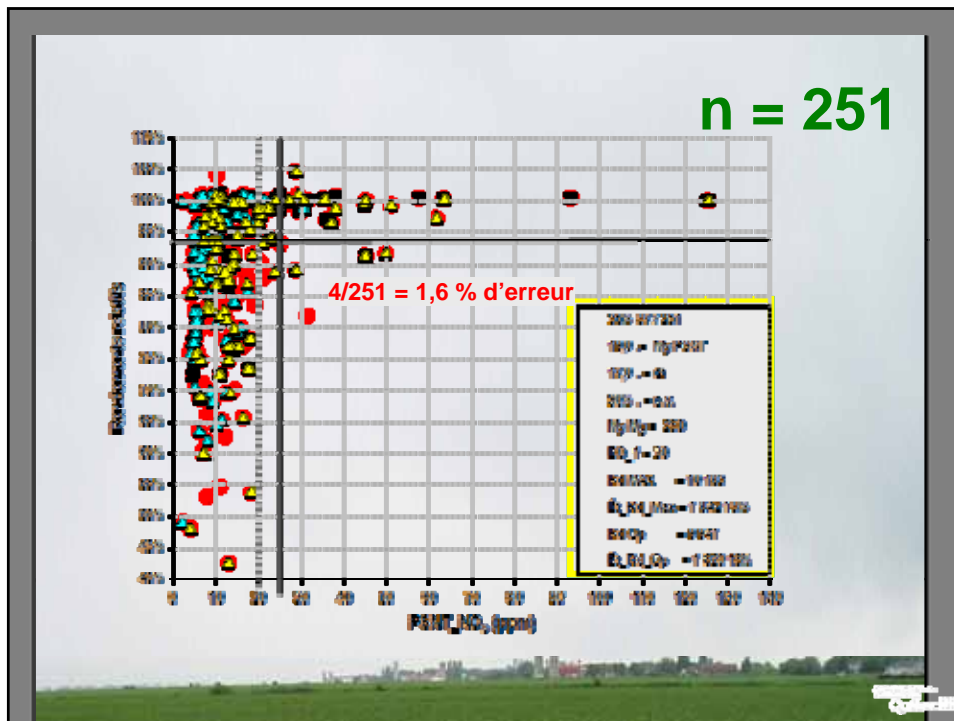
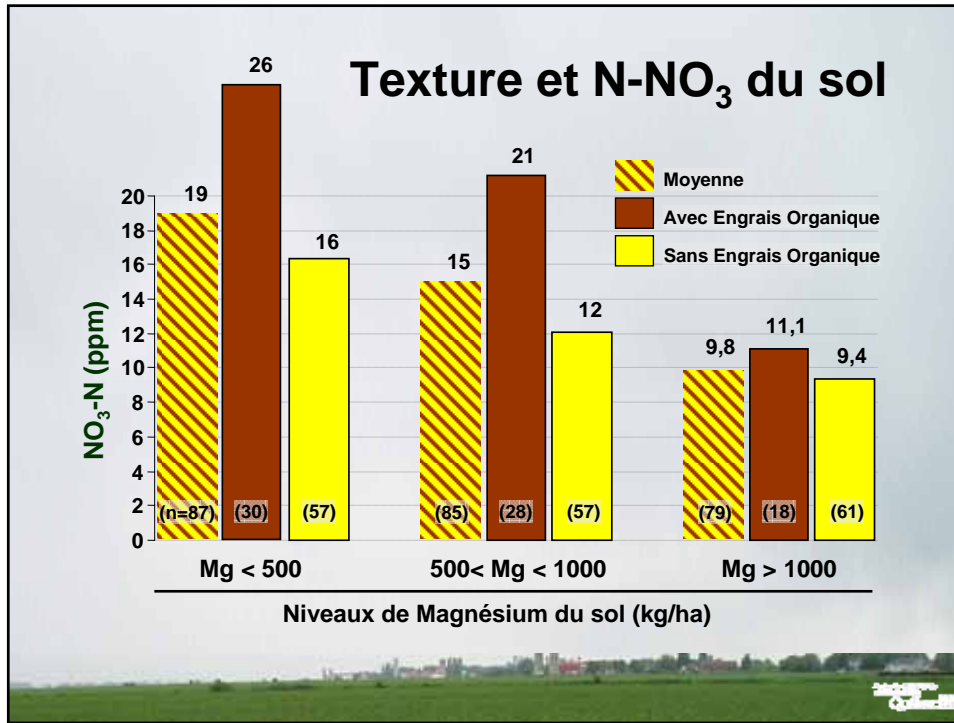


