

FERTILISATION AZOTÉE DANS LE MAÏS-GRAIN



L'azote est un facteur important dans la fertilisation du maïs.

Un manque d'azote peut occasionner une baisse de rendement, alors qu'un excès représente un risque de contamination de l'air et de l'eau, en plus d'engager des frais inutilement. Ainsi, la surfertilisation et la sousfertilisation occasionnent toutes deux des pertes économiques non négligeables.

Cependant, en raison de la diversité des sols retrouvés sur les fermes, il en résulte de grandes variations dans leur capacité à fournir de l'azote, d'où l'importance de réaliser des essais sur plusieurs sites et durant plusieurs années.

11 ans d'essais
à la ferme
au Québec

123 sites,
près de
3000
parcelles

30 à 70
kg N/ha

meilleur rendement
économique dans
34 % des cas

160 à
170
kg N/ha

meilleur rendement
économique dans
82 % des cas

180
kg N/ha
et plus

baisse de rendement
dans 25 % des cas

L'objectif de ce document est de vulgariser le processus d'utilisation de l'azote par la plante, le comportement de ce fertilisant dans le sol et de cerner les enjeux liés à la fertilisation. Il contient également un résumé de recherches à la ferme et d'essais effectués sur l'azote depuis quelques années au Québec.

L'AZOTE ET L'ENVIRONNEMENT

Au Canada, le N₂O issu des activités agricoles représente à lui seul 5 % des émissions globales de gaz à effet de serre.

DÉNITRIFICATION ET VOLATILISATION

Le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ammoniac (NH₃) sont les plus importants gaz azotés produits par la fertilisation et contribuent à la pollution atmosphérique. Le N₂O pour sa part, est un gaz à effet de serre 300 fois plus puissant que le gaz carbonique. Celui-ci est produit principalement lors de la dénitrification dans le sol. Comme la dénitrification survient en absence d'oxygène, les émissions de N₂O sont plus importantes dans les sols lourds, compactés et mal drainés, ou dans des zones d'accumulation d'eau.

La volatilisation de l'ammoniac dans l'air est un phénomène qui survient dans les heures qui suivent l'application en surface d'un engrais ammoniacal.

Ce phénomène touche particulièrement les fumiers et lisiers qui contiennent beaucoup de NH₄⁺ et peut réduire fortement leur efficacité fertilisante. En effet, les pertes par volatilisation peuvent atteindre 30 à 60 % de leur teneur en NH₄⁺. Une incorporation, même superficielle, à l'intérieur des 12 heures suivant l'application du fumier ou du lisier est le meilleur moyen d'empêcher la volatilisation.



LESSIVAGE

Le lessivage des nitrates se produit quand les sols reçoivent plus d'eau que ce qu'ils peuvent retenir. L'eau en surplus s'infiltré dans le sol et entraîne avec elle les nitrates, qui atteignent le système de drainage souterrain puis les cours d'eau. Ce phénomène est plus préoccupant dans les sols à texture légère. La profondeur à laquelle les nitrates descendent dépend de la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol, ainsi que de l'état d'humidité du sol avant la pluie. Les fertilisants azotés, sous forme de nitrates (34-0-0, 27-0-0 et solution 32 %) sont sujets à ces pertes dès leur application. De plus, un peu d'ammonium peut être lessivé dans les sols sableux.

RUISSELLEMENT

Les pertes d'azote dues à l'érosion et au ruissellement concernent principalement l'azote ammoniacal. L'importance de ce phénomène dépend notamment de la teneur en argile des sols et de leur capacité d'échange cationique, puisque les argiles peuvent adsorber en surface ou fixer entre leurs feuillets les ions NH₄⁺. Un sol dégradé, compacté, ayant une forte pente ou démontrant toute autre caractéristique réduisant l'infiltration de l'eau sera plus propice aux pertes d'azote par érosion ou ruissellement. Une incorporation des engrais, surtout pour les sols en pente, est souvent un bon moyen de contrôler cette forme de perte.

