

La chimie minérale des sols et la fertilisation (organique et minérale)

Fiche **QUESTIONS SUR...** n° 01.08.Q04

juin 2024

Mots clés : fertilité des sols, fertilisation, azote, phosphore, potasse, pH, chaulage

Les éléments minéraux nécessaires au fonctionnement des plantes sont absorbés dans le sol, essentiellement par les racines.

Pendant longtemps, l'apport de matières organiques a constitué le seul moyen d'entretenir la fertilité chimique des sols cultivés, et c'est encore le cas actuellement en agriculture biologique. Les animaux (notamment les ruminants) consommaient à l'étable une partie de la production fourragère issue des prairies, puis leur fumier servait à fertiliser les cultures annuelles (maraîchères en priorité, puis grandes cultures). Mais il en résultait un appauvrissement des sols de prairies.

Le remplacement des amendements organiques par la fertilisation minérale – après la Seconde Guerre mondiale – a permis de limiter l'appauvrissement des sols de prairies et d'abandonner l'élevage dans les plaines céréalières : les céréaliers, pouvant se passer d'engrais de ferme, se sont alors moins préoccupés d'entretenir le taux de matière organique des sols.

Les besoins en éléments minéraux des plantes sont faibles au regard des quantités présentes dans les sols : pour les éléments majeurs (azote, phosphore, potassium), ils vont de quelques kilogrammes à 200-300 kg/hectare/an pour les cultures à haut rendement. Au regard de ces besoins, les sols contiennent naturellement des quantités importantes de ces éléments : 3 à 6 tonnes/hectare d'azote organique, de 9 à 45 tonnes/hectare pour le phosphore et de 14 à 100 tonnes/hectare pour le potassium, en fonction de l'origine géologique du sol. Mais l'essentiel de ces éléments n'est pas sous une forme assimilable par les plantes : ils ne sont pas "biodisponibles".

Les besoins en éléments minéraux des plantes

L'azote (N)

L'azote est l'un des principaux constituants des acides aminés des protéines, ainsi que des bases azotées des acides nucléiques. Une nutrition limitée en azote réduit la synthèse protéique et la teneur en chlorophylle. À l'exception des plantes de la famille des légumineuses (pois, haricots, luzerne, trèfle, soja...), qui sont capables de fixer l'azote de l'air grâce à leur symbiose avec les bactéries du genre *Rhizobium*, les plantes s'alimentent à partir de l'azote minéral du sol.

Mais si les plantes sont carencées en azote, elles sont lentes à se développer, et leur feuillage est vert clair ou jaunâtre.

Le phosphore (P)

Le phosphore joue un rôle essentiel dans de nombreuses molécules de la matière vivante, étant le composant central de l'ATP (adénosine triphosphate), source majeure d'énergie pour les cellules vivantes. Les racines des plantes l'absorbent sous forme d'ions minéraux (H_2PO_4^-) ou (HPO_4^{2-}) dans la solution du sol ; ces ions proviennent de la solubilisation des phosphates et des ions minéraux adsorbés sur les différentes phases solides du sol. Le phosphore *organique*, contenu dans les molécules des effluents organiques, doit être minéralisé en ions phosphoriques pour devenir assimilable par les plantes.

Le phosphore stimule le développement des racines, la floraison et la fructification des plantes.

Le potassium (K)

Le potassium participe directement à la formation et à la croissance des cellules. Toujours abondant dans la matière sèche des végétaux (2 à 4 %), il est absorbé par les racines sous forme du cation K^+ , et circule dans toute la plante : on le retrouve à l'intérieur des cellules et dans les parois cellulaires. Il permet ainsi le maintien de la pression osmotique et la rigidité des plantes, il circule dans la sève brute et dans la sève élaborée, il améliore la résistance (au gel, aux ravageurs et aux maladies), il permet le transfert des sucres et des acides

aminés vers les organes de réserve (racines, tubercules, grains et fruits), et améliore la couleur et la qualité gustative des fruits, ainsi que la conservation des légumes racines.

Le calcium (Ca), le soufre (S) et les oligo-éléments

Le calcium est un élément nutritif qui participe à la constitution des parois cellulaires en les rigidifiant, au maintien de la pression osmotique intracellulaire avec le potassium, et à la rigidité des parois cellulaires.

Le soufre est un élément indispensable, car c'est un constituant de trois des vingt acides aminés constitutifs des protéines.

