

La nutrition minérale

1 Les besoins nutritifs des minéraux

Les plantes ont besoin d'eau : 80% à 95% du poids frais de la plante.

Macro-éléments organique : 90% du résidu sec de la plante.

Macro-éléments minéraux : 10 % du résidu sec => **oligo-éléments**

Les oligo-éléments essentielles :

- Cl
- Fe
- Mn, Zn, Cu, B
- Ni, Mo

Les éléments minéraux ont un rôle :

- Plastique : entre dans la constitution des cellules => nécessaire à la **synthèse** de la MO. S'il y a une carence, il y aura un problème de cette synthèse.
- Catalytique : Indispensable à l'activité de certaines **enzymes** et donc le bon déroulement du métabolisme => **cofacteur enzymatique**.

2 Rôle biologique

Cas de l'azote

Source d'azote = **N** minéral du sol

Il provient de la dégradation de la MO qui libère :

- des ions ammonium NH_4^+ -> ammonisation
- des ions nitrates NO_3^- -> nitrification

=> Cycle de l'azote

Les nitrates sont la source préférencielle pour les végétaux.

L'azote est un **constituant majeurs** des végétaux et entre dans la constitution :

- de tous les a.a
- des bases puriques et pyrimidique
- certains pigments
- des hormones
- des vitamines
- de nombreux métabolites secondaires

Les végétaux sont **incapable** de fixer l'azote atmosphérique car elles ne synthétisent pas l'enzyme nitrogénase.

Il faut donc passer par les nodosités racinaires :

- *Rhizobium* (fabacées).
- *Frankia* (Bétulacées (aulne))

L'azote est le principal élément limitant de la croissance des plantes

macroéléments minéraux**

macroéléments métalliques

Ils sont absorbés sous forme de **cations** et jouent un rôle dans la plante sous forme, libres ou complexés. (Pb, Ag, Al, Au ... et les plus utiles pour la plante sont Na, Mg, K et Ca)

Rôle du calcium

Le calcium est un ion **peu mobile*** mais il est très facilement absorbé par les membranes biologiques (paroi squelettique), il est donc **super important dans la rigidité**** des tiges (chez les céréales) et la fermeté des fruits, diminue la **perméabilité cellulaire** (empêche l'entrée des éléments toxiques indésirables) et une régulation des **échanges ioniques sol-racines**.

Rôle du potassium

Le potassium est un ion **mobile**, est important dans la **régulation** des phénomènes de **l'osmose**, ainsi que **l'ouverture/fermeture** des stomates (échanges gazeux) => augmente la résistance à la sécheresse. C'est le principal cation que l'on trouve dans la solution cytoplasmique (hyaloplasme). Il a un **rôle catalytique** important pour les protéines => carence en K : pb au niveau des mitoses

Rôle du magnésium

Le magnésium est un constituant de la chlorophylle pour le bon déroulement de la photosynthèse (maladie qui fait jaunir les plantes : chlorose) mais il a aussi un rôle catalytique dans les réactions enzymatiques (ATP-ase, kinases (permettrait le lien entre l'enzyme et son substrat))

Il y a des veines blanches sur les feuilles lorsqu'il n'y a pas assez de magnésium.

Rôle du sodium

Le sodium est un élément dont les plantes ont besoin en quantité variables, (bcp de sodium dans le sol : plantes halophytes => pression osmotique forte), il joue un rôle dans les équilibres hydriques et de transpiration.

macroéléments non métalliques

Ils sont absorbés sous forme d'anions avec une forte électronégativité : S, C, P, I, F, Cl

Rôle du soufre

Le soufre est uniquement absorbé, assimilé, utilisé sous **forme réduite** pour son utilisation sous forme de groupement -SH (-thiol) => constituant des **aa soufrés** (cystéine & méthionine) : élément plastique des végétaux pour une utilisation dans les **pont disulfure** R-S-S-R; rôle catalytique avec le CoA. les carence en soufre = carence très sévères : disparition de la chlorophylle : chlorose

Rôle du phosphore

Il a un double rôle plastique et fonctionnel, il entre dans la composition des acides nucléiques et des phospholipides; radical phosphoryle :

- structural : liaison entre les groupements organiques
- transporteur d'énergie (GTP & UTP) dans le cycle de Krebs et dans la mitochondrie
- activation de substrat

S'il manque du phosphore, l' plante aurait tendance à rougir.

oligoéléments

Ce sont des co-facteurs enzymatiques, à rôle catalytique.

