



Fertilisation azotée de la pomme de terre

Mieux comprendre le devenir de l'engrais

La pomme de terre, comme la plupart des plantes cultivées, utilise l'azote sous forme minérale. Mais celle-ci ne représente que 1 à 3 % de la quantité présente sous forme organique (3 à 15 t/ha). Des échanges constants existent entre ces deux formes par l'intermédiaire de l'activité microbienne.

La connaissance de ces processus permet de comprendre le devenir de l'engrais azoté pour mieux le gérer au cours du cycle.

sol. Ainsi, seule une partie de l'azote apporté par l'engrais est absorbée par la culture, le reste est soit organisé (c'est-à-dire consommé par les micro-organismes : champignons et bactéries), soit perdu par lessivage ou transferts gazeux vers l'atmosphère. L'encadré détaille ces principaux flux d'azote dans le système sol - plante - atmosphère.

Minéralisation de l'azote organique et organisation microbienne : des processus simultanés et antagonistes

La minéralisation correspond à la dégradation de la matière organique du sol, de la matière organique fraîche et des corps



François Laurent
flaurent@itcf.fr
ARVALIS-
Institut du végétal*
Jean-Marie Machet
INRA

*ARVALIS - Institut du végétal, né de la fusion, le 18 décembre 2002, de l'ITCF et de l'AGPM-TECHNIQUE.

La disponibilité en azote minéral du sol est souvent insuffisante pour couvrir le potentiel de croissance de la culture. C'est pourquoi un supplément d'azote est apporté sous forme d'engrais (minéral ou organique), qui va subir les mêmes transformations que celui du

microbiens par les micro-organismes et la microfaune du sol. Ils assimilent le carbone de ces substrats pour satisfaire leurs besoins de croissance. Ces matières organiques sont plus riches en azote que ce dont les micro-organismes qui les décomposent ont besoin : l'azote excédentaire est alors libéré dans le sol sous forme ammoniacale.

Les quantités d'azote minéralisées annuellement peuvent varier de quelques dizaines à plus de 150 kg N/ha. Elles dépendent du rapport carbone/azote (C/N) des résidus organiques, du milieu (humidité) et des conditions climatiques (température).

L'intensité de la minéralisation dépend également du type de sol, notamment des teneurs en argile et en calcaire qui protègent la matière organique de la dégradation microbienne. Par ailleurs, elle est d'autant plus élevée que les restitutions organiques sont importantes. Ceci suggère l'existence d'un compartiment organique se minéralisant rapidement et d'un autre, souvent considéré comme biologiquement inerte. C'est la proportion de ces deux « pools », l'un actif et l'autre stable, qui varie en fonction des systèmes de culture (politique des restitutions organiques...).

L'organisation de l'azote minéral est un processus parallèle à la minéralisation, mais opposé, et correspond à l'assimilation d'azote par des micro-organismes très diversifiés. Ceux-ci assimilent préférentiellement la forme ammoniacale à la forme nitrique. Leur croissance et leur activité dépendront donc de la présence de formes de carbone facilement décomposables : résidus végétaux, racines en décomposition, produits organiques épandus.

Pour des résidus à rapport

C/N élevé, la biomasse microbienne emprunte de l'azote au milieu car le C/N des corps microbiens est compris entre 6 et 10. Globalement, il y a alors une diminution de la quantité d'azote minéral dans le sol, c'est-à-dire une organisation nette, par exemple après enfouissement de pailles de céréales. A l'inverse, pour des résidus à C/N faible (déjections animales), les besoins de la microflore peuvent être couverts par l'azote contenu dans le résidu. L'excédent non utilisé est libéré dans le sol sous forme ammoniacale.

Si la minéralisation est plus importante que l'organisation, l'azote minéral s'accumule dans le sol. Dans le cas contraire, on observe une disparition d'azote minéral.

Une utilisation toujours incomplète de l'engrais

L'utilisation par le peuplement végétal de l'azote minéral apporté par l'engrais est toujours incomplète en raison des processus concurrents qui interviennent dans le cycle de l'azote.

