

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Des Frères Mentouri Constantine 1
Faculté des sciences de la nature et de la vie

Cours de Physiologie Végétale

2ème Année Ecologie et Environnement

Préparé Par

Dr BOUZID Salha

2019- 2020

Introduction

1. La classification des végétaux

Le règne végétal est traditionnellement subdivisé en deux grands groupes en fonction de l'organisation structurale du végétal: les Thallophytes et les Cormophytes.

1.1. Les Thallophytes

Ce sont des végétaux dont la structure est très simple appelé **thalle**, le thalle est composé par des cellules qui se ressemblent sans différenciation physiologiques où on ne peut distinguer ni racine, ni tige, ni feuilles ni vaisseaux conducteurs. Certaines thallophytes sont **unicellulaires** et d'autre **pluricellulaire**.

1.2. Les Cormophytes

Ce groupe est composé par les végétaux supérieurs qui correspondent à des organismes toujours **pluricellulaires** et dont les cellules **eucaryotes** sont réunies en **tissus** formant à leur tour des **organes** beaucoup plus complexe qu'un thalle appelé **cormus** d'où le nom de cormophyte ;

Les cormophytes sont divisées en plusieurs embranchements : **1^{er} Embranchement: Bryophytes**, **2^{ème} Embranchement: Ptéridophytes**, **3^{ème} Embranchement: Préspermaphytes (Préphanérogames)**, **4^{ème} Embranchement: Spermaphytes (Phanérogames)**

1. Gymnospermes: les ovules (ébauches des futures graines) et les graines elles-mêmes ne sont pas entourées d'enveloppes closes

2. Chlamydospermes: leurs organes reproducteurs sont entourés d'une enveloppe simple.

3. Angiospermes: Regroupe les **plantes à fleurs**, et donc les végétaux qui portent des fruits. Ils représentent la plus grande partie des espèces végétales terrestres, et ils comprennent les Dicotylédones et les Monocotylédones.

2. Particularités de la cellule végétale

2.1. Le plasmalemme appelé aussi membrane plasmique, possède une épaisseur de 6 à 9 nm, délimite le cytoplasme de la périphérie de la cellule grâce à une perméabilité très sélective, il joue un double rôle de protection et de contrôle des échanges entre les milieux intracellulaire et extracellulaire par des ponts cytoplasmiques ou des canaux qu'on appelle : **plasmodesmes**

2.2. La paroi cellulaire

Ou apoplasme, elle assure la rigidité de la cellule sans pour autant empêcher l'eau et les solutés de la traverser pour atteindre le **plasmalemme** grâce aux **plasmodesmes**.

- **La lamelle moyenne** est la partie **la plus externe** de la paroi cellulaire, elle est de nature pectique et constitue le ciment assurant la jonction entre les cellules.
- **La paroi primaire** formée d'un réseau de microfibrilles de cellulose et hémicellulose, elle est **flexible et extensible** ce qui permet la croissance cellulaire. Elle se dépose entre la lamelle moyenne et la membrane plasmique.
- **La paroi secondaire** est formée lors de **la différenciation** de la cellule, plus épaisse que la paroi primaire, se dépose entre la paroi primaire et la membrane plasmique, constituée de cellulose et hémicellulose et riche en composés phénoliques comme la **lignine**, la **subérine** et la **cutine**

2.3. Les vacuoles

Elle jouent un rôle de régulation des fonctions physiologiques (pH, concentration ionique, pression osmotique) et occupent généralement plus de 40 % du volume cellulaire total. Chaque vacuole est entourée d'une membrane vacuolaire, le tonoplaste, elles peuvent stocker de l'eau, des éléments minéraux, des substances organiques et des pigments (Ex : Anthocyanes).

2.4. Les plastes

Ce sont des organites intracellulaires ovoïdes ou sphériques de quelques microns de long, délimités par **une double membrane**, dérivent des **proplastés**.

4.1. Les chloroplastes

Les chloroplastes sont limités par une double membrane, ils contiennent de la chlorophylle indispensable pour la **photosynthèse**.

4.2. Les chromoplastes

Ils contiennent les **carotènes** (pigments jaunes et orangés) ou **la xanthophylle**, (pigment jaune pâle). Ils se trouvent dans les cellules de plusieurs fruits colorés, comme les tomates ou des fleurs, comme les roses rouges.

4.3. Les amyloplastes

Ce sont des plastes contenant très peu de membranes internes mais de nombreux grains d'amidon. Le développement de plusieurs grains peut entraîner l'éclatement de l'enveloppe, l'ensemble est alors libéré dans le cytosol.

Chapitre 1 : Germination

1. Définition

La germination correspond à l'étape par laquelle une semence en vie ralentie "se réveille" et donne naissance à une plantule. Ce passage met en jeu des mécanismes physiologiques complexes.

C'est l'ensemble des processus qui vont du début de la réhydratation de la graine à la sortie de la radicule, l'évolution suivante est un phénomène de croissance.

2. Les types des graines

La graine se compose d'un **tégument** (simple ou double) et d'une **amande** formée de l'**embryon** et de tissus de réserves constituant l'**albumen**. La partie essentielle de l'amande est l'**embryon**. Celui-ci comprend une radicule, que prolonge une tigelle portant les cotylédons. Selon la présence ou non d'albumen dans les graines, celles-ci se classent en 3 catégories :

- **Les graine à périsperme** : Albumen très peu développé avec autour le périsperme (reste du nucelle qui n'a pas été digéré et qui sert de réserve). Le lieu de réserve est le périsperme
- **Les graines albuminées** : Disparition du nucelle, cotylédons minces dans un albumen développé servant de réserve comme par exemple, les caryopses des céréales.
- **Les graines exalbuminées** : le nucelle a été digéré par l'albumen, qui sera digéré pour former l'embryon et les cotylédons qui renferment les matières de réserves, comme chez le pois ou le haricot.

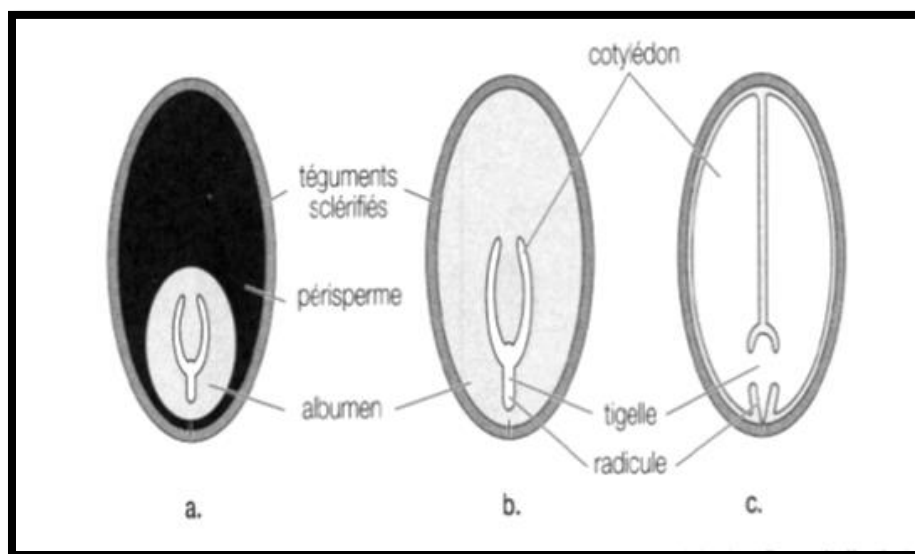


Figure 01 : a. graine à périsperme, b. graine albuminée, c. graine exalbuminée

3. Les étapes de la germination

Il est ainsi démontré que la germination comprend trois phases successives (figure 02) : la phase d'imbibition, la phase de germination stricto sensu et la phase de croissance.