Rôle du fer

Il entre dans la constitution de nbs protéines => élément essentiel de leur activité et joue un rôle dans le transport des e- dans la photosynthèse.

Rôle du bore

Le bore est indispensable au fonctionnement des méristèmes et intervient dans le transport des glucides

Rôle du zinc

Il est le co-facteur de nombreuses enzymes d'oxydation, les déshydrogénases mais aussi une utilisation dans la synthèse des auxines (hormones de croissance) (synthèse du tryptophane)

Rôle du manganèse

Il constitue le plus important co-facteur d'enzymes pour les décarboxylases

Rôle du cuivre

Il est impliqué dans le fonctionnement de certaines enzymes tels que le polyphénoloxydase

Rôle du molybdène

co-facteur de la nitrate réductase

Rôle du nickel

Important dans le fonctionnement de l'enzyme uréase (empêche que la plante s'enrichisse en urée)

Rôle du chlore

Il intervient dans le déroulement des réactions productrices d'O₂ de la photosynthèse mais est aussi essentiel au niveau des membranes pour le potentiel membranaire et le gradient électrochimique.

2 Besoins quantitatifs

concentration critique = concentration minimale en nutriment qui permet une croissance optimale.

optimum : correspond aux besoins exacts de la croissance végétale.

Tout élément même nécessaire devient toxique à forte dose.

La **notion de dose utile** : gamme quantitative qui permet aux plantes d'optimiser leur croissance.

Quand on est en dessous de la concentration critique, on est en zone de **carence** : elle peut provoquer des maladies, des chloroses avec une vitesse de croissance ralentie ou la nécrose (dégât cellulaire qui mène à la mort prématurée et non programmée des cellules), les **maladies de carence** peuvent provoquer des malformations ou des perturbations physiologiques.

Lorsque l'on a affaire aux éléments immobiles ou mobiles, les symptômes ne vont pas être de même nature :

- immobile : 1ers symptômes dans les tissus en croissance
- mobile : 1ers symptômes dans les tissus âgés → tissus en croissance restent préservés

Une carence concernant un oligoélément peut nuire à la production autant qu'une carence concernant un macroélément.

Loi du minimum : élément qui manque totalement ou se trouve en quantité insuffisante ce qui empêche les autres éléments de produire leur effets ou du moins, diminuer leurs actions nutritives.

La **consommation de luxe** : c'est au-delà de la concentration critique et pour une gamme de concentrations +/- large, la croissance ne s'améliore pas, ainsi la plante dépense de l'énergie pour l'absorption d'un élément qui ne lui sert à rien => gaspillage sans bénéfice pour la plante. Ces éléments sont stockés dans la vacuole → Investissement parfois utile à long terme car la plante peut constituer des réserves en cas de nécessité.

La **toxicité et la résistance aux métaux lourds** : certaines plantes ont une tolérance à la consommation de luxe et de la toxicité : permet de dépolluer les sols ou les eaux polluées (phytoremédiation) => accumulation dans les parois cellulaires, séquestration des éléments minéraux (**chélation** / complexation à des protéines ou des acides aminés), résistance génétique à des concentrations plus élevées : plus grande imperméabilité de la membrane biologique vis-à-vis des complexes.

4 L'absorption minérale

1 Modalités, cinétique et facteurs de variations

Rappels.

les horizons du sol

On distingue les différentes couches :

- Horizon éluvial : Horizon le plus superficiel, c'est celui qui présente le **maximum d'intérêt pour les plantes**
- Horizon illuviale : zone d'accumulation des corps entraînés par le lessivage des eaux de pluies (accès par les plantes dont le type racinaire est pivotant)
- Horizon profond de la roche-mère formant le substrat minéral

La texture du sol dans les horizons A et B est celle d'un système hétérogène associant :

- des colloïdes : formées de micelles minérales (argileuses) ou organiques (humiques), dispersées dans la **solution du sol**.
- des particules minérales provenant de la roche mère

L'ensemble forme ce que l'on appelle le **complexe argilo-humique CAH**.

