

Efficiences de la fertilisation

Nouveau défi pour l'agriculture moderne

E.Zaoui et G.Brun, bureau d'étude agro-challenge, brunzaoui@menara.ma

La fertilisation, qui consiste à apporter des fertilisants par épandage ou injection, ou encore par pulvérisation foliaire, est une pratique quotidienne de l'agriculteur. Il s'agit, d'un acte raisonné qui a pour objectif d'assurer une bonne nutrition des plantes et d'élever les rendements à un niveau potentiel. Les fondements et les concepts de cette pratique n'ont d'ailleurs cessé d'évoluer depuis que l'Homme a commencé à pratiquer l'agriculture.



L'Homme a toujours cherché des moyens qui lui permettent de restituer aux sols épuisés leur fertilité, pour pouvoir exploiter les mêmes parcelles très longtemps. L'effet bénéfique de la matière organique était bien connu et l'Homme continuait à apporter du fumier par coutume sans comprendre son mode d'action sur les plantes, jusqu'à ce que les premières réflexions philosophiques qui ont débuté au temps des savants grecs conduisent au développement de la « théorie de l'humus ». Cette théorie, développée par Aristote, stipule que les plantes se nourrissent de l'humus et le rôle de la matière organique est d'en fournir. Cette théorie a dominé le raisonnement de la fertilisation jusqu'au début du 20^e siècle quand l'Allemand Liebig a développé la « théorie minérale ». Cette nouvelle théorie explique que les plantes se nourrissent d'éléments minéraux et que la matière organique ne sert qu'à fournir par minéralisation ces éléments indispensables à leur nutrition.

Ainsi, depuis le développement de la théorie minérale, la pratique de la fertilisation n'a cessé de s'enrichir d'innovations au fur et à mesure de l'évolution des connaissances scientifiques dans plusieurs domaines (pédologie, physiologie, chimie,...). Cependant, des problèmes persistent toujours, et aujourd'hui, ils sont plutôt liés à l'assimilation des éléments nutritifs et à l'efficacité de la fertilisation.

Place à l'efficacité

Dans son sens le plus simple, la notion d'efficacité de la fertilisation consiste à profiter au maximum de chaque unité fertilisante apportée. Elle peut être mesurée par le rapport rendement / unité fertilisante apportée. Tant que ce rapport est élevé, l'efficacité est élevée de même que la rentabilité économique de la fertilisation. En plus de l'intérêt spécifique au producteur (éviter les dépenses inutiles et les mauvaises conséquences d'un déséquilibre de la nutrition), l'augmentation de l'efficacité présente un intérêt pour le

développement durable, notamment l'économie des ressources (énergie, ressource minière, eau) et la protection de l'environnement (eau, air, sol).

A noter que l'émergence de cette notion a donné naissance à un nouveau défi pour l'agriculture. Actuellement, toutes les recherches et les innovations dans le domaine de la nutrition des cultures se focalisent sur l'augmentation de l'efficacité des engrais. Ces innovations concernent aussi bien les produits que les techniques d'apport et les techniques de pilotage.

Les différents types d'engrais azotés

Engrais naturels	Teneur en azote	Forme de l'azote
- Engrais organique		
Guano d'oiseaux	16%	Organique, ammoniacal
Farine animale (sang, viande, plume, corne, etc.)	6 à 12%	Organique
Fiente	2 à 4%	Organique, ammoniacal
Tourteau végétaux (ricin, neem, etc.)	4 à 6%	Organique
- Engrais minéraux		
Salpêtre du chili	15%	Nitrate
Engrais chimique de synthèse		
Sulfate d'ammoniac	20,5%	Ammonium
Ammonitrate	33,5%	Ammonium/ Nitrate
Cyanamide calcique	21%	
Nitrate de chaux	15,5%	Nitrate
Nitrate de chaux et de magnésium	13%	Nitrate
Nitrate de soude	16%	Nitrate
Urée	45%	
Urée formol	40%	
Phosphate monoammonique (MAP)	12%	Ammonium
Phosphate diammonique (DAP)	21%	Ammonium
Nitrate de potasse	13%	Nitrate

