

TITRE DE LA PRÉSENTATION :

La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote



AUTEUR : **Adrien N'Dayegamiye**, Ph.D., agronome
Chercheur senior, IRDA
Professeur associé, Université Laval
Québec

COLLABORATEURS : **Marcel Giroux** et **Marc O. Gasser**

1. INTRODUCTION

De tous les éléments nutritifs, l'azote est celui qui est le plus difficile à gérer en fertilisation. Mais en même temps, il est l'élément nutritif le plus important pour la croissance des cultures et les niveaux de rendements. En effet, c'est principalement l'azote qui détermine le développement de la plante et des racines et qui stimule l'absorption optimale des autres éléments nutritifs du sol. Sans quantités adéquates d'azote, les autres éléments nutritifs sont donc moins absorbés dans la plante.

Autant les doses optimales d'azote peuvent stimuler la croissance et la productivité des cultures, autant son excès peut conduire à des baisses de rendement et à la diminution de la qualité des récoltes. De plus, l'excès d'azote favorise l'infestation de maladies et d'insectes, et augmente les transferts d'azote du sol vers l'air et les eaux. Il ressort qu'il est important d'établir des doses optimales d'azote pour les cultures, en se basant notamment sur l'azote minéralisé de la matière organique ou des matières organiques appliquées.

La comptabilisation de l'azote disponible du sol peut procurer des bénéfices économiques, car sous de bonnes conditions de sol et de climat du Québec, le sol peut fournir jusqu'à 200 kg d'azote à la culture. En effet, dans un sol riche en azote, plus de deux tiers des besoins des cultures en azote peuvent être comblés par le sol, le reste provenant de l'engrais minéral azoté. Par contre, dans des sols pauvres ou compactés avec de faibles potentiels de minéralisation, le sol peut ne fournir que moins d'un tiers des besoins en N des cultures.

Toutefois, l'azote du sol se retrouve principalement sous forme organique et doit donc être minéralisé par les microorganismes du sol afin de devenir par la suite disponible aux plantes pendant la saison de croissance. Il n'est donc pas facile de savoir combien d'azote du sol sera minéralisé et à quel moment! Pour répondre à ces questions, il est nécessaire de

considérer et d'intégrer beaucoup de facteurs, tels les cultures de rotation, les modes de fertilisation organique ou minérale, les techniques culturales, les teneurs en matière organique du sol et les résidus organiques apportés, la texture et la structure du sol, le pH et les conditions pédoclimatiques. Ainsi, tous ces facteurs déterminent la croissance et les activités des microorganismes du sol, et par conséquent les quantités d'azote minéralisées au cours de la saison de végétation.

La minéralisation de l'azote du sol est le résultat de la décomposition des matières organiques du sol ou d'autres sources organiques par les bactéries et les champignons du sol. Le carbone sert avant tout comme source d'énergie pour la microflore du sol. L'azote sous forme organique est converti en même temps par hydrolyses et désaminations en acides aminés ou en azote ammoniacal. Une partie de l'azote minéralisé est utilisée par les microorganismes pour leur synthèse protéique, tandis que l'autre partie est libérée dans le sol sous forme d'azote ammoniacal. Les microorganismes nitrificateurs transforment ensuite l'azote ammoniacal en nitrates.

2. FACTEURS RELIÉS AU POTENTIEL DE MINÉRALISATION D'AZOTE

2.1. La matière organique

La nature de la matière organique influence le rythme de croissance des microorganismes. Il est connu que les matières organiques facilement minéralisables augmentent et diversifient la microflore du sol, et par conséquent les taux de décomposition de la MO et de celui de la minéralisation d'azote.

Matière organique ou matières organiques? La matière organique que nous mesurons dans les sols peut être scindée en trois fractions différentes selon leur potentiel de minéralisation. Il est d'abord question de la matière organique labile appelée aussi fraction active à cause de sa décomposition rapide, ensuite de la matière organique lentement minéralisable et enfin de la fraction stable ou récalcitrante à la minéralisation. La fraction labile représente entre 5 et 10 % de la matière organique totale (N'Dayegamiye *et al.*, 1997).

Dans une étude d'incubation conduite sur une période de 56 semaines, les quantités d'azote minéralisées ont varié de 88 à 235 mg N/kg de sol, soit de 197 à 526 kg N/ha. L'azote minéralisé pendant cette période de 56 semaines représentait 6,6 à 22 % de l'azote total. Les sols analysés provenaient de 34 sites repartis sur des fermes laitières et incluaient sept séries de sols. Les rotations des cultures, qui étaient principalement des prairies, avaient enrichi les sols en matière organique labile ou active.

La fraction labile de la matière organique a été minéralisée pendant les premières 26 semaines, tandis que la fraction lentement minéralisable ou récalcitrante a été minéralisée entre la 26^e et 56^e semaine (Sbih *et al.*, 2002). Les taux de minéralisation de la matière organique labile facilement minéralisable étaient 20 fois plus élevés que pour la fraction

récalcitrante et représentaient en moyenne 5 mg N/kg/semaine, soit 130 mg N/kg sol en 26 semaines. Le taux moyen de minéralisation de la fraction lentement minéralisable était de 0,26 mg N/kg/semaine, ce qui représentait 7,8 mg N minéralisé/kg de sol entre la 26^e et la 56^e semaine.

