

**Séance académique co-organisée par les sections 5 et 1**

**POURQUOI ET COMMENT AMÉLIORER L'EFFICIENCE D'UTILISATION DES  
RESSOURCES NUTRITIONNELLES DU SOL PAR LES CULTURES ?**

*Date : 18 janvier 2023*

*Organisateurs : Jean-François BRIAT et Gilles LEMAIRE (section 5),  
et Michel DRON (section 1)*

---

**Contexte et objectif de la séance :**

Au cours des dernières décennies, un succès indéniable a été obtenu dans la production agricole mondiale. Ces progrès ont été principalement réalisés par la conjonction :

- (i) de l'utilisation d'une plus grande quantité de ressources externes telles que l'azote (N), mais aussi d'autres minéraux (P, K), et de l'irrigation (eau) ;
- (ii) la progression de la sélection en capacité de rendement maximale ( $Y_{max}$ ) des géotypes lorsque toutes les ressources externes sont fournies en quantité non limitative.

**Cependant, cette approche montre ses limites depuis quelques années, et l'augmentation des rendements stagne si l'apport d'intrants n'est pas augmenté, induisant des problèmes environnementaux liés à l'usage massif de ces ressources externes.**

Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des nutriments est essentielle pour rendre l'utilisation des intrants plus efficace et atteindre de manière plus durable les objectifs de sécurité alimentaire.

Les perspectives futures d'amélioration des cultures pour l'acquisition des ressources devraient donc se concentrer sur :

- i) une exploration plus efficace des ressources du sol (N, P, autres minéraux et eau) par le système racinaire, en se concentrant sur son architecture ;
- ii) une capacité des plantes à interférer plus efficacement avec le microbiome du sol pour augmenter les ressources minérales disponibles au niveau de la rhizosphère ;
- iii) une amélioration des caractéristiques des plantes impliquées dans la capacité globale d'absorption des nutriments et de l'eau lorsque ces ressources sont en quantité limitées dans les sols.

Ainsi, la sélection de traits racinaires convergents devrait être entreprise pour une amélioration de la capacité des plantes à rechercher, extraire et utiliser plus efficacement toutes les ressources endogènes du sol (eau, N, P, K et autres minéraux) de manière plus synergique. Pour atteindre ces objectifs, une nouvelle révolution doit être engagée pour recentrer la sélection sur l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des ressources plutôt que sur l'utilisation de concepts anciens tels que l'efficacité de l'eau ou de l'azote qui étaient essentiellement basés sur la réponse des cultures à des apports exogènes.

### **Déroulement de la séance :**

#### **1- Introduction** (Gilles LEMAIRE. Directeur de Recherche Honoraire INRAe. Membre de l'Académie d'Agriculture, section 5)

Nos connaissances de la nutrition minérale des plantes et l'utilisation des engrais minéraux, couplées avec le progrès génétique, ont permis d'augmenter d'un facteur 2 à 3 le rendement des principales espèces cultivées entre 1950 et 2000 (Tilman, 2002), mais avec une utilisation accrue d'un facteur 4 à 7 d'engrais minéraux. Cette faible efficacité de la fertilisation entraîne des impacts environnementaux graves et nécessite donc de réinterroger le progrès « agronomie-génétique » basé sur la réponse des cultures à des apports de ressources minérales externes tel qu'il a été pratiqué ces 50 dernières années.

Dans une première partie, l'approche classique visant à obtenir une augmentation de la réponse des cultures aux apports d'engrais sera remise en cause. Une approche cherchant à améliorer la capacité des cultures à mieux exploiter les ressources endogènes minérales et hydriques du sol, permettant ainsi de réduire les apports exogènes de fertilisants, sera présentée.

Dans une deuxième partie, le progrès récent des connaissances physiologiques et moléculaires des mécanismes d'adaptation des systèmes racinaires contrôlant les capacités de prélèvement des minéraux dans les sols sera expliqué.