Dans la solution du sol, les formes chimiques sous lesquelles l'azote minéral est apporté par l'engrais évoluent très rapidement sous l'influence des micro-organismes et de leurs enzymes.

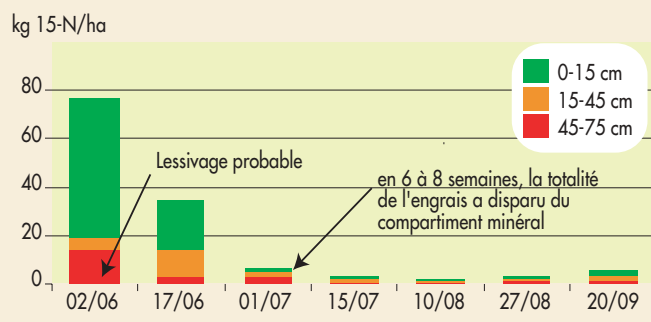
Ainsi :

- ▶ l'hydrolyse de l'urée (sa transformation en azote ammoniacal) est relativement rapide et ne constitue jamais l'étape limitante des transformations d'un engrais uréique jusqu'à la forme nitrique. Aucune perte d'azote n'est associée à cette hydrolyse ;

- ▶ la nitrification, qui conduit à la production d'azote nitrique à partir de l'ammonium, est potentiellement rapide. Elle peut s'opérer à une vitesse de l'ordre de 2 à 3 kg N/ha/jour

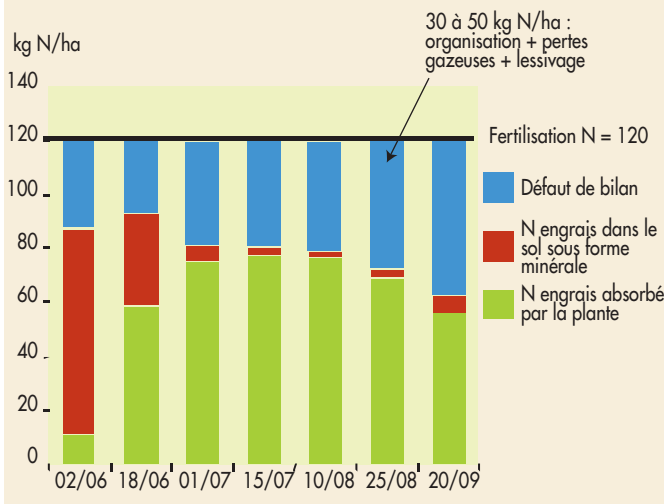
L'azote minéral de l'engrais disparaît rapidement

Evolution au cours du temps de l'azote de l'engrais retrouvé dans le sol sous forme minérale (essai IPTT-INRA, St Rémy 1993, apport de 120 kg N/ha à la plantation, le 6/05) (figure 1)



Plus du quart de l'azote de l'engrais est perdu

Evolution au cours du temps de l'azote provenant de l'engrais sur une culture de pommes de terre. Un apport de 120 kg N/ha a été réalisé à la plantation sous forme ammonitraté (essai IPTT-INRA, St Rémy 1993, apport de 120 kg N/ha à la plantation, le 6/05) (figure 2)



pour une température d'environ 10°C. Néanmoins, au champ, ces vitesses seront beaucoup plus faibles en raison de multiples facteurs : humidité et température défavorables, faible ressource en ammonium NH₄, organisation active rendant le phénomène net peu perceptible.

Dans les sols cultivés sans engorgement d'eau et à pH 6,5-7 (conditions d'une bonne nitrification), un engrais apporté sous forme uréique, ammoniacal et/ou nitrique se retrouve donc intégralement sous la forme nitrique en quelques semaines.

En parallèle, la quantité totale ⇨



d'azote minéral disponible, provenant de l'engrais, diminue rapidement au cours du temps (figure 1).

L'azote de l'engrais est marqué (¹⁵N) ce qui permet de suivre son devenir dans le sol en le distinguant des formes minérales présentes à la plantation (reliquat) ou produites par minéralisation des matières organiques.

