

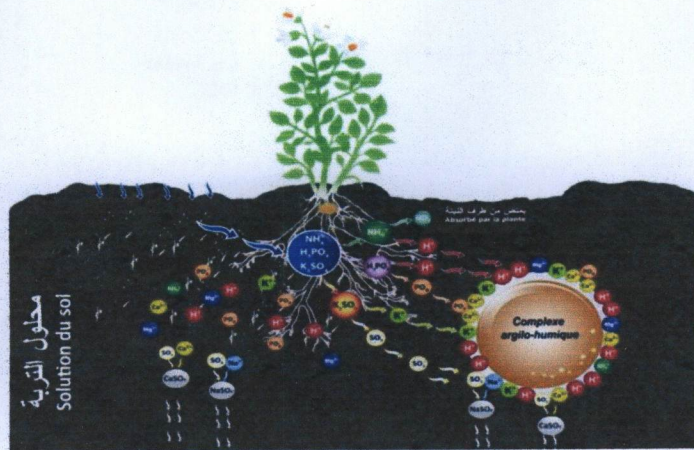
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EI-HARRACH-ALGER



Département : Productions végétales
Graduation : Cinquième année

Polycopie de cours

Module : Nutrition minérale



Dr. LATATI Mourad

Promotion 5^{ème} Année Productions végétales, ENSA, Alger



Table des matières

Partie 1 : Généralités sur la Nutrition Minérale	2
Chapitre 1 : Généralités sur la nutrition minérale des plantes	3
Chapitre 2 : Transport et transfert des éléments minéraux du sol vers la plante	17
Chapitre 3 : Nutrition Azotée	33
Chapitre 4 : Nutrition phosphatée	53
Chapitre 5 : Nutrition de la plante et oligo-élément (Ca, K et Mg....)	62
Partie 2 : Fertilisation	69
Chapitre 6 : Généralité sur la fertilisation	74
Chapitre 7 : Raisonnement de la fertilisation : définition et principes	75
Chapitre 8 : La fertilisation phosphatée des plantes	83
Chapitre 9 : La fertilisation en oligo-éléments	92
Chapitre 10 : la fertilisation organique.....	97
Chapitre 11 : La fertigation chez les espèces annuelles	102
Chapitre 12 : La fertilisation foliaire chez les annuelles	107
Chapitre 13 La fertilisation des arbres fruitiers	114
Références	120



Partie 1 : Généralités sur la Nutrition Minérale



Chapitre 1 : Généralités sur la nutrition minérale des plantes

1. Définitions et notions de bases

Nutrition Minérale : L'étude de comment les plantes obtiennent, métabolisent et utilisent les éléments minéraux.

Minérale : Elément Inorganique, acquis principalement sous la forme d'ions inorganique à partir du sol.

Les minéraux sont nécessaires pour la croissance de tous les organismes vivants.

Les minéraux entrent dans la biosphère principalement à travers le système racinaire des plantes, accompagnant l'eau absorbé dans le profil du sol.

Les minéraux absorbés sont ensuite transporté dans la plant pour fournir les nutriments aux différents tissus.

Nutriment : Substance nécessaire pour survivre ou nécessaire pour la synthèse de composants organiques.

L'utilisation de fertilisants pour apporter les nutriments aux cultures est un aspect important de la chaîne de production agro-alimentaire.

2. Classification des éléments minéraux

Tableau 1 : Liste des éléments essentiels

Element	Chemical symbol	Concentration in dry matter (% or ppm) ^a	Relative number of atoms with respect to molybdenum
Obtained from water or carbon dioxide			
Hydrogen	H	6	60,000,000
Carbon	C	45	40,000,000
Oxygen	O	45	30,000,000
Obtained from the soil			
Macronutrients			
Nitrogen	N	1.5	1,000,000
Potassium	K	1.0	250,000
Calcium	Ca	0.5	125,000
Magnesium	Mg	0.2	80,000
Phosphorus	P	0.2	60,000
Sulfur	S	0.1	30,000
Silicon	Si	0.1	30,000
Micronutrients			
Chlorine	Cl	100	3,000
Iron	Fe	100	2,000
Boron	B	20	2,000
Manganese	Mn	50	1,000
Sodium	Na	10	400
Zinc	Zn	20	300
Copper	Cu	6	100
Nickel	Ni	0.1	2
Molybdenum	Mo	0.1	1

Parmi les éléments minéraux, Il y'a 17 éléments qui sont considérés comme essentiels.

Pour être défini comme « essentiel » un élément doit avoir une de ces 2 conditions :

- Sans sa présence la plante ne peut avoir un cycle de vie normal.
- L'élément fait partie d'une molécule essentiel (macromolécule, métabolite...) dans la plante



La majorité de ces éléments rassemblent ces 2 conditions (ex : cofacteur enzymatique...). Il y'a plusieurs façons de classer les éléments minéraux, notamment : Le besoin métabolique pour l'élément minéral :

On distingue ici, les éléments essentiels des éléments bénéfiques.

Tableau 2 : Différences entre éléments essentiels et bénéfiques

Eléments Essentiels	Eléments Bénéfiques
Universel à toutes les plantes	Souvent limité à quelques espèces
Son absence empêche un cycle normal	Stimule la croissance et le développement
Absence = Déficience	Peut-être requis pour quelques espèces
Requis pour certains aspects de la nutrition minérale	

Exemples d'éléments bénéfiques : Sélénium et Cobalt, requis pour les légumineuses uniquement pour le développement des nodules.

a. La quantité requise ou présente dans les tissus

On distingue par les 17 éléments essentiels :

- **9 macronutriments** : (concentration >10 mmol / kg matière sèche) : N, K, Ca, Mg, P, S, Na, (Si)
- **8 micronutriments** : (concentration <10 mmol / kg matière sèche) : Cl, Fe, B, Mn, Zn, Cu, Mo, Ni

b. La mobilité dans la plante

On distingue les éléments qui sont :

- **Mobile** : ex : P, K, Mg
- **Immobile** : ex : Ca, S, Fe, Mn, Zn, Mo

c. La fonction biochimique pour la nutrition minérale

On divise les nutriments en 4 groupes :

- **Groupe 1** : Nutriments qui font partie des composés carbonés. (N, S)
- **Groupe 2** : Nutriments qui sont important pour le stockage d'énergie et la structure (P, Si, B)



Tableaux 3-4 : Micronutriments et macronutriments

TABLE 5.1
Adequate tissue levels of elements that may be required by plants (Part 1)

Element	Chemical symbol	Concentration in dry matter (% or ppm) ^a	Relative number of atoms with respect to molybdenum
Obtained from water or carbon dioxide			
Hydrogen	H	6	60,000,000
Carbon	C	45	40,000,000
Oxygen	O	45	30,000,000
Obtained from the soil			
Macronutrients			
Nitrogen	N	1.5	1,000,000
Potassium	K	1.0	250,000
Calcium	Ca	0.5	125,000
Magnesium	Mg	0.2	80,000
Phosphorus	P	0.2	60,000
Sulfur	S	0.1	30,000
Silicon	Si	0.1	30,000

TABLE 5.1
Adequate tissue levels of elements that may be required by plants (Part 2)

Element	Chemical symbol	Concentration in dry matter (% or ppm) ^a	Relative number of atoms with respect to molybdenum
Obtained from the soil			
Micronutrients			
Chlorine	Cl	100	3,000
Iron	Fe	100	2,000
Boron	B	20	2,000
Manganese	Mn	50	1,000
Sodium	Na	10	400
Zinc	Zn	20	300
Copper	Cu	6	100
Nickel	Ni	0.1	2
Molybdenum	Mo	0.1	1

Source: Epstein 1972, 1999.

^a The values for the nonmineral elements (H, C, O) and the macronutrients are percentages. The values for micronutrients are expressed in parts per million.

PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Table 5.1 (Part 2) © 2002 Sinauer Associates, Inc.

Tableau 5 : Groupe 1 – 2 des nutriments selon la fonction biochimique

Classification of plant mineral nutrients according to biochemical function (Part 1)

Mineral nutrient	Functions
Group 1	Nutrients that are part of carbon compounds
N	Constituent of amino acids, amides, proteins, nucleic acids, nucleotides, coenzymes, hexoamines, etc.
S	Component of cysteine, cystine, methionine, and proteins. Constituent of lipoic acid, coenzyme A, thiamine pyrophosphate, glutathione, biotin, adenosine-5'-phosphosulfate, and 3-phosphoadenosine.
Group 2	Nutrients that are important in energy storage or structural integrity
P	Component of sugar phosphates, nucleic acids, nucleotides, coenzymes, phospholipids, phytic acid, etc. Has a key role in reactions that involve ATP.
Si	Deposited as amorphous silica in cell walls. Contributes to cell wall mechanical properties, including rigidity and elasticity.
B	Complexes with mannitol, mannan, polymannuronic acid, and other constituents of cell walls. Involved in cell elongation and nucleic acid metabolism.

- **Groupe 3 : Nutriments qui subsistent sous forme ionique (K, Ca, Mg, Cl, Mn, Na)**

Tableau 6 : Groupe 3 des nutriments selon la fonction biochimique



- **Groupe 4** : Nutriments qui interviennent dans les réactions redox. (Fe, Zn, Cu, Ni, Mo)

Tableau 6 : Groupe 3 des nutriments selon la fonction biochimique

Classification of plant mineral nutrients according to biochemical function (Part 2)	
Mineral nutrient	Functions
Group 3	Nutrients that remain in ionic form
K	Required as a cofactor for more than 40 enzymes. Principal cation in establishing cell turgor and maintaining cell electroneutrality.
Ca	Constituent of the middle lamella of cell walls. Required as a cofactor by some enzymes involved in the hydrolysis of ATP and phospholipids. Acts as a second messenger in metabolic regulation.
Mg	Required by many enzymes involved in phosphate transfer. Constituent of the chlorophyll molecule.
Cl	Required for the photosynthetic reactions involved in O ₂ evolution.
Mn	Required for activity of some dehydrogenases, decarboxylases, kinases, oxidases, and peroxidases. Involved with other cation-activated enzymes and photosynthetic O ₂ evolution.
Na	Involved with the regeneration of phosphoenolpyruvate in C ₄ and CAM plants. Substitutes for potassium in some functions.

Tableau 7 : Groupe 4 des nutriments selon la fonction biochimique

Classification of plant mineral nutrients according to biochemical function (Part 3)	
Mineral nutrient	Functions
Group 4	Nutrients that are involved in redox reactions
Fe	Constituent of cytochromes and nonheme iron proteins involved in photosynthesis, N ₂ fixation, and respiration.
Zn	Constituent of alcohol dehydrogenase, glutamic dehydrogenase, carbonic anhydrase, etc.
Cu	Component of ascorbic acid oxidase, tyrosinase, monoamine oxidase, uricase, cytochrome oxidase, phenolase, laccase, and plastocyanin.
Ni	Constituent of urease. In N ₂ -fixing bacteria, constituent of hydrogenases.
Mo	Constituent of nitrogenase, nitrate reductase, and xanthine dehydrogenase.

3. La déficience en éléments minéraux :

On parle de déficience minérale quand la concentration d'un nutriment est en dessous de la **concentration critique**. La déficience pour un nutriment, se traduit par des symptômes



visuels, souvent caractéristiques qui reflètent le rôle de ce nutriment dans le métabolisme de la plante. L'apport d'engrais permet d'éviter la déficience de et de ce fait d'augmenter le rendement des cultures.

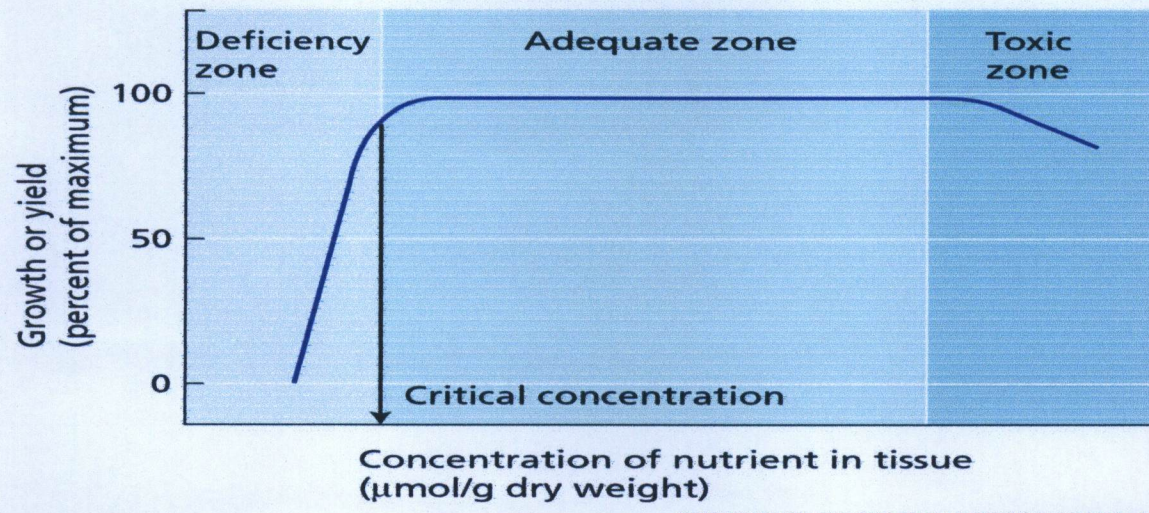


Figure 1 : Concentrations adéquates, déficientes et toxiques

Tableaux 8 : Déficiences en nutriments et symptômes associés

SYMPTOMS	N	P	K	Ca	S	Mg	Fe	Mn	B	Mb	Zn	Cu	Over Fert.
Yellow Upper Leaves	No	No	No	No	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	No
Yellow Middle Leaves	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No
Yellow Lower Leaves	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Red Stems	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Necrosis	No	No	Yes	No	No	Yes	No	Yes	Yes	No	No	Yes	No
Spots	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No	No
Growing Shoots Die	No	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No
White Leaf Tips	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No	Yes	No	No
Stunted Growth	Yes	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Deformed New Growth	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Yellow Tips	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Yes
Twisted Growth	No	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No



Cependant le pH du sol affecte, la croissance racinaire et la vie microbienne du sol, ainsi que la biodisponibilité des nutriments. On estime qu'un pH entre 5.5 et 6.5 serait idéal pour la croissance racinaire et l'absorption de la majorité des nutriments. L'acidité du sol permet de libérer le potassium, magnésium, calcium et manganèse à partir des roches

La décomposition de la matière organique permet de baisser le pH du sol (acidification) ; Alors que les pluies provoque le lessivage des ions, provoquant ainsi l'alcalinisation du sol.

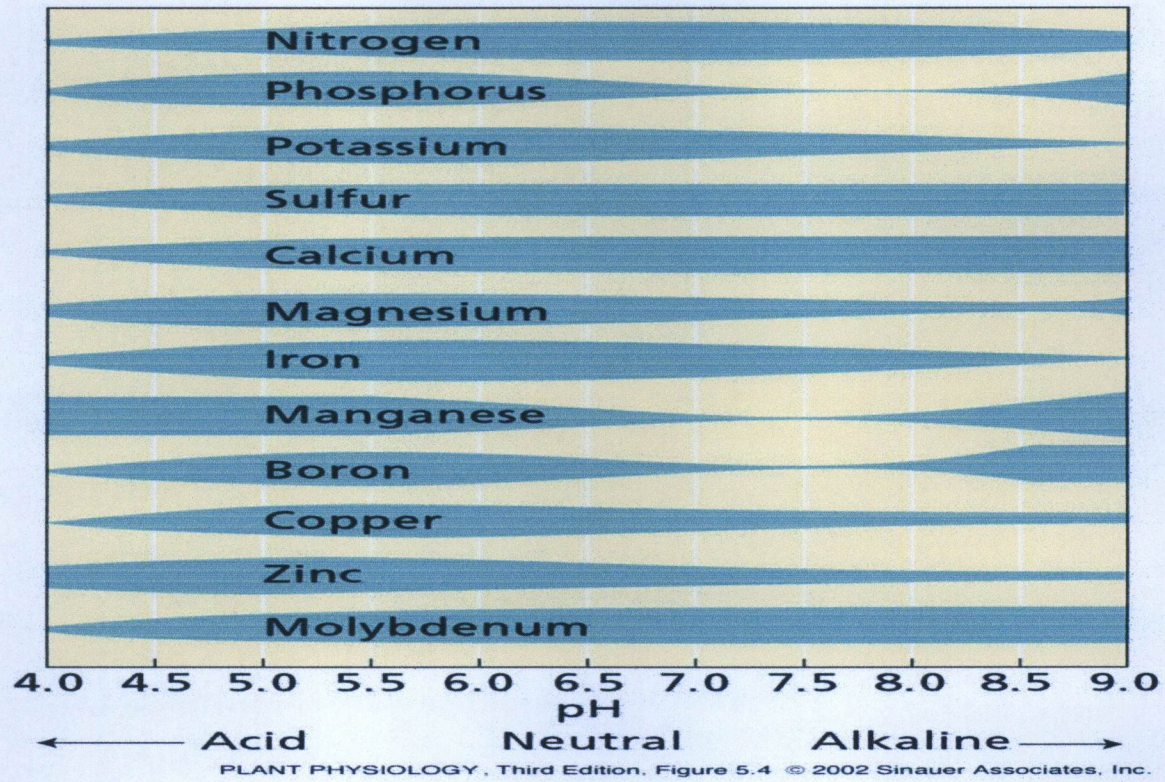


Figure 2 : pH et biodisponibilité des éléments

4. Comment les éléments minéraux sont acquis par la plante ?

La plante acquiert ses nutriments de 3 façons différentes :

- a. Par l'association de la plante avec des *microorganismes* (Fungi, et Rhizobia...)
- b. Absorption par les feuilles

Principalement artificiel, par « **application foliaire** » utilisé pour fournir le Fer, le cuivre et le manganèse par exemple).

Cette méthode a déjà montré son efficacité pour les micronutriments, mais permet aussi d'appliquer rapidement de l'azote directement sur les feuilles pour une correction rapide.

Cette méthode permet de s'affranchir des conditions hydriques qui peuvent entraver l'absorption en cas de sécheresse.



Figure 3 (à gauche) : Symptômes de carences sur feuilles (à corriger rapidement).

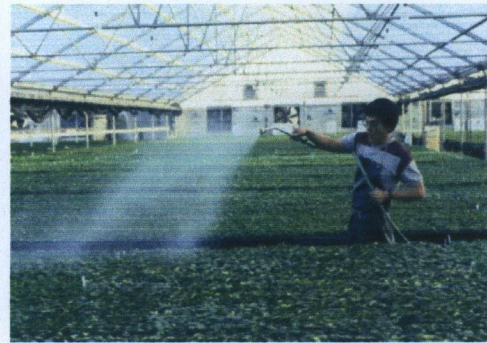


Figure 4 (à droite) : Fertilisation foliaire

c. Absorption des nutriments par les racines à partir de la solution du sol.

La **charge négative du sol** affecte l'adsorption des nutriments. Cette charge est définie par la composition du sol. Les particules du sol peuvent être organiques ou inorganiques. Les particules inorganiques sont caractérisées par leur taille :

- Gravier > 2mm
- Sable grossier 0.2-2mm et Sable fin : 0.02-0.2mm
- Limon : 0.002-0.02 mm et Argile < 0.002mm

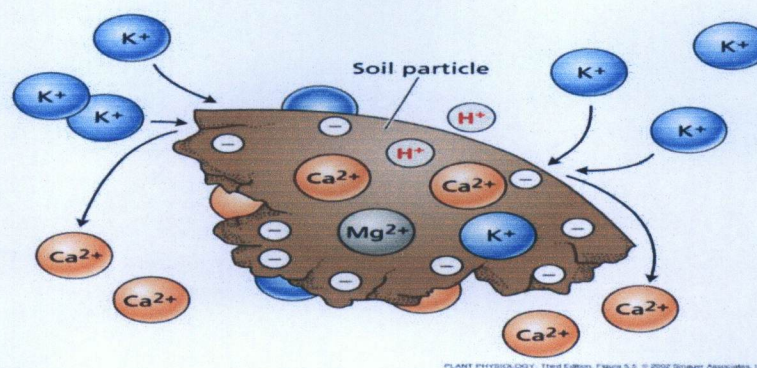


Figure 5 : Charge négative du sol et pouvoir d'adsorption



Au sein même des argiles on retrouve plusieurs types, chacun ayant ses spécificités et influant sur les caractéristiques du sol.

Tableaux 9 : Propriétés de 3 types majeurs d'argiles

Property	Type of clay		
	Montmorillonite	Illite	Kaolinite
Size (μm)	0.01-1.0	0.1-2.0	0.1-5.0
Shape	Irregular flakes	Irregular flakes	Hexagonal crystals
Cohesion	High	Medium	Low
Water-swelling capacity	High	Medium	Low
Cation exchange capacity (milliequivalents 100 g^{-1})	80-100	15-40	3-15

Comme nous l'avons déjà cité le pH affecte la disponibilité des nutriments, la vie microbienne et la croissance racinaire, le Ph étant lui-même affecté par les pluies, le climat, le type de sol, et la décomposition de la matière organique.

La salinité aussi peut limiter la croissance des plantes, celle-ci est causée par l'accumulation des sels minéraux, notamment les ions sodium.

La **salinisation** est significative dans les régions arides. Dans ces sols salins ce sont les plantes halophytes qui arrivent à survivre par leur adaptation, alors que les glycophytes y sont sensibles.

Le système de cultures affecte le pH et la biodisponibilité des éléments, de par de nombreux mécanismes, tel que la sécrétion d'exsudats racinaires etc...

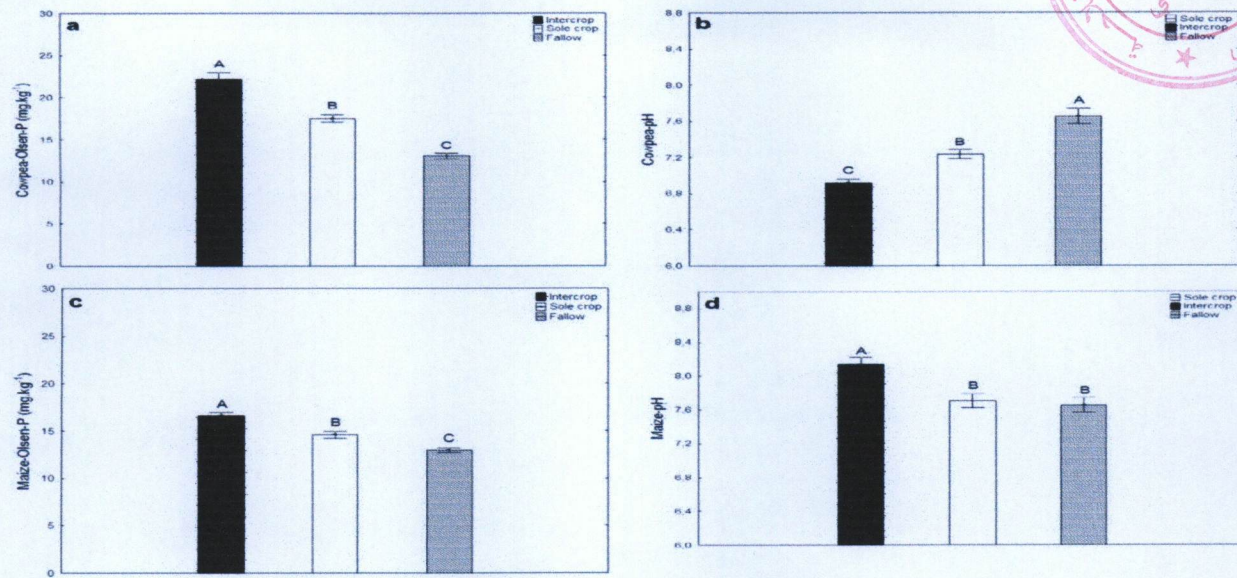


Figure 6 : Disponibilité du phosphore et pH du sol sous 3 systèmes de culture différents (monoculture, intercropping, jachère)

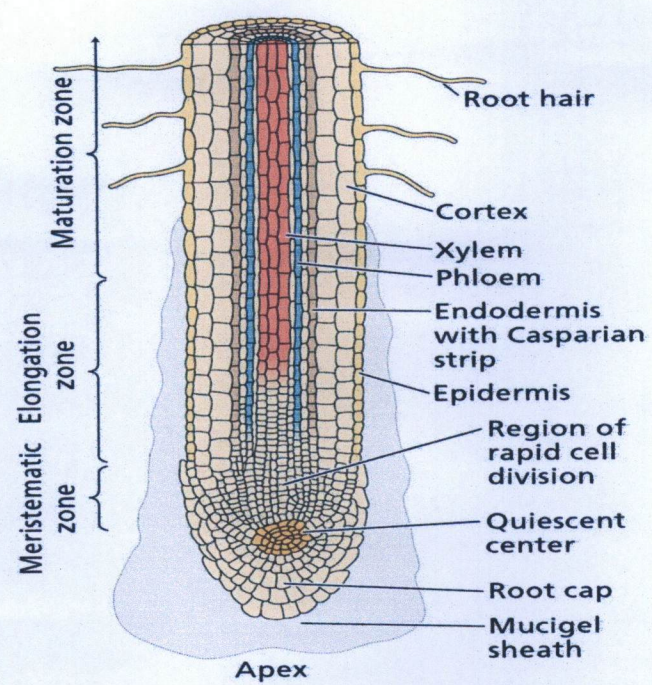
5. Racines et nutrition minérale des plantes

Le système racinaire diffère d'une plante à une autre de par sa profondeur et son type (pivotant, fasciculée) mais tous ont structure commune.

- La division cellulaire prend place dans le méristème et croit dans les 2 dimensions pour donner sa forme aux racines.
- Le Cadre de Caspary sépare le cortex de la stèle.
- Le Xylème et le phloème sont séparés dans la stèle

On peut décomposer la racine en 3 zones :

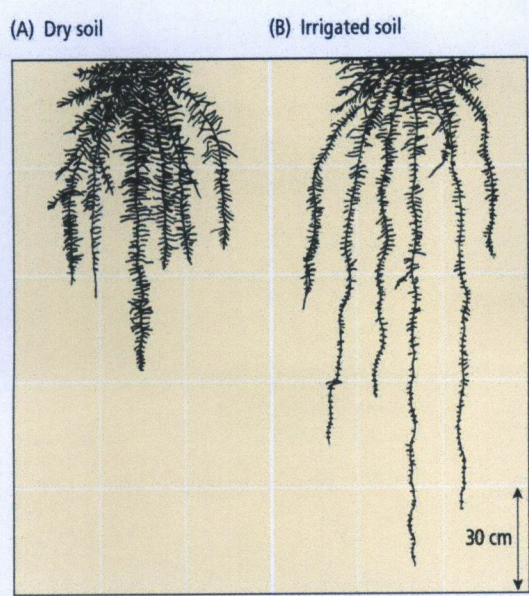
- **La zone méristématique** : Les cellules se divisent à la fois dans la direction de la base de la racine pour former les cellules qui vont devenir la partie fonctionnel, et dans la direction de l'apex de la racine
- **La zone d'élongation** : Les cellules s'allongent rapidement, se divisent une dernière fois pour forme l'endoderme, certaines cellules s'épaississent pour forme le cadre de Caspary
- **La zone de maturation** : Racines complètement forme avec xylème et phloème ; le chevelu racinaire commence son apparition dans cette zone.



PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 5.8 © 2002 Sinauer Associates, Inc.

Figure 7 : Structure d'une racine

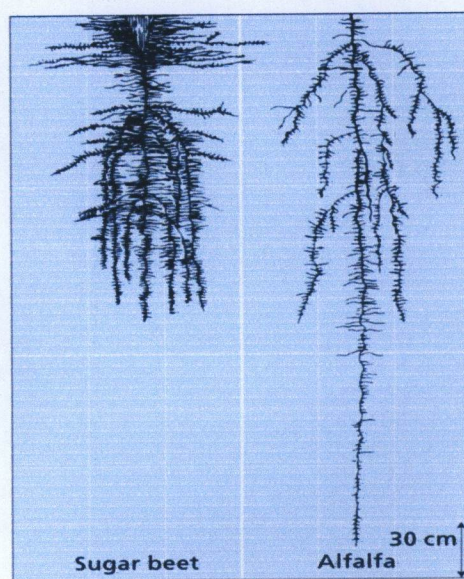
La forme des racines varie non seulement en fonction des espèces, mais aussi selon les conditions du milieu, l'eau notamment a un effet important sur la forme de racines.



PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 5.6 © 2002 Sinauer Associates, Inc.

Figure 8 (à gauche) :
Différences entre le système racinaire d'une plante en sol sec et irrigué

Figure 9 (à droite):
Différences entre le système racinaire de la betterave sucrière et de la luzerne



PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 5.7 © 2002 Sinauer Associates, Inc.

Quand la vitesse d'absorption des nutriments dépasse la vitesse de remplacement de ces nutriments dans le sol, il se forme **une zone de déplétion** dans le sol dans la région proche des racines. L'association des racines avec les mycorhizes peut être une solution pour aider la plante à surmonter ce problème.

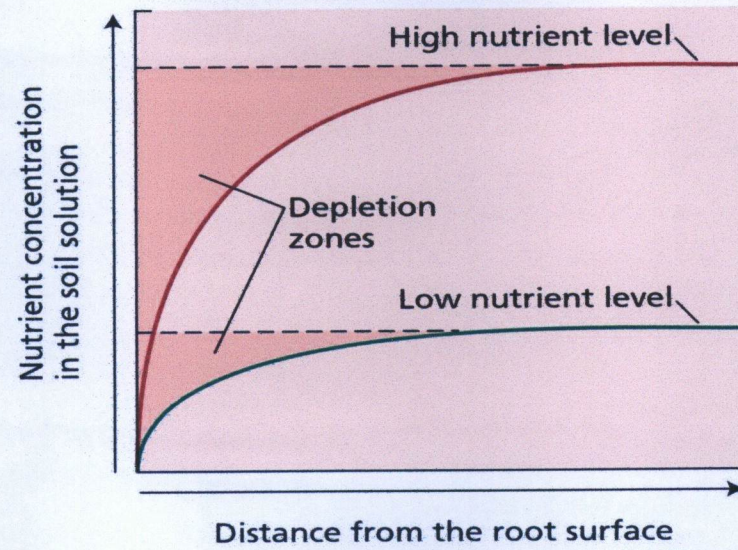


Figure 10 : Formation de la zone de déplétion

6. L'activité microbienne et la nutrition minérale des plantes.

L'activité microbienne du sol joue un rôle important dans la nutrition minérale des plantes, et la biodisponibilité des nutriments et cela à travers de nombreux mécanismes. Parmi les principaux mécanismes, la nodulation des légumineuses et la fixation de l'azote biologique.

La nodulation suit plusieurs étapes :

- 1) Les rhizobia s'attachent aux chevelus racinaires
- 2) Les bactéries entrent dans la cellule
- 3) Les bactéries se transforment en bactéroïdes dans la cellule qui s'élargit
- 4) Les cellules élargies deviennent des nodules

La fixation d'azote est affecté par plusieurs facteurs :

- La présence d'azote : la fixation est inversement proportionnel à la quantité d'azote disponible

- La présence de minéraux : notamment le P, Ca, Co, Mo qui joue un rôle important pour la fixation
- La disponibilité des sources d'énergie, la fixation consommant beaucoup d'énergie. L'humidité du sol
- La température : Optimal = environ 30°C

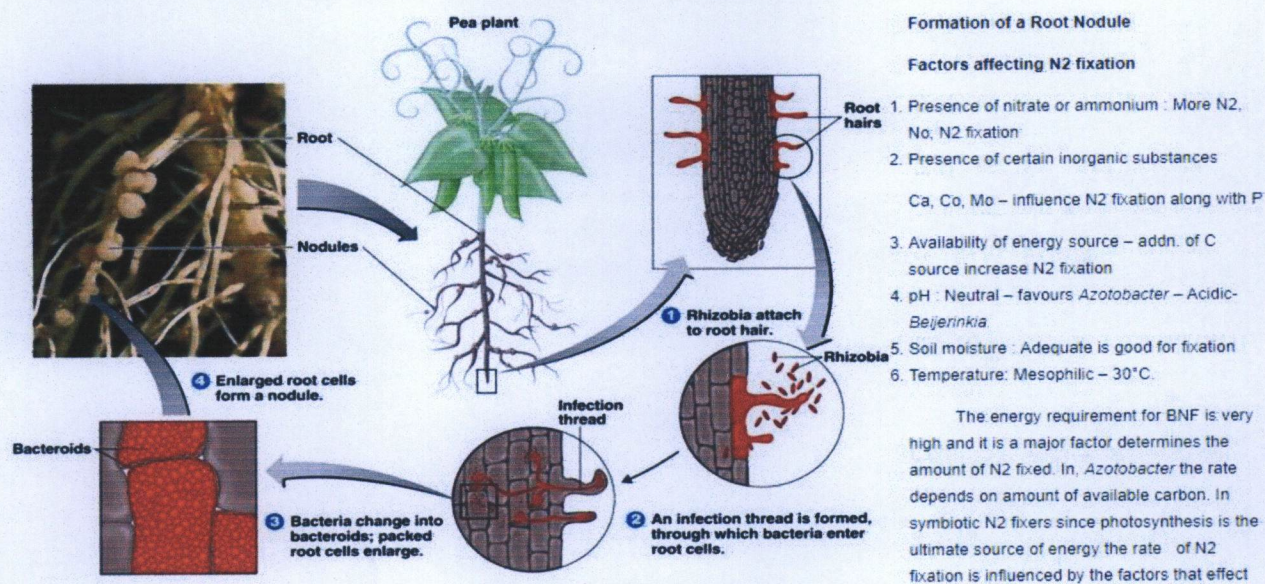
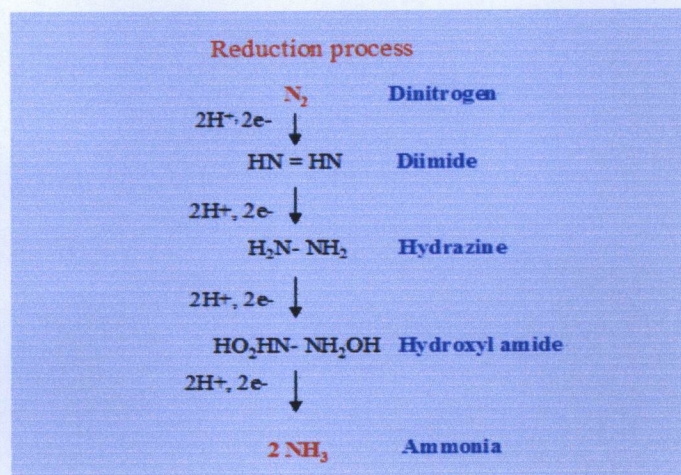
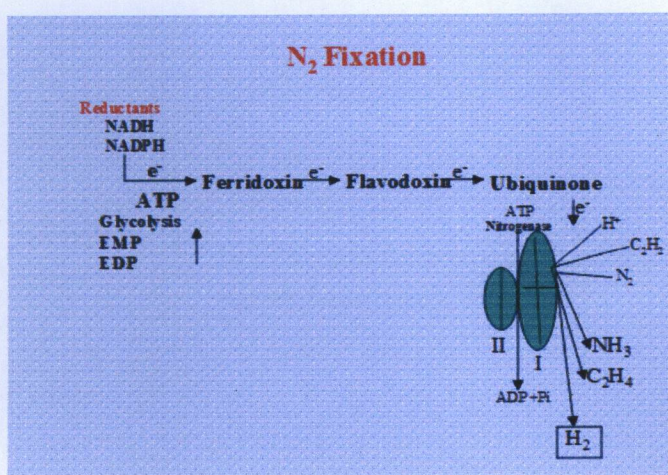


Figure 11 : Processus de nodulation



Figures 12-13 : Processus de fixation de N2 et de réduction de N2 et NH3

Plusieurs études ont montré l'effet positif de la nodulation sur la biomasse aérienne, l'absorption d'azote et de phosphore, le pH du sol et le rendement. Cette effet peut être renforcé par un système de culture adéquat (ex : intercropping : association des cultures légumineuses avec celles céréalières).

Les figures 13 et 14 montrent l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS) chez le haricot cultivé associé avec l'espèce céréalière (maïs). Ces figures (fig. 14) montrent la diminution des pH rhizosphériques sous la culture du haricot lorsqu'il est cultivé en association avec le maïs, cette dernière réduction du pH est accompagnée par une augmentation de la biodisponibilité de N et P dans la rhizosphère des espèces en association.

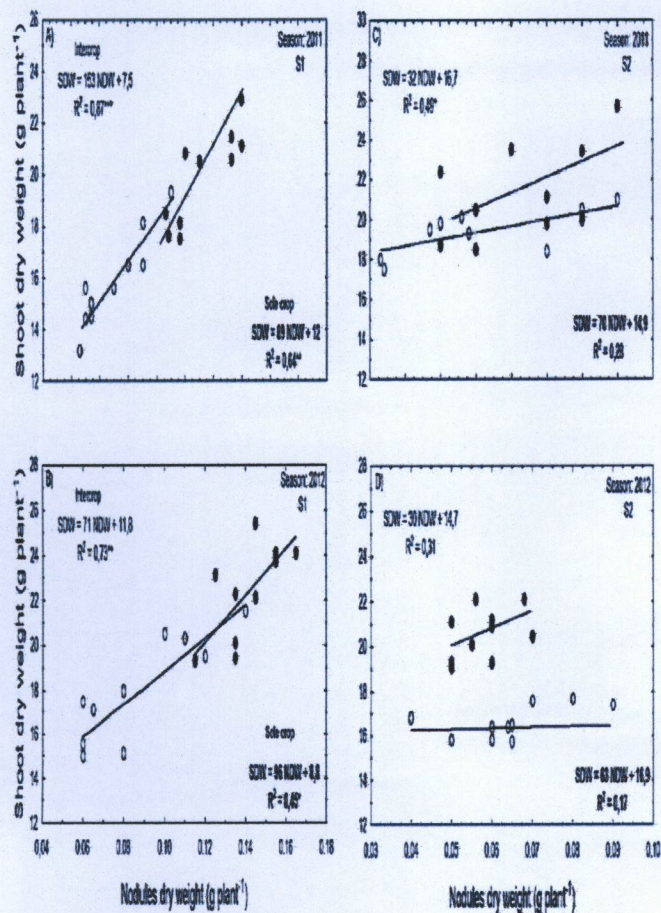


Figure 13 : Rapport nodulation sur la biomasse aérienne (EURS)

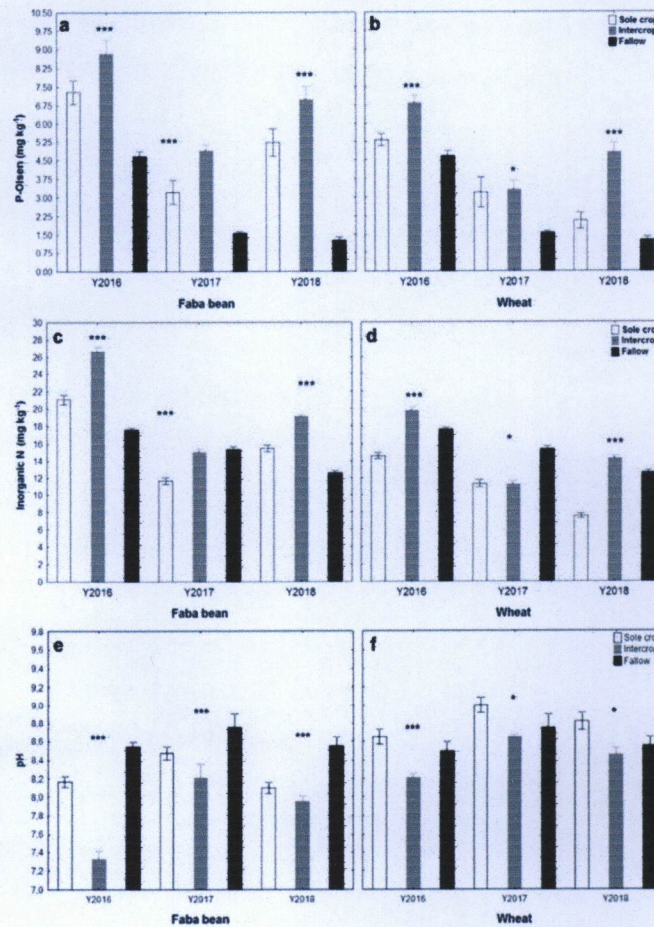


Figure 14: Effet du système de culture (Intercropping, Monoculture, Jachère) sur le pH du sol ainsi que sur la biodisponibilité du N et P dans la rhizosphère



Transport et Transfert des Eléments Minéraux du Sol vers la Plante

Chapitre 2 : Transport et transfert des éléments minéraux du sol vers la plante :

1. Mécanismes de l'absorption des ions :

Les mécanismes de l'absorption sont complexes et fortement régulés. Deux systèmes fonctionnent simultanément :

- Un système **actif** et fait intervenir des pompes à protons,
- Un système **passif** et non consommateur en énergie où les ions sont entraînés dans la sève brute par la transpiration.

