

Relations trophiques microfaune-bactéries rhizosphériques-mycorhizes : quel rôle dans le recyclage des nutriments ?

Fiche **QUESTIONS SUR...** n° 05.01.Q06

septembre 2022

Mots clés : nutrition minérale plantes - minéralisation N - minéralisation P - symbiose racinaire - boucle microbienne

La production agricole dépend, entre autres, d'une bonne nutrition minérale des cultures en macro-éléments comme l'azote (N), le phosphore (P), le soufre (S) et le potassium (K).

La nutrition minérale, notamment en azote et en phosphore, est majoritairement assurée par la fertilisation, qui apporte les éléments minéraux pouvant être absorbés plus ou moins directement par les racines.

Or dans le cadre d'une agriculture désirent mettre en œuvre les processus écologiques du sol, il convient de mieux connaître et de mieux maîtriser la minéralisation des composés organiques d'origine végétale – qui retournent au sol sous forme de débris, de lixiviats et d'excrétions – pour mieux utiliser et recycler leur azote et leur phosphore, en les rendant disponibles pour les cultures.

Les apports de nutriments et la minéralisation des matières organiques.

Depuis toujours, l'agriculture cherche à optimiser la nutrition minérale des cultures afin d'assurer une bonne croissance des végétaux dont dépendent les rendements.

Deux éléments sont particulièrement importants : l'azote (N) et le phosphore (P), car ils déterminent la vitesse de fixation de carbone du CO₂ de l'air, au cours de la photosynthèse qui a lieu dans les feuilles. En effet, la teneur en azote déterminera les quantités de l'enzyme qui assure la transformation du carbone (C) minéral en carbone organique dans les chloroplastes, et donc l'intensité de la photosynthèse et la production des sucres issus de la photosynthèse.

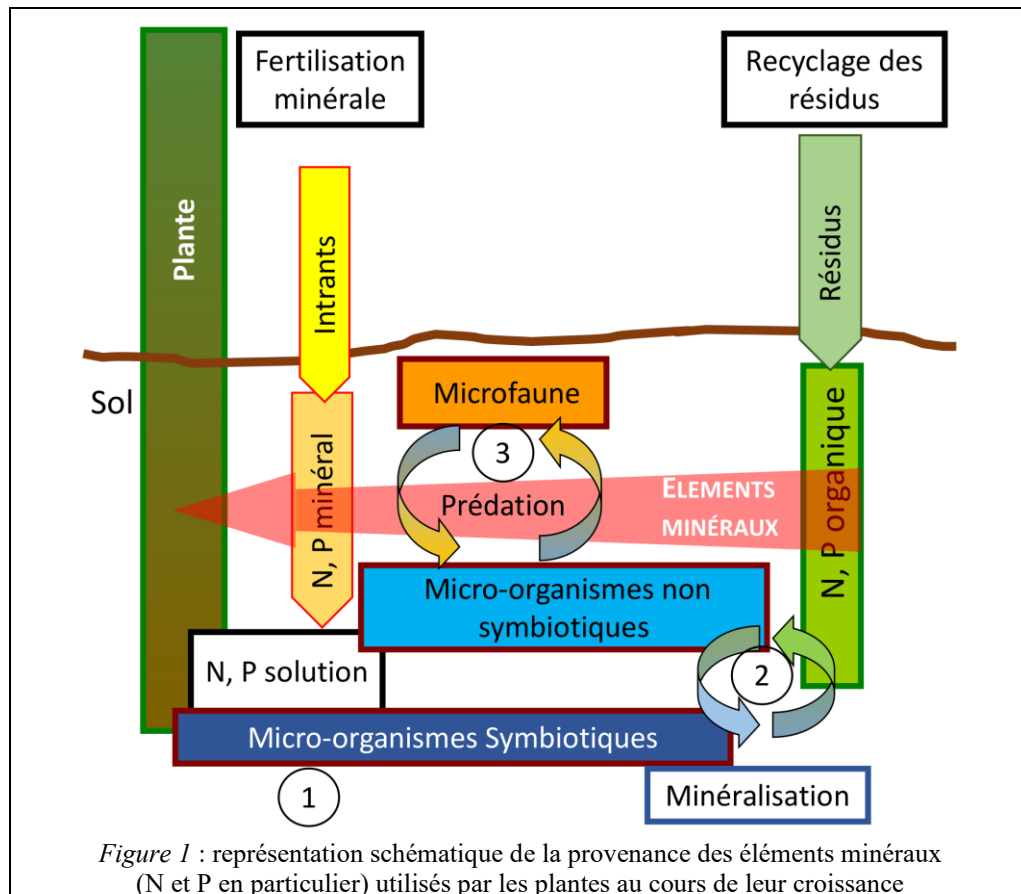
La teneur en P déterminera la sortie des sucres nouvellement synthétisés hors des chloroplastes, qui pourront être utilisés pour la croissance des autres parties de la plante, en particulier les racines.