AZOTE

La nutrition azotée est un facteur clé du rendement des cultures. Les sources de l'azote pour les plantes sont, la matière organique du sol, l'air (après fixation de l'azote atmosphérique par les microorganismes) et les engrais apportés par la fertilisation (engrais naturels organiques ou minéraux et engrais minéraux de synthèse). Dans le sol, l'azote est présent sous forme organique ou minérale (forme nitrique majoritaire et forme ammoniacale). Les plantes absorbent l'azote sous forme minérale, essentiellement sous forme de ni-



N-Tester: analyses en temps réel

trate (NO₃). Cette forme peut provenir directement des engrais nitriques ou de la transformation des autres formes d'azote par l'activité des microorganismes. A noter qu'à l'inverse de la forme ammoniacale (NH₄⁺), qui peut être fixée par le complexe adsorbant, la forme nitrique (NO₃⁻) est libre et donc sujette au lessivage.

Les causes du manque d'efficacité

L'azote est un facteur important du rendement. Cependant, l'augmentation du rendement en fonction des doses apportées n'est pas linéaire. Au-delà d'une dose optimale tout apport supplémentaire est superflu et n'a plus aucun impact. Ainsi, en plus des pertes économiques liées aux dépenses inutiles, il y a aussi le risque de pollution de l'environnement. La mauvaise efficacité de la fertilisation azotée est liée aux pertes de l'azote par lessivage ou volatilisation, dont l'intensité dépend de plusieurs facteurs :

- **Forme d'apport** : la forme ammoniacale est fixée sur le complexe adsorbant et ne subit pas de lessivage.
- **Période d'apport** : la coïncidence entre le moment d'apport et les besoins de la plante permet de profiter au maximum de la dose apportée.
- **Condition du sol (activité biologique, pH, structure)** : l'activité biologique contrôle la transformation de l'azote des formes pas ou peu assimilables (organique, ammoniacale) à la forme assimilable

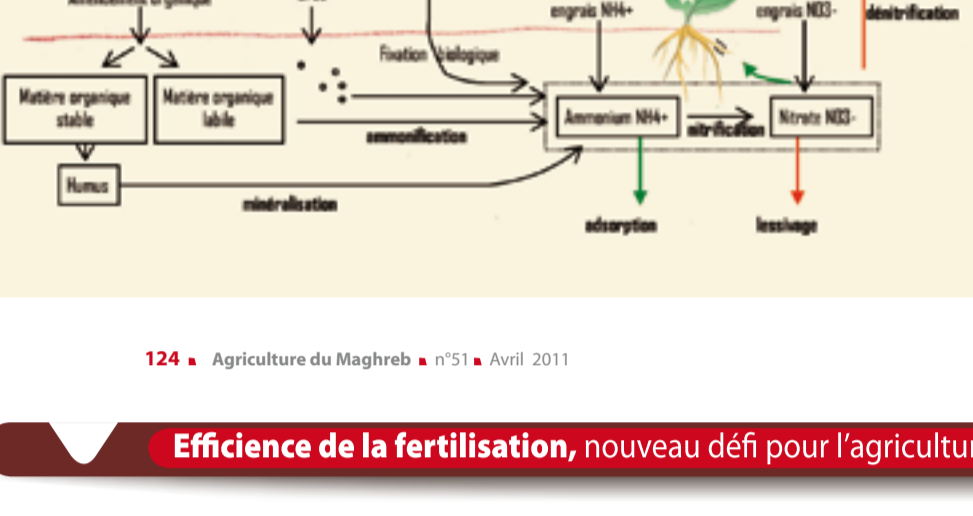


Fig 1: cycle de l'azote dans les sols agricoles

124 • Agriculture du Maghreb • n°51 • Avril 2011

Efficiences de la fertilisation, nouveau défi pour l'agriculture moderne



Plusieurs fabricants proposent des semoirs munis de fertilisateurs qui permettent de semer et de fertiliser en même temps. Cette technique permet de localiser l'engrais au plus près des racines des plantes

(nitrique). Quant à la structure du sol et le pH, ils ont une influence sur l'activité biologique du sol et les pertes d'azote par volatilisation et lessivage.

- **Facteurs climatiques** : la température du sol conditionne l'activité des racines ainsi que l'activité des microorganismes. L'apport d'azote sous forme organique ou ammoniacale sur des sols froids diminue l'efficacité de la fertilisation azotée.