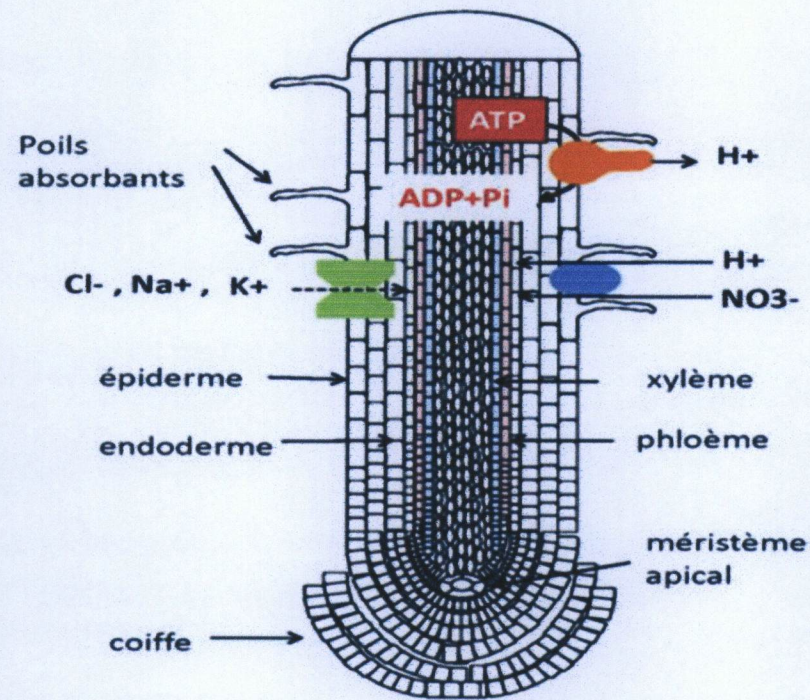


Figure 15 : Représentation d'une coupe longitudinale schématisant l'absorption des éléments nutritifs.

a. Le transport passif :

C'est la diffusion et l'osmose (diffusion de l'eau) Le transport passif se fait selon **le gradient de concentration** ou **le gradient électrique**. (Du plus concentré vers le moins concentré)

Le transport passif ne consomme pas d'énergie.

Ce transfert se produit soit :

- Directement à travers la double couche lipidique
- Par des protéines « canal »
- Par des protéines déformables (diffusion facilitée)

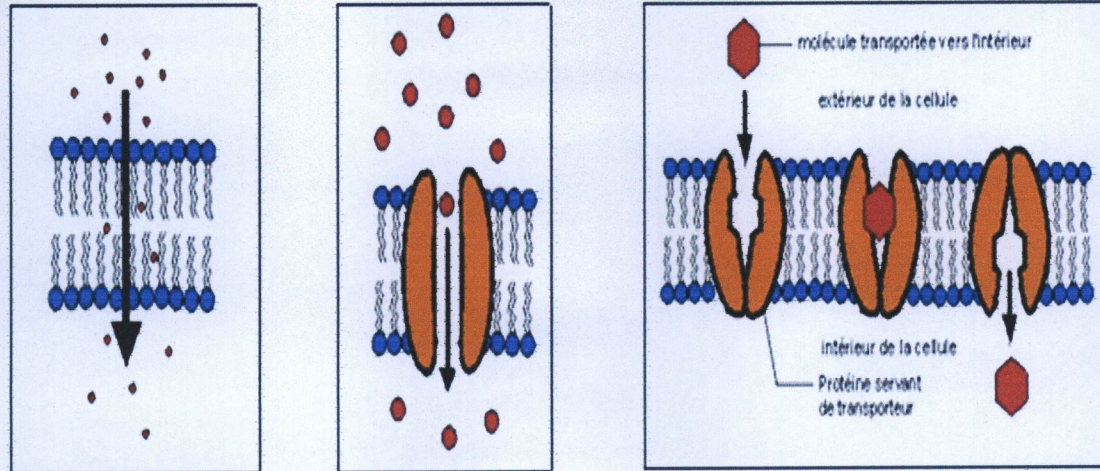


Figure 16 : Schématisation des différents moyens du transport passif

b. Le transport actif :

Par opposition au contraire passif, le transport actif se fait **contre** le gradient de concentration ou le gradient électrique. (Du moins concentré vers le plus concentré).

Pour aller contre le gradient de concentration, ce transport a besoin

- De consommer de l'énergie sous forme d'ATP.
On peut formaliser cette consommation d'énergie par la formule suivante : $ATP \rightarrow ADP + P$
- D'un transporteur de membrane (protéine)

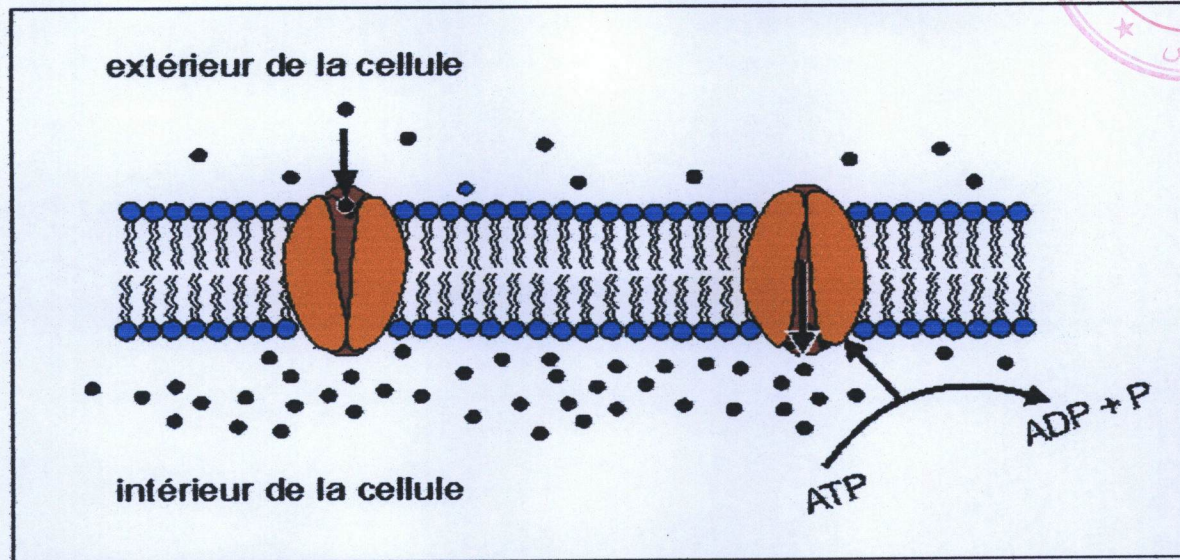
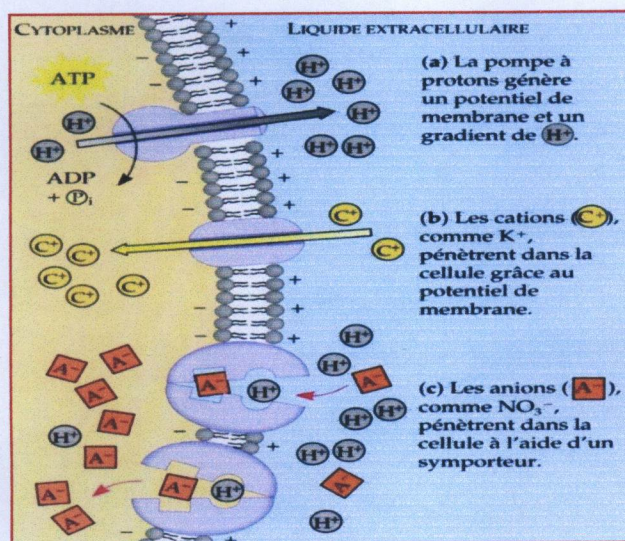


Figure 17 : Schématisation du transport actif via le transporteur, et la consommation d'énergie associée.



Pompe à proton et co-transport

L'énergie de l'ATP sert à transport des ions H^+ de l'intérieur vers la cellule vers l'extérieur afin de créer **gradient de concentration** et un **gradient électrique**. . Cela va :

- Permettre aux cations (+) de pénétrer **contre leur gradient de concentration**. (Car la sortie des H^+ va modifier le gradient)
- Permettre aux anions de pénétrer **contre leur gradient de concentration** et contre leur gradient électrique en voyageant avec des ions H^+ à travers des **symporteurs**. (Co-transport)

Figure 18 : Rôle de la pompe à protons et de la pénétration des anions et cations par le transport actif

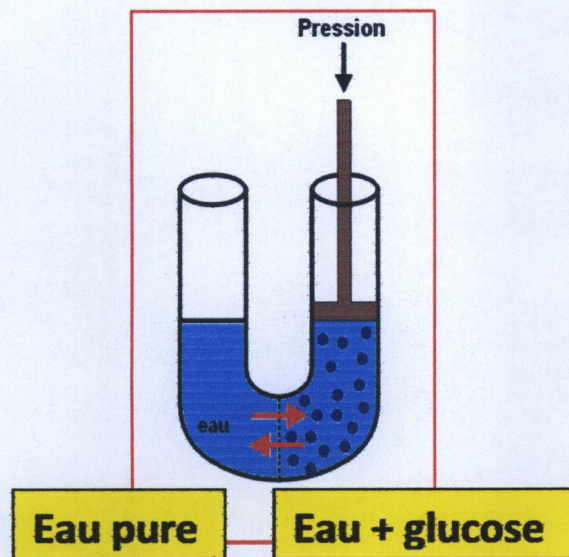
Potentiel hydrique (ψ) :

On définit le potentiel hydrique comme étant la **résultante des 2 forces issues de 2 compartiments différents**.

Le potentiel hydrique est défini par la formule suivante :

$$\psi = P - \pi$$

Exemple :



On suppose 2 liquides différents : l'eau et une solution de glucose. On utilise un piston pour appliquer une pression sur la solution de glucose.

Nous calculons le potentiel hydrique à droite et à gauche :

A gauche :

$$P = 0,0$$

$$\pi = 0,0$$

$$\psi = P - \pi$$

$$\psi = 0 - 0 = 0$$

Figure 19 : Schéma explicatif du potentiel hydrique (Dispositif de l'exemple)

A droite :

$$P = 0,23$$

$$\pi = 0,23$$

$$\psi = P - \pi$$

$$\psi = 0,23 - 0,23 = 0$$

Question : Quelle serait la valeur de ψ à droite s'il n'y avait pas le piston ?

Réponse : -0.23 car P serait égale à 0.

$$\psi = P - \pi$$

$$\psi = 0 - 0,23 = -0.23$$

L'eau se déplace toujours du potentiel hydrique élevé au potentiel hydrique plus faible.

Question : Quel sera l'effet sur le potentiel hydrique à droite si on augmente la pression du piston de 0,23 à 0,30 ?

Réponse : Le potentiel hydrique devient égal à 0,07 à droite, l'eau se déplace de droite ($\psi = 0,07$) à gauche ($\psi = 0$), c'est l'**osmose inverse**.

$$\psi = P - \pi$$

$$\psi = 0,30 - 0,23 = 0,07$$

Plasmolyse et turgescence :

Définitions :

Plasmolyse = Réaction par laquelle une cellule se contracte due à la sortie de son eau par osmose, lorsque la cellule se trouve en milieu **hypertonique**.

Turgescence = Réaction par laquelle une cellule se dilate due à l'entrée de l'eau externe par osmose, lorsque la cellule se trouve en milieu **hypotonique**.

Ces 2 réactions sont dues au gradient de concentration entre la cellule et le milieu où elle se trouve.

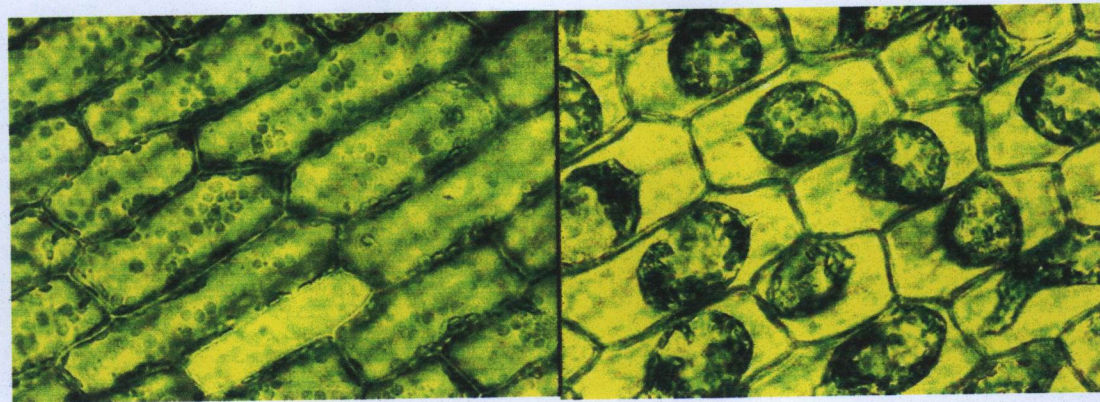
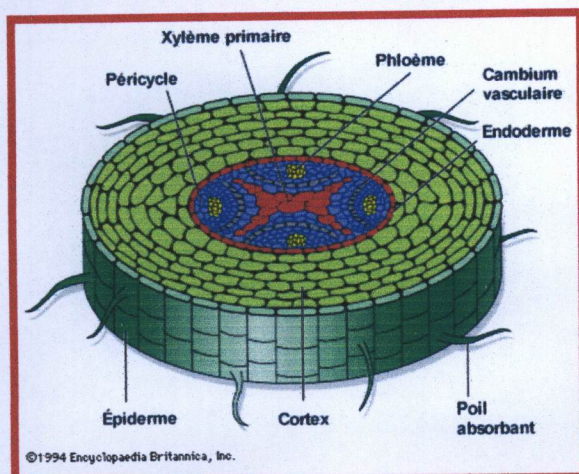


Figure 20 : Coupe transversale montrant des cellules en état de turgescence (à gauche) et plasmolyse (à droite)



2. Transport radial : Déplacement de l'eau dans la racine :

L'eau se déplace de l'extérieur vers le xylème primaire situé dans la stèle.

Stèle = Zone centrale délimitée par l'endoderme.

Figure 21 : Schéma d'une coupe transversale de la racine

L'eau traverse la racine en empruntant 3 voies :

- a) En passant directement à travers la membrane des cellules.
- b) Voie **Symplaste** = L'eau passe de cellule en cellule par les plasmodesmes.
- c) Voie **Apoplaste** = L'eau passe entre les cellules ou dans les cellules mortes.

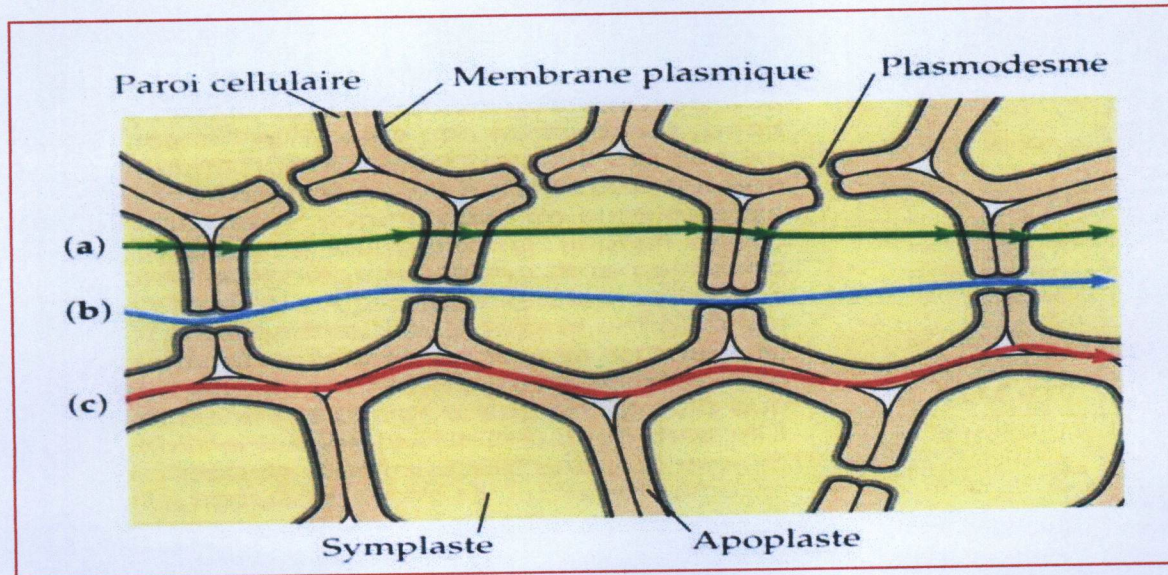


Figure 22 : Schéma des 3 voies de l'eau dans la racine

3. Transport vertical :

Le transport vertical se fait de 2 façons :

- Montée de la sève brute dans le **xylème**

- Déplacement de la sève élaborée dans le **phloème**.

Sève brute = eau et minéraux puisés par les racines.

Sève élaborée = eau et matières organiques élaborées par les feuilles.

a. Montée de la sève dans le xylème :

La montée de la sève dans le xylème se fait avec une vitesse moyenne de 15 m /h.

La plus grande partie de la sève brute s'évapore au niveau des feuilles.

Exemple : Un érable peut perdre jusqu'à 200L d'eau par heure en été, il doit donc puiser ces 200L d'eau dans le sol pour compenser.

C'est ce phénomène qui que l'évaporation des forêts tropicales joue un rôle important dans la circulation de l'eau sur la planète et dans le climat.

1) Capillarité

- La capillarité est un phénomène due à la **cohésion des molécules d'eau entre elles et avec la paroi** des vaisseaux conducteurs.
- La montée est **ininversement proportionnelle** au diamètre du tube.
- Cette montée a une limite : L'eau ne peut pas monter plus haut que 1,5 m capillarité
- dans les plus petits trachéïdes.

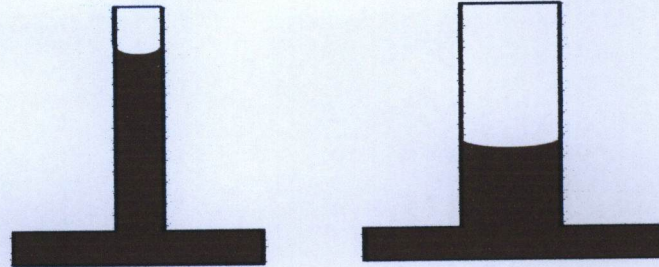


Figure 23 : Schématisation du phénomène de capillarité



2) Guttation

- La guttation est un phénomène due à la pression racinaire.
- Ce phénomène se voit dans l'eau qui perle le matin au niveau des feuilles des petites plantes (voir la photo à gauche).
- Le phénomène ne se produit que si le sol est gorgé d'eau et si l'air est assez humide pour ralentir l'évaporation au niveau des feuilles.

Figure 23 : Photo de l'eau qui perle sur une feuille résultant de la guttation.

3) Aspiration foliaire

Les lacunes, à l'intérieur des feuilles, sont recouvertes d'une pellicule d'eau qui s'évapore lorsque les stomates sont ouverts.

L'eau s'évaporant, la pellicule d'eau se rétracte.

La pellicule d'eau qui se rétracte, « tire » sur l'eau provenant du xylème.

Il se crée donc une tension dans le xylème.

Les molécules d'eau adhèrent entre elles (cohésion par les liaisons hydrogène). Si on « tire » sur une molécule, les autres suivent.

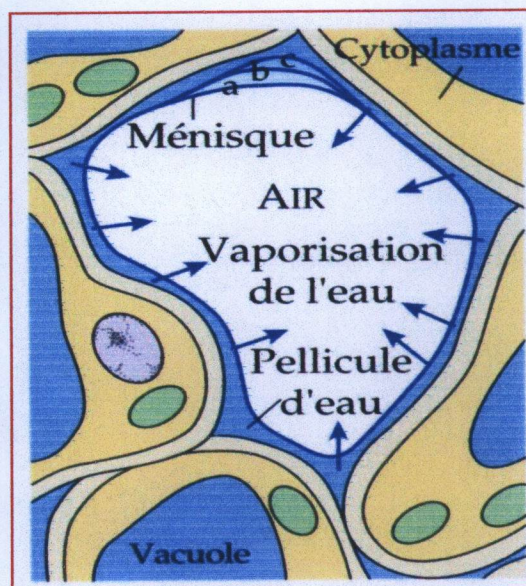


Figure 24 : Lacunes foliaire

Évaporation de l'eau dans les feuilles « tire » sur les molécules d'eau dans les tubes du xylème.

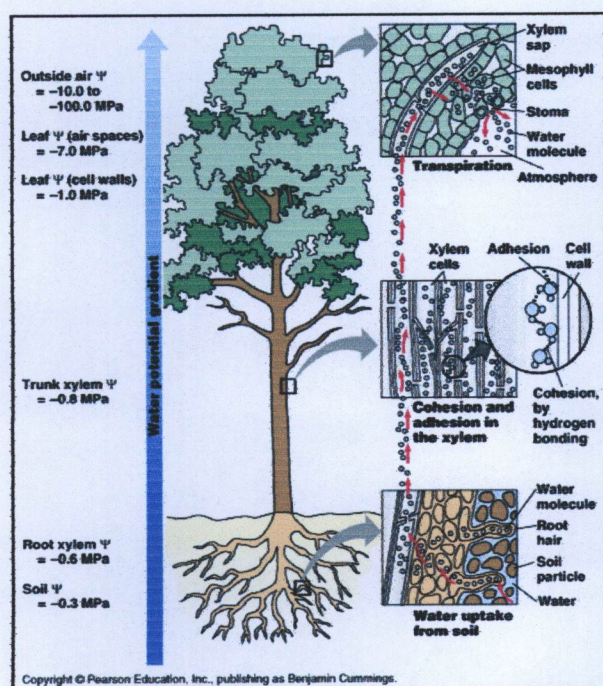
L'eau monte dans le xylème.

Plus l'eau s'évapore, plus la tension est grande et plus l'eau monte dans le xylème.

Le phénomène est aussi facilité par l'adhérence (liaisons hydrogène) des molécules d'eau avec les parois du xylème.

Figure 25 : Variation du potentiel hydrique, du sol à l'air libre au niveau des feuilles.

C'est donc l'énergie solaire qui crée la force permettant de faire monter la sève à plusieurs dizaines de mètres d'altitude



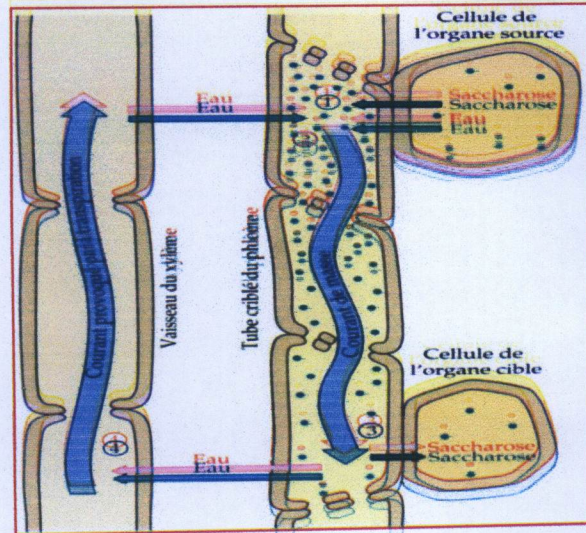
b. Transport de la sève élaborée dans le phloème



Se transport se fait d'un organe source à un organe cible.

- **Organe source** : produit des glucides
- **Organe cible** : utilise ou met en réserve les glucides (fruit ou racine par exemple)

N.B. Un tubercule peut être un organe source ou cible selon la saison.



Le transport de la sève élaborée consiste en le **transport actif du saccharose** de l'organe source dans les cellules du phloème.

L'énergie vient du **transport actif des glucides**.

Due au gradient créer par ce transfert l'eau suit **par osmose**.

Le saccharose passe ensuite du phloème à l'organe cible.

Le même phénomène d'osmose se produit et l'eau sort du phloème.

Figure 26 : Schéma du transport de la sève élaborée de l'organe source à l'organe cible.

4. Régulation de la transpiration

a. **Quotient de transpiration** :

Le phénomène de transpiration est **nécessaire** (car il permet la montée de la sève) et **inévitable** (car les feuilles représentent une grande surface). Cependant pour la survie de la plante, la transpiration ne doit pas dépasser l'apport d'eau par les racines.

Pour donner une idée de l'importance de la surface foliaire. Un gros chêne possède environ 700,000 feuilles ce qui représente une surface équivalent à 40 terrains de basketball. Si l'on considère les lacunes à l'intérieur des feuilles, la surface de contact avec l'air est de 10 à 30 fois supérieure.

Presque toute l'eau puisée par les racines est perdue par évaporation dans les heures qui suivent.

Une autre conséquence de l'évaporation est le **refroidissement**, Les températures basses qu'on retrouve dans un écosystème forestier sont dues justement à ce phénomène. Cette baisse de température peut être de l'ordre de 10 à 15°C.

Ce phénomène de refroidissement est exploité par les plantes désertiques qui laissent s'évaporer leur eau pour maintenir une température plus basses.

Le siège de l'évaporation sont les **stomates** (où se produit 90% de l'évaporation). En plus de leurs rôle dans l'évaporation de l'eau les stomates ont aussi la fonction de **laisser entrer le CO2 dans la plante** afin que celle-ci puisse effectuer sa photosynthèse. Donc :

- Si les stomates sont fermés : Il y'a peu de perte d'eau mais la plante manque de CO2 pour la photosynthèse.
- Si les stomates sont ouvertes : Les pertes d'eau sont importantes mais le CO2 entre dans la feuille cela permet la photosynthèse.

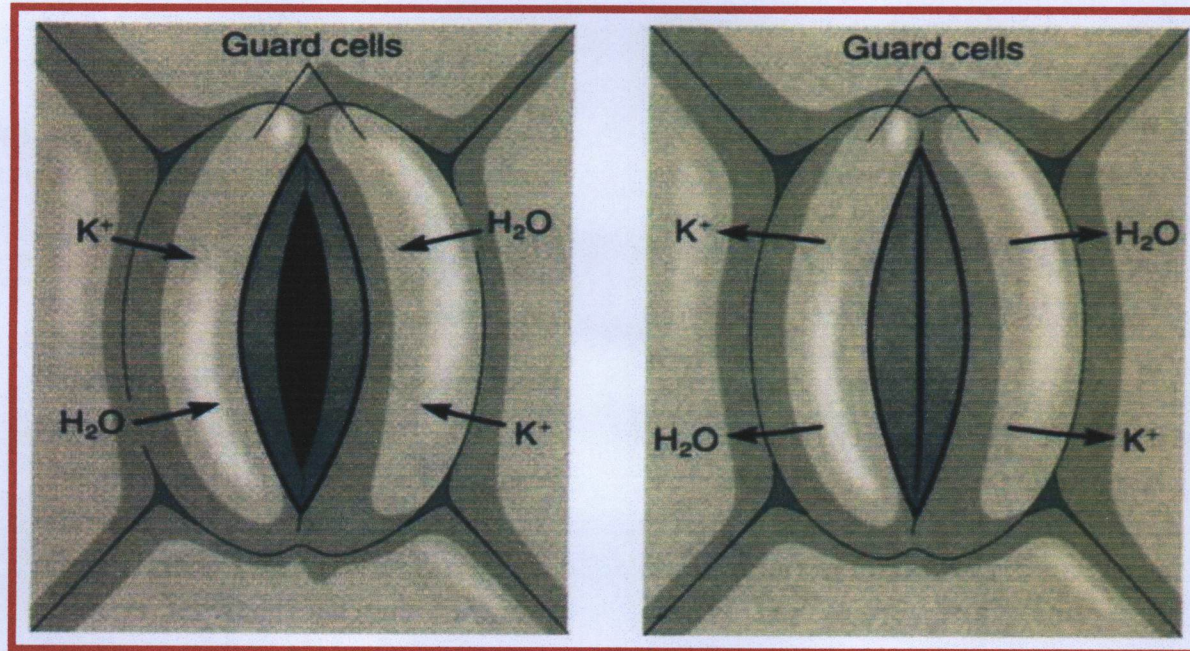


Figure 27 : Schéma d'un stomate ouverte (à gauche) et fermé (à droite)

Quotient de transpiration = bilan des pertes d'eau par rapport aux gains de CO₂ = $\frac{\text{Perte d'eau}}{\text{Gains de CO}_2}$,

Le gain de CO₂ correspond à la production de glucose.

Exemple : Si la plante perd 600g d'eau pour produire 1g de glucose, le quotient de transpiration est égal à 600. (600/1)

Les facteurs influant les pertes d'eau sont :

- Vent
- Humidité
- Ensoleillement
- Température

b. Structure des stomates :

Définition : Un stomate est un orifice qu'on retrouve dans l'épiderme des feuilles et des tiges. Il permet les échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant ainsi que la régulation de l'évapotranspiration.

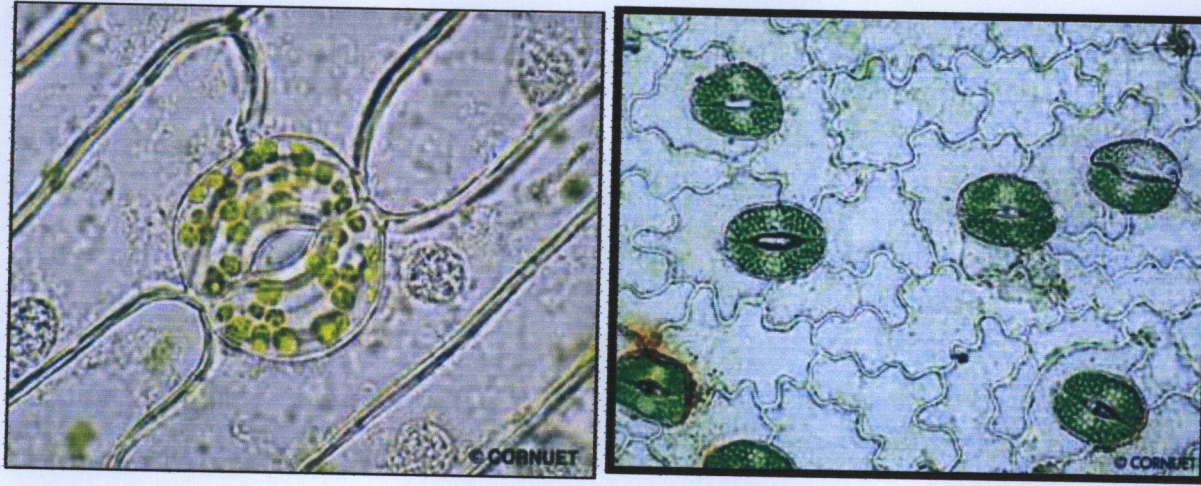


Figure 28 : Photos de stomates

Un stomate est constitué de deux cellules stomatiques réniformes qu'on appelle « **cellules de garde** », délimitent ostiole.

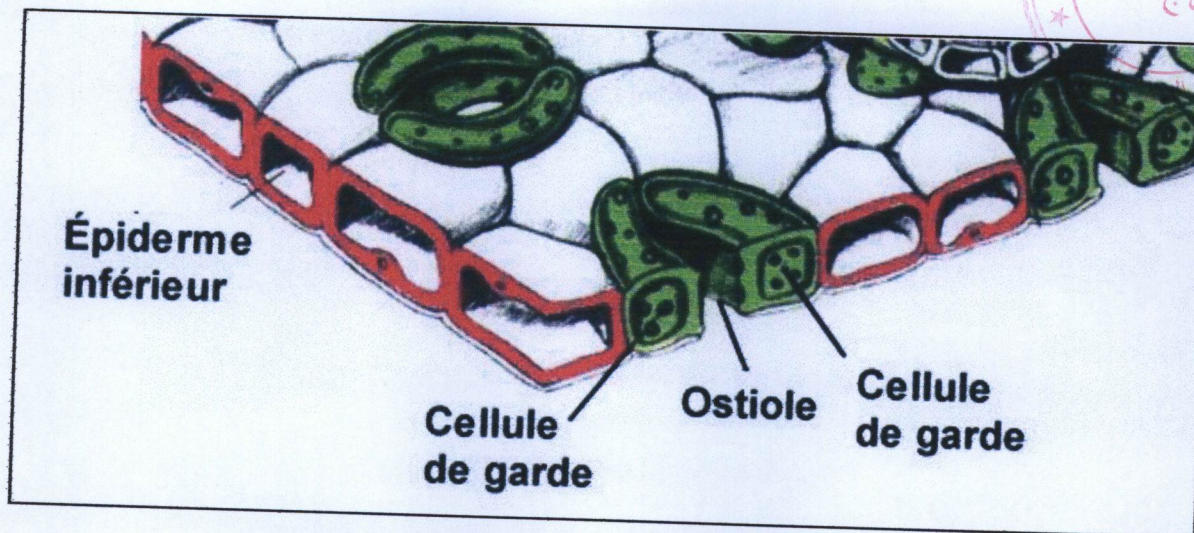


Figure 29 : Schéma de stomates dans l'épiderme

Sous l'ostiole se trouve un espace vide appelé chambre sous-stomatique, siège des échanges gazeux via un parenchyme (parenchyme lacuneux).

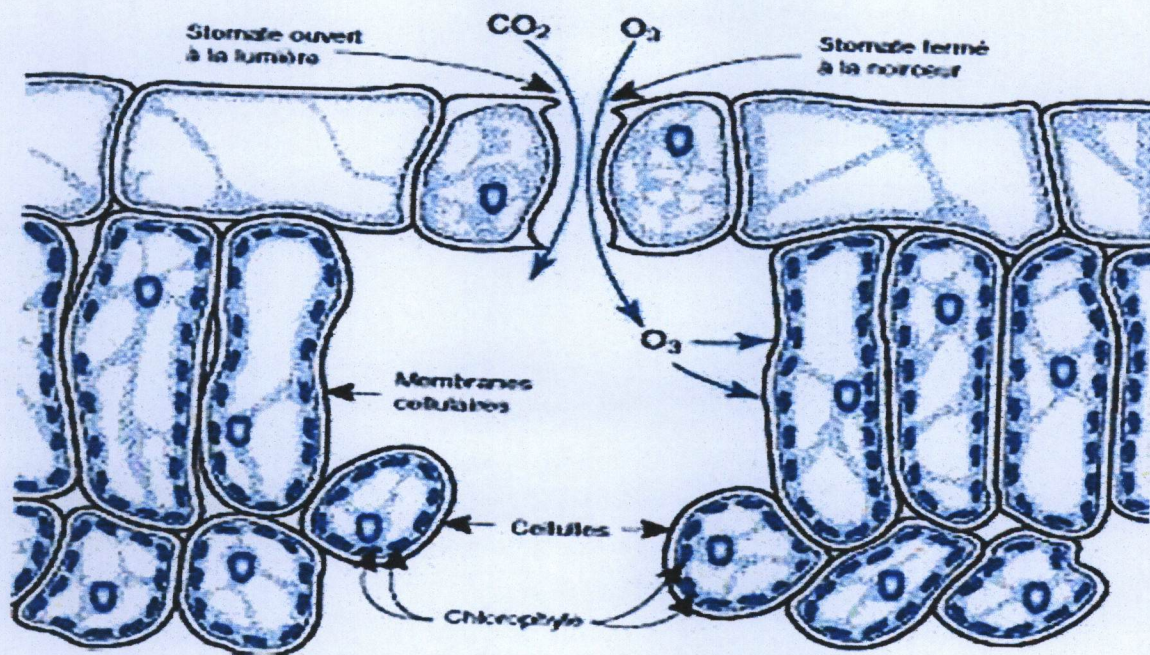
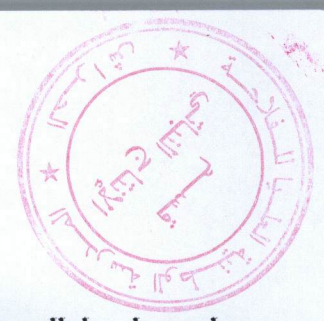


Figure 30 : Schéma de la structure d'un stomate



L'ouverture des stomates se produit lorsque l'eau entre, par osmose, dans les cellules de garde (phénomène de turgescence).

Lorsque la cellule de garde se gonfle d'eau, son côté opposé à l'ostiole se déforme et s'arrondit plus que l'autre (la paroi est plus épaisse et plus difficile à déformer du côté de l'ostiole).

En s'arrondissant, le côté mince « tire » sur les fibres de celluloses qui relient les deux côtés. L'ostiole s'agrandit.