Une troisième partie abordera, à partir d'exemples provenant de travaux sur le blé et le maïs, comment la sélection variétale peut prendre en compte ces critères pour une amélioration des performances agronomiques et environnementales des cultures.

Enfin une conclusion permettra de dégager les perspectives pour les recherches futures.

TILMAN, D., CASSMAN K.G., MATSON, P.A., NAYLOR, R., POLASKY, S., 2002.  
Agriculture sustainability and intensive production practices. *Nature* 418(6898):671–677

#### **2- Point de vue des "Agronomes" : D'une approche de l'efficience de la réponse des cultures aux apports d'engrais... à une approche de la capacité des cultures à produire avec le moins d'engrais possible ?** (Gilles LEMAIRE. Directeur de Recherche Honoraire INRAe. Membre de l'Académie d'Agriculture, section 5)

La fertilisation minérale des cultures a été basée sur une approche linéaire de leurs réponses aux apports d'engrais. L'analyse des courbes de réponse « doses-rendements » permettait de déterminer l'apport optimal pour atteindre, en conditions non limitantes, le rendement potentiel ( $Y_{max}$ ). En dehors de ses fortes incertitudes qui ont incité à des sur-fertilisations d'assurance, cette approche était entachée par trois erreurs fondamentales:

- (i) *La demande en N, P, K... des cultures augmente proportionnellement avec leur niveau de production.* Or ceci s'est avéré faux puisque la teneur de ces éléments dans les plantes diminue lorsque la biomasse de la culture augmente conformément aux lois de dilution (Lemaire et al. 2019, Briat et al. 2020).
- (ii) *L'offre du sol en N, P, K...est considérée comme un « facteur externe » à la plante.* Or la disponibilité de ces éléments étant directement contrôlée par la capacité de croissance de la plante elle-même (Briat et al. 2020) il n'y a pas d'indépendance entre offre et demande.

- (iii) *La disponibilité de chacun des éléments dépend aussi de la disponibilité des autres éléments, il y a donc co-limitation entre éléments ce qui rend les approches élément par élément peu pertinentes.*

Ainsi une approche plus systémique du système « plante-sol-microbiome du sol » permet de revisiter le concept d'efficacité d'utilisation de l'azote, et des autres minéraux, d'une manière plus dynamique et plus intégrative. L'approche classique consistait en réalité à optimiser la réponse des cultures aux apports exogènes d'engrais à travers la notion d'efficacité de N ou de P...qui mesure en fait l'augmentation de rendement (dY) obtenue par unité d'augmentation d'apport (dN ou dP). Or, sachant que l'augmentation du potentiel génétique  $Y_{max}$ , engendre une augmentation de la demande en N, P, K des cultures, ceci implique *de facto* une augmentation correspondante des apports d'engrais... et donc des risques de pollution afférents. Le concept d'efficacité basée sur la réponse aux apports n'est donc pas la bonne métrique pour estimer les performances agronomiques et environnementales des cultures. Une autre approche est proposée qui consiste à cibler non pas la *réponse* des cultures aux apports d'engrais, mais plutôt leur *non-réponse*. Pour cela, il importe d'augmenter la capacité des plantes à explorer les ressources du sol et intervenir dans les interactions rhizosphériques afin d'améliorer la disponibilité des ressources minérales pour satisfaire la demande des plantes, réduisant du même coup les besoins en apports exogènes (Ciampitti et al. 2022). Enfin il est montré que ce progrès génétique concerne aussi la ressource en eau du sol qui conditionne en grande partie la disponibilité de la ressource minérale pour la plante (Kunrath et al. 2020).

Une approche plus intégrative de la fertilisation minérale, basée sur un diagnostic *in situ* de l'état nutritionnel des cultures, ainsi qu'une analyse plus fonctionnelle des interactions génotype-milieu est proposée.