Soulignons que la minéralisation de l'azote de la matière organique du sol ou des matières organiques incorporées se déroule principalement en deux phases, soit une première phase de minéralisation intense de la fraction labile, pendant environ 60 jours, suivie d'une phase plus lente de minéralisation portant sur la fraction lentement minéralisable. (Exemple : Figure 1)

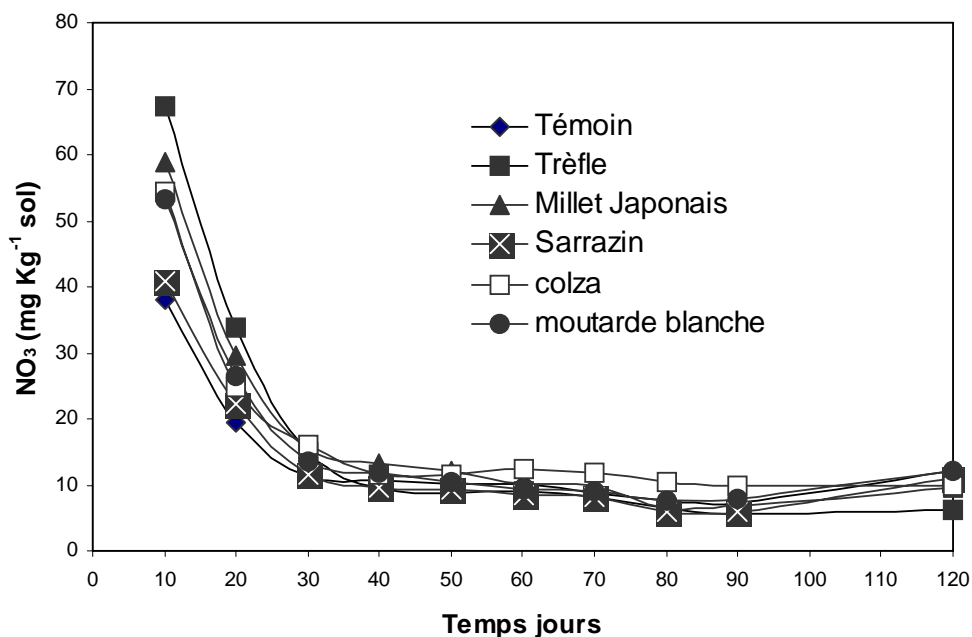


Figure 1. Quantités d'azote minéralisées à la suite d'applications de divers engrais verts dans le sol (Abdallahi et N'Dayegamiye. 1999. Can. J. Soil Sci. 80 : 81-89.)

2.2. Humidité et température du sol

Les taux de minéralisation d'azote dépendent aussi de l'humidité et de la température du sol (Ellert et Bettany, 1992). L'activité des microorganismes est faible dans les conditions de sol sec. Par exemple, les sols sablonneux bien drainés ayant une grande porosité perdent rapidement leur contenu en eau, soit par infiltration ou évaporation. Par contre, les sols contenant de l'argile ou du limon présentent des pores plus petits et peuvent contenir suffisamment d'eau, même en période de sécheresse, pour satisfaire les besoins des microorganismes du sol. Jusqu'à une certaine limite, les activités biologiques et les taux de minéralisation d'azote augmentent ainsi avec les augmentations de température et d'humidité dans les sols.

Les variations de températures dans le sol durant la saison de croissance peuvent donc avoir un effet marqué sur les quantités d'azote minéralisées dans le sol, tels qu'en témoignent les résultats de simulation présentés aux Figures 2a et 2b. L'azote minéralisé présenté dans ces figures a été simulé à partir de résultats d'incubation provenant de deux sols sableux ayant des antécédents culturaux contrastants et incubés à des températures de 4, 14 et 24 °C (Gasser, 2000). Ainsi, sous un climat tempéré froid, si les conditions d'humidité sont constantes et le sol n'est pas travaillé, les plus forts taux de minéralisation peuvent avoir lieu en juillet, suivi des mois d'août et juin, et l'azote minéralisé du sol risque de ne pas contribuer de façon importante à la fertilisation de cultures hâtives comme les céréales. Dans ces sols sableux, la contribution non négligeable en azote d'un retour de prairie sera mieux valorisée par des cultures plus tardives comme le maïs ou la pomme de terre.