Soixante jours après l'apport, il ne reste plus sous forme

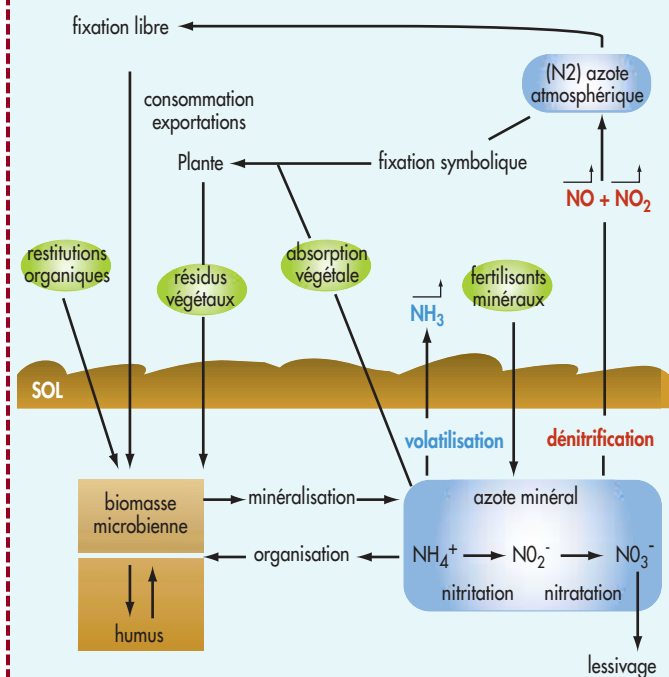
minérale dans le sol que 5 % de l'azote engrais apporté. La « disparition » de l'azote engrais du compartiment minéral correspond à l'absorption par la culture, à l'organisation, aux pertes gazeuses (volatilisation, dénitrification) et au lessivage. La présence d'azote de l'engrais dans l'horizon 45-75 cm, dès la première date de mesure (2/06), laisse penser que le lessivage aux dépens de l'engrais n'est pas négligeable

dans cette situation. Ce constat peut être assez courant sous une culture de pommes de terre, car les faibles profondeurs d'enracinement, fréquentes, limitent les possibilités de « récupération » de l'azote minéral transféré en profondeur (voir l'article d'O.

Scheurer dans ce numéro). La figure 2 montre que la totalité de l'azote apporté par l'engrais ne se retrouve pas sous forme minérale dans le sol ou absorbé par la plante. Une fraction de l'azote a été organisée par la biomasse microbienne ou perdue sous forme gazeuse. La



Les flux d'azote



De nombreux sols contiennent **3 à 5 tonnes d'azote par hectare**, presque uniquement sous forme organique et **essentiellement dans la couche superficielle** comprise entre 0 et 25-30 cm de profondeur. La matière organique du sol, qui résulte des transformations du carbone et de l'azote apportés par des débris organiques d'origine animale ou végétale (fumier, résidus de culture, exsudats racinaires...) est, pour la plus grande partie (90 à 95 % de l'azote total), non vivante et présente sous forme de composés organiques regroupés sous le terme générique « d'humus ». La stabilité biologique de ces composés est liée soit à leur nature complexe, soit à leur association avec les particules minérales (argile, calcaire, ions métalliques). L'autre partie, 5 à 10 %, est constituée par les êtres vivants du sol (bactéries, champignons, faune du sol) que l'on regroupe sous le terme de « **biomasse microbienne** ».

Dans le sol, l'azote minéral peut être présent sous deux formes : l'ion ammonium (NH₄⁺), ou azote ammoniacal, et l'ion nitrate (NO₃⁻), ou azote nitrique, prépondérante dans les sols cultivés. En dehors des périodes consécutives aux apports d'azote par les engrais et les produits organiques, l'azote minéral présent dans le sol ne représente généralement que quelques dizaines de kg par hectare.