Les problèmes environnementaux associés à la fertilisation azotée du maïs ont, bien entendu, des répercussions sur la pollution de l'eau. Ils sont également de plus en plus liés à la pollution atmosphérique et à l'émission de gaz à effet de serre. L'azote sous forme de nitrates (NO₃⁻) est très soluble et peut être perdu soit par dénitrification ou par lessivage. L'azote sous forme organique ainsi que l'azote ammoniacal (NH₄⁺) sont moins mobiles mais davantage susceptibles d'être perdus par ruissellement, particulièrement s'ils ne sont pas incorporés au sol. Dans le cas des applications de surface, la forme NH₄⁺ peut aussi se volatiliser dans l'air sous forme d'ammoniac (NH₃) et réduire l'efficacité de la fertilisation.



BONNE GESTION DE LA FERTILISATION AZOTÉE

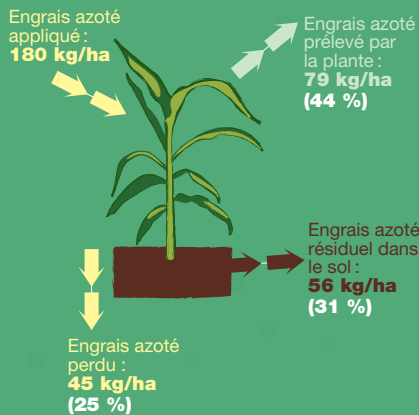
Pour réduire les pertes d'azote dans l'environnement et les pertes économiques qui en découlent, le producteur agricole doit optimiser trois aspects de la gestion de la fertilisation azotée (minérale et organique) dans le maïs : dose, moment d'application et conditions de sol.

DOSE :

La recherche au Québec a démontré que le maïs, comme d'autres cultures, prélève au mieux 50 % de l'azote des engrais minéraux appliqués. La figure 1 illustre le devenir de l'azote des engrais appliqués, après la récolte du maïs. On constate que suite à une application de 180 kg/ha d'azote minéral, 56 kg/ha (31 %) de cet engrais azoté se retrouvent sous forme organique à la suite de l'activité biologique du sol. Une importante partie de l'azote appliqué, soit 45 kg/ha (25 %), est perdue dans l'environnement. Plusieurs études ont démontré qu'au-delà du niveau de fertilisation optimale, le coefficient d'utilisation de l'azote par le maïs diminue beaucoup et le risque de pertes dans l'environnement s'accroît alors considérablement.

Figure 1: Devenir de l'engrais azoté appliqué dans une culture de maïs-grain.

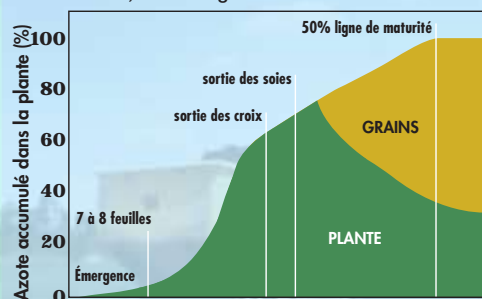
Adapté de Tran, 1995.



MOMENT D'APPLICATION :

Le maïs utilise la majeure partie de l'azote à partir de 3 à 4 semaines après la levée (environ à partir du stade 8 feuilles), tel qu'illustré à la figure 2. C'est pourquoi le fractionnement de l'azote permet de mieux synchroniser les applications avec les besoins de la culture. Selon la recherche effectuée au Québec, une année sur trois, l'apport de l'engrais azoté en bande en post-levée au stade 4 à 6 feuilles a augmenté les rendements ainsi que l'efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté par le maïs, en comparaison avec une application à la volée lors du semis.

Figure 2: Accumulation de l'azote (%) dans le maïs, de l'émergence à la maturité.



CONDITIONS DE SOL :

La plupart des processus de transformation de l'azote du sol et de l'engrais azoté apporté dépendent de l'activité biologique du sol. Ils sont donc très facilement affectés par les conditions climatiques et par les propriétés physico-chimiques du sol. L'efficacité de la fertilisation azotée sera meilleure si le pH est adéquat, si le sol a une bonne structure et s'il est bien drainé. Un bon égouttement du sol est également essentiel pour réduire les pertes par dénitrification.