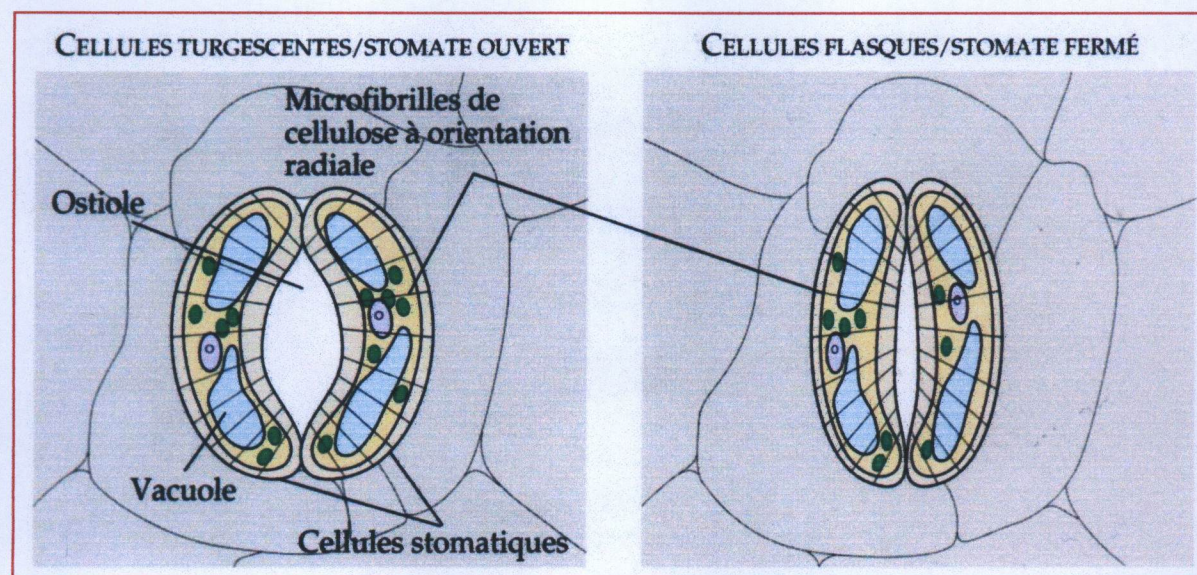


Figure 31 : Schéma de l'ouverture et la fermeture des stomates

Les ions potassium (K^+) jouent un rôle important au niveau des stomates, en effet le Transport actif de K^+ dans les cellules de garde permet :

- Augmentation de l'osmolarité
- Entrée d'eau par osmose
- Turgescence ce qui permet l'ouverture de l'ostiole

Les ions K^+ ont donc un impact sur l'ouverture et la fermeture des stomates. Quand leur concentration à l'intérieur des cellules de gardes est supérieure à la concentration externe, l'eau va entrer dans les cellules de gardes par osmose, celles-ci deviennent donc turgescents et les stomates sont ouverts et vice versa.

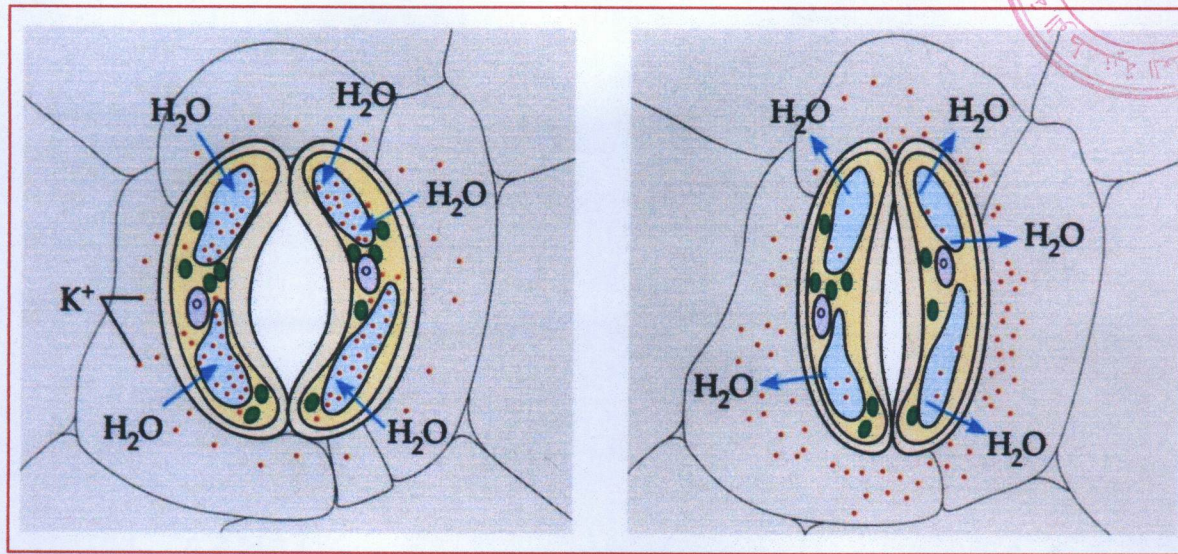


Figure 32 : Effet de la concentration en K^+ sur l'ouverture des stomates

c. Facteurs responsables de l'ouverture des stomates :

L'ouverture et la fermeture des stomates est un phénomène complexe qui est gouverné par plusieurs facteurs, qui sont :

1) Lumière :

La **lumière bleue** stimule des récepteurs de membrane ce qui active les pompes à K^+ cela provoque l'**entrée des ions K^+ dans la cellule**.

La lumière bleue **active aussi la photosynthèse** et donc la production d'ATP ce qui est nécessaire aux pompes à K^+ .

L'activation de la photosynthèse par la lumière bleue entraîne la baisse de CO_2 ce qui stimule l'ouverture des stomates. (Ce phénomène n'a toujours pas été expliqué)

2) Horloge interne :

Pour la plupart des plantes (sauf les plantes CAM) les stomates sont ouverts le jour et fermés la nuit, suivant ainsi le rythme de la photosynthèse.

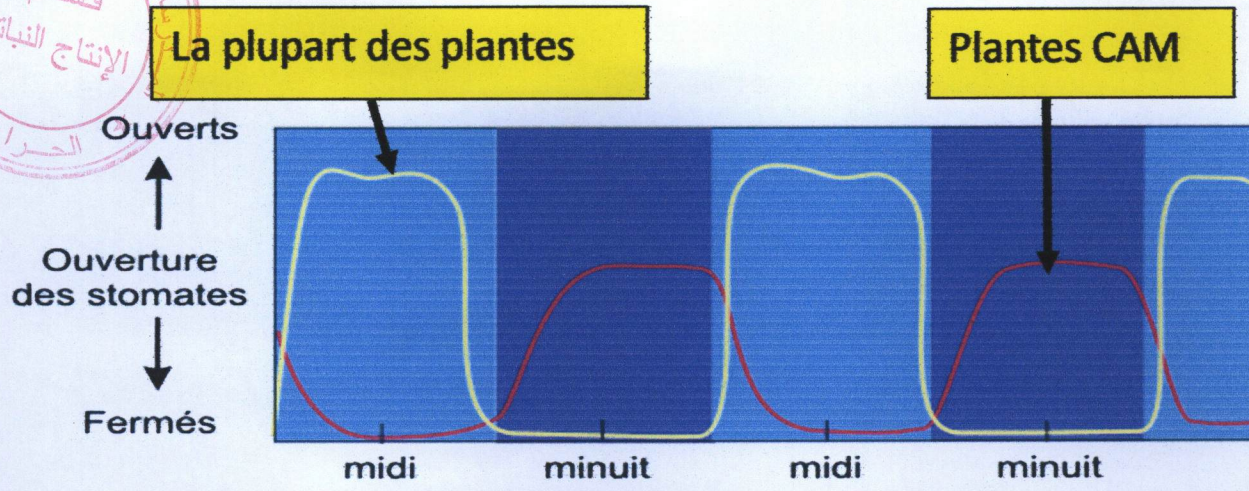


Figure 33 : Ouverture et fermeture des stomates au cours d'une journée

3) Agressions extérieures :

Le milieu extérieur affecte l'activité des stomates, en voici quelques exemples :

- Une sécheresse (manque d'eau) empêche la turgescence des cellules de gardes et de ce fait provoque la fermeture des ostioles.
- La sécrétion de certaines hormones (acide abscissique)
- Une augmentation de la température entraîne la fermeture des stomates.

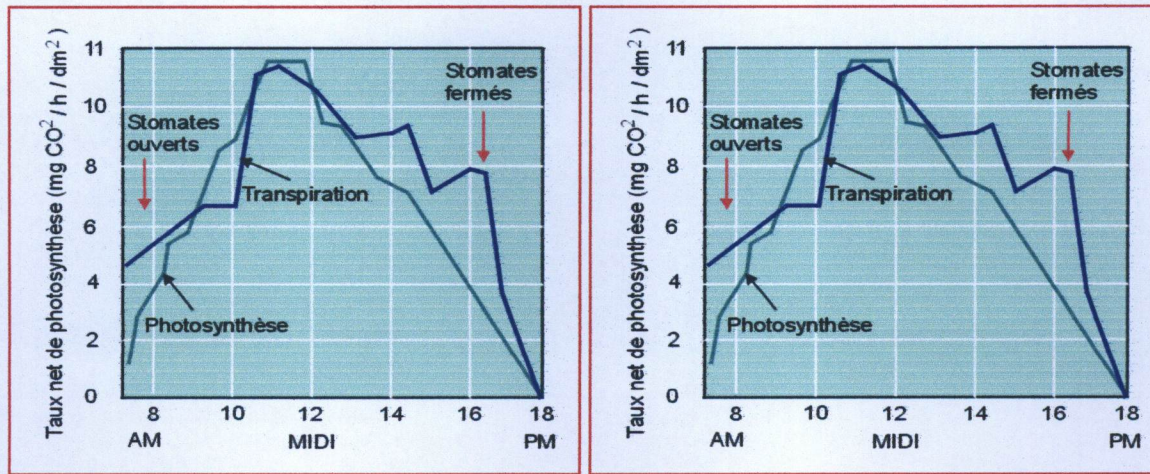


Figure 34 : Transpiration et photosynthèse d'une plante xérophyte (plante adaptée aux milieux arides) lorsque l'eau est suffisante (à gauche) et lorsque la plante souffre de sécheresse (à droite).



d. Adaptation pour diminuer la transpiration :

Certaines plantes sont adaptées aux climats arides, on parle de **plantes xérophytes**.

Pour pouvoir résister à ces conditions extrêmes ces plantes utilisent divers mécanismes notamment :

- Feuilles petites (diminution de la surface) et épaisses ou réduites en épines.
- Cuticule épaisse.
- Stomates enfouis pour atténuer l'effet du vent sec.

Un autre mécanisme utilisé par les plantes pour limiter la transpiration est le **métabolisme CAM**.

Qu'est que le métabolisme CAM ?

Le métabolisme CAM (*Crassulacean acid metabolism*) est une caractéristique de la famille des *crassulacées* (famille de plantes grasses) et de quelques autres plantes comme l'ananas. Ces plantes représentent environ 10% des plantes supérieures.

Contrairement à la majorité de plantes, les plantes CAM ouvrent leurs stomates la nuit pour absorber le CO₂ et le transforme en **acide organique (malate)** pour le conserver.



Figure 35 : Stomates enfouies chez une plante xérophyte

Durant le jour, la plante va utiliser cet acide organique pour la photosynthèse durant le jour, les stomates peuvent donc rester fermés durant la journée, limitant ainsi l'évaporation de l'eau.



- Production de glucose
- Assimilation de CO₂
- Production d'acide malique (malate)

Figure 36 : Dynamique de la production de glucose, de malate, et d'assimilation du CO₂ chez une plante CAM

Chapitre 3 : Nutrition Azotée

1. Cycle de l'azote dans l'agroécosystème :

L'azote se mobilise selon un cycle biogéochimique au cours duquel il se transforme entre la forme organique et celle minérale. La plupart des transformations d'azote impliquent l'oxydation et/ou la réduction de l'atome d'azote par des processus biologiques et physicochimiques.

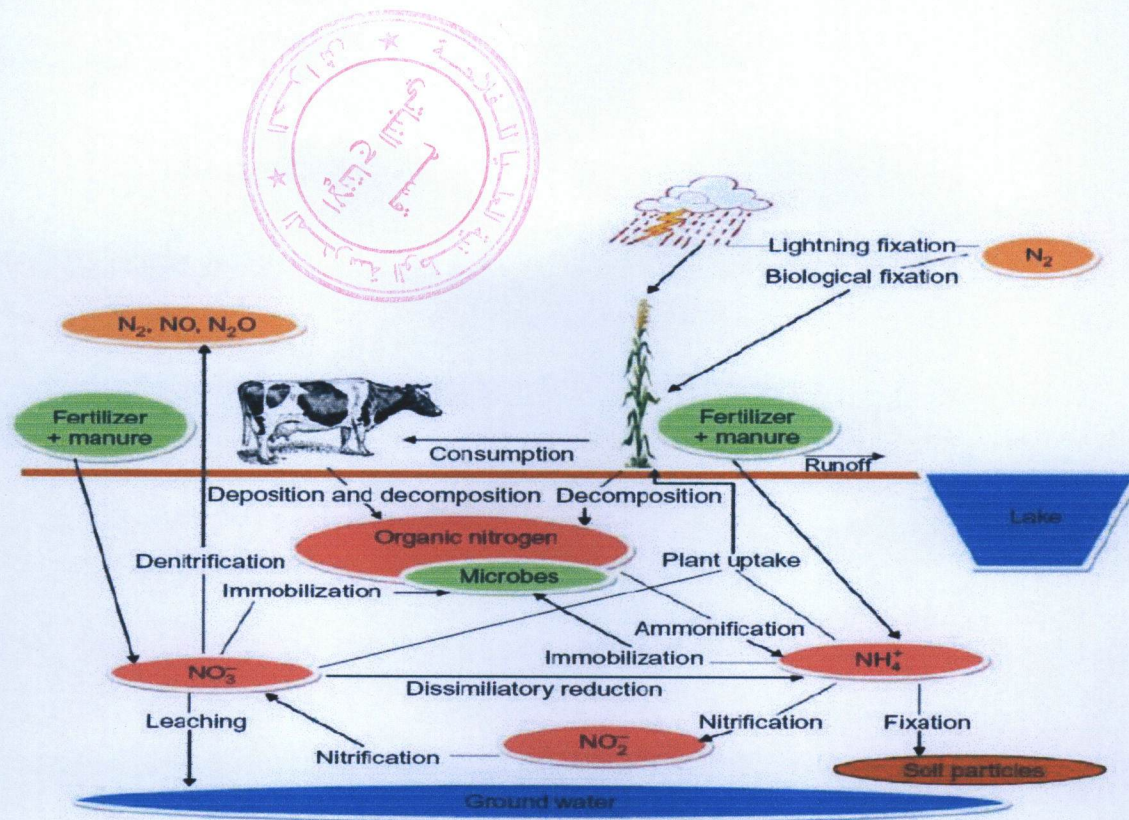


Figure 37 : Cycle biogéochimique de l'azote

Durant le cycle l'azote passe par différents compartiments (eau, plante, sol...) et prend différentes formes (N_2 , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- ...)

2. Rôle de l'azote dans la plante et dans la plante :

L'azote est un élément majeur en agriculture, et il a plusieurs rôles dans la plante :

- La **synthèse des glucides** grâce à l'augmentation du nombre de chloroplastes.
- La constitution des **réserves azotées** dans les graines.
- La **multiplication cellulaire** donc la croissance des tissus.
- La **multiplication des chloroplastes**, puisque la chlorophylle est une substance azotée d'où la couleur vert foncée des plantes après un apport d'azote. C'est un facteur de rendement, et parfois de qualité

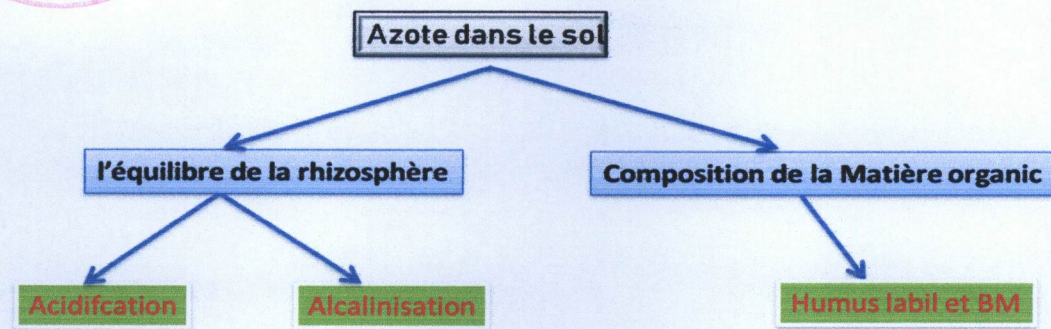


Figure 38 : Rôle de l'azote dans le sol

L'azote joue aussi un rôle important dans le sol où il équilibre le pH de la rhizosphère et entre dans la composition de la matière organique.

3. Processus de transfert et d'assimilation de l'azote

Plusieurs processus entrent en jeu dans le transfert et l'assimilation de l'azote, notamment :

- **L'ammonification** : elle concerne les végétaux, les animaux et les microorganismes, elle consiste en le passage de l'azote organique en NH_4^+
- **La nitrification** : Elle consiste en le passage du NH_4^+ en NO_3^- . On distingue 2 types :
 - **La nitrification autotrophe** : Elle est faite par les bactéries nitrifiantes
 - **La nitrification hétérotrophe** : Elle est faite par les microorganismes Microorganismes nitrificateurs.
- **La dénitrification** : Consiste en le passage du NO_3^- vers le N_2 , NO et N_2O

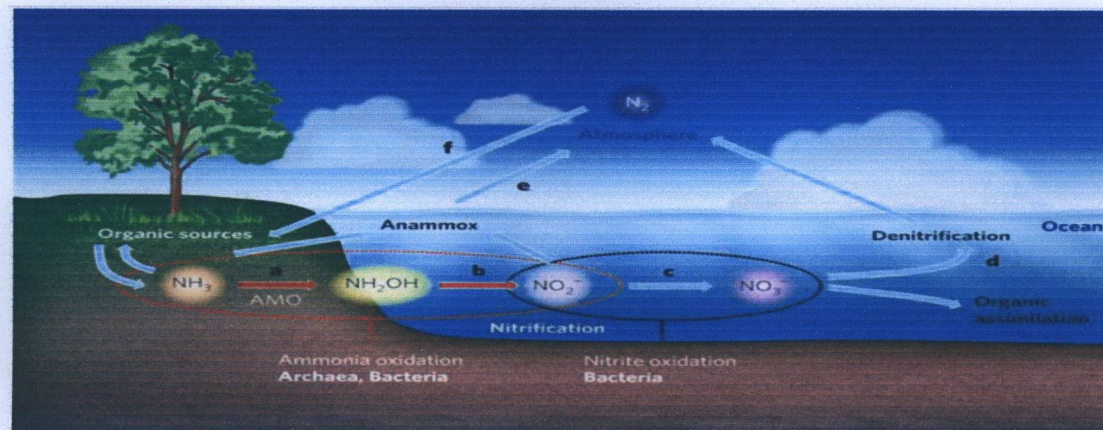
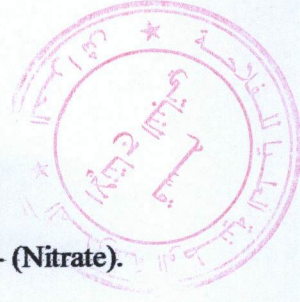


Figure 39 : Processus de transformation de l'azote dans les différents compartiments



4. Absorption de l'azote minéral :

La plante absorbe principalement 2 types d'ions : NH_4^+ (ammonium) NO_3^- (Nitrate).

1) Mécanisme actif :

Le transport des composés azotés se fait du milieu à la plante par deux étapes :

- **1ère étape diffusive, ou constitutive** : l'azote rentre de façon constante, en petite quantité.
- **2ème étape inductible** : le transport est régulé par une protéine (**HATS : High Affinity Transport System**) qui joue un rôle inhibiteur. Ces deux types de transporteurs existent aussi bien pour NO_3^- que NH_4^+ . Le pH augmente (alcalinisation) quand le NO_3^- est absorbé.

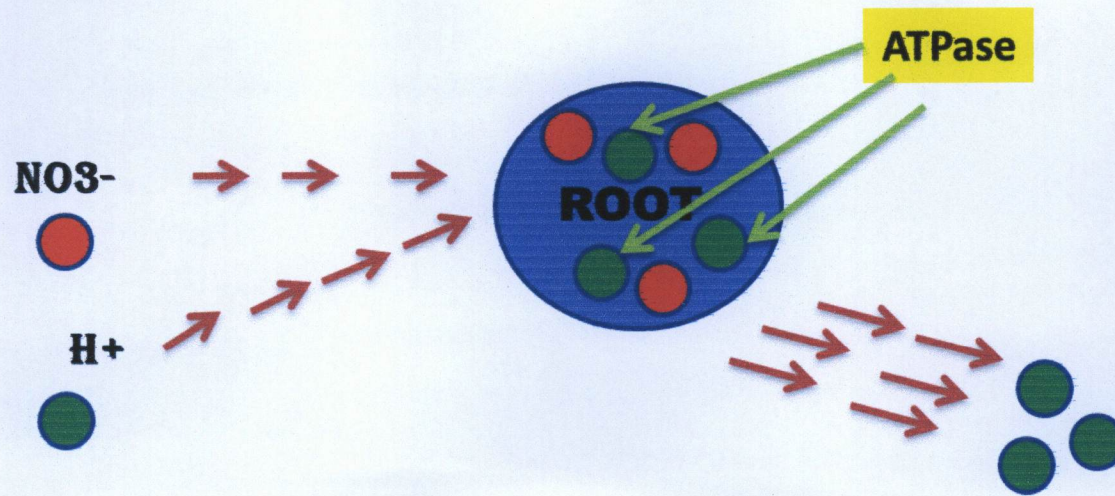


Figure 40 : Absorption du NO_3^- par la racine

2) Transport des ions de la racine au xylème

Le NO_3^- est xporté directement dans le xylème Il est réduit sur place par la **nitrate réductase**, puis par la **nitrite réductase (AA)**.

Cependant, le NH_4^+ ne partira pas vers le xylème, mais sera utilisé directement sur place. Le NH_4^+ est **thermodynamiquement** plus intéressant pour la plante que la forme oxydée (NO_3^-). L'absorption de NH_4^+ va avoir deux effets : **L'acidification** du milieu et Le **syndrome ammoniacal**.

L'acidification de la rhizosphère inhibe l'absorption des NH_4^+ , en découle une faible quantité d'N organique.



La double absorption ($\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$) permet un équilibre du pH : La nutrition mixte résout le problème de l'acidification de la rhizosphère. La plante va pouvoir stocker des NO_3^- , donc une pression osmotique faible permettant l'entrée d'eau. L'absorption de NO_3^- permet l'absorption des sucres libres, qui activent la photosynthèse.

3) Adaptation à la nutrition ammoniacale

Le NH_4^+ provient de la dégradation d'azote organique. Le NH_4^+ est riche en énergie, il est rapidement **utilisé par les bactéries nitrificatrice**. Ces transformations peuvent être inhibées si l'on inhibe le métabolisme des bactéries, donc par la chaleur, le pH trop acide, ou par manque d' O_2 .

5. Mécanisme absorption de l'azote minéral (apporté avec l'engrais)

L'azote subit des transformations dans le sol dépendant de **la forme d'engrais apportée**. Alors que le **nitrate** est absorbé directement par la plante, **ammonium et urée** doivent au préalable évoluer vers la forme nitrate. Les pertes au cours de ces transformations sont **minimales avec les nitrates** et plus élevées avec l'urée.

a. Option 1 : Ammonitrate

L'ammonitrate combine la forme nitrique (NO_3) et ammoniacale (NH_4).

1) Etape 1 : L'ammonitrate est appliqué.

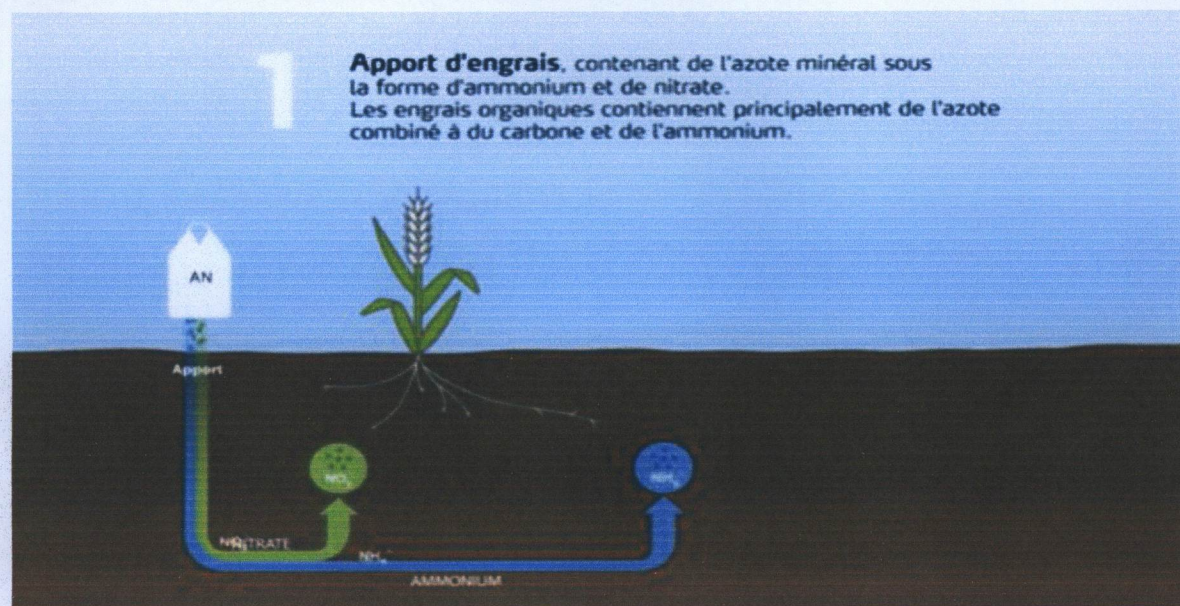


Figure 41 : Etape 1 : Apport d'ammonitrates

- 2) **Etape 2 : Absorption rapide des ions nitrates (NO_3), c'est la forme la plus facilement absorbable par les plantes**

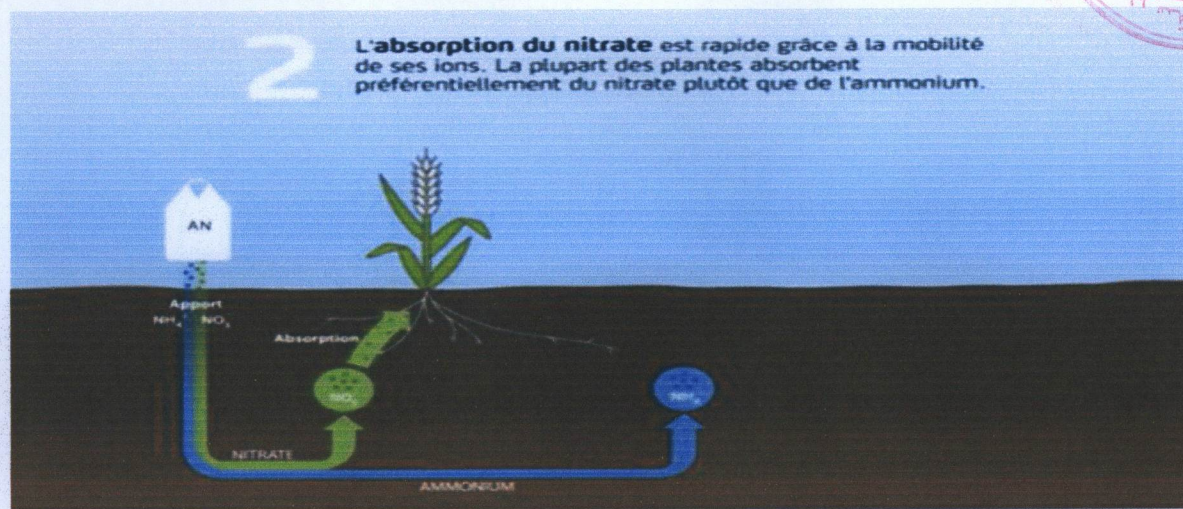


Figure 42 : Etape 2 : Absorption des nitrates

- 3) **Etape 3 : Absorption lente de l'ammonium, car peu mobile et lié à l'argile. La majeure partie est transformée en nitrate avant absorption (Etape 4)**

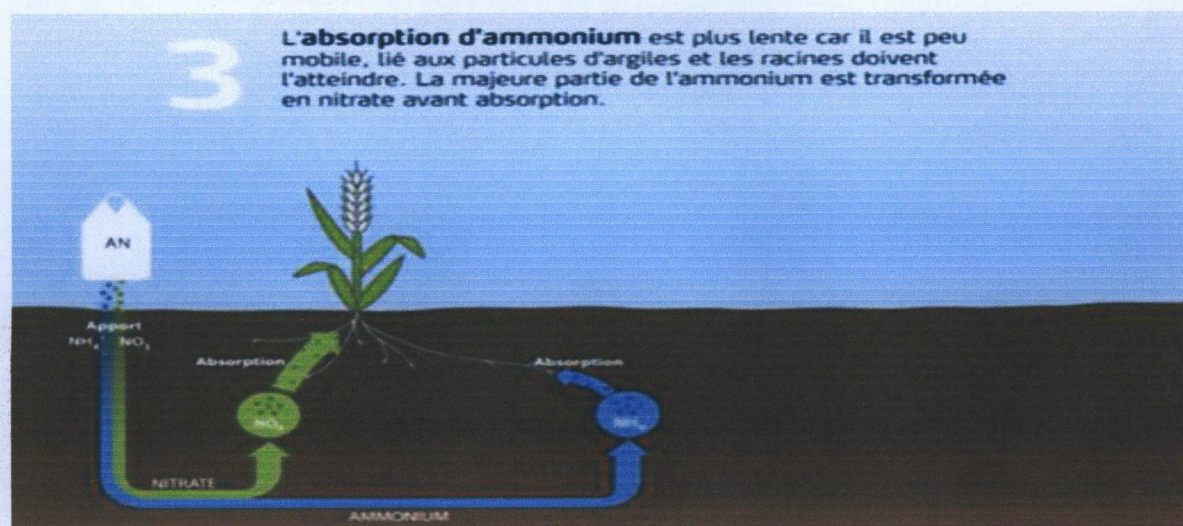
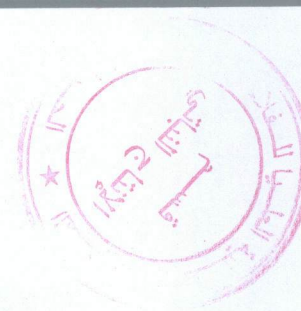


Figure 43 : Etape 3 : Absorption d'ammonium



- 4) **Etape 4 : Nitrification** de l'ammonium le convertissant en nitrate (quelques jours à plusieurs semaines), Des pertes surviennent à cette étape (Protoxyde d'azote, oxyde d'azote).

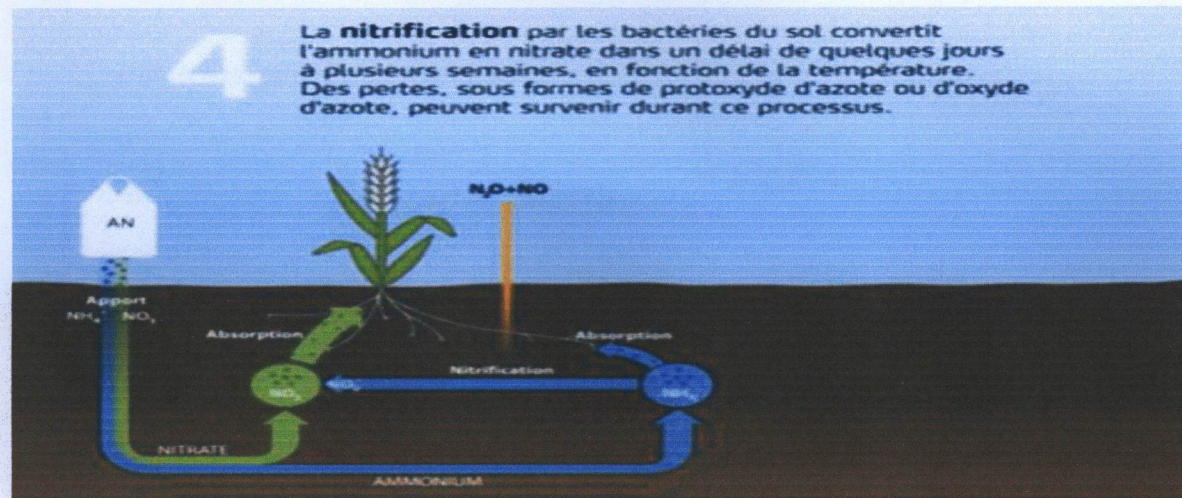


Figure 44 : Etape 4 : Nitrification

- 5) **Etape 5 : Dénitrification** (Favorisé par l'anaérobie du sol) ; Les nitrates (et nitrites) sont convertie en azote gazeux inerte, et marginalement en protoxyde d'azote et oxyde d'azote qui vont vers l'atmosphère

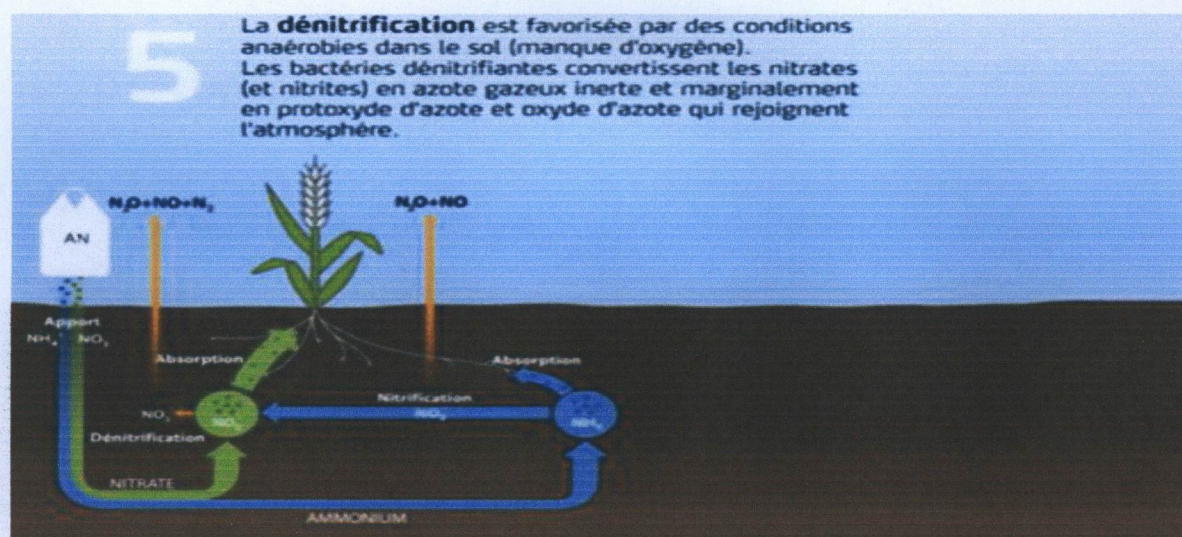
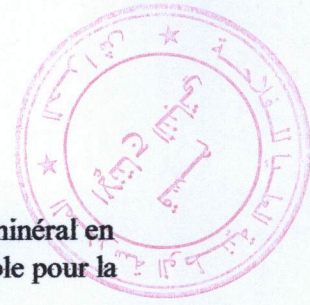


Figure 45 : Etape 5 : Dénitrification



6) **Etape 6 : L'Organisation microbienne transforme l'azote minéral en azote organique.** Celui-ci n'est plus immédiatement disponible pour la culture.

La **minéralisation** de la matière organique produit de l'ammonium (opération inverse)

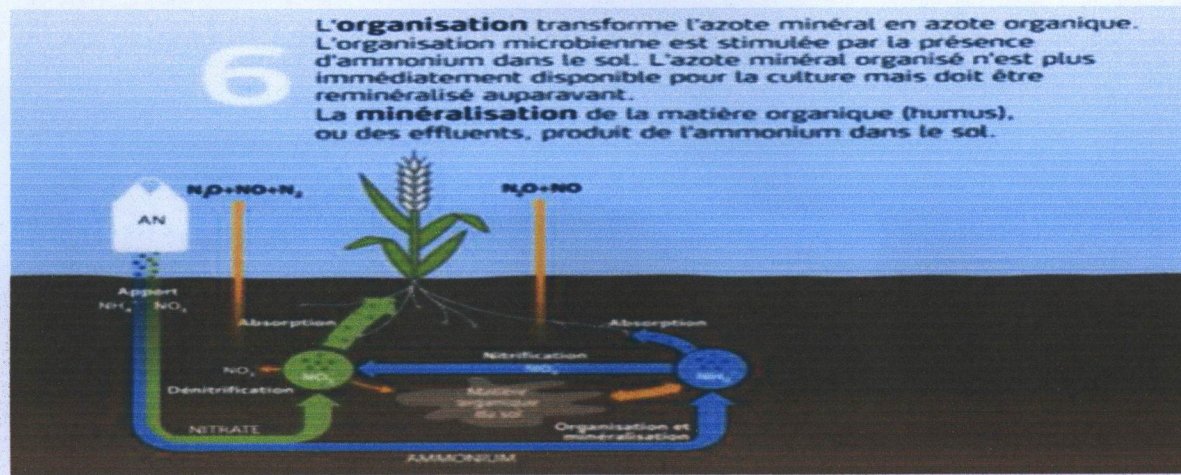


Figure 46 : Etape 6 : Organisation et minéralisation

7) **Etape 7 : Volatilisation ammoniacale** = Ammonium transformé en gaz et perdu dans l'atmosphère. Le phénomène est favorisé par un pH et une température élevée, un manque de pluie, et un apport en surface sans incorporation.

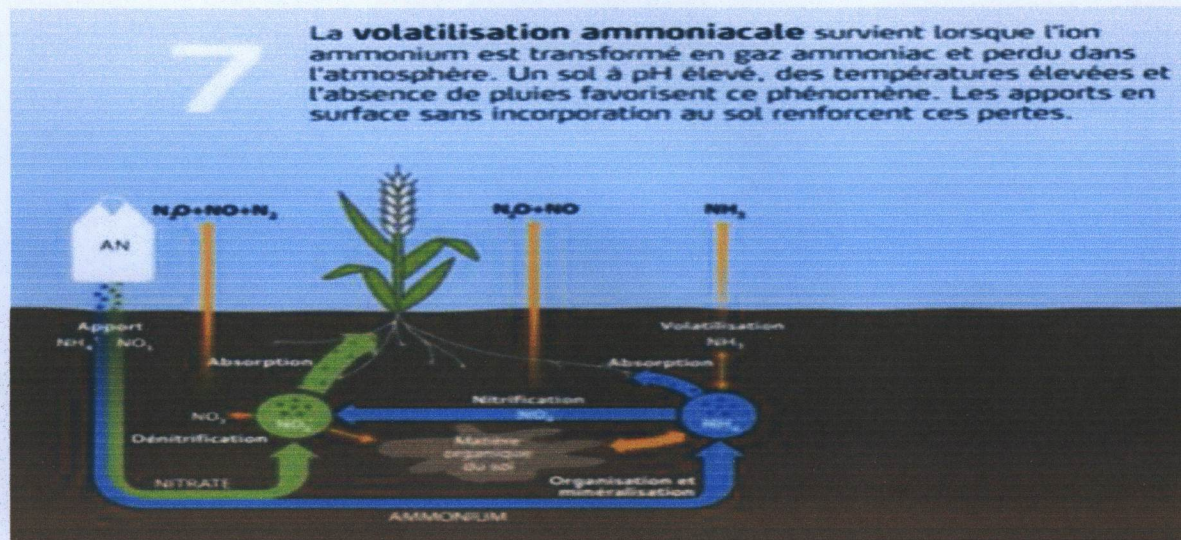


Figure 47 : Etape 7 : Volatilisation ammoniacale



- 8) **Etape 8 : Lessivage (Lixiviation)** des nitrates sous l'effet des pluies drainantes (surtout en Hiver-Automne) D'où l'intérêt d'une fertilisation ajustée.