Les oligo-éléments sont absorbés en quantités toujours très faibles (quelques dizaines ou centaines de grammes par hectare), mais sont indispensables à la bonne santé végétale.

Les carences en oligo-éléments sont assez courantes et dépendent souvent du type de sol et des cultures. Par exemple, la carence en cuivre apparaît sur les céréales à paille dans des sols calcaires, et la carence en bore est surtout connue pour la betterave, le tournesol ou les choux.

Le pH : un facteur important pour l'absorption des minéraux du sol

Le pH est une caractéristique des sols qui rend compte de la concentration en ions H^+ du milieu. Cette mesure permet de dire qu'un sol est très acide (pH 4 à 5,5), acide (pH 5,5 à 6,8), neutre (pH 6,8 à 7,2) ou alcalin (pH supérieur à 7,2). Le pH modifie l'activité biologique des sols et l'absorption des éléments minéraux par les plantes.

L'acidification des sols non calcaires est un phénomène naturel, indirectement dû aux apports d'engrais organiques et minéraux.

Un pH compris entre 5,5 et 7 est un optimum pour la biodisponibilité du phosphore. Au-delà de 7,2, la présence de calcium augmente l'insolubilité des phosphates, en raison de la formation de phosphates de calcium.

La biodisponibilité des éléments minéraux dans le sol

La plus ou moins grande biodisponibilité des éléments minéraux s'explique en partie par le fait que les éléments minéraux sont plus ou moins mobiles dans le sol ; alors que les nitrates ou les sulfates se déplacent assez facilement (sur plus de 20 mm), le phosphore est très peu mobile (2 mm au maximum). Un système racinaire dense facilitera donc l'absorption des éléments minéraux les moins mobiles.

Il faut mentionner que la biodisponibilité en phosphore est facilitée par la présence d'endomycorhizes qui vivent en symbiose avec beaucoup d'espèces végétales, à l'exception des brassicacées (colza, navette, chou...) et des chénopodiacées (betterave, épinard...).

Les cations échangeables (exemple : potasse K^+)

Les sels minéraux en solution dans l'eau du sol sont dissociés sous forme :

- d'anions, chargés négativement,
- et de cations, chargés positivement.

Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , etc.) sont adsorbés sur le complexe argilo-humique, et sont donc assez facilement biodisponibles. Les cultures mobilisent des quantités très importantes de potasse en comparaison du niveau des exportations ; pour celles très exigeantes, il faut disposer de sols riches en potasse, d'autant plus s'ils ont une faible capacité d'échange cationique (les sols sableux, par exemple).

Azote et soufre

Les sols cultivés possèdent un stock d'azote organique plus ou moins important (de l'ordre de 3 000 à 6 000 kg/hectare) qui minéralise pour donner de l'azote ammoniacal (NH_4^+), puis des nitrates, (NO_3^-) qui sont les formes d'azote assimilables par les plantes.

L'azote des engrais minéraux est plus rapidement assimilable que l'azote organique, qui doit donc être préalablement minéralisé en azote ammoniacal puis en nitrate.

L'origine de l'azote dans le sol

Sachant que la récolte des plantes cultivées exporte des quantités importantes d'azote du sol (100 à 300 kg/hectare/an pour les cultures annuelles), tout agriculteur doit se préoccuper de fournir de l'azote au système sol-plante. Pour cela, il dispose de plusieurs sources :

- la fixation symbiotique de l'azote de l'air, réalisée par des bactéries fixatrices situées dans les nodosités des racines de légumineuses (pois, féverole, soja, lupin, luzerne, trèfle, etc.) ;
- les apports d'engrais de ferme (fumiers, lisiers, etc.), ainsi que tous les engrais organiques qui contiennent une part d'azote organique, et une part (généralement faible) d'azote ammoniacal ;

- les pluies, qui apportent des quantités non négligeables d'azote (de l'ordre de 10 kg/ha/an, essentiellement sous forme NH_4^+) ;
- enfin les engrais minéraux, qui permettent d'ajuster les apports en fonction des besoins totaux de la culture.

La dynamique de l'azote dans le sol

La dynamique de l'azote dans le sol est complexe, aussi la fertilisation azotée des cultures est probablement une des techniques les plus difficiles à maîtriser par les agriculteurs. Le nombre de paramètres à prendre en compte pour l'estimation de l'azote disponible est très vaste : effet du précédent cultural, minéralisation de la matière organique fraîche, minéralisation de l'humus, pertes d'azote par lessivage ou dénitrification, etc.