APRÈS LA PLUIE...

Généralement, il n'est pas justifié d'appliquer de l'azote additionnel à la suite de fortes pluies en début de saison. Dans le doute, il importe d'évaluer les risques de pertes en azote en tenant compte de certains facteurs dont :

- la texture du sol;
- la quantité d'eau reçue;
- la teneur en eau du sol avant la pluie;
- l'intensité de la précipitation;
- le type d'engrais azoté appliqué et
- le délai entre l'application de l'engrais et la pluie.

Dans tous les cas, il ne faut pas oublier que le maïs utilise de l'azote qui provient d'autres sources que de l'engrais minéral appliqué (sol, résidus de culture et fumiers). Si les conditions météo sont fraîches et que le sol a été saturé en eau, ces sources ne pourront pas libérer rapidement l'azote dans le sol. Un réchauffement de la température rendra les formes d'azote non minérales davantage disponibles. L'aération du sol par un sarclage léger peut hâter ce processus.

Le maïs et l'azote

Chaque tonne de grains de maïs à 15 % d'humidité contient environ 15 kg d'azote. Une récolte de 8 tm/ha exporte ainsi quelques 120 kg/ha d'azote, en provenance du précédent cultural, de la minéralisation de la matière organique du sol, des engrais de ferme et de l'engrais minéral. Cependant, l'augmentation de la fertilisation azotée ne se traduit pas toujours par une augmentation de rendement. Plusieurs recherches démontrent que souvent, il n'y a aucun lien entre les rendements obtenus et les quantités d'engrais appliquées. En effet, lorsque les conditions (sol, climat) sont propices à un fort rendement, elles favorisent aussi une bonne libération de l'azote du sol (bonne minéralisation de la matière organique du sol, de l'azote résiduel, etc.). La culture s'alimente alors prioritairement de cette source.



ESSAIS RÉALISÉS AU QUÉBEC

MISE EN PLACE DES ESSAIS

Le guide de fertilisation du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) recommande de façon générale un apport d'azote de 120 à 170 kg/ha selon la zone climatique. Afin de préciser davantage ces recommandations, 123 essais à la ferme (sans fumier), ont été réalisés chez des producteurs du Québec de 1997 à 2005, pour un total de près de 3000 parcelles. Parmi ceux-ci, 103 ont été réalisés en zone 1 (2700-2900 UTM) et 20 en zone 2 (2500-2700 UTM). Ces essais ont été réalisés sous la responsabilité du Centre de recherche sur les grains (CÉROM) et du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), avec la participation de clubs-conseils en agroenvironnement. Le Programme d'atténuation des gaz à effet de serre (PAGES) a pour sa part contribué financièrement à ces essais pour les saisons 2003 à 2005.

La régie adoptée pour chacun des sites était celle du producteur, à l'exception de la fertilisation minérale azotée. La plupart de ces essais étaient composés de 24 parcelles de 6 à 8 rangs de largeur et 12 m de longueur. Chaque parcelle recevait de façon aléatoire un des 6 niveaux d'azote prévus (40, 80, 120, 160, 200 et 240 kg/ha total) et chaque niveau d'azote était attribué à 4 parcelles différentes afin de tenir compte de la variabilité spatiale du sol. La dose la plus faible correspondait à la quantité d'azote appliquée dans l'engrais de démarrage, avec le semoir. Quelques grandes parcelles avec répétitions, de la largeur du semoir et sur la longueur du champ, ont aussi été réalisées. Au stade 6 feuilles du maïs, le responsable du site procédait à l'application des différentes doses d'azote et s'assurait d'une incorporation adéquate au sol par un sarcléur ou à la main. Les épis étaient récoltés à la main sur les rangs du centre de chacune des parcelles. Le rendement, le poids spécifique des grains et l'humidité à la récolte étaient mesurés pour chaque parcelle.

