

Comment les minéraux sont-ils assimilés et transportés dans les racines ?

FICHE **QUESTIONS SUR...** n° 06.02.Q07

Mots clés : nutrition minérale - système racinaire - transport ion racine

Le prélèvement et le transport des ions minéraux par les tissus racinaires des plantes sont des fonctions qui leur assurent une provision d'éléments minéraux : nitrates, phosphates, sulfates, potassium, calcium, magnésium, fer, etc. Ces éléments sont nécessaires à leur croissance et à leur développement.

Les mécanismes biologiques requis pour ces fonctions sont donc essentiels à la production et à la qualité des produits végétaux qui constituent la base de la nutrition animale et humaine.

Leur compréhension est un préalable à toute amélioration de la fertilisation minérale des cultures.

Les racines

Les racines ancrent le végétal à son substrat et assurent l'alimentation des plantes en eau et en éléments nutritifs minéraux. Dans les champs, les racines forment un enchevêtrement très dense ; d'une manière générale, suivant le type de plante, de sol, de conditions environnementales et de culture, ce sont entre 20 000 et 100 000 kilomètres de racines qui cheminent sous un hectare de sol. Ces grandes étendues racinaires sont équipées de systèmes d'absorption et de transport très performants, ce qui explique que, malgré les faibles concentrations des ions dans la solution du sol, l'acquisition des nutriments minéraux par les plantes est un processus très efficace. Par ailleurs, les racines peuvent aussi améliorer leurs performances d'exploration du sol en s'associant à des organismes du sol comme les bactéries (Rhizobiacées) et les champignons (Mycorhizes) connus pour améliorer grandement le prélèvement du phosphore et de l'azote¹

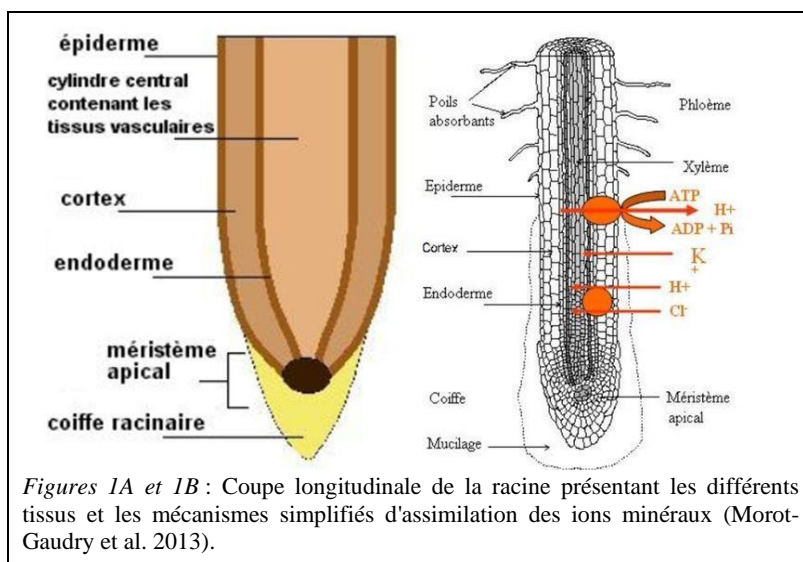
Structures tissulaires des racines

Les racines se caractérisent par une structure tissulaire concentrique et caractéristique (*Figure 1*). Du centre à l'extérieur, elle comprend :

- le cylindre central ou stèle, entouré par le péricycle (non représenté) collé à l'endoderme ; il contient les tissus conducteurs, xylème (sève brute qui contient des ions minéraux en solution dans l'eau) et phloème (sève élaborée qui contient également des molécules organiques issues de la photosynthèse) ;
- l'endoderme qui sépare le cylindre central du cortex ;
- le cortex ou parenchyme cortical ;
- l'épiderme ou rhizoderme.

La pointe de la racine se termine par une coiffe entourée de mucilage.

La surface de contact des racines avec le sol peut être très significativement augmentée par la différenciation de poils absorbants, des structures unicellulaires de 6 à 8 mm de longueur sur 10 à 15



Figures 1A et 1B : Coupe longitudinale de la racine présentant les différents tissus et les mécanismes simplifiés d'assimilation des ions minéraux (Morot-Gaudry et al. 2013).

