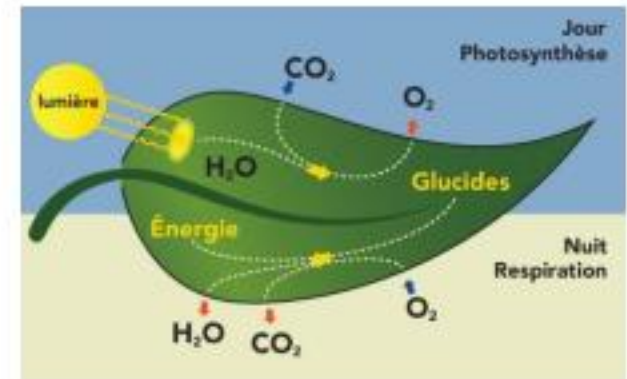
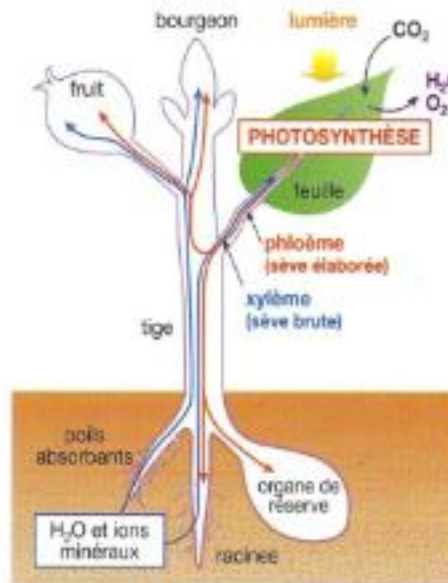


Physiologie Végétale



Faculté des Sciences Appliquées Université Ibn Zohr
Filière SV, Semestre 4

2019/2020



NUTRITION MINERALE

Nutrition minérale

Introduction

- Au 4^e siècle avant notre ère, Aristote supposait que les plantes mangeaient le sol, car il les voyait émerger du sol.
- Dans les années 1640, le Belge Helmont vérifia cette hypothèse: la croissance végétale s'effectue grâce à la consommation des constituants du sol.
 - Il planta un petit arbre de saule dans un pot contenant 90.9 Kg de sol.
 - Cinq ans plus tard, le saule pesait 76.8 Kg, mais il ne manquait plus que 0.06 Kg de sol dans le pot.
 - Comment 60 grammes de sol peuvent maintenir et donner un arbre de 75 Kg?
- Conclusion de Van Helmont → L'arbre s'est formé surtout à partir de l'eau d'arrosage (le reste venant du sol).

Nutrition minérale

Introduction

- Un siècle plus tard le physiologiste Stephen Hales (1677-1761):
 - Suite aux développements de la chimie, on démontre que la matière organique contient du carbone.
 - Puisque l'eau ne contient pas de carbone, alors la masse végétale ne peut pas provenir uniquement de l'eau.
 - Hales suppose que les végétaux se nourrissent surtout de l'air.
- Il faudra attendre le XXe siècle pour démontrer que Hales avait raison!!

Nutrition minérale

Introduction

- Les minéraux peuvent intervenir dans des processus physiologiques importants pour les plantes, à savoir:
 - La photosynthèse,
 - La fructification,
 - La perméabilité cellulaire,
 - Les équilibres ioniques, etc.

Nutrition minérale

Introduction

- Connaître les besoins nutritifs des plantes permet de fertiliser de manière raisonnée.
- Les engrais commerciaux (engrais chimiques) sont généralement formés d'un mélange d'éléments nutritifs.
- La plante puise dans le sol des éléments de construction et de croissance.

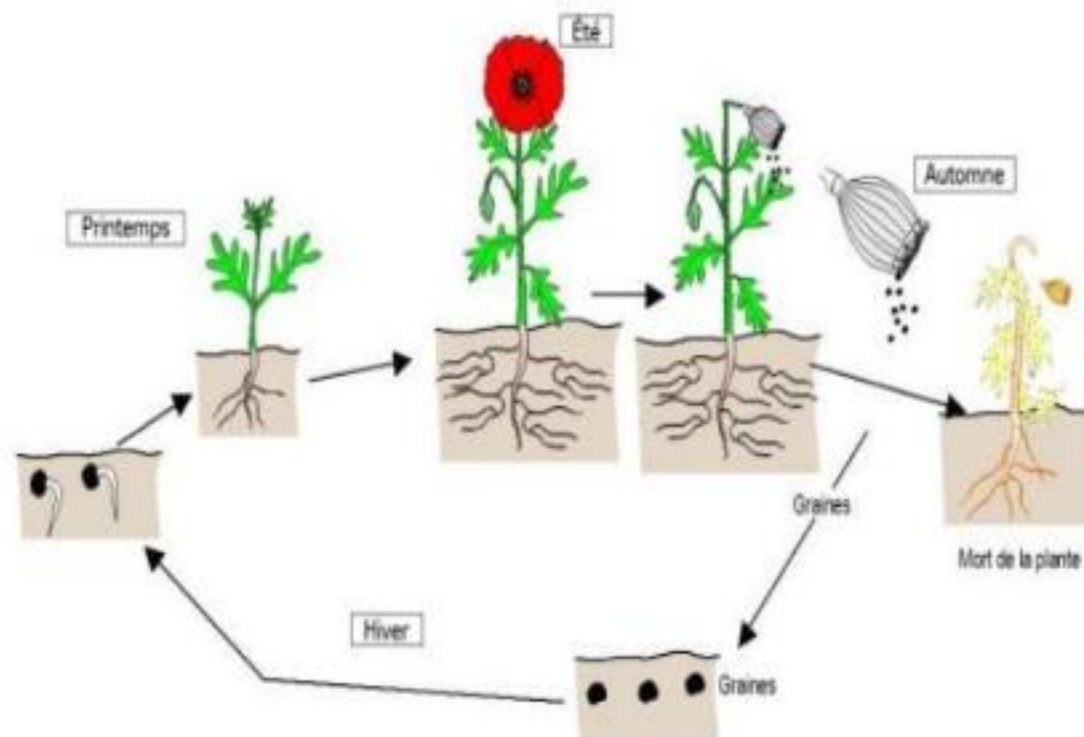


Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Besoins des plantes en éléments minéraux

Les éléments essentiels

- Un élément est essentiel si, en son absence, la plante ne peut pas réaliser un cycle de développement complet, de la graine à la graine. Il est non essentiel dans le cas contraire.

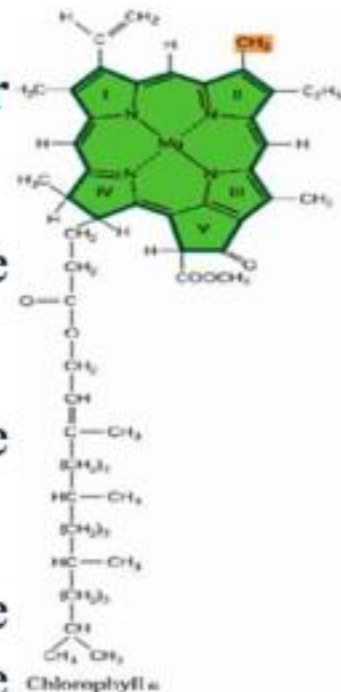


Besoins des plantes en éléments minéraux

Les éléments essentiels

Pour qu'un élément soit considéré essentiel, trois critères doivent être réunis:

- Une plante donnée doit être **incapable d'accomplir** son cycle en l'absence de l'élément minéral en question.
- Dans sa fonction, cet élément ne doit pas être **remplaçable** par un autre élément minéral.
- L'élément doit être **directement impliqué** dans le métabolisme de la plante.
- Par exemple, comme un constituant essentiel de la plante tel qu'une enzyme, ou bien il doit être nécessaire dans une étape métabolique distincte telle qu'une réaction d'une enzyme.



Besoins des plantes en éléments minéraux

Les éléments essentiels

La mise au point de techniques de culture en hydroponie (culture où les racines baignent directement dans la solution nutritive, sans substratum solide) a permis d'identifier progressivement dix huit éléments **essentiels** classés en deux catégories, **macro-éléments** et **micro-éléments** selon leur abondance relative

- ✓ Éléments majeurs ou Macroéléments
- ✓ Éléments mineurs ou Oligoéléments (Micro-éléments)

Besoins des plantes en éléments minéraux

Les éléments majeurs ou Macroéléments

Il s'agit d'éléments essentiels dont la plante a besoin en quantité relativement importante. Ils sont au nombre de 9 éléments:

Les macroéléments (dont la concentration est **supérieure** à 10 mmol kg⁻¹).

- 1) Carbone (C),
- 2) Hydrogène (H),
- 3) Oxygène (O)

Sont puisés dans
l'air et dans l'eau

Ces quatre éléments, qui
constituent la matière
organique, représentent plus
de 90 % en moyenne de la
matière sèche végétale

- 1) L'Azote (N)

Dans le sol (forme
minérale) et dans l'air (cas
des organismes fixateurs)

Besoins des plantes en éléments minéraux

Les éléments majeurs ou Macroéléments

A ces éléments s'ajoutent :

- 5) Soufre (S),
- 6) Phosphore (P),
- 7) Calcium (Ca),
- 8) Potassium (K),
- 9) Magnésium (Mg).

- On peut trouver souvent le Na, le Cl et le Si, mais ces derniers ne sont pas nécessaires à tous les végétaux.

Besoins des plantes en éléments minéraux

Éléments mineurs ou Oligoéléments (Micro-éléments)

- Les micro-éléments sont appelés ainsi non parce qu'ils sont moins importants pour la croissance des plantes, mais parce qu'ils sont requis en **plus petites quantités** (la concentration est **inférieure** à 10 mmol kg^{-1});
- Ces éléments agissent comme cofacteurs de réactions enzymatiques.
- Exemple: le fer est le constituant métallique des cytochromes, protéines qui interviennent dans les chaînes de transfert d'e- des chloroplastes et des mitochondries.
- Un manque de ces éléments nutritifs dans le sol ou dans les plantes peut nuire à la production autant qu'une carence d'un des macroéléments.

Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Besoins des plantes en éléments minéraux

Éléments mineurs ou Oligoéléments (Micro-éléments)

- Ils comprennent entre autres, le:

1. Fer
2. Manganèse
3. Zinc
4. Cuivre
5. Bore
6. Molybdène
7. Chlore
8. nickel

	B	Cu	Fe	Zn	Mn	Mo
Photosynthèse						
Croissance						
Fertilité						
Synthèse des protéines						
Synthèse de la lignine						
Fixation de l'azote						
Réduction des nitrates						
Respiration						
Migration des sucres						

Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Besoins des plantes en éléments minéraux

Source relative (Tab. 2.1).

Tableau 2.1 – Teneurs en éléments minéraux des tissus des plantes.

Valeurs moyennes, exprimées en pourcentage par rapport à la matière sèche (MS). Leur origine et les formes disponibles sont indiquées.