En parallèle à ces essais, près de 180 grandes parcelles de démonstration fertilisées à 5 différents niveaux d'azote (échelonnés de 50 à 220 kg N/ha), ont été documentées pour la période 2003 à 2005, dans les mêmes zones que le réseau de parcelles scientifiques avec répétitions décrit précédemment. Ces essais ont été réalisés sous la responsabilité du MAPAQ, avec la collaboration de conseillers de clubs-conseils en agroenvironnement. Le PAGES a également pris part au financement de ces essais. Dans l'ensemble, les résultats de ces 2 réseaux vont dans le même sens.

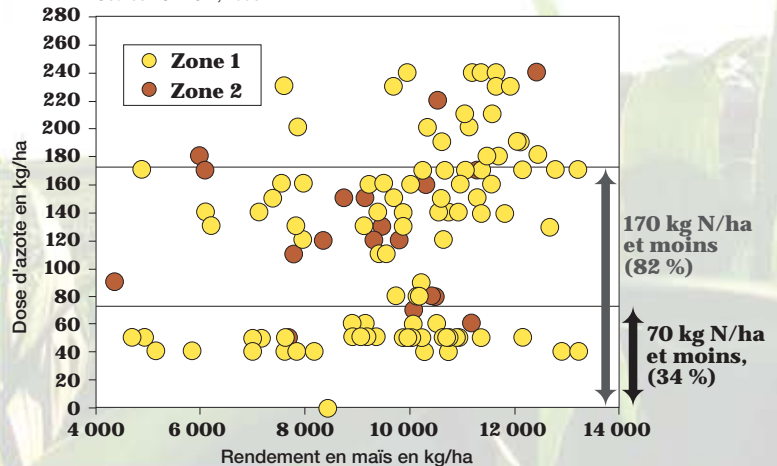
Selon les saisons, les apports naturels en azote peuvent varier de 64 à 360 kg/ha pour l'ensemble d'une parcelle.



RÉSULTATS

Figure 3 : Rendement observé à la dose d'azote économique optimale, pour chacun des essais.

Source : CEROM, 2006



Selon les 123 essais (sans fumier) réalisés dans les parcelles avec répétitions chez des producteurs au cours des 11 dernières années, un apport total d'azote de 170 kg N/ha a permis d'obtenir un rendement économique optimal dans plus de 80 % des cas, soit l'équivalent de 4 années sur 5. Cette dose totale prend en considération les contributions en azote estimées selon les grilles du CRAAQ pour l'azote du précédent cultural. La dose économique optimale de chacun des essais a été déterminée en fixant le prix de l'azote minéral à 1 \$/unité. Le prix du maïs-grain a été fixé selon le modèle de l'assurance-stabilisation, soit 180 \$/tonne pour les 7.2 premières tonnes et 120 \$/tonne pour le rendement additionnel. Une dose économique optimale signifie donc que chaque dollar investi en azote doit rapporter au moins un dollar de revenu en grains. Une variation dans le prix de l'azote aura un impact sur la dose économique optimale.

En effet, à un prix de l'azote de 1,20 \$/kg, l'application de 150 kg/ha permettrait d'atteindre le rendement économique optimal dans 75 % des cas. Ce même seuil de rendement économique (soit dans 74 % des cas) serait atteint avec 140 kg/ha si l'azote était à 1,40 \$/kg.

D'autres scénarios, tenant compte de différentes méthodes de calcul du prix du maïs et du coût de l'azote, sont présentés au tableau 1. Les doses recommandées permettent d'atteindre le rendement économique optimal dans 80 % des cas.

Tableau 1 : Dose d'azote économique optimale (kg N/ha) en fonction du prix du maïs et du coût de l'azote

Source : CEROM, 2006.

\$/kg N	Prix du maïs stabilisé	Maïs à 120 \$/t pour l'ensemble de la récolte, sans la stabilisation	Maïs à 100 \$/t pour l'ensemble de la récolte, sans la stabilisation
1,00	160-170	160-170	150-160
1,10	160-170	160-170	130-140
1,20	150-160	150-160	130-140
1,30	140-150	150-160	120-130
1,40	140-150	140-150	120-130

Ainsi, il apparaît que la dose économique optimale varie de 120 à 170 kg/ha d'azote, selon le prix du maïs et le coût de l'azote. Ces recommandations sont le résultat de 123 essais de maïs sans fumier, réalisés durant 11 années.