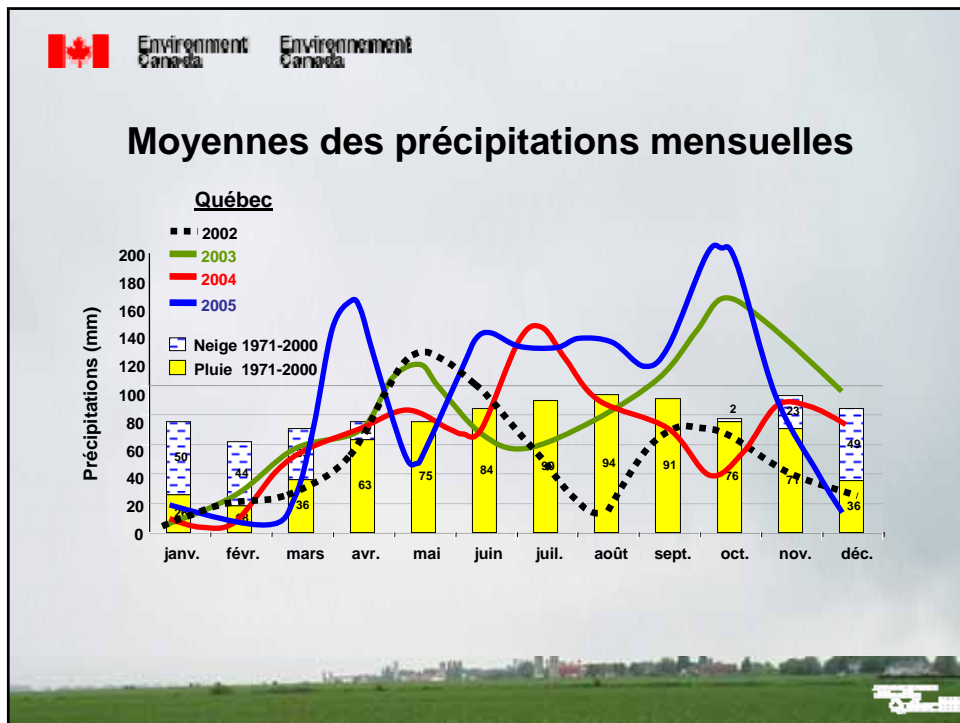
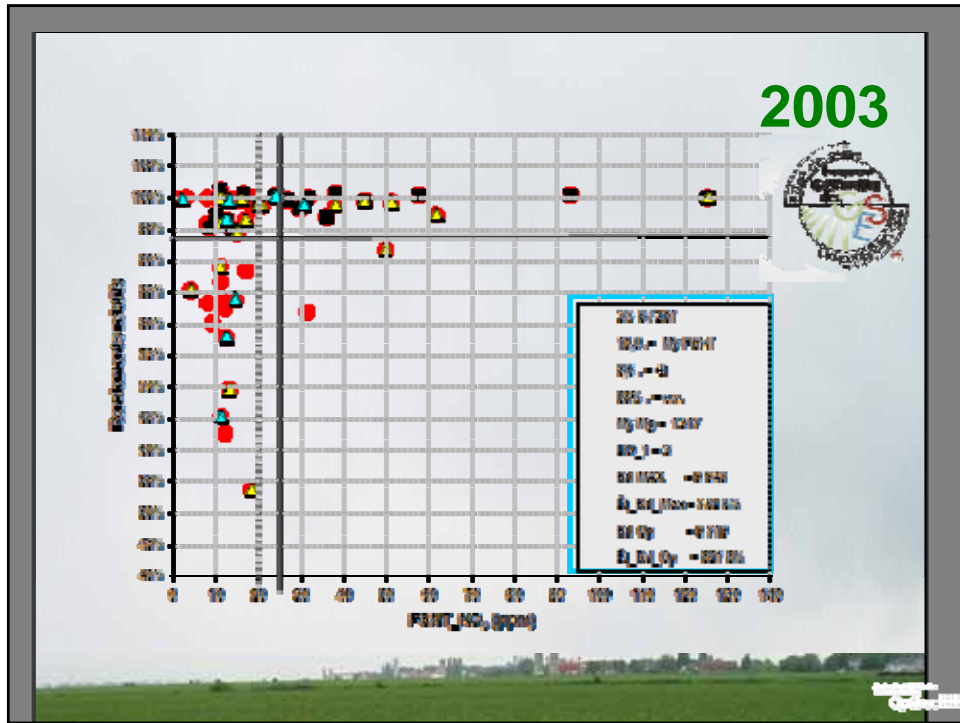
Source: Tran, 1996



