

APPROCHES SYSTÉMIQUES DE LA NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES EN BIOLOGIE ET EN AGRONOMIE

Animateurs : Jean-François **BRIAT** et Gilles **LEMAIRE** (Membres de la section 5 de l'Académie)

Jean-François **MOROT-GAUDRY** (Membre de la section 6 de l'Académie)

Mots clés : Plantes, nutrition minérale, biologie, agronomie

INTRODUCTION

Jean-François **BRIAT**. Membre de la section 5 l'Académie d'Agriculture de France

La nutrition minérale des plantes, jusqu'à récemment, faisait l'objet d'études partielles.

Au niveau de la biologie des plantes, la recherche traitait de la carence ou de la toxicité d'un élément, sans considérer ses interactions avec les autres éléments. Un effort particulier a porté ces dernières années sur l'identification des transporteurs membranaires des différents éléments nutritifs (N, P, S, K, Fe, Zn, Mn ...), en analysant leur structure et leur fonction mais surtout l'expression des gènes qui les codent et les signalisations environnementales (en particulier nutritionnelles et hormonales) qui régulent la nutrition. Toutefois, ces études si elles ont le mérite d'avoir identifié les acteurs moléculaires responsables du prélèvement et de la distribution *in planta* des éléments nutritifs, ont souvent le défaut d'être partielles, au cas par cas, sans vision globale de l'impact de la nutrition minérale multi-éléments sur le génome dans son entier, et sur la reprogrammation générale de son expression, à différents niveaux, pour répondre au plus près aux besoins de prélèvement des plantes.

Au niveau agronomique l'étude de la nutrition des cultures s'est faite également élément par élément, essentiellement pour N puis P et K, à partir d'une approche de type bilan et stock basée sur un pronostic de courbe de réponse donnant lieu à des fertilisations souvent excédentaires. Les approches dynamiques plus récentes initiées principalement sur N, couplant « offre du sol » et « demande de la culture » permettent une approche plus efficace de la fertilisation basée sur un diagnostic *in situ* aboutissant à des ajustements plus précis des apports. Une extension de cette approche à P et K permet maintenant d'envisager la nutrition minérale dans sa globalité (interaction multi-éléments) et donc des pratiques de fertilisation plus intégrées et moins génératrices de pollutions.

La séance proposée:

- présentera l'évolution des recherches actuelles dans ce domaine en considérant la nutrition minérale des plantes comme un système tant au niveau biologique qu'agronomique. L'état des connaissances de la biologie de la nutrition des plantes et son intégration / interaction avec les données agronomiques seront présentées (intervenants Gilles Lemaire et Alain Gojon, Montpellier)

- mettra également l'accent sur les interactions entre éléments et leur impact au niveau génomique et agronomique. L'architecture racinaire comme trait phénotypique de la nutrition minérale et comme "nouvelle frontière" de l'amélioration génétique, visant la sélection de génotypes optimisés dans leur prospection du sol sera également évoquée (Hatem Rouached, Montpellier)

EXPOSES

1. Une approche dynamique de la nutrition minérale des plantes pour une fertilisation durable des cultures

Gilles LEMAIRE, Membre de la section 5 de l'Académie d'Agriculture de France

L'approche traditionnelle de la nutrition minérale des cultures par l'Agronomie, basée sur les concepts issus des lois de Liebig (loi dite des facteurs limitant) et de Mistcherlich (loi dite des rendements décroissants) a contribué à une sur-fertilisation généralisée des cultures du fait d'un « pronostic » du besoin des cultures dont le degré élevé d'incertitude a amené les agriculteurs à apporter « trop » d'engrais pour être certain d'en avoir « assez ». Or ce sont ces excès d'apports, liés à l'aversion au risque des agriculteurs, qui ont conduit aux émissions excessives de N et P dans l'environnement qui posent problème aujourd'hui. Une approche plus dynamique de la nutrition azotée des peuplements végétaux a permis de montrer que l'absorption d'azote par les cultures était co-régulée à la fois par la disponibilité de N minéral dans le sol et par la vitesse de croissance potentielle de la plante. Ce rétro-contrôle de l'offre par la demande apparaît comme une « propriété émergente » du peuplement végétal dont la prise en compte explicite a permis de mettre en place une approche de diagnostic de l'état de nutrition N d'une culture s'affranchissant de l'incertitude des pronostics et donc de décider au plus juste des apports correctifs nécessaires en fonction des rendements possibles. Cette approche dynamique basée sur le concept de « dilution de N » permet une analyse plus mécaniste de l'efficacité d'utilisation de N par les cultures montrant ainsi que cette efficacité varie en premier lieu avec la capacité d'accumulation de biomasse par les cultures et donc que les différences d'efficacité entre génotypes doivent être analysées à même biomasse pour avoir un sens. Ce concept de dilution de N a été étendu à P, K et S, il permet ainsi d'étudier les interactions entre éléments dans un cadre de co-limitation et de mettre en œuvre une approche intégrée de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures basée sur la stoechiométrie à la fois de l'offre dans le sol et de la demande dans la plante. Cette nouvelle approche de la nutrition minérale des cultures pose un certain nombre de problèmes fondamentaux à la biologie et la physiologie végétale quant à la réalité biologique des processus élémentaires mis en œuvre et leur contrôle génétique et à son extension pour prendre en compte les micro- et oligo-éléments qui peuvent jouer un rôle de plus en plus prépondérant dans les systèmes de culture.