Éléments	Symbole	Concentration dans la MS (%)	Origine
Carbone	C	44	CO_2 & (HCO_3^-)
Oxygène	O	43	H_2O
Hydrogène	H	6	
Macro-éléments			À partir du sol
Azote	N	1,5	NO_3^- , NH_4^+
Potassium	K	1	K^+
Calcium	Ca	0,5	Ca^{2+}
Magnésium	Mg	0,2	Mg^{2+}
Phosphore	P	0,2	$\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-$
Soufre	S	0,1	SO_4^{2-}
Silice	Si	0,1	SiO_3^{2-}
Micro-éléments			À partir du sol
Chlorure	Cl	0,01	Cl^-
Fer	Fe	0,01	Fe^{3+}
Manganèse	Mn	0,005	Mn^{2+}
Zinc	Zn	0,002	Zn^{2+}
Bore	B	0,002	BO_3^-
Cuivre	Cu	0,0006	Cu^{2+}
Nickel	Ni	0,00001	Ni^{2+}
Molybdène	Mo	0,00001	MoO_4^{2-}

Besoins des plantes en éléments minéraux

Interactions entre les éléments minéraux

Il existe entre les éléments des interactions qui font que l'action d'un élément est modifiée par la présence d'un autre.

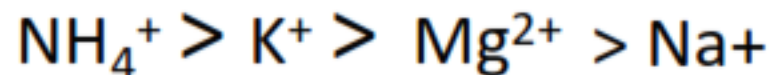
- **Synergie** : L'effet d'un élément est amplifié par la présence d'un autre.
- **Antagonisme** : L'effet de l'élément A est atténué par B et pour retrouver cet effet, on doit augmenter la dose de A.

L'utilisation excessive de certains éléments peut contrarier l'assimilation des autres nutriments. Cet antagonisme peut être réciproque. Par exemple, un excès d'azote peut induire une déficience en potassium et vice versa.

Besoins des plantes en éléments minéraux

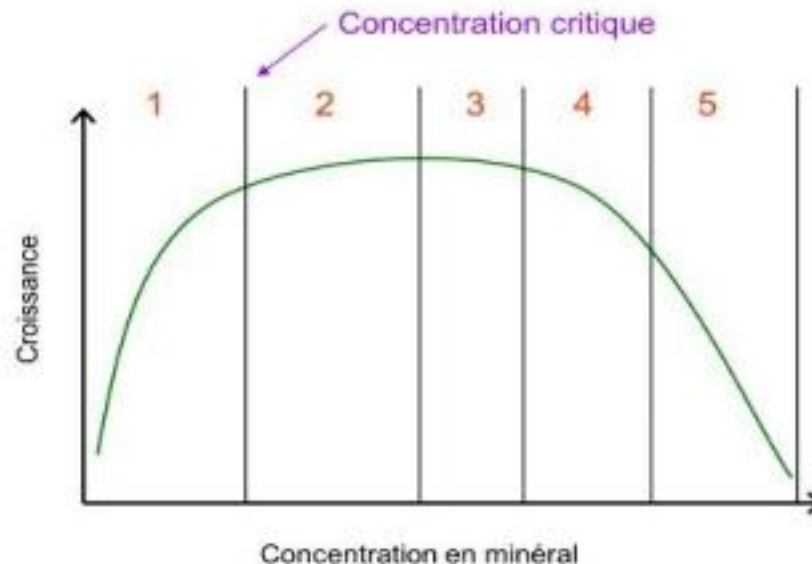
Interactions entre les éléments minéraux

- **Accumulation** : certains éléments absorbés par la plante atteignent des concentrations plus élevées que celles du milieu extérieur.
- **Sélectivité** : propriété selon laquelle le végétal choisit les éléments à absorber. Tous les éléments ne pénètrent pas à la même vitesse.



Besoins des plantes en éléments minéraux

Besoins des plantes en éléments minéraux



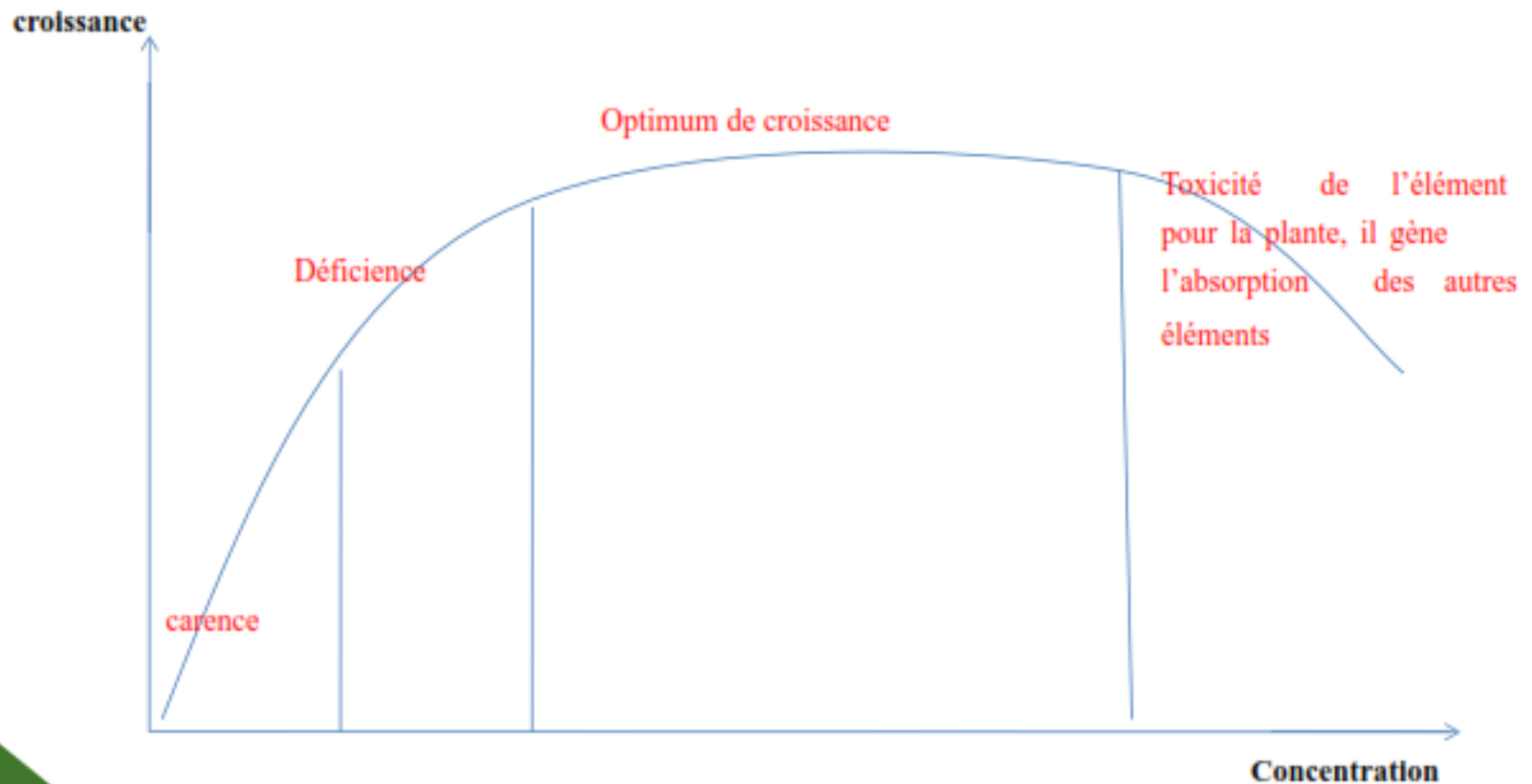
- 1: Zone de carence
- 2: Zone optimale de croissance
- 3: zone de « luxe »
- 4: Zone toxicité sans symptômes visuels
- 5: Zone de toxicité avec symptômes visuels

Un apport minéral est plus efficace sur la croissance quand la carence est plus accusée.

Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Besoins des plantes en éléments minéraux

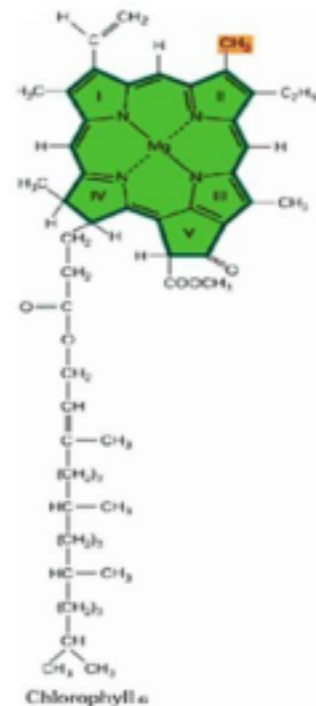
Besoins des plantes en éléments minéraux



Besoins des plantes en éléments minéraux

Carences en minéraux

- Les symptômes d'une carence en un élément dépendent en partie du rôle nutritif de cet élément dans la plante.
- Exemple: Le Mg est un constituant de la molécule de chlorophylle, son absence provoque la chlorose (jaunissement des feuilles).
- Dans certains cas, la relation entre la carence en un élément et les symptômes occasionnés par cette carence est moins directe.
- Exemple: le Fe ne fait pas partie de la molécule de chlorophylle, mais c'est un cofacteur dans l'une des étapes enzymatiques de la synthèse de la chlorophylle. Par conséquent sa carence provoque des chloroses.



Besoins des plantes en éléments minéraux

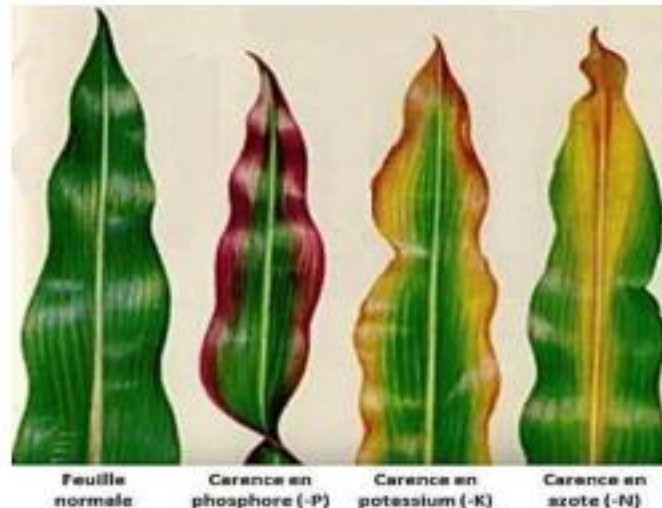
Carences en minéraux

- Les symptômes d'une carence en un élément dépendent non seulement du rôle nutritif de cet élément dans la plante, **mais aussi de sa mobilité dans** celle-ci.
- Les jeunes tissus en croissance ont plus de capacité d'attirer les éléments peu disponibles que les tissus arrivés à maturité.
- **Exemple:**
 - Le Mg est un élément mobile dans la plante. Sa carence déclenche le jaunissement des **anciens organes**.
 - A l'inverse, le fer dont la mobilité est plutôt faible, reste localisé dans les anciens organes. Un manque d'approvisionnement en cet élément provoque la chlorose des **jeunes organes**.

Besoins des plantes en éléments minéraux

Carences en minéraux

- Les carences les plus fréquentes sont:
 - Azote (N)
 - Phosphore (P)
 - Potassium (K)
- Les carences en éléments mineurs sont plus rares.



Besoins des plantes en éléments minéraux

Origine des minéraux

- Dans le sol, les ions sont en solution, ils varient selon la nature et le pH du sol. Ils sont, soit à l'état libre ou **fixé** dans le **complexe argilo-humique** (dans des solutions colloïdales), dans le complexe anionique.
- Si c'est une fixation par un cation, et si celui-ci est divalent, il fixera l'anion au sol.
- Si le sol a beaucoup de complexes argilo-humiques, il sera riche.