Pour l'ensemble des essais réalisés, l'apport supplémentaire d'azote n'a permis d'augmenter le poids spécifique du grain que dans 29 % des cas. Également, la fertilisation azotée n'a eu que très peu d'effet sur l'humidité des grains à la récolte (dans 14 % des essais). Des baisses de rendement ont été mesurées dans 25 % des cas lorsqu'on dépasse la dose de 170 à 180 kg N/ha.

Enfin, le maïs répond de façon similaire à l'azote, que l'on soit dans une zone de 2700 à 2900 UTM (zone 1) ou dans une zone de 2500 à 2700 UTM (zone 2), tel qu'illustré à la figure 3. Sur cette figure, chaque point correspond au rendement obtenu à la dose d'azote économique optimale pour chacun des 123 essais sans fumier (103 essais en zone 1 et 20 essais en zone 2).

La figure 3 illustre également la variabilité des réponses à l'azote selon les sites étudiés. D'après ces données, des doses de 30 à 70 kg N/ha, soit la quantité appliquée au démarreur dans le semoir, ont permis d'obtenir le meilleur rendement économique dans 1 cas sur 3 (34% des essais). Par exemple, les deux points jaunes dans le coin inférieur droit de la figure 3 correspondent à deux sites où des doses aussi faibles que 40 kg N/ha ont permis d'obtenir des rendements d'environ 13 t/ha. Dans de telles situations, il apparaît que les conditions de sol (drainage, structure, aération et autres) devaient être propices à une excellente libération de l'azote du sol.

Afin d'identifier dans quels champs et dans quelles conditions des doses inférieures à 170 kg N/ha procurent le rendement économique optimal, il est essentiel de réaliser des essais à la ferme. Il est reconnu par les spécialistes que la mise en place de grandes parcelles constitue un excellent outil de sensibilisation. Le programme PAGES a permis la réalisation de 181 grandes parcelles qui confirment la variabilité des réponses à l'azote, notamment selon le type de sol. Ainsi, dans plus de 90 % de ces essais, une dose de 160 kg/ha d'azote a permis d'atteindre le rendement agronomique maximal. À partir de ces résultats, les producteurs agricoles sont en mesure de préciser ces doses par des essais avec répétitions, afin de tenir compte des conditions particulières de sol et de rotation retrouvées sur leur ferme.

Outils

Il y a un intérêt économique et environnemental indéniable à préciser davantage les besoins en azote du maïs. D'abord, il importe de tenir compte de toutes les sources d'azote disponibles (précédent cultural, fumiers, matière organique, etc.) et d'ajuster la recommandation en fonction de l'état du sol (drainage, structure, etc.). Mais puisque l'aptitude des sols à fournir de l'azote est très variable, il peut être utile d'avoir recours à des outils qui peuvent soit servir à optimiser la dose d'azote à appliquer (outils prévisionnels utilisés en début de saison, avant l'application de l'azote en post-levée) ou encore à évaluer la justesse de la quantité d'azote appliquée plus tôt en saison (outils de diagnostic, utilisés en fin de saison).

Outils PRÉVISIONNELS

ANALYSE DE LA TENUEUR EN NITRATES DU SOL, EN POST-LEVÉE DU MAÏS

Cette méthode repose sur la relation qui existe entre la quantité de NO_3^- disponible dans les 30 premiers centimètres de sol en début de saison et la réponse du maïs aux engrais azotés. L'échantillonnage doit être réalisé après le début de la minéralisation de l'azote, lorsque le maïs atteint le stade 5 à 6 feuilles. Les résultats doivent être obtenus rapidement, dans un délai de 24 à 48 heures, pour laisser le temps d'appliquer l'azote en post-levée. Il faut donc recourir à des méthodes d'analyses rapides. Les essais réalisés au Québec ont permis de démontrer que lorsque le sol contient des niveaux de NO_3^- supérieurs à 25 ppm, il a la capacité de minéraliser suffisamment d'azote pour répondre aux besoins du maïs

et permettre l'obtention d'un rendement optimal. Une application additionnelle d'azote ne procurerait donc aucun gain. Lorsque la teneur en NO_3^- est inférieure à 25 ppm, un champ sur deux ne répondra pas à l'application d'azote. Dans ce cas, l'agriculteur et son conseiller doivent s'en remettre à leur expérience pour ajuster la dose selon les critères de valorisation des engrais organiques et des précédents culturaux déjà reconnus en fertilisation.



