

### 3 Azote du sol

## Une minéralisation liée à de multiples facteurs

Une grande partie de l'azote absorbé par les cultures provient de la minéralisation des matières organiques du sol, notamment de l'humus. Liée au stock d'azote organique disponible mais aussi à des caractéristiques pérennes du sol et aux conditions climatiques, la prévision annuelle ou à plus long terme de la minéralisation est possible mais encore affectée d'incertitudes.

Lors du calcul de la dose d'engrais à apporter à une culture, la plupart des méthodes commencent par estimer la quantité d'azote que le sol peut fournir. Excepté une part d'azote minéral héritée des stratégies de fertilisation de l'année précédente, l'essentiel résulte de la minéralisation de l'azote contenu dans les différents compartiments de la matière organique. Deux types de processus se distinguent. Le premier est rapide : c'est la minéralisation de l'azote des matières organiques « fraîches » que sont les résidus des cultures précédentes ou des couverts intermédiaires, les produits résiduels organiques... Généralement inférieur au temps de présence de la culture en place et de la suivante, ce processus n'est jamais complet. L'azote organique restant est intégré dans la matière organique stable du sol, appelée humus. Ce dernier se minéralise en continu et constitue la fourniture basale d'azote du sol. C'est la seconde source de minéralisation de l'azote organique. Comme la précédente, elle dépend de la nature et de la quantité d'azote organique disponible, des conditions d'humidité et de température en surface, mais aussi des propriétés du sol.

#### Ajuster les objectifs de stocks au contexte

Une large étude menée conjointement par l'INRA, ARVALIS-Institut du végétal et le CETIOM de 2003 à 2010 a permis de mieux

La minéralisation de l'azote issu des matières organiques « fraîches », telles que les résidus de cultures, est rapide.

#### Un lien variable entre la vitesse potentielle de minéralisation et le stock d'azote organique

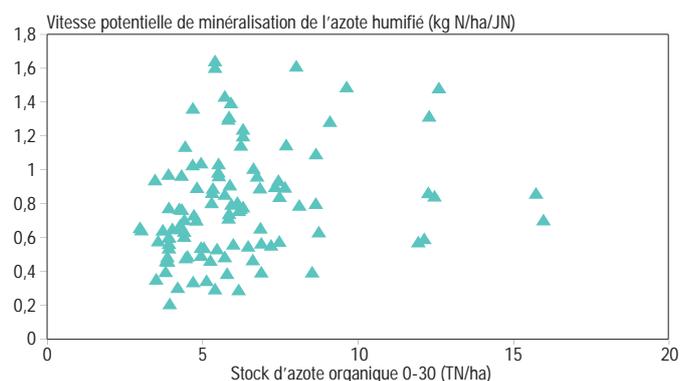


Figure 1 : Relation entre le stock d'azote organique des 30 1<sup>er</sup> cm du sol et la vitesse potentielle de minéralisation de l'azote organique humifié. Données obtenues sur 103 dispositifs expérimentaux sous sol nu (essais 1999-2010 ARVALIS-INRA-CETIOM-CA59-CA62-Soufflet Agriculture) sur de sols de textures variées.

En tendance, la vitesse potentielle de minéralisation d'un sol est liée au stock d'azote organique. Mais un même « potentiel » de minéralisation peut correspondre à des stocks très divers entre situations. Il est donc difficile de déterminer des objectifs « absolus » de stock d'azote organique pour maximiser la fourniture du sol.



## Outils

**Estimer le potentiel de minéralisation**

La minéralisation de l'azote organique humifié d'un sol est représentée par sa vitesse potentielle de minéralisation ( $V_p$ ), exprimée en  $\text{kgN/ha}$  par jour normalisé. Cette échelle temporelle exprimée sous des conditions standard de température et d'humidité du sol permet de s'affranchir de l'effet de ces deux facteurs pour estimer le potentiel intrinsèque de minéralisation d'un sol. La  $V_p$  peut être mesurée au champ, via des dispositifs de suivi sous sol nu ou sous culture. Cette détermination est néanmoins lourde et coûteuse à mettre en œuvre. Elle est donc réservée à l'expérimentation. Les recherches ont permis de déterminer des modèles d'estimation de la  $V_p$  en fonction du stock d'azote organique et de facteurs pérennes du sol (granulométrie, pH...). Certains sont utilisés en routine dans les outils de calculs de dose d'engrais azoté. La  $V_p$  peut aussi être déterminée par incubation contrôlée au laboratoire. Très corrélée à la  $V_p$  mesurée au champ et précieuse pour comprendre le fonctionnement du sol, cette valeur est difficile à utiliser en pratique en raison de l'artificialisation du milieu en laboratoire.