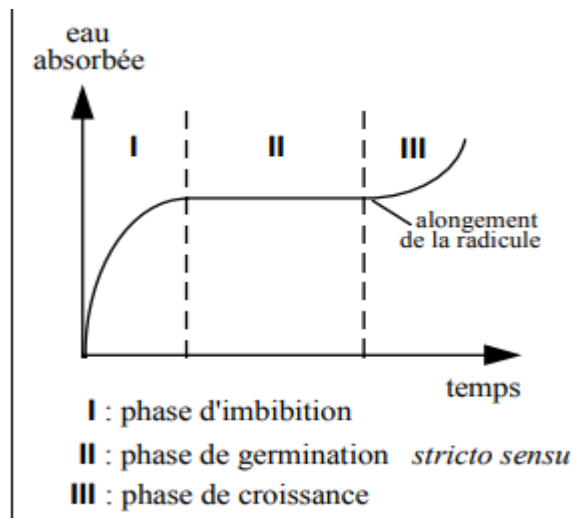


Figure 02. Courbe théorique d'imbibition d'une semence (d'après Côme, 1982).

3.1. La phase d'imbibition : Elle correspond à une forte hydratation des tissus par absorption d'eau aboutissant au gonflement de la graine : -Blé : 47 g d'eau pour 100 g de graines, -Haricot : 200 à 400 g d'eau pour 100 g de graines.

Parallèlement, on assiste à une reprise de l'activité respiratoire intense. Cette phase est assez brève durant de 6 à 12 heures selon les semences.

3.2 Phase de germination sensu-stricto : caractérisée par une stabilisation de l'hydratation et de l'activité respiratoire à un niveau élevé. Durant cette phase qui est relativement brève elle aussi (12 à 48h), la graine peut être réversiblement déshydratée et réhydratée sans dommage apparent pour sa viabilité. Elle s'achève avec l'émergence de la racicule hors des téguments.

Jusqu'à la fin de la phase de germination stricto sensu, la semence peut être déshydratée sans être tuée, mais lorsque la racicule a commencé sa croissance, la déshydratation est fatale.

3.3. Phase III : caractérisée par une reprise de l'absorption de l'eau et une élévation de la consommation d'oxygène, elle correspond en fait à un processus de croissance affectant la racicule puis la tigelle. A ce niveau, on doit distinguer entre l'activité métabolique de la jeune plantule qui se développe à partir de l'embryon, qui a tendance à s'exalter, et celle du tissu de réserve (albumen, cotylédons), qui a tendance à décroître par suite de l'épuisement des réserves.

4. La respiration

La respiration est une réaction catabolique qui décompose le glucose et d'autres nutriments. Les graines en germination absorbent l'oxygène de l'air ambiant. L'oxygène est utilisé pour convertir les nutriments stockés dans l'endosperme de la graine en énergie que la graine utilise pour germer. Les enzymes activées lorsque la graine s'imbibe (absorbe de l'eau) rendent possible la conversion d'énergie. Le dioxyde de carbone est rejeté sous forme de déchets lors de la respiration.

5. La longévité des graines

C'est la durée maximale qu'une graine peut consentir avant de perdre la capacité de germer, quand l'ensemble des conditions sont réunies.

Ewart (1908) classe les semences en trois catégories : les semences macrobiotiques, qui vivent plus de 15 ans, les semences mésobiotiques, les plus nombreuses, qui ont une durée de vie comprise entre 3 et 15 ans, et les semences microbiotiques, qui ne survivent pas plus de 3 ans ; certaines meurent même après quelques jours (*Oxalis sp.*) ou quelques semaines (*Populus sp.*)

6. Les types de germination

6.1. La germination épigée lorsque les tissus de réserve qui composent l'essentiel de la graine sortent du sol. La germination est alors assurée essentiellement par l'élongation importante de l'hypocotyle.

6.2. La germination hypogée lorsque les tissus de réserve qui composent l'essentiel de la graine demeurent dans le sol. La germination est alors assurée essentiellement par l'élongation importante de l'épicotyle.

7. Les conditions de germination

Des facteurs physiques, chimiques du milieu ou internes à la graine peuvent influencer l'aptitude de la graine à germer, selon l'espèce à laquelle elle appartient : température, teneur en oxygène, pH, lumière, hormones végétales, etc...

a. L'eau : Indispensable, elle doit être disponible dans le milieu extérieur en quantités suffisantes le blé peut germer sur une terre légère ayant une teneur en eau de 0.52%, alors que sur du terreau de jardinier, il faut une humidité d'au moins 19%. L'immersion totale des graines inhibe la germination par asphyxie.

c. L'oxygène : Indispensable à la germination, d'où l'importance de l'aération des sols pour la levée des semis.

d. La température : C'est le facteur le plus important de la germination du fait que son action est souvent masquée par d'autres phénomènes qui dépendent aussi très étroitement de ce facteur.

La température intervient directement, en agissant sur la vitesse des réactions biochimiques. Il faut élever la température pour stimuler la germination mais à condition qu'il n'y a est pas de d'autres facteurs limitants en particulier l'O₂. En effet, indirectement la température joue un grand rôle dans la germination en agissant sur la solubilité de l'O₂ dans l'embryon.

La gamme de températures compatibles avec la germination, varie d'une espèce à l'autre. Elle peut être étroite ou au contraire très large ; espèce des climats tempérés (températures basses = 0°C), espèces tropicales (températures élevées).

En fait, il est très difficile pour une espèce donnée, de préciser les températures cardinales (Minimale, Optimale, Maximale) car elles varient avec la variété, le lieu d'origine, les conditions de développement

e. La lumière : L'action de la lumière peut être soit nécessaire, soit défavorable à la germination selon la photosensibilité* des espèces. On trouve plusieurs types de photosensibilité :

Photosensibilité positive : elle est présente chez 70% des semences, c'est un besoin de lumière.

Photosensibilité négative : c'est un cas rare que l'on trouve chez les liliacées.

Photosensibilité facultative : on retrouve ce cas chez la majorité des plantes cultivées.

f. La maturité : toutes les parties constitutives de la semence : enveloppes séminales (téguments + péricarpe) et amande (tissus de réserve + embryon), soient complètement différenciées morphologiquement. Cependant, la maturité ne confère pas forcément le pouvoir de germer, car la graine peut être dormante.

g. La longévité : varie considérablement selon les espèces. Une longévité a un grand intérêt biologique en particulier dans les régions ou zones arides où les conditions favorables à la germination (Humidité surtout) ne se rencontrent pas chaque année.

Chapitre 2 : Croissance et Floraison

I. La croissance

1. Définition de la croissance

La croissance est l'augmentation continue de toutes les dimensions de la plante : longueur, largeur, diamètre, surface, volume et masse. La croissance d'une plante entière (ou d'un couvert végétal) fait intervenir en fait deux phénomènes :

- la croissance au sens strict, en dimension de chacun des organes après leur initiation
- la multiplication du nombre de ces organes : c'est le développement.

1.1. La mérése

C'est une prolifération cellulaire qui consiste en une succession de divisions cellulaires ou mitoses, qui s'opèrent dans des régions localisées : les méristèmes (à l'exception des feuilles où elles se répartissent sur toute la surfaces du limbe).

1.2. L'auxèse

C'est une augmentation des dimensions des cellules. Elle peut être : isodiamétrique : précise une croissance à diamètres égaux quelque soit la forme (circulaire, carrée ou rectangulaire), exemple du parenchyme de la feuille, de l'écorce ou des organes de réserve. Elle peut être aussi longitudinale (élongation) : cas le plus général, ou radiale : croissance en épaisseur.

1.3. La différenciation

C'est le processus qui permet aux cellules d'acquérir des caractères morphologiques particuliers, différents suivant les tissus et sur l'acquisition de potentialités physiologiques nouvelles telles que le virages floral (la mise à fleur).

On peut assimiler ce phénomène de différenciation à la morphogenèse qui est l'élaboration de nouvelles structures au niveau des tissus, c'est l'Histogenèse , ou au niveau des organes , c'est l'Organogenèse qui comprend la *Rhizogenèse* (Racines) et la *Caulogenèse* (Tiges).

2. Croissance primaire : Les Méristèmes Primaires

Le méristème est un tissu végétal composé d'un groupe de cellules indifférenciées, à activité mitotique importante, responsables de la croissance en longueur indéfinie de la plante.