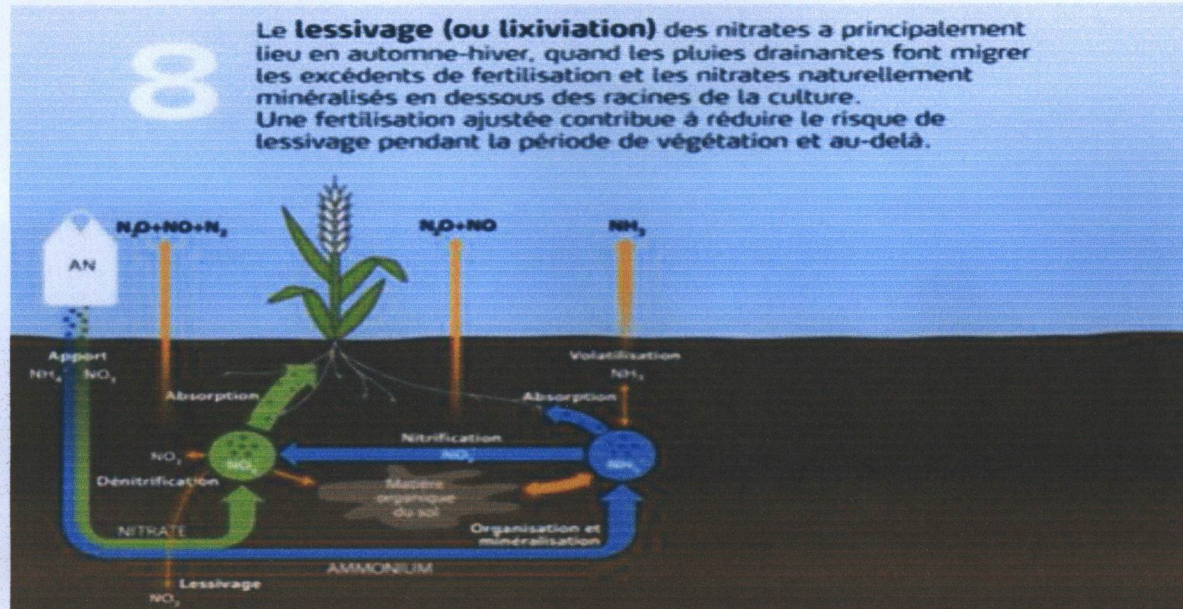


Figure 48 : Etape 8 : Lessivage des ions nitrates dans le sol

b. **Option 2 : Urée**

L'urée $CO(NH_2)_2$ est apporté sous formes de granulée d'azote, il contient 46% d'azote.

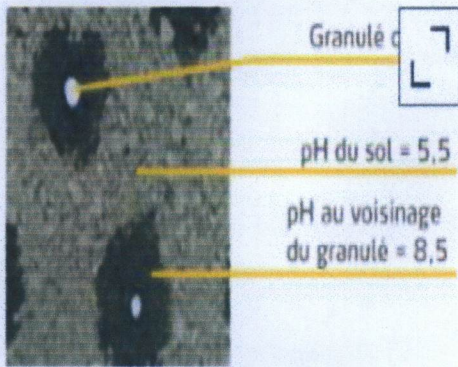
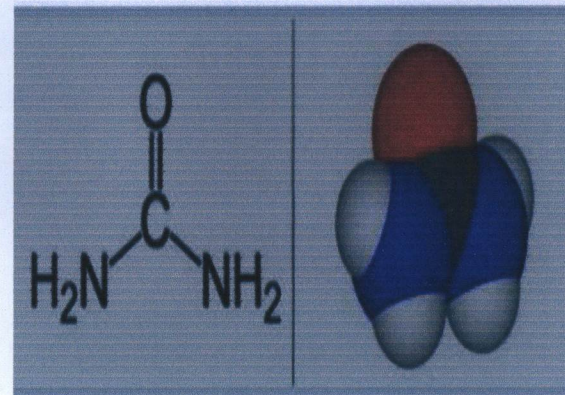


Figure 49 (à gauche) : Granulée d'urée

Figure 50 (à droite) : Molécule d'urée





1) Etape 1 : L'urée est appliquée.



Figure 51 : Etape 1 : Apport d'engrais

2) Etape 2 : **Hydrolyse de l'urée**, par les enzymes du sol, cela convertit l'urée en ammonium et CO_2 . Le temps varie selon la température et le processus augmente le pH du sol ce qui renforce les pertes par volatilisation ammoniacale.

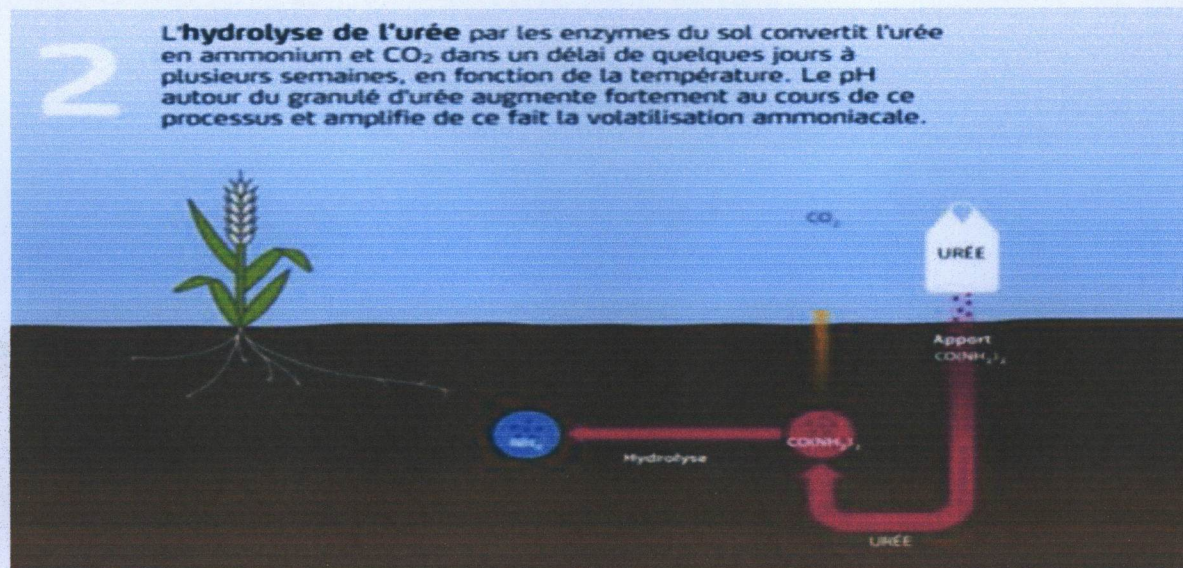


Figure 52 : Etape 2 : Hydrolyse de l'urée

- 3) **Etape 3 : Volatilisation ammoniacale** = Ammonium transformé en gaz et perdu dans l'atmosphère. Le phénomène est favorisé par un pH et une température élevée, un manque de pluie, et un apport en surface sans incorporation.

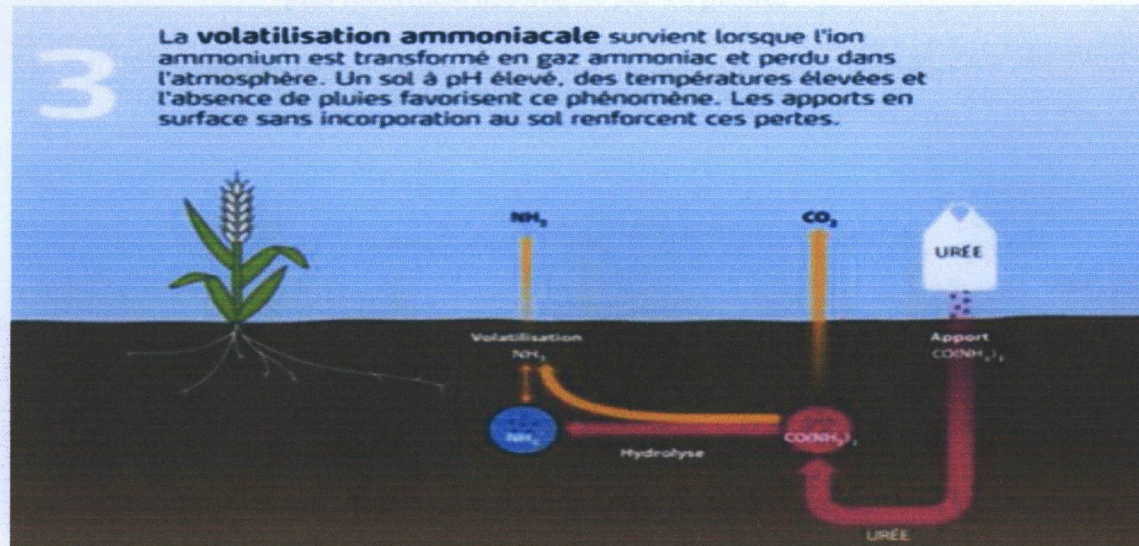


Figure 53 : Etape 3 : Volatilisation ammoniacale

- 4) **Etape 4 : Nitrification** de l'ammonium le convertissant en nitrate (quelques jours à plusieurs semaines), Des pertes surviennent à cette étape (Protoxyde d'azote, oxyde d'azote).

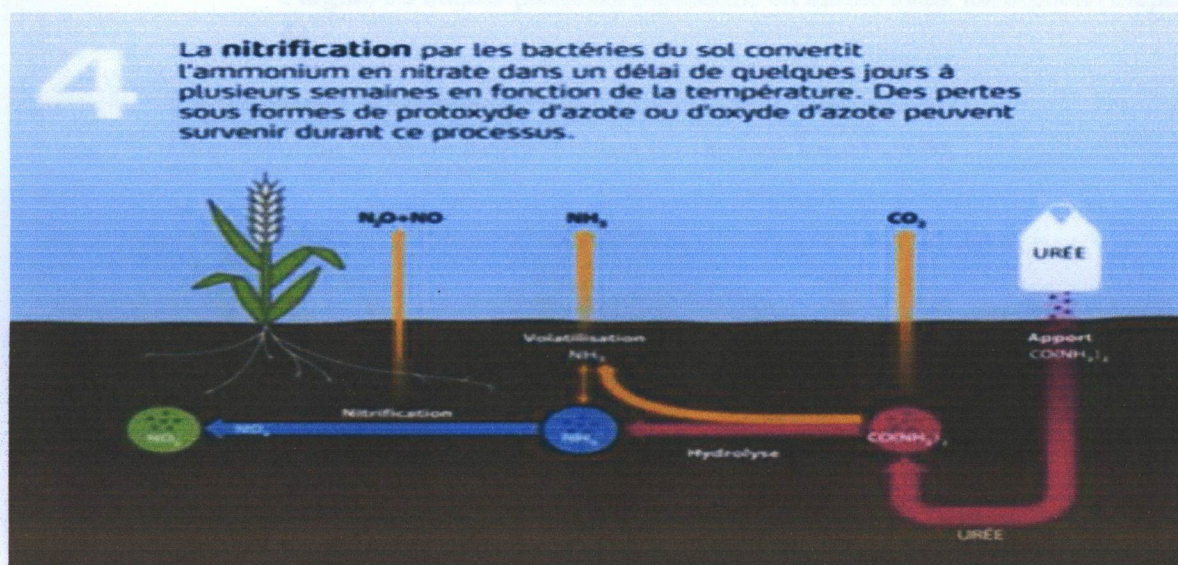
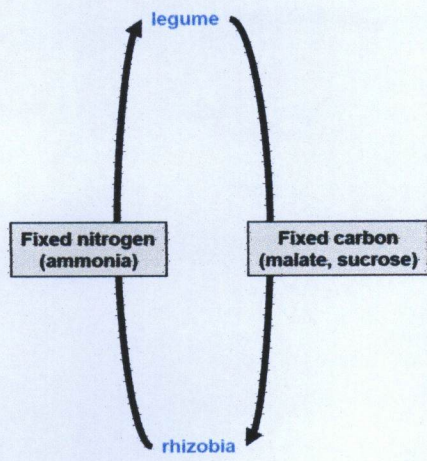


Figure 54 : Etape 4 : Nitrification



6. Fixation symbiotique de l'azote atmosphérique



Les légumineuses s'associent avec le rhizobium dans une relation donnant-donnant.

- La légumineuse fournit le carbone (malate, sucrose...) au rhizobium
- En contrepartie le rhizobium fournit fixe l'azote atmosphérique pour fournir l'azote pour la plante.

Figure 61 : Relation entre la légumineuse et le rhizobia.

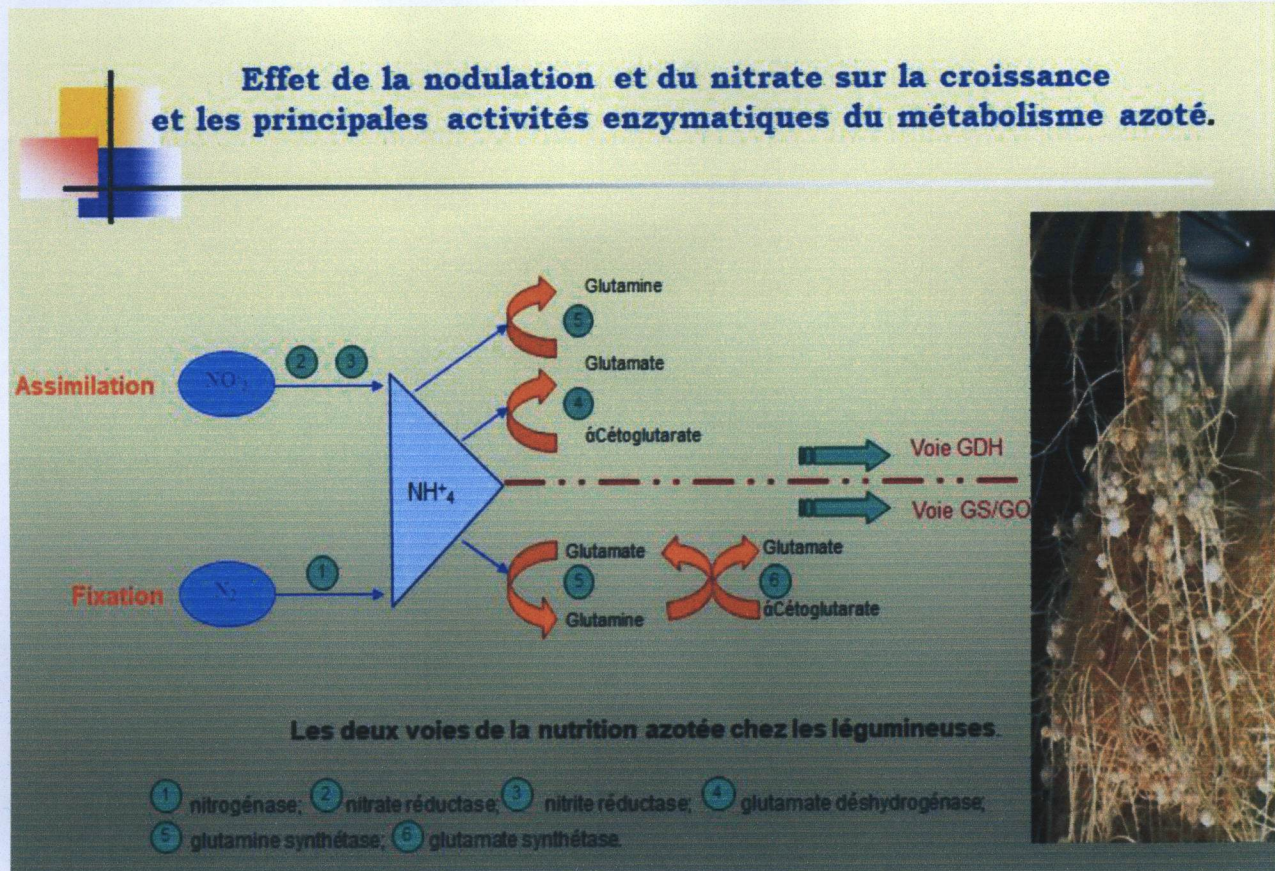
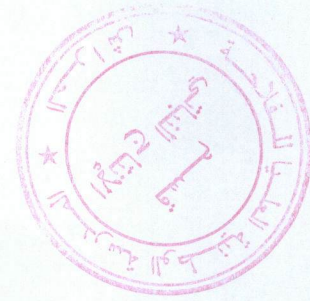


Figure 62 : Voies de nutrition azotée chez les légumineuses et activités enzymatiques du métabolisme azotée



Les légumineuses ont deux voies de nutrition azotée :

- **L'assimilation** : Le NO_3^- est transformé en NH_4^+ par l'effet de la nitrate réductase et nitrite réductase
- **La fixation** : Le N_2 est transformé en NH_4^+ par l'effet de la nitrogénase. C'est une opération qui consomme beaucoup d'ATP.

Biological nitrogen fixation:

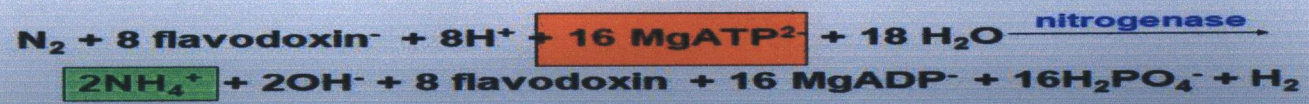


Figure 63 : Formule de la fixation biologique de de l'azote.

La fixation biologique de l'azote consiste en la réduction du gaz atmosphérique (N_2) en ions ammoniums (NH_4^+) par l'effet de l'enzyme **nitrogénase** qui catalyse cette réaction : $\text{N}_2 + 3 \text{ H}_2 \Rightarrow 2 \text{ NH}_3$

L'activation de cette réaction nécessite 16 ATP pour briser le tripe lien N-N. Ce qui en fait l'une des réactions les plus consommatrice d'énergie dans la nature.

Le pouvoir de réduction est fourni par la NAPH/ferredoxin.

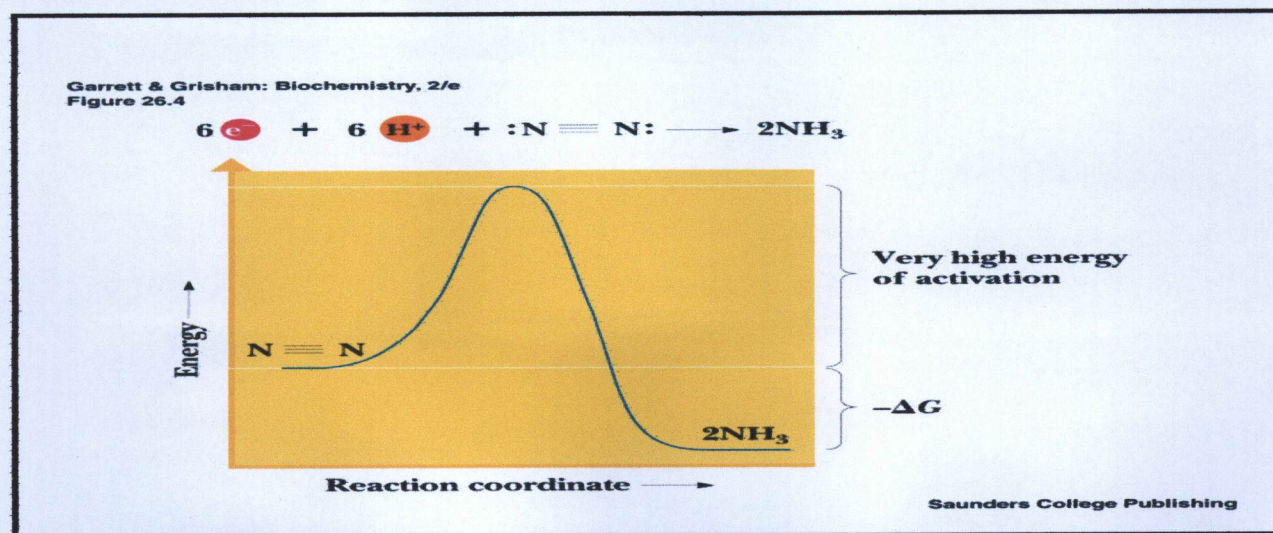


Figure 64 : Energie nécessaire pour la activer la fixation d'azote



Il existe différents systèmes de fixation de l'azote atmosphérique selon l'organisme (bactéries) qui s'associe à la légumineuse :

- **La symbiose** : (Ex : *Rhizobium*) C'est le système qui fixe le plus d'azote (50-400 kg/ha/an), et qui prend le sucrose fourni par la plante comme source de carbone.
- **L'association** : (Ex : *Azospirillum*) Fixe entre 10 et 200 kg/ha/an et prend les exsudats racinaires de la plante hôte comme source de carbone.
- **Les bactéries libres fixatrices d'azotes** : (Ex : *Rhodospirillum*) : Selon la source d'énergie : Hétérotrophe (Résidus des plantes) ou Autotrophe (Photosynthèse) les bactéries fixe respectivement entre 1-2 kg N/ha/ (Hétérotrophe) ou 10-80 kg N/ha/an (Autotrophe)

Ecology of nitrogen-fixing bacteria

System of N ₂ fixation (and microbes involved) (N ₂ → NH ₃)	SYMBIOSIS (e.g. <i>Rhizobium</i>)	ASSOCIATION (e.g. <i>Azospirillum</i>)	FREE-LIVING (e.g. <i>Rhodospirillum</i>)
Energy source (Organic C)	Sucrose from the host plant	Root exudates from the host plant	Heterotroph (plant residues) ; Autotroph (photosynthesis)
Estimates of fixation rate (kg N/ha/y)	50-400	10-200	1-2 10-80

Figure 65 : Ecologie des bactéries fixatrices d'azote

La fixation symbiotique de l'azote requière une quantité important d'énergie. Cette quantité est estimée théoriquement à 35 kJ par mol d'N fixé. Le coût énergétique mesuré est de 15 à 30 g de CH par NH₃ produit. L'assimilation de NH₃ quant à lui consomme entre 3.1-3.6 g de CH.

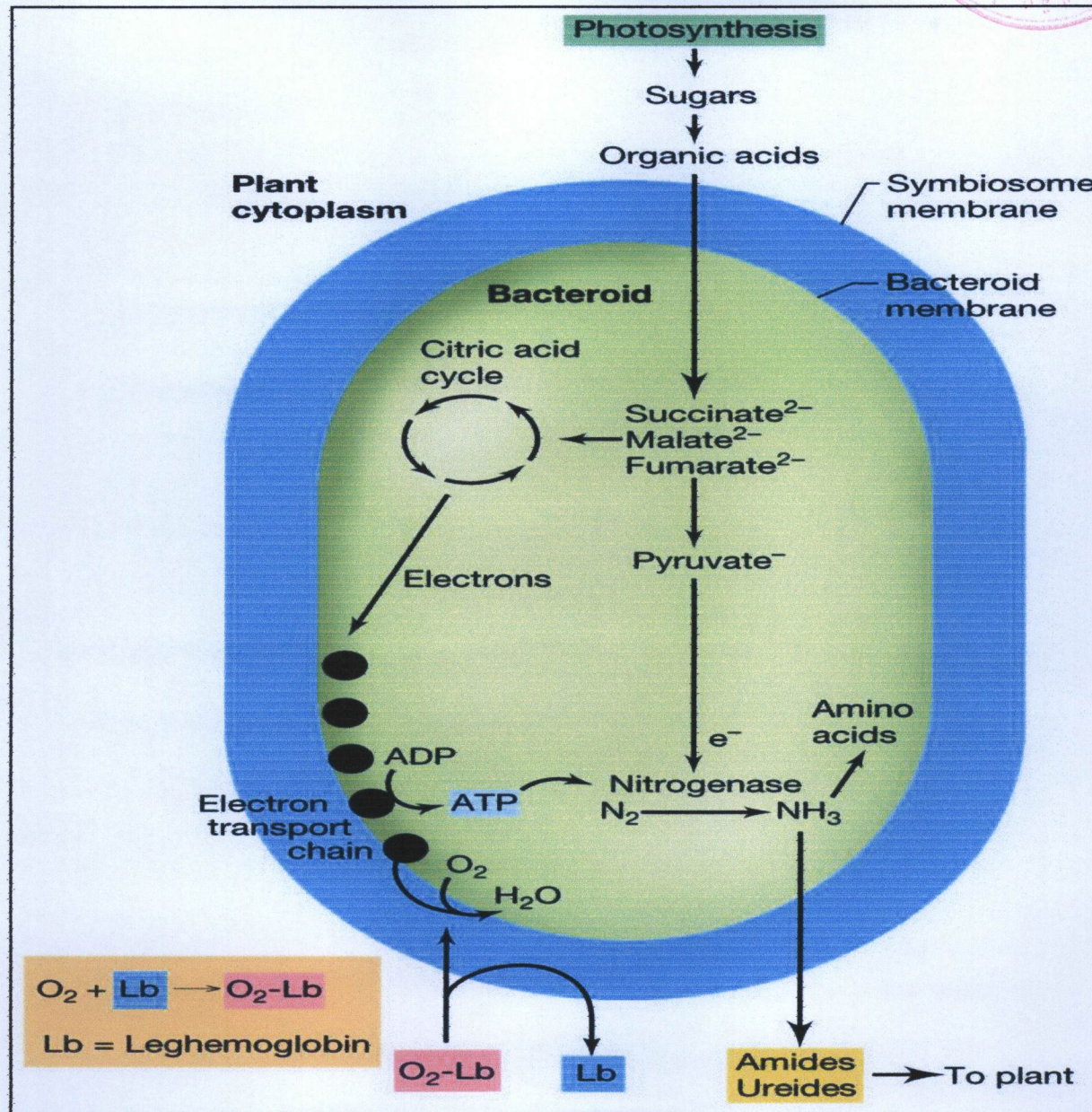


Figure 66 : Schématisation de la fixation symbiotique

7. Besoins et déficience en azote

L'azote est l'un des éléments pour lequel les plantes sont le plus exigeantes, c'est pour cela qu'en générale c'est l'élément pour lequel on apporte le plus de fertilisants.

Tableau 10 : Quelques exigences de certaines espèces en Azote

Espece	Besoin en N
Maïs en grain	2,3 uN/quintal
Maïs en fourrage	14 uN/tonne de matière sèche
Blé	3 unités d'azote /quintal
Orge	2,5 unités d'azote/quinta
Triticale	2,6 kg N /quintal produit
Seigle	2,3 kg N /quintal produit
Avoine	2,2 kg N /quintal produit
Colza	7 kg N absorbé/quintal produit
Tournesol	4,5 kg N absorbé/quintal produit
Soja	Pas de N, (avec présence de rhizobia)
Pois	Pas de N, (avec présence de rhizobia)
Féverole	Pas de N, (avec présence de rhizobia)
Pomme de terre	25 kg N / ha
Sorgho	14 uN/tonne de matière sèche
BETTERAVE SUCRIERE	260 kgN/ha

Important : Avant d'apporter le fertilisant il faut prendre en considération le précédent cultural et le type du sol (fertilité+texture)

Tableau 11 : Effet du précédent sur la fertilisation azotée (cas du maïs)

	Pomme de Terre	Chou	Soja <i>Acquisition en cours de référence</i>	Tabac	CIPAN sans légumineuses	CIPAN avec légumineuses
Effet précédent (kg N/ha)	40	40	30	40	15	30



La déficience en azote est un phénomène bien connu avec des symptômes caractéristique le plus fréquent étant la coloration jaune des feuilles âgées. (Alors que dans les cas de sur fertilisation la feuille est excessivement verte).

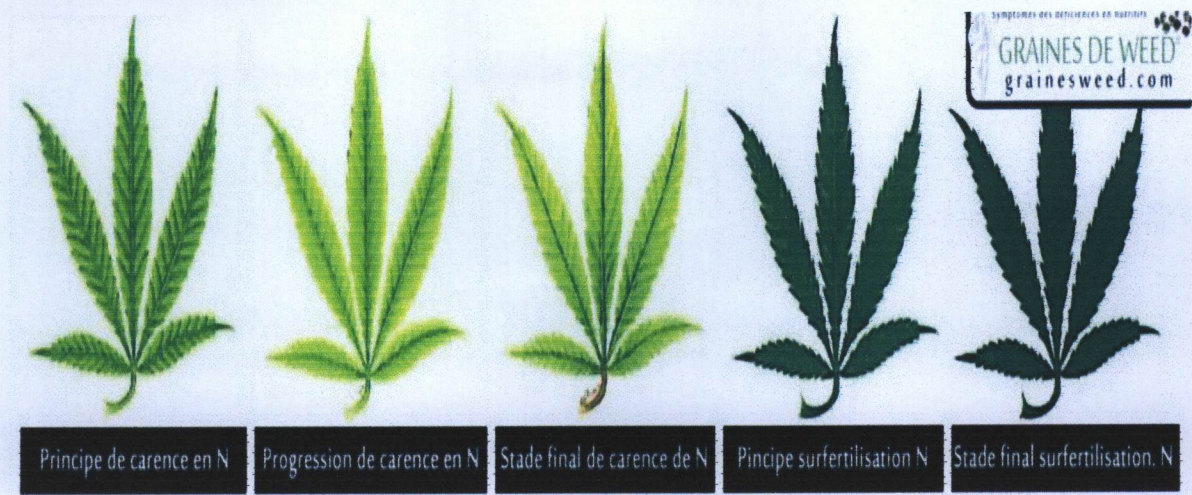


Figure 67 : Effet de la carence et la sur fertilisation en azote sur la coloration de la feuille
En plus d'affecter les feuilles la carence en azote affecte d'autre processus physiologiques dont le remplissage du grain.



Figure 67 : Effet de la carence n en azote sur la feuille et le remplissage du grain de maïs.



Chapitre 4 : Nutrition phosphatée

1. Le phosphore dans la plante

La matière sèche de la plante renferme environ **1% de phosphore**. Au niveau de la plante, le P se répartit entre :

- Un **pool métabolique**, situé dans le cytoplasme et les chloroplastes
- Un **pool non métabolique** dit de réserve, sous forme inorganique au sein des vacuoles.

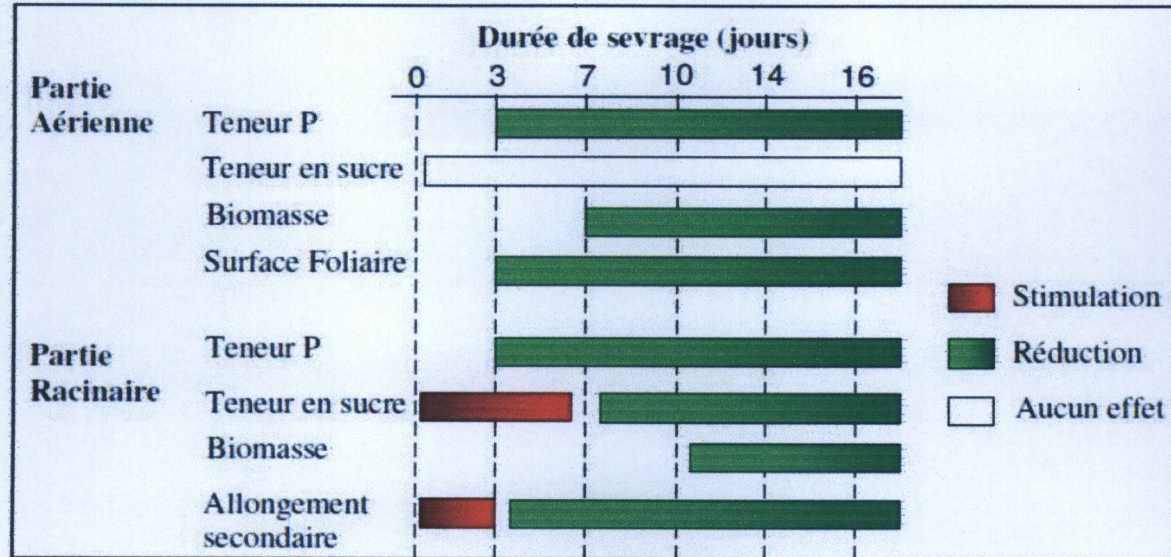


Figure 68 : Effet du sevrage sur certaines variables liées au phosphore

Le phosphore est un élément majeur, il assure plusieurs fonctions au sein de la plante. Ses rôles métaboliques sont :

- **Rôle Structural** : Entre dans la constitution des phospholipides et acides nucléiques (pont stable entre deux chaînes carbonées, estérifiées sur un groupe hydroxyle d'une chaîne carbonée).
- **Rôle Energétique** : par le haut potentiel que le phosphoryle confère à certaines molécules (ATP)
- Rôle de **régulateur des voies métabolique** par sa répartition entre chloroplaste et cytoplasme.
- Rôle dans la **formation correcte des graines** (des quantités importantes de phosphore sont stockées dans les semences sous forme de **phytine**) et accélère leur **maturation**.
- Rôle de **stimulant de la croissance racinaire**.
- Rôle de **stimulant de la fixation d'azote** chez les légumineuses.



2. Le phosphore dans le sol (Biodisponibilité et prélèvement par la plante)

Le P dans le sol existe sous deux formes principales (**minérale** et **organique**) qui se répartissent selon deux phases :

- **Phase liquide** (le P en solution) : On trouve le phosphore sous 2 formes $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}
On trouve entre **0.08 et 2.31 mg de P par 1 litre** Soit **10 à 100 g / ha**
- **Phase particulaire** (le P lié à la phase solide) : Le phosphore est l'un des 6 macronutriments (N, P, K, Ca, Mg et S) les plus inaccessibles du sol. Plus de **90%** du phosphore total est sous **forme insoluble**.

Un indice important est le **ratio C/P**, il permet de déterminer si le phosphore du sol est minéralisé (libéré) ou immobilisé. Ainsi selon la valeur de cette indice C/P on a 3 cas :

- **C/P < 200** : minéralisation nette, d'où libération du phosphore organique.
- **C/P entre 200 et 300** : Absence de gain ou de perte de phosphore inorganique disponible pour la plante.
- **C/P > 300** : Immobilisation nette.

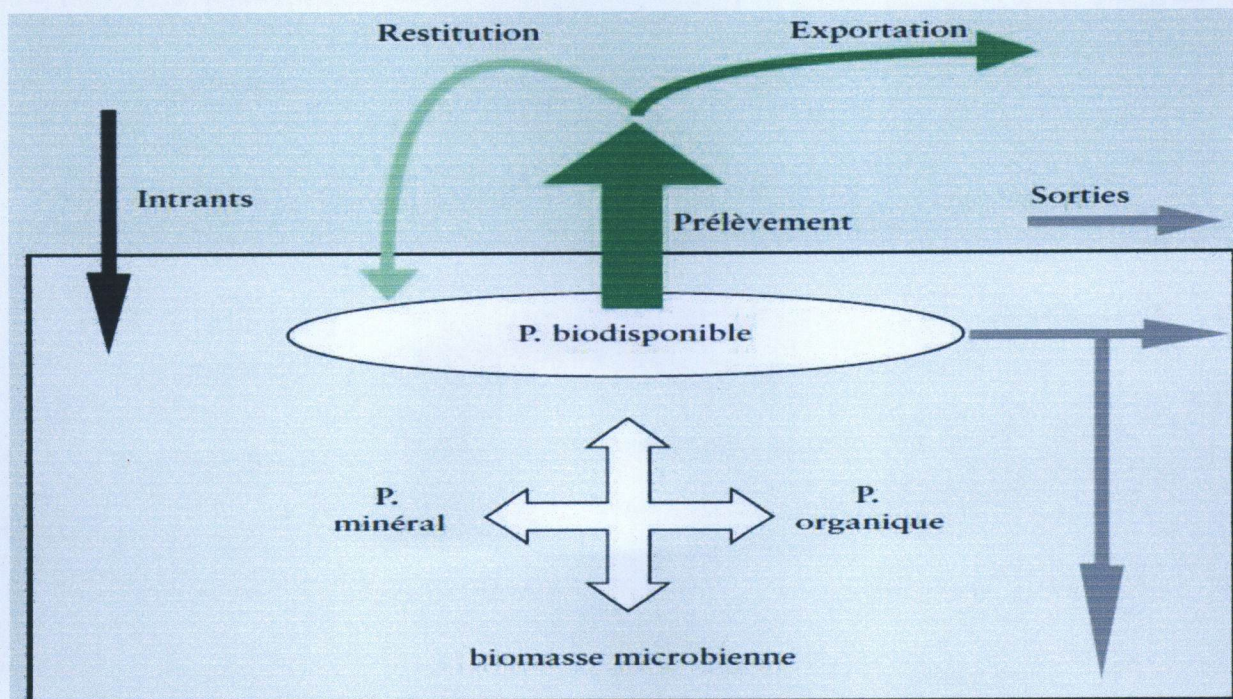


Figure 69 : Dynamique du phosphore dans le sol



Il y'a plusieurs mécanismes qui contrôlent le transport des ions P entre le sol et la plante :

- **L'abaissement de la concentration des ions P à la surface de la racine suite à son absorption** conduisant à la création d'un gradient entre cette surface, la solution du sol et sa phase solide
- Le **déplacement des ions P par diffusion** dans la solution du sol suite à l'existence de ce gradient de concentration
- Le **flux de convection de l'eau du sol (mass flow)** associé à la transpiration des cultures. Ce transport est considéré négligeable compte tenu de la faible concentration du P dans la solution

3. Besoins des cultures en phosphore

Le phosphore, avec le Potassium et l'Azote est l'un des 3 éléments majeurs en agriculture. Les quantités apportées sont importantes en comparaison avec les autres éléments.

Certaines cultures sont plus exigeantes que d'autres notamment les légumineuses pour qui le phosphore est souvent considéré comme le principal élément limitant.

Selon les besoins on a :

- **Cultures peu exigeantes en phosphore :**

Le **maïs** est une culture peu exigeante en phosphore et moyennement exigeante en potassium. Les exportations du maïs grain sont faibles (0,6 kg/q de P soit 60 kg/ha pour 100 q/ha et 0,55 kg/ha de K soit 55 kg/ha pour 100 q/ha).


L'impasse est possible et la fumure de fond se gère sur la rotation. Le **blé** est une culture peu exigeante en phosphore et en potassium.

L'impasse est tout à fait possible en se basant sur des analyses de sols régulières et une gestion de la fertilisation de fond sur la rotation.

Les exportations avec enfouissement des pailles sont de 0,65 kg/q de P (52 kg/ha pour 80q) et 0,5 kg/ha de K (40 kg/ha pour 80q).

En situation avec exportation des pailles, les exportations sont de 1,2 kg/q de P (96 kg/ha pour 80q) et 1,8 kg/ha de K (144 kg/ha pour 80q).

Tableau 12: Exigence en P et en K pour certaines espèces céréalières



	Besoin P / quintal grain récolté	Besoin K / quintal grain récolté
Triticale	0,65	0,50
Seigle	0,65	0,45
Avoine	0,75	0,45
Epeautre	0,65	0,50

- Cultures moyennement exigeantes en phosphore :

L'**orge** est moyennement exigeante en P (exportation du grain de 0,65 unité/quintal de grain produit) et peu exigeante en K (exportation du grain de 0,55 unité/quintal de grain produit).

En sol correctement pourvu, les impasses sont possibles, d'autant plus s'il y a des apports de matières organiques dans la rotation.

Le pois et la féverole sont moyennement exigeants en phosphore et en potasse. Les exportations de ces protéagineux sont de :

- **pois** : 0,80 unité de phosphore et 1,15 unité de potasse par quintal produit.
- **féverole** : 1,20 unité de phosphore et 1,30 unité de potasse par quintal produit.
- **lupin** : 0,75 unité de phosphore et 1,05 unité de potasse par quintal produit.