## France

**Des stocks d'azote organique variables selon les sols**

La teneur en azote total de l'horizon de surface d'un sol étant encore un paramètre assez rarement mesuré par l'agriculteur, il n'existe pas d'analyses de laboratoire suffisamment exhaustives sur la France pour estimer directement le niveau actuel et l'évolution récente des stocks d'azote organique des sols cultivés. Néanmoins, en considérant que le rapport carbone/azote de la matière organique humifiée oscille autour de 9, l'extrapolation des informations sur l'évolution des teneurs et stocks de matière organique (voir p 24-26) fournit une estimation. Les sols français seraient dans des situations assez contrastées, avec des secteurs en voie de stockage, des zones plus stables et des régions en voie de déstockage. Comme pour le carbone organique, ces différentes situations résultent de la coexistence de deux flux : les apports d'azote organique (résidus de cultures, produits résiduels organiques, couverts intermédiaires) et la minéralisation.

## Changement climatique

**Des effets probables mais contradictoires**

La forte influence du climat sur les processus de minéralisation de l'azote force à s'interroger sur les conséquences potentielles du changement climatique sur la fourniture d'azote par le sol à moyen et long terme. L'élaboration de scénarios d'évolution fait intervenir de nombreux facteurs en interaction. La progression tendancielle des températures pourrait dynamiser la minéralisation. Mais elle pourrait être contrecarrée par de plus grands stress hydriques, synonymes d'humidité du sol limitante. Les impacts des changements sur les cultures elles-mêmes pourraient être aussi bien positifs (augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère accroissant la production par photosynthèse et donc aussi les restitutions organiques au sol) que négatifs (raccourcissement des cycles de cultures et donc du temps pour absorber l'azote, stress hydrique, nouveaux risques parasitaires...). Complexe, cette question est néanmoins importante à traiter pour évaluer à long terme la durabilité des systèmes de culture.

déterminer les facteurs explicatifs de la minéralisation de l'azote humifié d'un sol de grandes cultures. Elle a montré qu'un lien entre la vitesse potentielle de minéralisation (encadré 1) et le stock d'azote organique du sol existait, mais qu'il était très variable (figure 1). Cette vitesse dépend également du sol lui-même (granulométrie, pH) et probablement aussi d'éléments plus fins que le simple stock d'azote total qu'il contient. Etablir un objectif « absolu » de stock d'azote organique à atteindre à tout prix est donc sans fondement. Il faut raisonner en stocks

**Établir un objectif « absolu » de stock d'azote organique à atteindre à tout prix est donc sans fondement.**

souhaitables, variables d'un milieu à l'autre, d'un contexte de production à l'autre.

L'azote minéralisé à partir de l'humus est ensuite en partie absorbé par les végétaux. Tout dépend du climat, qui conditionne l'intensité des processus microbiens à l'œuvre. La température régit de manière



**Les apports sous forme d'engrais de synthèse sont une des entrées d'azote dans le système de culture.**



© N. Combe

exponentielle l'activité métabolique des micro-organismes. L'humidité de la couche minéralisante joue pour sa part un rôle dans la diffusion des gaz, des solutés et dans le mouvement des micro-organismes. Ces deux paramètres expliquent les différences de fourniture d'azote constatées d'une année à l'autre sur une même parcelle et entre régions de production, à vitesse potentielle de minéralisation équivalente.

