

Phosphore, Arsenic et Silicium en culture de céréales : éléments minéraux désirés ou indésirables....

Séance du 17 juin :

Animatrices :

Section 5 : Fabienne **Trolard** et Claude **Plassard**

Section 9 : Delphine **Guey** et Marie Emmanuelle **Saint-Macary**

Introduction : Parmi les éléments chimiques intervenant dans les processus biologiques, dix-sept d'entre eux sont essentiels à la croissance et au développement des végétaux : C, H, O, N, K, Ca, Mg, P, S, Cl, B, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Mo. À l'exclusion du carbone prélevé dans l'air, ces nutriments sont disponibles dans les sols, associés à des constituants minéraux et/ou organiques.

Dans les écosystèmes cultivés, les pratiques de fertilisation privilégient les apports d'azote, phosphore et potassium (NPK), tout en étant attentives aux carences éventuelles en calcium, magnésium ou soufre... Ainsi pour raisonner les décisions sur l'usage des engrais dits de « trésorerie », orientés à la baisse depuis plusieurs années, comme les phosphates, il est essentiel d'en connaître les teneurs dans les sols. Dans le cas de carences non maîtrisées en P, dans certaines conditions physico-chimiques, le phosphore peut être substitué par l'arsenic dans la plante rendant la production végétale impropre à la consommation alimentaire.

Par ailleurs l'agrofourniture propose aussi pour l'agriculture et l'horticulture des produits minéraux comme la terre à diatomées, le kaolin, la perlite, la zéolite ou la wollastonite. Ces additifs minéraux ont en commun d'être présentés comme des fournisseurs de silicium potentiellement plus biodisponible que celui naturellement présent dans les sols. Dans la majorité des sols, l'analyse de terre montre des teneurs en silice élevées, mais le déficit de sa biodisponibilité peut entraîner une augmentation de divers stress abiotiques et biotiques impactant les rendements agricoles.

L'objet de la séance que nous proposons est donc de faire le point sur le rôle des trois éléments (P, Si et As) dans le système sol – eau – plante, sur leurs impacts et rôles respectifs dans les écosystèmes cultivés, en particulier en culture de céréales.

Structure de la séance

Introduction : Fabienne TROLARD et Delphine GUEY avec une courte intervention de Clément FONTAINE du labo EUROFINS sur les analyses actuellement disponibles de ces éléments pour les sols agricoles et les limites de l'interprétation des analyses de sol.

Exposé 1 : Claude PLASSARD et Lucien STOLZE

Absorber du phosphore ou de l'arsenic : les cultures peuvent-elles choisir ? De la biodisponibilité dans les sols aux mécanismes d'assimilation.

Exposé 2 : Bruno DELVAUX

Le cycle sol-plante du silicium

Exposé 3 : Jean-Dominique MEUNIER

Apport du silicium dans la culture des céréales : les verrous scientifiques

Conclusion : Guilhem BOURRIE

Résumés

1. Absorber du phosphore ou de l'arsenic : les cultures peuvent-elles choisir ? De la biodisponibilité dans le sol aux mécanismes d'assimilation.

Claude PLASSARD, membre correspond AAF
INRAE, Agro Montpellier, IRD, Cirad

Lucien STOLZE,
Université d'Avignon, INRAE

La diminution des concentrations en phosphore biodisponible dans les sols agricoles pose un défi agronomique et environnemental majeur, car elle tend à modifier la dynamique des éléments dans la rhizosphère et à accroître l'absorption de l'arsenic par les cultures. Pour bien appréhender cette tendance et comprendre la dynamique de cette compétition entre le phosphore et ce métalloïde toxique, il est indispensable d'élucider les mécanismes couplés qui contrôlent d'une part la biodisponibilité géochimique de l'arsenic dans le sol, et d'autre part les voies de son assimilation par les végétaux.

La biodisponibilité de l'arsenic est régie par un ensemble complexe de processus biogéochimiques impliquant principalement les mécanismes de sorption ainsi que les cycles d'oxydoréduction du fer et du manganèse. Dans ce contexte, le phosphore joue un rôle prépondérant en raison de la compétition pour les sites d'adsorption, influençant ainsi directement la mobilité de l'arsenic vers la solution du sol. Par ailleurs, la matrice du sol constitue un environnement d'une extrême complexité structurale où le couplage entre l'écoulement des fluides et les processus biogéochimiques s'avère critique. Par exemple, cette hétérogénéité spatiale génère des points chauds de réactivité, au sein desquels les limitations cinétiques de transfert de masse interviennent comme un facteur déterminant capable de restreindre ou, à l'inverse, d'exacerber la biodisponibilité de l'arsenic. À cette complexité spatiale s'ajoute une dynamique temporelle dictée par les forçages climatiques, qui influencent

à la fois les transferts de masse et les conditions hydrochimiques et redox du sol, altérant ainsi continuellement la mobilité de l'arsenic.