La fertilisation se raisonne à l'année sur la base d'un bilan minéral prévisionnel, mais le bilan prévisionnel ne dit rien sur les périodes pendant lesquelles la minéralisation de la matière organique est significative. La minéralisation est maximale en fin de printemps quand le sol est réchauffé et encore humide, ralentit en été en raison de la sécheresse du sol, et redémarre avec les pluies d'automne.

La dynamique du soufre dans le sol

La dynamique du soufre est très voisine de celle de l'azote.

Le soufre organique minéralise sous forme de sulfate (SO_4^{2-}) facilement assimilé par les plantes.

Phosphore

Plus de 95 % du phosphore, dont la plante a besoin, est extrait de la phase solide du sol. Il y est associé pour environ deux tiers à la fraction minérale : au fer, à l'aluminium ou au calcium ; le tiers restant est sous forme organique. Une grande partie de cet élément minéral est retenue dans le sol, sous des formes non immédiatement disponibles pour les plantes.

Les ions H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} représentent les seules formes de phosphore utilisables par les cultures. Lorsque, au cours de leur croissance, les racines des plantes prélèvent du phosphore, elles appauvrissent la solution du sol, ce qui entraîne une libération du phosphore qui se trouvait adsorbé, complexé ou précipité. Ces réserves du sol sont donc mobilisées en permanence pour nourrir les plantes.

La nutrition correcte d'une plante dépend de la capacité de cette dernière à mobiliser les réserves en phosphore du sol. C'est ce qui explique que les cultures sont plus ou moins exigeantes en cet élément.

Diagnostic de carences

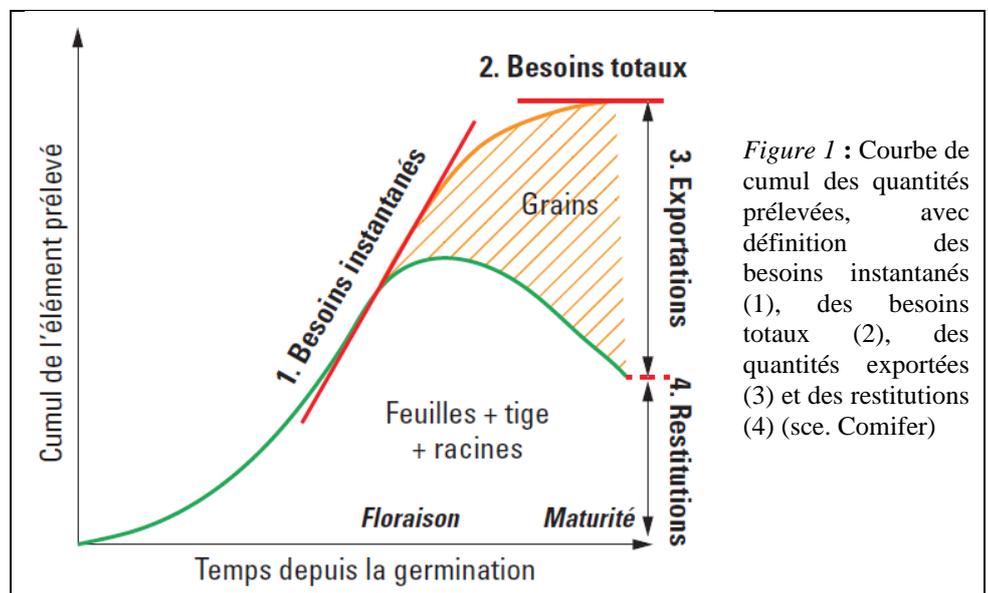
L'insuffisance d'un élément minéral limite le plus souvent les rendements des cultures. Ces carences peuvent être fugaces quand elles interviennent à un moment de fort besoin instantané (*Figure 1*) ou quand les conditions climatiques (froid, sécheresse, excès d'eau) rendent certains éléments minéraux provisoirement non biodisponibles.

L'observation des organes aériens des plantes

(en particulier les feuilles) permet, à un œil un peu exercé, de détec-

ter des carences ; par exemple, un blé ou une orge qui jaunit au printemps aura souvent une carence en azote. Avec une carence en phosphore, le feuillage est foncé, rouge ou marqué de taches rouges, la floraison est peu abondante et la maturation des fruits est longue.