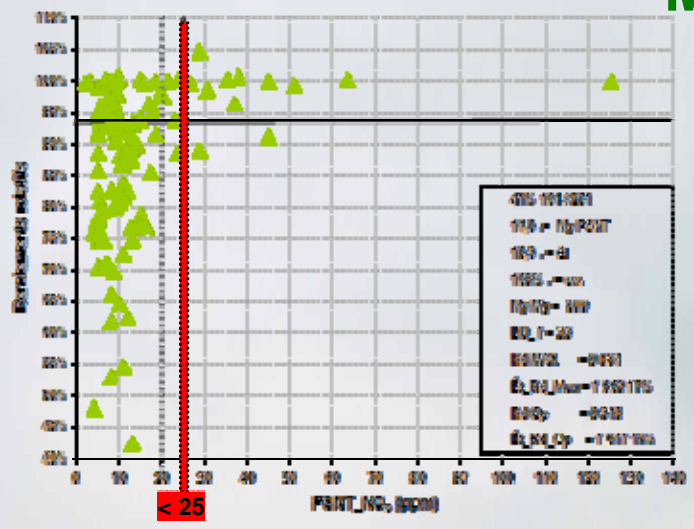




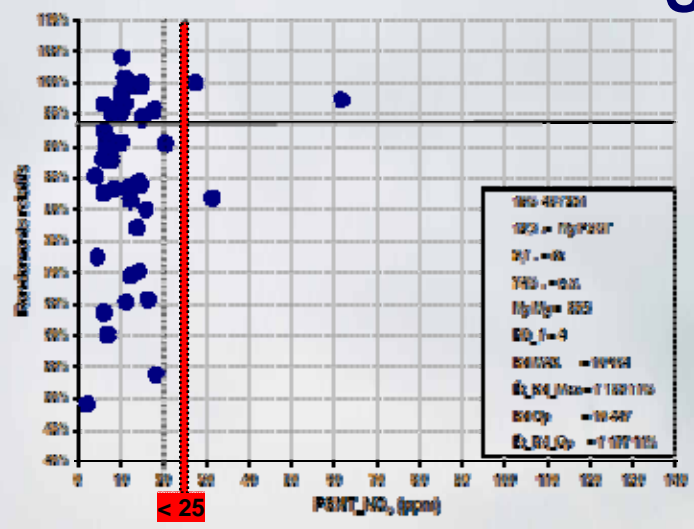




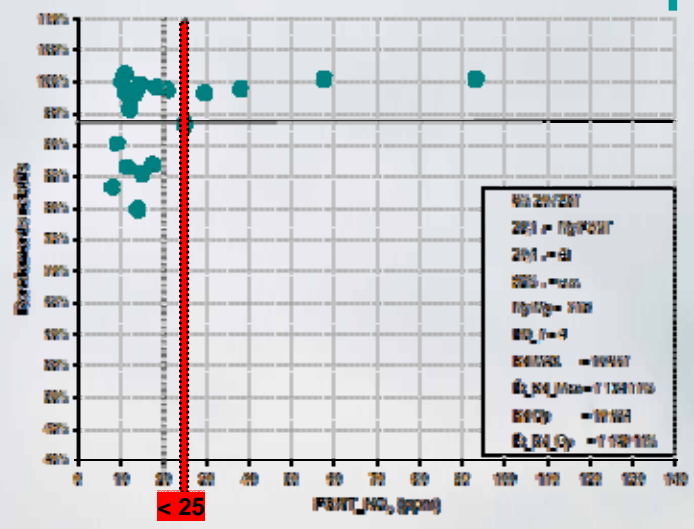