Les « entrées » d'azote dans le système sol-plante s'effectuent principalement par la fixation symbiotique, les apports de matière organique fraîche (résidus de culture, exsudats racinaires, produits organiques), les apports atmosphériques (par déposition ou précipitation) et les engrais de synthèse. Les engrais azotés contiennent de l'azote sous l'une des trois formes : ammonium, nitrate ou urée.

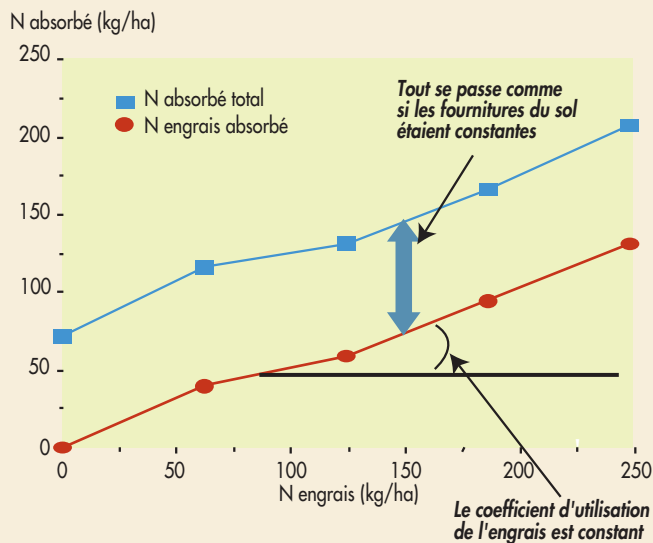
Quelles que soient l'origine et la nature de l'azote incorporé au sol, apport atmosphérique, engrais de synthèse, produit organique, matières organiques humifiées ou fraîches, l'ion nitrate — produit final des transformations dans le sol — est exactement le même du point de vue chimique.

Les processus qui déterminent la disponibilité en azote minéral du sol sont, pour la plupart, sous le contrôle de la **microflore** du sol. Celle-ci est très sensible aux facteurs du milieu : oxygène, température et humidité. Il est donc difficile d'en prévoir l'intensité. On peut cependant distinguer les processus qui auront lieu en toutes circonstances (minéralisation, organisation, nitrification), sauf conditions extrêmes, de ceux qui se produisent de manière beaucoup plus discontinue (volatilisation, dénitrification, lessivage).

L'azote nitrique et l'azote ammoniacal sont absorbés et assimilés par la pomme de terre en proportion différentes selon les conditions d'environnement. L'ion **nitrate absorbé devra être réduit en ammonium** dans les racines et/ou dans les feuilles pour entrer dans les voies de synthèse des acides aminés et des protéines.

Le coefficient d'utilisation est indépendant de la dose apportée

Effet du niveau de fertilisation azotée sur la quantité totale d'azote absorbé et sur la quantité d'azote absorbé issu de l'engrais (essai ITPT-CEA, St Rémy 1992, stade défanage) (figure 3)



Le niveau de fertilisation azotée ne modifie :

- ni le coefficient réel d'utilisation de l'engrais,
- ni les fournitures du sol (représentées par l'écart entre les courbes bleue et rouge).

quantité mise en jeu (30 à 50 kg N/ha) est cohérente avec les ordres de grandeur de ces deux phénomènes.

Nous ne disposons pas actuellement de mesures directes des quantités d'azote organisées sous une culture de pommes de terre. Compte tenu des études conduites sur d'autres espèces végétales, on peut faire l'hypothèse que 15 à 20 % de l'azote engrais est engagé dans ce processus.

Deux sources d'azote indépendantes...