Les méristèmes primaires apparaissent en premier au cours de l'embryogenèse, et donnent les tissus primaires.

Les cellules des méristèmes primaires se localisent sur l'extrémité des tiges et des racines sont petites, isodiamétriques, le noyau est sphérique, volumineux, très riche en chromatine, les vacuoles sont nombreuses et très petites et des plastes non différenciés, proplast.

2.1. Le méristème caulinaire

Le méristème caulinaire (de la tige) est responsable de l'édification de la partie aérienne en donnant **les tiges, les feuilles, les bourgeons axillaires et les bourgeons floraux**, il est donc **histogène** et **organogène**.

La section centrale du méristème caulinaire révèle l'existence de trois régions : **Une zone axiale**, qui l'épiderme et les tissus centraux de la tige et des feuilles, **une zone latérale** correspond à l'apparition d'une feuille et **un méristème médullaire** à l'origine de la moelle centrale.

2.2. Le méristème racinaire

Il élabore les tissus de la racine et la coiffe: il est **uniquement histogène**. Il ne produit pas d'organes latéraux et n'est donc pas organogène.

Les racines latérales se forment de manière endogène à quelque distance de l'apex à partir du **péricycle**. Le péricycle initie les ramifications de la racine. La structure et le fonctionnement des ramifications sont identiques à celui du méristème apical de la racine.

3. La croissance secondaire : Les méristèmes secondaires

Les méristèmes secondaires sont à l'origine des tissus secondaires, apparaissant plus tard à maturité, ils sont constitués d'assises génératrices sous forme d'anneaux formés de cellules capables de se diviser rapidement, ces cellules diffèrent des cellules du méristème primaire par la forme (rectangulaire), et le contenu cellulaire ; une vacuole centrale et un noyau qui occupe une position latérale.

Les méristèmes secondaires permettent **une croissance en épaisseur** autour de la tige et des racines des Angiospermes **Dicotylédones**, les Monocotylédones n'en possèdent pas.

3.1. La zone génératrice libéro-ligneuse, ou cambium, se localise entre le xylème et le phloème, il est responsable de la formation des **tissus conducteurs secondaires**, il présente une activité mitotique orientée dans le sens radial responsable de la formation du xylème secondaire (**le bois**) vers **l'intérieur** et du phloème secondaire (**le liber**) vers **l'extérieur**

3.2. La zone génératrice subéro-phéllodermique, ou phellogène, responsable de la formation des **tissus protecteurs secondaires**, il se trouve dans l'écorce, il est responsable de l'apparition du liège (**suber**) vers l'extérieur et du **pheloderme** vers **l'intérieur**.

4. Les hormones de croissances

Définition : Composé organique qui, synthétisé dans une partie de la plante et transporté dans une autre partie, cause une réponse physiologique, à de très faibles concentrations.

Il existe cinq groupes d'hormones naturelles : – Les auxines, – Les gibbérellines, – Les cytokinines, – L'acide abscissique, – L'éthylène.

• Les auxines

- activent l'élongation des coléoptiles et des tiges, favorisent le phototropisme et le géotropisme,
- jouent un rôle important dans l'initiation et la formation de la racine principale, des racines latérales et des racines adventives ,

La production des auxines est inhibée par la déficience en zinc et en phosphore

• Les cytokinines

- jouent un rôle important dans la germination, favorisent la division, activent l'initiation des feuilles, des tiges,
 - favorisent l'extension des feuilles et des cotylédons ainsi que le transport des nutriments.
 - inhibent la sénescence des feuilles et permettent la levée de la dormance des graines
- le stress hydrique, les hautes températures et les conditions d'hydromorphie inhibent la production des cytokinines dans les racines et leur transport vers les parties aériennes.

• Les gibbérellines

- activent la germination des semences, l'élongation des tiges, l'expansion des feuilles, la floraison des plantes de jours longs et la croissance des fruits, lèvent la dormance des semences et la dominance apicale.
- inhibent la sénescence des feuilles et la maturation des fruits l'excès d'eau et par l'effet des jours courts inhibent la production des gibbérellines

Les Hormones de stress

• L'éthylène

- Favorise la maturation des fruits, la sénescence des feuilles et la chute des organes
- inhibe la division cellulaire ainsi que le géotropisme des tiges et des racines.

La production de l'éthylène est stimulée par la maturation des fruits, la sénescence des feuilles et des fleurs, le stress hydrique. Elle est inhibée par la lumière et par des conditions d'anaérobiose.

• L'acide abscissique

- favorise la fermeture des stomates, la sénescence des feuilles, la dormance des bourgeons, et la formation des tubercules et des racines adventives,
- inhibe la germination des semences, la croissance des bourgeons axillaires, l'élongation des tiges et des racines, et l'initiation florale.

Le stress hydrique, l'excès d'eau, la déficience en éléments minéraux et la salinité augmentent la production de l'acide abscissique.

II. La floraison

La floraison désigne le **développement du bourgeon floral** puis l'épanouissement de la fleur ou d'une inflorescence et donner un fruit

Les périodes de floraison sont variables d'une espèce à l'autre. Il existe des floraisons sur les 4 saisons, dont la durée varie également. L'induction florale, c'est-à-dire le fait qu'un bourgeon foliaire devienne un bourgeon floral, ceci dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels la zone géographique, le climat, la luminosité, la température ou encore la richesse du sol.

Il existe des plantes :

- **bisannuelles** : qui fleurissent une année sur deux (primevère, cyclamen, etc.) ;
- **annuelles** : qui donnent une floraison puis meurent (œillet d'inde, cosmos, etc.) ;
- **vivaces ou pluriannuelles** : qui fleurissent chaque année.

La floraison a plusieurs rôles dont celui d'amener des insectes butineurs à la plante, mais elle présente par la suite la fructification. Sans la première étape, il ne pourrait y avoir de fruits qui renferment la ou les graines et donc assurer la descendance du végétal. Ainsi la floraison permet la **reproduction de la flore** en général.

Chapitre 3 : Nutrition hydrique

Introduction

Tout comme l'organisme humain, la plante a besoin d'eau pour vivre. L'eau est indispensable à la formation de la sève et participe ainsi aux phénomènes de circulation et donc à l'apport de nutriments aux différents organes de la plante ; elle participe également à des phénomènes de régulations tel que la transpiration.

I. L'eau dans le sol

Il est essentiel de faire la distinction entre la quantité de l'eau dans un sol et sa disponibilité dans celui-ci. En effet, l'eau a une certaine mobilité dans le sol due à la gravité d'une part, et à différentes forces d'autre part :

- **Des forces osmotiques**, qui sont générées par les ions présents dans le sol, retenant l'eau dans le sol.
- **Des forces capillaires**, qui sont générées par la tension superficielle existant entre l'eau et les interstices laissées libres dans le sol.
- **Des forces colloïdales**, qui sont dues à la propriété des substances colloïdales à gonfler en présence d'eau. Ces forces sont d'autant plus grandes que le sol est riche en argile.

(Les colloïdes sont des macromolécules organiques ou minérales qui, placées dans l'eau, ne forment pas une solution, mais forment une suspension colloïdale).

1. Le potentiel hydrique

Le potentiel hydrique permet de déterminer le sens des échanges hydriques entre :

- différentes parties de la plante (organes, cellules...).
- le sol et la plante.
- la plante et l'atmosphère.

En effet l'eau circule toujours des potentiels hydriques les plus élevés vers les potentiels hydriques les plus bas

Le potentiel hydrique d'un sol est l'énergie qu'il faut appliquer au sol pour libérer 1g d'eau. Ce potentiel est toujours négatif, et est d'autant plus bas que la liaison entre l'eau et le sol est forte. On note que le mouvement de l'eau va du potentiel le plus haut au potentiel le plus bas, et donc de la zone retenant le moins d'eau (la plus hydratée), à la zone retenant le plus d'eau (la moins hydratée).

Quand le sol se dessèche on observe donc une diminution du potentiel hydrique, devenant ainsi plus négatif.

2. La capacité de rétention

C'est la quantité d'eau (en gramme), contenue dans 100g de sol après centrifugation ou après drainage.