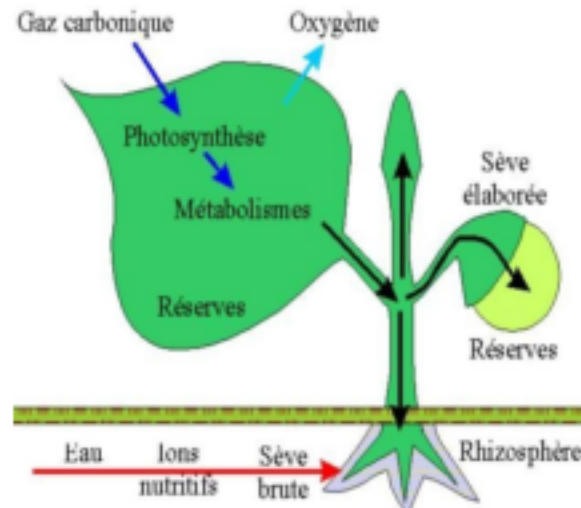
Besoins des plantes en éléments minéraux

Origine des minéraux

- La majorité des ions sont transformés par la plante pour pouvoir être utilisés. On a par exemple, les sulfates réduits au niveau des chloroplastes.
- Ces ions seront souvent à faibles concentrations. On trouve aussi dans la plante, des ions 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.
- Dans le complexe argilo-humique, Les ions sont fortement liés: il y a compétition entre la plante et le complexe ionique pour capter des ions, d'où une dépense d'énergie par le végétal.

L'absorption minérale

- L'absorption des éléments minéraux s'effectue plus ou moins comme celle de l'eau: à travers les poils absorbants des racines ou via les mycorhizes pour le cas des végétaux supérieurs terrestres, par la surface des racines des plantes aquatiques ou par tout le thalle chez les algues.
- L'absorption se mesure par la quantité de matière qui en un temps donné passe du milieu extérieur vers le végétal.



L'absorption minérale

Les facteurs de variation de l'absorption

L'absorption dépend de plusieurs facteurs :

- **Etat physiologique** : le stade de développement de la plante et son état hormonal.
- **pH du milieu** : action directe sur l'absorption. La baisse du pH réduit l'absorption des cations et l'augmentation du pH réduit l'absorption des anions.
- **Aération du milieu** : l'absorption est réduite en conditions asphyxiques.
- **Température** : l'absorption augmente avec la température.

L'absorption minérale

Modalités d'absorption

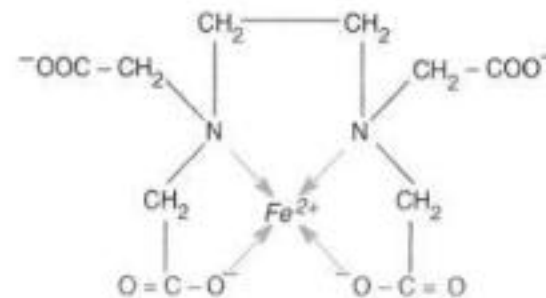
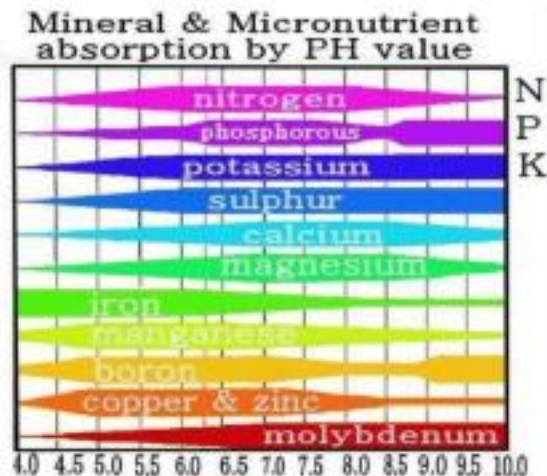
- Les éléments minéraux sont généralement absorbés sous forme d'ions.
- Connaître les mécanismes de nutrition des végétaux permet de raisonner la fertilisation pour obtenir des plantes de qualité et résistantes aux maladies
- Dans les cultures, l'absorption est réalisée de manière spécifique. Par exemple, dans un verger, on fait absorber à une plante des oligo-éléments via ses feuilles.

Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

L'absorption minérale

Modalités d'absorption

- Certains éléments comme le fer sont difficilement absorbables à pH élevé, l'existence de certains complexes organométalliques appelés chélats, permet de surmonter cette difficulté.
- La chélation du fer évite la précipitation de l'ion métallique dans un milieu acide. Le métal peut ensuite être facilement libéré du chélat et être absorbé par la plante.
- En absence des chélateurs, l'absorption foliaire de fer par une plante chlorosée est le seul moyen d'absorption sur les sols calcaires.



Chélation du fer par l'EDTA

L'absorption minérale

Modalités d'absorption

- Les ions circulent par voie symplastique (dans le cytoplasme) jusqu'au xylème puis ils passent dans la sève brute.
- Certains ions sont retenus au niveau des parois, comme le calcium, d'autres s'accumulent dans la vacuole puis ils sont excrétés. La vacuole est une poubelle ou une réserve.

L'absorption minérale

Modalités d'absorption

- Les cellules n'absorbent pas indifféremment les ions. Il existe une perméabilité sélective (le Na^+ pénètre très mal dans la cellule). A l'opposé, le K^+ se trouve à des concentrations plus élevées à l'intérieur qu'à l'extérieur (accumulation).
- Les cations présentent une vitesse de franchissement des membranes plus grande que celle des anions.
 - Pour les cations: $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$
 - Pour les anions: $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{SO}_4^{2-}$

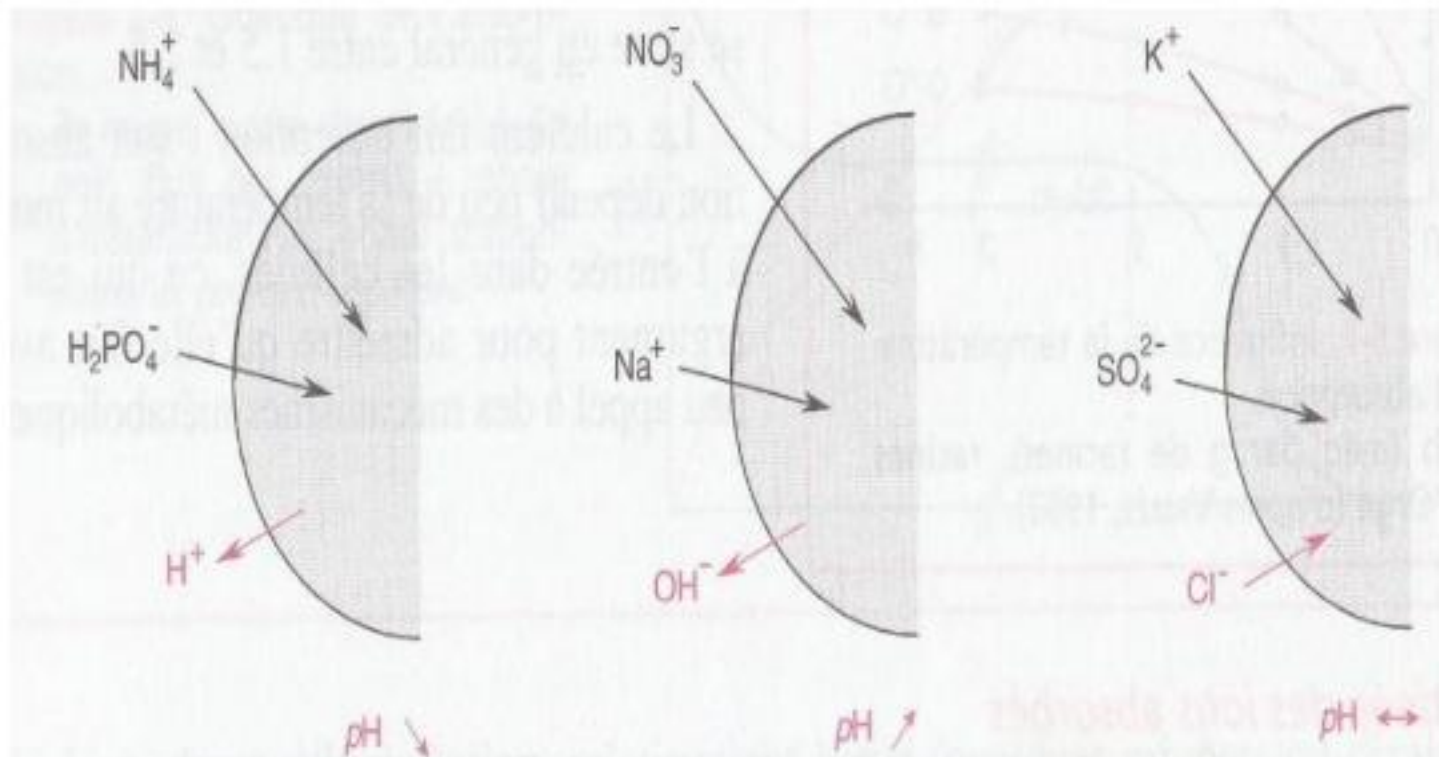
L'absorption minérale

Modalités d'absorption

- Les différences dans les vitesses d'absorption entraînent deux conséquences du fait que l'équilibre acido-basique (égalité des charges + et -) doit être respecté:
- Exemple: du phosphate d'ammonium, engrais courant: NH_4^+ pénétrant beaucoup plus vite que H_2PO_4^- , l'équilibre ne pourra se réaliser que par une sortie simultanée de protons H^+ , les engrais ammoniacaux sont acidifiants: Inversement.
- Les engrais nitriques, par la rapidité de pénétration de NO_3^- , qu'accompagne une entrée de H^+ ou que compense une sortie de OH^- , sont alcalinisants.
- L'absorption préférentielle d'un ion a fréquemment pour conséquence une variation compensatrice du pH du milieu.

L'absorption minérale

Modalités d'absorption



Exemples de flux induits par des différences de vitesse d'absorption et maintenant l'équilibre acido-basique.
Longueurs des flèches proportionnelles aux intensités de l'absorption.

L'absorption minérale

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) et le **transport actif**.

L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption

- **La diffusion simple**
- La membrane cellulaire permet à l'eau et aux molécules **non polaires** de pénétrer par simple diffusion mais aussi 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 : le coefficient de diffusion,
 - a : la surface de diffusion,
 - Δc : la variation de concentration.

L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption

- **La diffusion simple**
- 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.



L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption

- **Le transport passif (la diffusion facilitée)**
 - Le transport se fait par des canaux protéiques et par des protéines porteuses.
 - Si la molécule est non chargée, le transport est déterminé par le gradient de concentration.
 - Si cette molécule est chargée, le transport est déterminé par le gradient de concentration et par le gradient électrochimique.
 - On a donc un transport dans le sens du gradient qui entraîne un potentiel de membrane. Le potentiel électrochimique.

L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption

- **Le transport passif (la diffusion facilitée)**
 - Dans la diffusion facilitée le transport est réalisé dans le sens du gradient.
 - 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.