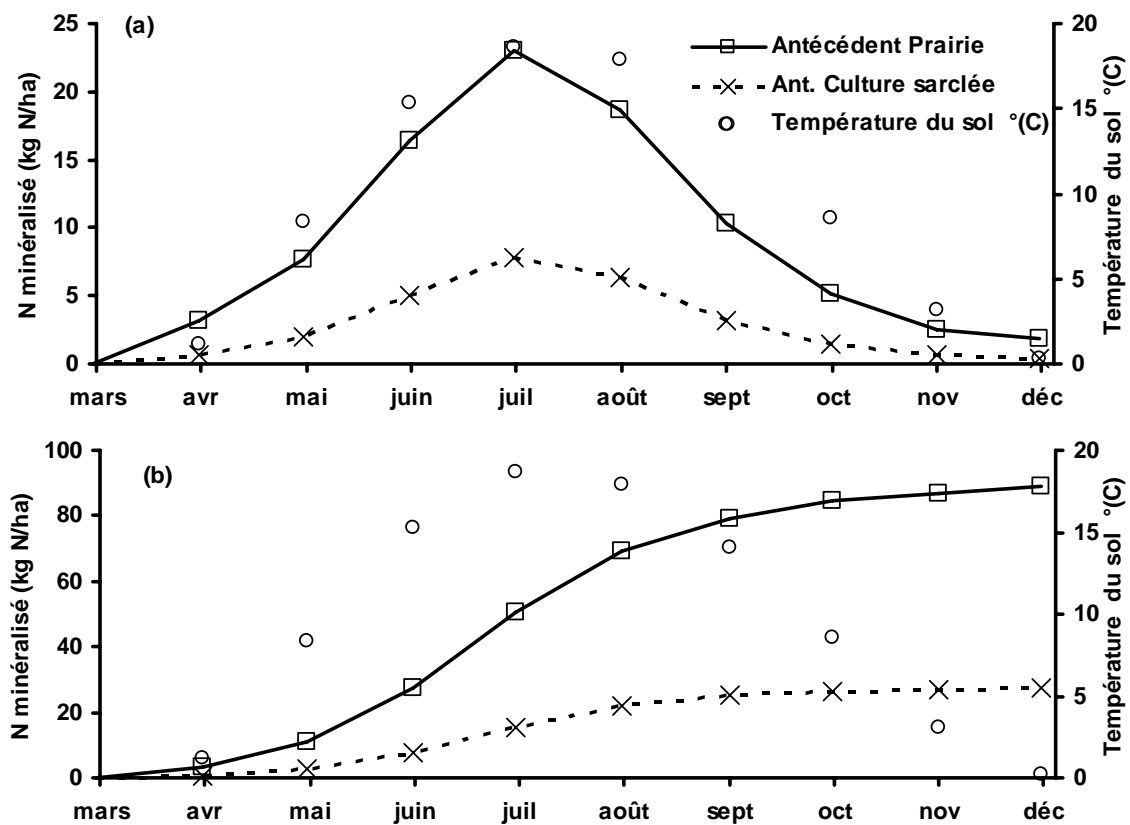


Figure 2. Production mensuelle (a) et production cumulée d'azote minéralisé estimées avec des températures moyennes du sol de la région de Québec. (Gasser, 2000)

2.3. Texture du sol et porosité

La texture d'un sol détermine souvent les dimensions des pores et les quantités d'air et d'eau qui y circulent. On distingue les macropores avec de plus larges diamètres (> 75 μm), les mésopores de dimensions intermédiaires (30-75 μm), et enfin les micropores (5-30 μm) ayant les plus petits diamètres. Même si les taux de minéralisation d'azote sont parfois

généralement plus élevés en sols sablonneux à cause d'une plus grande aération et d'un réchauffement important, le potentiel de minéralisation d'azote peut être réduit en conditions de sécheresse ou à cause de faibles teneurs en matière organique. Dans les sols de texture fine, leur plus grande proportion de mésopores et de micropores protège la matière organique contre une minéralisation très rapide. Cependant, ces types de sol se réchauffent lentement au printemps et ils peuvent aussi être mal drainés périodiquement. Toutefois, ils possèdent un stock plus important d'azote organique, pouvant ainsi assurer une minéralisation constante d'azote organique en cours de saison. Des études effectuées en conditions de laboratoire ont indiqué que les taux de minéralisation en N sont plus élevés en sols argileux en comparaison avec les sols sablonneux (Simard et N'Dayegamiye, 1992; Sbih *et al.*, 2002). Ces auteurs ont en plus démontré que les quantités de carbone et d'azote organique et leurs taux de minéralisation de C et de N sont fortement corrélés aux teneurs des sols en argile et limon (Tableau 4) et inversement corrélés aux teneurs en sable.

Tableau 1. Coefficients de corrélation (R^2) entre les particules minérales du sol et les paramètres de minéralisation de C et de N du sol

	Sable	Limon	Argile
C	- 0,61***	0,59***	0,58***
N	- 0,76***	0,73***	0,71***
Nm	- 0,71***	0,72***	0,63***
Cm	- 0,51**	0,54***	0,42**
No	-0,63**	0,68***	0,50**
kN	- 0,35*	0,31*	0,41**
hN	NS	NS	- 0,36*

*, **, *** : $P \geq 0,05$, 0,01 et 0,001, respectivement.

Nm et Cm : N et C minéralisé; No : N potentiellement minéralisable; kN et hN taux de minéralisation de l'azote labile et lentement minéralisable, respectivement.

Source : Sbih, M. A. N'Dayegamiye et Karam, A. 2002. Can. J. Soil Sci. 83 : 25-33.

En effectuant une régression multiple associant le carbone du sol et la teneur en argile, Simard et N'Dayegamiye (1993) ont obtenu une meilleure prédiction des taux de minéralisation d'azote, la contribution de la teneur en argile comme seconde variable étant significatif à $P < 0,01$.

2.4. Structure et compaction

La structure du sol est aussi un facteur important influençant la minéralisation de l'azote organique. La structure du sol est définie comme étant un assemblage de particules primaires en agrégats de diverses dimensions. Les gros agrégats ont des dimensions variant de 0,25 mm à 5 mm de diamètre, tandis que les micro-agrégats ont un diamètre inférieur à 0,25 mm. Généralement, un sol bien structuré doit présenter dans sa couche arable une

proportion de macro-agrégats supérieure à 70 %, ce qui assure une meilleure porosité entre les agrégats pour une meilleure circulation d'air et d'eau. De même, les macropores et mésopores formés entre ces agrégats constituent des niches pour la flore du sol. Les sols ayant une proportion plus élevée (> 60 %) de micro-agrégats sont en voie de dégradation et de compactage; ils ont un volume important de micropores, présentent une faible porosité, et par conséquent ont des mauvaises conditions de drainage. La croissance des microorganismes et des plantes y est ainsi faible. L'état de la structure et de compactage des sols détermine ainsi la croissance et les activités des microorganismes, ainsi que les taux de décomposition de la matière organique et de minéralisation d'azote.

2.5. Les modes de travail du sol

Le travail du sol joue aussi un rôle important sur les taux de minéralisation d'azote. Il augmente temporairement la répartition et le volume des macropores, assurant ainsi un meilleur régime d'air et d'eau dans les sols. Le travail du sol assure aussi une meilleure propagation de la température dans le sol, ceci étant propice aux processus microbiens de minéralisation. Le travail du sol agit aussi sur la taille et la localisation des matières organiques contenues à l'intérieur des agrégats, l'exposant ainsi à la minéralisation (Angers *et al.*, 1993). Le travail du sol augmente ainsi les taux de minéralisation d'azote. Cependant, un travail intensif peut conduire à la réduction des macropores et des mésopores, ce qui conduit à l'augmentation des micropores et par conséquent au mauvais drainage, à une faible circulation d'air dans les sols, ce qui limite la croissance et les activités des microorganismes.