Maïs



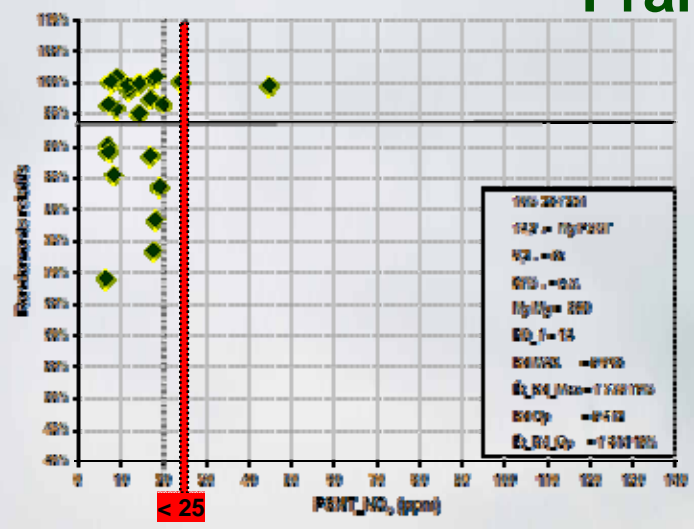
Soya

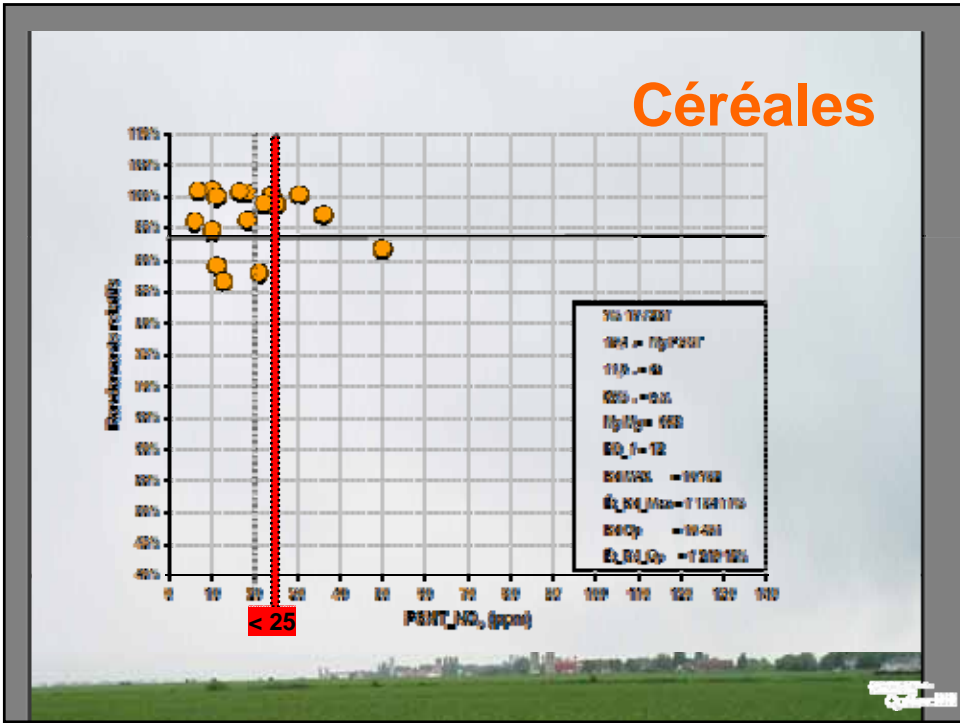
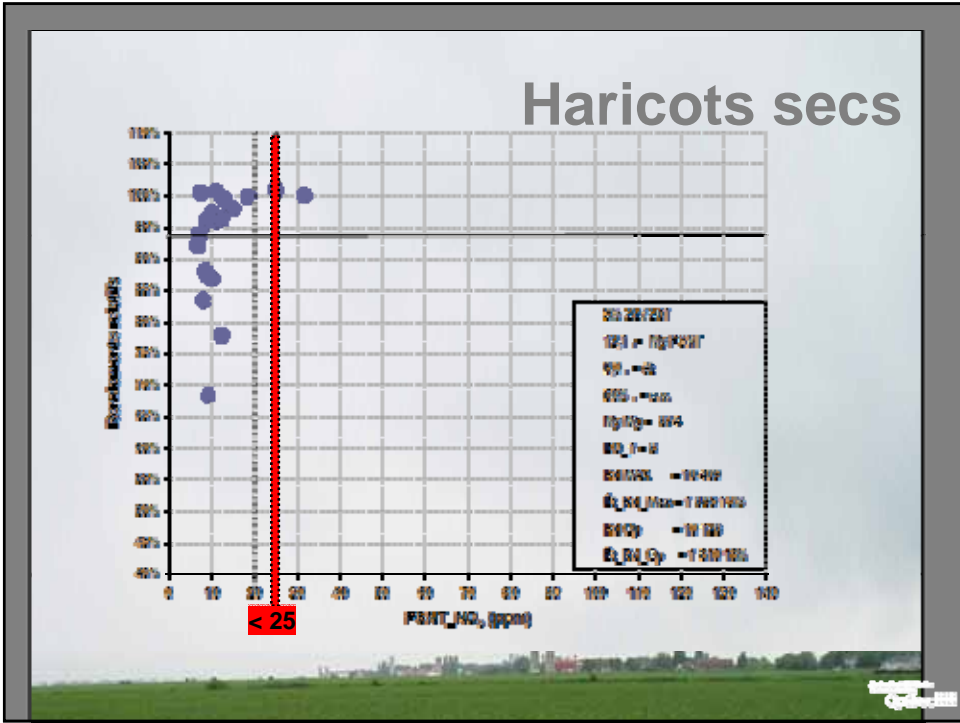


