

LA NUTRITION MINERALE

La nutrition minérale des plantes est l'ensemble des mécanismes impliqués dans le prélèvement, le transport, le stockage et l'utilisation des ions minéraux et des gaz nécessaires au métabolisme et aux différentes fonctions physiologiques chez la plante (croissance, reproduction, développement).

Ces mécanismes sont assurés au niveau de différents organes de l'appareil végétatif de la plante (racines, tiges et feuilles).

Détermination des besoins nutritifs des végétaux chlorophylliens

La plante se nourrit de **sels minéraux qui existent dans le sol** sous forme **d'ions et qui pénètrent dans les racines**.

De grandes surfaces racinaires et des systèmes actifs d'absorption expliquent 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.

Les végétaux chlorophylliens puisent des matières minérales indispensables à leur bon fonctionnement dans leurs milieux environnant (**sol, eau et air**).

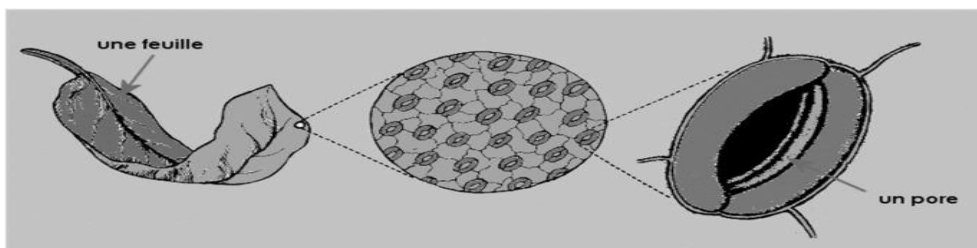
L'absence ou carence de ces matières perturbe leur développement

Comment la nourriture est-elle transportée ?

Comme les animaux, la plante **transpire**. Elle perd de la vapeur d'eau au niveau des **feuilles** par des milliers de **pores** (les **stomates**).

La respiration grâce aux feuilles

Cette perte crée une **aspiration** de la **sève minérale** qui monte continuellement des **racines** et apporte ainsi à la plante l'**eau** et les **sels minéraux** indispensables à la plante.



Pour connaître les besoins de la plante en sels minéraux on suit 2 méthodes successives : méthode analytique et méthode synthétique.

Principe :

Matière végétale fraîche = eau + matière sèche

Matière sèche = matière minérale + matière organique (C, O, H, N).

Si un élément est présent dans un tissu (A, B, C) c'est que la plante en a besoin. (quelques exceptions)

- Si un élément est présent en plus grande quantité qu'un autre (C), c'est que la plante en plus besoin qu'un autre



2.Méthode synthétique : Essayer l'effet des ions sur la croissance

Elle permet de connaître la nature et les proportions des éléments minéraux rencontrés chez les végétaux ; à l'aide des analyses par des réactifs spécifiques après la destruction de la matière organique par une des deux voies possibles :

- **voie sèche** : l'échantillon végétal subit une calcination ou incinération (Four à moufle : $T^{\circ} >$ à 400°C pendant 5heures), c'est la calcination est bien menée, assure la destruction totale de la matière organique.

voie humide : l'échantillon étudié subit une minéralisation en utilisant des oxydants acides.

On analyse ensuite les sels et les oxydes à l'aide des réactifs spécifiques.

Préparation de l'échantillons (minéralisation)

Afin de simplifier la composition des échantillons à analyser, il est nécessaire de procéder à une minéralisation pour éliminer les composés organiques du moment où il s'agit d'analyses élémentaires.

Procédé	Avantages	Inconvénients
Minéralisation par voie sèche (four à moufle)	- Peu couteuse - Le poids de l'échantillon peut être augmenté	- Perte d'éléments volatils (Cl, As, Hg ...). - Contaminations. - Formation de silicates non solubles.
Minéralisation par voie humide (Acides forts)	- Moins de pertes et moins de contaminations	- Acides dangereux - Très longue
Minéralisation assistée à micro-ondes	- Rapide - Pas de pertes volatiles - Contamination minimisée	- Equipement coûteux

Méthode synthétique: On se base sur les résultats de la méthode analytique et on prépare un milieu synthétique permettant la croissance de la plante. On modifie ce milieu en supprimant un élément, ce qui permet d'observer son influence. On définit ainsi si un élément est nécessaire et quelle est sa dose optimale.