Au contraire, le travail réduit (par exemple, le semis direct) permet de conserver la matière organique du sol, car celle-ci ainsi que les résidus organiques se minéralisent plus lentement. Cependant, les taux de minéralisation d'azote sont plus faibles sous semis direct, et on peut alors parfois retrouver une immobilisation d'azote par les microorganismes sous ce mode de travail, ce qui peut exiger un apport supplémentaire d'engrais azoté pour combler les besoins des plantes.

Germon *et al.* (1994) ont démontré que le travail conventionnel du sol (labour) peut permettre une plus grande minéralisation de N à cause des températures généralement plus élevées au printemps, contrairement au travail réduit (semis direct). Les faibles taux de minéralisation de la MO au printemps et l'immobilisation d'azote sont causés par des quantités élevées de résidus organiques laissées en surface, qui retiennent beaucoup d'eau, ce qui conduit ainsi à un réchauffement lent du sol au printemps. De même, l'acidification temporaire de l'horizon de surface dans le semis direct au cours des processus de décomposition des résidus organiques peut affecter l'activité des bactéries nitrifiantes qui sont les plus sensibles au pH du sol (Doran, 1987).

Toutefois, une meilleure structure et porosité dans les sols soumis au semis direct permettent des taux de minéralisation plus élevés pendant la saison de croissance des cultures, en comparaison avec le travail conventionnel. Il ressort que les quantités de N

minéralisées annuellement sont finalement comparables dans les deux modes de travail du sol (Germon *et al.*, 1994). Cependant, il est nécessaire de tenir compte de l'immobilisation temporaire au printemps sous semis direct et lorsque des quantités importantes de résidus organiques sont laissées au sol, et ajuster la fertilisation azotée en conséquence.

2.6. Les cultures de rotation

Les bonnes cultures de rotation enrichissent les sols en matière organique et en azote, et elles améliorent également la structure du sol. Elles augmentent ainsi le nombre et les activités des microorganismes dans les sols, et par conséquent les taux de minéralisation d'azote. L'utilisation de l'azote minéralisable du sol dépend aussi des espèces cultivées. Comme les taux de minéralisation dépendent des conditions de température et d'humidité, la minéralisation est donc graduelle au cours de la saison de végétation, étant lente durant les mois d'avril et mai et élevée à partir du mois de juin jusqu'à la fin du mois d'août. C'est ainsi que les cultures ayant une courte saison de croissance, telles les céréales, bénéficient moins de l'azote minéralisable du sol. Par contre, les cultures avec une plus longue période de végétation (maïs-grain, maïs fourrager, pomme de terre ou foin) peuvent utiliser de grandes quantités d'azote minéralisées du sol.

3. CALCUL DES CONTRIBUTIONS DE L'AZOTE DU SOL À PARTIR DE COEFFICIENT DE MINÉRALISATION

Les quantités d'azote total sont très élevées dans les sols agricoles, dépendamment des précédents des cultures. Ces niveaux d'azote varient en moyenne de 3000 à 8000 kg de N/ha. En considérant des taux annuels de minéralisation de la matière organique du sol qui se situent entre 2 et 5 % sous nos conditions de sol et de climat, les sols pourraient minéraliser entre 60 et 400 kg N/ha annuellement.

Voici un exemple de calcul de l'azote minéralisable de la matière organique du sol :

- Prenons un sol avec :**
- Un horizon de surface de 20 cm de profondeur
 - Une densité apparente de 1,4 t (tonne)/m³ ou g/cm³
 - Un taux de 4 % de matière organique et 0,15 % de N total
 - Un coefficient de minéralisation qui varie de 0,02 à 0,05

La masse de ce sol sur un ha est : $1,4 \text{ t/m}^3 \times 10\,000 \text{ m}^2/\text{ha} \times 0,20 \text{ m} = 2\,800 \text{ t/ha}$

La quantité de matière organique de ce sol sur un ha est : $2\,800 \text{ t/ha} \times 0,04 = 112 \text{ t de M.O./ha}$

La quantité d'azote totale de ce sol sur un ha est : $2\,800 \text{ t/ha} \times 0,0015 = 4,2 \text{ t N/ha}$ ou $4\,200 \text{ kg N/ha}$

La quantité d'azote minéralisable de ce sol sur un ha est :

$4\,200 \text{ kg N/ha} \times 0,02 = \mathbf{84 \text{ kg N/ha}}$ à

$4\,200 \text{ kg N/ha} \times 0,05 = \mathbf{210 \text{ kg N/ha}}$

Pour l'établissement des plans de fertilisation en azote, des logiciels permettent de tenir compte de l'azote de la matière organique, mais peu de plans de fertilisation tiennent en considération cette contribution. Le chapitre 2.2 du Guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2003) fait état des différents éléments à prendre en considération dans un bilan de minéralisation de la matière organique du sol et des résidus végétaux du sol.

4. CALCUL DES CONTRIBUTIONS DE L'AZOTE DU SOL À PARTIR DE PARCELLES TÉMOINS

De 1999 à 2001, nous avons établi à la station de recherche de l'IRDA à Saint Hyacinthe des parcelles pour mesurer l'importance de l'azote du sol dans la nutrition des cultures. Le sol de la série Contour contenait 3,8 % de matière organique, et les doses d'azote apportées étaient de 0, 60, 120 et 180 kg N/ha pour le maïs-grain et de 0, 30, 60 et 90 kg N/ha pour le blé (Tableaux 2 à 4.). Les rendements en maïs obtenus avec la dose de 120 kg N/ha n'ont pas été significativement différents de ceux obtenus avec la dose de 180 kg N/ha. Les rendements en maïs obtenus avec le témoin seul sans fertilisation azotée représentaient 55 et 65 % des rendements maximums obtenus en 1999 et 2001 respectivement. Dans le traitement témoin, les quantités d'azote prélevées du sol par la culture étaient de 71 et 80 kg N/ha en 1999 et 2001, respectivement. La fourniture du sol en azote a aussi été importante pour la culture de blé (44 kg N/ha) et les rendements optimaux ont été obtenus avec la dose de 60 kg N/ha (Tableau 2). Ces résultats indiquent que les cultures peuvent bénéficier de l'azote de la matière organique du sol, ou des matières organiques apportées. Dans ce site expérimental, la rotation précédente était constituée de maïs-soya-céréales. De plus, le sol avait une bonne structure, ce qui a pu favoriser la minéralisation de l'azote du sol.