## Des apports exogènes nécessaires

Une partie de l'azote minéralisé par l'humus puis absorbé par les végétaux est ensuite restituée partiellement au système, ce qui contribue au recyclage de l'azote. L'autre partie est exportée dans les organes récoltés (grains, pailles, plantes entières, tubercules...). Cette perte doit être compensée par un apport exogène au système qui permet à la fois d'augmenter la productivité et les restitutions au sol. À long terme, celui-ci induit une modification du stock d'azote organique et donc indirectement de la fourniture d'azote. Il peut prendre différentes formes. Les engrais de synthèse, introduits de façon significative dans les systèmes de culture à partir des années 50, outre qu'ils ont accru considérablement la production, ont modifié le niveau de fourniture d'azote du sol. Ils ap-

**Un couvert de non légumineuse telle que la moutarde limite la lixiviation du nitrate.**

portent dans le système de l'azote atmosphérique, fixé via le procédé industriel Haber-Bosch de synthèse de l'ammoniac. L'insertion des légumineuses dans les rotations a les mêmes conséquences, l'azote atmosphérique étant capté par fixation symbiotique. Les apports réguliers de produits résiduels organiques peuvent aussi constituer une source d'azote significative. Néanmoins, si on se place à une échelle plus globale, cette source d'azote ne constitue qu'un recyclage de l'azote atmosphérique initialement capté par des légumineuses et/ou des engrais de synthèse sur d'autres exploitations.

## Le cas particulier des couverts

Le cas des couverts intermédiaires est un peu à part. S'ils sont constitués de non-légumineuses (crucifères, graminées...), ils n'apportent pas d'azote exogène au système. Mais ils empêchent la perte par lixiviation d'une part de l'azote minéral du sol, en partie issu de la minéralisation de l'humus. En cela, ils peuvent avoir un impact à long terme sur la fourniture d'azote (figure 2). S'ils comportent une forte part de légumineuses, ils peuvent à la fois réduire les pertes et fournir de l'azote exogène par fixation symbiotique. En ce sens, ce type de couvert est probablement à privilégier dans les années à venir afin d'améliorer l'autonomie des systèmes de culture en azote. D'autres facteurs comme le travail du sol ont un effet sur le stockage d'azote organique. Mais leur influence est en général inférieure à la variation des restitutions de matière organique au sol. ■

Jean-Pierre Cohan

*jp.cohan@arvalisinstitutduvegetal.fr*

Robert Trochard

*r.trocard@arvalisinstitutduvegetal.fr*

ARVALIS-Institut du végétal

**Une partie de l'azote minéralisé par l'humus puis absorbé par les végétaux est ensuite restituée partiellement au système, ce qui contribue au recyclage de l'azote.**

## Les couverts intermédiaire contribuent à long terme au stockage d'azote organique

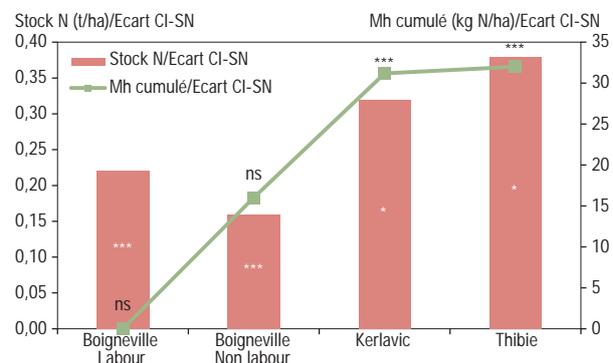


Figure 2: CI: modalité avec couvert intermédiaire, SN: modalité avec interculture maintenue en sol nu. Effet cumulatif de l'implantation de couverts intermédiaires de non-légumineuses sur le stock d'azote organique du sol (0-30 cm) et sur la minéralisation de l'humus (Mh). Cumuls après 16, 13 et 17 années de différenciation pour respectivement les essais de Boigneville (91 - ARVALIS - sol limono-argileux - rotation blé/orge de printemps/pois de printemps - CI moutarde blanche), Kerlavic (29-CRAB/ARVALIS - sol limoneux - rotation maïs/blé - CI RGI) et Thibie (51-AREP - sol de craie - rotation blé/betterave/pois de printemps - CI radis fourrager). Sources: Constantin et al. 2010 et 2011 (thèse INRA/ARVALIS). Résultats statistiquement significatifs à 1 % (\*\*\*) , à 5 % (\*\*) et 10 % (\*) (Test de Student; ns = non significatif).