- Cultures très exigeantes en phosphore :

La **pomme de terre** est très exigeante en phosphore et en potasse. Les impasses sont impossibles (fumure équivalente au minimum aux exportations), se baser sur des analyses de sol régulières.

Les exportations sont de 0,95 unité de phosphore et de 3,90 unités de potasse par tonne produite.

4. Effet de la déficience en phosphore

La déficience en phosphore a des effets négatifs sur la plante, cette déficience va affecter les différentes fonctions dans lequel entre le phosphore.

Cela va entraîner des **changements** qui peuvent être **morphologiques** (prolifération de poils absorbants...), **métabolique** (altération du métabolisme, baisse de la fixation d'azote...), ou encore **physiologiques** (mobilisation et recyclage du phosphore intracellulaire...)

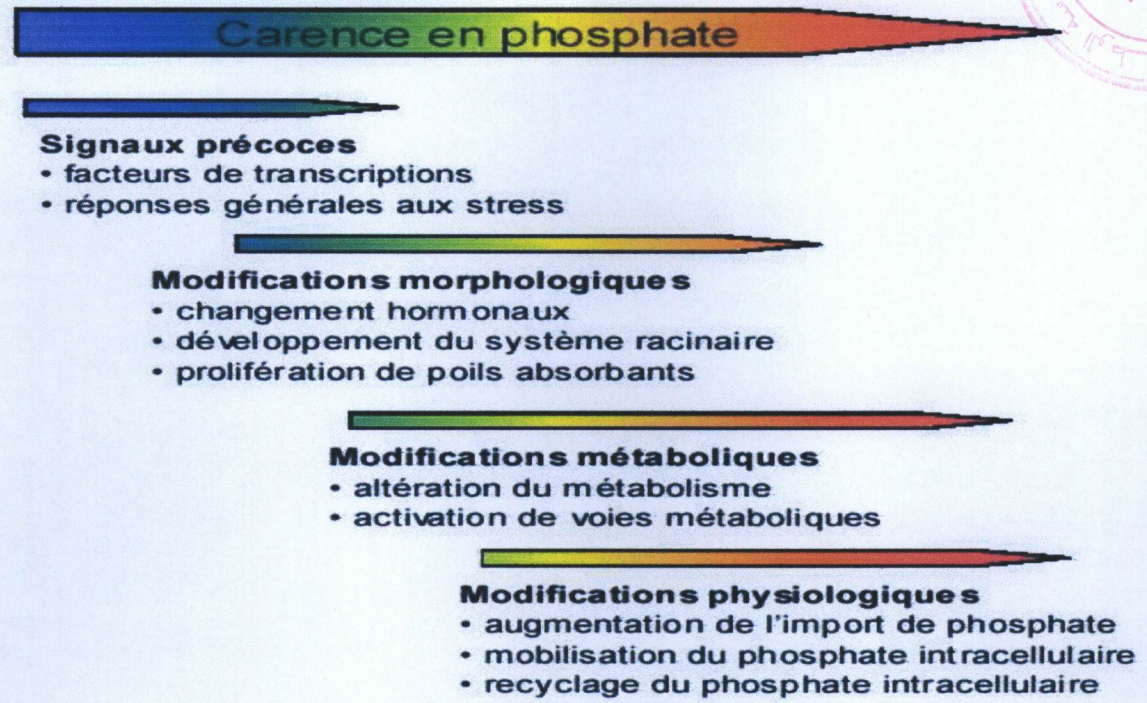
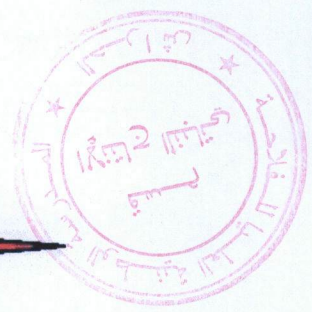


Figure 70 : Conséquence de la carence en phosphore selon l'intensité La carence en phosphore laisse des symptômes visibles, le plus connu étant une coloration pourpre des feuilles.

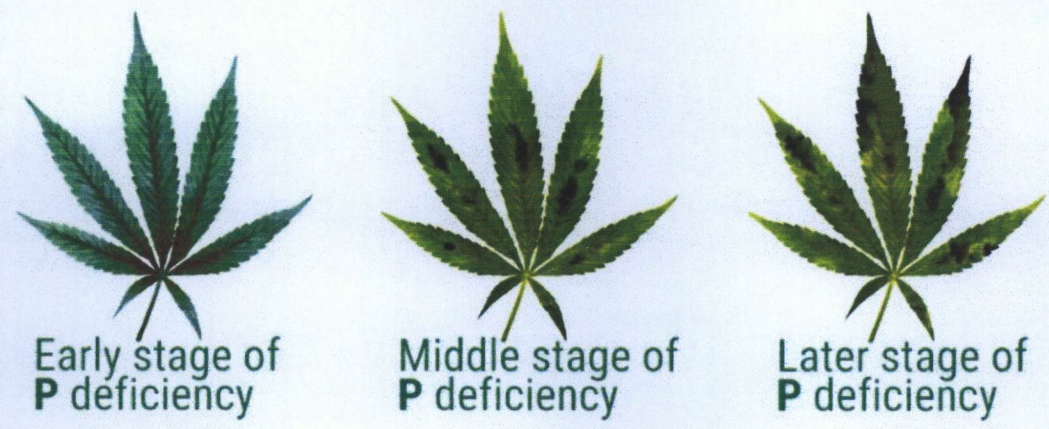


Figure 71 : Différents stage de la carence en phosphore



Figure 72 : Symptômes de la carence en P sur pois chiche

5. Déficiencia en P et symbiose plante-microbes

Le phosphore est un élément important pour la plante, cela est d'autant plus valable pour les légumineuses qui en ont besoin comme source **d'énergie pour la fixation symbiotique de l'azote.**

La déficiencia en phosphore a donc un effet négatif aussi bien sur la plante que sur les microbes du sol.

Pour répondre à cette déficiencia, la plante va sécréter des exsudats racinaires sous l'effet du **gradient de stress** pour solubiliser le phosphore du sol.

D'un autre côté il existe des bactéries solubilisatrices du phosphore qui vont augmenter sa disponibilité dans le sol.

Le schéma représenté au niveau de la figure n° 73, montre l'ensemble des processus de solubilisation et du prélèvement du phosphore dans le système complexe : sol, plante, microorganisme et atmosphère. Celui-ci concerne le cas des plantes légumineuses qui sont caractérisées par la symbiose rhizobienne dont laquelle le compartiment nodulaire joue un rôle clé dans l'amélioration de la biodisponibilité du phosphore pour la plante afin d'améliorer d'avantage son pouvoir de fixation symbiotique.

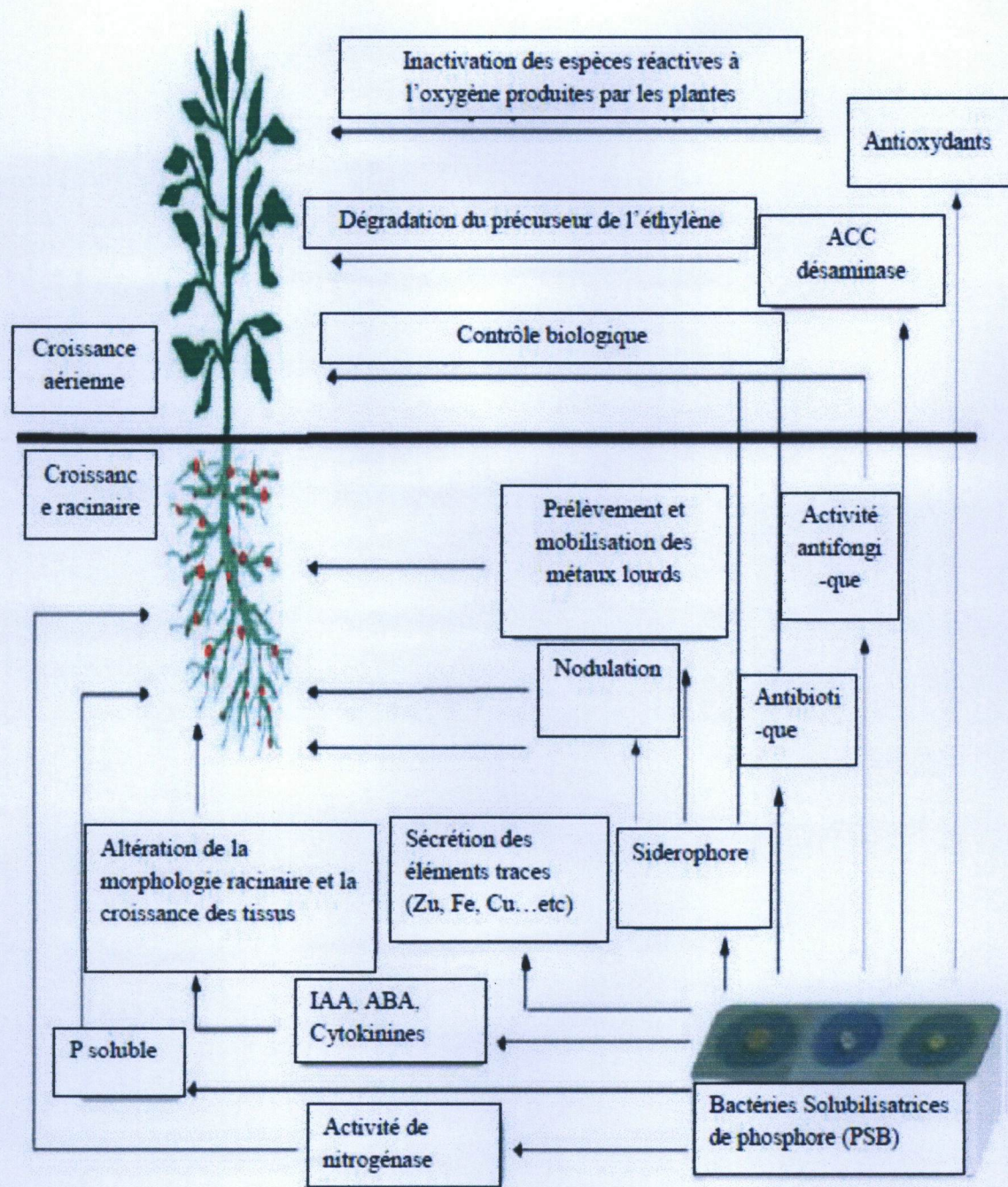
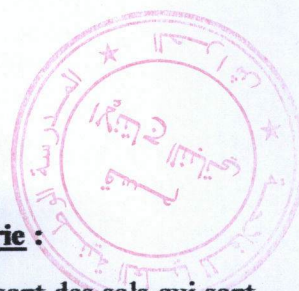


Figure 73 : Relation entre les légumineuses et les microbes à propos du Phosphore.



6. Déficience en P et intensification des systèmes de culture en Algérie :

La majeure partie des sols Algériens sont calcaires et alcalins, de ce fait ce sont des sols qui sont très pauvre en phosphore. En effet en sols calcaires, le phosphore est non disponible on le retrouve sous forme d'ortho phosphate.

La déficience en P des sols algériens provoque des rendements à la fois faibles et instables.

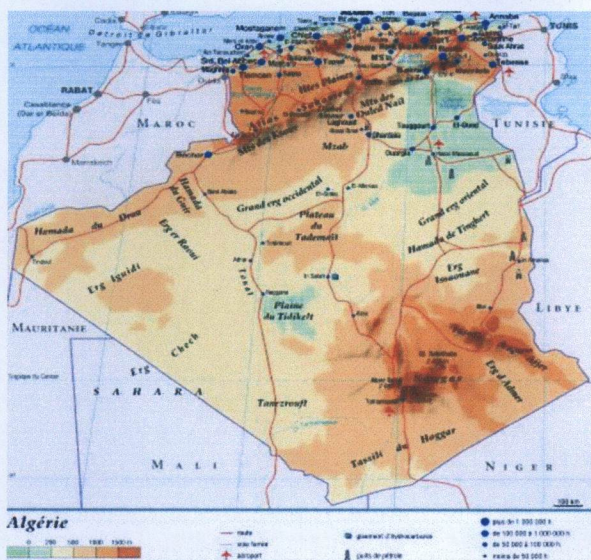


Figure 73 (à gauche) : Carte de l'Algérie.



Figure 74 (à droite) : Roche phosphatée.

Associée à cette déficience, le stress hydrique, les agents pathogènes et les mauvaises pratiques culturales (Notamment la jachère qui représente 40% des sols agricole) qui accentue l'alcalinisation et l'appauvrissement des sols.

Pour répondre à une population grandissante, à une chute des prix du pétrole, et pour pouvoir assurer la sécurité alimentaire et répondre aux enjeux économiques futurs, il est nécessaire d'intensifier le système de cultures.

Cette intensification passe forcément par l'amélioration des légumineuses et leur introduction dans les systèmes de cultures. Le rôle des légumineuses en plus de diversifier les cultures et de fixer l'azote sera d'acidifier la rhizosphère afin de libérer le Phosphore augmentant ainsi sa biodisponibilité.

Cette amélioration dans la production des légumineuses, se fait par la sélection de plantes, et leur association avec les microorganismes, et le remplacement de la rotation céréales-jachères qui est dominante par la rotation céréales-légumineuses ou des associations céréales légumineuses.



Figure 75 : Relation entre la rhizosphère, la M.O, la respiration du sol, la photosynthèse, la biodisponibilité du P et la séquestration du C et du N.

Les associations de cultures ont déjà montré leur utilité, de par leurs nombreux services agro-écologiques, permettant l'augmentation des rendements, l'absorption d'azote et de phosphore, la libération de phosphore dans la rhizosphère... etc

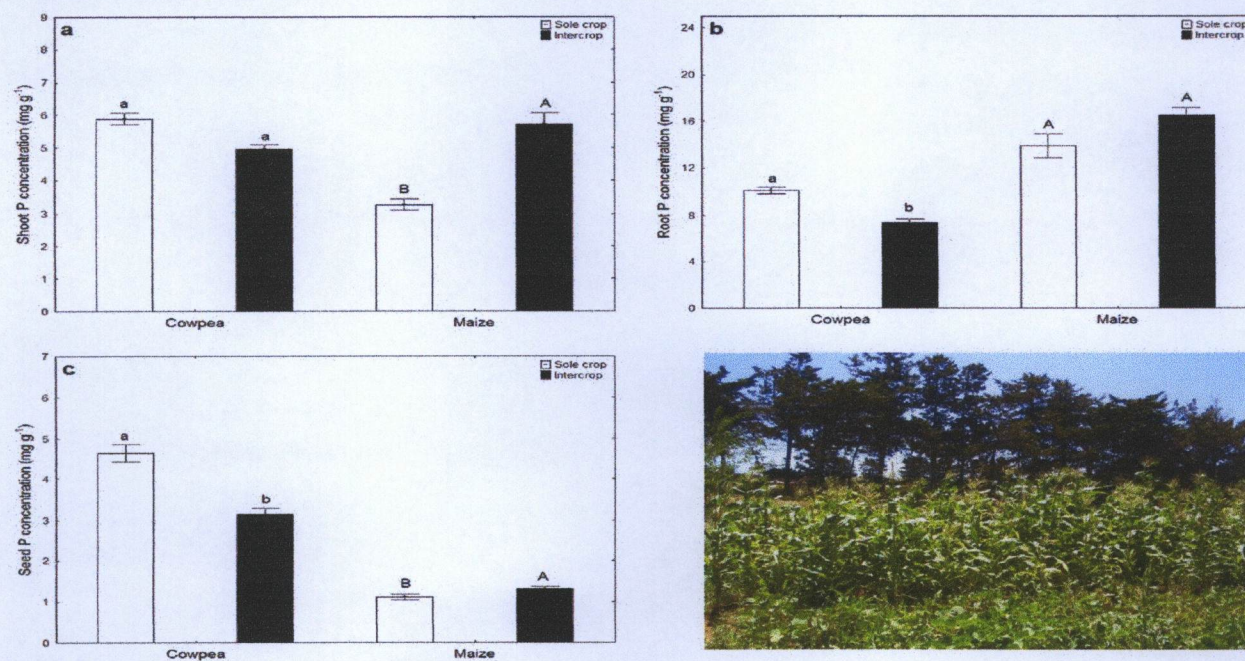


Figure 75-76-77-78 : Comparatif entre les cultures pures de maïs et de niébé en comparaison avec leurs intercropping en termes de concentration en P dans les racines, la partie aérienne et la graine. Et illustration de l'intercropping maïs-niébé.



Chapitre 5 : Nutrition de la plante et oligo-élément (Ca, K et Mg.....)

1. Notion de toxicité

Les Eléments minéraux sont essentiels à la vie de la plante, leur absence entrainant une déficience et ayant des répercussions négatives sur la plante. En parallèle, un excès de ces éléments devient toxique pour la plante et se traduit aussi par des anomalies dans la physiologie de la plante, affectant ainsi son développement et son rendement.

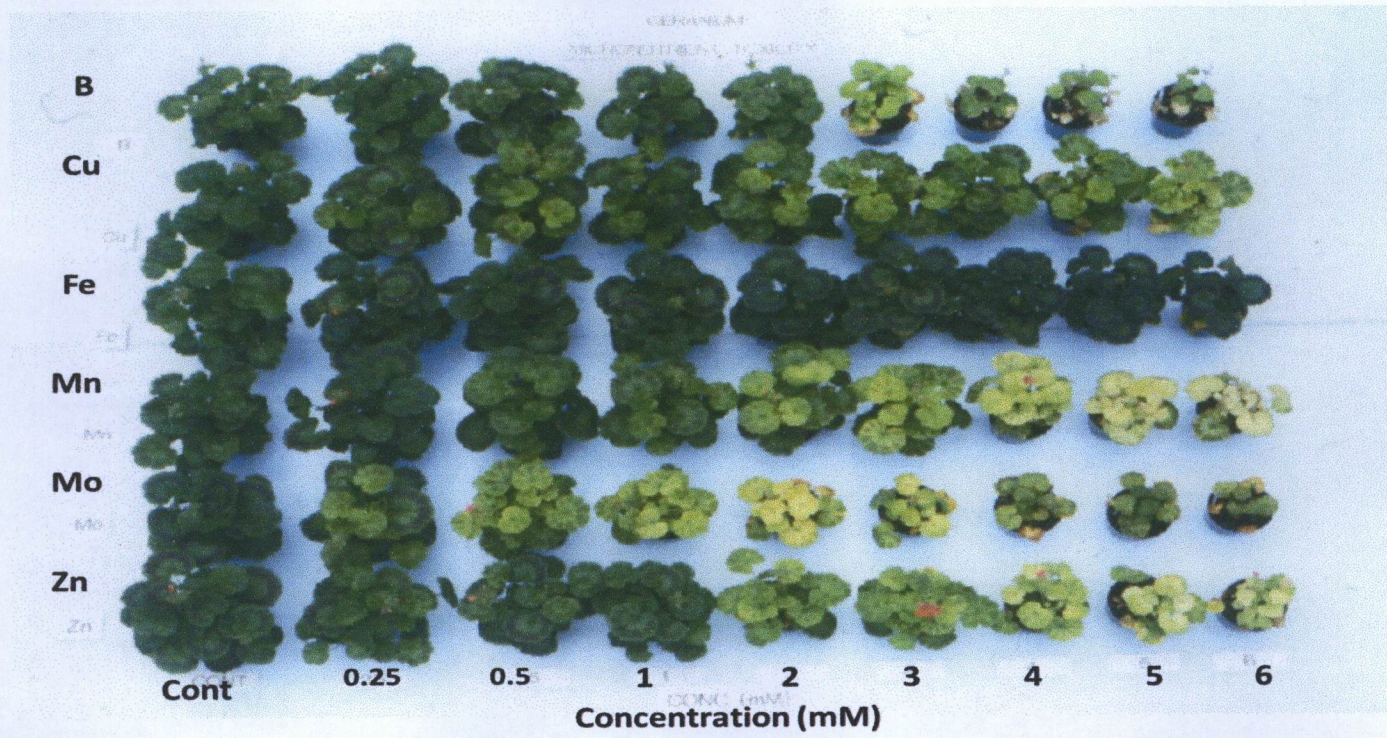


Figure 79 : Effet de l'augmentation excessif de certains éléments sur la croissance de la plante

2. Potassium (K)

a. Relation au sol :

Le potassium est présent en **grande quantité dans la majorité des sols**, sauf dans les sols organiques ou il est relativement peu présent.

b. Fonctions dans la plante :

Le Potassium **active plusieurs enzymes** au sein de la plante et **régule le mouvement de l'eau** entre les membranes et au travers des stomates (Cellules de gardes)



c. Déficience et toxicité :

Les symptômes de la déficience en K sont :

- Brunissement et nécrose de l'extrémité des feuilles.
- Les feuilles âgées sont les plus affectées.

La toxicité due au K a pour conséquences :

- Nécrose de l'extrémité des feuilles

Figure 80 : Symptôme de la déficience en potassium

d. Fertilisants :

Les principales formes de potassiums utilisés pour la fertilisation sont :

- Chlorure de Potassium (KCl)
- Sulfate de Potassium (K₂SO₄)
- Nitrate de Potassium (KNO₃)

3. Calcium (Ca)

a. Relation au sol :

Le calcium est présent en **grande quantité sur la surface de la terre**, et il a une grande influence sur la disponibilité des autres ions.

b. Fonctions dans la plante :

Le calcium entre dans la composition de la paroi cellulaire, et participe au fonctionnement des membranes cellulaire.

Il est largement présent en tant que pectine de calcium dans la lamelle moyenne, les **pectines de calcium sont immobiles dans la plante**.

c. Déficience et toxicité :

Les symptômes de la déficience en Ca sont observés chez les nouvelles tiges et les jeunes feuilles (immobilité du Ca) :

- Nécrose apicale chez la tomate
- Distorsion des feuilles, plaques nécrotique, nécrose de l'extrémité de la tige.

Aucune toxicité du calcium n'a été observée.



Figure 81-82 : Symptômes de la déficience en calcium

d. Fertilisants :

Le calcium est principalement apporté sous forme de :

- Carbonate de Calcium (CaCO_3), Gypse (CaSO_4)
- $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$
- Superphosphate
- Os Broyé (Source organique)

4. Soufre (S)

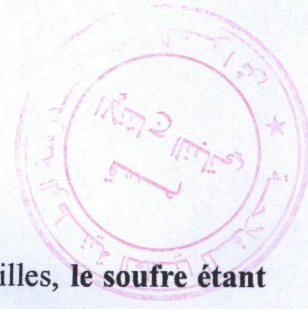
a. Relation au sol :

Présent dans les pyrites minérales, (FeS_2), les sulfides (complexes minérales à base de soufre), et les sulfates (complexes minérales à base de SO_4^{2-}). On le retrouve aussi **principalement dans la matière organique**. Les pluies acides permettent de fournir du soufre au sol.

b. Fonctions dans la plante :

Le soufre entre dans plusieurs fonctions de la plantes :

- C'est une composante des acides aminés (méthionine, cystéine)
- Il constitue les co-enzymes et les vitamines
- Il est responsable de l'odeur et le goût de certaines espèces (Moutarde, oignon, ail)



c. Déficience et toxicité :

Les signes de la déficience en soufre sont un jaunissement des nouvelles feuilles, **le soufre étant immobile.**

La toxicité est rarement observée.

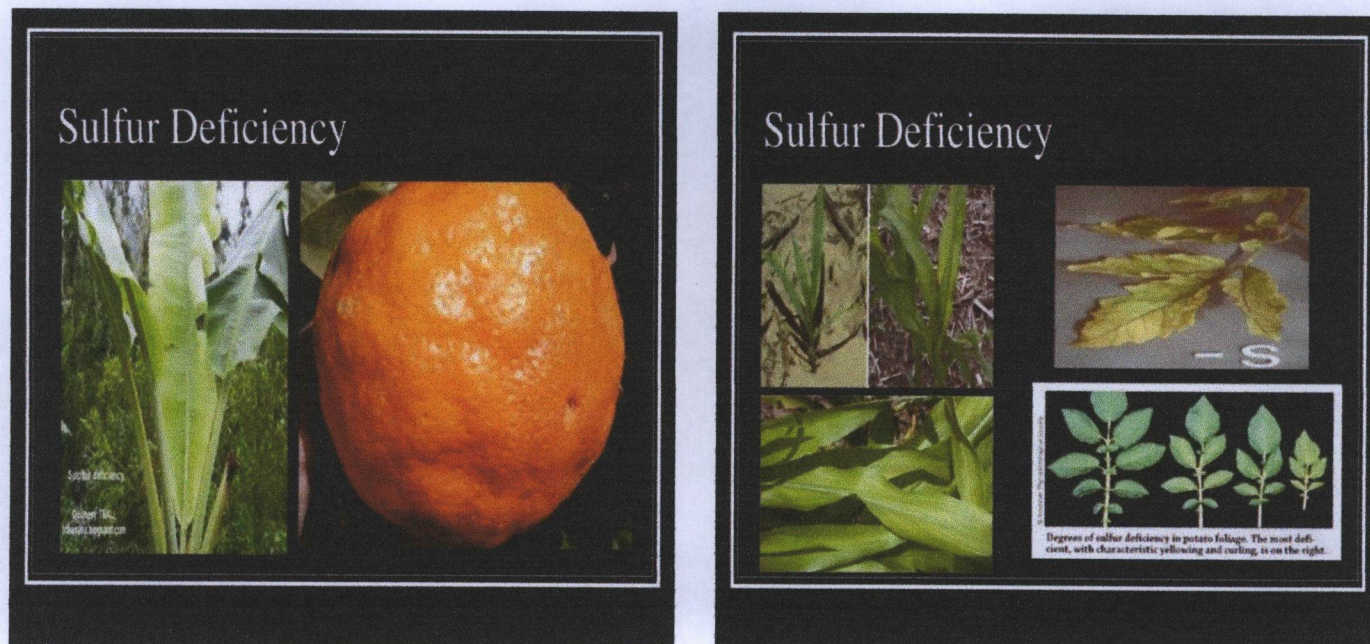


Figure 83-84 : Symptômes de la déficience en Soufre.

d. Fertilisants :

Le soufre est apporté sous forme de :

- Gypse (CaSO_4)
- Magnésium sulfate (MgSO_4)
- Sulfate d'ammonium [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$]
- Soufre élémentaire (S)

5. Magnésium (Mg)

a. Relation au sol :

Il est présent dans le sol sous forme de cation échangeable Mg^{2+} , comme c'est le cas pour le cation Ca^{2+} .

b. Fonctions dans la plante :

Le magnésium est un **composant essentiel de la molécule de chlorophylle**. C'est aussi un **catalyseur** pour certaines activités enzymatiques.

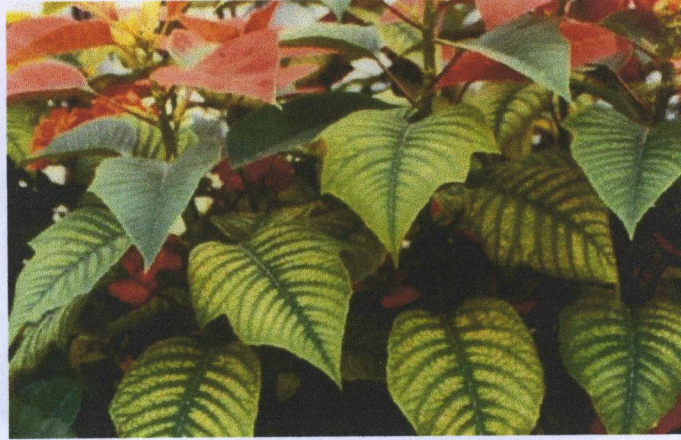


Figure 85 : Symptômes de la déficience en magnésium

c. Déficience et toxicité :

La déficience en Magnésium se traduit par une chlorose interveinale des feuilles âgées, cela est dû à la **grande mobilité du magnésium** dans la plante.

L'excès de magnésium provoque la déficience en potassium et en Calcium.

d. Fertilisants :

Les formes de magnésium qu'on utilise comme fertilisants sont :

- La dolomite (Mélange de $CaCO_3.MgCO_3$)
- Le Sel d'Epsom ($MgSO_4$)
- Les nitrates de magnésium : $[Mg(NO_3)_2]$
- Les Sulfates de magnésium : ($MgSO_4$)

6. Les micronutriments

Les micronutriments sont souvent apportés par fertigation, la déficience et la toxicité sont souvent dues à des pH extrême.

a. Fer (Fe) :

Le fer est un composant des cytochromes il est donc **nécessaire à la photosynthèse**. Il est essentiel aussi à la **respiration ainsi qu'à la fixation d'azote** (car il est entre dans le fonctionnement des nitrates réductase).

Les symptômes d'une déficience en Fer sont une chlorose des jeunes feuilles (**Le fer est immobile**), cela se produit surtout dans des sols au pH élevée.

Les solutions à ce problème sont :

- L'utilisation des chélates de fer :
 - FeEDTA (Fe 330) qui est stable à des pH < 7
 - FeEDDHA (Fe 138) qui est stable même à des pH >7
- Baisser le pH (car le fer est plus facilement assimilé sous la forme Fe²⁺)

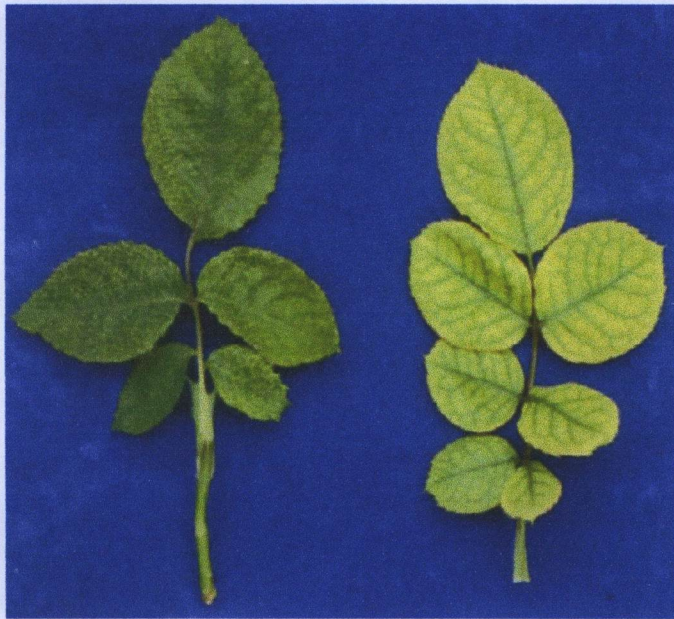


Figure 86 : Symptôme de carence en Fer (Chlorose Ferrique) d'absorption du Fe²⁺ et Fe³⁺

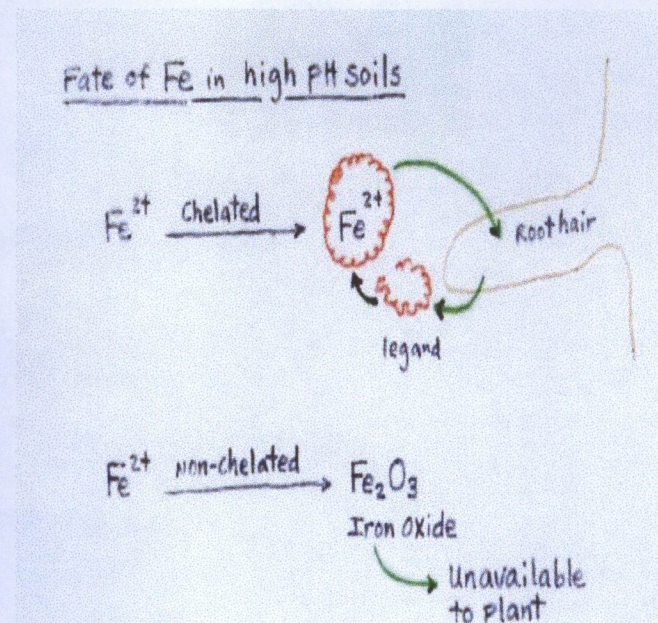


Figure 87 : Voies

b. Manganese (Mn):

Le manganèse est requis pour la **synthèse de chlorophylle**, ainsi que pour **l'activation de certaines enzymes**. Les signes d'une déficience en Mn, sont une **chlorose** entre les veines des

nouvelles feuilles, ce qui est similaire à la déficience en fer car tous deux sont **immobiles**. La déficience apparait à des pH élevés.



Figure 88 : Symptôme de carence en Manganèse

La toxicité se manifeste par la chlorose de nouvelles feuilles associées à des taches noires. On constate que la toxicité apparait à des pH faibles.

Le Manganèse est apporté sous forme de Sulfates de manganèse ($MnSO_4$) voir sous forme de Mn EDTA (Chélates) pour les sous à pH élevé.

c. Bore (B) :

Le Bore intervient dans le **métabolisme des glucides et de l'azote, dans la floraison, et dans la germination du Pollen.**

Les signes d'une déficience en Bore sont : Une dépréciation de la floraison et de la nouaison, et une distorsion des racines et des organes végétative nouvellement formés.

Une toxicité due au bore fait que : Les rameaux dépérissent, les fruits éclatent, et des brûlures apparaissent sur le bord des feuilles.

Les fertilisants utilisées pour le Bore sont : Le Borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), Le Borate de calcium ($NaB_4O_7 \cdot 4H_2O$).

d. Zinc (Zn) :

Le Zinc intervient dans la synthèse protéique, notamment dans **la synthèse d'acides aminés.**

La **déficienc**e en zinc se manifeste dans des sols calcaires à pH élevée, ce qui freine la croissance, et réduit la taille des entrenœuds et des rosettes, et provoque la chlorose des jeunes feuilles (Le zinc est immobile).

La **toxicité due au zinc** est due à des pH bas, ce qui freine la croissance et provoque la chlorose des feuilles.

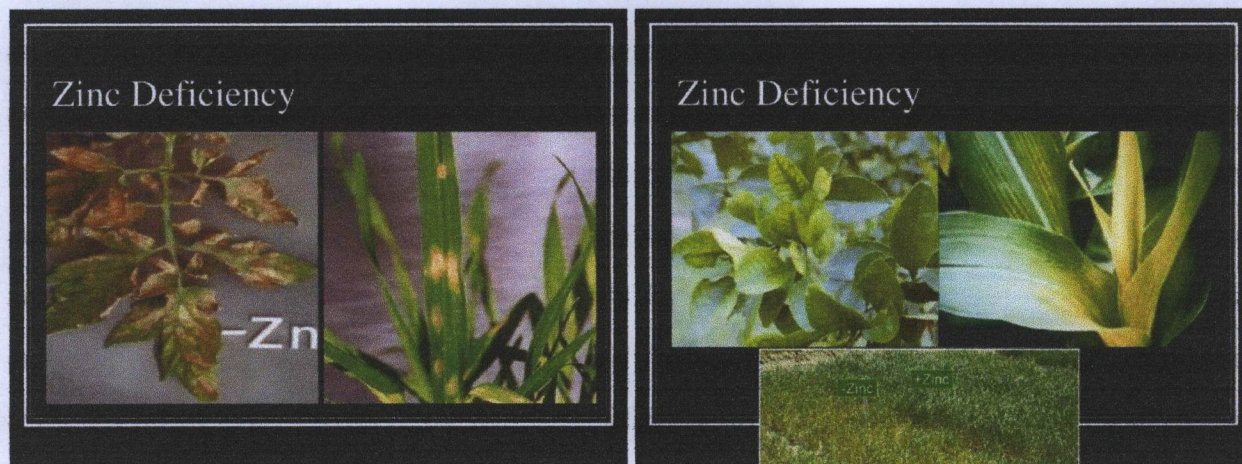
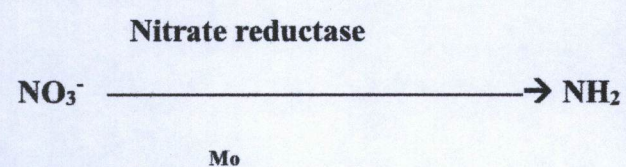


Figure 89-90 : Symptômes de la déficience en Zinc

e. Molybdène (Mo) :

Le molybdène est requis pour l'activité du nitrate réductase pour effectuer la transformation suivante :



Le molybdène est aussi nécessaire pour la nodulation et la synthèse de vitamine.

La déficience en molybdène se traduit par une couleur clair des jeunes feuilles (Car le Mo est immobile), et des feuilles étroites chez les espèces à feuilles larges. Cette déficience se produit à des pH Bas.

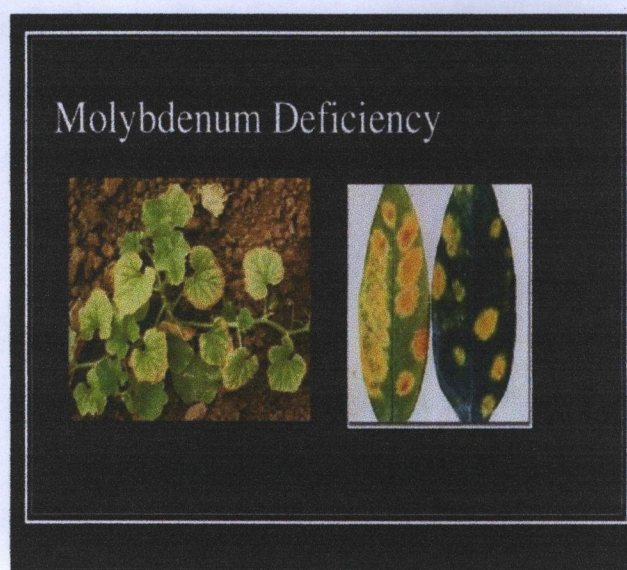


Figure 91 : Symptômes de la déficience en molybdène

La toxicité se traduit par une chlorose avec une coloration orange.

Le fertilisant utilisé pour apporter le molybdène est le molybdate de sodium.

f. Cuivre (Cu) :

Le cuivre est un **composant essentiel de plusieurs enzymes qui interviennent la synthèse de chlorophylle et le métabolisme des glucides.**

- La déficience en cuivre se traduit par un **symptôme dit « balais de sorcière ».**
- La toxicité se traduit par la **chlorose.**
- Le fertilisant utilisé est le sulfate de cuivre (CuSO₄)

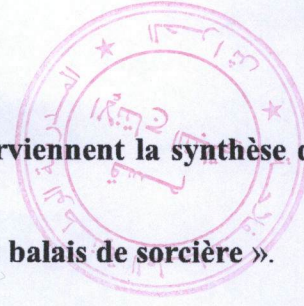
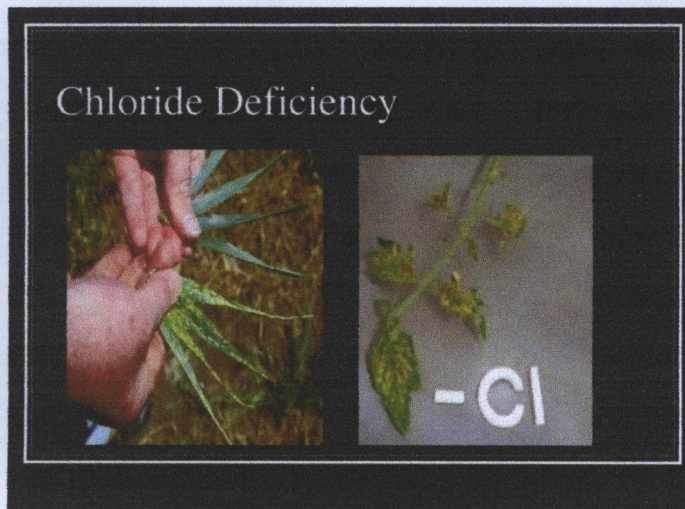


Figure 92-93 : Symptômes de déficience en cuivre

g. Chlore (Cl) :



Le chlore **intervient dans la photosynthèse** et plus particulièrement dans la dynamique de l'oxygène lié à ce processus.

