

CONCLUSION

par Jean-François **MOROT-GAUDRY**¹

En introduction **Jean-François Briat** a dévoilé les grandes lignes de cette séance sur les « **approches systémiques de la nutrition minérale des plantes en biologie et agronomie** ». Il a souligné les limites des études antérieures conduites dans ce domaine par les agronomes et les physiologistes et présenté les résultats de recherches acquis ces dernières années suite à l'introduction des approches génétiques et moléculaires. Il est possible désormais d'appréhender le complexe sol/plante dans ces mécanismes de prélèvement et de distribution des éléments minéraux pris dans leur ensemble *in planta*. JF Briat a insisté sur la nécessité de considérer la nutrition des plantes dans une vision « globale « multi-éléments » en considérant le génome des plantes dans son entier et dans sa capacité de reprogrammation à différents niveaux au cours des différents événements du prélèvement des éléments minéraux. Les réponses des plantes à leur environnement nutritionnel fluctuant doivent dorénavant être étudiées en considérant que cet environnement est un tout intégrant les différents paramètres le composant, paramètres qui jusqu'alors étaient considérés indépendamment. JF Briat a terminé son exposé en présentant les orateurs et les thèmes qu'ils ont abordé tant au niveau agronomique qu'au niveau biologique.

Au cours de cette séance **Gilles Lemaire** a fait part de résultats de travaux d'une longue recherche en agronomie concernant **une approche dynamique de la nutrition minérale des plantes pour une fertilisation durable des cultures**, soulignant les **applications agronomiques** dont on peut d'ores et déjà bénéficier. La leçon que tire G. Lemaire de ces recherches est que « *trop longtemps, le concept de disponibilité des éléments dans le sol a été considéré comme "externe" à la plante et donc comme pouvant être étudié par une approche purement linéaire de type "dose-réponse". Les approches récentes montrent que le prélèvement racinaire de l'azote est non seulement dépendant des réserves du sol mais surtout est contrôlé par la croissance de la plante entière au niveau des systèmes d'absorption racinaire. Ce qui fait de la plante un acteur incontournable de la disponibilité des éléments minéraux.*

Constatant que la demande de la plante en azote semble être étroitement liée à son potentiel de croissance G. Lemaire a proposé une nouvelle approche plus dynamique basée sur le concept de « dilution de l'azote » qui permet de mieux comprendre l'efficacité de l'utilisation de cet élément par les cultures. Cette approche plus mécaniste montre que

¹ Membre de l'Académie d'agriculture de France, Directeur de recherche honoraire de l'INRA.

[Tapez ici]

Copyright Académie d'agriculture de France, 2019.

l'efficacité de l'assimilation de l'azote varie avec la capacité d'accumulation de biomasse, ce qui conduit à mener parallèlement des études de biomasse lors de la comparaison de différents géotypes. Il est possible ainsi de mettre en œuvre une « approche diagnostic » de l'état de l'efficacité d'assimilation de l'azote d'une culture, approche plus sûre que celle donnée par une « approche pronostic ». Enfin ce type d'approche couplant « offre du sol » et « demande de la culture » a été étendue à tous les éléments minéraux du sol. G. Lemaire a observé enfin que le prélèvement de l'azote est la résultante d'un réseau d'échange d'informations entre la plante et son milieu donnant au système des propriétés hautement auto-adaptatives.

Parallèlement à ces évolutions agronomiques, il y a eu ces vingt-cinq dernières années **explosion des connaissances de la biologie de la nutrition des plantes** : découverte et caractérisation moléculaire et cellulaire des transporteurs de N, P, K, S, Fe, Mn, etc., intégration de leurs fonctions dans la plante entière, caractérisation des régulations de leur activité et de l'expression des gènes qui les codent. 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 eu souvent le défaut d'être partielles négligeant l'impact de la nutrition minérale « multi-éléments » comme déjà signalé par JF Briat.

Spécialiste des approches globales de la nutrition des plantes, **Alain Gojon** a mis l'accent dans le cas de l'azote sur les liens qui peuvent être établis entre les mécanismes moléculaires récemment mis en évidence et les concepts qui ont émergé des approches plus globales de type physiologique et agronomique. D'une part, l'élucidation des mécanismes de signalisation entre feuilles et racines permet de comprendre comment le prélèvement racinaire de nitrate est piloté par la « demande en azote » de la plante. D'autre part, l'identification de protéines racinaires « senseurs » de nitrate associées aux signalisations hormonales a révélé que la perception que la plante a de la richesse minérale du sol est un déterminant important de la croissance. Ainsi, avant même que son métabolisme azoté ne soit perturbé par une pénurie d'azote du sol, la plante est capable de percevoir cette pénurie et d'ajuster sa demande à la disponibilité de cet élément dans le milieu. A. Gojon a finalement mentionné un paradoxe pour le moment inexplicable : alors que la photosynthèse stimule le prélèvement racinaire d'azote, la culture des espèces C3 sous atmosphère enrichie en CO₂ s'accompagne d'une dégradation de leur statut nutritionnel en azote et en de nombreux autres minéraux. Ces découvertes récentes apportent un éclairage nouveau sur la fonction de nutrition, étroitement contrôlée par un dialogue moléculaire très performant entre les différents compartiments racinaires et foliaires de la plante en relation avec la disponibilité de l'azote du sol.