¹ Points non développés dans cette fiche.

microns d'épaisseur ; ces structures très denses (500 à 2 000 par cm^2) jouent un rôle crucial dans le prélèvement des sels minéraux.

Structures cellulaires des tissus racinaires

Les cellules végétales présentent un contenu cellulaire liquide, le cytosol, entouré par le plasmalemme, fine membrane constituée essentiellement de lipides et de protéines. Le cytosol contient des mitochondries (micro-organites nécessaires à la respiration), une très grosse vacuole (organe de stockage des minéraux par exemple), et un noyau avec tout l'équipement génétique nécessaire à la reproduction.

Le cytosol, avec son équipement cellulaire, est souvent appelé cytoplasme.

Enfin, à la différence des cellules animales, une paroi pectocellulosique recouvre l'ensemble cellulaire, ce qui – faute de squelette – assure une certaine rigidité et limite le gonflement des cellules sous l'effet des variations de la pression osmotique.

Voies de transport des ions minéraux dans les racines

Les ions en solution dans la sève brute peuvent diffuser librement, *via* les tissus vivants non spécialisés, sans système circulatoire, en empruntant deux types de voies :

- les voies formées par le continuum de parois cellulaires au sein des tissus (voies apoplastiques) ;
- les voies empruntant les continuités cytoplasmiques ménagées entre les cellules *via* les plasmodesmes, sorte de ponts cytosoliques entre les cellules d'un même tissu (voies symplastiques).

Dans ces deux cas, le mouvement des ions se fait essentiellement par diffusion selon leur gradient de concentration (*Figure 2*).

À l'issue de leur transport radial dans la racine, après avoir franchi la barrière endodermique, les ions sont sécrétés dans l'apoplasme de la stèle, puis diffusent dans les vaisseaux du xylème pour être entraînés par le flux de sève et être distribués à tous les organes aériens de la plante.