La **déficience en chlore n'a jamais été observé dans la nature**, elle n'a été observé qu'en étant induite expérimentalement. La toxicité se manifeste par **une chlorose de l'extrémité des** et une **nécrose de toutes les feuilles** (On n'applique **jamais de fertilisant chlorée**).

Figure 94 : Symptômes de déficience en chlore

7. Relations entre nutriments, Antagonisme et synergisme

En plus des leurs effets respectifs sur la plante, certaines plantes étant plus sensibles à des éléments que d'autres.

Tableau 13 : Réponse des cultures à certains nutriments

MICRONUTRIENT RESPONSES						
Crop	Mn	B	Cu	Zn	Mo	Fe
Corn	M	L	M	H	L	M
Soybeans	H	L	M	M	M	M
Wheat	H	L	H	L	L	L
Canola	M	H	H	M	L	
Alfalfa	M	H	H	L	M	M
Oats	H	L	H	L	L	M
Grass	M	L	L	L	L	H
Barley	M	L	M	M	L	H
Dry Beans	H	L	L	H	M	H
Potatoes	H	L	L	M	L	
Rye	L	L	L	L	L	
Peas	H	L	L	L	M	

Legend: H... High M... Medium L... Low

Les effets, notamment la déficience, sont combinables ainsi un triple déficit N-P-K présente des symptômes plus marqués qu'un simple déficit azotée, phosphatée ou potassique.

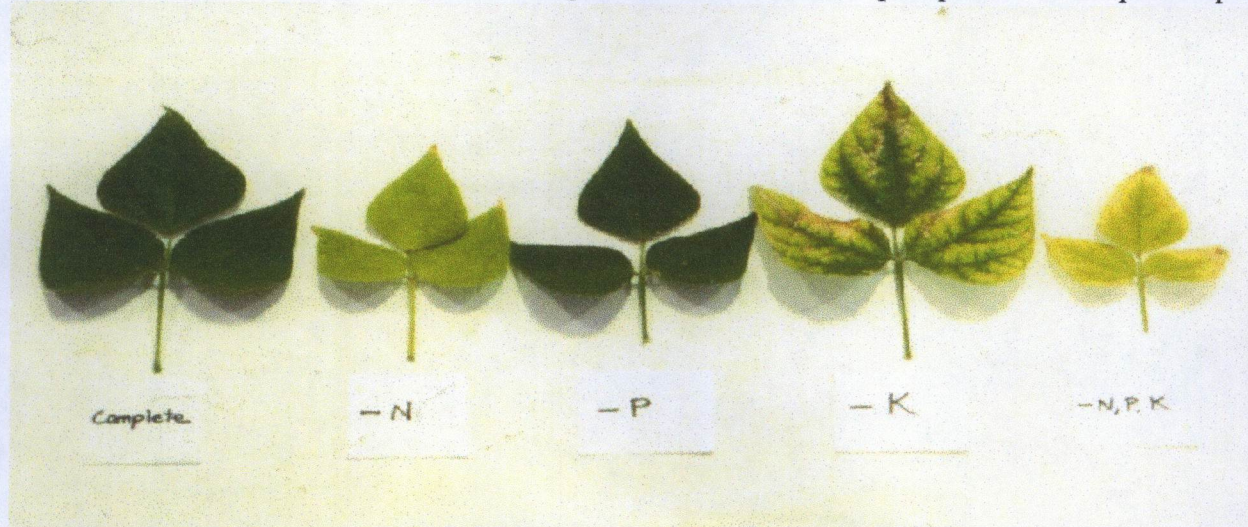


Figure 95 : Comparatif des feuilles d'haricots en situation normal, de déficit azote, phosphaté, potassique ou les 3 combinés.

De plus, de nombreuses relations, règnent entre les différents nutriments, certaines sont favorables, les 2 éléments se complètent, augment la disponibilité, ou facilitent l'absorption de l'autre, on parle de **Symbiose**, le phénomène inverse existe aussi, il s'agit de l'**antagonisme**, les éléments influent négativement sur la disponibilité où un élément baisse la disponibilité des d'un autre nutriment. Ces relations entre les nutriments sont représentées par la **charte du Mulder**.

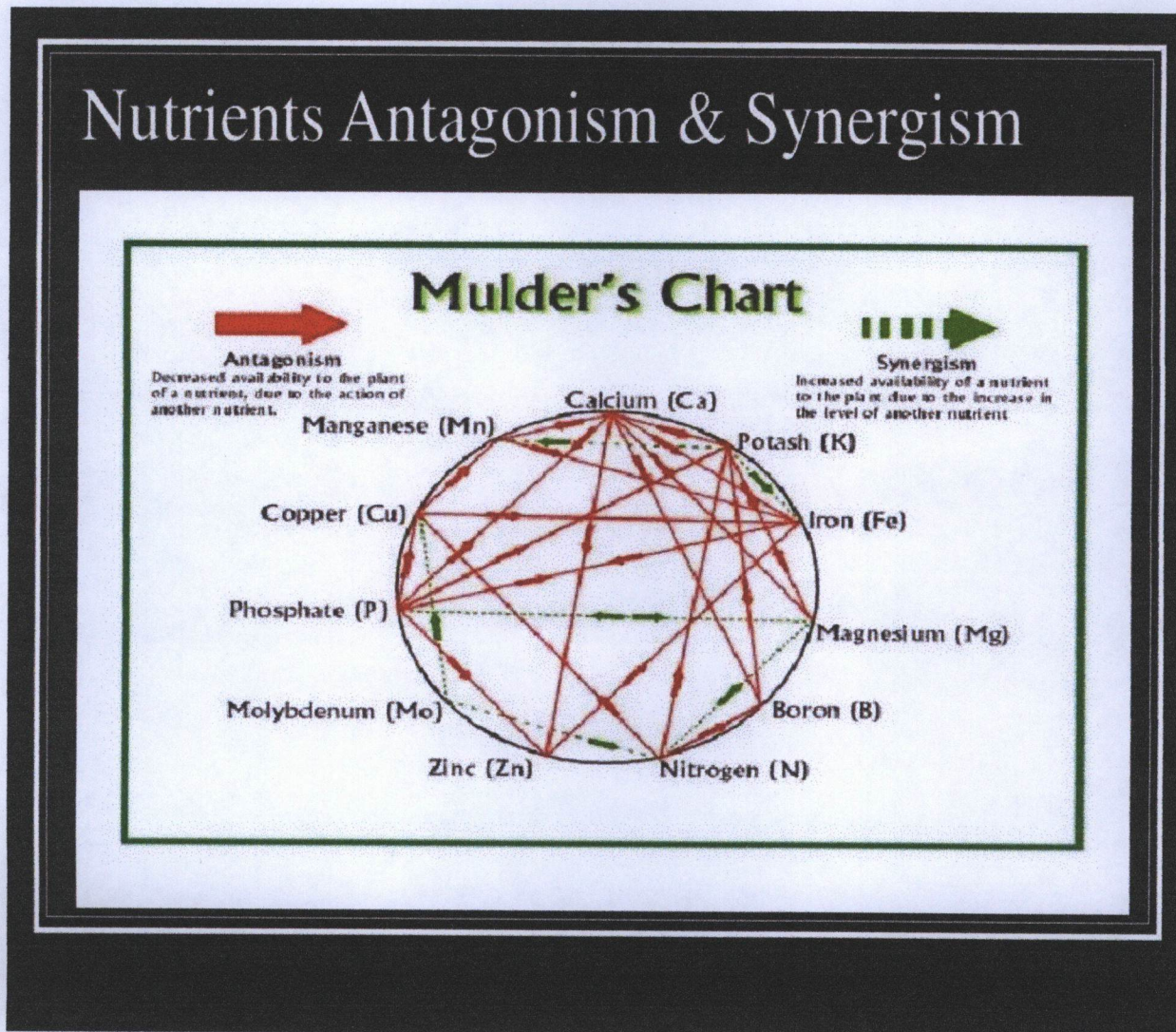
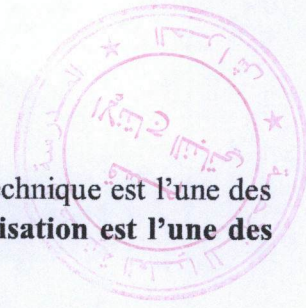


Figure 96 : Charte de Mulder représente les phénomènes d'antagonisme et de synergie entre les différents éléments nutritifs de la plante



Partie 2 : Fertilisation et Nutrition de la Plante

Chapitre 6 : Généralité sur la fertilisation



En agronomie, le développement des pratiques culturales et de l'itinéraire technique est l'une des principales voies de l'amélioration du rendement et de sa qualité. La **fertilisation est l'une des composantes centrales** et les plus étudiées.

La fertilisation consiste à **assurer aux plantes cultivées une alimentation correcte** dans l'ensemble des éléments nutritifs, en complétant l'offre du sol en éléments minéraux et en améliorant sa fertilité. C'est une pratique nécessaire.

Les connaissances du cycle biogéochimique des éléments minéraux ainsi que leurs interactions avec la plante est une clé pour une bonne fertilisation. Ainsi alors que la nutrition minérale étudie les plantes obtienne, métabolisent et utilisent les éléments minéraux, la fertilisation va utiliser ces connaissances et les mettre à profit afin d'optimiser le rendement et donc a rentabilité économique tout en préservant l'environnement et en assurant le développement durable.

En pratique, la fertilisation consiste à **apporter des engrais organique ou minéraux nécessaires pour un bon développement des plantes**. De façon à améliorer leur croissance, et l'amélioration de la production en quantité et en qualité.

La méthode ou la technique d'application d'engrais est essentielle pour une bonne pratique agricole qui affecte la quantité d'éléments nutritifs prélevée par la plante et le rythme de son prélèvement où ils sont dépendantes d'autres facteurs tels que la variété végétale, la date de semis ou plantation, la rotation culturale, les conditions du sol et de climat.

La **fertilisation est l'une des nombreuses pratiques culturales**, il est important de l'intégrer dans le plan des travaux cultural, et de prendre en compte ces autres travaux dans la réflexion sur la fertilisation. En effet très souvent l'engrais de fond est incorporé au moment du semis par exemple.

Chapitre 7 : Raisonnement de la fertilisation : définition et principes



1. Notion de fertilisation raisonnée

L'agriculture raisonnée est un système de production agricole dont l'objectif est **l'optimisation du résultat économique** en maîtrisant les quantités d'intrants, (pesticides, engrais) dans le but de **limiter leur impact sur l'environnement**.

La fertilisation raisonnée est un pilier de ce type d'agriculture où chaque culture reçoit une **fertilisation adaptée à ses besoins**. Les caractéristiques du milieu tels que le sol, le climat doivent être pris en compte dans le dosage des fertilisants.

2. Principes de la fertilisation raisonnée

La fertilisation raisonnée selon le principe des 4B permet d'accroître la production, d'augmenter la rentabilité et de préserver l'environnement. Les 4B sont :

- **Le Bon Produit** : Chaque élément fertilisant peut se présenter sous différentes formes, dont les caractéristiques s'adaptent mieux soit à certaines cultures, soit à certaines conditions de sol ou pratiques culturales. D'où l'importance du **choix du produit adéquat pour chaque situation**.
- **La Bonne Dose** : Il faut calculer la dose requise en fonction des plantes et des sols. Une fertilisation optimale favorise l'obtention de bons rendements tout en maximisant la rentabilité des cultures.
- **Au Bon Moment** : Savoir **quand et à quel fréquence apporter les nutriments** en fonction de l'absorption des éléments. Les courbes d'absorption sont différentes pour chacun des nutriments. Le fractionnement de l'azote en plusieurs applications en est un bon exemple.
- **Au Bon endroit** : L'application **doit se faire là où l'assimilation se fera plus efficacement** et où le sol en aura vraiment besoin. (Ex : Application en surface/en profondeur, sur le rang/entre les rangs)

On peut résumer ces 4B par une seule phrase « Le succès en fertilisation ne dépend pas d'une grande action, mais de petits gestes associés les uns aux autres. »

Les 4B interagissent entre eux, le choix du bon produit est ainsi influencé par la dose, le moment et l'endroit, et vice-versa. Ce qui que **chaque situation est unique**, il est donc nécessaire de raisonner chaque situation en tenant compte des 4B simultanément.



3. Lois générales de la fertilisation

a. La loi de restitution ou des Avances :

« Il est indispensable de restituer au sol, pour qu'il ne s'épuise pas, tous les éléments fertilisants que lui enlèvent les récoltes. »

Cette loi **ne tient compte que des exportations**. Mais cela ne reflète pas la réalité car le sol peut subir d'autres pertes comme le lessivage, comme il peut bénéficier d'apports naturels tels que la fourniture d'azote par les micro-organismes et la dégradation des minéraux du sol.

b. La loi du minimum de Liebig :

« L'importance du rendement d'une récolte est déterminée par l'élément qui se trouve en plus faible quantité relativement aux besoins de la culture. »

Selon cette loi, Dans un sol déséquilibré en éléments minéraux l'élément le moins disponible pour la plante définit le niveau de rendement et la qualité de la récolte même si tous les autres éléments se trouvent en quantités suffisantes. On l'appelle « **Facteur Limitant** », on le détermine facilement par les analyses du sol.

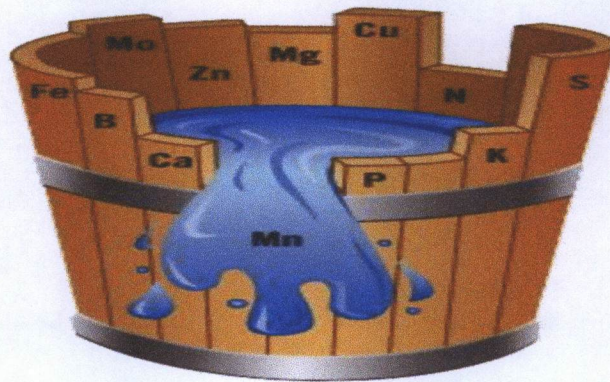


Figure 97 : Représentation de la loi du minimum

c. La loi des accroissements moins que proportionnels (Mitscherlich) :

« Quand on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant, les augmentations de rendement obtenues sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les quantités apportées s'élèvent. »

Quand on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant, **le rendement ne croît pas proportionnellement**.

Il se traduit par une courbe dont le sommet représente le rendement maximum possible. Le rendement optimal est atteint quand le gain de rendement couvre la dépense supplémentaire en engrais.

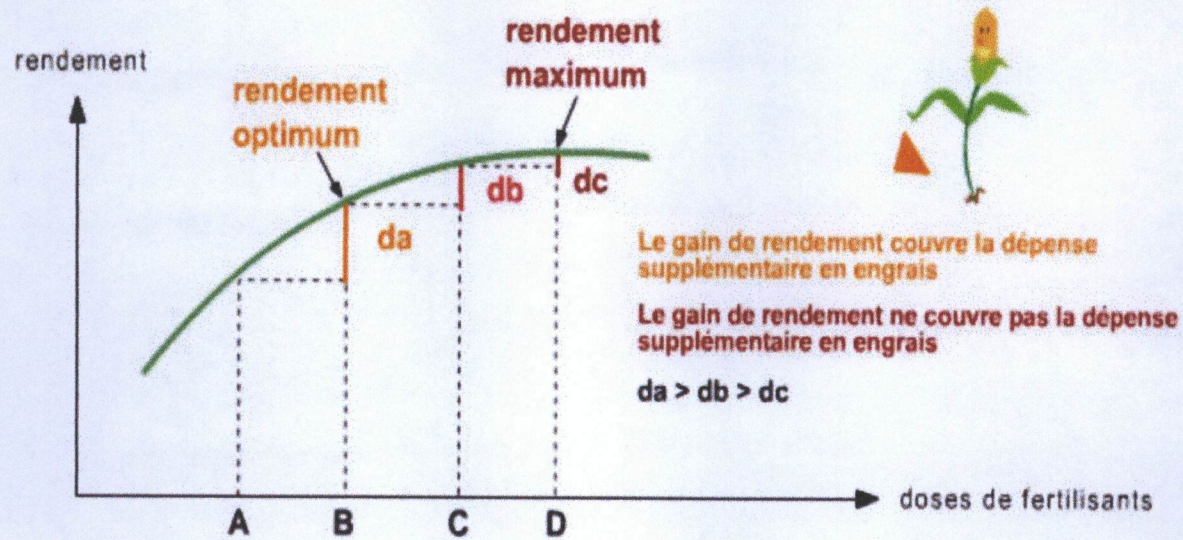


Figure 98 : Représentation des accroissements moins que proportionnels

4. Importance des analyses du sol et des plantes

Les analyses de sol permettent **de quantifier ses caractéristiques physiques et chimiques**, d'évaluer la disponibilité pour les plantes de l'élément nutritif concerné et donc l'état de la fertilité du sol, ce qui facilite d'établir un plan de fumure conforme aux besoins des plantes et protégeant l'environnement.

Alors que l'analyse de plantes permet **d'optimiser les apports d'éléments nutritifs en déterminant précisément les quantités minimales requises** par une culture pour obtenir un rendement et une qualité optimaux.

Elle vise ainsi à minimiser l'impact environnemental des pratiques de fertilisation en optimisant l'efficacité des engrais apportés. C'est un moyen complémentaire pour suivre la dynamique de la fertilisation et pour établir un diagnostic précis lors d'un problème apparent de fertilisation.



5. Les étapes de raisonnement de la fertilisation

a. Déterminer la biodisponibilité des éléments nutritifs :

La première étape à la base de tout le raisonnement consiste en **l'évaluation de l'abondance dans le sol des nutriments.**

La plante absorbe effectivement la fraction présente dans la solution du sol, son épuisement sera rapidement compensé par une solubilisation de la réserve de l'élément de la phase solide vers la solution du sol.

La quantité bio disponible de l'élément est donc la somme de la quantité d'élément soluble immédiatement disponible et de celle pouvant passer en solution dans un espace de temps compatible avec la durée d'absorption par la plante. Cette notion est d'autant plus vraie pour le P, le K et le Mg, alors que pour l'Azote on considère que la quantité biodisponible est la somme des formes solubles (nitrate, ammonium...) et de la partie des formes organiques pouvant être minéralisées au cours de l'année culturale.

b. Interpréter des mesures et établissement du diagnostic :

Consiste à donner une **appréciation sur le système sol plante à partir des mesures.**

Avec un objectif de productions Le diagnostic de la biodisponibilité va permettre de dire s'il est nécessaire de fertiliser compte tenu des objectifs de la production.

Avec un objectif de protection de l'environnement (sol, eaux, air), le diagnostic va évaluer un risque de pollution, lié à la situation présente ou en cas d'apport de fertilisants

Le diagnostic peut prendre en compte d'autres contraintes en plus de la mesure de la biodisponibilité.

c. Proposer un plan de fertilisation :

Consiste à **quantifier les interventions nécessaires et à en préciser les modalités** (choix du type d'engrais, de l'époque, des quantités, de la fréquence, le mode d'apport...)

6. Raisonnement de la fertilisation pour les grandes cultures

a. Raisonnement de la fertilisation azotée :

Les plantes absorbent l'azote en fonction de leurs besoins et de sa disponibilité dans le sol. L'objectif du raisonnement de la fertilisation azotée est **d'apporter la quantité d'azote nécessaire à l'obtention du potentiel de rendement sans négliger la qualité de la production** dans une situation donnée et tout en évitant les pertes (lessivage, volatilisation...).

Une des méthodes les plus utilisées pour ce raisonnement est la **méthode du bilan**, elle s'applique à la plupart des cultures, elle prend en compte les besoins en azote des cultures et les restitutions d'azote par le sol.

On représente la méthode du bilan par la formule suivante :

$$\text{Dose conseillée} = \text{Besoins de la culture} - \text{Fournitures}$$

La méthode dite du "bilan" pour le calcul de la dose d'engrais totale à apporter peut être présentée selon le tableau suivant :

Tableau 14 : Méthode des bilans appliquée à la fertilisation azotée

Besoins de la culture (A)	Fournitures (B)
Besoin de la plante (1) :	Reliquat d'azote sortie hiver (4) :
x	+ Minéralisation de l'humus du sol (5):
Objectif de rendement (2) :	(y compris Arrière-effet des MO)
+	+ Effet du précédent (6) :
	+ Effet des cultures intermédiaires (7) :
Azote restant dans le sol	+ Effet du retournement de prairie (8) :
après la récolte (3) :	+ Azote absorbé pendant l'hiver (9) :
	+ Azote apporté par l'eau d'irrigation (10) :
TOTAL A :	TOTAL B :
Fertilisation azotée prévisionnelle = Apport azote minéral et organique (en unités ou kg d'azote/ha)	
= Besoins (A) - Fournitures (B) =	

La méthode ne prend pas en compte certaines fournitures et perte, ainsi elle fait l'hypothèse est faite que les apports atmosphériques sont de même amplitude que les pertes gazeuses (volatilisation de l'ammoniac et de la dénitrification). Il est donc important de limiter autant que faire se peut les émissions vers l'air, que ce soit pour utiliser au mieux l'azote apporté ou pour réduire les impacts négatifs de l'ammoniac et du protoxyde d'azote.

On peut décomposer ce tableau en 2 parties :

a. Les besoins de la culture :

$$\text{Besoins de la culture} = (\text{besoins de la plante} \times \text{objectif de rendement}) + \text{azote restant après récolte}$$



- **Besoins de la plante** = C'est la quantité d'azote dont la plante a besoin pour constituer ses feuilles, racines et grains. Elle s'exprime en kg d'azote par quintal de grain produit pour les cultures dont l'absorption d'azote est proportionnelle au rendement.
- **Objectif de rendement** = C'est le rendement qui peut être atteint ; on le détermine en fonction de du potentiel génétique de la plante et de l'itinéraire technique.

Une bonne façon de l'estimer est le fait de calculer partir de l'historique de rendement en retenant la moyenne des 3 rendements obtenus au cours des 5 dernières années sur en excluant la valeur maximale et la valeur minimale.

- **Azote restant après récolte** = C'est la quantité d'azote qui reste dans le sol et qui n'a pu être utilisée par la culture. Il faut le minimiser pour limiter les risques de lessivage.

b. Les fournitures :

Fournitures = Reliquats + Minéralisation De L'humus Du Sol + Résidus Du Précédent + Effet Des Cultures Intermédiaires + Effet Des Retournements De Prairie + Azote Absorbé Pendant L'hiver + Azote Apporté Par L'eau D'irrigation

- **Le reliquat d'azote à la sortie de l'hiver** : Dépend de plusieurs variables : type de sol, passé cultural de la parcelle, pluviométrie, température hivernale, bilan de l'azote sur le précédent... Il varie donc beaucoup d'une année à l'autre, il peut être mesuré par analyse du sol à la fin de l'hiver ou estimé à partir des références.
- **La minéralisation de l'humus** : Dépend de plusieurs variables : %M.O, pH, %Argile, structure du sol, activité biologique... Des valeurs de références ont été calculées pour certains sols.
- **Les résidus du précédent** : C'est l'azote libéré ou réorganisé provenant des résidus de récolte du précédent.
- **L'effet des cultures intermédiaires** : Effet d'une culture intermédiaire piège à nitrate (ex : colza) dans le cas où elle a été cultivée. Cet effet varie selon l'espèce, le niveau de croissance, la date de destruction et la date d'ouverture du bilan.
- **L'arrière effet des prairies** : La destruction de prairies s'accompagne d'une minéralisation intense d'azote qui dépend de la conduite et de l'âge de la prairie au moment de sa destruction.



- **L'azote absorbé pendant l'hiver** : Il y'a une liaison étroite entre l'azote absorbé par la plante et la quantité de biomasse produite à l'ouverture du bilan.
- **L'azote apporté par l'eau d'irrigation** : Dans certains cas l'eau d'irrigation est chargée d'une matière organique, il faut alors prendre en compte cet apport

c. Raisonnement de la fertilisation soufrée :

Les **besoins des plantes en soufres** sont **similaires à ceux du phosphore et du magnésium**. Les carences en soufre sont devenues courantes sur les cultures annuelles.

Le raisonnement actuel de la fertilisation soufrée est basé sur un **bilan entrées/sortie** combiné en prenant en compte le **risque de lixiviation** (c'est le flux le plus important des pertes en soufre du sol).

Cette méthode consiste à estimer l'ensemble des flux d'entrées et de sorties pour un système étudié donné, puis faire la somme de chacune de ces entrées et de chacune de ces sorties et pour pouvoir **calculer la différence entre le total des entrées et des sorties**.

d. Raisonnement de la fertilisation phosphatée et potassique :

La stratégie de fertilisation pour le phosphore P et le potassium K définie est basée sur les critères suivants :

- **Exigence de la culture pour chacun de ces deux éléments nutritifs** : Cela dépend de la sensibilité et des besoins des cultures en P et K. Certaines espèces étant plus sensibles et exigeantes en ces éléments que d'autres.
- **Analyse de terre interprétée selon deux seuils** : Afin de mesurer la biodisponibilité de ces 2 éléments dans le sol. Ces teneurs **s'interprètent différemment selon le niveau d'exigences des cultures**.

L'interprétation de la teneur nécessite un référentiel agronomique établissant expérimentalement des seuils pour un type de sol, ainsi il y'a 2 seuils de références :

- **Seuil haut : T_{imp} ou Teneur Impasse** : Au-dessus de ce seuil, l'absence d'apport n'entraîne pas de risque de diminution du rendement de la culture.
- **Seuil Bas : T_{remf} ou Teneur renforcé** : En dessous de ce seuil, l'apport nécessaire pour satisfaire les besoins de la culture est supérieur à la dose d'entretien (exportation de la culture).



Ces deux seuils définissent ainsi trois classes correspondant à des stratégies d'apport différentes. De plus ces seuils sont définis pour chaque classe d'exigence des cultures.

- **Passé récent de fertilisation sur les quatre dernières années** : Un apport de fertilisant élève d'abord la teneur en élément "assimilable" de l'élément puis une baisse de la biodisponibilité se produit au cours des mois et des années qui suivent. En pratique pour apprécier l'effet de ce facteur, on ajoute un critère simple qui correspond au nombre d'années sans apport de l'élément P ou K (d'origine organique ou minérale) avant la culture considérée
- **Restitution ou non des résidus du précédent cultural** : Lorsqu'une espèce est cultivée pour ses graines (blé, maïs, colza, tournesol...), l'essentiel du phosphore prélevé par la culture est présent dans le grain et donc exporté. En revanche, la majorité du potassium (80 à 90 %) est présent dans les tiges et les feuilles, sous une forme très soluble. Au cours des premières phases de décomposition des résidus, ce potassium est libéré sous une forme identique à celle d'un engrais potassique. La restitution des résidus de récolte du précédent équivaut donc à un apport important de K_2O .



Chapitre 8 : La fertilisation phosphatée des plantes annuelles :

1. Dynamique du phosphore dans le sol

Le phosphore minéral provient de l'altération des roches, alors que le phosphore organique résulte de la dégradation des végétaux par la faune et la flore du sol.

- **La M.O :** Lors de la décomposition de matière organique par les micro-organismes du sol, la dégradation des molécules organiques conduit à la libération de molécules inorganiques, ainsi le **phosphore organique est minéralisé**, cela consomme de l'oxygène dont la baisse de concentration peut influencer la condition d'oxydo-réduction et favoriser le relargage du PIP (**phosphore inorganique particulaire**) lié aux cations

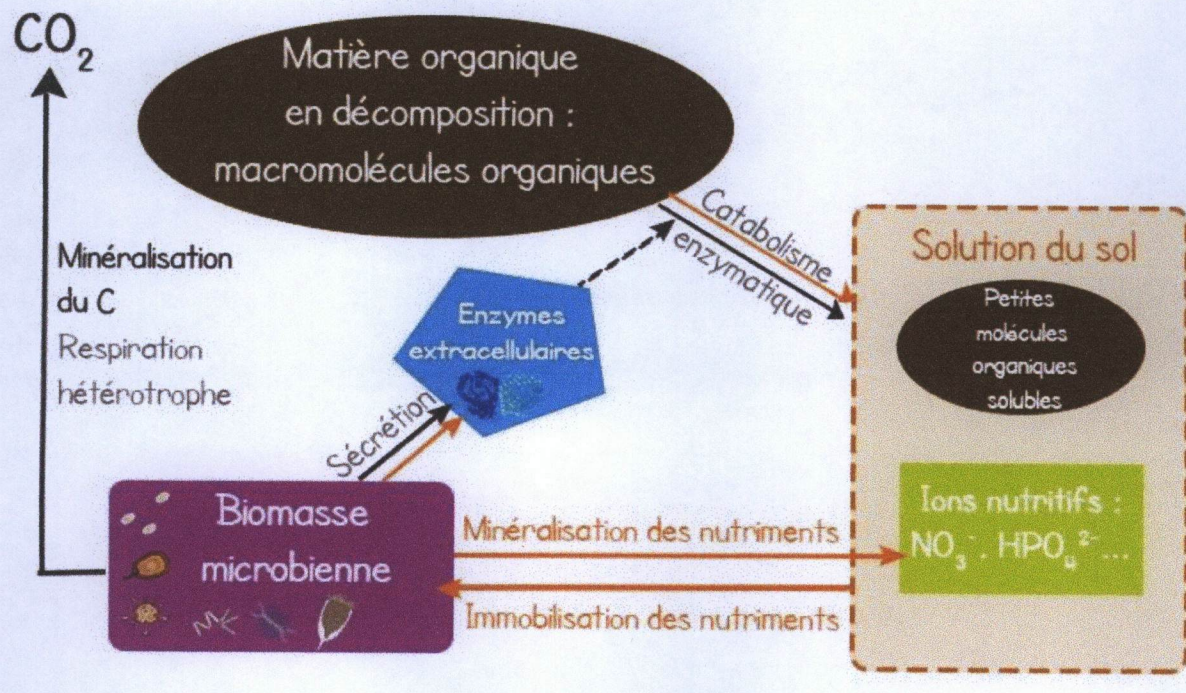


Schéma par C. Marsden

Figure 99 : Relations entre le phosphore et la matière organique

- **La roche-mère :** Tout le phosphore en milieu terrestre est dérivé de l'altération des phosphates de calcium des roches de sur de longues périodes de temps. **Les roches s'érodent lentement et libèrent ainsi le phosphore** qu'elles contiennent dans l'environnement. Bien que les sols contiennent un grand volume de phosphore, **une petite partie seulement est accessible** aux organismes vivants ainsi absorbée par les plantes.

On en déduit qu'on retrouve le phosphore sous 2 formes :

- **Les formes organiques** : Associées à la M.O.
- **Les formes inorganiques** : Associées à des composés d'aluminium et de fer dans les sols acides et à des composés de calcium dans les sols alcalins.

Les **ions phosphates** représentent les **seules formes de P utilisable** par les cultures. Dans les sols, ils sont généralement **présents à de faibles concentrations** dans la solution, en raison des nombreux processus géochimiques contraignant leur mobilité et disponibilité.

Le phosphore évolue en permanence entre les formes fixées, adsorbées et solubles

2. Les entrées et sorties du phosphore dans les systèmes de cultures

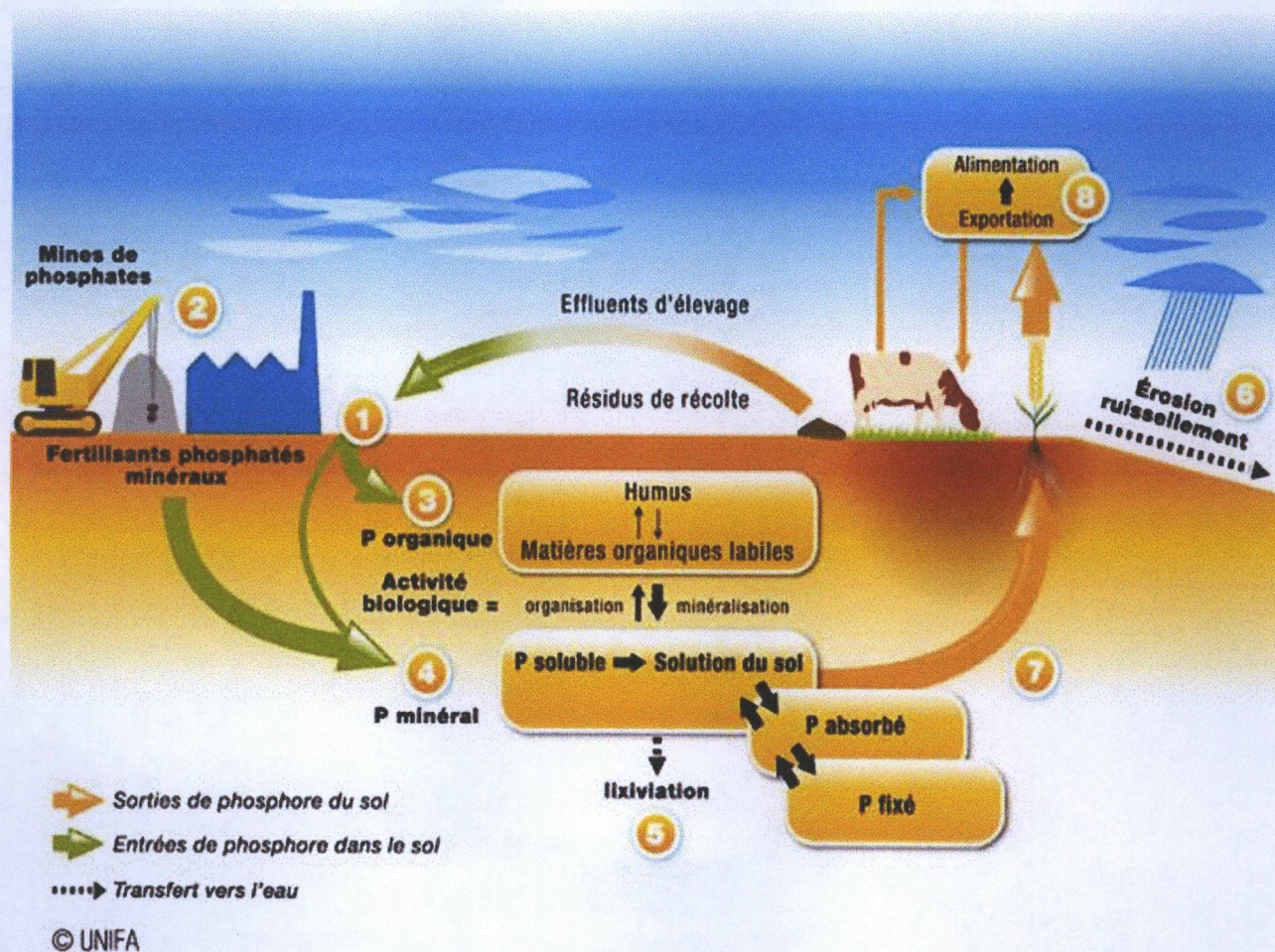
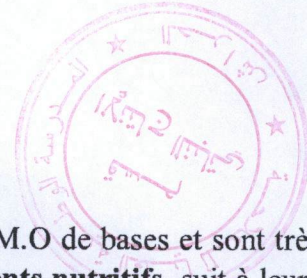


Figure 100 : Cycle Biogéochimique du phosphore



a. Les entrées

- **Les effluents d'élevage et les résidus de récolte** : Ce sont des M.O de bases et sont très importants pour la fertilisation car ils **restituent au sol les éléments nutritifs**, suite à leurs minéralisation et à l'immobilisation des composés organiques phosphatée. La minéralisation est effectuée grâce à l'activité biologique du sol.
- **La fertilisation phosphatée** : qui consiste en **l'apport fait par les agriculteurs** pour satisfaire les besoins de la plantes et avoir de meilleurs rendements.
Le phosphate à partir duquel on fabrique les fertilisants est extrait de mines à ciel ouverts et transformé en une forme assimilable par la plante par action d'acide.

b. Les sorties

- **Lixiviation** : qui est l'entraînement de certains en **profondeur par ruissellement**. Néanmoins, ce phénomène est limité pour le phosphore du fait de sa fixation par le sol. Lorsqu'on applique une fertilisation raisonnée, on estime les pertes à moins d'1 kg/ ha du à la lixiviation.
- **Erosion et ruissèlement** : pour une parcelle où il y a présence **de pente**, un ruissèlement (entraînement du phosphore par l'eau) ou une érosion (qui concerne le phosphore liée par les particules du sol) peut avoir lieu, cependant ces deux phénomènes sont faibles aussi.
- **Absorption du phosphore par la culture** : le phosphore bio disponible prélevé par la plante se trouve **uniquement au niveau de la solution du sol**.
La plante prélève le phosphore sous les deux formes : **$H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-}**
Il est à noter que comparé au phosphore totale du sol, la teneur en **phosphore bio disponible pour le sol es très faible**.

Rappel sur la nutrition phosphatée des plantes annuelles :

Le phosphore (P) est un élément nutritif essentiel de la nutrition minérale des plantes tout comme le N et le K.

Un apport adéquat de cet élément est particulièrement important aux **premiers stades de la croissance** des plantes et **lors du développement des organes reproductifs**.

Le phosphore à un rôle structural, énergétique et régulateur des voies métaboliques. Les plantes **déficientes en phosphore** montrent un retard de croissance.

Les espèces cultivées ont des **sensibilités différentes à la carence en P**, qui se traduisent par des pertes de production d'autant plus élevées que l'espèce est sensible. Cette caractéristique des

espèces, liée à la nature de leur système racinaire ou au rôle de P dans l'élaboration de leur production, est traduite par la **notion d'exigence**. Elle ne signifie pas que les cultures exigeantes absorbent ou exportent plus de P que celles qui le sont moins

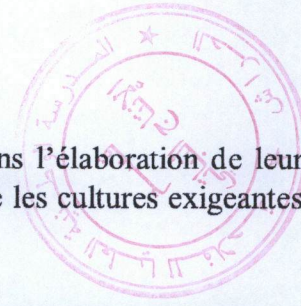


Tableau 15 : Niveau d'exigences de certaines cultures au phosphore

P₂O₅	
Exigence élevée	Betterave, Colza, Luzerne, pomme de terre
Exigence moyenne	Blé dur, Mais ensilage, Orge, Pois, Ray-grass, Sorgho, Blé sur blé
Exigence faible	Avoine, Blé tendre, Mais grain, Soja, Tournesol

Cas des céréales (orge)

Les céréales sont relativement **peu exigeantes en Phosphore (P)** ; Une fois qu'elles ont dépassé le stade de deux à trois feuilles, de nouvelles applications de phosphate disponible sont nécessaires pour éviter toute limitation de la croissance initiale des pousses.

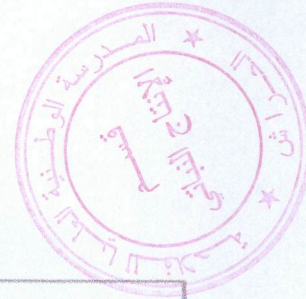
Deux étapes du développement des cultures d'orge d'hiver nécessitent une attention particulière. La première correspond à **l'implantation initiale des cultures** (stades de croissance 13 à 25 sur l'échelle de Zadoks).