Les éléments minéraux peuvent être classés selon leur importance pondérale en deux catégories:

Les macroéléments (éléments majeurs) : sont indispensable a beaucoup de plantes car ils rentrent directement dans la composition des composés organiques : c'est le cas de l'azote, du phosphore et du soufre. Ils peuvent rester essentiellement sous la forme minérale d'ion tel qu'ils ont été absorbés par les racines comme c'est le cas du potassium. Ils jouent enfin un rôle dans de très nombreuses réactions enzymatiques qu'ils catalysent et ils sont caractérisés par leurs

concentrations élevée de la matière sèche. ex : Azote N, Bore B, Calcium Ca, Chlore Cl, Cuivre Cu, Magnésium, Fer Fe, Magnésium Mg, Molybdène Mo, Zinc Zn, Potasse K, Phosphate P, Soufre S,

Remarque : le Sodium Na, le Chlore Cl et le silicium Si sont présent en quantité variable mais pas forcément nécessaire à tous les végétaux.

Les microéléments (oligoéléments) : Les oligo-éléments se trouvent au niveau des enzymes avec des variations distinctes selon les espèces. ils sont indispensable mais a des très faibles quantités tels : le Fer Fe, le manganèse Mn, le zinc Zn, le cuivre Cu, le bore Bo, l'aluminium Al, le nickel Ni, le cobalt Co, le molybdene Mo, l'iode I, le fluor F,

Principaux macroéléments indispensables aux végétaux.

Éléments	Symbole chimique	Forme disponible pour les plantes	Poids sec mg/kg	Fonctions
Hydrogène	H	H ₂ O (air et eau)	60000	Photosynthèse, circulation des sèves
Carbone	C	CO ₂	450000	croissance
Oxygène	O	O ₂ ; H ₂ O; CO ₂	450000	Photosynthèse (sucres)
Azote	N	NO ₃ ⁻ ; NH ₄ ⁺	15000	Respiration, production d'énergie
Potassium	K	K ⁺	10000	Synthèse d'acides aminés, de nucléotides et de pigments
Calcium	Ca	Ca ²⁺	5000	Équilibre ionique et osmotique, ouverture et fermeture des stomates, activation d'enzymes
Magnésium	Mg	Mg ²⁺	2000	Perméabilité membranaire, paroi, cofacteur d'enzymes
Phosphore	P	H ₂ PO ₄ ⁻	2000	Composant des chlorophylles, activateur d'enzymes
Soufre	S	SO ₄ ²⁻	1000	Énergie (ADF, ATP), acides nucléiques, phospholipides Acides aminés soufrés, co-enzyme A

Principaux microéléments (oligoéléments) indispensables aux végétaux.

Éléments	Symbole chimique	Forme disponible pour les plantes	Poids sec mg/kg	Fonctions
Chlore	Cl	Cl ⁻	100	Équilibre ionique et osmotique, photosynthèse
Fer	Fe	Fe ²⁺ ; Fe ³⁺	100	
Bore	B	H ₃ BO ₃	20	Synthèse de chlorophylles, cytochromes et nitrogénase
Manganèse	Mn	Mn ²⁺	50	Synthèse d'acides nucléiques, intégrité des membranes
Zinc	Zn	Zn ²⁺	20	Activateur d'enzymes, intégrité des membranes chloroplastiques
Cuivre	Cu	Cu ²⁺ ; Cu ⁺	6	Activateur ou composant d'enzymes
Nickel	Ni	Ni ²⁺	Traces	Activateur ou composant d'enzymes
Molybdène	Mo	MoO ₄ ²⁻	0,1	d'oxydoréduction Composant d'enzymes Fixation de l'azote et réduction des nitrates

L'origine des minéraux

Les ions sont en solution dans le sol, ils varient selon la nature et le pH du sol. Ils sont, soit à l'état fixé dans des solutions colloïdales (le complexe argilo-humique), dans le complexe anionique. La majorité des ions sont transformés par la plante pour pouvoir être utilisés. On trouve dans la plante des ions à faibles concentrations et à concentrations élevées. On observe, chez une plante, une sélectivité pour l'absorption des ions et pour le maintien de la concentration de ces ions.