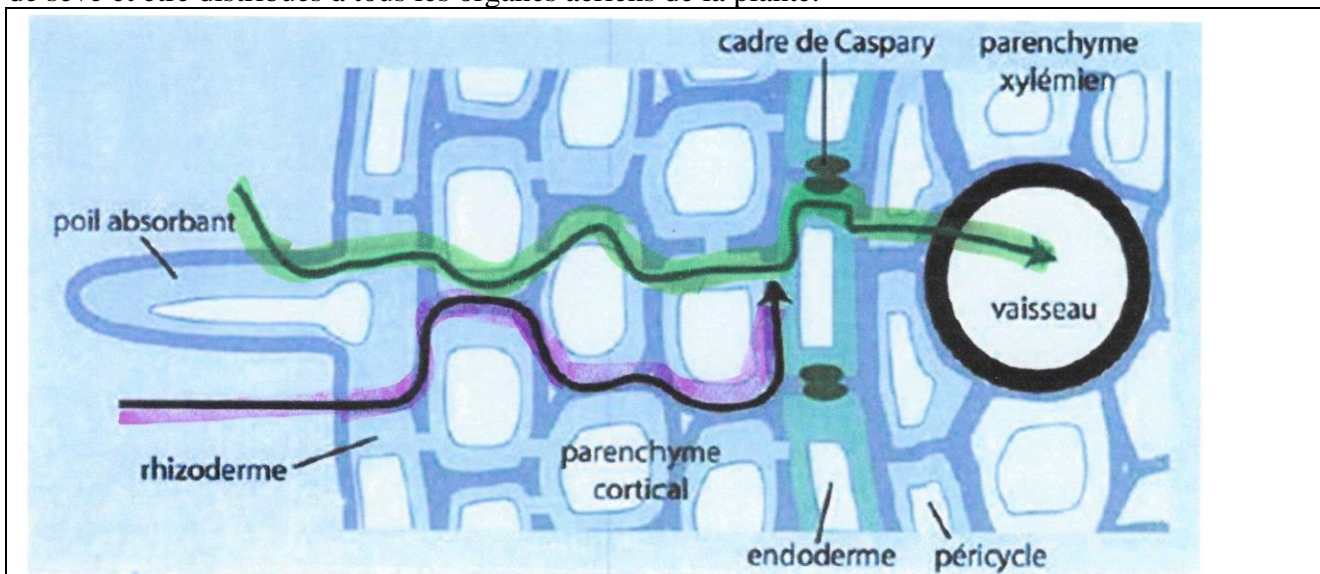


Figure 2 : Trajet de l'eau du poil absorbant à l'endoderme de la racine, en passant de cellule en cellule par les plasmodesmes, voie symplastique (flèche surlignée en vert, haut de la figure), et en passant par les parois et les espaces intercellulaires, voie apoplastique (flèche noire surlignée en mauve, bas de la figure) (Morot-Gaudry & al. 2017).

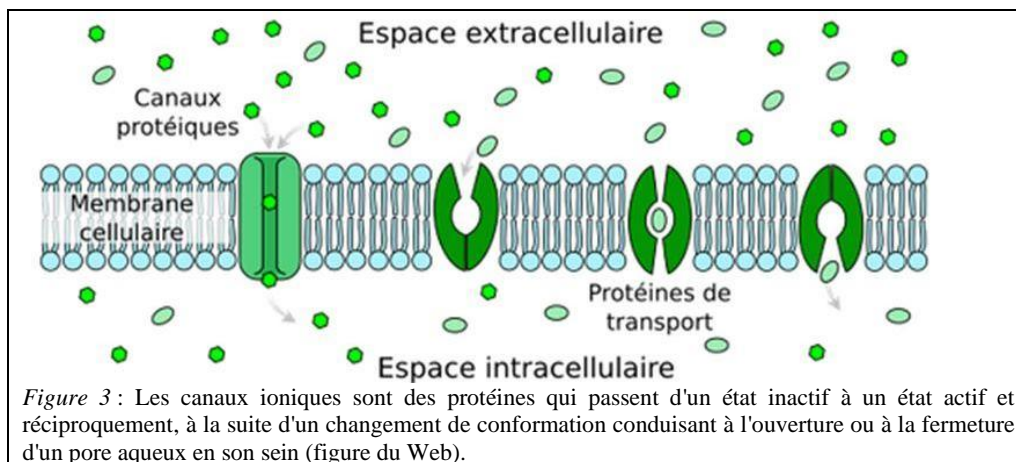
Les transporteurs de minéraux des membranes cellulaires

Du fait de leurs charges électriques, les ions ne peuvent pas diffuser facilement au travers de la membrane enveloppant la cellule, de la membrane plasmique ou plasmalemme, et de la membrane enveloppant la vacuole (le tonoplaste). Ces membranes sont constituées essentiellement de lipides hydrophobes ralentissant fortement tout passage d'ions ; toutefois, on observe dans les membranes des tissus biologiques la présence de transporteurs d'ions de structure protéique qui assurent, suite à un changement conformationnel, un transfert d'ions à travers ces membranes. Dans ce cas, le transport est déterminé par le gradient de concentration (les ions ont tendance à diffuser du milieu le plus concentré vers le moins concentré) et par le gradient électrique (l'intérieur de la cellule est en général chargé négativement, ce qui attire les cations mais repousse les anions). La combinaison de ces deux gradients est mesurée par le

potentiel électrochimique, qui est une grandeur thermodynamique exprimée en joules par mole, équivalente au potentiel chimique mais tenant compte des espèces électriquement chargées.