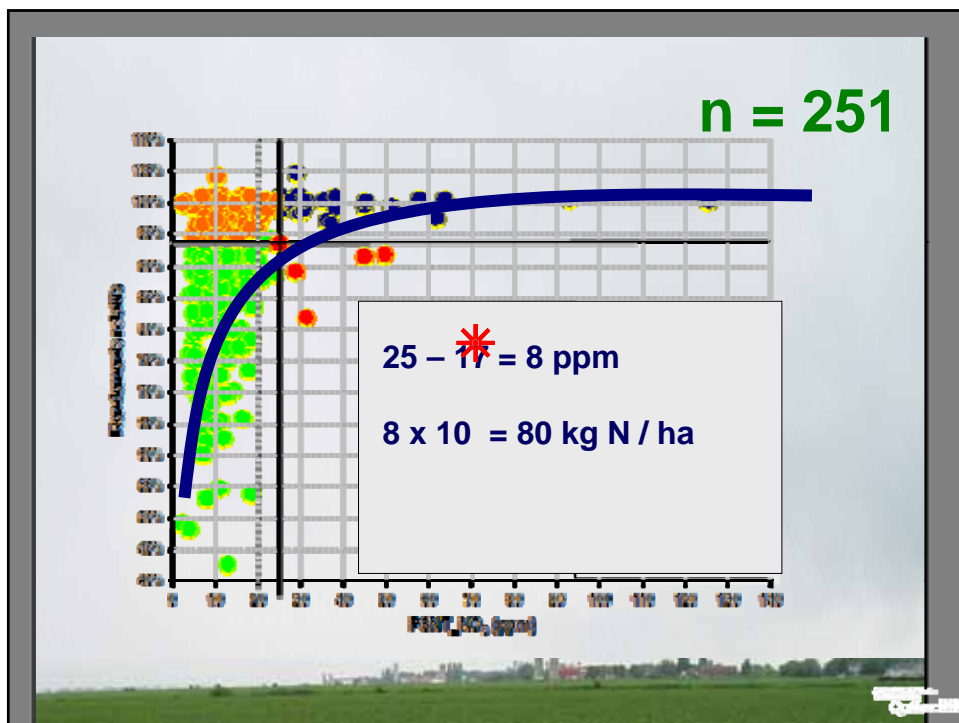
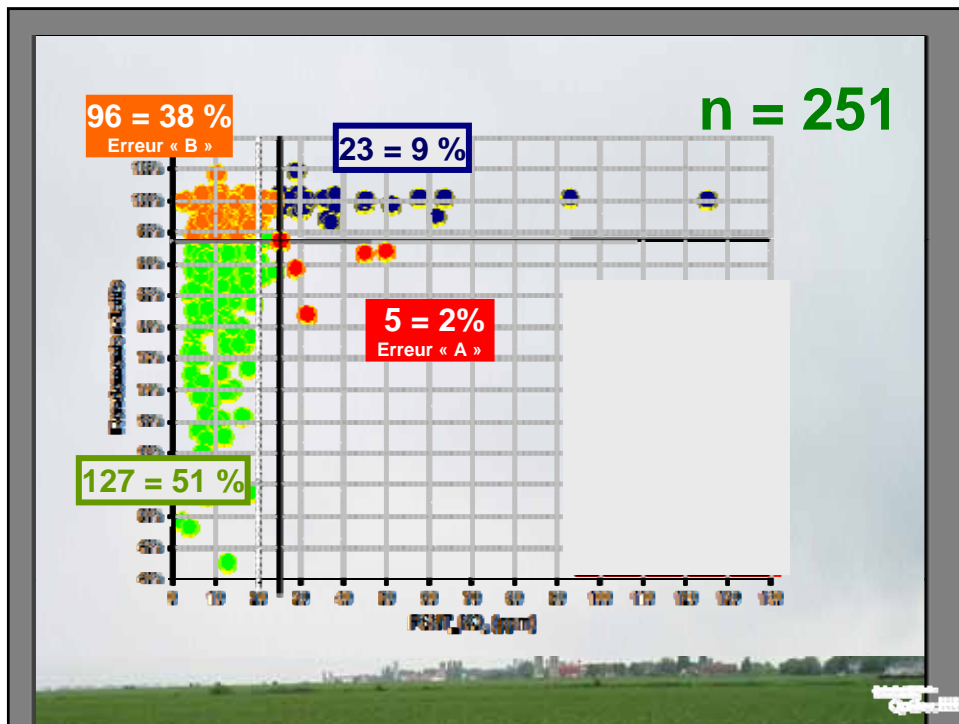
Pois