3. Le point de flétrissement

Le point de flétrissement permanent est le taux d'humidité d'un sol, pour lequel, une plante flétrie irréversiblement (sable 5%, limon 12%, argile 27%, tourbe 50%).

4. Réserve utilisable

La réserve utilisable est la mesure de la quantité d'eau utilisable par la plante. C'est la différence entre la capacité de rétention et le point de flétrissement initial. Cette réserve représente généralement la moitié de la capacité de rétention. Un sol léger aura besoin d'un arrosage fréquent alors qu'un sol lourd n'en aura pas besoin.

II. L'eau dans la plante

1. La teneur en eau des végétaux

L'eau est stockée dans la vacuole qui sert de réservoir d'eau aux plantes. Le xylème et le phloème sont les vaisseaux qui conduisent les deux sèves. Le xylème est un ensemble de tissus morts, où circule la sève brute (eau + sels minéraux). Le phloème est composé de tissus vivants où circule la sève élaborée (eau + sels minéraux + substances organiques).

$$\theta = \% \text{eau} = [(MF - MS)/MF] * 100 ; MS = \text{Matière Sèche} ; MF = \text{Matière Fraîche}$$

La teneur en eau diminue avec l'âge de la plante, dans les graines, on trouve entre 5 et 10% d'eau.

2. les formes de l'eau dans la plante

Elle peut être en solution (dans les vacuoles ou les sèves), sous forme de vapeur (dans les méats, dans la chambre sous-stomatique).

Dans le milieu réactionnel de la cellule, l'eau est le solvant des molécules organiques. Cette eau sert de véhicule aux aliments et permet donc la circulation des constituants de la sève.

2.1. L'eau liée

C'est l'eau immobilisée dans la cellule par des liaisons hydrogènes autour des groupements alcooliques, aminés ou carboxyliques.

2.2. L'eau libre

S'opposant à la précédente, c'est l'eau d'imbibition générale, facilement circulante ou stagnante dans les vacuoles.

2.3. L'eau de constitution

C'est l'eau qui stabilise la structure de certaines macromolécules et ne peut être enlevée de ces protéines sans en entraîner la dénaturation.

III. Absorption, transport et émission de l'eau

1. Absorption de l'eau

En un jour, la plante absorbe un volume d'eau équivalent à sa masse. Les plantes supérieures absorbent l'eau par leurs poils absorbant (fixés sur les racines).

Quelle que soit la structure considérée, l'absorption d'eau se fait toujours à travers une paroi cellulaire. Pour expliquer ces mécanismes, il faut se rappeler que les échanges d'eau entre le milieu intra-cellulaire et le milieu extra-cellulaire se font à travers la membrane cytoplasmique conformément aux lois physiques de la diffusion : l'**osmose** (qui est un transport passif) s'effectue toujours du milieu hypotonique vers le milieu hypertonique.

La **pression osmotique** est une force déterminée par une différence de concentration entre deux solutions situées de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. L'osmose et les forces osmotiques favorisent la diffusion des substances à travers la membrane, en milieu interne, le solvant passant de la solution la moins concentrée vers la plus concentrée. La pression osmotique détermine le flux d'eau est proportionnelle à la différence de concentration entre les deux milieux.

Ainsi une cellule placée dans une solution hypertonique par rapport au milieu intra-cellulaire perd de l'eau et devient **plasmolysée**. En revanche, si elle est placée dans un milieu extra-cellulaire hypotonique par rapport au milieu intra-cellulaire, de l'eau pénètre dans la cellule, la vacuole gonfle : la cellule est alors **turgescence**

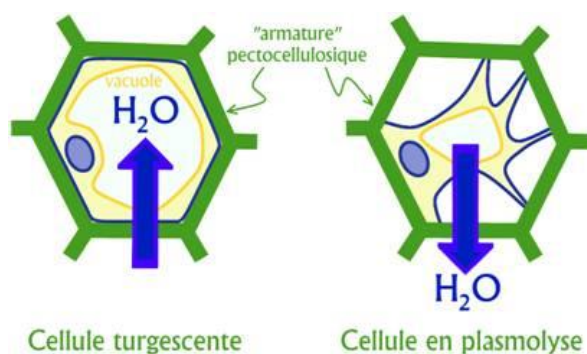


Figure 03 : L'eau dans la cellule

Remarque

Dans les conditions naturelles, la cellule du poil absorbant (ou celle du mycélium des mycorhizes) est toujours hypertonique par rapport à la solution du sol : elle absorbe donc l'eau **passivement** par osmose.

Une plante, arrosée avec une solution trop concentrée en sels minéraux, se fane et meurt car, non seulement les cellules des racines n'absorbent plus d'eau, mais elles en perdent ce qui entraîne leur plasmolyse.

2. Le transport de l'eau

L'eau et les sels minéraux sont transportés par les poils absorbants jusqu'à l'endoderme. Le cheminement se fait par la loi de l'osmose. Il y a déplacement par voie apoplastique (à travers la paroi) et symplastique (à travers les vacuoles et le cytoplasme).

Au niveau de l'endoderme, la couche cellulaire subérifiée (bandes de Caspary) oblige un passage par voie symplastique.

L'atmosphère a un potentiel hydrique très négatif et soutire en permanence l'eau de la plante, créant ainsi un flux transpiratoire.

Dès que l'eau arrive aux éléments conducteurs du xylème, elle monte à travers la racine et la tige jusque dans les feuilles, d'où la plus grande partie se perd dans l'atmosphère par transpiration ; on peut donc considérer la voie sol-plante-atmosphère comme un continuum servant au déplacement de l'eau.

Pour traverser la racine, l'eau peut suivre au moins l'une des trois voies suivantes :

- apoplastique** : passe par les parois cellulaires
- symplastique** : l'eau passe de protoplaste en protoplaste par les plasmodesmes
- transcellulaire** : l'eau va de cellule en cellule, en passant par les vacuoles.

Protoplaste : Cellule végétale débarrassée de sa paroi cellulosique externe.

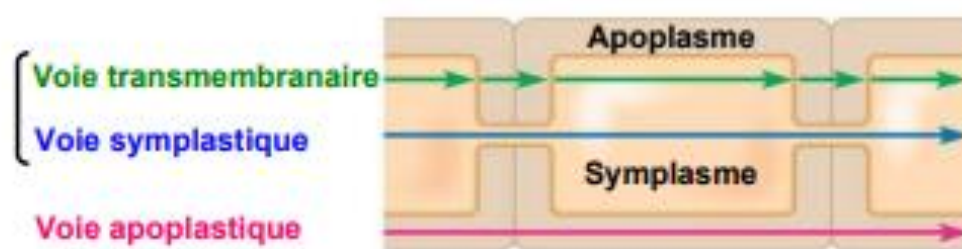


Figure 04 : Les trois voies du passage de l'eau

3. Emission d'eau par la plante (LA TRANSPIRATION)

3.1. Le mécanisme de la transpiration

Moins de 5% de l'eau absorbée par les plantes, est réellement utilisée pour la croissance, et une quantité encore moindre est utilisée dans les réactions biochimiques; l'équilibre hydrique de la plante passe par une perte de vapeur d'eau, un phénomène nommée transpiration.

La plus grande partie de l'eau (plus de 90%) s'échappe par les feuilles. En effet le mécanisme de la transpiration est étroitement lié à l'anatomie de la feuille;

La transpiration peut être considérée comme un mécanisme comprenant deux phases T1 l'évaporation de l'eau des parois cellulaires humides dans la chambre sous stomatique et T2 la diffusion de la vapeur d'eau des espaces sous-stomatique dans l'atmosphère;

La diffusion de la vapeur d'eau de l'espace sous-stomatique dans l'atmosphère est un phénomène relativement simple; une fois qu'elle a quitté la surface des cellules, la vapeur d'eau diffuse dans la chambre sous-stomatique et s'échappe des feuilles par les pores stomatiques (ostioles).