Tableau 2. Effets d'apports d'azote sur les rendements et les prélèvements en N du maïs (1999).

Traitements	Rendements (kg/ha)	Prélèvements
		N
Témoin	6 194 d	71 d
60 kg N/ha	9 795 bc	124 c
120 kg N/ha	11 179 ab	153 ab
180 kg N/ha	12 054 a	169 a

Tableau 3. Effets d'apports d'azote sur les rendements et les prélèvements en N du blé (2000).

Traitements	Rendements (kg/ha)	Prélèvements
		N
Témoin	2 479 cd	44 d
30 kg N/ha	3 406 c	64 c
60 kg N/ha	4 048 ab	76 ab
90 kg N/ha	4 300 a	82 a

Tableau 4. Effets d'apports d'azote sur les rendements et les prélèvements en N du maïs (2001).

Traitements	Rendements (kg/ha)	Prélèvements
		N
Témoin	5 824 c	80 c
60 kg N/ha	8 018 a	122 ab
120 kg N/ha	8 907 a	144 a
180 kg N/ha	8 255 ab	138 a

Des lettres semblables sur une même colonne indiquent qu'il n'y a pas de différence significative au niveau de $P < 0,05$.

Source : Adrien N'Dayegamiye (données non publiées).

Une autre étude récente a évalué la fourniture du sol en azote dans un essai de longue durée débuté en 1978 et comportant 4 types de rotation, soit (I) une monoculture de maïs ensilage; (II) une rotation maïs ensilage- orge grainée-prairie de 2 ans de mil-trèfle; (III) une rotation de maïs ensilage- blé- orge (2 ans), et (IV) une prairie permanente réimplantée tous les 4 ans avec de l'orge grainée (Giroux et Lemieux, 2006). Après six cycles de rotation en 24 ans, toutes les grandes parcelles ont été subdivisées en cinq sous-parcelles comportant cinq doses croissantes d'azote (0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha) pour la culture de maïs-ensilage. Les doses croissantes visaient à déterminer les doses optimales d'azote sous ces systèmes de rotation.

Les rendements en maïs ensilage obtenus ont varié significativement selon les systèmes de rotation ($P < 0,006$) et les doses d'azote ($P < 0,0001$). L'interaction rotation x dose était également très significative ($P < 0,0001$). Ceci signifie que les doses d'azote n'ont pas eu le même effet dans chacun des systèmes et que des ajustements devraient donc être apportés selon les rotations (Giroux et Lemieux, 2006).

Les rendements moyens, toutes doses d'azote confondues, ont été de 9,7 t/ha pour la monoculture de maïs (rotation I), de 12,7 t/ha pour la rotation maïs-orge grainée-prairie (rotation II), de 11,4 t/ha pour la rotation maïs-céréales (rotation III) et de 14,1 t/ha pour la prairie permanente (rotation IV). La dose d'azote produisant le rendement optimal a été déterminée à partir de la dérivée des fonctions de production. Pour la rotation I, correspondant à la monoculture de maïs ensilage, les rendements ont été plus faibles et la dose d'azote requise pour atteindre le niveau optimal de fertilisation azotée a été beaucoup plus élevée, variant entre 161 et 183 kg N/ha (Giroux et Lemieux, 2006). Pour la rotation II, avec maïs-orge grainée-prairie (2 ans), la dose N optimale a varié de 93 à 128 kg N/ha et celle-ci se situait entre 114 et 128 kg N/ha pour la rotation III, avec maïs-blé-orge (2 ans). Enfin, pour la rotation IV, correspondant à un retour de maïs ensilage sur un précédent de prairie, la dose optimale de N a varié de 0 à 57 kg N/ha. Les rotations comportant des prairies ont ainsi démontré une fertilité azotée plus élevée, exigeant par conséquent une fertilisation minérale plus réduite par rapport aux autres systèmes de rotation. Les prélèvements en N des parcelles témoins sans N dans chacune des rotations ont démontré l'aptitude des sols à fournir l'azote aux cultures subséquentes. Ces valeurs étaient de 49 kg N/ha dans la rotation I, de 116 kg N/ha dans la rotation II, de 94 kg N/ha dans la rotation III et de 168 kg N/ha dans la rotation IV.

Au début de ces essais en 2002, les sols dans les rotations I, II, III et IV avaient une teneur en N total de 1520, 1800, 1610 et 2050 mg/kg de sol respectivement. Avec un facteur de conversion de 2,24 kg/ha par mg/kg de sol, les teneurs en N total dans chaque rotation sont évaluées à 3400, 4030, 3610 et 4590 kg N/ha. Finalement, en se basant sur l'azote prélevé dans les parcelles témoins de chaque rotation, le pourcentage d'azote fourni par le sol à la culture de maïs pourrait équivaloir à 1,45 %, 2,89 %, 2,60 % et 3,67 %. Ces résultats démontrent qu'en monoculture, le coefficient de minéralisation de l'azote des sols se situe aux environs de 1,5 %, tandis qu'en rotation, la contribution de l'azote des sols et des

résidus des cultures pourrait être plus du double. La fourniture de N des sols varie donc considérablement selon les rotations et des ajustements très importants en engrais azotés doivent être apportés selon les types de rotation incluant ou non les prairies ou les légumineuses.