## Bibliographie

- 1) BRIAT, J.F., GOJON, A., ROUACHED, H., PLASSARD, C., LEMAIRE, G., 2020 Reappraisal of the concept of nutrient availability for plants in soils at the light of the recent molecular physiology advances. *European Journal of Agronomy*, 116 (doi.org/10.1016/j.eja.2020.126069).
- 2) CIAMPITTI, I.A., BRIAT, J-F., GASTAL, F., LEMAIRE, G., 2022. Comment. Re-defining Crop Breeding Strategy for Effective use of Nitrogen Use Efficiency in Cropping Systems. *Nature communication Biology* (accepted).
- 3) LEMAIRE, G., SINCLAIR, T., SADRAS, V.O., BELANGER, G., 2019. Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping: A review. *Agronomie for Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0570-6>.
- 4) LEMAIRE, G., TANG, L., BELANGER, G., ZHU, Y., JEUFFROY, M-H., 2021. Forward: New paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture. *European Journal of Agronomy*, 125, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126248>.
- 5) KUNRATH, T., LEMAIRE, G., TEXEIRA, E, BROWN, H., CIAMPITTI, I., SADRAS, V.O., 2020. Allometric relationships between nitrogen uptake and transpiration to untangle interactions between nitrogen supply and drought in maize and sorghum. *European Journal of Agronomy*. 113. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126145>.

**3- Point de vue des "Biologistes" : Adaptation de l'architecture racinaire aux contraintes nutritionnelles du sol : identification des mécanismes et exploitation de la variabilité génétique** (Alain GOJON. Directeur de Recherche INRAe. Institut des Sciences des Plantes de Montpellier).

Les défis associés à la sécurité alimentaire, à la préservation de l'environnement et à l'adaptation au changement climatique induisent une demande très forte pour des cultures toujours plus productives, mais moins exigeantes en intrants et plus résistantes aux stress environnementaux. A cette fin, une des stratégies explorées par les biologistes végétaux est l'élaboration de génotypes disposant d'un système racinaire plus développé, avec une architecture optimisée, pour mieux exploiter les ressources du milieu et mieux résister aux fluctuations de ces ressources (Lynch 2022). Le postulat est que l'utilisation de tels génotypes pourrait à la fois favoriser le stockage du carbone dans les sols, et améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais et de l'eau en augmentant la surface d'échange avec le sol et le volume de sol exploré par les racines.

La connaissance des mécanismes impliqués dans le contrôle du développement racinaire a beaucoup progressé chez de nombreuses espèces, y compris celles de grandes cultures. La plasticité impressionnante de l'architecture racinaire en réponse aux contraintes nutritionnelles est maintenant bien caractérisée (Giehl et von Wirén 2014). De nombreux gènes régulateurs ont été identifiés, et le rôle central des signalisations hormonales (auxine notamment) a été abondamment documenté. Une approche qui se renforce est celle exploitant la variabilité génétique naturelle des mécanismes du développement racinaire, qui peut fournir des outils précieux aux sélectionneurs.

La présentation décrira rapidement l'état de l'art sur les mécanismes gouvernant les réponses développementales du système racinaire aux contraintes nutritionnelles. Elle détaillera plus particulièrement les avancées récentes sur l'exploitation de la variabilité génétique naturelle, notamment en ce qui concerne la profondeur d'enracinement, qui constitue un trait racinaire important à la fois pour l'efficacité du prélèvement de l'eau et de l'azote, et pour le stockage du carbone dans le sol (Lynch 2013, Poirier et al. 2018). Un problème crucial reste à traiter, qui concerne la difficulté d'étude du système racinaire au champ, et la validité des acquis réalisés en laboratoire vis-à-vis des performances des plantes cultivées en conditions agronomiques.

## Bibliographie

- 1) Giehl RFH, von Wirén N. 2014. Root nutrient foraging. *Plant Physiology* 166: 509-517.
- 2) Lynch JP. 2013. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals of Botany* 112: 347-357.
- 3) Lynch JP. 2022. Harnessing root architecture to address global challenges. *Plant Journal* 109: 415-431.
- 4) Poirier V, Roumet C, Munson AD. 2018. The root of the matter : Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry* 120: 246-259.