L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption

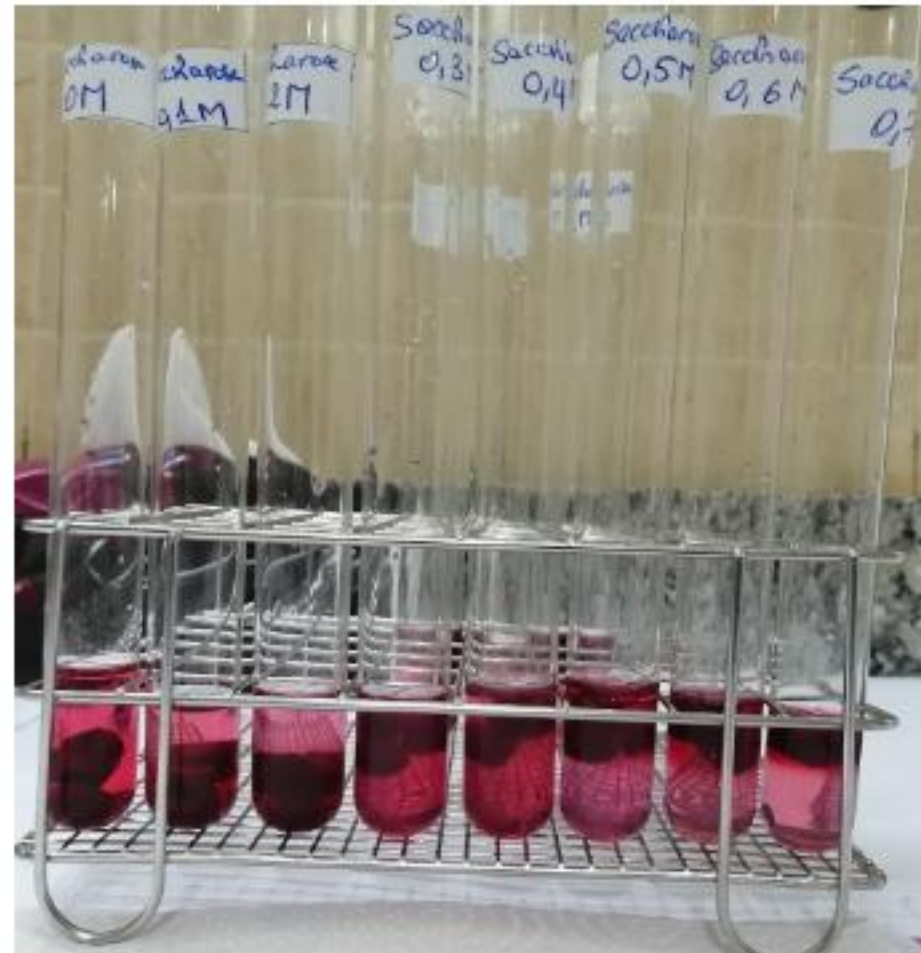
■ **Le transport actif**

- 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.

Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption



L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption

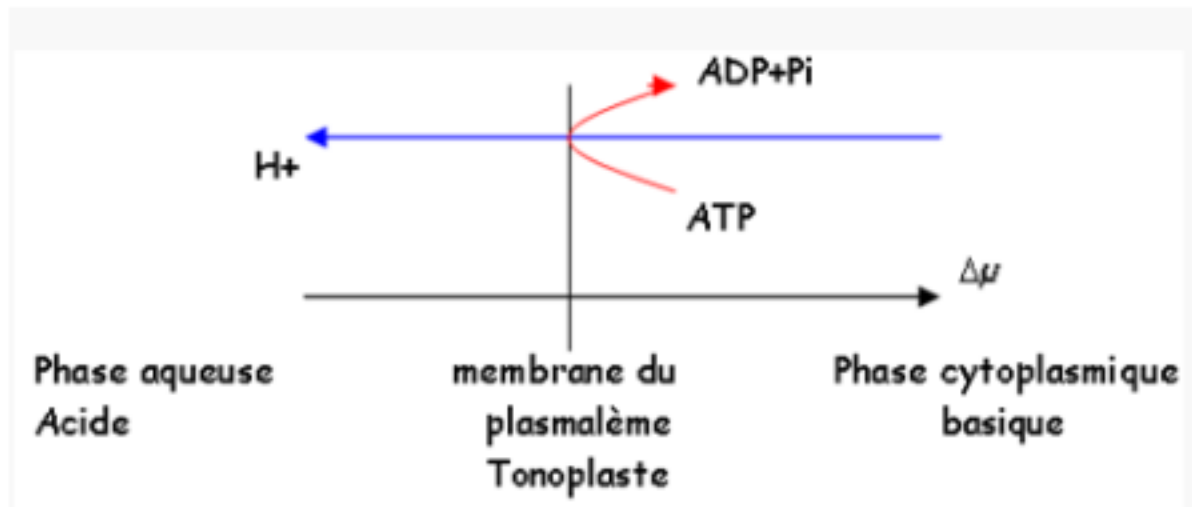
■ Le transport actif

- 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 rédox: 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 plasmalème ou du tonoplasme. Elles utilisent de l'énergie. Le transport des protons par ces ATPases est un transport actif primaire.

L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption

- Le transport actif



L'absorption minérale

Mécanismes de l'absorption

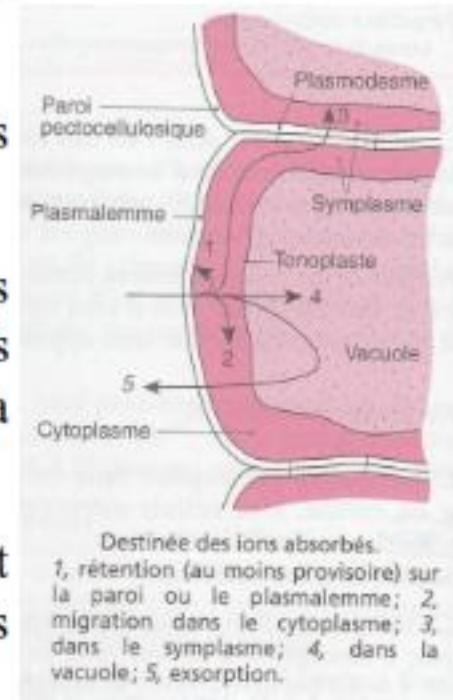
■ Le transport actif

- Cette émission de protons crée la « force motrice protonique », qui permet à son tour d'énergiser le déplacement de 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**.

L'absorption minérale

Destinée des ions absorbés:

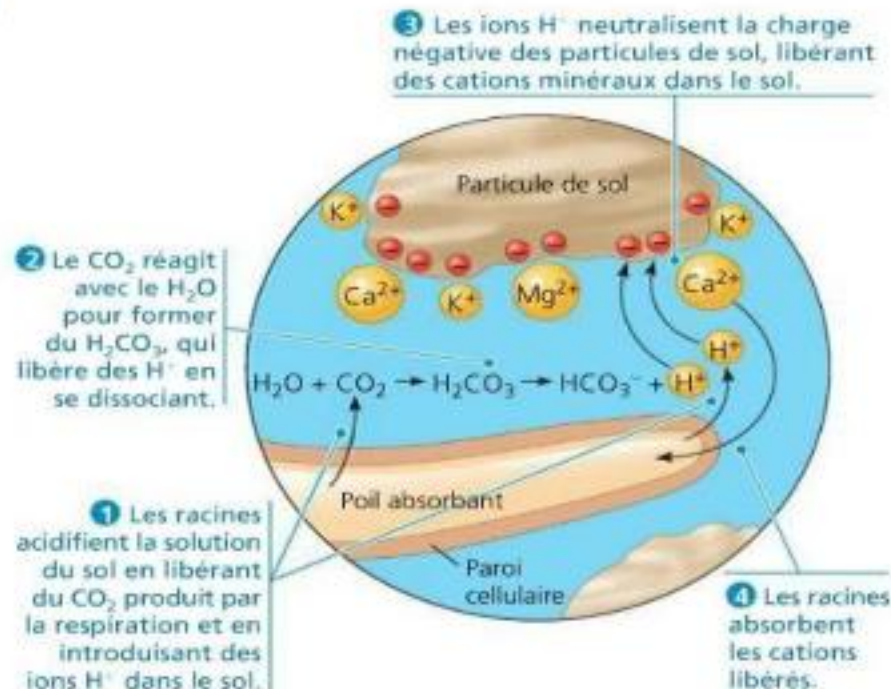
- Les ions absorbés doivent franchir la paroi puis la membrane plasmique. Certains comme Ca^{2+} ou Na^{+} sont lors de ce passage retenus en proportion importante.
- D'autres comme K^{+} , NO_3 ou H_2PO_4 migrent vers l'intérieur.
- Dans le cytoplasme, les ions se fixent sur les différentes structures (RE, ribosomes), pénètrent dans les organites cellulaires (mitochondries, chloroplastes) ou rentrent dans la vacuole.
- Le passage d'une cellule à l'autre se fait le plus souvent directement de cytoplasme à cytoplasme (symplasma) sans passage par la vacuole.
- Une partie des ions absorbés peut ressortir, on dit qu'ils sont exorbables.



L'absorption minérale

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

- C'est la capacité d'un sol 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, à travers la solution du sol (les plantes absorbent les nutriments à partir de la solution du sol).



L'échange de cations dans le sol.

L'absorption minérale

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

- Elle correspond donc au nombre total de charges négatives que porte une masse de sol. Autrement dit, quantité totale de cations échangeables que le sol peut adsorber.
- Elle s'exprime en milliéquivalents par 100 g de sol ou de toute autre substance adsorbante, comme l'argile.
- L'analyse chimique du sol a pour but d'évaluer son niveau de fertilité minérale pour une culture végétale donnée. Les résultats analytiques permettent l'élaboration d'un conseil de fumure adapté à la culture envisagée.

Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Rôle des nutriments et symptômes de carence

- La croissance et le développement des plantes sont étroitement liés à leurs teneurs en éléments minéraux.
- A fortes teneurs en éléments minéraux, la croissance des plantes est réduite suite à des phénomènes de **toxicité**.
- Le manque de ces éléments dans le sol ou dans les plantes peut nuire à la production végétale. La plante est dite **carencée**.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

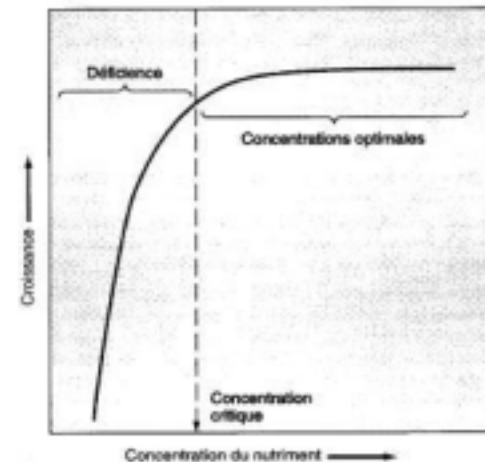
- Une alimentation inadéquate en éléments minéraux essentiels se traduit par des désordres physiologiques et métaboliques et des symptômes caractéristiques.
- En générale, les symptômes des carences sont plus visibles sur les feuilles et se traduisent en Chloroses, Nécroses, Déformations...