CHLOROPHYLLE- MÈTRE

Cette méthode est basée sur la teneur en chlorophylle des feuilles de plants de maïs. Elle implique qu'une application minimale d'azote soit réalisée au semis, suivie d'une application en post-levée. Deux parcelles de référence « saturées » en azote doivent être établies dans le champ. La lecture avec le chlorophylle-mètre est réalisée juste avant l'application d'azote en post-levée. La relation entre les données recueillies dans les parcelles « témoins » et les parcelles « saturées » permet de déterminer la dose d'azote requise.

CAPTEURS OPTIQUES (N-sensor, CropScan et autres)

Les capteurs optiques évaluent les quantités de chlorophylle et de biomasse du couvert végétal pour déterminer les besoins en azote de la culture. Les données sont recueillies lorsque le maïs a de 6 à 8 feuilles, juste avant l'application d'azote en post-levée.

Les outils pour mesurer la réflectance, tout en ajustant l'application de la dose d'azote en continu dans le champ sont actuellement disponibles, mais des travaux additionnels sont requis afin de calibrer les valeurs de réflectance avec les besoins en azote du maïs.



CONCLUSION

La recommandation d'une dose d'azote doit considérer que le rendement maximal d'une culture ne se traduit pas nécessairement par un bénéfice économique maximal. En effet, il arrive que le coût relié à l'augmentation de rendement dépasse le coût de l'azote supplémentaire qui a rendu possible ce gain.

La recherche réalisée au Québec au cours des onze dernières années, sur 123 sites de maïs-grain sans fumier, a démontré qu'un apport total d'azote de 120 à 170 kg N/ha (selon le prix du maïs et le coût de l'azote) permet d'obtenir un rendement économique optimal dans plus de 80 % des cas, soit l'équivalent de 4 années sur 5.

Afin de préciser le niveau d'azote qui pourrait leur permettre d'atteindre le rendement économique optimal, les producteurs agricoles ont tout intérêt à effectuer des essais structurés à la ferme (grandes et petites parcelles) dans leurs conditions de sol, de rotation et de climat. Il existe différents outils qui peuvent être utilisés à la ferme afin de mieux comprendre et évaluer la fertilisation azotée (outils prévisionnels et de diagnostic). De plus, la recherche se poursuit et il importe de rester à l'affût des développements à ce chapitre.

Témoignage de Michel Deslauriers, Ferme M.D. inc., Napierville

Michel Deslauriers exploite une ferme de grandes cultures en Montérégie. La dose économique optimale d'engrais azoté dans le maïs-grain le préoccupe et ce, pour des motifs économiques et environnementaux. Afin d'établir cette dose, il a mis en place avec l'aide de son conseiller de club-conseil en agro-environnement, 16 sites d'essais d'azote depuis 2000. Pour ce faire, l'entreprise a été scindée en 3 blocs correspondants aux types de sol les plus représentatifs de l'exploitation. Ces blocs présentent des caractéristiques fort différentes de même que des historiques de rotation et d'application de fumier très distincts. La démarche de validation a nécessité la réalisation de 2 types de parcelles. Ainsi, la mise en place de parcelles de grandes dimensions, sans répétitions, a permis de dresser un portrait général

de la réponse à l'azote des différents types de sol. La réalisation de parcelles de petites dimensions, avec des répétitions pour chaque traitement, a permis de préciser les doses optimales pour ces sols. L'interprétation des résultats sur 16 essais suggère que des doses de 115 à 155 kg d'N/ha (retour de soya) permettent d'atteindre le rendement économique optimal, selon l'historique des champs et le type de sol. Michel précise : « L'utilisation de parcelles à la ferme permet d'évaluer avec assurance quelle dose convient pour mes sols. L'aide de mon conseiller a été fort utile pour avoir de la rigueur dans la démarche. Je suis étonné de la variabilité de la réponse selon les types de sol. Depuis ces essais, je suis convaincu que les doses proposées ne sacrifient en rien mes rendements! »