Selon les espèces végétales, les teneurs totales en azote des plantes peuvent varier de 1 à 3 %, et celles du phosphore de 0,1 à 0,3 %, soit un rapport N/P de 10. Les sources de N et de P utilisées par les plantes peuvent avoir plusieurs origines qui sont schématisées dans la *figure 1*, avec :

1/ Un apport de N et P par les intrants chimiques, engrais à base de nitrate, ammonium ou urée pour N et de phosphates pour P. Ces engrais alimenteront la fraction de N et P en solution, seule source où les racines pourront absorber les formes minérales de N et P, soit directement par les poils racinaires et les cellules épidermiques, soit avec l'aide de micro-organismes symbiotiques (repère 1 sur le schéma).

2/ Un apport de sources organiques de N et P, majoritairement sous forme de débris végétaux, fumiers et composts et de sécrétions racinaires. Les racines ont des capacités limitées pour utiliser ces composés organiques, qui doivent d'abord être transformés en formes minérales. Cette transformation (ou minéralisation) des matières organiques peut être assurée par les micro-organismes symbiotiques, qui peuvent transférer ces formes minérales à la plante ; cependant, ce sont les micro-organismes non symbiotiques qui assurent en grande partie cette minéralisation et assimilent dans leur biomasse les éléments minéraux libérés (repère 2 sur le schéma).

Pour que la plante profite de cette minéralisation, il est nécessaire de libérer N et P immobilisés par les microorganismes, ce qu'assure l'action de prédation de la microfaune du sol (repère 3 sur le schéma).



Les micro-organismes symbiotiques et la nutrition végétale

Deux symbioses sont très importantes pour l'agriculture :

- L'une est bactérienne, et forme la symbiose fixatrice d'azote avec les légumineuses ; elle est capable, au sein des nodosités, de transformer l'azote de l'air en ammonium directement utilisable par la plante.

Deux facteurs environnementaux pilotent l'efficacité de la fixation de l'azote :

- la disponibilité en azote (surtout nitrique), qui doit être faible,
- et la disponibilité en P minéral, qui doit être suffisante pour assurer le coût énergétique élevé de la symbiose, et dépend de molécules riches en énergie (comme l'adénosine triphosphate ou ATP) et de sucres dérivant de la photosynthèse.
- L'autre est fongique, et forme les associations mycorhiziennes. Cette symbiose accroît considérablement la zone de sol explorée par les racines, par un réseau mycélien externe à la racine dont les filaments prospectent des zones inaccessibles aux racines et à leurs poils racinaires. Ce mycélium va pouvoir absorber l'azote et le phosphore, loin des racines, et les transférer à la plante par ces mycorhizes qui se développent dans les racines. Seules quelques familles végétales sont exclues de cette symbiose, comme les Brassicacées (tels chou et colza) et les Chénopodiacées (telles les betteraves). Cette symbiose est principalement sensible à la disponibilité en P du sol qui, si elle est trop élevée, diminue la formation, le développement et l'efficacité des mycorhizes à améliorer la nutrition minérale de la plante.

Bien utiliser le potentiel agronomique de ces symbioses apparaît donc comme un moyen très pertinent pour améliorer de façon écologique la nutrition minérale des cultures.

Les micro-organismes non symbiotiques et leurs prédateurs

À côté des associations symbiotiques, des populations microbiennes non symbiotiques se développent (en particulier hors des racines) dans une zone appelée la rhizosphère ; celle-ci, enrichie en exsudats racinaires, apporte des nutriments aux populations microbiennes. Certaines de ces populations, appelées bactéries PGPR (pour *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) ont aussi des effets bénéfiques sur la croissance de la plante, par exemple *via* la stimulation du développement racinaire, et donc une meilleure exploration du sol. D'autre part, les débris végétaux et les apports de matières organiques au sol (dont celles

page 2 Cette fiche est consultable sur le site internet www.academie-agriculture.fr onglet "**Publications**", puis "**Encyclopédie de l'Académie**" puis "**Questions sur**".

Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance

contenant N et P) vont être favorables au développement de populations bactériennes et fongiques, pouvant minéraliser N et P. Ces microorganismes minéralisateurs utilisent ces nutriments minéraux générés qu'ils immobilisent dans leur cellule, les rendant indisponibles pour les végétaux ; mais en nourrissant un niveau trophique de la microfaune, ils seront dégradés par divers animaux de taille d'ordre du millimètre : protozoaires, nématodes, collemboles. Cette microfaune, en libérant les éléments immobilisés, constitue un maillon essentiel du recyclage des nutriments pour les végétaux.

La minéralisation de l'azote organique

La matière organique contient des composés azotés, essentiellement sous forme de protéines et d'acides aminés qui seront minéralisés par les microorganismes au travers de quatre étapes successives :

- 1/ l'hydrolyse des protéines en peptides, par des protéases,
- 2/ l'hydrolyse des peptides en acides aminés, par des peptidases,
- 3/ la désamination des acides aminés en ammonium, par des désaminases,
- 4/ l'oxydation de l'ammonium en nitrate (nitrification).

Les champignons et les bactéries contribuent aux trois premières étapes de ce cycle, mais seules les bactéries et les archées interviennent dans la nitrification.

Les racines utilisent préférentiellement l'azote minéral (ammonium et nitrate), mais très peu l'azote organique, d'où la nécessité de minéraliser les matières organiques des sols.

La minéralisation du phosphore organique

Seuls les ions phosphate (Pi) peuvent être absorbés par les racines et les autres organismes. Or la matière organique contient P sous des formes organiques représentées principalement par deux groupes : les phospho-diesters (acides nucléiques) et les phospho-monoesters (glucose-6-phosphate, ...).

Par hydrolyse par les di-estérases (nucléases), les phospho-diesters (de structure du type R1-P-R2) produisent des phospho-monoesters du type R-P. Ces molécules doivent encore être hydrolysées par les mono-estérases (les phosphatases) pour libérer le phosphate (Pi) assimilable par les végétaux et les autres organismes du sol.

Contrairement à l'azote, tous les organismes (plantes, bactéries et champignons) peuvent produire des enzymes comme les nucléases et les phosphatases, spécialement quand la disponibilité en Pi est très faible, mais les populations microbiennes sont plus efficaces que les racines pour minéraliser le phosphore.

L'accélération de la minéralisation de N et P par la microfaune

Les connaissances actuelles montrent que les populations microbiennes ont des capacités de minéralisation de la matière organique très supérieures à celles des racines. Cependant, ces mêmes populations microbiennes sont très souvent plus compétitives que les racines pour absorber les formes minérales de N et P libérées, ce qui conduit à l'immobilisation de ces éléments dans la biomasse microbienne.

Des travaux récents ont montré que la microfaune – qui se nourrit de bactéries et de champignons – a un rôle déterminant pour libérer ces éléments accumulés dans ces micro-organismes ; cette action de prédation de la microfaune et de libération des éléments est aussi appelée *boucle microbienne*.

Pour l'azote, l'effet positif des organismes bactériovores (protozoaires ou nématodes) a été clairement démontré par une analyse de 220 observations : en moyenne, les situations avec bactériovores augmentent de 80 % le taux de minéralisation de l'azote dans le sol utilisé. Les plantes avec bactériovores accumulent beaucoup plus d'azote dans leurs parties aériennes (+ 59%) et leurs racines (+ 28%) et poussent mieux que sans bactériovores (+ 20 % de biomasse). Cette meilleure nutrition azotée des plantes en présence de bactériovores pourrait être due au fait qu'après ingestion de leurs proies, les bactériovores excrètent de l'ammonium directement utilisable par la plante.

Pour le phosphore, les données sont rares et particulières en raison de sa chimie, car le phosphore est un élément :

- très peu mobile dans la solution du sol,
- qui forme des composés stables avec beaucoup de cations (calcium, fer, aluminium, etc., ce qui entraîne des teneurs très faibles en solution (aux environs de 10 µM).