Quelques références bibliographiques

- (1) LEMAIRE G., SALETTE J., 1984. – Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I - Etude de l'effet du milieu. *Agronomie*, 4(5), 423-430.
- (2) GREENWOOD D.J., LEMAIRE G., GOSSE G., CRUZ P., DRAYCOTT A., NEETESON J.J., 1990. – Decline in %N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Ann. Bot.*, **66**(4), 425-436.

- (3) DEVIENNE-BARET F., JUSTES E., MACHET J.M., MARY, B., 2000. – Integrated control of nitrate uptake by crop growth rate and soil nitrate availability under field conditions. *Ann. Bot.* **86**, 995–1005.
- (4) LEMAIRE G., JEUFFROY M.H., GASTAL F., 2008. – Diagnostic tools for crop and plant N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy* **28**, 614-624.
- (5) GASTAL F., LEMAIRE G., DURAND J.L., LOUARN G., 2014. – Quantifying responses of crop species to N nutrition deficiency and avenues to improving N use efficiency. *In* : V.O. Sadras and D.F. Calderini (eds) "Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy", Academic Press, Oxford, pp 159-206.

2. Physiologie moléculaire de la nutrition azotée des plantes : quels liens entre mécanismes moléculaires et approches agronomiques ?

Alain **GOJON**, INRA, Montpellier

L'optimisation de la fertilisation azotée des cultures est un défi majeur que doit relever l'Agronomie pour promouvoir une agriculture durable. Pour que les intrants azotés soient utilisés efficacement, il faut que leur apport corresponde à la demande nutritionnelle des plantes, elle-même essentiellement conditionnée par leur potentiel de croissance. En effet, si le prélèvement racinaire de N est étroitement dépendant de la disponibilité de cet élément dans le sol, il dépend tout autant du contrôle qu'exerce le statut azoté interne de la plante sur les systèmes racinaires de prélèvement. Ce concept de co-régulation du prélèvement de N par « l'offre » du sol et la « demande » des cultures est largement partagé entre agronomes et physiologistes. En physiologie, la décennie écoulée a vu une explosion des connaissances sur les mécanismes moléculaires assurant cette co-régulation. L'identification des transporteurs racinaires responsables de l'acquisition du N minéral a été menée à bien de manière quasi-exhaustive. Le contrôle de ces transporteurs par la disponibilité externe en N et par la signalisation systémique de la demande en N de la plante entière a été mis en évidence. Enfin, les mécanismes moléculaires de cette signalisation systémique ont été récemment découverts. Ainsi, il est maintenant possible de comprendre comment la croissance de la plante pilote, via un dialogue feuilles-racines, l'efficacité de l'absorption de N. De plus, ces acquis physiologiques apportent un éclairage nouveau sur la relation réciproque, c'est-à-dire le contrôle de la croissance par l'offre du sol en N. On sait maintenant que ce contrôle repose en partie sur la perception directe par la plante de la disponibilité externe de N. Ainsi, avant même que son métabolisme azoté ne soit pénalisé par une disponibilité externe en N insuffisante, la plante a perçu son environnement comme défavorable et freine sa croissance pour ajuster sa demande nutritionnelle à l'offre du sol. Les mécanismes de cette réponse adaptative sont en partie connus : des protéines senseurs de N ont été identifiées, et leur mode d'action sur la croissance en connexion avec les signalisations hormonales commence à être compris. En prenant le prélèvement racinaire de nitrate comme exemple, l'objectif de la présentation sera d'illustrer ces découvertes récentes en les positionnant dans le cadre conceptuel proposé par les agronomes, et de montrer ainsi comment une « fertilisation croisée » entre disciplines peut faciliter l'émergence de nouvelles approches de la fertilisation durable des cultures.