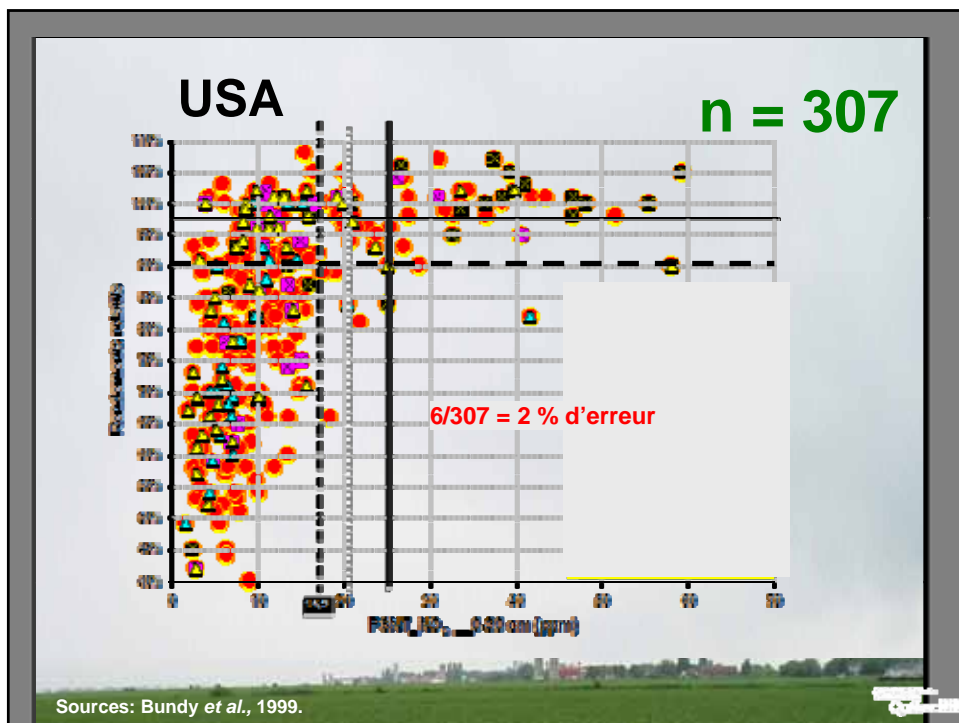
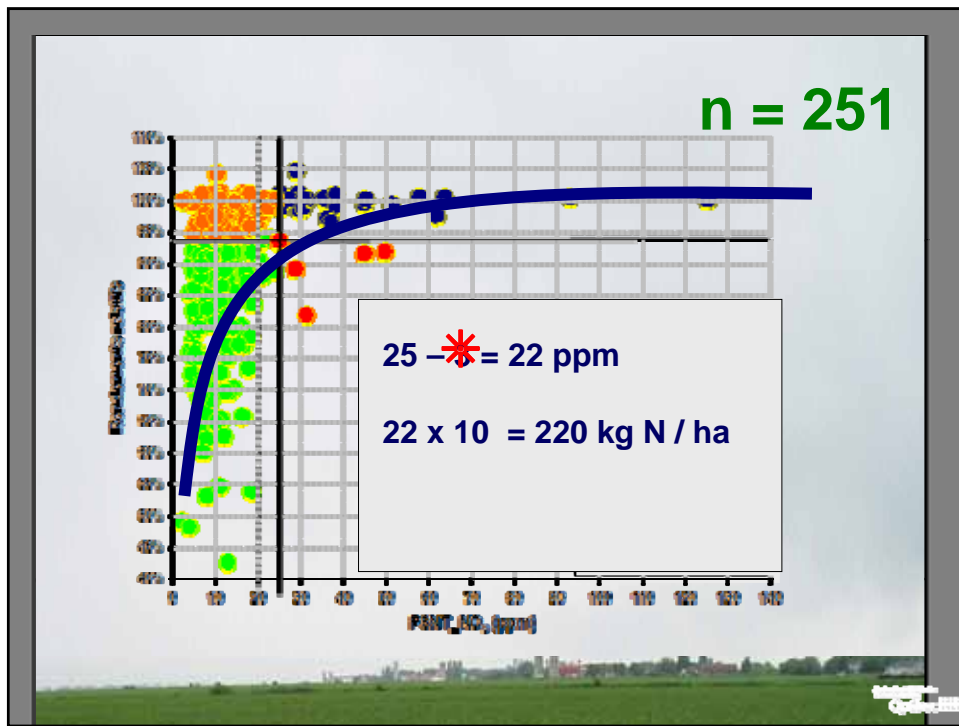