Le sol: Le sol est la région la plus superficielle de la croûte terrestre, constamment remaniée par les agents atmosphériques (pluie, vent, alternances chaud, froid etc.) et par des contient aussi des êtres vivants qu'il abrite (bactéries, champignons, vers, et autres) qui y jouent un rôle important.

La composition chimique du sol est le résultat d'un équilibre dynamique.

- Un sol fertile est constitué d'une partie minérale et d'une partie organique.
- Composante minérale : se forme à partir de l'érosion de la roche mère,
- Composante organique : c'est l'humus du sol, c'est à dire la matière organique en décomposition.
- Un sol fertile peut contenir de 1% à 30% d'humus.

La capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol:

La capacité d'échange cationique d'un sol (CEC) traduit la faculté de celui-ci à fixer certains éléments minéraux à la surface du complexe argilo-humique.

Ces minéraux pourront être restitués ensuite aux plantes par des phénomènes d'échange.

La quantité totale de cations échangeables que le sol peut adsorber. Se dit

parfois : capacité totale échange; pouvoir d'échange de cations; ou capacité d'adsorption de cations. Elle s'exprime en milliéquivalents par 100 g de sol ou de toute autre substance adsorbante, comme l'argile.

Éléments essentiels, macro-éléments

L'azote (N) est un élément nutritif essentiel à la croissance et au développement des végétaux et donc à la production de la biomasse pour les plantes cultivées.

C'est un constituant des acides aminés, protéines, et de plusieurs vitamines, sa carence provoque la diminution marquée de la chlorophylle, d'où chlorose (jaunissement) d'abord des vieilles feuilles puis des jeunes, suivie du ralentissement et de l'arrêt de la photosynthèse. Cela explique l'importance de la nutrition azotée en nutrition végétale. Lorsque l'alimentation azotée est perturbée, les différents organes des plantes sont plus petits, et les rendements diminués. Une plus faible densité des peuplements, à une fructification précoce et à une teneur réduite en protéines.

Sous sa forme gazeuse N_2 , il ne peut pas être utilisé directement par les plantes qui ne peuvent, à l'exception de certains micro-organismes (bactéries et algues notamment), l'assimiler que sous forme minérale, ammoniacale (NH_4^+) ou nitrique (NO_3^-).

En effet, l'**azote** doit absolument subir **une transformation chimique** avant de pouvoir être utilisé par les organismes vivants.

C'est **le rôle du cycle de l'azote** qui permet de transformer **l'azote moléculaire gazeux et l'azote organique** en **azote minéral (ammoniac et nitrates)**.

Les engrais commerciaux (engrais chimiques) sont généralement formes d'un **mélange de ces trois éléments (N, P et K)**. Souvent, ces engrais (surtout les nitrates et les phosphates) **présentent des impacts** aussi bien sur l'être humain que sur l'environnement dans lequel il évolue.

Le phosphore intervient dans **les transferts énergétiques : processus de stockage et de transport de l'énergie dans les cellules (ATP)**, dans **la transmission de caractères héréditaires** (acides nucléiques), la photosynthèse et la dégradation des glucides.

Le phosphore est un constituant important des protéines phosphorées (nucléoprotéines, phosphoprotéines, etc.). En outre, un grand nombre de réactions métaboliques exigent des phosphorylations préalables pour se dérouler.

• Il est **essentiel** pour **la floraison, la précocité, le grossissement des fruits et la maturation des graines**.