On distingue deux types de transport d'ions minéraux dans les membranes biologiques :

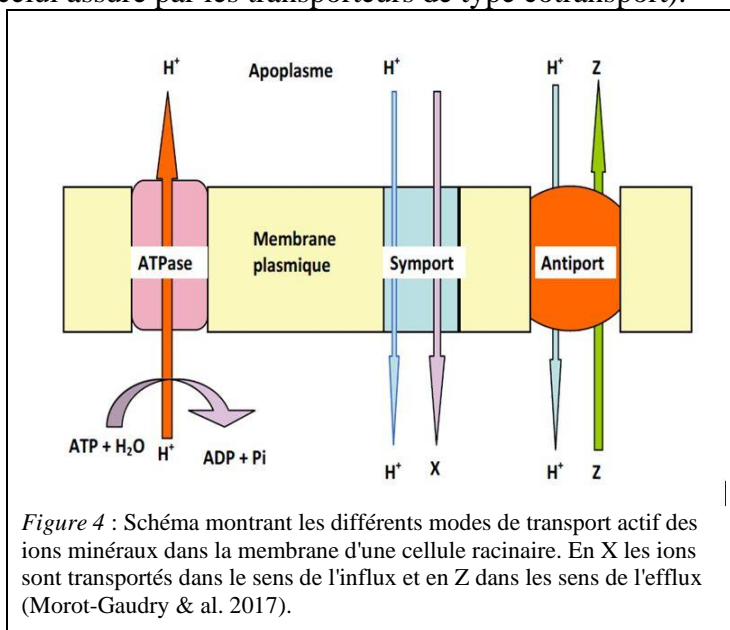
- le transport passif, qui se fait dans le sens du gradient électrochimique (thermodynamiquement favorable),
- le transport actif, qui se fait contre le gradient électrochimique et nécessite donc une fourniture d'énergie.



Le transport passif s'effectue essentiellement *via* des canaux ioniques, qui sont des protéines capables de changer de conformation et d'osciller entre des états fermés et ouverts (Figure 3). Tant qu'ils sont ouverts, ces canaux permettent le passage d'un flux continu et important d'ions spécifiques, tels potassium K^+ , chlore Cl^- , nitrate NO_3^- (flux 1 000 fois plus important que celui assuré par les transporteurs de type cotransport).

Le transport actif s'effectue grâce à des protéines transporteurs, capables de changer également de conformation mais qui nécessitent à chaque cycle de transport un apport énergétique, obtenu le plus souvent grâce au transport couplé de protons (H^+).

Les membranes des cellules racinaires contiennent des pompes ioniques ATPases de type enzymatique, qui hydrolysent les liaisons phosphates de molécules riches en énergie comme l'adénosine triphosphate (ATP) pour excréter des ions H^+ contre leur gradient de potentiel électrochimique (Figure 4). Les transporteurs couplent alors le transport des autres ions (NO_3^- , K^+ , etc.) à la réentrée des ions H^+ . Ils utilisent ainsi l'énergie libérée par le transport des ions H^+ dans le sens de leur gradient électrochimique, pour activer le transport d'autres ions contre le sens de leur gradient électrochimique (Figure 4). Le transport de ces ions peut se faire soit dans le même sens que celui des ions H^+ (symport), soit dans le sens opposé (antiport).



Ce qu'il faut retenir :
 Grâce aux approches de physiologie et de génomique, les connaissances sur les mécanismes d'absorption des ions minéraux par les racines ont fortement progressé. Les gènes impliqués dans ces fonctions racinaires ont été identifiés. Ceci devrait rendre possible, *via* des programmes de sélection de certains traits racinaires, l'émergence de variétés améliorées dans leurs capacités de prélèvement des ressources minérales du sol, en particulier dans des environnements limités en ressources nutritives.
 La sélection de telles variétés devrait permettre de maintenir un niveau de rendement satisfaisant, tout en diminuant l'apport d'engrais minéraux, source de pollutions environnementales.

Pour en savoir plus :

- Jean-François MOROT-GAUDRY & al. : *Biologie Végétale 1*, Dunod 2017.
- Jean-François MOROT-GAUDRY & al : *Nutrition minérale des plantes, aspects moléculaires*, Les Potentiels de la Science, Académie d'Agriculture de France, 2013.
- Jean-François BRIAT, Gilles LEMAIRE et Jean-François MOROT-GAUDRY : *Approches systémiques de la nutrition minérale des plantes en biologie et en agronomie*, Séance hebdomadaire de l'Académie d'Agriculture de France du 10 avril 2019.

L'auteur remercie Jean-François Briat et A. Gojon pour la relecture du texte et leurs remarques pertinentes.