Symptômes de carences nutritionnelles chez la tomate

Rôle des nutriments et symptômes de carence

- Pour chaque plante le besoin en un élément particulier, est habituellement défini par le terme de concentration critique. Elle correspond à la concentration de l'élément, mesurée dans les tissus et située juste en **dessous** de la concentration qui permet la croissance maximale.
- Aux concentration **supérieurs** à la concentration critique, des augmentations du contenu en nutriments n'exercent aucun effet particulier sur la croissance et le contenu en nutriment est dit optimal.
- En **dessous** de la concentration critique, la croissance diminue brutalement lorsque le contenu en nutriment devient déficient.



Représentation graphique de la croissance en fonction de la concentration en nutriment des tissus. La concentration critique est celle qui réduit la croissance de 10 %.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Les macroéléments

- Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène ne seront pas traités puisqu'ils constituent le squelette de toutes les molécules organiques.
- Une carence en carbone entraine rapidement la mort de la plante, tandis qu'un déficit hydrique entraine rapidement la fanaison de la plante.
- On se limitera aux carences des éléments essentiels qui sont prélevés par la plante à partir de la solution du sol:

Rôle des nutriments et symptômes de carence

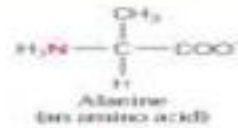
L'azote (N)

- Il est absorbé sous forme de nitrate (NO_3^-), et dans quelques cas rare sous forme de (NH_4^+).
- De tous les minéraux, l'azote est celui dont la carence restreint le plus la croissance des végétaux et le rendement des cultures.
- 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.
- L'azote représente environ 2% de la matière sèche des végétaux.
- C'est un constituant des acides aminés, protéines, bases puriques et pyrimidiques, chlorophylles, cytochromes, phytohormones (auxines, cytokinines,...) et de plusieurs vitamines.

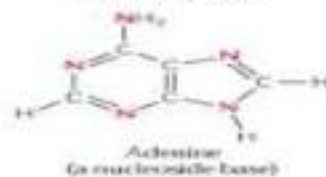
Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)

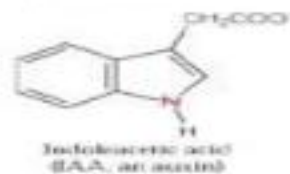
Alanine (AA)



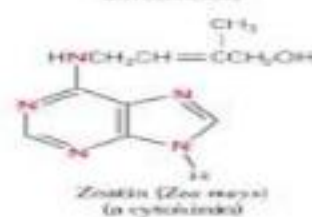
Adénine



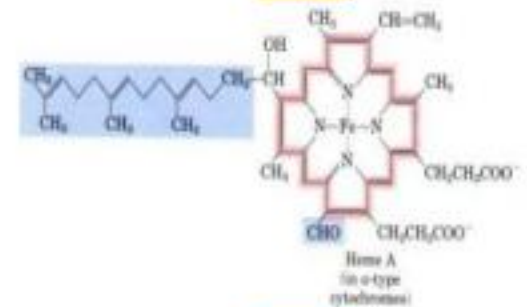
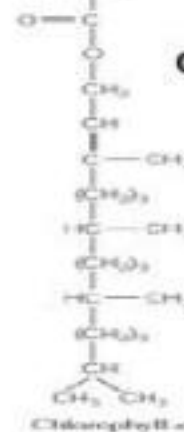
AIA (auxine)



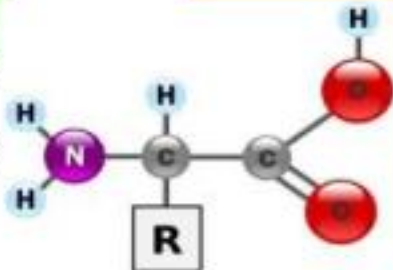
Nicotine



Chlorophylle



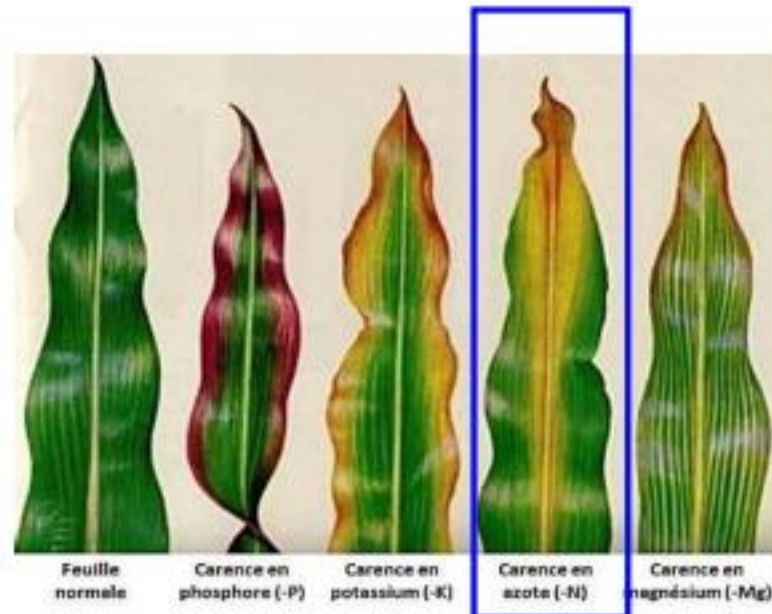
Zéatine (cytokinine)



Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)

- Symptômes de la carence en azote:
- 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.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)

▪ Symptômes de la carence en azote:

- Les différents organes de la plante sont très petits, la plante est chétive et des rendements sont diminués.
- Faible densité des peuplements
- Fructification précoce
- Teneur réduite en protéines

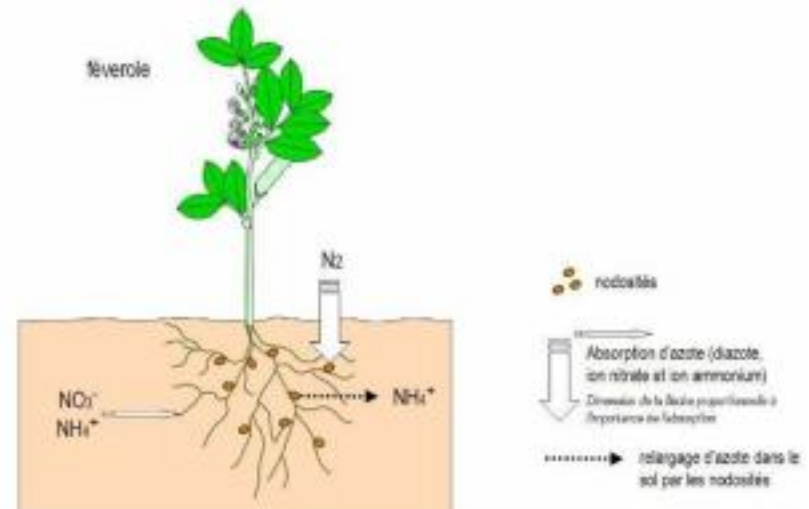


Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)

- Symptômes de la carence en azote:
- Il peut paraître curieux que des végétaux souffrent d'une carence en azote, alors que cet élément est très abondant dans l'air.
- En effet, l'azote représente environ 80% de l'atmosphère terrestre, où il constitue une grande source de fertilisants estimée à 4.10¹⁵ tonnes, mais sous sa forme gazeuse N₂, il ne peut pas être utilisé directement par les plantes qui ne peuvent l'assimiler que sous forme minérale, ammoniacale (ion ammonium: NH₄⁺) ou nitrique (NO₃⁻). Néanmoins il y'a des exceptions, certains)



Rôle des nutriments et symptômes de carence

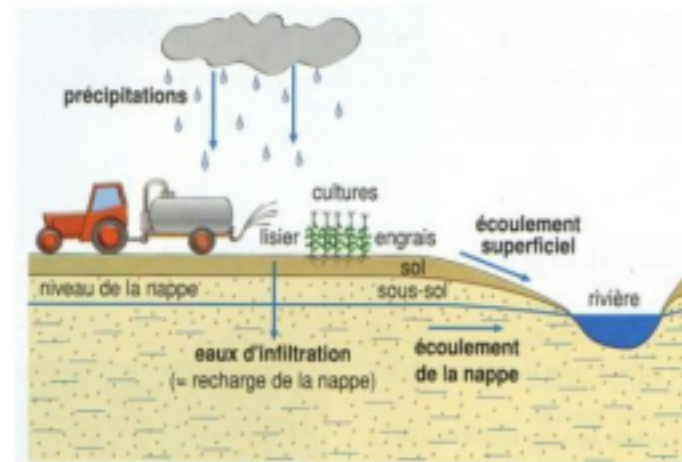
L'azote (N)

- Symptômes de la carence en azote:
- Par comparaison, la photosynthèse se déroule très bien chez tous les végétaux verts bien que la teneur en CO₂ dans l'atmosphère terrestre ne soit que de 0,03%. C'est un des paradoxes de la nutrition azotée des végétaux.
- 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 formés 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.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)

- Symptômes de la carence en azote:
- Exemple de l'impact des engrais sur l'environnement:
- Apportés à un sol, les NO_3^- qui sont des anions, ne sont pas adsorbés par les colloïdes de ce sol et sont, par conséquent, entraînés par lessivage quand les précipitations l'emportent sur l'évaporation.
- Les NO_3^- ainsi lessivés sont donc perdus du sol et atteignent les nappes phréatiques, ou les eaux souterraines, où ils vont se concentrer pour provoquer de graves problèmes de pollution.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)

La nutrition des végétaux comporte souvent des associations avec d'autres organismes:

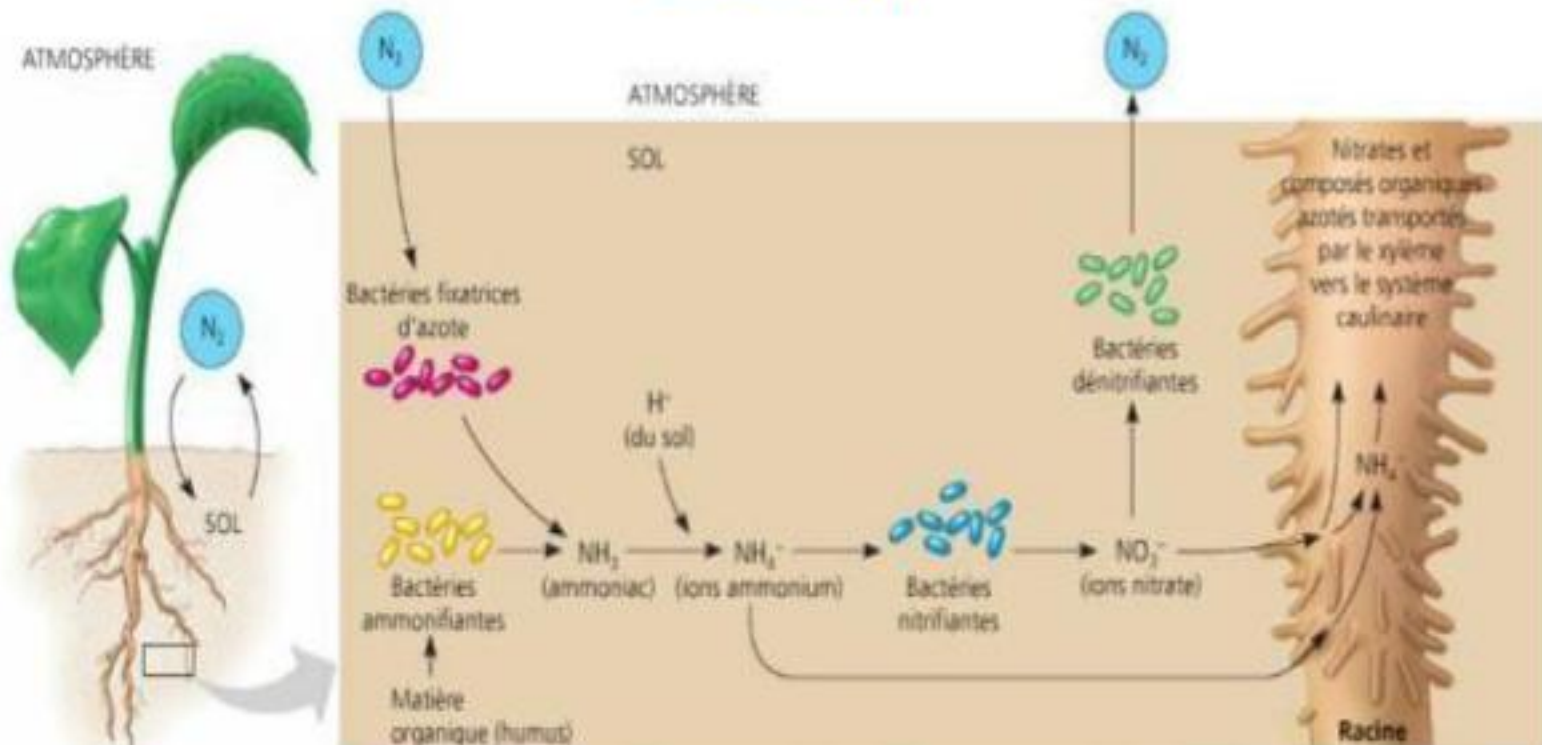
➤ Les bactéries du sol:

- Certaines bactéries du sol participent à des échanges chimiques mutuellement bénéfiques avec les racines des plantes.
- Exemple les rhizobactéries: elles vivent dans la rhizosphère, la couche de sol qui entoure les racines des plantes.
- Jusqu'à 20% de la production photosynthétique des plantes alimente les organismes dans cet écosystème.
- Certaines peuvent produire des substances chimiques qui favorisent la croissance, d'autres produisent des antibiotiques, d'autres absorbent les métaux toxiques ou rendent les nutriments plus facilement assimilables par les racines.

Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)



Le rôle des bactéries du sol dans la nutrition azotée des Végétaux. Deux types de bactéries du sol fournissent de l'ammonium aux Végétaux: celles qui fixent le N_2 atmosphérique (bactéries fixatrices d'azote) et celles qui décomposent la matière organique (bactéries ammonifiantes). Bien qu'ils absorbent une certaine quantité d'ammonium, les Végétaux absorbent principalement des nitrates, produits par les bactéries nitrifiantes à partir de l'ammonium. Ces Végétaux réduisent ensuite les nitrates en ammonium avant d'incorporer l'azote dans les composés organiques.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)

- Les champignons du sol:
 - Certains champignons forment également des associations avec les racines et jouent un rôle important dans la nutrition des plantes. Les mycorhizes sont des associations mutualistes entre les racines et le mycélium des champignons.
 - Le champignon bénéficie d'une réserve constante de glucides fourni par la plante, en retour il augmente la surface d'absorption des racines pour l'eau et absorbe de manière sélective les phosphates et d'autres minéraux du sol qu'il transfère à la plante.
 - Il stimule le développement des racines et peut produire des antibiotiques qui protègent la plante.
 - On trouve les Ectomycorhizes et les Endomycorhizes.

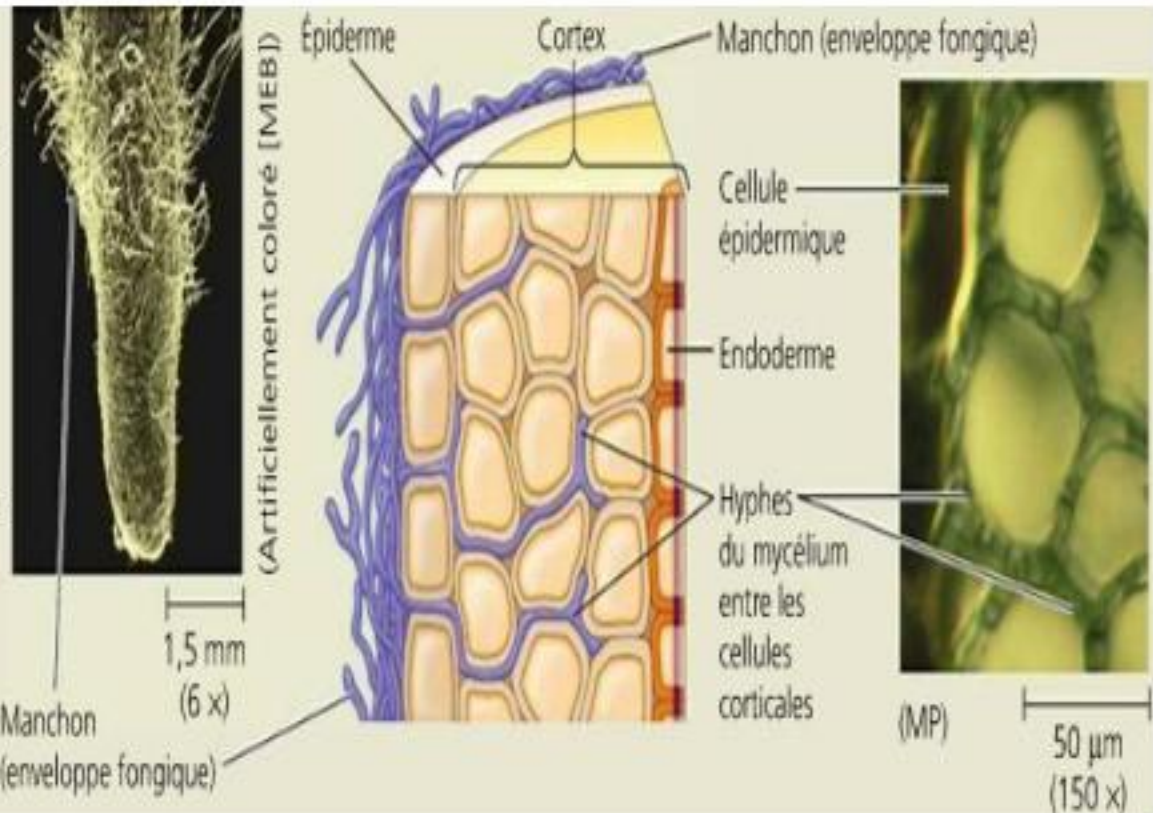
Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Rôle des nutriments et symptômes de carence

L'azote (N)

- Les Ectomycorhize

Ectomycorhizes. Le mycélium du champignon forme un manchon qui enveloppe la racine. Les hyphes s'étendent dans le sol pour en absorber l'eau et les minéraux, surtout les phosphates. Elles pénètrent également dans les interstices du cortex de la racine, offrant ainsi une grande surface pour l'échange de nutriments entre le champignon et la plante hôte.



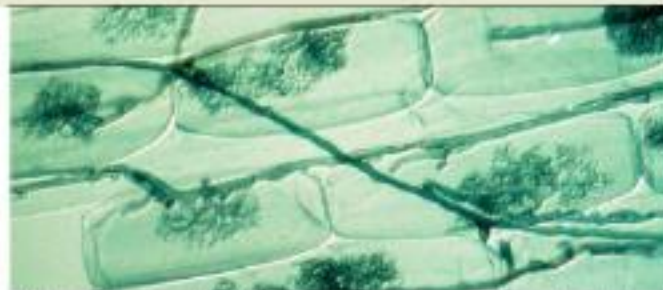
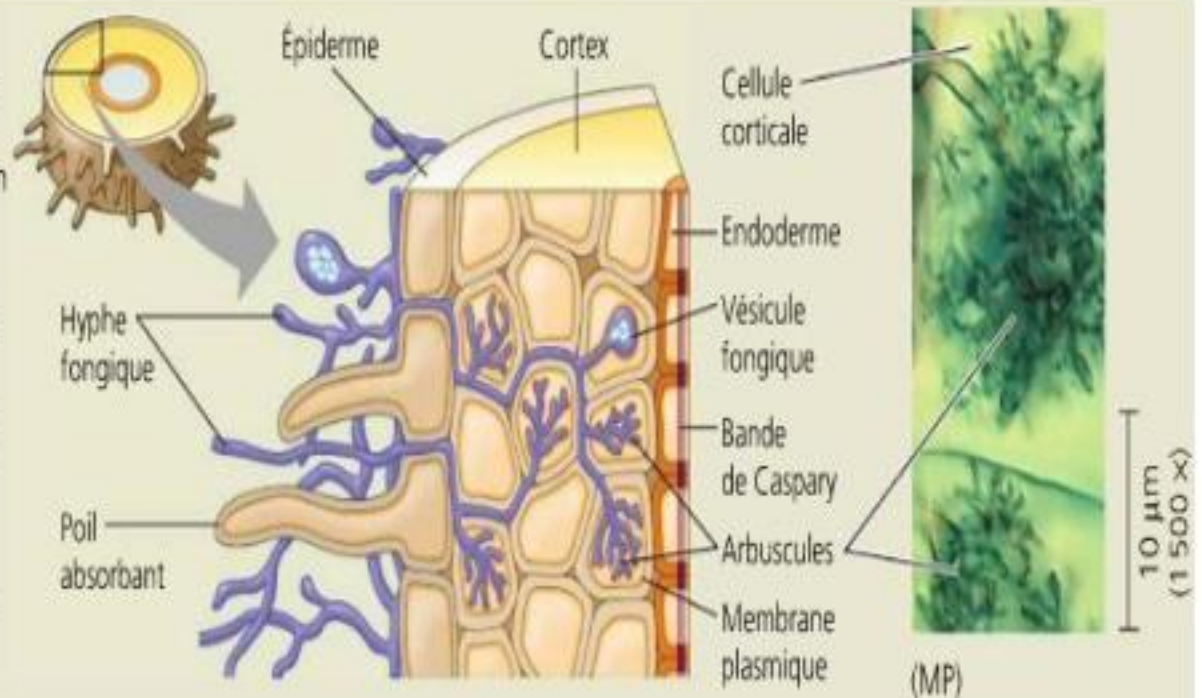
Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Rôle des nutriments et symptômes de carence

- les Endomycorhizes.

i) Mycorhizes à arbuscules

(endomycorhizes). Aucun manchon n'enveloppe la racine, bien que les hyphes microscopiques du champignon s'étendent à l'intérieur de cette dernière. Dans le cortex de la racine, le champignon développe une grande surface de contact avec la plante, grâce aux ramifications de ses hyphes qui forment des arbuscules. Les arbuscules fournissent une très grande surface de contact pour l'échange de nutriments. Les hyphes traversent les parois cellulaires, mais pas les membranes plasmiques des cellules du cortex.