La seconde correspond au **début de la croissance printanière** (stades de croissance 25 à 30 sur l'échelle de Zadoks). **70 % du phosphate est absorbé pendant une période comprise entre les mois de mars et de mai.**

Par conséquent, des applications d'engrais phosphatés doivent répondre à cette demande. D'après les essais, **les applications printanières de phosphate augmentent le rendement.**

L'intégration d'applications foliaires de phosphate favorise une amélioration de leur teneur en phosphate lorsque le sol n'offre qu'une disponibilité limitée. Cela permet **d'améliorer la croissance et le développement à l'automne et en début du printemps.**

Dans le cas de l'orge de printemps, des applications phosphatées lorsque les sols sont encore froids et limitent la disponibilité en phosphate, permettent d'éviter le ralentissement de la croissance et du développement précoces.



Phosphate Uptake in Barley

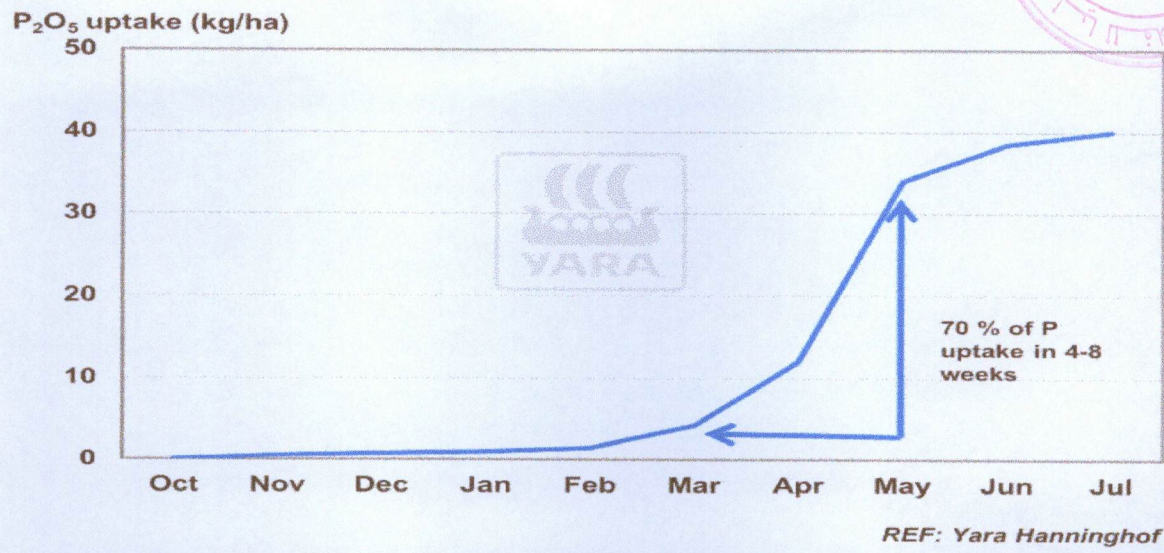


Figure 101 : Prélèvement du phosphore P₂O₅ par l'orge au cours du cycle

Cas des légumineuses (pois chiche)

Les seuils critiques au-delà desquels les légumineuses alimentaires ne répondent pas à l'apport du phosphore sont de 5,5 ppm pour le pois-chiche, 7 ppm pour la fève et 7 à 8 ppm pour la lentille. Par ailleurs,

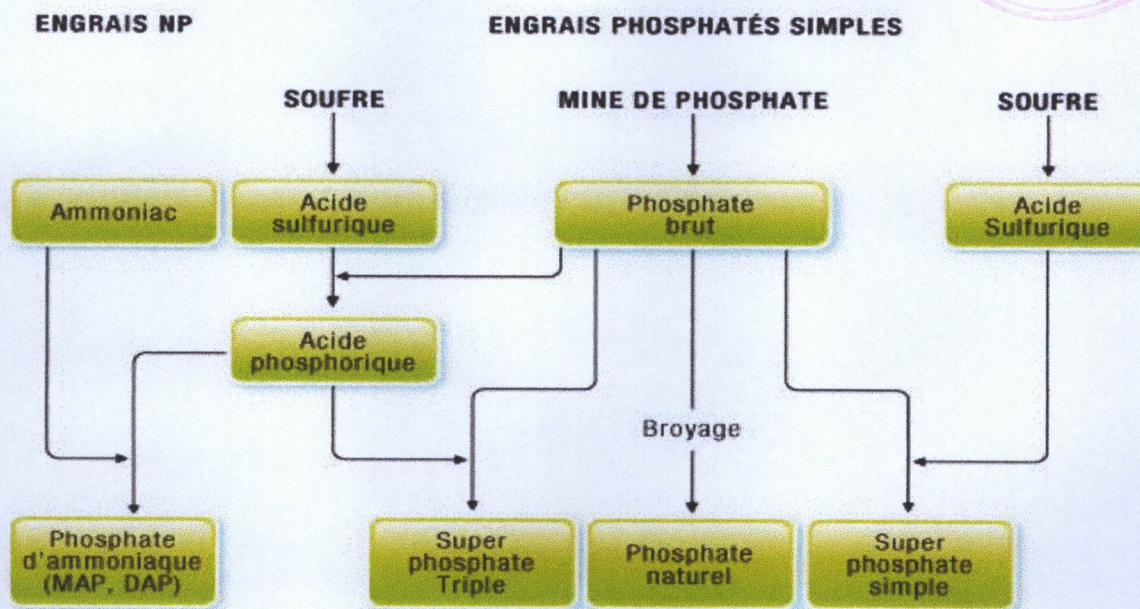
En situation de sols carencés en phosphore (valeurs inférieures à ces seuils critiques), ce problème se dédouble d'un autre problème à savoir le mode d'épandage : les niveaux de rendement obtenus par application du phosphore en bande sont nettement supérieurs à ceux obtenus par sa simple application à la volée.

Le pois chiche est une espèce considérée comme moyennement exigeant concernant les éléments phosphore.

Le raisonnement vis-à-vis des apports P est réalisé à l'échelle de la rotation, en fonction des analyses de sols. Pour un rendement de 20-30q/ha, le pois chiche exporte 15 à 20 unités de P₂O₅

Dans les sols pauvres à moyennement pourvus en phosphore (3.4 à 5.5 ppm P), on recommande un apport de 40 à 60 kg P₂O₅/ha. Ceci **améliore le rendement, la taille des graines et la nodulation.**

c. Fertilisants Phosphatée



© UNIFA

Figure 102: Fabrication des principaux engrais phosphatés

La **roche phosphatée (RP)** est la **matière première** utilisée dans la fabrication de la plupart des engrais phosphatés sur le marché. La roche est **provenant des mines** est d'abord envoyée aux unités de valorisation pour éliminer les impuretés. La **plupart des procédés sont humides** pour faciliter le transport et pour réduire la poussière.



Figure 103 : Photo illustrative d'une mine de phosphate



Un **acide phosphorique faible (40-55%)** est produit par la réaction de **roche phosphatée** avec de l'**acide sulfurique**, à l'aide d'un procédé humide.

L'acide phosphorique obtenu est ensuite utilisé dans la production d'une série d'engrais liquides ou solides. Les plus importantes sont les **superphosphates simples et triples (SSP, TSP)** et les **phosphates d'ammonium (MAP, DAP)**. Ces derniers étant le choix les plus populaires car ils apportent à la fois le phosphore et l'azote.



Figure 104 : Engrais MAP et DAP

Les **superphosphates** sont obtenus par traitement des phosphates naturels par l'acide sulfurique ou l'acide phosphorique, ou un mélange des deux. Selon l'acide employé, différentes réactions se produisent pour donner naissance à 3 types de superphosphates :

- Le **superphosphate simple (18% P_2O_5)**, qui est simple à produire, mais il est actuellement moins populaire.
- Le **superphosphate concentré (25 à 35% P_2O_5)**,
- Le **superphosphate triple (45% P_2O_5)**,

Le **phosphate naturel tendre et fin**, est issu de la mouture par broyage du phosphate brut.

d. Raisonnement de la fertilisation phosphatée

Les bases du raisonnement de la fertilisation en phosphore consistent à compenser les exportations des cultures par des apports selon 2 critères principaux et 2 critères supplémentaires.

Les 2 critères principaux sont :

- **La teneur de l'élément dans le sol** : qui est évalué par des analyses du sol. Si la teneur est faible, l'apport p sera supérieur aux exportations de la culture. Si la teneur est élevée, l'apport sera inférieur aux exportations. Il pourra même être nulle (impasse).

Tableau 16 : Méthodes d'analyse du phosphore

Méthode	Réactif	Caractéristiques
Dyer	Acide citrique 2 %	Adaptée aux sols de pH inférieurs à 6,5. C'est la méthode de référence des tableaux de préconisation.
Joret-Hébert	Oxalate d'ammonium	Adaptée aux sols de pH supérieurs à 6,5.
Olsen	Bicarbonate de sodium	Extrait une partie plus faible du phosphore du sol. Utilisation possible pour une large gamme de sols.

- **L'exigence de la culture en phosphore** : Certaines cultures étant plus exigeantes que d'autres.

A cela s'ajoute les 2 critères supplémentaires :

- **La fertilisation minérale ou organique apportée les deux dernières années.**
- La restitution des résidus de la culture précédente

En se basant sur ces critères, une grille est établie pour calculer les apports nécessaires pour la culture. Il est important de calculer précisément la **dose à apporter** et aussi de bien choisir la **forme du fertilisant** ainsi que la **date d'épandage** et sa **localisation**.

e. **Recommandations et perspective**



Pour diminuer les apports d'engrais, le phosphore étant un élément limité, il est important **d'augmenter la biodisponibilité** du phosphore et cela en :

- **Favorisant la présence de micro-organismes** (ex : mycorhize) qui peuvent modifier considérablement la quantité de p que la plante est capable d'acquérir tout au long de sa croissance (biodisponibilité), que ce soit par l'inoculation du sol avec des rhizobies ou le choix de systèmes de culture adaptés.
- **Favorisant la présence des lombrics** qui rendent le phosphore plus accessible.
- **Amendant le sol** permet de corriger le pH, de pourvoir le sol en phosphore assimilable.
- **Utilisant des espèces solubilisatrices** du phosphore tel que les légumineuses qui jouent un rôle important dans l'acidification du sol.
- **Utilisant des rotations et des intercroppings**
- **Faire des apports** de farine de poisson, de poudre d'os ou de phosphate naturel (pour sol acides).



Chapitre 9 : La fertilisation en oligo-éléments

1. Biodisponibilité des oligo-éléments dans le sol

On classe es éléments minéraux macro-éléments dont la plante a besoin en quantité élevée et en micro-éléments dont la plante a besoin en petite quantité. Ces derniers ont aussi été dénommés oligo-éléments, ou également appelés éléments traces ; cette appellation se référant à la **difficulté de déterminer avec sûreté et précision la quantité très petite de ces éléments.**

Certains sont prélevés sous la forme cationique (Fe^{++} , Mn^{++} , Cu^{++} , Zn^{++}) d'autre sous la forme anionique (bore et molybdène), que la plante trouve dans le sol constituant ainsi la sève brute.

La teneur des sols en éléments mineurs dépend surtout de leur nature pédologique, de leur texture et de leur minéralogie. Elle est aussi influencée par les pratiques humaines tels que la fertilisation et les systèmes de cultures en général.

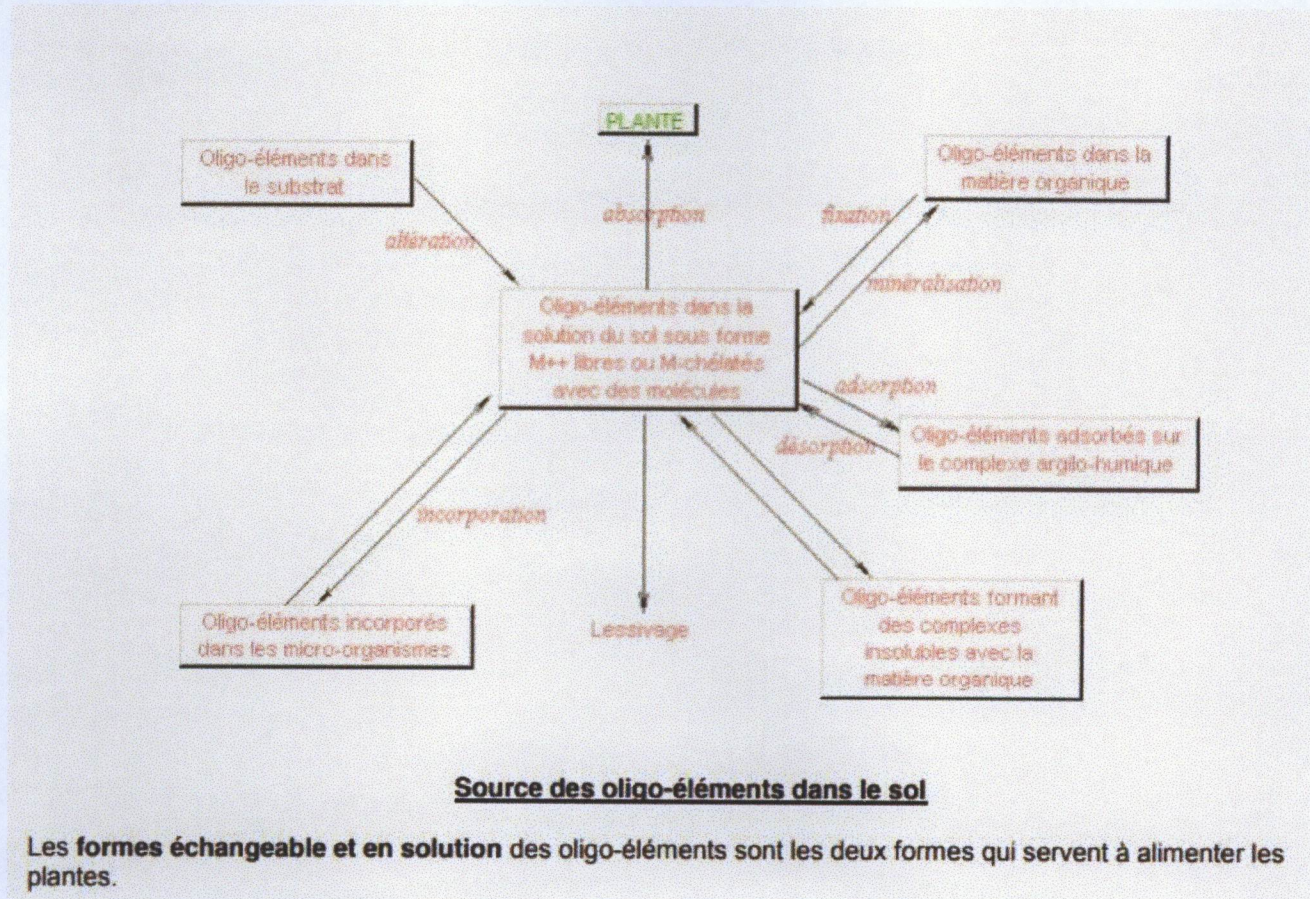


Figure 104 : Sources d'oligo-éléments dans le sol



Les oligo-éléments proviennent de :

- L'altération de la roche-mère
- La minéralisation de la matière organique.

Ils sont présents dans le sol sous plusieurs états :

- **Réserve inaltérée ou lentement altérable** : inclus dans la roche mère ou dans les grosses molécules de matière organique.
- **Forme mobilisable** : dans les oxydes, hydroxydes et sulfures.
- **Forme échangeable** : Adsorbés sur le complexe argilo-humique.
- **Forme présente dans la solution du sol** : ils sont **soit libres dans la solution, soit sous forme chélatée.**

Les chélates sont des complexes organométalliques **très stables** où l'ion est inséré dans une molécule organique. Les plantes peuvent absorber les oligo-éléments chélatés. Ils sont importants car ils **augmentent la solubilité des cations métalliques oligo-éléments** présents naturellement dans le sol ou ajoutés comme fertilisants.

L'assimilabilité des oligo-éléments dépend de plusieurs paramètres :

- **Le pH** : L'augmentation du pH réduit la solubilité des oligo-éléments (sauf pour le molybdène, pour lequel c'est l'inverse) et donc leur absorption par les racines est diminuée.
- **L'aération du sol** : plus le milieu est pauvre en oxygène (ex: sol engorgé d'eau), plus la solubilité des oligo-éléments augmente (conditions réductrices).
- **Le %M.O et de chélation** : les sols pauvres en matière organique sont généralement pauvres en oligo-éléments.
- **Les interactions entre les éléments nutritifs** : Antagonisme ou Synergisme.
- **Les techniques culturales** : Certaines pratiques réduisent la disponibilité des éléments minéraux (ex : chaulage, car il augmente le pH), d'autres l'augmentent (ex : Amendement organique), certaines produits phytosanitaire contiennent des oligoéléments (ex : Bouille Bordelaise), c'est aussi applicables pour les engrais.



2. Reconnaissance et correction des carences

On distingue 2 types de carences :

- **Les carences directes** : Elles concernent surtout les macroéléments. Il y'a un **déficit en éléments minéraux dans le sol**, ce qui ne permet pas de couvrir les besoins des cultures.
- **Les carences indirectes** : Dans le cas où le sol contient suffisamment d'éléments nutritifs, mais il y a un **déséquilibre** entraînant une surconsommation de l'un et un blocage de l'autre. Il s'agit d'un cas typique de l'**antagonisme**.

Il est difficile de détecter carences ou des excès en oligoéléments car les teneurs en oligo-éléments dépendent, de la partie du végétal étudié, du sol, des conditions climatiques...

Pour détecter les carences il y'a 3 méthodes :

- **L'expérimentation agronomique**, pour étudier l'influence sur les rendements de l'application de divers oligo-éléments.
- **Le diagnostic visuel** comparant l'aspect et la coloration des plantes carencées par rapport à des plantes saines.
- **Le diagnostic foliaire** où l'analyse chimique de la feuille permet de quantifier les teneurs en oligo-éléments et de déterminer s'il y'a réellement une carence.

Chacune de ces 3 méthodes a ses avantages et ses inconvénients, le diagnostic visuel est généralement la méthode la plus facile, rapide et la plus utilisée, mais bien qu'elle permet en effet de détecter des anomalies.

Les symptômes des déficiences sont connus pour chaque élément (voir cours chapitre 5), cependant on peut facilement se tromper surtout que certains symptômes se ressemblent.

La méthode la plus efficace et la plus précise reste le diagnostic foliaire, il l'avantage de donner souvent une interprétation physiologique aux phénomènes observés.

Ainsi bien que la visualisation des symptômes soit la 1ere étape du diagnostic, elle n'est pas toujours suffisante pour gérer une carence. Elle doit être complétée par des analyses chimiques.

En général **certaines carences sont récurrentes sur certains types de sol**, celles-ci sont présentées dans le tableau suivant, on peut néanmoins trouver ces carences dans d'autres conditions.

Tableau 17 : Carences potentielles en éléments mineurs selon le type de sol

Éléments mineurs	Caractéristiques physico-chimiques des sols et particularités
Fer	Sols organiques – Sols Calcaires
Manganèse	Sol léger bien aéré - Sol alcalin riche en humus. En cas de sur chaulage, le problème de la carence du manganèse s'accroît davantage surtout en sols sableux et riches en matière organique.
Cuivre	Carence à pH élevé, en sols sableux, pauvres en Cu et riches en M.O
Zinc	Sols dont le pH est >6,8 et riches en P assimilable.
Molybdène	Surtout chez les légumineuses et les crucifères et chez l'oignon cultivé en sol organique.
Bore	Répandu dans les climats très pluvieux qui favorisent le lessivage de l'acide borique dans les sols alcalins et argileux.

3. Le mode d'apports des oligo-éléments

L'apport des oligo-éléments peut être réalisé de façon préventive ou curative. Une gamme importante de produits existe pour aussi bien liquide ou solide. On distingue 2 modes d'apports des oligo-éléments :

- **L'apport d'engrais minéral au sol** : C'est le moyen le plus efficace et le plus économique de fertilisation. L'incorporation se fait en surface ou près de la semence. Selon les situations, l'application foliaire peut être suivie d'un apport au sol pour éviter la réapparition de la carence.
- **L'apport par pulvérisation foliaire** Permet d'optimiser les rendements et de corriger rapidement les carences. mais il existe des limites, notamment sur la quantité d'éléments nutritifs pouvant être apporté de cette façon.

L'absorption foliaire des éléments nutritifs se fait par les cuticules et les stomates. De ce fait, elle peut être améliorée par le choix du bon moment de la fertilisation et par l'utilisation de surfactants. L'absorption foliaire est aussi facilitée par les pulvérisations faites tôt le matin.

4. Types d'engrais d'oligo-éléments

On peut définir la typologie des engrais d'oligo-éléments comme suit :

- **Engrais Organiques** : Dans la plupart des cas, les effluents d'élevage servent à couvrir les besoins des cultures, tout en enrichissant le sol en M.O.



- Engrais sous forme granulaire
- Engrais sous forme liquide

5. Gestion des apports en oligo-éléments pour les cultures

L'apport d'oligo-éléments **n'est pas systématique**. Il faut surveiller les plantes ainsi que les teneurs du sol et **de n'intervenir qu'en cas de besoin**, soit à titre curatif après l'apparition d'une carence ou à titre préventif si on sait qu'elle risque d'apparaître.

L'écart est parfois mince entre la concentration qui provoque une carence et celle qui provoque la phytotoxicité. **La précision est donc de mise pour calculer la quantité à apporter.**

a. Cultures annuelles

Le tableau suivant montre les besoins pour certains des éléments les plus indispensables pour les céréales. Les quantités sont nettement plus basses que celles des éléments majeurs.

Tableau 18 : Principaux besoins d'une culture céréalière en oligoéléments.

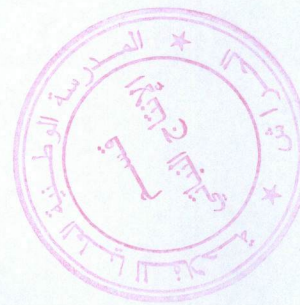
Eléments	Besoins
Mg	Les prélèvements par des récoltes plus importantes et par le lessivage, font perdre chaque année au sol de 40 à 60 kg de magnésie MgO par hectare.
Fe	Les besoins des cultures s'élèvent à 2 kg par hectare et par an.
Zn	Les récoltes prélèvent en moyenne 200 g de zinc par hectare.
B	Les pertes en bore dues aux exportations par les cultures et au lessivage s'élèvent à 200-300 g par hectare et par an.

b. Cultures pérennes

Les principaux oligo-éléments nécessaires en quantités supérieures sont le fer, le bore, le zinc et le manganèse. L'équilibre de ces éléments reste essentiel

Les oligoéléments comme le bore, le zinc et le manganèse sont de plus en plus pris en compte dans la conduite moderne des cultures fruitières et sont particulièrement importants pour la floraison et la nouaison et la fructification. Le cuivre, bien que nécessaire en quantités inférieures, contribue à la qualité de la peau en minimisant les risques de craquelures.

Étant donné que les **oligoéléments contrôlent des périodes clés de développement des plantes**, une carence – même temporaire – peut provoquer des pertes au niveau du rendement et de la qualité.



Chapitre 10 : la fertilisation organique

1. Notions et importance de la fertilisation organique

La fertilisation organique **ou amendements**, consiste en **l'incorporation au sol, de matières organiques (MO) plus ou moins décomposées**, tels que les fumiers. Ces derniers doivent passer sous forme minérale avant d'être assimilés par la plante. Leur transformation variera en fonction de l'activité biologique du sol.

Elle a pour but **d'améliorer la structure du sol** ainsi que **d'augmenter la capacité du complexe argilo-humique** à stocker les éléments nutritifs.

Les sols Algériens ont un %M.O très faible, d'où une faible rétention d'eau et d'éléments fertilisants, une faible activité biologique et une mauvaise CEC. Les éléments y **sont facilement lessivés**. Il est donc important d'enrichir nos sols en M.O afin d'améliorer leur qualité et d'améliorer leur pouvoir de rétention et ainsi leur fertilité.

2. Les types d'engrais organiques

Il existe plusieurs sortes d'engrais organiques, on distingue notamment

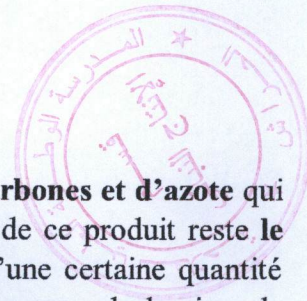
a. Engrais organiques d'origines végétal

- **Engrais vert** : Ce sont des **cultures temporaires de plantes** qui couvrent le sol entre deux mises en culture d'une parcelle, puis sont fauchées et **enfouies** pour enrichir naturellement la terre en éléments nutritifs.
Le pouvoir fertilisant de ce type d'engrais vient de **la fixation symbiotique de l'azote** si l'espèce est une légumineuse et/ou de **l'immobilisation puis la libération** de nutriments.
- **Purin de plantes** : Produit de la macération de plantes grossièrement hachées dans l'eau. (Ex : Purin d'orties)
- **Cendres de bois** : Les cendres sont une source remarquable de Nutriments (P, K, Ca, Mg) mais contient aussi en plus faibles quantité du soufre, du fer, de manganèse, de zinc, de cuivre, de sodium et de molybdène. Il constitue donc un **apport complet et équilibré** tout en étant **exempt de polluants et de contaminants**. Il est très utilisé en jardinage.

Récemment on remarque aussi l'utilisation de certaines algues comme engrais organique.

b. Engrais organiques d'origine animal

Il y'a plusieurs engrais organique d'origine animal notamment la corne broyée, le guano, le sang desséché, poudres d'os, poudres de poisson...



Ce sont des produits **rapidement minéralisable**, ce sont des **sources de carbones et d'azote** qui en plus **stimule la vie microbienne des sols**. **Cependant**, le plus utilisé de ce produit reste le **fumier**, qui est un produit solide composé d'une matière organique et d'une certaine quantité d'eau. Issus des déjections des animaux d'élevage, principalement de chevaux, de bovins, de volailles et d'ovins. C'est **à la fois un engrais et un amendement**.

c. Compost

Le compost est un **produit stable riche en humus** provenant du processus de **dégradation de toutes les matières organiques** et contenant des organismes vivants et des éléments nutritifs pour les plantes.

Ce produit provient du procédé appelé le compostage qui est un processus naturel de **dégradation ou de décomposition de la matière organique fraîche par les micro-organismes**.

Le compostage sert à traiter les matières biodégradables afin de limiter la pollution tout en ayant un usage agronomique.

Chaque type d'engrais organique a ces avantages et ses inconvénients comme le montre le tableau suivant.

Tableau 19 : Avantages et inconvénients des engrais organiques

Engrais	Avantages	Inconvénients
Fumier et compost	Agit comme amendement et engrais Stimule la vie du sol pour une fertilité durable. Gratuit si produit par l'agriculteur	Temps d'attente de la décomposition Nécessite du travail
Corne broyée et guano	Excellent engrais organique bio Facile d'utilisation S'achète prêt à l'emploi	Prix de revient important
Engrais vert	Agit comme amendement et engrais Excellent engrais organique bio Gratuits sauf prix de la semence Permet de protéger le sol de l'érosion	Nécessite de s'y prendre une saison à l'avance Nécessite du travail : semer, hacher, enfouir...
Purins d'ortie	Excellents engrais organiques bio Gratuits si artisanale	Fabrication longue et nauséabonde



3. Les indicateurs de caractérisation des produits

a. Les indicateurs « descripteurs » des produits organiques :

- **Composition en matières premières** : Principal élément déterminant les caractéristiques du produit. Les matières organiques végétales sont sources d'humus. Alors que ceux d'origines animales sont souvent sources de matières organiques facilement minéralisables.
- **% Matière Sèche (%MS)** : elle est donnée en pourcentage du produit brut. Il est conseillé de **privilégier les produits avec une teneur en MS élevée** : le reste correspond à de l'eau.
- **% Matière organique (%M.O)** : elle est donnée soit en pourcentage de produit brut, soit en pourcentage de MS. Par exemple, un produit avec une teneur en MS de 60% et une teneur en MO/MS de 70% n'apportera réellement que 420 kg de MO/t de produit brut.
- **pH** : La grande majorité des produits ont des **pH compris entre 6 et 8**. L'incorporation de MO dans le sol peut s'accompagner d'une légère baisse passagère du pH, due à la libération d'acides organiques au cours de la minéralisation).
- **Formulation** : les produits peuvent exister sous différentes formes : brut (taille des éléments souvent grossière), broyée puis tamisée. La forme sous laquelle se présente le produit détermine son mode d'épandage, mais également certaines caractéristiques agronomiques du produit (effet sur la structure du sol, rapidité de dégradation...).
- **Prix** : Les prix / 100 kg de produit sont très variables selon la nature des produits. Il convient de **rapporter le prix à l'objectif principal visé** à travers l'utilisation du produit : prix de la tonne d'humus apportée, prix de l'unité d'azote... etc.
- **Teneur en éléments fertilisants** : Permet de **déterminer la quantité d'éléments fertilisants** (N, P, K, Ca, Mg....) apportés par le produit.

b. Les indicateurs estimant le comportement des produits organiques

- **Le Rapport C/N** : En règle générale, **la vitesse de dégradation du produit est inversement proportionnelle au rapport C/N**. Il faut néanmoins prendre en compte la nature des matières premières lors de l'interprétation.

Au cours du compostage, le rapport C/N diminue, il est donc important de le surveiller régulièrement. La plupart des amendements ont des **C/N de l'ordre de 12-15**.



- **Le rendement en humus** : C'est la quantité de MO « stables » apportée par un produit, elle permet d'entretenir le taux de MO d'un sol à long terme. Le rendement humus correspondait au **coefficient isohumique** d'un produit (k1).
- **Disponibilité des éléments minéraux apportés** : La forme sous laquelle sont apportés les éléments minéraux détermine leur rapidité de mise à disposition

4. Le raisonnement de la fertilisation organique

L'ajustement de la dose d'apport entre les besoins des cultures et les fournitures du sol contribue à la bonne gestion des produits organiques sur l'exploitation.

Il faut savoir que les **processus qui déterminent la disponibilité** des éléments retenus par la matière organique dans le sol sont **sous le contrôle de la biomasse microbienne**

La mise en culture à tendance à diminuer le taux de matière organique dans le sol, il est donc important à la fois de restituer ces pertes, et de choisir les opérations culturales qui provoquent le moins de perte.

Parmi les mesures qu'il faut prendre en considération quand on apporte des fertilisants organiques :

- **Le régime de restitution des résidus des cultures.**
- **La teneur en élément nutritif des produits organiques.**
- **La minéralisation du stock organique** déjà existant. Et la vitesse de minéralisation des 2 premiers points.

Selon le produit utilisé, la **composition peut varier énormément**. Cette composition peut aussi varier au sein d'un même produits, par exemple la composition du fumier change selon l'alimentation du cheptel, il est donc important de faire analyser son produit.

Dans le raisonnement d'un plan d'une fertilisation organique, il est important de **prendre en compte les facteurs qui influencent la mise en disponibilité des éléments nutritifs** :

- Météorologie.
- Type de sol et minéralogie.
- Quantité et qualité de la matière organique, fraîche ou humifiée.
- Intensité de l'activité biologique.
- Etat physico-chimique du sol.
- Pratiques culturales.
- Développement racinaire de la culture.

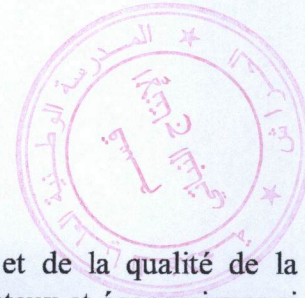
Quand on apporte la matière organique au sol il faut garder à l'esprit que plusieurs processus entrent en jeu :

- La **minéralisation de la matière organique fraîche** (litière) **non incorporée** au sol.
- La **minéralisation de la matière organique fraîche incorporée** au sol.
- La **synthèse d'humus**.
- La **minéralisation des composés humifiés**.

Lors du raisonnement de la fertilisation organique, il est important d'avoir recours au **bilan humique**, celui-ci permet de comparer les gains (Matière organique restitué) et les pertes d'humus (Minéralisation) de cette parcelle sur une profondeur définie.

Afin de favoriser la conservation et la maturation des composés humiques, on peut utiliser des **stabilisateurs minéraux** tels que le calcaire actif qui bloque l'humus.

En conclusion, le raisonnement de la fertilisation organique est une pensée pluridisciplinaire dans lequel, il faut prendre en compte plusieurs paramètres de nature physique, chimique, biologique et décisionnelle qui interagissent entre eux.



Chapitre 11 : La fertigation chez les espèces annuelles

1. Notions et objectifs de la fertigation

Si l'irrigation est un facteur important qui influe sur les rendements et de la qualité de la production, son extension est limitée et présente des risques environnementaux et économiques si elle est mal gérée. Il est donc important de gérer cette pratique afin d'assurer la durabilité des systèmes.

La fertigation est l'association de deux pratiques agronomiques : l'irrigation et la fertilisation. En pratique, elle consiste à apporter des éléments fertilisant sous forme soluble via le système d'irrigation.

Elle assure à la fois la nutrition hydrique et minérale de la plante et elle est rendue possible notamment grâce au système d'irrigation goutte-à-goutte enterré auquel elle est le plus souvent associée.

Cette technique a un double objectif :

- **La préservation des ressources hydriques** par une réduction de consommation d'eau et une plus grande efficacité de l'irrigation.
- **L'augmentation des rendements et de la rentabilité** par une économie en intrant et en main d'œuvre.



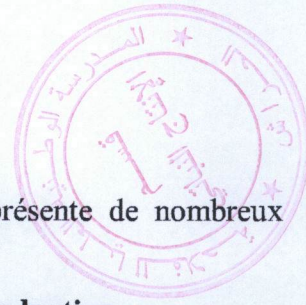
Figure 105: Système de fertigation



2. Les principales règles de la fertigation

Il faut garder à l'esprit que plusieurs règles régissent cette pratique, notamment :

- Il est important que **l'engrais soit entièrement solubilisé** afin d'éviter de boucher le système d'irrigation. D'où le **choix d'engrais les plus solubles possibles**.
- La **pression doit être maximale** en tête de station et au niveau des rampes afin de permettre l'injection de la solution nutritive et pour une bonne répartition de l'eau dans la parcelle.
- La **maintenance régulière des filtres** qu'il faut nettoyer pour avoir une solution propres, sans impuretés.
- **Etaler l'injection sur une certaine durée** pour maintenir la pression et garder la sécurité d'une bonne uniformité d'irrigation.
- Pour protéger les nappes et éviter les pollutions en nitrates, il est important que le système ait un **dispositif anti-retour** qui empêche la solution de revenir à la source d'eau.
- Le système d'irrigation doit être commandé à partir de la station de pompage, afin **d'arrêter la fertigation et le pompage simultanément**.
- **Surélever le bac de préparation de la solution nutritive** pour empêcher les précipités de passer au bac suivant, le bac qui récolte le surnageant est alors en dessous, et la solution passe à travers un **tamis très fin**.
- **Choix d'un bon système d'injection** (Généralement c'est un Venturi qui est utilisé) ; il faut que son **dimensionnement soit adapté à la quantité de solution nutritive à injecter**. Très souvent le Venturi donc l'agriculteur est obligé de fractionner ses apports ce qui est gênant
- **Contrôle fréquent de la salinité et de l'acidité** de la solution nutritive à l'aide d'un pH mètre et d'un EC mètre.



3. Avantages de la fertigation

La fertigation est une technique qui a déjà montré son utilité et qui présente de nombreux avantages, notamment :

- **L'augmentation quantitative (rendement) et qualitative de la production.**
- **Diminue la main d'œuvre** (et donc augmente la rentabilité).
- **Améliore l'efficacité de l'irrigation.**
- **Augmente la fréquence des apports d'engrais.**
- **Application précise des engrais au sol** (ex : Correction d'une déficience en phosphore au cours du cycle de la culture ce qui n'était pas possible en fertilisation traditionnelle)
- **Préservation de la qualité des eaux souterraines** en limitant le lessivage des sels et des nitrates.
- **Évite le ruissellement** et permet donc l'utilisation des terrains en pente.

4. Conceptions d'un système de fertigation

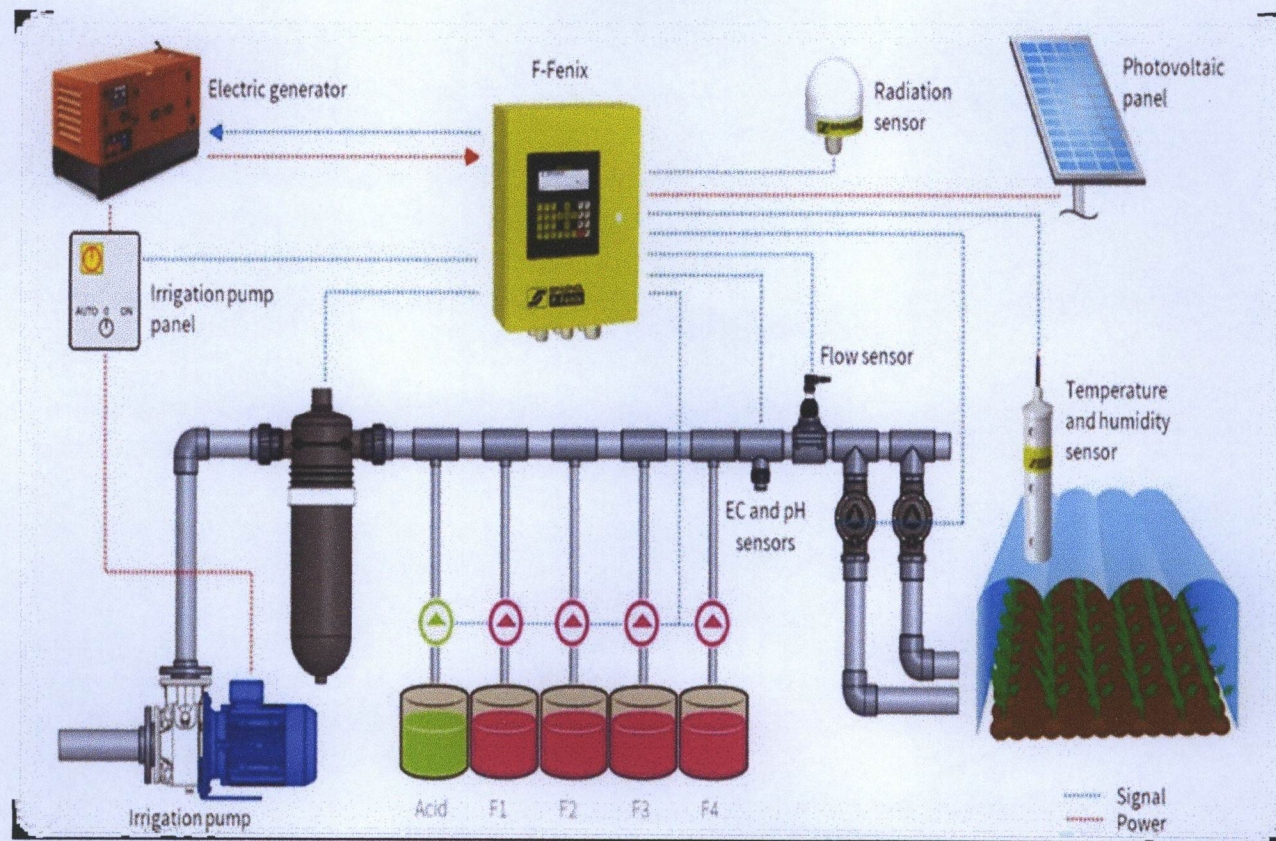
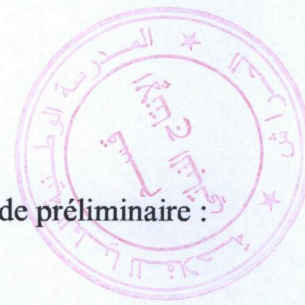


Figure 106 : Conception d'un système de fertigation



Il est important d'entamer la conception du système de déterminer par une étude préliminaire :

- La taille et la forme de la surface à irriguer
- La topographie
- Le type de sol
- Les sources d'eau
- Les données climatiques

Ces données permettront de déterminer à la fois les besoins en eau des cultures et les dimensionnements du système de fertigation à concevoir.