Afin de maintenir la turgescence des parties feuillées ainsi que les activités biochimiques à un niveau compatible avec la survie, l'eau perdue par les plantes au cours de la transpiration doit être continuellement remplacée.

L'absorption d'eau par les racines peut s'effectuer parce qu'il existe un gradient de potentiel entre le sol et la racine. Par conséquent lorsque le sol s'assèche, le potentiel hydrique diminue et les plantes peuvent rencontrer des difficultés pour prélever l'eau suffisamment vite afin de compenser les pertes liées à la transpiration. Dans ces conditions, les plantes vont perdre leur turgescence et se flétrir. Si la transpiration est réduite ou empêchée pendant un certain temps (comme par exemple la nuit ou par la mise sous un sac en plastique), l'absorption d'eau peut reprendre, la turgescence peut être rétablie et les plantes retrouver leur port initial.

3.2. Les facteurs influençant la transpiration

➤ Facteurs structuraux

Surface et épaisseur des feuilles : Une feuille plus petite transpirera moins vite qu'une feuille plus grande, car il y a moins de pores disponibles pour la perte d'eau. L'épiderme de la plupart des végétaux terrestres est recouvert d'une cuticule. Cet atout apporte une protection imperméabilisante qui prévient de l'assèchement. Plus la cuticule est épaisse plus la transpiration sera faible.

Nombre de stomates : L'eau de la transpiration étant évacuée par les stomates est proportionnelle au nombre de pores des stomates. Plus il y en a, plus la transpiration sera forte.

Nombre de feuilles : Un nombre de feuilles, ou autres organes photosynthétiques, plus grand augmente aussi le nombre de stomates disponibles pour la transpiration. Il y aura donc plus d'échanges gazeux avec le milieu externe.

➤ Facteurs externes

Disponibilité de l'eau : Quand l'humidité du sol passe en dessous d'un seuil normal (entre -1,0 MPa et -4,0 MPa) pour la plante, les stomates se fermeront jusqu'à ce que la condition s'améliore et la transpiration sera ainsi réduite.

Humidité relative : La diminution de l'humidité relative, rendant l'air plus sec, abaisse considérablement le gradient potentiel hydrique atmosphérique ce qui contribue à augmenter la transpiration. La plus grande différence entre le potentiel hydrique interne des feuilles et externe encourage l'eau à quitter celles-ci.

Vent : Le vent défait la couche limite qui sert à protéger la surface des feuilles et augmente donc le dessèchement. Le changement d'air autour de la plante plus fréquent favorise l'évaporation de l'eau. Puis, la différence de potentiels hydriques entre les milieux, interne et externe, est augmentée, ce qui accroît alors tout de suite la transpiration, cherchant le renouvellement de sa couche limite.

Luminosité : Comme la plupart des plantes ouvrent leurs stomates durant le jour pour faire de la photosynthèse, à l'exception des plantes de la famille CAM, la vitesse de transpiration augmente avec l'intensité de la lumière laissant l'eau s'évaporer par les pores des feuilles. La transpiration est donc plus élevée le jour et diminue fortement durant la nuit.

Température : La température encourage l'ouverture des stomates pour permettre l'évaporation de l'eau cellulaire. Plus il fait chaud, plus les stomates s'ouvriront et donc, plus il y aura de transpiration. Ceci se produit jusqu'à ce que la température atteigne un certain seuil, de 25 à 30 °C. À ce seuil, les stomates commenceront à se refermer et ainsi à abaisser la transpiration pour éviter le dessèchement.

4. Les stomates

4.1. Structure des stomates

Ce sont des cellules particulières situées dans les feuilles. Elles ont une forme réniforme et sont constituées de deux cellules de gardes (qui contiennent des chloroplastes) et un vide entre les deux qu'on appelle ostiole.

L'ostiole est l'ouverture des stomates par lequel les gaz circulent et l'eau passe

Souvent, on observe la présence d'une chambre sous-stomatique.

Remarque : chez les monocotylédones, les stomates se trouvent sur les 2 faces de façon égale alors que chez les dicotylédones le nombre de stomates est plus élevé dans la face inférieure.

4.2. Mécanismes d'ouverture des stomates

La transpiration stomatique varie suivant l'ouverture et à la fermeture des stomates, liées aux différences de pressions osmotiques dans les cellules de garde. Les cellules de garde (donc les stomates) s'ouvrent ou se ferment selon les forces osmotiques qui correspondent aux variations de la concentration de potassium intracellulaire. Par augmentation des concentrations potassiques il y a formation d'un milieu hypertonique qui entraîne une turgescence des cellules de gardes, et ainsi une ouverture des stomates.

Les cellules de garde ont des parois renforcées du côté interne qui délimite l'ostiole, et sont souvent accompagnées de cellules épidermiques, dépourvues de chloroplastes, avec lesquelles elles sont intimement en contact par leur face externe, permettant des échanges intercellulaire plus important.

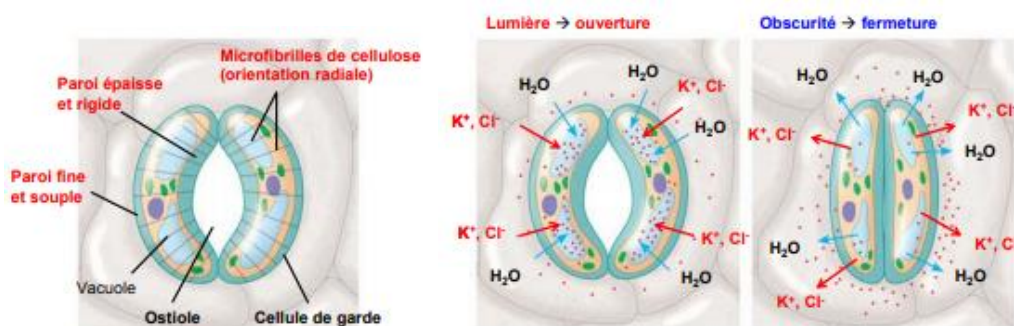


Figure 05 : Structure et Mécanisme d'ouverture des stomates

IV. Réponses adaptatives des plantes face à la sécheresse

Les plantes s'adaptent à la sécheresse de différentes manières :

- Développement du système racinaire en surface (ramification) et/ou en profondeur
- Diminution de la surface foliaire par la perte des feuilles avant la saison sèche ou des feuilles très réduites/inexistantes (Cactées)
- Protection des stomates par la présence de poils ou de la cuticule sur la surface foliaire
- Constitution de réserves d'eau par les parenchymes aquifères ou par le stockage de l'eau dans de grandes vacuoles

Chapitre 4 : La Nutrition Minérale

Introduction

Les racines des plantes puisent dans le sol des minéraux indispensables à leur croissance et à leur développement. Du point de vue quantitatif, on distingue les macronutriments qui comprennent les minéraux consommés en grande quantité, tandis que les micronutriments comprennent des minéraux consommés en quantité de l'ordre du microgramme.

Macro-éléments	Azote	N	100 - 300 kg/ha
	Potassium	K	100 - 400 kg/ha
	Calcium	Ca	40 - 200 kg/ha
	Phosphore	P	20 - 50 kg/ha
	Soufre	S	10 - 40 kg/ha
	Magnésium	Mg	10 - 30 kg/ha
Micro-éléments	Fer	Fe	1000 - 2000 g/ha
	Manganèse	Mn	150 - 700 g/ha
	Zinc	Zn	100 - 300 g/ha
	Bore	B	80 - 200 g/ha
	Cuivre	Cu	25 - 100 g/ha
	Molybdène	Mo	5 - 20 g/ha

Figure 06 : Besoins en macro et microéléments pour diverses cultures annuelles

I. Les macronutriments ou macroéléments

Ce groupe est constitué des minéraux les plus abondants dans les cellules végétales. Au nombre de ces minéraux, on retrouve : l'azote, le potassium, le phosphore, le calcium, le magnésium et le soufre.

1. L'azote

L'azote est le principal constituant des molécules essentielles à la construction des cellules végétales. Les acides nucléiques (ARN, ADN), les acides aminés, les nucléotides, les coenzymes et la chlorophylle ont besoin d'azote pour se former. Le taux de protéines des fruits est intimement lié à l'abondance d'azote dans le sol.