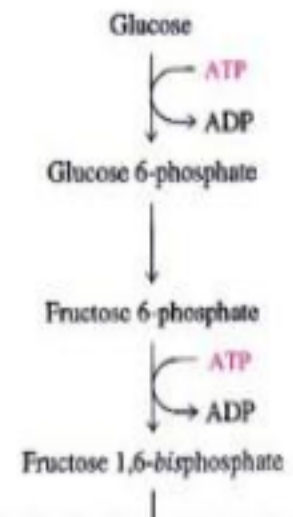
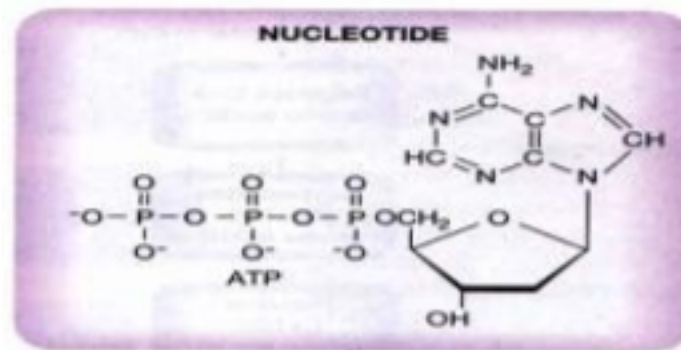
Mycorhizie arbusculaire. On voit très bien la structure arbusculaire se développer à l'intérieur des cellules végétales.
Source : Lady Penner, 2000

Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le phosphore (P)

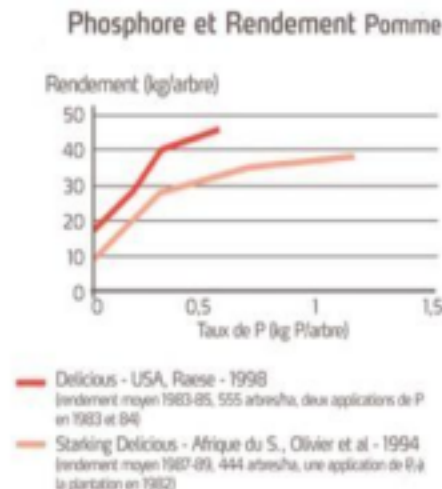
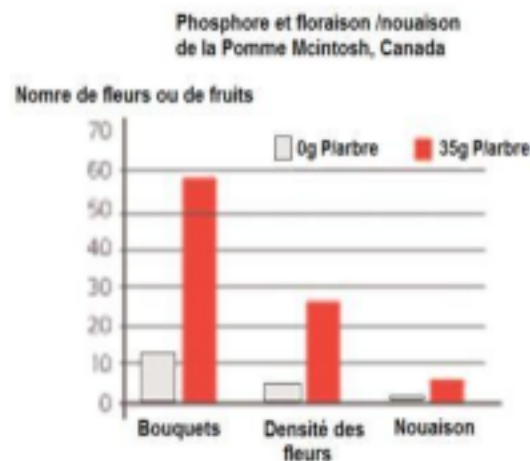
- Il est disponible dans la solution du sol sous forme d'acide phosphorique (H_3PO_4), il intervient dans:
 - les transferts énergétiques: processus de stockage et de transport de l'énergie dans les cellules (ATP),
 - dans la transmission de caractères héréditaires (acides nucléiques),
 - la photosynthèse,
 - la dégradation des glucides.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le phosphore (P)

- Le phosphore est un constituant important des protéines phosphorées (nucléoprotéines, phosphoprotéines, lécithines, etc.).
- 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.
- la présence de phosphore dans les plantes joue un rôle crucial pour les animaux qui les consomment.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le phosphore (P)

- **Les carences en P:**
 - Croissance ralentie.
 - Développement des racines et densité des populations réduits.
 - Floraison et maturation retardées.
 - Diminution de la production de protéines et de vitamines.
 - Conservation des légumes ainsi que la résistance au gel est moins bonne



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le phosphore (P)

- Certaines espèces végétales, en situation de carence en P, développent des racines spéciales : appelées **protéoïde** (racines en touffes, de l'anglais cluster roots) capables de rendre le phosphore du sol disponible à la plante.



Racines proteoïdes

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le phosphore (P)

- Symptômes des carences en phosphore
- La manifestation la plus caractéristique est une intense coloration verte des feuilles.
- Les feuilles peuvent subir des malformations et des nécroses.
- Dans certains cas, des anthocyanes s'accumulent conférant aux feuilles une décoloration qui varie du vert foncé au pourpre.



Carence en phosphore chez la Vigne



Feuille normale Carence en phosphore (-P)



Carence en Phosphore chez le fraisier

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le potassium (K)

- Il est absorbé sous la forme du cation monovalent K^+ .
- Il joue le rôle d'activateur de différentes enzymes
- Il joue un rôle dans l'osmorégulation
- Régularise l'économie de l'eau dans la plante et augmente ainsi la résistance à la sécheresse.
- Ion principal des solutions cytoplasmiques.
- Joue un rôle fondamental dans les processus d'échanges transmembranaires passifs et actifs dans les cellules.
- Améliore le rendement de l'assimilation chlorophyllienne et la résistance au gel.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le potassium (K)

- Les légumineuses, la pomme de terre, les betteraves, le maïs et l'avoine ont des besoins très élevés en K^+



Légumineuses



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le potassium (K)

- Conséquence de la carence en potassium
 - Production de matière sèche restreinte (hydrates de carbone, protéines).
 - Goût moins agréable (fruits et légumes).
 - Réduction de la résistance au gel et à la sécheresse.
 - Dérèglement de la transpiration.
 - Mauvaise conservation des fruits et légumes.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le potassium (K)

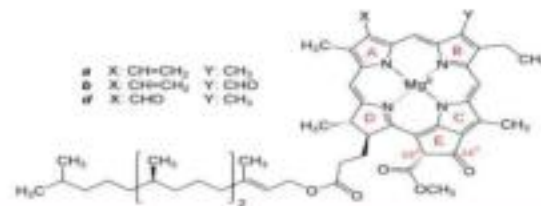
- Les feuilles sont d'abord vert brunâtre, puis peuvent prendre une coloration rouge brunâtre
- Une chlorose apparaît et se développe à partir du bord des feuilles âgées, qui rapidement finissent par dépérir
- Les plantes manquent de turgescence et flétrissent (port flasque).
- Les feuilles se recourbent ou s'enroulent.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le magnésium (Mg)

- Il est absorbé sous forme d'un cation Mg^{2+}
- Le magnésium est un constituant de la chlorophylle. Il favorise la synthèse des pigments (chlorophylle, xanthophylle et carotène).
- Il entre dans la composition de composés organiques essentiels comme la phytine (graine) et la pectine.
- C'est aussi un activateur d'enzymes, en particulier celles qui sont à l'origine de la protéosynthèse.
- Il favorise l'absorption du phosphore et son transport dans les graines où il favorise la synthèse des lipides.



Structure des chlorophylles a, b et d.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le magnésium (Mg)

- La présence de magnésium dans les plantes est indispensable aux animaux herbivores qui, sinon, développent ce que l'on appelle la tétanie d'herbage (ou tétanie hypomagnésienne), maladie due à un déficit en ~~excès~~ de potassium dans les plantes.
- Le magnésium évite l'absorption excessive de potassium par les plantes.
- Dans le sol, un excès d'engrais azoté et potassique entraîne un lessivage du magnésium présent après une pluie.

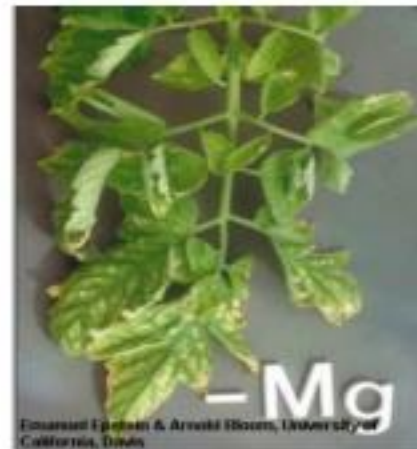


Vache victime d'une tétanie d'herbage.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le magnésium (Mg)

- Symptômes de la carence en Magnésium:
 - Entre les nervures des feuilles apparaissent des jaunissements linéaires, au niveau des herbes de prairie et céréales.
 - Chez les dicotylédones: les feuilles se décolorent en jaune entre les nervures à partir de la base, puis ces plages brunissent.

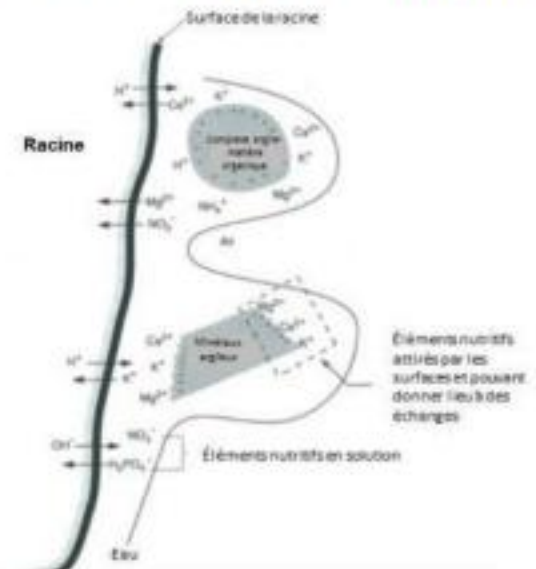
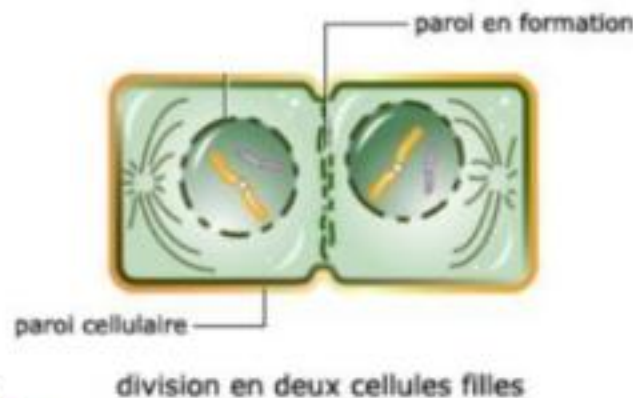


Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le calcium (Ca)

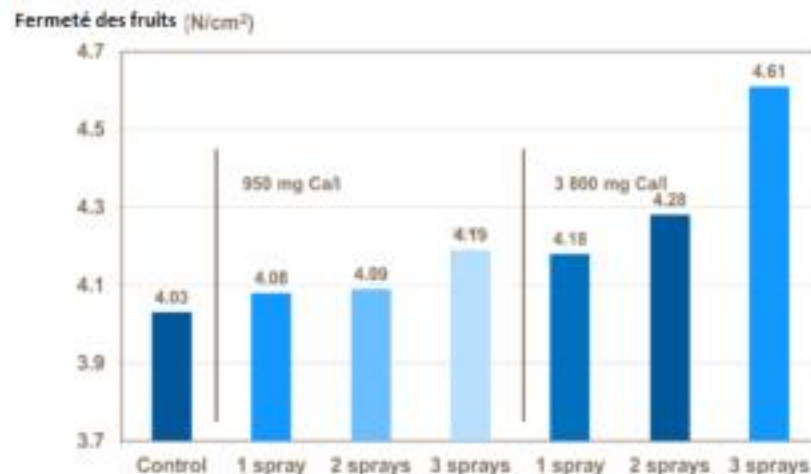
- Le Calcium est absorbé sous forme de cation divalent (Ca^{2+}), il est un macroélément essentiel pour toutes les plantes supérieures:
- Il joue un rôle important lors de la division cellulaire, en formant des pectates de calcium au niveau de la lamelle moyenne qui apparait entre les deux cellules filles.
- Il joue un rôle important dans la régulation des échanges ioniques entre les racines et leur milieu.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le calcium (Ca)

- Il favorise la formation, la qualité et la fermeté des fruits.
- L'excès de Calcium réduit la solubilité du Zinc du sol et entrave sa disponibilité aux plantes à cause de l'antagonisme $\text{Ca}^{2+}/\text{Zn}^{2+}$.
- Il possède un rôle important dans les échanges transmembranaires.
- Les plantes ont besoin de Ca^{2+} au niveau de la structure de la membrane cellulaire.