Les minéraux sont sous forme dissoute et adsorbés (= fixés) sur les particules argileuses.

Le pouvoir adsorbant du CAH est la capacité à retenir à sa surface des cations provenant de la solution du sol.

Les macroéléments Ca, Mg, K, P et S sont bien représentés dans la solution du sol. Cependant, Fe, Al, Si se solubilisent très mal.

La fixation des cations est **sélective** : certains se fixent plus facilement que d'autres.

$H^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+ > NH_4^+ > Mn^{2+} > Zn^{2+} > Cu^{2+} > Mo > Al^{3+} > Fe^{3+} > Fe^{2+}$

Cette loi se vérifie pour un **équilibre des concentrations** autrement dit à **iso-concentration** pour les minéraux en compétition.

la fixation des cations est réversible.

- échange de cation par désorption
- notion d'équilibre adsorption / désorption ou ions libres en solution / ions absorbés

****Équilibre dynamique entre la CAH, la solution du sol et la racine**

La **chélation** est la capacité à soustraire les éléments métalliques d'un milieu = **séquestration**

Chélat : **complexe organo-métallique** très stable où un ion métallique (Fe, Zn, Ca, Mg, ...) est inséré dans une molécule organique (= chélateur), recourbé comme une pince (en grec : *chèle* = pince).

Les **acides humiques** sont les principaux chélateurs présents dans un sol.

Les minéraux, sous forme solide (provenant de la roche-mère), ne sont pas absorbés directement par la plante.

Ces minéraux sont absorbés par les racines. Mais les feuilles peuvent absorber les minéraux de la pluie (en climat équatorial)

La collecte des nutriments par les racines :

Le système racinaire :

- s'allonge et se ramifie de façon très importante, se renouvelle sans cesse (plus fréquemment que les parties aériennes)
- explore un très important volume du sol

L'interface sol-racine est déterminante : il y a un très grand nombre de poils absorbants

- contact assuré pour un **mucigel** d'origine végétale (sécrété par la racine) et d'origine bactérienne => faciliter l'absorption d'eau et des éléments minéraux
- espèce ligneuses : présence de **mycorhizes** : le champignon augmente la surface d'adsorption des racines => environ **100 fois** plus importante. Le champignon **augmente l'exploitation des ressources** par les racines.

Le champignon **améliore l'adsorption** du K, N, Zn, Cu venant de l'eau.

il y a des échanges de molécules, hormones entre le végétal et le champignon.

Le végétal fournit en retour des glucides issus de la **photosynthèse**

Cinétique de l'absorption minérale

- La phase initiale : la plante absorbe les éléments minéraux : mécanisme d'absorption passif
- La phase d'accumulation : la racine absorbe contre le gradient de concentration : mécanisme d'absorption actif

Entre les 2 phases, il y a la phase d'équilibre, égalité de concentration entre l'intérieur et l'extérieur de la racine

la facteur de variation : la concentration.

Il faut des pompes pour faire rentrer les minéraux, si il y a trop de concentration, les pompes seront saturés et donc la plante ne pourra pas mieux absorber.

les **ions antagonistes**

- si ions de même charge et de taille semblable
- Absorption de l'ion A inhibée par la présence d'un autre ion B => augmenter la dose de A pour retrouver l'effet souhaité.

Certains ions antagonistes : Ca^{2+} avec K^{+} ou Mg^{2+} ou Fe^{2+}

K^{+} avec Mg^{2+} , si l'absorption K^{+} trop importante alors absorption Mg^{2+} diminue (tétanie d'herbage pour les herbivores)

/! la compétition n'est généralement pas symétrique (sauf NO_3^- et Cl^-)

les **ions synergistes**

- généralement si ions de charges opposées
- absorption d'un cation stimulée par la présence d'un anion et inversement
- explications : nécessité du maintien de l'équilibre des charges, possibilité d'un transport couplé.