5. INDICATEURS D'AZOTE ET VALIDATION AU CHAMP

Pour l'établissement des plans de fertilisation en azote, le guide de référence du CRAAQ et des logiciels permettent déjà de tenir compte de l'azote de la matière organique, des coefficients d'efficacité et des arrière-effets des fumiers ou d'autres sources organiques. Des études sont également en cours dans les centres de recherche du Québec afin de trouver des indicateurs de fourniture d'azote du sol, qui permettront ainsi de mieux prédire les taux de minéralisation d'azote de la matière organique et des précédents culturels.

Il existe d'abondantes informations sur les teneurs en nitrates des sols dans les couches 0-30 cm, ou 0-60 cm comme outils de prédiction de l'azote du sol disponible aux cultures en cours de saison. Très récemment, Giroux et Lemieux (2006) ont indiqué que le test de nitrates expliquait plus de 50 % de la variance des rendements et des prélèvements en azote du maïs ensilage. Cette forme d'azote est extraite par plusieurs solutions, dont le KCl, le NaHCO₃. Beaucoup de pays européens et certains États américains se basent déjà sur le test des nitrates pour l'établissement des doses optimales d'azote. Les analyses de nitrates reflètent l'azote résiduel dans les sols des apports antérieurs d'engrais minéraux ou organiques, mais elles indiquent également aussi l'historique du champ (apports précédents de fumiers ou autres sources organiques, incorporations de prairie, cultures de rotation) et les taux de minéralisation de l'azote qui peuvent en résulter. Les teneurs en nitrates mesurées au printemps sont toujours plus élevées sous les précédents de fumiers, de boues mixtes, de prairie enfouie, de rotation avec légumineuse. De nombreuses données sont disponibles au Québec sur les tests de nitrates en relation avec les rendements et les prélèvements en azote. Grâce à celles-ci, il est possible d'établir des grilles d'azote basées sur les nitrates et les textures du sol, en vue de leur intégration dans les grilles de référence du CRAAQ.

En attendant un indicateur azoté plus fiable et universel sous différentes conditions de sol et précédents culturels, les tests de nitrates complétés par des mini-essais au champ peuvent servir dans l'établissement des doses optimales d'engrais azotés. Les mini-essais peuvent comprendre seulement deux traitements, soit le témoin sans azote, comparé à la fertilisation complète selon les recommandations actuelles. Les traitements témoins révèlent le pourcentage de rendements obtenus avec seulement l'azote du sol, en comparaison avec la fertilisation complète. C'est ce qu'on appelle le rendement relatif. Même si les données obtenues peuvent varier en fonction des années à cause de l'influence du climat, des espèces des cultures et des cultivars, ces valeurs peuvent refléter le potentiel de minéralisation d'azote selon les régies agricoles effectuées antérieurement. La prédiction de l'azote minéralisable et disponible aux cultures est un exercice complexe et doit donc être permanent.

6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La prédiction de l'azote minéralisable et disponible aux cultures est un exercice complexe qui permet d'optimiser les quantités d'engrais apportées et de réduire les excès d'azote dans le sol et les pertes à l'environnement. L'optimisation de la fertilisation azotée doit être réalisée de manière récurrente, car elle n'aboutit pas toujours au même résultat d'années en années à cause des conditions climatiques variables qui affectent le potentiel de minéralisation de l'azote du sol ainsi que la croissance des cultures. De plus, la demande de la plante en azote peut changer d'une année à l'autre selon l'effet des conditions climatiques et des précipitations sur la disponibilité de l'eau du sol. Il existe différents coefficients dans la littérature pour estimer les contributions de la matière organique et des résidus de culture à la fertilisation azotée des cultures. Toutefois, l'utilisation de parcelles témoins sans engrais pour estimer cette contribution constitue une alternative intéressante qui reflète davantage les conditions vécues dans une situation donnée sur le terrain. D'années en années, ces informations peuvent servir à estimer plus précisément les contributions en azote du sol sous l'effet des pratiques et des précédents culturels. Il ressort qu'il ne devrait pas exister de **recommandation unique d'azote pour une culture**, telle qu'on retrouve encore parfois dans les guides de fertilisation.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Doran, J.W. 1987. *Biol. Fertil. Soils*, 5 : 68-75.
- Gasser. 2000. Thèse de doctorat, U. Laval. 200 pp.
- Giroux, M. et M. Lemieux. 2006. *Agrosol*, vol. 17(1) : 39-50.
- Germon, J.C., J.C. Taureau et J.M. Thomas. 1994. *Simplification du travail du sol*. Dans : INRA (Ed.) Paris. Pages 125-154.
- N'Dayegamiye, A., M. Goulet et M. Laverdière. 1997. *Can. J. Soil Sci.* 77 : 351-358.
- N'Dayegamiye, A. 2006. *Le producteur de lait québécois*, vol 27 (3) : 30-33.
- Sbih, M., A. N'Dayegamiye et A. Karam. 2002. *Can. J. Soil Sci.* 83 : 25-33.
- Simard, R. et A. N'Dayegamiye. 1993. *Can. J. Soil Sci.* 73 : 27-38.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze et K. Denef. 2004. *Soil Tillage Res.* 79 : 7-31.

L'azote dérivé de la M.O. du sol

Adrien N'Dayegamiye

IRDA



N dérivé de la M.O. du sol

- Les taux de minéralisation de N de la M.O.
- L'azote du sol dans la nutrition des cultures—une réalité!
- Facteurs qui influencent les taux de minéralisation
- Critères de recommandation de N



Fractions de la M.O.

- Matière organique labile ou active (5-10 %)
- Matière organique récalcitrante
- Humus

3000-8000 kg N/ha !