Prairies





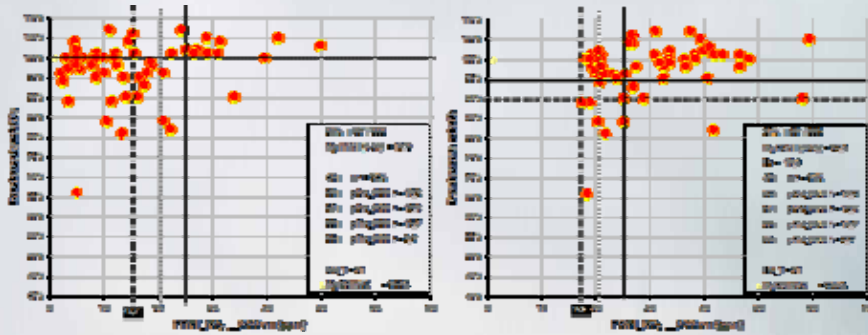




Différentes périodes d'Échantillonnage

Présemis 0-30 cm

Post-levée 0-30 cm

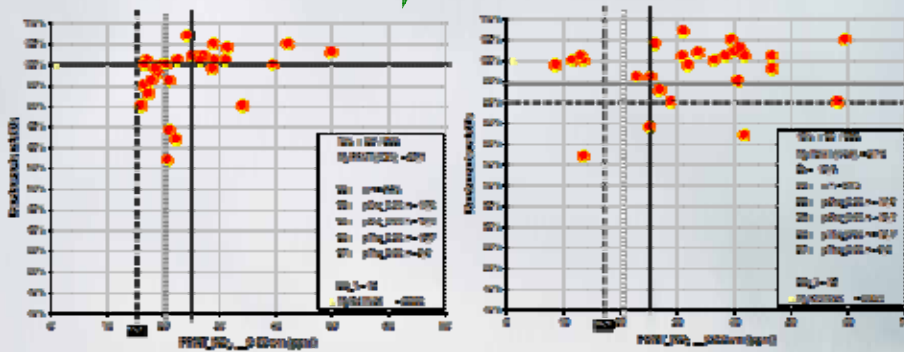


Sources: Bundy *et al.*, 1999.

Différentes périodes d'Échantillonnage

Présemis 0-30 cm

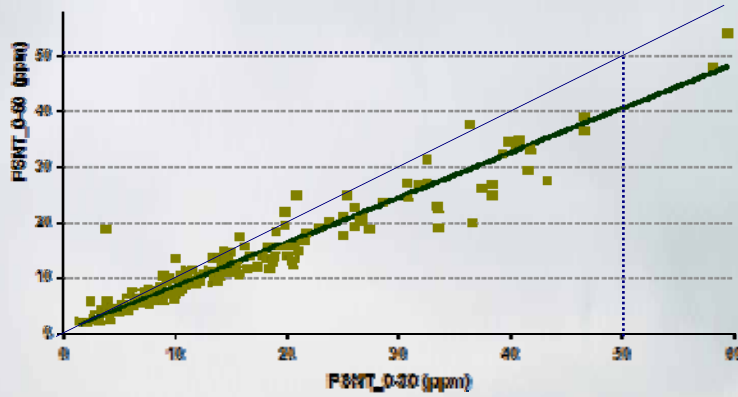
Post-levée 0-30 cm



Sources: Bundy *et al.*, 1999.

Différentes profondeurs d'Échantillonnage

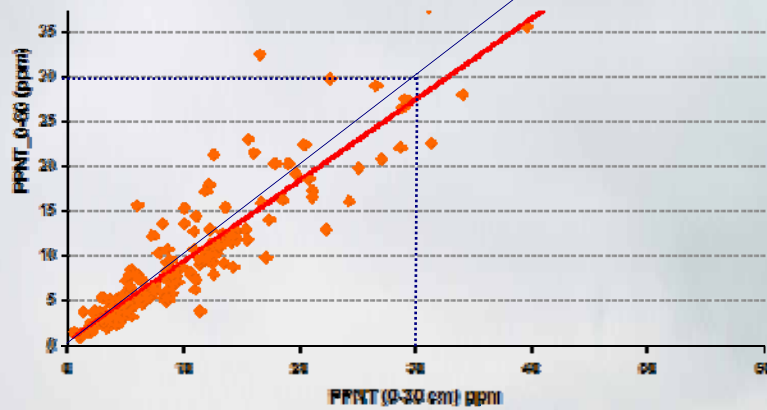
Post-levée: 0-30 vs 0-60 cm



Sources: Bundy *et al.*, 1999.