**4- Point de vue des "Améliorateurs" : Efficacité d'utilisation de l'azote par le blé tendre : variabilité et progrès génétiques.** (Jacques Le GOUIS. Directeur de recherche INRAE. *Génétique, Diversité et Ecophysiologie des Céréales Clermont-Ferrand*).

Environ 20 % des engrais azotés utilisés pour les cultures arables sont appliqués sur le blé. Ils représentent un coût croissant pour les agriculteurs, car leur prix est lié aux combustibles fossiles nécessaires à leur fabrication et à leur application. Ils ont également un impact important sur l'environnement. S'ils ne sont pas absorbés, ils peuvent entraîner une pollution par les nitrates dans les nappes phréatiques et les rivières. En outre, le protoxyde d'azote, un gaz à effet de serre dont l'impact par unité de poids est environ 300 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone, peut être libéré par les bactéries du sol qui utilisent le nitrate comme

source d'oxygène. Dans ce contexte, la sélection de variétés qui utilisent l'azote de manière plus efficace, à la fois pour produire un rendement en grain et une concentration en protéines élevés, devient un objectif important pour les obtenteurs (Cormier et al 2016).

L'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) peut être définie comme le rendement en grain par unité d'azote disponible pour la culture, provenant du sol et des engrais (Moll et al 1982). La NUE est souvent divisée en deux composantes principales, l'efficacité d'absorption et l'efficacité de conversion, définie comme le rendement par unité d'azote absorbée par la culture. La NUE et les protéines du grain doivent être considérées en même temps car la concentration et la composition des protéines sont des déterminants majeurs de la qualité du grain en panification. Il est par contre difficile d'améliorer ces deux caractères simultanément en raison de la corrélation négative connue de longue date entre le rendement en grain et la concentration en protéines. Monaghan et al (2001) ont ainsi proposé d'utiliser les résidus de cette régression comme critère de sélection qu'ils ont nommé GPD (Grain Protein Deviation).

Plusieurs études ont montré qu'il existait une variabilité génétique significative pour la NUE, ses deux principales composantes et le GPD. Ce sont tous des traits polygéniques complexes sujets à des interactions génotype  $\times$  environnement fortes, notamment dépendantes du statut azoté de la plante. C'est ainsi qu'il a été proposé d'utiliser l'indice de nutrition azoté (INN) pour mieux comprendre la diversité génétique et l'influence de l'environnement (Ciampitti et Lemaire 2022). Nous allons rendre compte ici des études réalisées pour quantifier la variabilité génétique et estimer le progrès génétique de ces différents caractères chez le blé (Cormier et al 2014).

## Bibliographie

- 1) Ciampitti IA, Lemaire G (2022) From use efficiency to effective use of nitrogen: A dilemma for maize breeding improvement. *Science of the Total Environment* 826:154125.
- 2) Cormier F, Faure S, Dubreuil P, Heumez E, Beauchêne K, Lafarge S, Praud S, Le Gouis J (2013) A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theoretical and Applied Genetics* 126:3035-3048.
- 3) Cormier F, Foulkes J, Hirel B, Gouache D, Moenne-Locco Y, Le Gouis J (2016) Breeding for increased nitrogen-use efficiency: a review for wheat (*T. aestivum* L.). *Plant Breeding* 135:255-278.
- 4) Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA (1982) Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron J* 74:562-564.
- 5) Monaghan JM, Snape JW, Chojecki AJS, Kettlewell PS (2001) The use of grain protein deviation for identifying wheat cultivars with high protein concentration and yield. *Euphytica* 122:309-317.

## 5- Questions / réponses avec la salle

**6- Synthèse et Conclusion** (Jean-François BRIAT. Directeur de recherche honoraire CNRS. Membre de l'Académie d'Agriculture, section 5)