Minéralisation de N

- D'abord le C labile comme source d'énergie
- Libération de N par hydrolyses et désaminations en acides aminés ou en azote ammoniacal (*ammonificateurs*)
- $\text{N-NH}_4 \Rightarrow \text{N-NO}_3$ (*nitrificateurs*)



Minéralisation de N en 56 semaines

- 34 sites répartis sur 7 séries de sol
- N minéralisé: 88 à 235 mg N/kg sol ou 197 à 526 kg N/ha
- 6,6 à 22% de N total

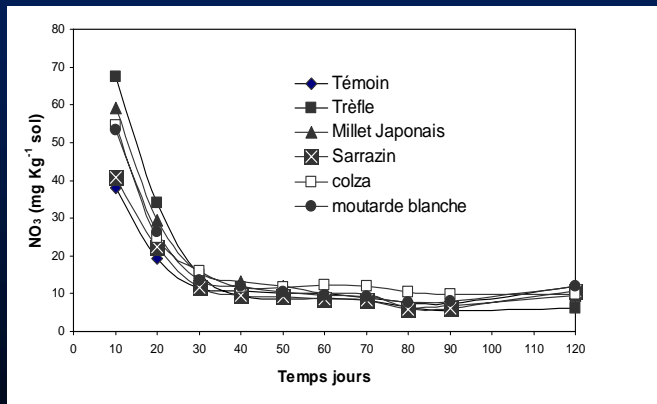


Minéralisation de N en 56 semaines

- 26 semaines : 5 mg N/kg/semaine, soit 130 mg N/kg sol (N labile)
- 26^e à 56^e semaine : 0,26 mg N/kg/semaine, soit 7,8 mg N/kg sol (N récalcitrante)
- N labile : 20 fois plus que N récalcitrante



Phases de minéralisation



N minéralisable du sol : exemple de calcul

Un sol avec :

- 20 cm de profondeur, une densité apparente de $1,4 \text{ t/m}^3$
- Un taux de 0,15 % de N total
- Un coefficient de minéralisation de 0,02 à 0,05
- Masse du sol /ha : $1,4 \text{ t/m}^3 \times 10000 \text{ m}^2/\text{ha} \times 0,20 \text{ m} = 2800 \text{ t/ha}$
- N total : $2800 \text{ t/ha} \times 0,015 = 4,2 \text{ t N/ha}$ ou 4200 kg N/ha



N minéralisable du sol : exemple de calcul (suite)

- N minéralisable :
 $4200 \text{ kg N/ha} \times 0,02 = 84 \text{ kg N/ha}$ à
 $4200 \text{ kg N/ha} \times 0,05 = 210 \text{ kg N/ha}$



Essais au champ : N dérivé du sol

et réponse à la fertilisation azotée



Effets d'apports d'azote sur les rendements et les prélèvements en N du maïs (1999) - Série Contour, 3.8% M.O.

	Rendements -----(kg/ha)-----	N
Témoin	6 194 d	71,16 d
60 kg N/ha	9 795 bc	123,98 c
120 kg N/ha	11 179 ab	153,47 ab
180 kg N/ha	12 054 a	168,75 a



Effets d'apports d'azote sur les rendements et les prélèvements en N du blé (2000) - Série Contour, 3.8% M.O.

	Rendements ----- (kg/ha) -----	N
Témoin	2 479 cd	43,62 d
30 kg N/ha	3 406 c	64,36 c
60 kg N/ha	4 048 ab	76,07 ab
90 kg N/ha	4 300 a	82,39 a



Effets d'apports d'azote sur
les rendements et les prélèvements en N
du maïs (2001)- Série Contour, 3.8% M.O.

	Rendements	N
	(kg/ha)	
Témoin	5 824 c	80,35 c
60 kg N/ha	8 018 a	122,00 ab
120 kg N/ha	8 907 a	143,73 a
180 kg N/ha	8 255 ab	137,76 a



Rotations des cultures

- (I) Monoculture de maïs ensilage
- (II) Maïs ensilage-orge grainée-prairie (2 ans)
- (III) Maïs ensilage-blé-orge
- (IV) Prairie permanente (cycles de 4 ans)

(Giroux et Lemieux, 2006. Agrosolutions vol. 17(1): 39-50



Fourniture du sol en N (kg/ha)

- (I) : 49 kg N/ha
- (II) : 116 kg N/ha
- (III) : 94 kg N/ha
- (IV) : 168 kg N/ha



Fourniture du sol en N (%)

- (I) : 1,45 % de 3400 kg N/ha
- (II) : 2,89 % de 4030 kg N/ha
- (III) : 2,60 % de 3610 kg N/ha
- (IV) : 3,67 % de 4590 kg N/ha



Doses optimales

- (I) : 161-183 kg N/ha
- (II) : 93-128 kg N/ha
- (III) : 114-128 kg N/ha
- (IV) : 0-57 kg N/ha

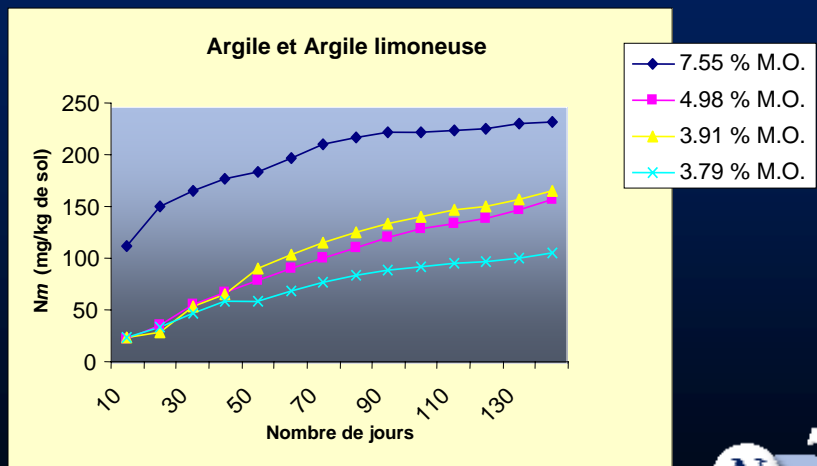


L'azote du sol : 3000-8000 kg N/ha !