Innovations pour augmenter l'efficacité

L'efficacité de la fertilisation azotée est l'un des objectifs majeurs de l'agriculture moderne. Les innovations visent essentiellement : la protection de l'azote contre le lessivage et la volatilisation, l'augmentation de l'assimilation de l'azote par les plantes et le pilotage de la fertilisation azotée.

Protection contre le lessivage et la volatilisation

L'innovation majeure dans ce domaine peut être attribuée au concept d'engrais à libération lente, d'engrais à libération contrôlée ou d'engrais stabilisés. Ces engrais libèrent l'azote au fur et à mesure de son absorption par les plantes, limitant ainsi les pertes. Ils sont classés comme suit :

- Engrais à libération lente ou libération contrôlée :

* **Formules à libération lente** : ce sont des engrais à base de complexe organique (urée formaldéhyde, isobutylidène diuréé) ou de complexe métallique (phosphate d'ammonium et magnésium (MgNH₄PO₄). L'azote est libéré par solubilisation par voie biologique ou chimique.

* **Formules qui contrôlent la libération de l'azote par une barrière physique** : ce sont des engrais sous forme de bille entourée par une membrane à base de polymère qui contrôle la diffusion de l'azote dans le sol. La vitesse de diffusion dépend de la nature du polymère. Elle peut être continue dans le temps ou fonction de la température. On parle d'engrais enrobés.

- Engrais à inhibition de la nitrification ou de l'urée

Se sont des engrais qui apportent l'azote sous forme uréique ou ammoniacale, auxquelles on ajoute des agents qui ralentissent la transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique ou de l'azote uréique en azote ammoniacal.

Innovations pour augmenter l'assimilation

Actuellement, les recherches sont orientées vers le développement de molécules qui permettent d'activer l'assimilation et le mé-

bolisme de l'azote. Ces molécules n'apportent pas d'azote, mais permettent d'augmenter l'efficacité de la fertilisation azotée. Ce sont souvent des extraits de plantes ou des molécules d'acides humiques.

Amélioration du pilotage de la fertilisation azotée

On assiste actuellement à l'émergence de plusieurs méthodes et outils qui permettent des analyses en temps réel et un apport d'azote à la juste dose. C'est le cas du N-tester ou Nitratet ou encore de la méthode PIIAZO développée par le CTIFL.

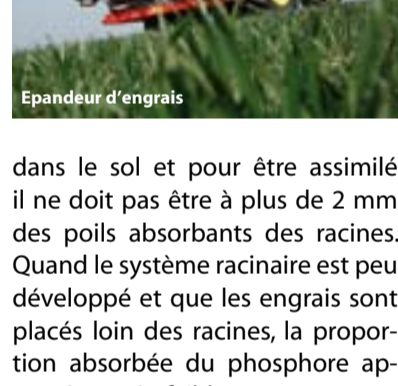
Amélioration de la répartition des engrais

Plusieurs fabricants proposent des semoirs munis de fertilisateurs qui permettent de semer et de fertiliser en même temps. Cette technique permet de localiser l'engrais au plus près des racines des plantes. Soulignons que l'une des récentes innovations dans le domaine de l'amélioration de la répartition des engrais est le N-senseur développé par Yara. Cet équipement permet de moduler les apports en tenant compte de l'hétérogénéité à l'intérieur de la parcelle.

PHOSPHORE

La plante absorbe le phosphore à partir de la solution du sol essentiellement sous forme d'ions orthophosphate (H₂PO₄⁻) et éventuellement sous forme d'ions HPO₄²⁻. Le phosphore provient des réserves du sol, des engrais organiques ou minéraux apportés par la fertilisation.