Absorption PO_4^{3-} et Mg^{++} mais aussi le K^{+} avec NO_3^-

Un autre facteur de variation : le pH

Modifie la capacité d'absorption de certains ions

Un autre facteur de variation d'absorption : la T°

Plus la T° est basse, plus l'absorption est difficile car il y a plus de processus métaboliques lorsque la T° est assez élevée. La T° est importante lorsque l'on est dans un mécanisme d'absorption actif

Un autre facteur de variation : la teneur en O_2

L' O_2 se dissout mal dans l'eau donc il ne faut pas d'accumulation d'eau. il faut 10% d' O_2 dans le sol pour avoir une capacité d'absorption maximale.

Plus il y a de lumière, plus il y a évapotranspiration, et donc il faut qu'elle absorbe de l'eau et des éléments minéraux dans le sol. La lumière va contribuer donc indirectement à l'absorption des éléments minéraux dans le sol

2 Les mécanismes

Diffusion (hyper \rightarrow hypotonique != osmose (hypo \rightarrow hyper tonique))

Le mécanisme de diffusion :

- entre les phospholipides => composé hydrophobe = lipophile donc apolaire
- flux proportionnel à la surface de la membrane traversée (loi de Fick) $k \cdot a \cdot \Delta C$

Diffusion facilitée :

transporteur qui vont permettre aux ions de transiter de part-d'autres de la bicouche lipidique par des protéines canaux (perméase). Protéines qui permettent de faciliter les échanges

Les composantes du transport passif à travers la membrane plasmique, exemple du K^+ :

Les membranes sont polarisées, avec à l'intérieur, des charges négatives ($E_m = -120 \text{ mV}$) et à l'extérieur, des charges positives.

Les cations seront donc "attirés" à l'intérieur de la cellule.

La **force de diffusion** (force électrochimique) est l'équilibre entre la force osmotique et la force électrique.

Il faut des canaux K^+ qui vont permettre de faire rentrer les cations.

$FLux_{net} = Perméabilité + force \text{ de diffusion}$

Franchissement des membranes biologiques :

vitesse cation > vitesses anions

$NH_4^+ > K^+ > Mg^{++} > Ca^{++} > Na^+$

$NO_3^- > Cl^- > SO_4^{--} > H_2PO_4^-$

Propriété de la membrane cellulaire :

- une perméabilité **sélective**
- semi-perméable
 - se comporte comme une membrane **dialysante**

→ la membrane dialysante = membrane dont les pores ont un diamètre de l'ordre du nanomètre.

Au pH physiologique, les protéines sont sous forme ionisées (négatives) (Pz^-)

Équilibre de Donnan :

Aux pH physiologiques, les protéines sont chargées négativement ont ont une certaine valence Pz^-

Lorsque la protéine est chargée négativement, elle impose un potentiel négatif du côté où elle se trouve.

Les cations diffusibles s'accumulent alors du côté négatif et inversement pour les anions diffusibles.

La protéine ionisée non diffusible est responsable de **la différence de potentiel** : $\Delta V = V_1 - V_2$

=> c'est l'effet Donnan : équilibre des charges, il faut que les deux compartiments soient électriquement neutres.

Équation de Donnan :

À l'équilibre, l'électroneutralité est vérifiée dans les deux compartiments.

$$[C^+]_1 * [A^-]_1 = [C^+]_2 * [A^-]_2$$

$$R = [\text{Côté le plus concentré}] / [\text{Côté le moins concentré}] = [C+]_1 / [C+]_2 = [A-]_2 / [A-]_1$$

Transport actif :

- contre m^e gradient lectrochimique
- au prix d'une dépense d'énergie
- couplage avec une réaction exergonquies

Généralement l'hydrolyse de l'ATP → Pompe à Na⁺, K⁺ ou Pompe à proton.

Schéma général des transports actifs et passifs :

Transport acitf & transport passif (prot canal) => H₂O

transport actif secondaire => pompe à proton : les protons rentrent dans la cellule par des co-transports (en symport/antiport) et ressortent par l'ATP-ase, ce qui va fabriquer de l'ATP.

Destinée des ions absorbés :

- Rétention au niveau des membranes cellulaires : cas de Ca⁺⁺ ou Na⁺
- Migration vers l'intérieur des cellules : cas du K⁺, Cl⁻, des NO₃⁻, H₂PO₄⁻, ... → rôle plastique ou rôle catalytique
- Sortie : cas des ions exsorbables (= qui peuvent sortir) et des ions échangeables (il doit y avoir un autre ion qui doit le remplacer).