Le système de fertigation est composé de 2 parties :

- **Système d'irrigation :**

Ces systèmes servent à livrer l'eau à la plante grâce à la pression et en utilisant certains équipements de régulation du débit : ex : goutteurs et les micro-jets.

Il est important de bien déterminer les besoins en eau, selon le climat, le sol la culture... Pour pouvoir bien contrôler l'apport.

La **station de pompage** permet de pressuriser l'eau de le faire passer travers **la conduite principale** vers les secteurs opérationnels. L'eau passe ensuite vers **les rampes** qui sont doté de **goutteurs** permettant la distribution de l'eau aux cultures selon un débit précis (depend de la culture).

La filtration est nécessaire pour t préserver les appareils d'émission contre le bouchage. La première filtration doit être effectuée à l'amont du système. Il y'a plusieurs méthodes de filtration : filtre à sable, mailles...

- **Système d'injection d'engrais :**

Le matériel d'injection utilisé est une **pompe doseuse ou l'injecteur** de type venturi permettant l'injection de l'engrais par différentiel de pression. L'engrais passe ensuite par le système d'irrigation dont il bénéficie des avantages (Localisation des apports, Intervention rapide et ciblé, et un meilleure contrôle des quantités)

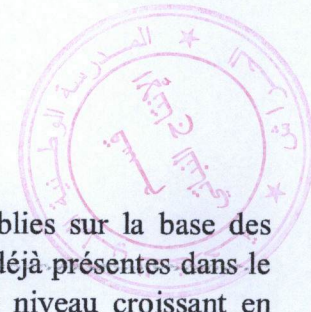
5. Etablissement d'un programme de la fertigation

La réalisation d'un programme de fertigation est base sur trois méthodes :

a. Méthode des équilibres :

On doit établir **un équilibre entre les éléments fertilisantes** (N, P, K ,Ca, Mg) selon les exigences de la culture, sa physiologie et son stade de développement.

Le calcul se fait sur la base de la fertilisation azotée qui est l'élément central.



b. Méthodes des normes :

Elle consiste à donner à la plante des solutions nutritives qui ont été établies sur la base des besoins en fonction des stades végétatifs auxquels on soustrait les réserves déjà présentes dans le sol et les quantités apportées par l'eau d'irrigation. Ces solutions ont un niveau croissant en termes de concentration en azote.

c. Méthode basée sur la conductivité électrique (CE) :

Cette méthode ne repose pas sur les éléments nutritifs mais sur des mesures régulières de la CE, elle a pour but de garder une CE qui assure un bon développement des plants. Cette méthode prend en compte les sels contenus dans l'eau d'irrigation qui apportent le Ca et le Mg, le reste est apporté sous forme D'N-P-K en respectant le rapport N/K égal à 1 ou 2, pour avoir une CE voulue.

Une CE élevée au début de la plantation stimule la fructification et la formation des racines, et à la fin améliore la qualité du fruit

En parallèle à ces méthodes il est important de prendre en compte la culture et le sol, afin d'éviter les phénomènes d'antagonisme et d'apporter à chaque culture ses besoins.

Les exigences des cultures diffèrent selon les espèces, variétés et stades physiologiques. Ainsi il n'y a pas de solution nutritive universelle, il est possible d'avoir une solution nutritive adaptée pour chaque stade d'une culture donnée.

6. Limites de la fertigation

Bien qu'elle soit une technique de fertilisation très utile elle a ces limites et ces désavantages parmi lesquelles on mentionnera :

- Le **prix élevé des engrais solubles** en comparaison avec les engrais traditionnels
- Le **coût de l'infrastructure** est un investissement conséquent
- Le raisonnement de la fertilisation demande **une grande précision et donc beaucoup de calculs**
- Il peut y avoir une **distribution inégale des engrais si le système est mal conçu**
- Problème de **salinité de l'eau**
- Problème de **compatibilité entre certains engrais**
- Problème de **goutteurs bouchés**.



Chapitre 12 : La Fertilisation foliaire chez les annuelles:

1. Notions de fertilisation foliaire

La fertilisation foliaire, développé dans les années 50 est une introduction nouvelle dans le domaine de la fertilisation et connait un certain succès notamment dans la fertilisation arboricole et maraichère en oligoéléments, elle s'est répandue aux grandes cultures et aux macros éléments depuis les années 2000.

La fertilisation foliaire consiste à appliquer les minéraux solubilisés nécessaire à la plante directement à l'aide d'un adjuvant.

Un fertilisant foliaire, ou engrais foliaire, est un produit vaporisé sur les feuilles d'une plante pour en améliorer la qualité ou améliorer sa fertilisation. Il est conçu pour être appliqué directement sur les feuilles

2. Mécanismes de l'absorption foliaire

La pénétration des éléments par fertilisation foliaire se fait par 3 voies :

- **La 1ere voie** : C'est le **transfert passif des éléments à travers la cuticule**. C'est la voie la plus simple et le plus logique étant passivité du phénomène ce qui est bien corrélé avec l'hypothèse du gradient de stress. Cette voie présente des limites : la cuticule a des capacités de diffusions limitées (Flux maximum de <2 Kg. Ha-1 pour le P et de < 10 Kg. Ha-1 pour l'N par exemple)
- **La 2eme voie** : Le produit trouve **des failles naturelles dans la cuticule**, ce qui augmente son absorption par rapport au transfert passif
- **La 3eme voie** : fais appel aux **stomates** en utilisant les films d'eau adsorbés par les cellules de garde. Dans la même logique, le produit peut s'introduire via d'autres structures épidermiques tel que **les lenticelles et les trichomes**.

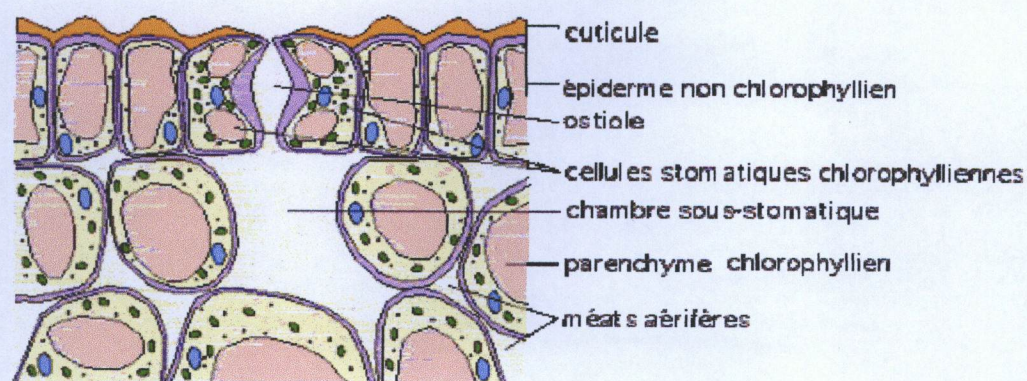


Figure 107: Schéma représentant la cuticule et les stomates au niveau de l'épiderme de la plante

L'absorption peut se faire soit sous forme **simple** (ions : cations et anions) ou **complexe** (ex : Chélates).

Il est **indispensable pour une fertilisation foliaire efficace que la matière active** pénètre à la plante afin qu'elle puisse être métaboliquement active dans les cellules.

Les stomates ne représentent que 10% de la surface foliaire, **de plus la nature cireuse de la cuticule freine l'absorption**. Donc seule une faible quantité d'éléments peut pénétrer la plante c'est pour cela qu'on l'utilise principalement pour l'oligoélément.

La fertilisation foliaire est **favorisée par une humidité élevée** qui conduira à un gonflement de la membrane cuticulaire, qui réduit son caractère hydrophobe et augmente donc l'absorption des nutriments dissous dans l'eau.

Vu que les stomates se trouvent en plus grand nombre sur la **face inférieure du feuillage** il est important d'atteindre cette partie pour maximiser l'efficacité de l'absorption. De même les stomates sont plus **ouverts en fin de journée ou tôt le matin, ce qui correspond au meilleur moment de la journée de l'application**.

Les **résultats de la fertilisation foliaire sont très variables**. Dues à plusieurs variables : la complexité de l'architecture du feuillage et des différences qu'il prend d'une espèce à une autre, et des différents paramètres définissant la feuille (Age, %humidité, sénescence...)

La **fertilisation foliaire est liée aux feuilles**, la plante ne peut donc valoriser la fertilisation foliaire qu'avec un **LAI suffisant** (2-4 pour le blé par exemple). De plus les feuilles sont sensibles aux stress osmotique il est important alors de limiter les doses pour éviter dégâts sur les feuilles.

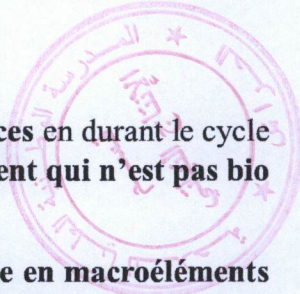
3. Domaine d'application et limites

La fertilisation foliaire **peut être appliquée à toutes les cultures sauf les plantes xérophytes** qui ont une anatomie spéciale pour protéger les pertes d'eau notamment la présence de cutine et de cires qui empêchent l'absorption des nutriments pulvérisés. Pour le cas de la majorité des espèces annuelles ce problème ne se pose pas.

Le **stade de croissance des cultures est également très important** due au fait que les plantes en début de croissance sont très délicates, il faut donc attendre au moins un développement de la plante pour éviter les dégâts.

Les **cultures de courte durée répondent généralement mieux** à la fertilisation foliaire.

Si la pluie se produit peu de temps après une application, la majeure partie du produit sera lavée des feuilles, il faudra dès lors réappliquer le produit.



La fertilisation foliaire est efficace pour une **correction rapide des déficiences** en durant le cycle cultural. C'est aussi une bonne solution pour **apporter à la culture un élément qui n'est pas bio disponible** dans le sol cultivé.

Elle ne peut malheureusement **pas couvrir toutes les exigences de la plante en macroéléments** car le montant total, ne dépassera pas 5-6% des besoins, même avec 10 pulvérisations car la concentration en produit de pulvérisation est fixe pour éviter les dégâts sur les feuilles.

Dans quel cas se justifie la fertilisation foliaire en culture annuelles ? :

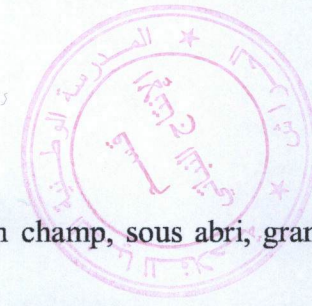
En ce qui concerne les éléments majeurs, la faible absorption d'éléments nutritifs et l'impossibilité d'un trop grand apport au risque de causer des dégâts à la plante (l'azote uréique par exemple cause des nécroses à partir de 40 kg d'N/ha, le NO₃⁻ est encore plus corrosif) fait qu'on ne peut pas se baser que sur la fertilisation foliaire. **La fertilisation foliaire représente alors un apport complémentaire** peut être utile en Algérie pour les céréales en fin de cycle car la sécheresse empêche une bonne absorption par les racines.

En revanche pour les oligo-éléments la fertilisation foliaire est tout à fait justifiable car les besoins sont infimes en termes de quantité.

Exemple : Cas de la correction de carences P-K des céréales : Le phosphore est un élément très dépendant du pH du sol, une bonne partie des sols méditerranéens sont déficients en. Le potassium est un autre élément qui peut être présent mais déficient dues à la nature du sol (rétrogadation dues aux feuillets d'argile). La fertilisation classique est donc tributaire de la nature du sol qui peut les rendre indisponible à la plante. **La fertilisation foliaire en complément est donc une solution rapide et efficace pour régler ce problème.**

Une étude réalisée au Maroc a montré l'augmentation du rendement du blé de 10 qx/ha pour un apport de potasse par la voie foliaire de seulement 25 kg/ha. Une telle augmentation est très bénéfique pour l'agriculteur.

Exemple : Cas de la fertilisation soufrée des céréales : A partir du stade dernière feuille chez le blé, **l'absorption racinaire du soufre ne permet plus de couvrir les besoins de la culture**, ce qui représente une carence. La fertilisation foliaire est donc une solution. Celle-ci se fait généralement donc en 2 apports entre le stade dernière feuille étalée et floraison. Des études ont **montré l'avantage de la fertilisation en soufre et en magnésium par voie foliaire des céréales d'Hiver**. Parmi ces principaux bénéfices, une **meilleure valorisation de l'azote, des teneurs en protéines plus élevées** et donc une meilleure qualité boulangère, ainsi qu'un **rendement optimum**.



4. Nature et propriétés de l'engrais foliaires :

L'engrais foliaire s'adapte à tous les environnements cultureux (plein champ, sous abri, grande culture, maraîchage, conventionnelle, bio, etc.). Il se caractérise par :

- **Sa vitesse d'actions** : car les nutriments sont immédiatement assimilés et utilisés par les plantes, et à une
- **Sa précision** : l'action peut être ciblée uniquement sur une carence, seul l'élément ciblé peut être apporté.

La forme la plus courante est la forme liquide (poudre ou sous forme de poudre à dissoudre ces derniers doivent être entièrement dissous et ne laisser aucun résidu.



Figure 108 : Photo d'une fertilisante foliaire liquide multiculture composée de 2 oligoéléments (Bore et Molybdène)

On retrouve des fertilisant foliaires sous formes de formules qui sont **spécialement conçues pour une culture donnée.**

On retrouve différents types d'engrais foliaires, la majorité étant **des correcteurs de carences**, contenant seulement l'élément requis. Ce sont principalement des oligo-éléments mais on retrouve de plus en plus de macros éléments. L'azote est par exemple utilisé en fertilisant foliaire sous plusieurs formes : urée, nitrate, ammonium, amides....etc.

Mais les fertilisants foliaires ne se limite pas qu'aux éléments minéraux, ils peuvent contenir des **hormones, des vitamines, des protéines, des acides aminés...**



5. Intérêt de la fertilisation foliaire

La fertilisation foliaire a de nombreux intérêts en effet :

- **La fertilisation foliaire est un moyen efficace de nourrir les plantes :** Dans certains sols les engrais appliqués réagissent avec le sol et sont alors peu ou pas disponibles. Dans certains cas, on estime que seulement 5 à 15% des éléments principaux atteignent la plante. Pour les oligo-éléments, ce pourcentage est souvent encore plus faible, parfois même pas 1%. Cela est dû à plusieurs facteurs notamment, le pH, la texture, les équilibres entre les éléments...

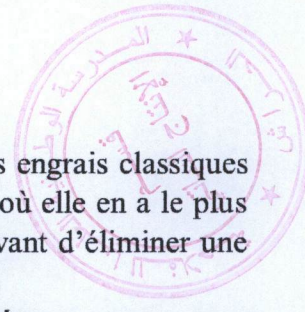
La fertilisation foliaire permet de s'affranchir de ces contraintes du sol.

- **La nutrition foliaire stimule le développement et la croissance des racines :** La capacité d'absorption du système racinaire est augmentée. La plante est donc en mesure d'absorber plus d'eau et de nutriments car elle atteint un plus grand volume de sol.



Figure 109-110-111 : De gauche à droite : effet de 0 fertilisation – effet de la fertilisation classique – effet de la fertilisation foliaire.

- **La nutrition foliaire compense la faible activité des racines :** Les racines peuvent mal fonctionner pour plusieurs raisons (asphyxia, compactage, salinité...), infections du sol, compactage, maladies, niveau élevé de salinité. Par conséquent, elles sont peu fonctionnelles et la culture se développe très lentement. La fertilisation foliaire permet de compenser ce problème en **s'affranchissant des racines.**
- **La nutrition foliaire résoudra immédiatement une carence (Action très rapide) :** Les conséquences du stress dû aux carences sont importantes et affectent la productivité et le rendement final. Il est donc **très important de traiter la carence le plus rapidement possible** pour assurer la récolte.



L'effet de la fertilisation foliaire est beaucoup plus rapide que des engrais classiques apportés au sol. La plante absorbe les nutriments immédiatement. Là où elle en a le plus besoin. Alors que la fertilisation au sol prend parfois des semaines, avant d'éliminer une carence, ce qui pourra nuire à la culture.

- **Elle permet de contrôler la vigueur de la culture : il y'a 2 possibilité :**
 - Si la vigueur est trop faible : on stimule la croissance plus fortement avec des produits riches en azote.
 - Si la vigueur est trop forte, on ralentit la croissance, avec un apport ciblé de K qui va canaliser l'énergie de la plante vers les fruits.

D'autres processus peuvent être stimulés de la même façon. Ainsi, on peut stimuler la floraison en appliquant du bore au bon moment.

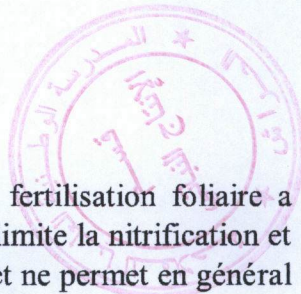
- **La fertilisation foliaire augmente la résistance de la plante :** Car une plante bien nourri est plus résistante.
- **La nutrition foliaire améliore la qualité de la récolte :** Car l'alimentation de la plante est plus équilibrée. Cela évite plusieurs inconvénients qui nuisent à la qualité (excès d'azote, carence en bore et en zinc...)
- **Gain de temps avec la nutrition foliaire :** En combinant fertilisation foliaire et application de pesticide
- **Elle permet de faire des économies :** Car les nutriments sont fournis plus efficacement par la fertilisation foliaire, on diminue la quantité d'engrais apporté.

Tableau 20 : Comparaison entre les quantités apportés par la fertilisation foliaire et au sol

	Pour chaque kg fourni par voie foliaire	Quantité nécessaire à appliquer au sol (kg)
Nitrogène	1	10-15
Phosphore	1	20
Potassium	1	27
Calcium	1	35-40
Magnesium	1	28
Soufre	1	5-7
Bore	1	30
Cuivre	1	35-38
Fer	1	25-100
Manganèse	1	20-25
Zinc	1	12

Comparaison Foliaire/Sol (unité ou kg/ha)

- **Elle permet de préserver l'environnement :** Car elle ne pollue pas les sols en profondeurs (lessivage des nitrates...).

- 
- **Elle ne dépend pas des conditions de l'environnement** : La fertilisation foliaire a donné de bons résultats en conditions stressantes : sécheresse (qui limite la nitrification et l'activité biologique du sol) et froid (qui réduit l'activité racinaire et ne permet en général la disponibilité des éléments dans le sol qu'à partir de 10°C).

6. Raisonement de la fertilisation foliaire

Il est important de **calculer avec précision la dose d'engrais** à apport car les feuilles sont sensibles, un surdosage peut provoquer des brûlures ou la fermeture des stomates.

La fertilisation foliaire doit être **pensé au sein du plan de fumure global** afin d'éviter les mélanges toxiques et les surdosages.

Il faut garder à l'esprit que le **délai entre 2 apports foliaires est de 48h**.

Il est important **d'ajouter un agent mouillant ou un surfactant** (tensioactif) pour qu'il va couvrir la feuille et empêchera l'eau de perler. La dose est de 1-2 gouttes de détergent pour 5 litres d'eau.

Comme l'absorption dépend en grande partie des stomates, il convient de :

- **Éviter les heures chaudes** : température de l'air >25°C (stomates fermés)
- **Choisir les heures de la journée** les plus humides (HR de l'air > 60 %, stomates ouverts).

Ce qui fait que les heures matinales sont les plus propices pour une application.

Il est **important d'éviter les rosées et les temps nuageux** pour que le produit ne ruissèle pas.

L'eau doit sécher le plus lentement possible pour que l'engrais ait le temps de traverser la cuticule

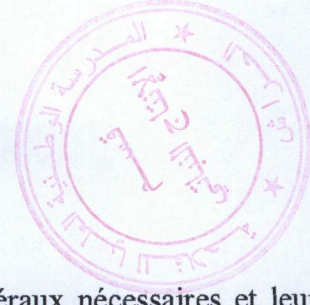
La **vaporisation de l'engrais sous forme de brume est la méthode la plus efficace**, puisque les gouttelettes fines pénètrent plus facilement dans les stomates.

On doit appliquer au moins **200 litres d'eau (bouillie) à l'hectare**. Afin de bien mouiller le feuillage en évitant le ruissellement. L'eau permet aussi de ramollir la cuticule ce qui facilite ensuite le passage des éléments nutritifs.

L'application de l'engrais foliaire se fait généralement à l'aide d'un pulvérisateur.

La pulvérisation doit au maximum **toucher les jeunes feuilles** qui absorbent le mieux les nutriments.

Dans le cas où plusieurs produits sont utilisés il est important de vérifier la compatibilité des éléments sous peine d'avoir **un problème de toxicité**. Cela vaut aussi pour les pesticides.



Chapitre 13 La fertilisation des Arbres fruitiers :

1. Bases de la fertilisation des arbres fruitiers

Afin d'établir un programme de fertilisation il faut :

- **Définir les besoins des arbres**, déterminer les éléments minéraux nécessaires et leurs quantités pour chaque espèce ainsi que les besoins du verger en chaque élément dans les différentes périodes de la saison selon l'âge du verger et l'objectif de la récolte. En effet, le rendement en fruit est le but majeur de l'arboriculteur, C'est à partir de ce rendement cible que l'on peut évaluer la quantité d'éléments fertilisants à apporter.
- **Analyser le sol** (Analyse physique et chimique) du verger : Ph, CEC, calcaire... Ceci afin de pouvoir prendre des décisions conditionnant la réussite du verger telles que : le choix des espèces et des porte greffes, correction des taux par des fumures etc...

2. Le sol du verger :

L'analyse du sol est la seule démarche qui permette une connaissance précise sur les caractéristiques physicochimiques de la parcelle, **il faut bien connaître toutes les caractéristiques de la parcelle et déterminer le type de verger** choisi pour définir une parcelle de terrain, il est important de bien apprécier :

- Sa situation topographique
- La profondeur du sol (pour permettre un bon ancrage des racines)
- La nature physico-chimique du sol
- Absence d'une dalle ou croute à faible profondeur
- Structure favorable
- Structure stable
- Présence d'une nappe d'eau

3. Eléments nutritifs et fertilisation en arboriculture :

Pour produire des fruits de haute qualité à un niveau de rendement élevé, l'arbre doit disposer de **tous les éléments nutritifs au bon moment, en quantité suffisante et en équilibre** les uns par rapport aux autres. Les manques, excès ou déséquilibres peuvent entraîner des symptômes de carences et des troubles physiologiques (perturbation de la maturation des fruits, alternance, croissance végétative au lieu de générative, baisse de la qualité des fruits). Pour mieux cerner la nature des difficultés liées à l'alimentation minérale des arbres fruitiers, il convient **d'examiner chacun des éléments minéraux, dans son rôle physiologique, les symptômes de sa déficience et les facteurs à leur origine.**

a. Disponibilité des éléments nutritifs :

Lorsqu'un élément nutritif « empêche » l'absorption d'un autre élément, c'est appelé l'antagonisme, en opposition consiste à stimuler l'effet entre deux ions d'éléments fertilisants

Pour identifier les antagonismes importants pour l'arbre, il est important de connaître la forme ionique sous laquelle les éléments nutritifs sont absorbés par la plante.



b. Les éléments nutritifs :

- **Azote** : contribue à former des boutons floraux de qualité et rend les fleurs fécondables plus longtemps ; la coulure et l'alternance sont de plus réduites par une bonne nutrition azotée des arbres.

Il est apporté Avant la floraison pour subvenir à la croissance et au grossissement des fruits après la nouaison, Il est par contre déconseillé d'apporter de l'azote au cours de la floraison, étant donné que celui-ci va accélérer la poussée végétative au détriment de l'alimentation azotée des fleurs

- **Phosphore** : La rapidité de fixation de cet élément dans le sol implique que l'apport se fasse régulièrement au printemps plutôt qu'à l'automne
- **Potassium** : En règle générale, la fertilisation potassique se fait au printemps avec des engrais potassiques contenant du sulfate.
- **Calcium** : Sur les sites présentant des problèmes d'approvisionnement en Ca, on peut apporter dès juin des engrais foliaires en complément.
- **Bore** : Réaliser des apports foliaires au printemps, Les pulvérisations d'automne sont conseillées pour améliorer la mise en réserve de cet élément dans l'arbre.
- **Magnésium** : Un apport de Mg en engrais foliaire peut aussi se faire dès la fin de la floraison et jusqu'en juin
- **Fer** : Des apports complémentaires peuvent s'avérer opportuns en été ou après la récolte

c. Analyse de situation et corrections des carences :

L'élément azote est celui qui influence le plus la vigueur, il sera apporté essentiellement en fonction de l'observation du végétal. **L'appréciation se fait en recherchant un équilibre physiologique idéal** (rapport feuille/fruit, aoûtement du bois). La fumure phosphatée, potassique et n'est pas déterminée en fonction de l'observation du végétal comme pour la fumure azotée, sauf en cas de carence avérée. Une fumure annuelle avec d'autres éléments n'est en général pas nécessaire dans les vergers, sauf dans des cas très particuliers. Il s'agit surtout du fer, du manganèse et du zinc, éléments que l'on applique par voie foliaire en cas de nécessité. En cas de soupçon de carence d'un oligoélément, l'analyse du sol doit être complétée d'une analyse foliaire

4. Les types d'engrais en arboriculture fruitière

a. Les engrais simples : (1 élément principal)

- **Les engrais azotés** : sont acidifiants et donnent l'azote nitrique ammoniacal.

Ex : Urée 46%, sulfate d'ammonium (21% de NH_4^+ et 23% de S)



- **Les engrais phosphatés simples mono calciques :**
Ex : Superphosphate normal de chaux, superphosphate concentré (0-25-25), superphosphate triple.
- **Les engrais potassiques :** dont le sulfate de potassium qui doit être positionné au printemps en fumure d'entretien pour profiter de l'effet soufre et le chlorure de potasse qui doit être positionné à l'automne pour que les chlorures soient lessivés à l'hiver.
- **Les engrais magnésiens :** à savoir le sulfate de magnésie qui est utilisé en pulvérisation foliaire en cas de carence. Pour corriger les carences du sol, on utilise le Kieserite, le sulfate et l'oxyde de magnésie en granulé.

b. Les engrais composés :

Ils associent trois à quatre éléments fertilisants. Ils sont obtenus soit par mélange d'engrais simple ou binaire, soit par des réactions chimiques complexes. **L'engrais le plus intéressant est celui avec un retardant de nitrification qui limite le risque de lessivage des nitrates.**

- **Engrais complexes :** fabriqués par des méthodes faisant intervenir une réaction chimique entre les matières premières contenant plusieurs éléments nutritifs choisis.
- **Engrais composés granulés :** issus de la granulation après un mélange à sec d'engrais simples.
- **Engrais de mélanges :** Engrais contenant plusieurs éléments nutritifs, obtenus par mélange physique des matières premières.

c. Les engrais organiques et organo-minéraux :

La teneur minimale en N, P_2O_5 ou K_2O doit être de 3%. **Ils doivent avoir au moins 1% d'azote sous forme organique.** Seule la matière organique d'origine végétale fournit de l'humus.

5. Le mode d'apport

a. Engrais de fond :

Agit lentement, en pénétrant dans le sol, il **compense le manque d'éléments** causé par l'intensification. Cette pratique peut se réaliser de plusieurs façons : à la plantation, mettre du

compost dans le trou ou recouvrir les racines avec un mélange à base de compost, mettre de la terre en surface mélangée à du compost.

b. Fertilisation distribué ou localisée :

Epannage uniforme sur la ligne l'arbre ou sur toute la surface : les engrais sont apportés par un semoir muni d'un dispositif de localisation de la fumure

c. Fertigation :

Cette technique est susceptible de présenter un intérêt essentiellement pour des cultures très intensives sur porte-greffe faible

d. Apport par enfouissement :

On l'utilise dans des situations particulières ex ; sous-sol très pauvre en P et K, ou si la fumure de fond n'a pas été apportée à la création.

On peut faire cet apport sous forme solide à l'aide d'un coute creux qui permet de localiser l'apport d'engrais au niveau des racines ou bien sous forme liquide avec un pal injecteur.

e. Fertilisation foliaire :

On l'utilise poste récolte si le feuillage est en bon état pour la mise en réserve. Comme on l'utilise aussi pour la correction des carences et l'apport des oligo-éléments

Les engrais foliaires complets ne doivent être utilisés qu'exceptionnellement jusqu'en juin au plus tard.

L'apport doit respecter les normes et les conditions météo pour éviter les brûlures des feuilles.

6. Calendrier des apports :

Il est important de planifier à l'avance un programme d'apport pour assurer une fertilisation dans les temps et bien optimisé.

Ce programme dépend de : L'espèce et ses exigences ainsi que du stade de développement des arbres et l'âge du verger

Il y'a 2 catégories d'apports :

➤ *La fumure de fond :*

Elle permet un d'avoir **un sol riche et équilibré pour assurer un bon démarrage** pour l'arbre. En général on l'apporte **avant la plantation**, durant le labour d'hiver. Cependant on peut aussi l'apporter au moment de la plantation.



Le critère essentiel est une **grande teneur en azote** afin que l'arbre puisse bien développer ses organes végétatifs au démarrage.

C'est pour cela qu'on fait beaucoup appel aux **engrais organiques** (ex : compost) qui en plus de leur richesse ont l'avantage de libérer progressivement les éléments nutritifs ce qui augmente la période d'effet de cet apport.

➤ *La fumure d'entretien :*

La réserve minérale doit être toujours renouvelée pour assurer la production continue et stable de l'arbre.

Alors qu'à la plantation l'arbre a de grands besoins en azote ceux-ci diminuent au profit de la potasse et phosphore. Il y'a notamment 2 périodes clé :

- **Le stade de nouaison** : Accroissement des besoins en nutriments, les engrais doivent être apportés en surface.
- **La fin de saison** : L'arbre a besoin de faire ses réserves pour la saison suivant, cependant une fertilisation trop riche peut redémarrer son activité, d'où l'importance d'enfuir l'engrais. C'est là que la fumure d'entretien intervient, elle est apporté périodiquement tous les 2 à 5 ans pour les sols non carencés.

7. Recommandations

- **Les analyses du sol** sont utiles, elles permettent à la fois **réduire les dépenses** en apportant la dose exacte et de **protéger l'environnement** en limitant les pertes.
- Un **suivi régulier du verger est nécessaire**, il permet de détecter le moindre symptôme de carence pour un traitement rapide.
- **Eviter de fertiliser pendant l'aoutement (de juillet à mi-aout)** car la croissance de l'arbre continue, une fertilisation à cette époque empêche les nouvelles pousses de se transformer en bois pour l'hiver.
- **Eviter d'apporter un fumier jeune très riche en azote** car il peut brûler les racines et l'écorce des arbres.
- **Eviter un apport annuel de compost** pour ne pas laisser les arbres fruitiers avoir un enracinement superficiel, ce qui leur nuira à long terme.

Tableau 21 : Quelques normes de fertilisation chez quelques familles d'arbres fruitiers

Espèces	Création du Verger	Jeunes arbres	Arbres Adulte (Pleine production)
Agrumes (Les plus exigeants)	Période : Eté Fumure de fond : 450- 500 U de P ₂ O ₅ /ha 600 -700 U de K ₂ O/ha.	30 U de N/ha fractionnées en trois apports : <ul style="list-style-type: none"> • 15 U de N/ha en Juin. • 7,5 U de N/ha en Juillet. • 7,5 U de N/ha en Août. 	Fumure de Fond (Automne) <ul style="list-style-type: none"> • Fumure organique • Fumure phospho-potassique (100-120 U de P₂O₅ + 100-160 U de K₂O). Enfouissement des engrais vert en Février (Apport d'azote de 250-300 U de N/ha fractionnées en trois fois : <ul style="list-style-type: none"> • 120-150 U de N/ha en février, mars (à la floraison). • 70-80 U de N/ha en mai-juin (à la nouaison). • 70-80 U de N/ha en aout septembre (pousse d'automne).
Rosacées à pépin	Période : Eté Fumure de fond : 400- 500 U de P ₂ O ₅ /ha 500 -600 U de K ₂ O/ha.	20 U de N/ha fractionnées en trois doses : <ul style="list-style-type: none"> • 4 U de N/ha en en février et mars (avant débourrement). • 12 U de N/ha en mai-juin (développement des pousses). • 4 U de N/ha en aout (fin de saison). 	Fumure de Fond (Automne) <ul style="list-style-type: none"> • Fumure organique • Fumure phospho-potassique (80-120 U de P₂O₅ + 120-160 U de K₂O). Enfouissement des engrais vert en Février Apport d'azote de 160-200 U de N/ha fractionnées en trois fois : <ul style="list-style-type: none"> • 32-40 U de N/ha en mars • 96-120 U de N/ha en mai-juin • 32-40 U de N/ha en mars en Aout-Septembre
Rosacées à noyaux	Période : Eté Fumure de fond : 400- 500 U de P ₂ O ₅ /ha 500 -600 U de K ₂ O/ha	20 U de N/ha soit en un seul apport (sec) ou fractionnées en trois doses (irrigué): <ul style="list-style-type: none"> • 4 U de N/ha en en février (débourrement). • 12 U de N/ha en Avril- Mai (développement des pousses et fruits). • 4 U de N/ha en Juillet (fin de saison). 	Fumure de Fond (Automne) <ul style="list-style-type: none"> • Fumure organique • Fumure phospho-potassique (60-80 U de P₂O₅ + 100-120 U de K₂O). Enfouissement des engrais vert en Février Apport d'azote de 80-100 U de N/ha en seul apport en Février si en condition sec. Si on est en conditions irrigués, fractionner en trois fois : <ul style="list-style-type: none"> • 30-35 U de N/ha en février • 80-110 U de N/ha en Avril • 30-35 U de N/ha en mars en Juillet



Références bibliographiques

- **AFNOR (2011)**: Guide d'interprétation pour les méthodes de caractérisation de la matière organique des amendements organiques XP U44-162 et XP U44-163. 18 p.
- **Bertschinger, L., Gysi, C., Häseli, A., Neuweiler, R., Pfammatter, W., Ryser, J. P., ... & Weibel, F. (2003)**. Données de base pour la fumure en arboriculture fruitière. FAW fascicule, 15.
- **Busson, S., Chabalié, P.F., Cottineau, J.S., De Laburthe, B., Fournier, P., Leroux, K., Van De Kerchove, V. et Salgado, P. (2015)**. Guide des bonnes pratiques agricoles à la réunion.
- **Colomb, B. (2017)**. Guide de la fertilisation raisonnée (2ème édition). France : éditions France Agricole.
- **Comifer, G. A. (2013)**. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. Editions COMIFER, Paris, France.
- **Constant, N. (2011)** : Catalogue des engrais et amendements utilisables en viticulture biologique en Languedoc-Roussillon. L'AIVB-LR, p 3
- **Cherkaoui, F., El Iamani, A., & El Mansouri, L. (2004)**. Développement et Pratique de la Fertigation dans le Périmètre Irrigué du Tadla. Tadla: IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa; Rabat, Morocco.
- **Dabin, B. (1970)**. LES FACTEURS CHIMIQUES DE LA FERTILITÉ DES SOLS (MATIÈRE ORGANIQUE; PHOSPHORE), techniques rurales en Afrique. OVATY, PARIS.
- **Etchebest, S. (2000)** Croissance foliaire du maïs (*Zea mays L.*) sous déficience en phosphore. Analyse à l'échelle de la plante et à l'échelle de la feuille. Thèse doctorat, INAPG, Paris. 99 p.
- **Falisse, A. et Lambert, J.** La fertilisation minérale et organique. Dans *Agronomie moderne : bases physiologiques et agronomiques de la production végétale* (544p.). France : Hatier AUPELF-UREF
- **FAO, (2017)**. Les engrais et leurs applications.
- **Fernández, V., Sotiropoulos, T., Brown, P. H., & Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. (2013)**. Foliar Fertilization. International fertilizer industry Association.
- **FERTIAL, (2017)**. Manuel d'utilisation des engrais
- **Gardiner, D.T., Miller, R.W., (2008)**. Soils in Our Environment (11th ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Pears on Prentice Hall.
- **Jaillard, B., Hinsinger, P., (1993)**. Alimentation minérale des végétaux dans le sol. Techniques agricoles 1210 : 6p.
- **Khelil, A. (2009)**. *Nutrition et fertilisation : arbres fruitier et vigne*. Office des publications universitaires.



- **Kuster, T., Eicher, O., Leumann, L., Müller, U., Poulet, J., & Rutishauser, R. (2017).** Fertilisation en arboriculture. Recherche agronomique suisse, 8, 209-229.
- **Latati M., (2011).** Adaptation de la symbiose légumineuse haricot-rhizobium à la déficience en phosphore : incidence sur la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère
- **Latati, M., Pansu, M., Drevon, J.J., Ounane, S.M., (2013).** Advantage of intercropping maize (*Zea mays* L.) and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on yield and nitrogen uptake in Northeast Algeria. International J Res Appl Sci 01: 1-7.
- **Latati, M., Blavet, D., Alkama, N., Laoufi, H., Pansu, M., Drevon, J.J., Gerard, F., Ounane, S.M.,(2014)** The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. Plant Soil 385 : 181-191
- **Liu, Y., Wu, L., Baddeley, J.A., Watson, C.A., (2011).** Models of biological nitrogen fixation of legumes. A review. Agron Sustain. doi: 10.1051/agro/2010008.
- **Leclerc, B. (2001).** Guide des matières organiques (2nd édition). Institut Technique de l'Agriculture Biologique, Paris, France. 238 p.
- **Maltais, A. (2006).** Facteurs et conditions favorables à l'efficacité de la fertilisation foliaire des cultures maraîchères du Québec.
- **Marschner, A., (1995).** Minéral nutrition of high plants. Academic press London. 889p.
- **Mengel, K., Kirkby, E., (2001),** Principal of plant nutrition. 5ème édition. Klumer Academic Publishers, 849p.
- **Mustin, M. (1987).** Le composte, gestion de la matière organique. Editeur : Paris : François Dubusc. ISBN : 2-864-72008-6. 954 p.
- **Petit, J., & Jobin, P. (2005).** *La fertilisation organique des cultures: les bases.* Fédération d'agriculture biologique du Québec.
- **Raynal-Lacroix C., Nicolardot B. (2006) :** Les produits organiques utilisés en agriculture biologique : caractérisation et étude de la minéralisation. Infos-CTIFL n°224, pp 43-48.
- **Reto, N ; Jürgen, K. (2017).** *Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse.*