Dans le sol, le phosphore se trouve



Engrais enrobés

essentiellement sous forme de :

- **Phosphates de calcium** sous trois formes : monocalcique (soluble dans l'eau), bicalcique (peu soluble dans l'eau) et tricalcique (insoluble dans l'eau). La forme tricalcique représente la forme la plus abondante dans les sols calcaires.
- **Phosphates d'alumine ou de fer** : ils sont insolubles et se forment dans les sols acides.
- **Phosphates organiques** : intégrés dans les molécules organiques, leur minéralisation par les micro-organismes du sol libère de l'acide phosphorique.
- **Ions ortho-phosphates** fixés par le complexe adsorbant par l'intermédiaire du calcium : Cette forme est la plus disponible pour les plantes. Les quantités adsorbées sont en équilibre avec celles libres dans la solution du sol. Les ions sont libérés dans la solution du sol au fur et à mesure que la plante y puise

Les causes du manque d'efficacité

L'efficacité de la fertilisation phosphatée est la plus problématique et fait l'objet de beaucoup de travaux scientifiques. En effet, la dynamique du phosphore dans le sol est très complexe et reste encore mal élucidée. Le manque d'efficacité de la fertilisation phosphatée est lié à plusieurs facteurs :

- Le phosphore est peu mobile

Les différents types d'engrais phosphatés :

Engrais naturels	Teneur phosphore (P ₂ O ₅)	Forme du phosphore
- Engrais organique		
Guano d'oiseaux	20%	organique
Farine animale (poisson, viande, etc.)	6 à 12%	organique
Farine d'os et arrête de poisson	16%	organique
- Engrais minéraux		
Phosphate naturel	32%	minérale
Engrais chimique de synthèse		
Superphosphate simple	16 à 18%	minérale
Superphosphate concentré	25 à 32%	minérale
Superphosphate triple	44 à 48%	minérale
Phosphate monoammonique (MAP)	60%	minérale
Phosphate diammonique (DAP)	48 à 50%	minérale

Fig 2 cycle du phosphore dans les sols agricoles



126 • Agriculture du Maghreb • n°51 • Avril 2011

Efficiences de la fertilisation, nouveau défi pour l'agriculture moderne

Efficiences de la fertilisation

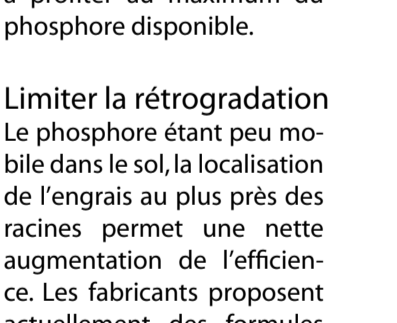
Les innovations visent à remédier aux inconvénients liés à la faible mobilité du phosphore dans le sol et à sa tendance à la rétrogradation. Elles concernent principalement : les méthodes de raisonnement pour le calcul des doses, les méthodes de solubilisation des phosphates du sol et l'augmentation de son assimilation, ainsi que des méthodes pour limiter la rétrogradation du phosphore dans le sol.

Raisonnement des doses

Lors de l'élaboration du plan de fertilisation, la détermination du phosphore assimilable est la méthode la plus utilisée pour calculer la dose des phosphates à apporter. Cependant, à cause de la dynamique complexe de cette méthode varie en fonction de la nature du sol. On assiste donc actuellement, à l'émergence de nouvelles méthodes basées sur la modélisation de la dynamique du phosphore dans le sol en fonction de ses caractéristiques physiques et chimiques.

Solubilisation des phosphates et l'augmentation de l'assimilation

L'utilisation de mycorhizes devient une pratique courante en agriculture. Plusieurs spécialités commerciales sont proposées, avec comme objectif l'optimisation de la nutrition phosphatée. La mycorhize agit par solubilisation des phosphates et par augmentation de l'espace prospecté par les racines. D'autres spécialités commerciales à base de bactéries ou d'acides organiques sont proposées pour solubiliser les phosphates.



En stimulant l'enracinement de la plante, les produits dits enracineurs aident à augmenter le volume de sol prospecté par les racines et à profiter au maximum du phosphore disponible.

Limiter la rétrogradation

Le phosphore étant peu mobile dans le sol, la localisation de l'engrais au plus près des racines permet une nette augmentation de l'efficacité. Les fabricants proposent actuellement des formules d'engrais Starter, liquides et en micro-granulés, à apporter par des semoirs munis de fertilisateurs adaptés. Cette technique permet d'utiliser des doses réduites d'engrais (20 à 60 kg/ha).