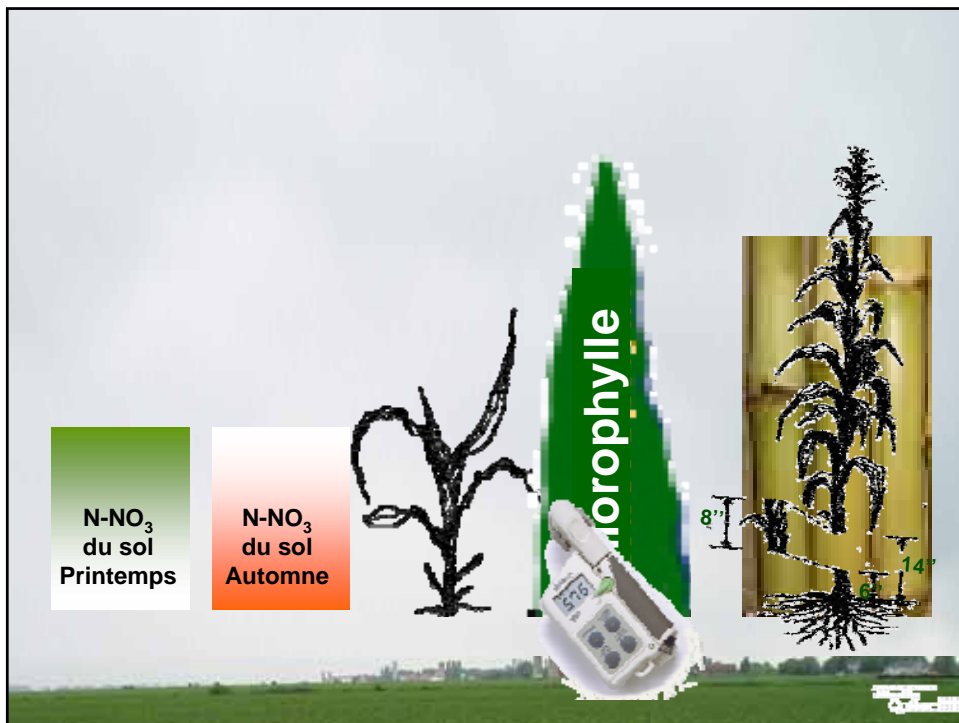
Différentes profondeurs d'Échantillonnage

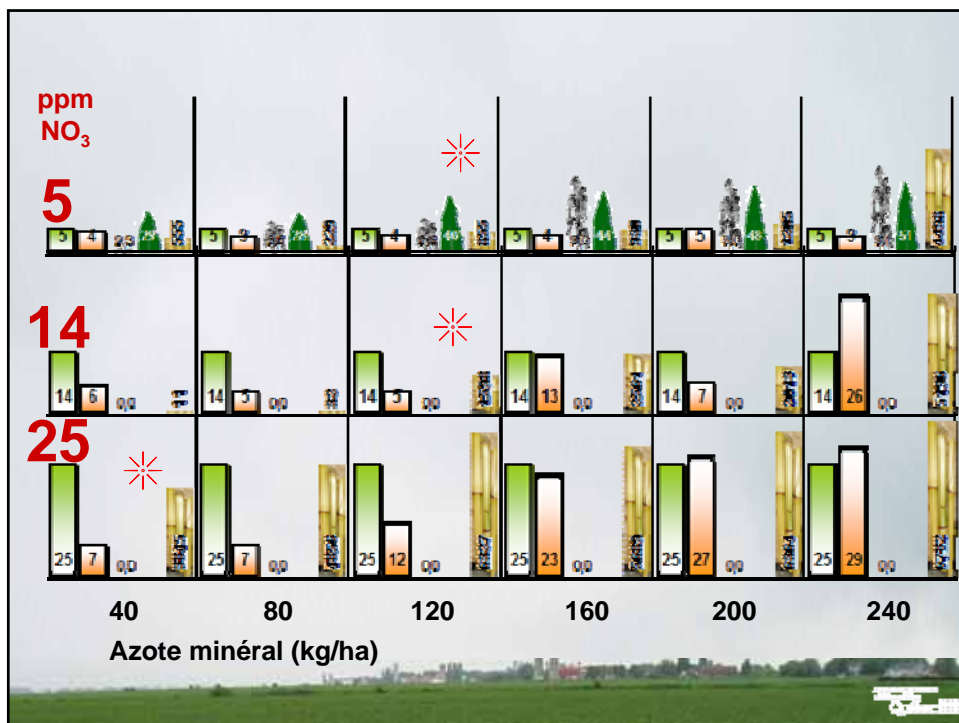
Présemis: 0-30 vs 0-60 cm



Sources: Bundy *et al.*, 1999.

Conclusion







Environnement
Canada

Environnement
Canada



Merci !