A. Gojon a donné ensuite une vision très claire des mécanismes moléculaires complexes qui régulent les interactions entre la plante et le sol, permettant à cette dernière de s'adapter aux conditions de milieu en évitant les excès ou les carences en azote. Les protéines senseurs d'azote ont été identifiées, la détermination et la compréhension de leur mode d'action sur la croissance ont été montrées être en connexion avec les signalisations hormonales. A. Gojon a fait remarquer que certains transporteurs d'azote peuvent

[Tapez ici]

également présenter des capacités de senseur d'azote et peuvent aussi transporter des hormones comme l'auxine. Ces découvertes récentes apportent un éclairage nouveau sur la fonction de nutrition, manifestant un dialogue moléculaire très performant entre les différents compartiments racinaires et foliaires de la plante en relation avec la disponibilité de l'azote du sol.

Enfin, **Hatem Rouached**, étudiant les bases moléculaires et génétiques des interactions entre éléments minéraux *in planta*, a cherché à comprendre **la signalisation nutritionnelle chez les plantes**. Il a établi que **l'architecture racinaire pouvait être considérée comme trait phénotypique de la nutrition minérale et comme "nouvelle frontière" de l'amélioration génétique**. Ceci en vue d'une sélection de génotypes optimisés dans leur prospection du sol. Ceci amène à une compréhension de « **la signalisation nutritionnelle combinée** » chez les plantes. Le système sol-plante est un système indissociable qui est doté d'une forte capacité d'autoadaptation dont les propriétés émergentes disparaissent dès qu'on l'étudie par "fractions". H. Rouached a illustré clairement les réponses à différents éléments, phosphate et zinc, en montrant par exemple qu'une carence en zinc provoque une accumulation de phosphate. Il a observé également que la carence en fer se manifeste par une carence en chlorophylles dans les feuilles alors qu'une double carence en fer et phosphate n'a pas d'effet sur la teneur en chlorophylles. D'où la nécessité de réaliser des approches multi-éléments. H. Rouached a terminé son exposé en décrivant toutes les voies moléculaires très complexes connues de signalisation impliquées dans ces mécanismes d'interactions entre éléments minéraux lors de leur prélèvement par la plante.

Il existe également un domaine de recherche en nutrition des plantes qui a bénéficié ces dernières années des avancées extraordinaires de la biologie moléculaire et de la génomique. Il concerne les bactéries fixatrices d'azote (cas des légumineuses ou fabacées) et les mycorhizes qui, vivant en **symbiose** avec le système racinaire des plantes, jouent un rôle très important dans l'assimilation des éléments minéraux (grandes cultures et forêts). Ce dernier aspect qui implique les relations des plantes avec leur environnement biologique devrait faire l'objet d'une séance académique.

Toutes ces approches nécessitent des perspectives et des besoins de recherche sur les interactions entre éléments minéraux et leur impact au niveau génomique et agronomique. Une approche « biologie des systèmes » est indispensable, d'où la **nécessité de l'interdisciplinarité dans la recherche**. Déjà en 1923, Jean Perrin constatait que les chercheurs de différents domaines d'étude étaient hermétiquement cloisonnés entre mathématiciens, physiciens chimistes et biologistes, travaillant chacun dans leur coin sans interactions. A la suite de ces observations, Jean Perrin et le Baron de Rothschild créèrent à Paris un Institut d'avant-garde, toujours existant, l'Institut de biologie physicochimique (IBPC) réunissant des scientifiques de différentes disciplines sous un même toit pour étudier les bases physicochimiques de la vie.

En conclusion, on peut dire qu'une réévaluation du concept de "disponibilité des nutriments du sol" pour les plantes selon les connaissances récentes en physiologie moléculaire est nécessaire pour **développer une agronomie qui assure, sur moins de terres**

[Tapez ici]

cultivables, avec moins d'intrants, suffisamment de productions agricoles, tout en respectant l'environnement (par exemple développer une « approche diagnostique » pour éviter les surplus d'engrais) dans un système en perpétuelle évolution, d'où la nécessité de tenir compte des interactions environnement, géotypes et itinéraires techniques. Dans les années à venir la recherche fondamentale apportera encore de nombreuses données sur les mécanismes intimes de prélèvement des minéraux par les plantes qui permettront d'optimiser leur application dans de nouvelles conditions climatiques.