Une carence en azote se traduit par un jaunissement résultant d'une faible synthèse de chlorophylle. On assiste à une fructification précoce et à une chute brutale du rendement.

L'excès d'humidité est une des causes principales de la disparition de l'azote.

Pour **éviter** les lessivages et enrichir le sol en azote, aérez le sol, reformez la couche d'humus (grande source d'azote), cultivez des engrais verts

2. Le potassium

Cet élément nutritif intervient dans l'ouverture des stomates. Le potassium permet la circulation des sels minéraux dans les tissus végétaux par le phénomène de l'osmose. De ce fait, il contribue à l'équilibre ionique au niveau des cellules. Il sert également d'activateur à un certain nombre d'enzymes. Le phosphore réduit la transpiration des plantes et leur confère une plus grande résistance à la sécheresse. Le potassium intervient dans le renforcement des parois des cellules végétales.

Une carence en potassium se traduit par un désordre physiologique et une plus grande susceptibilité des plantes à la verse et aux maladies.

Les plantes deviennent peu développées, le port est mou, la bordure des feuilles varie du jaune au brun, le limbe se couvre de taches brunes. Chez les fruitiers, les feuilles les plus anciennes se crispent.

Pour enrichir le sol en potasse, effectuez des apports de matière organique, comme le compost (en se décomposant, elle libère du potassium disponible)

3. Le phosphore

Le phosphore est présent dans de nombreuses molécules indispensables à la vie. On le retrouve dans les acides nucléiques, les chloroplastes et les protéines du noyau. Il est présent dans les molécules énergétiques que sont l'ATP (adénosine triphosphate) et l'ADP (adénosine diphosphate). Le phosphore a donc un rôle énergétique, plastique et génétique au niveau des cellules végétales. En association avec l'azote, il contribue à la croissance des végétaux. Il joue un rôle essentiel dans la qualité des produits végétaux, dans le développement racinaire, la précocité et la rigidité des tissus.

Les signes visibles de carence : la plante reste petite et raide. La pointe des feuilles se colore (vert foncé à pourpre), la floraison est retardée voire nulle, et les fruits sont rares, de petit calibre et acides.

Les milieux acides et alcalins rendent difficiles l'assimilation du phosphore par les plantes. Le froid et l'humidité sont également des facteurs aggravants. Effectuez des amendements humiques (compost, fumier, engrais verts, paillis...); cela permet de corriger le pH, de pourvoir le sol en phosphore assimilable et d'alléger (pour un meilleur développement des racines) et drainer le sol.

4. Le calcium

Le calcium joue un rôle primordial au niveau des parois cellulaires. En cimentant les parois cellulaires, les unes aux autres, le calcium assure leur cohésion. Il intervient dans la perméabilité de la membrane en facilitant le transport de certaines substances et en bloquant celui d'autres substances. Le fonctionnement de certaines enzymes telles que la calmoduline nécessite la présence de calcium. Le calcium intervient également dans l'élongation des racines.

Une carence en calcium se manifeste tout d'abord sur les grandes feuilles les plus âgées. La carence en calcium se reconnaît à l'apparition de taches brunes/ jaunâtres souvent entourées d'un bord brun prononcé, et c'est la croissance qui est inhibée.

Des fertilisants calciques peuvent être appliqués durant la semence, ou sur l'appareil foliaire pour corriger ce manque.

5. Le magnésium

Le magnésium joue un rôle important dans la photosynthèse car il est l'atome central de la chlorophylle. Le magnésium est l'activateur de nombreuses enzymes dont deux enzymes critiques à savoir la ribulobiphosphate carboxylase (RuBisCO) et la phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC).

Une carence en magnésium se traduit généralement par une chlorose des nervures principales des feuilles âgées. Les plantes souffrant d'une carence en magnésium sont victimes d'une maturité précoce.

Il est cependant recommandé de fertiliser avant une croissance active de la plante, pour assurer un bon développement de la chlorophylle, et ainsi ne pas pénaliser la photosynthèse.

6. Le soufre

Le soufre est un élément constitutif des acides aminés que sont la cystine, la cystéine et la méthionine. Chez les légumineuses, le soufre intervient dans la formation des nodules nécessaire à la fixation de l'azote atmosphérique. Le soufre permet aux plantes de résister aux pathologies. Il intervient dans la croissance des végétaux et dans la formation des fruits. En cas de carence en soufre, les feuilles des plantes prennent une couleur vert-pâle.

II. Les micronutriments ou oligoéléments

Quoique présents en faible quantités, les micronutriments ou oligo-nutriments n'en demeurent pas moins indispensables. A leur nombre, on retrouve : le chlore, le cuivre, le bore, le molybdène, le fer, le manganèse, le zinc et le nickel.

1. Le fer

Le fer est indispensable pour la production de la chlorophylle. Il est l'élément indispensable à la production des cytochromes (pigments) et de la nitrogénase (enzyme). Il est rare que les sols soient déficients en fer. Mais cet élément peut être indisponible pour les plantes si le pH n'est pas compris entre 5 et 6,5.

Une carence en fer se traduit par une chlorose ou un brunissement du pétiole des feuilles, alors que les nervures demeurent vertes.

Les excès de calcium, de phosphore et de cuivre sont également des facteurs bloquants, de même que l'humidité et le froid.

Il existe des solutions « anti chlorose » à pulvériser sur les feuilles, directement assimilables par les plantes. Pour corriger les conditions de culture responsables des éventuels blocages, drainez votre sol et couvrez-le d'un paillis végétal

2. Le zinc

De nombreuses enzymes végétales incluent dans leur composition des atomes de zinc. Le zinc est également l'activateur de nombreuses enzymes. Cet oligoélément intervient dans la synthèse de la chlorophylle. Une carence en zinc se manifeste généralement par une chlorose et un retard de croissance.

3. Le bore

Cet oligoélément intervient dans le transport des hydrates de carbone produits lors de la photosynthèse. Il joue également un rôle dans la régulation des processus métaboliques. L'utilisation de calcium, de même que la synthèse des acides nucléiques, requière la présence de bore. Le bore assure l'intégrité de la membrane plasmique.

4. Le cuivre

Le cuivre est l'activateur et le constituant des enzymes liées aux réactions d'oxydoréductions dans les cellules végétales. Le brunissement des pointes des feuilles et la chlorose sont généralement les symptômes d'une carence en cuivre.

5. Le nickel

Ce minéral est le constituant essentiel d'enzymes jouant un rôle clé dans l'organisme. Au nombre de ces enzymes, on retrouve les enzymes impliquée dans l'absorption de l'azote. Les plantes souffrant d'une carence en azote présentent des nécroses sur les pointes de leurs feuilles.

6. Le molybdène

Cet élément intervient dans la métabolisation de l'azote et la réduction des nitrates. Les plants n'ont besoin que de quantités infimes de molybdènes (moins de 50 grammes par hectare). Les carences en molybdènes ne s'observent généralement que sur des sols très acides. La chute des vieilles feuilles associée à un retard de croissance est un symptôme de carence en molybdène.

7. Le chlore

Le chlore est nécessaire à l'osmose et à l'équilibre ionique au niveau des cellules végétales. Il joue également un rôle dans les processus photosynthétiques. Des taches nécrotiques blanches sur les bordures des feuilles peuvent témoigner d'une carence en chlore.