Carence en P

- Les plantes carencées en P ont une croissance ralentie ; le développement des racines et la densité des populations sont réduits ; la floraison et la maturation sont retardées.
- Une carence en P provoque une diminution de la production de protéines et de vitamines. La résistance au gel est moins bonne.

Le potassium n'est pas un élément constitutif des hydrates de carbone, des lipides ou des protéines, mais il joue le rôle d'activateur de différentes enzymes.

- Il permet l'augmentation de la pression cellulaire.
- Il régularise l'économie de l'eau dans la plante et réduit l'évaporation; il en accroît donc la résistance à la sécheresse.
- Le potassium est l'ion principal des solutions cytoplasmiques.
- Il joue un rôle fondamental dans les processus d'échanges transmembranaires passifs et actifs dans les cellules.
- Il améliore le rendement de l'assimilation chlorophyllienne et la résistance au gel.
- Les légumineuses, la pomme de terre, les betteraves, le maïs et l'avoine ont des besoins élevés en K.

Carence en K

- Gout moins agréable (fruits et légumes).
- Réduction de la résistance au gel et à la sécheresse.
- Transpiration et respiration plus importantes.
- Mauvaise conservation des fruits et légumes.

Le magnésium (Mg)

- Le magnésium est un constituant de la chlorophylle. Il en favorise la synthèse ainsi que celle de la xanthophylle et celle du carotène.
- Il entre dans la composition de composés organiques essentiels comme la pectine. C'est aussi un activateur d'enzymes.
- Il favorise l'absorption du phosphore et son transport dans les graines ou il favorise la synthèse des lipides.
- Le magnésium évite l'absorption excessive de potassium par les plantes.

Carence en Mg

Chez les plantes carencées en magnésium, la production d'hydrates de carbone est réduite et les amides, qui servent à la protéosynthèse, s'accumulent dans les feuilles.

Modalité d'absorption des éléments minéraux:

L'absorption des éléments minéraux se fait à partir de la solution de sol. Les éléments minéraux sont absorbés sous forme d'ions.

certaines éléments comme le **Fer** sont difficilement absorbables a Ph élevé; l'existence de certains complexes organométallique, les chélate, permet de surmonter cette difficulté.

L'absorbance des éléments minéraux est sélective. La vitesse de franchissement se fait dans l'ordre suivant:

les cations : $\text{NH}_4^+/\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$

Les anions: $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-/\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{SO}_4$

La vitesse des anions est **inferieure** a celle **des cations**. L'intensité de l'absorption dépend de: l'espèce, l'âge, la composition minérale du milieu et l'état physiologique de la cellule.

Métabolisme d'absorption des éléments minéraux: L'absorption des éléments minéraux se fait en 2 étapes:

a) l'adsorption : étape de fixation superficielle, pendant laquelle, l'élément adsorbé peut être résorbé. La racine exprime un pouvoir adsorbant par le quel elle peut échanger ses cations avec la solution du sol c'est la capacité d'échange cationique racinaire (C.E.C.R).

b) l'absorption : (au sens strict) qui suit la première étape et peut être active ou passive selon les ions.

Transport des ions dans la racine

L'eau et les sels minéraux doivent d'abord entrer dans la racine d'une manière radiale et se rendre jusqu'à la stèle (cylindre vasculaire), il y a un déplacement de cellule à cellule en suivant 3 voies possibles:

1. La Voie transmembranaire

L'eau et les ions peuvent se déplacer à travers la membrane plasmique (ce déplacement le moins utilisé). Les substances sortent d'une cellule et pénètrent dans la cellule voisine en traversant la membrane et la paroi cellulaire.

La voie apoplastique: ou les ions et l'eau se déplacent dans l'espace de la paroi. Le déplacement se fait de la forte concentration vers la plus faible concentration.