Ces mêmes études au champ permettent de faire deux constats importants (figure 3) :
 ▶ en fin de cycle (défanage), la plante absorbe une quantité d'azote proportionnelle à la quantité d'engrais épandue. En d'autres termes, le coefficient d'utilisation de l'engrais (apparent ou réel) est indépendant de la dose d'azote épandue ;
 ▶ la quantité d'azote absorbé

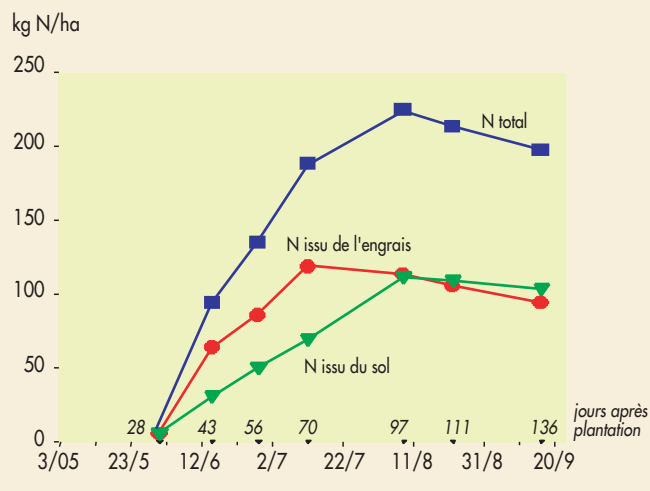
issu des fournitures du sol est également indépendante du niveau de fertilisation azotée. Ces deux observations ne sont pas spécifiques de la pomme de terre. Elles ont été systématiquement rapportées pour d'autres cultures (céréales à paille, maïs,...). Elles permettent de justifier une méthode prévisionnelle de calcul de la fertilisation azotée fondée sur l'indépendance des deux sources d'azote : d'une part, l'azote minéral du sol (azote minéral en début de cycle et azote issu de la minéralisation des matières organiques) et, d'autre part, l'azote de l'engrais. C'est la méthode du bilan azoté, dont nous proposons un paramétrage adapté à la pomme de terre (voir dans ce même numéro).

... que la plante absorbe successivement

Dans de nombreuses situations de plein champ, l'azote

La plante utilise d'abord l'azote de l'engrais

Cinétique d'absorption de l'azote de l'engrais et du sol (essai ITPT-INRA, St Rémy 1993, apport de 120 kg N/ha à la plantation) (figure 4)

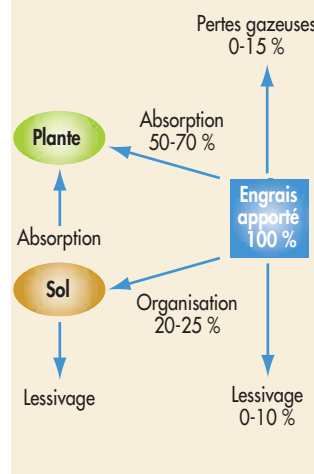


L'azote minéral apporté par l'engrais et l'azote minéral du sol se mélangent peu. Dans une première phase, la culture utilise principalement l'azote provenant de l'engrais, celui-ci disparaît donc rapidement du profil (figure 2). Dans une deuxième phase, la culture profite de l'azote issu de la minéralisation du sol.

apporté par l'engrais et l'azote minéral du sol se mélangent peu, parce qu'ils ne sont pas disponibles au même endroit dans le profil, ni au même moment. Dans une première phase, la culture utilise ainsi principalement l'azote provenant de l'engrais : celui-ci disparaît donc rapidement du profil, comme nous l'avons vu précédemment. Dans une deuxième phase, la culture profite de l'azote fourni par la minéralisation du sol. La figure 4 montre la succession de ces deux phases dans le cas de la pomme de terre : il y a un découplage entre les cinétiques d'absorption de l'azote de l'engrais et de l'azote du sol. La variabilité de cette seconde source d'alimentation azotée en fonction des conditions climatiques rend nécessaires des tactiques d'ajustement de la fertilisation azotée en cours de culture, comme nous le détaillons dans un autre article.

De 30 à 50 % de perte pour l'azote de l'engrais

Quantification des phénomènes impliqués dans le devenir de l'engrais azoté pour une culture de pommes de terre (figure 5)



En guise de conclusion, la figure 5 propose une quantification des différents phénomènes impliqués dans le devenir de l'engrais azoté. ■