Responsable du projet :
Carl Bérubé, agr. PAGES

Équipe de rédaction :

Rédactrice principale;
Sylvie Thibaudeau, agr. Terre à terre
agronomes-conseils

Comité de rédaction :
Jean Cantin, agr. MAPAQ
Pierre Filion, dta, MAPAQ
Daniel Guay, producteur agricole
Roger Rivest, agr. MAPAQ
Éric Thibault, agr. Club Techno-Champ 2000
Gilles Tremblay, agr. CEROM

Comité de révision :
Martin Chantigny, Ph. D., AAC
Marcel Giroux, M.Sc., IRDA
Noura Ziadi, Ph. D., AAC

Conception graphique :
Format L78

Crédits photographiques :
Carl Bérubé, François Cadrin, Pierre Filion,
Marie-Anne Langevin et Sylvie Thibaudeau

mai 2006

Collaboration spéciale pour la
réalisation des parcelles 2003-2005:

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation
Québec

Clubsconseils
EN AGROENVIRONNEMENT

CEROM
Centre de recherche sur les grains inc.

OUTILS DE DIAGNOSTIC

ANALYSES FOLIAIRES

Les analyses foliaires permettent de connaître l'assimilation des éléments nutritifs par la plante, à un moment précis de son développement. Plusieurs études récentes ont démontré qu'elles étaient fort utiles pour détecter les carences, mais peu pour détecter les excès. Dans le cas du maïs, l'échantillonnage peut être réalisé au stade plantule du maïs (plantules entières récoltées) ou au moment de l'apparition des soies (feuilles sous l'épi).

ANALYSE DE LA TENEUR EN NITRATES dans les tiges de maïs en fin de saison

La recherche a démontré que la tige de maïs accumule des nitrates lorsque le plant atteint sa maturité physiologique. Si l'azote est déficient, la concentration en NO_3^- dans les tiges diminue durant le remplissage des grains, alors que si l'azote dépasse les besoins de la culture, la concentration en NO_3^- augmente proportionnellement à la quantité d'azote disponible dans le sol. La mesure des NO_3^- des tiges durant les 2 à 3 semaines suivant l'apparition du point noir (et même à partir du stade $\frac{1}{4}$ de ligne d'amidon) est donc particulièrement utile pour détecter des excès en azote qui passent facilement inaperçus. Cette méthode peut également permettre d'évaluer l'efficacité du placement de l'azote. Les analyses peuvent être réalisées à l'aide de tests rapides ou en laboratoire (voir la section *Analyse de la teneur en nitrates du sol, en post-levée du maïs*).

ÉVALUATION VISUELLE du nombre de feuilles vertes sous l'épi (« leaf firing »)

Il est fréquent d'observer des symptômes de carence en azote sur les feuilles inférieures, au fur et à mesure que les plants approchent de la maturité et ce, même si le sol renferme une concentration en azote compatible avec un rendement optimal. Ainsi, la recherche américaine a permis d'établir que si le plant présente 4 feuilles vertes ou plus sous l'épi, (une feuille verte étant définie comme présentant moins de 25 % de jaunissement) au stade $\frac{1}{4}$ de ligne d'amidon, l'azote a été suffisant. Toutefois, sous ce seuil, on ne peut affirmer que l'azote a été insuffisant. Cette méthode ne permet donc pas d'identifier des carences en azote.



COLORATION DES TIGES DE MAÏS, en fin de saison

La coloration des tiges de maïs à l'aide d'acide sulfurique (H_2SO_4) en fin de saison, soit durant les 2 à 3 semaines suivant l'apparition du point noir, permet de visualiser l'accumulation des nitrates. Ces tests ne permettent pas de diagnostiquer une carence en azote (dans le cas d'une absence de coloration), mais permettent plutôt de détecter des excès.