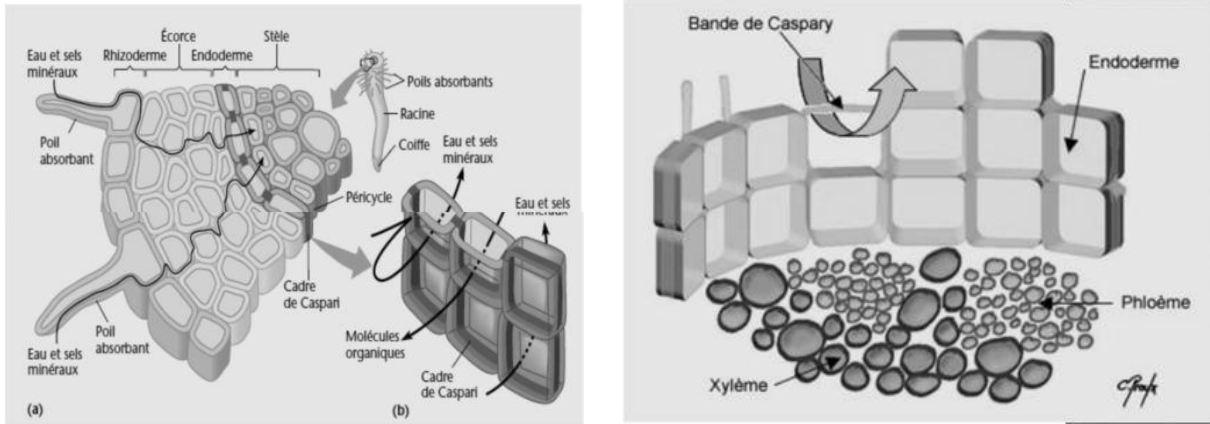
Le mouvement des ions se fait d'une manière rapide et passive sans traverser la Membrane.

3. La voie symplastique: ou l'eau et les ions pénètrent dans la cellule et se déplacent par les plasmodesmes. C'est un mouvement **lent** et **actif** qui **nécessite de l'énergie (ATP)**

Une fois arrivés à l'endoderme, il y a une sélection entre les ions. Dans cet endroit, les molécules ne peuvent que passer par la membrane plasmique (voie de symplaste) qui permet de faire une sélection car la bande de Caspar, constituée de Cire, les empêche de passer. Puis une fois l'endoderme passé, les 3 voies de déplacements peuvent être de nouveau empruntées jusqu'à être chargées dans le xylème.

L'eau et les sels minéraux peuvent progresser entre les cellules du rhizoderme et de l'écorce mais ils doivent passer à l'intérieur des cellules de l'endoderme à cause de la présence du cadre de Caspari.

) Le cadre de Caspari oblige l'eau et les minéraux dissous provenant du sol à progresser dans les cellules de l'endoderme au lieu de passer entre elles. (voie symplasmique)



Mécanismes de l'absorption

L'absorption est sensible à la température et aux inhibiteurs métaboliques ; par exemple, une cellule morte n'absorbe pas. Ils existent plusieurs composantes dans le phénomène de transport des ions et des petites molécules. On trouve trois possibilités de pénétration : la diffusion, le transport passif (diffusion facilitée), le transport actif.

La simple diffusion.

La membrane cellulaire permet à l'eau et aux molécules non polaires de pénétrer par simple diffusion mais aussi à quelques petites molécules polaires comme l'urée, le glycérol, le CO₂, peuvent pénétrer. Ce phénomène de diffusion est exprimé par la loi de Fick.

$$(DQ/dT) = k.a.\Delta c ;$$

k est le coefficient de diffusion, **a**, la surface de diffusion, **Δc**, la variation de concentration.

La diffusion tend vers un état d'équilibre pour que le gradient de concentration soit nul. Le transport de petites molécules se fait grâce à des protéines membranaires de deux types. On trouve des protéines porteuses et des canaux protéiques.

Le transport des molécules est réalisé par des canaux protéiques, par des protéines porteuses et par perméabilité membranaire. On trouve deux types de protéines porteuses, des protéines qui permettent un transport passif et des protéines qui réalisent ce transport grâce à de l'énergie : c'est un transport actif.

Mécanisme actif.

Lapicque a mis en évidence le phénomène d'épictèse : c'est une absorption active des ions et des petites molécules.