Les bactériovores sont cependant capables d'augmenter fortement la concentration en phosphore dans la plante : jusqu'à + 30 % dans la partie aérienne, et + 23 % dans la partie racinaire. Il a été proposé récemment

page 3 Cette fiche est consultable sur le site internet www.academie-agriculture.fr onglet "**Publications**", puis "**Encyclopédie de l'Académie**" puis "**Questions sur**".

que le transport des bactéries minéralisatrices à la surface des animaux et /ou par leurs déjections contenant des bactéries mortes et vivantes augmentait considérablement la minéralisation du P organique. Cependant tous les mécanismes d'amélioration de la nutrition P de la plante via la boucle microbienne ne sont pas encore totalement compris à ce jour, et appellent des travaux complémentaires.

Claude PLASSARD, membre de l'Académie d'Agriculture de France

Ce qu'il faut retenir :

Les cycles des nutriments – en particulier azote et phosphore – sont sous la dépendance des populations microbiennes du sol, vivant dans l'environnement des racines (la rhizosphère), mais aussi dans les sites recevant des résidus végétaux.

Les associations entre les racines des plantes et les microorganismes peuvent être symbiotiques, comme dans les cas de la symbiose bactérienne fixatrice d'azote, ou de la symbiose fongique mycorhizienne, conduisant respectivement à une meilleure nutrition azotée et phosphatée de la plante.

D'autre part, en minéralisant les formes organiques, les populations microbiennes libèrent de l'azote et du phosphore minéral, qui peuvent être à leur tour immobilisés dans leur biomasse, créant une compétition avec les besoins des cultures.

La consommation de ces populations microbiennes – par la microfaune appelée aussi boucle microbienne – conditionne très fortement le recyclage des éléments minéraux qui, autrement, resteraient inaccessibles aux plantes.

Toutefois nous ne connaissons pas encore tous les leviers qui permettraient d'optimiser le fonctionnement des populations microbiennes et des boucles trophiques, pour contrôler la nutrition minérale des cultures en azote et en phosphore.

C'est sans aucun doute une voie de recherche à privilégier dans les années qui viennent, afin d'aller vers une agriculture plus agroécologique.

Pour en savoir plus :

- J.-F. BRIAT, GOJON A., C. PLASSARD, H. ROUACHED, G. LEMAIRE : *Reappraisal of the central role of soil nutrient availability in nutrient management in light of recent advances in plant nutrition at crop and molecular levels*. European Journal of Agronomy, 2020
- S. JEFFERY, C. GARDI, A. JONES, L. MONTANARELLA, L. MARMO, L. MIKO, K. RITZ, G. PERES, J. RÖMBKE et W.-H. VAN DER PUTTEN : *Atlas Européen de la Biodiversité du Sol*, Commission européenne, Bureau des publications de l'Union, 2013, <http://www.gessol.fr/atlas>
- T. DECAËNS : *Macroecological patterns in soil communities*, Global Ecology and Biogeography, 2010
- J.-M. GOBAT, M. ARAGNO, W. MATTHEY : *Le sol vivant. Bases de pédologie, biologie des sols*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2010
- M. GARCÍA-SÁNCHEZ, M. SOUCHE, C. TRIVES-SEGURA, C. PLASSARD : *The grazing activity of Acrobeloides sp. drives phytate mineralisation within its trophic relationship with bacteria*. Journal of Nematology, 2021
- C. PLASSARD, A. ROBIN, E. LE CADRE, C. MARSDEN, J. TRAP, L. HERRMANN, K. WAITHAISONG, D. LESUEUR, E. BLANCHART, L. CHAPUIS-LARDY, P. HINSINGER : *Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol*, Innovations Agronomiques, vol 43, 2015
- C. PLASSARD, E. LECADRE, C. MARSDEN, J. TRAP, P. HINSINGER : *Le Sol et ses facteurs de fertilité*, Guide de la fertilisation raisonnée, 2^e édition, La France Agricole Eds, 2017, 2015
- C. PLASSARD, J. TRAP, P. RANOARISOA, U. IRSHAD, C. VILLENAVE, A. BRAUMAN : *Les relations trophiques microfaune - bactéries rhizosphériques - mycorhizes : quel rôle dans le recyclage des nutriments (N et P) ?*, Les sols et la vie souterraine, des enjeux majeurs en agroécologie, J-F Briat & D. Job, coordinateurs, collection Synthèses Quae, Cirad, Ifremer, Inra, Irstea, 2017
- J. TRAP, M. BONKOWSKI, C. PLASSARD, C. VILLENAVE, E. BLANCHART : *Ecological importance of soil bacterivores for ecosystem functions*, Plant and Soil, 2016