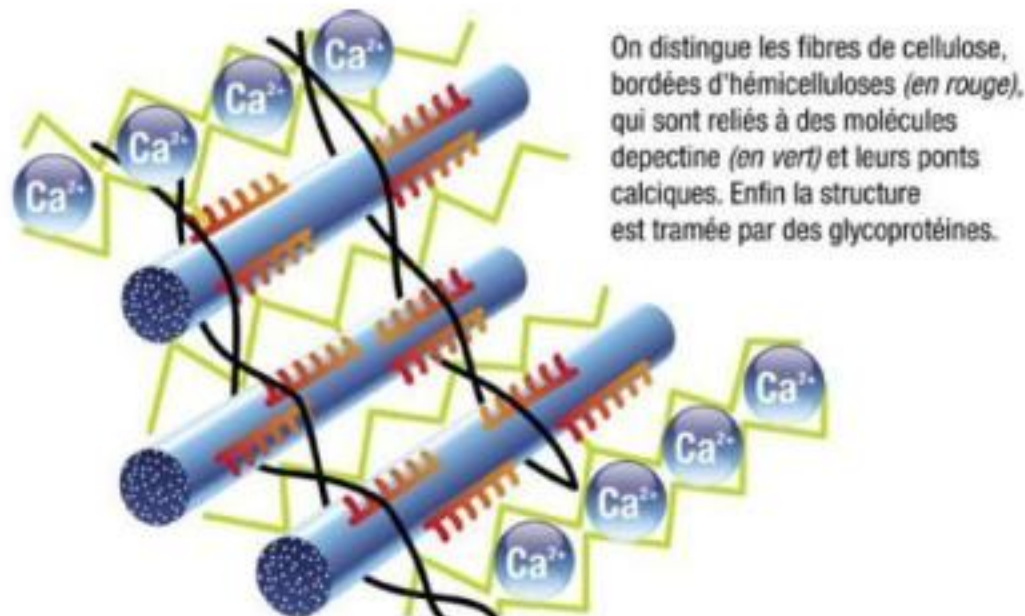
REF: Fecteau et al., 1987

Effet de la pulvérisation foliaire de Calcium sur la fermeté des fruits de cerises.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le calcium (Ca)

- C'est un élément fondamental des parois cellulaires des plantes. C'est lui qui donne leur résistance tissulaire aux membranes pectiques, il a une grande influence sur certaines caractéristiques des cultures comme la rigidité des tiges de céréales et la qualité des fruits.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le calcium (Ca)

- Symptôme de la carence en calcium:
- Puisqu'il joue un rôle dans les cellules en division, les symptômes de carence calcique se manifestent dans les régions méristématiques, là où les cellules sont en division et où de nouvelles parois cellulaires sont en formation.
- Les jeunes feuilles sont déformées et nécrosées avec des taches brunes à jaunâtres.



Symptômes de carence en calcium (nécrose apicale, tomate)

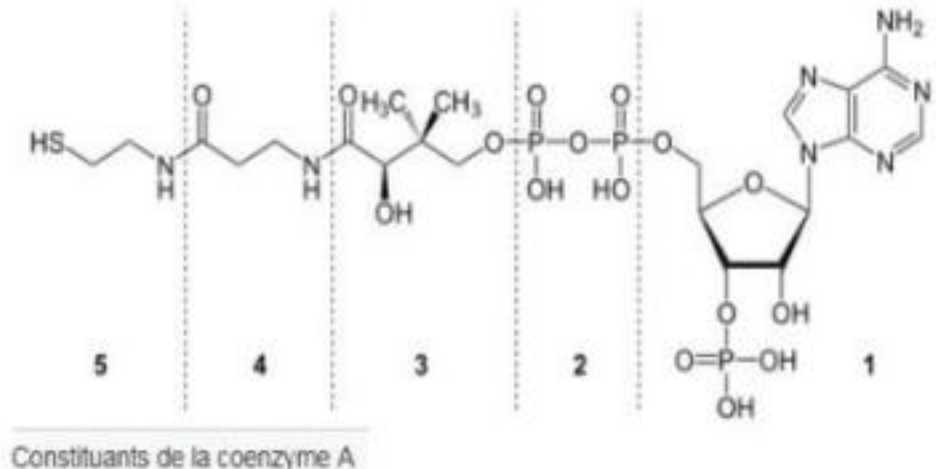
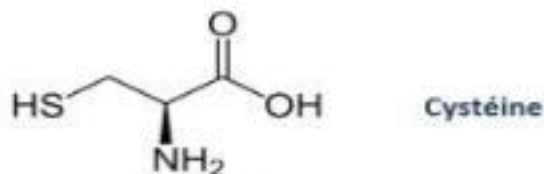
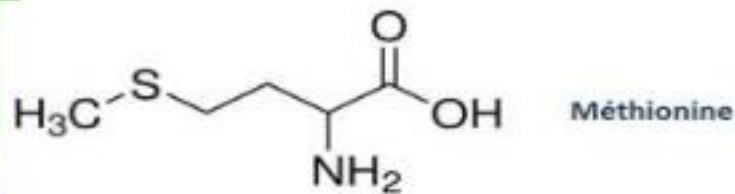


Chapitre I : Nutrition Hydrique & Minérale

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le soufre (S)

- Il est absorbé par les plantes sous la forme de sulfates (SO_4^{2-}).
- Le soufre est le constituant essentiel des acides aminés soufrés (méthionine et cystéine) que la plupart des animaux ne savent pas synthétiser et qu'ils trouvent dans les plantes qu'ils consomment.
- Le soufre est un constituant de certaines vitamines et du Coenzyme A, élément important de la respiration.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le soufre (S)

- Certaines plantes comme les liliacées, les légumineuses ou les crucifères sont riches en ces acides aminés soufrés, et plus généralement en produits soufrés.

Liliacées



Légumineuse



Crucifère



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le soufre (S)

- A cause de la diminution de la synthèse protéique, la capacité de former des complexes chlorophylle-protéines stables est diminuée, ce qui provoque des chloroses qui ressemblent aux carences en azote.



Le chrysanthème de gauche est normal, tandis que celui de droite a une carence en soufre.

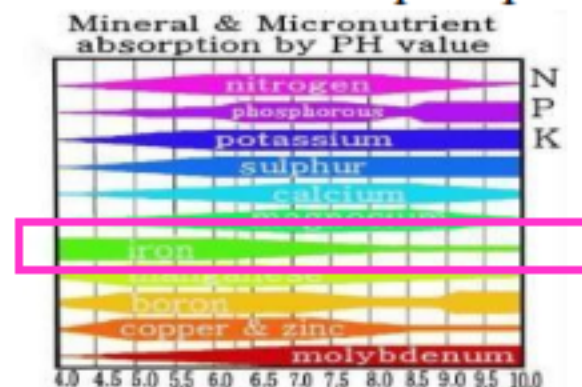


Les oligoéléments

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le fer (Fe)

- Il est absorbé sous la forme de l'ion ferrique (Fe^{3+}) ou ferreux (Fe^{2+}).
- C'est l'un des éléments les plus communs de la croûte terrestre. Cependant, il existe des problèmes liés à sa disponibilité aux plantes, qui varie suivant les conditions du sol.
- Bien que la majorité des sols renferment des quantités suffisantes de fer total, des conditions de pH élevé et la présence de carbonate de calcium (CaCO_3) libre rendent fréquemment le fer insuffisamment disponible et donc inadéquat pour une croissance végétale normale.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le fer (Fe)

- Carence en Fer
- Sa carence provoque la chlorose, car bien qu'il ne soit pas un constituant de la chlorophylle, le fer est indispensable à sa formation.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le cuivre (Cu)

- Le cuivre est absorbé sous la forme de l'ion bivalent Cu^{2+}
- Le cuivre forme facilement des chélats avec les acides humiques.
- Il est cofacteur de différents enzymes d'oxydation lors de la photosynthèse et de la respiration.
- Les symptômes de la carence en cuivre sont:
 - Croissance réduite,
 - Déformation des jeunes feuilles,
 - Chute des jeunes feuilles .



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le zinc (Zn)

- Il est absorbé sous la forme de cation bivalent Zn^{2+} .
- C'est un activateur de nombreuses enzymes d'oxydation.
- Il joue un rôle dans le métabolisme de l'hormone de croissance: Auxine. Une précurseur de l'AIA (auxine).
- Hypothèse suggère que le zinc est nécessaire à la synthèse du tryptophane, précurseur de l'AIA (auxine).
- Les symptômes de la carence en zinc sont caractérisés par des entrenœuds raccourcis et des petites feuilles et des chlorose débutant sur le pourtour des feuilles en développement



Pomme de terre

Plante saine

Plante carencée en Zn^{2+}

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le molybdène (Mo)

- Absorbé par les plantes sous forme MoO_4^{2-} .
- Les besoins en molybdène sont parmi les plus faibles, ils sont en relation avec le métabolisme de l'azote. En effet il est le constituant de la nitrate réductase et de la nitrogénase.
- Les symptômes carence en Mo sont voisins de ceux d'une carence en azote, avec des chloroses.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le manganèse (Mn)

- Il est absorbé par la plante sous la forme de cation bivalent Mn^{2+} .
- Intervient comme cofacteur de décarboxylases et de déshydrogénases du cycle de Krebs.
- Il joue un rôle dans la production d'oxygène lors de la photosynthèse, il est impliqué dans l'accumulation des charges lors de l'oxydation de la molécule d'eau.
- La carence provoque une chlorose s'étalant entre les nervures de la feuille et une décoloration et déformation des graines de légumineuses.



Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le bore (B)

- L'ion borate H_2BO_3^- est strictement indispensable au fonctionnement des méristèmes.
- Agit dans le métabolisme et le transport des glucides.
- Sa carence s'accompagne par une accumulation anormale de sucre ou d'amidon.
- Sa carence se caractérise par des nécroses et pourritures au niveau des méristème.



Betterave

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le cobalt (Co)

- Il est essentiel pour la croissance des légumineuses qui sont atmosphérique.
- Il est indispensable aux bactéries et aux champignons de la rhizosphère.

Rôle des nutriments et symptômes de carence

Le chlore:

- L'ion chlorure Cl^- , très répandu dans la nature est très soluble. Il est donc rarement en quantité insuffisante.
- Il est indispensable dans les réactions de photosynthèse.
- Il maintient la neutralité électrique à travers la membrane plasmique.
- C'est un des solutés osmotiquement actifs dans la vacuole.
- Il est nécessaire dans les divisions cellulaires dans les feuilles.

Carences:

- Croissance réduite
- Flétrissement des extrémités des feuilles
- Chlorose généralisée