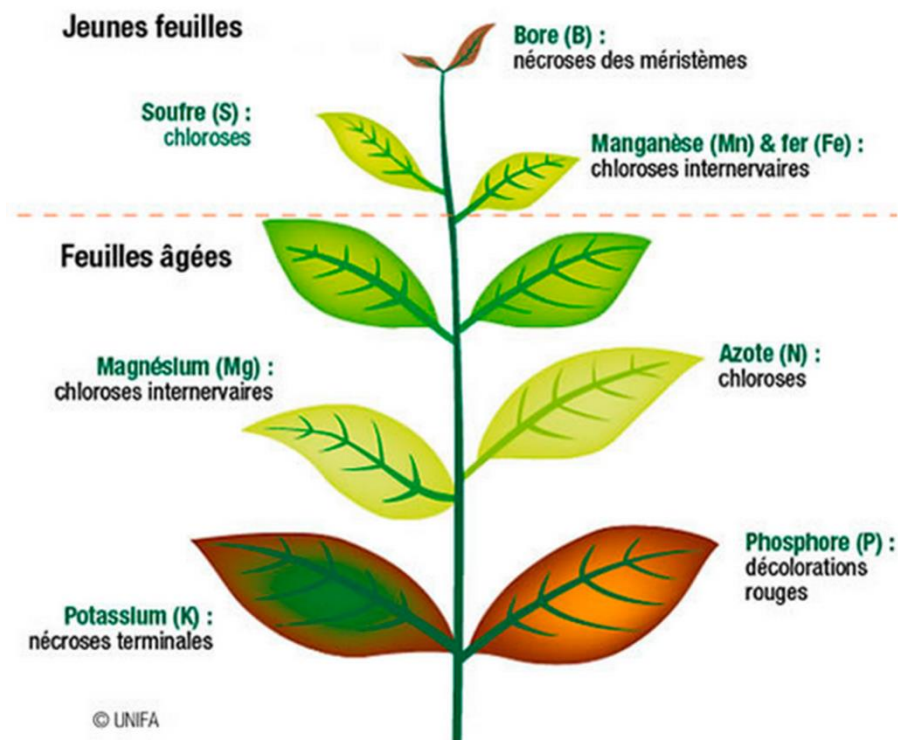


Figure 07 : Les différentes carences des minéraux chez les plantes

III. Circulation des minéraux dans la plante

1. L'absorption des minéraux

L'absorption des minéraux par les racines est un processus dynamique. Les éléments minéraux dissous dans la solution aqueuse du sol pénètrent dans la plante par les racines sous la forme d'ions. Chaque espèce végétale a des besoins précis en ions, liés à son métabolisme propre et possède des résistances variées aux éléments toxiques. La plante développe des mécanismes particuliers de transport d'ions, réglant ainsi les quantités absorbées selon ses besoins.

Un ion peut être trop abondant par rapport aux besoins de la plante, par exemple l'aluminium (Al) dans les sols acides, le sodium (Na) dans les sols salés, et le calcium (Ca) en sol calcaire. Inversement, un ion peut être déficitaire, par exemple un sol carencé en phosphore dans les andosols.

Les cellules n'absorbent pas indifféremment les ions. Il existe une perméabilité sélective (le Na pénètre très mal dans la cellule. A l'opposé, le K se trouve à des concentrations plus élevées à l'intérieur qu'à l'extérieur (accumulation).

Les cations présentent une vitesse de franchissement des membranes plus grande que celle des anions.

L'absorption des éléments nutritifs par le système racinaire est sélective. Elle met en jeu plus de 400 protéines localisées sur les parois des cellules de l'épiderme, de l'endoderme et des vaisseaux qui règlent les transports de l'eau et des ions depuis le sol vers le xylème

2. Les étapes de l'absorption

2.1. L'adsorption, étape de fixation superficielle des ions sur les racines, passive et réversible pendant laquelle, l'élément adsorbé peut être désorbé.

Adsorption (du latin *ad* =vers, *sorbere*=aspire, c'est l'adhérence d'un liquide, d'un gaz ou d'une substance dissoute à un solide, augmentant la concentration de cette substance)

2.2. L'absorption (au sens strict) qui suit la première étape et peut être active ou passive, selon les ions. Les éléments minéraux doivent être solubles dans l'eau afin d'être assimilé par la plante.

3. Le transport des minéraux dans la plante

La sève brute est caractérisée par une concentration importante en sels minéraux et par un déplacement des racines aux feuilles dans le xylème (bois) ; la sève élaborée, quant à elle, est caractérisée par une concentration importante en sucres et en acides aminés, et par un déplacement descendant ou latéral (vers les autres organes de la plantes) dans le phloème (liber).

La sève brute circule dans l'organisme végétal grâce à un tissu conducteur, le xylème , uniquement dans le sens ascendant, c'est-à-dire de la racine à la feuille, à une vitesse ~ 15m/h. La plus grande partie de la sève brute s'évapore au niveau des feuilles.

Le passage d'eau et de nutriments entre les cellules se fait par les plasmodesmes, par les pompes à protons, ou par des symporteurs (ex : transporteur symport du saccharose activé par une pompe à proton).

Trois forces contribuent à faire monter l'eau: la capillarité, la pression racinaire et l'aspiration foliaire

3.1. La capillarité

- Due à la cohésion (force d'union) des molécules d'eau entre elles et avec la paroi des vaisseaux conducteurs.
- La montée inversement proportionnelle au diamètre des tubes du xylème.

3.2. La pression racinaire

L'eau se déplace vers la stèle et pénètre dans le xylème par osmose = pression racinaire.

La pression racinaire peut entraîner dans certains cas la **guttation**, quand l'eau perle le matin au niveau des feuilles des petites plantes.

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.

(Ce phénomène ne doit pas être confondu avec la **rosée** qui provient de la condensation de l'eau atmosphérique sur la plante)

3.3. 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.

L'aspiration foliaire est plus importante (plus forte) que la poussée racinaire

Tableau des besoins des plantes en minéraux

<i>Éléments</i>	<i>Symboles chimiques</i>	<i>Fonctions</i>	<i>Signes de carence</i>	<i>Signes d'un excès</i>
Macro-éléments				
Azote	N	Constituant de la chlorophylle, vitamines, ADN, etc.	Les plantes deviennent vert pâle, les feuilles âgées jaunissent	Croissance exagérée
Potassium	K	Maintient de l'organisation cellulaire	Taches brunes sur les feuilles, croissance diminuée	Les feuilles deviennent plus pâles et se couvrent de taches sombres
Calcium	Ca	Croissance et solidité de la membrane cellulaire	Chute prématurée des feuilles et des fleurs	Diminue la solubilité de certains éléments, donc carence
Phosphore	P	Constituant ADN, protéines, enzymes, etc.	Les feuilles deviennent vert sombre ou vert pourpré	Jaunissement et brunissement des extrémités des feuilles, puis chute
Magnésium	Mg	Constituant de la chlorophylle, production d'énergie	Les feuilles s'enroulent et jaunissent	Croissance exagérée des tiges et des racines, diminution de la floraison
Soufre	S	Constituant de plusieurs enzymes	Les jeunes feuilles deviennent jaunes en premier	Les feuilles sont vert bleuâtre et se courbent vers l'intérieur
Oligo-éléments				
Fer	Fe	Formation de la chlorophylle	Jaunissement des Feuilles	Rarement toxique
Chlore	Cl	Intervient dans la photosynthèse	Jaunissement des feuilles de la tomate	Le tabac donne des cendres noirâtres
Manganèse	Mn	Formation de la chlorophylle	Jaunissement des jeunes feuilles, puis chute	Induit une carence en fer, donc jaunissement des feuilles
Bore	B	Important dans la croissance	Maladies physiologiques (ex. : craquelure des branches de céleri, taches brunes sur le chou-fleur)	Jaunissement des côtés de la feuille, puis chute
Zinc	Zn	Active un grand nombre d'enzymes	Croissance irrégulière, feuilles rabougries	Jaunissement des feuilles, mort des bourgeons, les

Chapitre 5 : La Nutrition Carbonée

Introduction

Dans la nature, on trouve le carbone sous deux formes assimilables ; le carbone minéral (CO_2 ou H_2CO_3) et le carbone organique qui se trouve dans les molécules organiques. On trouve deux types de végétaux :

- Ceux qui convertissent le carbone minéral en carbone organique. Ce sont les autotrophes. Ils utilisent l'énergie solaire pendant la photosynthèse grâce à la chlorophylle.
- Ceux qui n'assimilent que le carbone organique. Ce sont les hétérotrophes (c'est le cas des champignons et de quelques plantes parasites).

La photosynthèse et la respiration s'équilibrent globalement.