3. Vers une compréhension de la signalisation nutritionnelle combinée chez les plantes

Hatem **ROUACHED**, INRA, Montpellier

La perception de la disponibilité en nutriments du sol par les plantes et la transduction de cette information qui conduit à leur adaptation à cette disponibilité ont été étudiées de manière séparée pour différents éléments nutritifs. Or, l'interaction entre les homéostasies des nutriments est une règle générale plutôt qu'une exception, et des mécanismes actifs existent chez les plantes pour maintenir les rapports stœchiométriques entre éléments minéraux. En effet, plusieurs études agronomiques et physiologiques ont révélé l'existence de fortes relations entre les réponses à différents nutriments, pour l'instant essentiellement lorsqu'ils sont considérés deux par deux (revue, Briat *et al.*, 2015). Ceci est illustré lorsqu'une carence en un élément provoque des modifications dans l'accumulation d'un autre élément. Un exemple caractéristique concerne l'augmentation de la concentration en phosphate (Pi) chez les plantes cultivées dans des conditions de carence en zinc (Zn). Ce n'est que récemment que les bases moléculaires de cette interaction ont été décryptées (Kisko *et al.*, 2018).

Les réponses des plantes à des stress nutritionnels multiples ne se résument pas à la simple addition des réponses aux stress individuels. Par exemple, alors que la carence simple en fer (Fe) diminue l'accumulation de chlorophylle dans les feuilles, la double carence Fe et Pi n'a pas cet effet. Cette interaction Pi/Fe se manifeste également au niveau des racines ; les carences simples en P ou en Fe affectent la croissance des racines primaires, alors que la double carence -P/-Fe ne la modifie pas (Ward *et al.*, 2008). La croissance des racines en condition de carence en P dépend aussi de la disponibilité des autres nutriments tel que l'azote (N) (Medici *et al.*, 2013). Des études de génétique d'association (GWAS) ont permis de mettre en évidence chez les plantes la présence d'architectures génétiques distinctes contrôlant la réponse aux stress simples d'une part et aux stress combinés d'autre part. L'étude de l'effet de stress combinés sur la croissance des plantes a donc révélé une « propriété émergente » qui ne peut pas être détectée en étudiant l'effet de chaque élément pris isolément (Bouain *et al.*, 2018).

L'objectif de la présentation est de faire le point sur nos connaissances actuelles des bases moléculaires qui président à l'intégration des stœchiométries de différents éléments nutritifs minéraux. Les interactions entre Pi, Fe et Zn seront prises comme exemples pour illustrer l'effet des interactions macro- et micro-nutriments sur la croissance des plantes et l'homéostasie ionique. Comprendre les mécanismes à l'œuvre dans le contrôle de ces interactions entre les ions devrait permettre l'élaboration de stratégies d'amélioration de la productivité des cultures, en augmentant l'efficacité d'utilisation des nutriments.

Quelques références bibliographiques

- (1) Briat JF, Rouached H, Tissot N, Gaymard F, Dubos C. 2015. – Integration of P, S, Fe, and Zn nutrition signals in *Arabidopsis thaliana*: potential involvement of PHOSPHATE STARVATION RESPONSE 1 (PHR1). *Front Plant Sci.* 28;6:290.
- (2) Bouain N., Korte A., Satbhai S.B., Saenchai C., Busch W., Rhee SY., Rouached H. 2018. – Genetic Architecture Underlying Root Growth Rate in Plants. *BioRxiv*
- (3) Kisko M, Bouain N, Safi A, Medici A, Akkers RC, Secco D, Fouret G, Krouk G, Aarts MGM, Busch W, Rouached H. 2018. – LPCAT controls phosphate homeostasis in a zinc-dependent manner. *eLIFE* 7, e32077.
- (4) Medici A, Marshall-Colon A, Ronzier E, Szponarski W, Wang R, Gojon A, Crawford N M, Ruffel S, Coruzzi G M, Krouk G. 2015. – AtNIGT1/HRS1 integrates nitrate and phosphate signals at the *Arabidopsis* root tip. *Nature communications*, 6, 6274.

- (5) Ward JT, Lahner B, Yakubova E, Salt DE, Raghothama KG. 2008. – The effect of iron on the primary root elongation of Arabidopsis during phosphate deficiency. Plant Physiol. 147(3):1181-91.

CONCLUSION

Jean-François **MOROT GAUDRY**. Membre de la section 6 de l'Académie d'Agriculture de France

ADRESSES ET CONTACT DES NON ACADEMICIENS

Alain **GOJON** (Chercheur INRA).

Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes. Campus INRA / Supagro. Bâtiment 7, 2 place Pierre Viala – 34060 MONTPELLIER cedex 2.

alain.gojon@inra.fr

<https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/presentation-3/bpmp-en-bref/>

HATEM **ROUACHED** (Chercheur INRA).

Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes. Campus INRA / Supagro. Bâtiment 7, 2 place Pierre Viala – 34060 MONTPELLIER cedex 2.

hatem.rouached@inra.fr

<https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/presentation-3/bpmp-en-bref/>