Coté formulation, nous assistons, comme pour l'azote, à l'apparition des "engrais retard" ou des engrais à base de phosphore complexe par des molécules organiques, type acides humiques. Ces formulations permettent une protection du phosphore contre la rétrogradation et sa libération progressive au fur et à mesure de son absorption par les racines.

Enfin, nous assistons à l'apparition d'autres solutions qui visent à bloquer les sites de fixation du phosphore dans le sol et le maintenir dans la solution du sol le plus longtemps possible. C'est le cas du procédé Avail.

POTASSIUM

Contrairement à l'azote et au phosphore, le potassium se trouve toujours dans le sol sous forme minérale. Il y est sous forme de minéraux potassiques qui sont non assimilables ou sous forme d'ions K⁺ libres dans la solution du sol ou fixés sur le complexe adsorbant. Il est absorbé par la plante directement sous forme d'ions K⁺. Les ions potassium disponibles pour la plante sont répartis entre la solution du sol et le complexe adsorbant, qui sont en équilibre. En effet, le complexe adsorbant rééquilibre la solution du sol au fur et à mesure que la plante y puise les ions K⁺. Et quand le potassium n'est ni absorbé par la plante, ni adsorbé, il est exposé au lessivage.

Le potassium adsorbé est dit « potassium échangeable » et son importance dépend de la capacité d'échange cationique CEC. Mais il peut également être sous une autre forme dite « rétrogradée » qui est moins disponible pour les plantes, car retenue par les feuillets d'argile.

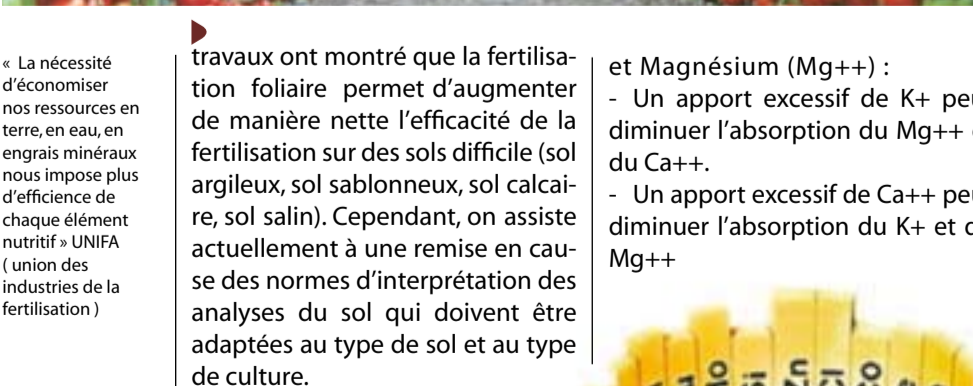
L'importance de la rétrogradation dépend de la richesse du sol en argiles et de leur nature minéralogique.

Les causes du manque d'efficacité

La figure 3 montre que les sources de pertes de potassium sont essentiellement le lessivage et le rétrogradation. En effet, le potassium apporté en excès ou à des moments où la plante ne l'absorbe pas, est automatiquement perdu par le lessivage dans les sols sableux ou rétrogradé dans les sols argileux. L'importance de ces pertes est fonction de la capacité d'échange cationique du sol. Les autres facteurs qui peuvent diminuer l'efficacité de la fertilisation potassique sont les interactions d'antagonisme qui peuvent exister entre le potassium et d'autres éléments comme le magnésium et le calcium.

Innovations pour l'efficacité

La fertilisation potassique n'est pas aussi complexe que la fertilisation azotée ou phosphorique. Les méthodes d'application et les formes classiques sont toujours d'usage et donnent des résultats satisfaisants. Les travaux pour l'amélioration de l'efficacité de la fertilisation potassique concernent surtout l'adaptation des doses et leur fractionnement au type de sol et au type de culture. Ces



« La nécessité d'économiser nos ressources en terre, en eau, en engrais minéraux nous impose plus d'efficacité de chaque élément nutritif » UNIFA (union des industries de la fertilisation)

travaux ont montré que la fertilisation foliaire permet d'augmenter de manière nette l'efficacité de la fertilisation sur des sols difficiles (sol argileux, sol sablonneux, sol calcaire, sol salin). Cependant, on assiste actuellement à une remise en cause des normes d'interprétation des analyses du sol qui doivent être adaptées au type de sol et à son type de culture.