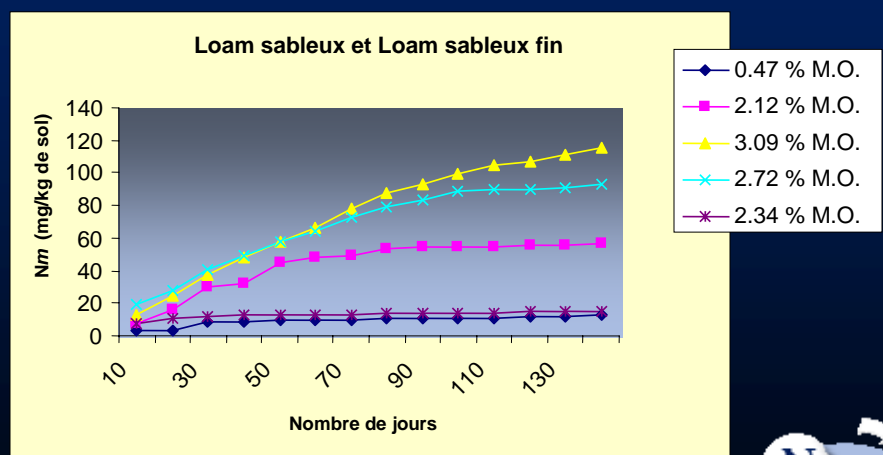
- Dans les sols riches : 2/3 de N dérive du sol
1/3 de l'engrais minéral N
- Dans les sols pauvres : 1/3 de N dérive du sol
2/3 de l'engrais minéral N



Taux de minéralisation selon types de sol & niveaux de M.O.



Taux de minéralisation selon types de sol & niveaux de M.O.



Coefficients de corrélation (R2)

	Sable (g kg ⁻¹)	Limon (g kg ⁻¹)	Argile
C	-0,61***	0,59***	0,58***
N	-0,76***	0,73***	0,71***
Nm	-0,71***	0,72***	0,63***
Cm	-0,51**	0,54***	0,42**
No	-0,63**	0,68***	0,50**
KN	-0,35*	0,31*	0,41**
hN	NS	NS	-0,36*



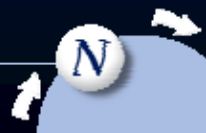
Multiple regression equations developed with various chemical and physical soil properties (X1 and X2) to predict N-mineralization parameters (Y)

Y (mg kg ⁻¹)	X ₁ (g kg ⁻¹)	X ₂ (g kg ⁻¹)	Intercept	b ₁ ^Z	b ₂ ^Z	R ²
N _m	N _{tot}	Clay	39.5	117.1	2.24	0.787
	C _{tot}	Clay	57.1	7.15	3.21**	0.786
N _o	N _{tot}	Clay	65.8	208	1.29	0.518
	C _{tot}	Clay	110.0	12.0	3.22	0.542
N _{ok}	N _{tot}	Clay	20.0	62.9	2.31	0.698
	C _{tot}	Clay	24.6	4.06	2.74**	0.723



Texture et porosité

- Macropores, mesopores et micropores
- Sols sablonneux: macroporosité
(aération et réchauffement important;
> minéralisation mais affectée par les conditions de sécheresse)



Texture et porosité

- Sols de texture fine : > de mésopores et micropores; réchauffement plus lent au printemps; mal drainés périodiquement
Minéralisation moins rapide mais constant, stock > de N
- Quantité de N minéralisé : sols argileux > sols sablonneux



Structure du sol



Structure du sol

- Macro-agrégats : 0,25 mm à 8 mm
- Micro-agrégats < 0,25 mm
- Bonne structure : macro-agrégats > 70 %
(> grande porosité, donc meilleure circulation d'air et de W, niches microbiennes..)
- Sols en voie de compaction : > 60 % de micro-agrégats



Pas de recommandation unique pour une même culture !

La recommandation d'azote = un exercice complexe

L'agronome se base sur :

- ses connaissances et son expérience sur le terrain



Critères d'optimisation de la fertilisation azotée

Savoir diagnostiquer la richesse et l'état du sol et se poser de bonnes questions :

- Connaître l'historique du champ : cultures précédentes de rotation, fumiers, engrais verts ou autres sources de M.O.
- Évaluer les conditions du sol; sont-elles propices pour les micro-organismes ?



Critères d'optimisation de la fertilisation azotée

La minéralisation de N = un processus microbien avant tout

Évaluer les conditions favorables à la croissance et aux activités des micro-organismes



2 à 5 % de N total,
soit de 50 à 160 kg N/ha

- Sols avec arrière-effets de fumier ou autres sources organiques
- Sols avec des précédents de légumineuses ou de prairie
- Sols riches en M.O. et bien structurés
- Sols labourés ? Conditions du sol?



N disponible

- Évaluer l'azote disponible pendant la saison (K N = 2 à 5 %)

N disponible = N minéral de printemps + N potentiellement minéralisable

Combien et quand?



N disponible (suite)

N minéral (N-NH₄ + N-NO₃)

- Forte variabilité spatiale (C.V. 15–30 %)
- Forte variabilité temporelle (t & W)
- N minéral disponible durant la première phase de croissance (juin)
- N potentiellement minéralisable : toute la saison



N disponible (suite)

- N minéral < N potentiellement minéralisable
- Méthode prévisionnelle doit intégrer l'azote minéralisable et disponible en saison de croissance



Outils d'aide à la décision

- Indicateurs de N potentiellement disponible (recherches en cours)
- Test de nitrates en post-levée (labo ou Nitrachek!)
- Diagnostic foliaire en post-levée
- Des mini-essais à la ferme