Les analyses de sols, permettant d'anticiper les besoins en engrais pour éviter des carences, sont réalisées par des laboratoires qui mesurent les teneurs en éléments minéraux. En fait, on mesure rarement la teneur totale en élément minéral du sol ; on mesure par exemple le K^+ échangeable et le P assimilable, avec des méthodes d'extraction spécifique pour chaque élément. Ces analyses nécessitent d'être interprétées par le laboratoire qui tiendra compte du type de sol et des besoins de chaque culture.



L'analyse d'organes aériens de plantes est surtout utilisée en arboriculture. Pour ces cultures, l'analyse de sol et du sous-sol reste utile, mais est généralement réalisée au moment de la mise en place du verger ou du vignoble. Une fois la culture implantée, les analyses sont réalisées sur la partie travaillée du sol, alors que les arbres s'alimentent en éléments minéraux parfois très en profondeur.

Fertiliser les cultures avec des engrais minéraux et organiques

La fertilisation consiste à compléter si nécessaire, par des apports d'engrais organiques ou minéraux, les éléments minéraux déjà présents dans le sol pour satisfaire les besoins des plantes.

Pour les éléments majeurs (phosphore et potassium), il faut connaître les quantités d'éléments prélevés chaque année lors de la récolte des cultures, ces exportations seront ensuite compensées par des apports de fertilisants. Ce calcul peut être réalisé sur une rotation, en positionnant les apports sur les cultures les plus exigeantes.

Notons que les oligoéléments (S, Fe, Mg, Cu, Zn, Cd, Al, Mn, B, etc.), indispensables en petites quantités aux plantes, sont souvent présents dans les sols, mais il faut rester attentif aux carences qui sont fréquentes pour certaines cultures et dans certains types de sol.

Pour l'azote, on est obligé de raisonner à l'année, car les nitrates sont des ions très mobiles et les stocks d'azote minéral disponibles dans le sol varient rapidement en fonction de la minéralisation de la matière organique, qui dépend de la température et de l'humidité du sol.

La fertilisation azotée des cultures est un sujet complexe, aussi les erreurs de gestion de la fertilisation azotée ont de nombreuses conséquences : sur le rendement et la qualité des productions, sur la pollution des eaux par les nitrates, sur les émissions de gaz à effet de serre.

Pour calculer les doses d'azote à apporter aux cultures annuelles de manière précise et économique, on réalise un bilan prévisionnel. La fumure azotée minérale à apporter à la culture sera la différence entre les besoins et les fournitures du sol. Pour éviter le travail fastidieux et complexe d'un calcul de bilan prévisionnel, il est possible d'utiliser des logiciels développés par les laboratoires d'analyse ou les chambres d'agriculture.

Le chaulage

La réaction de neutralisation par le chaulage, propre à chaque type de sol, dépend du pouvoir tampon du sol, aussi n'est-il pas possible de prévoir l'effet d'un amendement sur le gain de pH. Il faut donc réaliser des apports progressifs (1 à 5 tonnes/hectare de chaux vive CaO) et suivre l'évolution du pH régulièrement. En règle générale, plus le sol est argileux, plus l'apport doit être important.

L'efficacité des amendements basiques dépend de leurs vitesses de solubilisation et de la force de la base. Dans la pratique, plus l'amendement est fin ou tendre, plus sa vitesse de dissolution est rapide, et donc plus il est efficace.

Philippe VIAUX, membre de l'Académie d'Agriculture de France

Ce qu'il faut retenir :

Les besoins en éléments minéraux nécessaires à la croissance des plantes sont fournis par le sol, qui s'appauvrit au fur et à mesure des ponctions ; la fertilisation permet de compenser les exportations des récoltes.

Les fumures organiques doivent être apportées à l'automne pour que la minéralisation de l'azote puisse commencer à fournir de l'azote suffisamment tôt au printemps, et donc satisfaire les besoins de certaines cultures qui démarrent vite au printemps.

La fertilisation minérale est utile pour corriger les déséquilibres de la fertilisation organique et pour fournir de l'azote à des périodes clefs de la croissance des plantes.

Pour en savoir plus :

- Philippe VIAUX : *Dix clés pour une fertilité durable des sols agricoles*, Édition France Agricole, 230 p., 2023