Au niveau formulation, on assiste à l'apparition d'engrais potassique dans lesquels le potassium est complexé par des molécules organiques type acides humiques. Ils sont à utiliser sur des sols dans des conditions favorables au lessivage et à la rétrogradation. Leur apport doit être limité à des moments du cycle de la culture où les besoins sont très élevés.

L'efficacité et l'interaction entre les éléments

Les relations de synergie entre d'antagonisme qui existent entre les éléments nutritifs, peuvent augmenter ou réduire l'efficacité de la fertilisation. C'est le cas de l'antagonisme entre potassium (K⁺), Calcium (Ca⁺⁺)

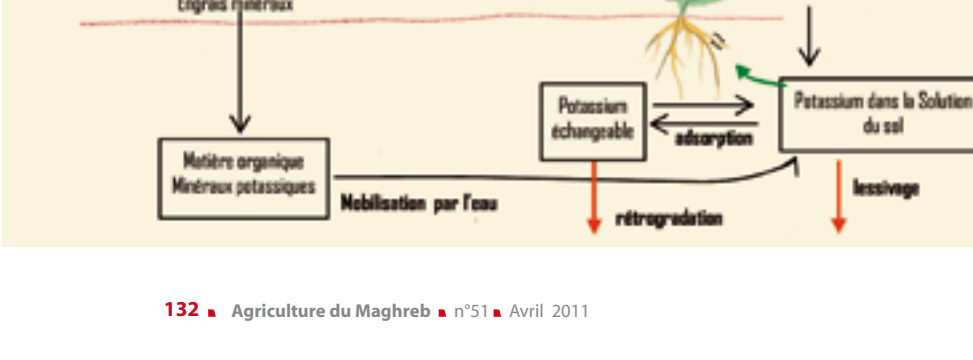
et Magnésium (Mg⁺⁺) :

- Un apport excessif de K⁺ peut diminuer l'absorption du Mg⁺⁺ et du Ca⁺⁺.
- Un apport excessif de Ca⁺⁺ peut diminuer l'absorption du K⁺ et du Mg⁺⁺



Cette illustration explique la loi du facteur limitant émise pour la première fois par Liebig à la fin du 19^e siècle. Le niveau d'eau dans le seuil ne peut pas s'élever au-dessus de la planche la moins haute. De même, c'est l'élément fertilisant qui se trouve en moindre quantité qui détermine le niveau du rendement possible.

Figure 3 : cycle du potassium dans le sol agricoles.



132 • Agriculture du Maghreb • n°51 • Avril 2011

Un apport excessif de Mg⁺⁺ peut diminuer l'absorption du K⁺ et du Ca⁺⁺.

Une fertilisation déséquilibrée est aussi un facteur de manque d'efficacité. Si un élément est apporté à des doses inférieures aux besoins, l'impact des autres éléments, même apportés à des doses adéquates, sur le rendement n'est pas optimal.

L'efficacité de la fertilisation et la fertilité du sol

Les caractéristiques du sol agissent sur l'efficacité de la fertilisation de plusieurs manières :

- La structure du sol agit sur l'enracinement, la respiration et la pénétration de l'eau dans le sol.
- L'activité biologique du sol agit sur la transformation des éléments nutritifs en formes assimilables.
- La capacité d'échange cationique et le taux de matière organique agissent sur l'aptitude du sol à stocker les éléments et diminuer les pertes par lessivage et/ou volatilisation.
- Le déséquilibre de la teneur du sol en éléments minéraux accentue les phénomènes d'antagonisme qui conduisent à une mauvaise efficacité des engrais potassiques, calciques ou magnésien.
- Le pH du sol conditionne les phénomènes de précipitation et de rétrogradation. Il influence ainsi l'assimilation de beaucoup d'éléments nutritifs.
- La texture du sol et sa teneur en calcaire conditionnent les phénomènes de rétrogradation. Elles influencent ainsi, les quantités d'éléments nutritifs perdues par insolubilisation.
- La teneur en matière organique du sol est un élément important. Un sol riche en matière organique donne plus de récolte avec moins d'engrais.

La gestion de la fertilité des sols est donc une pratique essentielle pour l'augmentation de l'efficacité de la fertilisation.