C'est au cœur de cet environnement hétérogène et fluctuant que le système racinaire doit s'adapter pour prélever le phosphore dans la solution du sol. En particulier, lorsque le phosphore manque, les racines synthétisent plus de protéines capables de transporter le phosphate mais aussi les différentes formes chimiques de l'arsenic.

Cette présentation explorera les différentes voies d'absorption déployées par les cultures confrontées à ce dilemme et la manière dont elles subissent l'empreinte géochimique du sol. En reliant les dynamiques de transport réactif à la biologie végétale, nous illustrerons l'importance d'une approche holistique et mécaniste pour comprendre le continuum sol-plante et la vulnérabilité de nos cultures face à l'arsenic.

2. Le cycle sol-plante du silicium

Bruno DELVAUX, membre AAF

Earth and Life Institute, Faculté des bioingénieurs
Université catholique de Louvain (Belgique)

Second élément le plus abondant en masse (~ 31 %) après l'oxygène (~ 49 %), le silicium (Si) est omniprésent dans la croûte terrestre dont plus de 90 % est constituée de silicates. Présent dans le sol dans divers minéraux silicatés et aluminosilicatés, ainsi qu'en phase liquide (H_4SiO_4), il n'y existe que sous forme tétraédrique SiO_4^{4-} . La teneur totale en Si s'échelonne de 5 à 470 g kg^{-1} selon la minéralogie du sol, sa concentration en solution variant de $3 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-1}$ g kg^{-1} . La dissolution des minéraux primaires lithogéniques est la source originelle de H_4SiO_4 aqueux, dont la concentration est régulée par dissolution-précipitation, adsorption-désorption, absorption par les plantes et lessivage vers l'hydrosystème. Dans la plante, la saturation en H_4SiO_4 au niveau des terminaux transpiratoires induit la précipitation d'opale-A phytogénique ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), appelée phytolithe. Dans le système sol-plante, le pool phytolithique augmente progressivement avec l'altération du sol jusqu'à excéder le réservoir minéral pédogénique de Si. Dans certains agrosystèmes, l'exportation des pailles de céréales peut induire un appauvrissement du Si en sols très altérés, grevant le rôle bénéfique du Si pour la plante dans l'atténuation de divers stress. Ces bénéfices y rendent la fertilisation siliceuse rentable. La biodisponibilité du Si dans le sol, à laquelle le réservoir phytolithique contribue significativement, est au mieux estimée par extraction en milieu salin dilué.

3. Apport du silicium dans la culture des céréales : les verrous scientifiques

Jean-Dominique MEUNIER

CNRS, CEREGE, Aix Marseille Université, IRD, INRAE

Le rôle bénéfique du silicium dans la croissance des céréales est connu depuis plus d'un siècle. Au cours des trente dernières années, un nombre important d'études ont documenté l'impact positif du Si, non seulement sur les rendements, mais aussi lorsque la plante est soumise à des stress biotiques et abiotiques. Les mécanismes de ces effets bénéfiques restent encore mal compris, mais depuis les travaux de Ma *et al.* (2006), il a été établi que l'absorption peut être active, c'est-à-dire déclenchée par des gènes, chez les plantes accumulant le Si comme la plupart des céréales que nous consommons (riz, orge, maïs ou blé).

L'accumulation de Si dans les plantes dépend du réservoir de silicium biodisponible (DSi). Or, dans le cas du riz sous climat tropical, il est bien démontré que l'apport d'engrais silicaté

permet d'améliorer les rendements en grain, surtout sur des sols acides, très altérés et naturellement désilicifiés. Cependant, l'augmentation des rendements n'est pas systématique, et deux verrous scientifiques majeurs sont discutés pour déterminer si l'application d'engrais silicatés peut être étendue aux climats tempérés et à d'autres céréales que le riz. Le premier concerne la caractérisation de la fraction de Si biodisponible. Le deuxième porte sur les besoins en Si des variétés cultivées.

CV des intervenants non académiciens

Jean-Dominique MEUNIER est directeur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Depuis 1991, il exerce ses activités au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (CEREGE). Spécialiste de biogéochimie environnementale, ses travaux ont d'abord porté sur la formation et l'évolution des gisements d'uranium dans les grès. Il a ensuite élargi ses recherches aux processus biogéochimiques et aux bilans d'altération dans les sols et les eaux, avant de se spécialiser dans l'étude du cycle biogéochimique du silicium. Ses recherches actuelles mettent particulièrement l'accent sur le rôle du silicium en agriculture.

Lucien STOLZE est Professeur Junior à l'Université d'Avignon. Ses travaux de recherche se concentrent sur le couplage entre l'écoulement de l'eau, le transport des solutés et les processus biogéochimiques, afin de comprendre comment ces interactions contrôlent la mobilité des contaminants et les transferts de masse dans le sous-sol. Docteur de l'Université Technique du Danemark (2020), il y a étudié la mobilité de l'arsenic dans des systèmes d'écoulement complexes. Il a ensuite rejoint le Laboratoire National Lawrence Berkeley (2021-2025), où ses travaux se sont portés sur les flux hydrochimiques liés à l'érosion chimique des roches sédimentaires en conditions transitoires.