Une cellule végétale dans une solution hypertonique, concentrée en saccharose est plasmolysée. Au bout d'un certain temps, la cellule redevient turgescente : la cellule rétablit son hypertonie en absorbant des ions (ou des petites molécules) contre le gradient du potentiel électrochimique. Ce phénomène explique qu'une cellule est capable de concentrer des ions. Ces déplacements nécessitent de l'énergie d'origine chimique, par exemple l'ATP, d'origine physique : le gradient ionique, due aux déplacements d'électrons. Cette énergie permet le fonctionnement des pompes ioniques donc le type le plus représenté est le type des pompes à protons. On trouve deux types de pompes :

des pompes redox donc la circulation est réalisée grâce à des déplacements d'électrons. Ces pompes produisent de l'ATP.

- Des pompes de type ATPase : elles expulsent les protons au niveau de la membrane du plasmalemma ou du tonoplaste (transports actifs). Elles utilisent de l'énergie. Le transport des protons par ces ATPases est un transport actif primaire.

Cette émission de protons crée la «force motrice protonique », qui permet à son tour d'énergiser le déplacement d'autres espèces ioniques. On parle de transports actifs secondaires.

Ce transport actif secondaire se fait dans le sens opposé au gradient, en demandant donc de l'énergie.

S'il y a transport d'un seul soluté, on parle de système uniport.

Si deux solutés traversent dans le même sens, c'est un système symport.

Si les 2 solutés traversent dans un sens différent, c'est un transport antiport.

<i>Les transports passifs</i>	<i>Les transports actifs</i>
Ils ne nécessitent pas d'énergie car ils s'effectuent dans le sens du gradient de concentration (ou gradient électrochimique).	Ils nécessitent de l'énergie car ils s'effectuent contre le gradient de concentration (transport non spontané).
<p><i>A- La diffusion directe :</i> les molécules "liposolubles" diffusent au travers de la membrane biologique.</p> <p><i>B- La diffusion facilitée :</i> les molécules utilisent une protéine de transport.</p> <p><i>C- L'osmose :</i> mouvement net de molécules de solvant au travers d'une membrane semi-perméable vers un compartiment contenant une concentration plus importante d'un soluté. Ce mouvement tend à égaliser la concentration de ce soluté des 2 côtés de cette membrane.</p>	<p><i>A- Transport actif primaire (ou direct) :</i> l'énergie est fournie par l'hydrolyse d'un nucléotide triphosphate (exemple : pompes à sodium et hydrolyse de l'ATP).</p> <p><i>B- Transport actif secondaire (ou couplé) :</i> l'énergie est fournie par une différence de potentiel électrochimique (exemple : un gradient de concentration de sodium). Le terme "secondaire" signifie que cette différence de potentiel électrochimique résulte d'un transport actif primaire (exemple : pompe à sodium et hydrolyse de l'ATP).</p>

Rôles des ions dans la plante

Rôles physiques.

Les phosphates favorisent l'entrée du magnésium, alors que le calcium freine son entrée. Les ions permettent le maintien de la turgescence, du pH (système tampon), la création de potentiels membranaire qui agissent sur la perméabilité de la membrane.

Rôles physiologiques.

Les rôles constitutifs sont tenus par les éléments phosphorylés, comme les phospholipides, les composés phosphorylés, les nucléotides, et les acides nucléiques.

On trouve le soufre dans les acides aminés et dans les protéines.

On trouve le calcium dans les parois où ils forment avec les peptides, des pectates ; dans la vacuole il est sous forme de cristaux d'oxalate de calcium ; dans le cytoplasme. On trouve le fer (Fe) au niveau des hèmes et des cytochromes.

Le calcium se trouve dans les chloroplastes (en formant les plastocyanines) et dans les mitochondries où ils forment les cytochromes oxydases.

On trouve du molybdène dans les nitrate-réductases et dans les nitrogénases.

Le phosphore est en importante quantité pendant la floraison et dans les graines.

Le potassium est impliqué dans le métabolisme des glucides.

Le calcium se trouve le plus souvent dans les lieux de stockage des produits toxiques (en général se sont les vacuoles).