La photosynthèse par les végétaux alimente continuellement la biosphère en carbone sous forme de glucides. Les quantités de carbone qui passent annuellement de l'atmosphère à la biosphère sont de l'ordre de 500 milliards de tonnes.

La respiration restitue ce carbone sous forme de CO_2 après dégradation des glucides.

1. Photosynthèse ou assimilation chlorophyllienne.

La photosynthèse est un processus physiologique par lequel les végétaux qui contiennent certains pigments (en particulier de la chlorophylle) sont capables de capter l'énergie lumineuse et de la transformer en énergie chimique (ATP et pouvoir réducteur NADPH, H^+) afin de réaliser la nutrition carbonée à partir du CO_2 atmosphérique ... Ce processus est accompagné d'un dégagement de dioxygène.

Les végétaux synthétisent leur matière organique à partir de molécules simples ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) et de l'énergie lumineuse (soleil), le CO_2 et l'eau se combinent (réaction de réduction) pour former des glucides.

La formule générale de la photosynthèse est : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + h\nu$ (énergie lumineuse) -----> $(\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$

La photosynthèse est un phénomène physiologique d'une importance capitale car il est indispensable à toute forme de vie animale et humaine.

Puis, chez tous les organismes, les glucides sont oxydés pour reformer de l'eau et du CO_2 au cours de la respiration. Une partie de l'énergie contenue dans les glucides est transformée en énergie chimique sous la forme d'une molécule : l'ATP.

2. Le chloroplaste

2.1. Localisation et types

Selon les espèces, on a de 10 à 100 chloroplastes par cellule (plus ils sont nombreux, plus ils sont petits). L'ensemble des chloroplastes s'appelle le plastidome.

Les mitochondries et le peroxysoxe participent à la phase d'assimilation. Les chloroplastes sont généralement situés au niveau des feuilles, dans le mésophylle (ensemble de parenchymes palissadiques et lacuneux).

On ne trouve jamais de chloroplastes dans l'épiderme sauf dans les stomates. Ils sont au niveau des pétioles, des tiges herbacées et de certains organes floraux.

Au cours du développement de la plante, des proplastides se différencient en chloroplastes par des voies différentes selon les conditions externes :

- Les chloroplastes matures,
- Les chromoplastes colorés (comme dans les fruits et les fleurs),
- Les leucoplastes où sont stockés des réserves d'amidon, de lipides ou de protéines, ils sont alors respectivement appelés amyloplastides, oléoplastides, ou protéinoplastides.

2.2. Structure

C'est un organite à double membrane, de forme ovoïde, de quelques dizaines de micromètres de long. La membrane externe est relativement perméable et continue, tandis que l'interne est imperméable (une barrière sélective) repliée sur elle-même pour former des sacs (les thylacoïdes) où se trouvent les pigments.

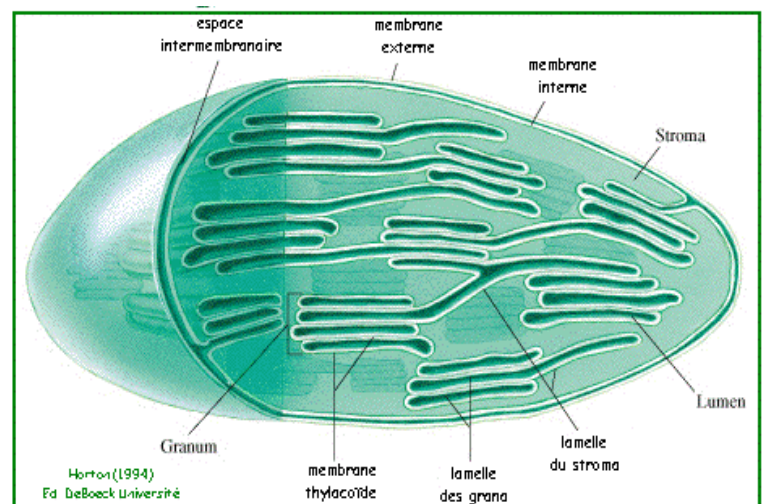
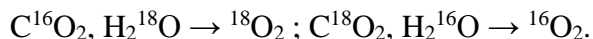


Figure 08 : La structure du chloroplaste

Le chloroplaste est composé de grana et stroma, le grana est un ensemble de granum comprenant chacun plusieurs saccules ou thylacoïdes. Le granum peut être constitué de 2 à 100 disques, sont reliés les uns aux autres par des lamelles stromatiques dont l'ensemble forme un réseau continu. Le stroma contient aussi des ribosomes ainsi que de l'ADN circulaire.

3. Les étapes de la photosynthèse

Il y a deux phases. Une pendant laquelle l'eau est photodissociée (photochimique) et une autre pendant laquelle le CO₂ est incorporé (assimilatrice).



Ce processus est divisé en deux phases, la phase photochimique (ou réactions claires) et la phase biochimique (ou cycle de Calvin).

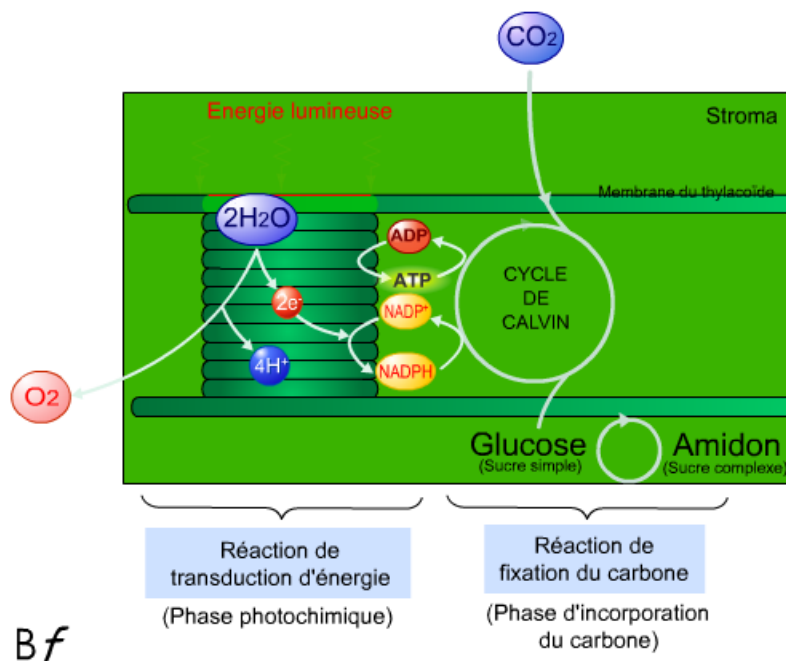


Figure 09 : Les deux étapes de la photosynthèse

3.1. Phase photochimique (claire)

D'abord, les pigments chlorophylliens associés à des protéines forment des photosystèmes qui absorbent et capturent les photons de la lumière. Ensuite, cette énergie lumineuse est convertie en énergie chimique avec la photo-oxydation de l'eau qui s'accompagne d'un transfert d'électrons et de protons jusqu'à un accepteur final et du dioxygène est produit. Enfin, ces réactions d'oxydoréduction sont couplées avec la production d'ATP (adénosine triphosphate) à partir de phosphate inorganique (Pi) et d'une molécule d'ADP (Adénosine di phosphate).

Un photosystème est un ensemble de protéines et de pigments (dont la chlorophylle), il se trouve dans les membranes thylakoïdales d'une plante et sert à absorber les photons de la lumière. Ils en existent deux, qui sont complémentaires et permettent la production de NADPH et d'ATP.

Au niveau du PSII va s'opérer une étape majeure de la photosynthèse : la **photolyse de l'eau**, donc, les électrons sont tout d'abord fournis par l'eau au photosystème II (PSII), puis par la suite ils sont transmis au photosystème I (PSI) pour que la **NADP réductase** réduise le NADP⁺ en NADPH⁺ H

3.2. Phase biochimique (sombre)

Cette phase a lieu en même temps que la phase photochimique, mais ne nécessite pas d'énergie lumineuse. La phase biochimique permet de fixer le carbone contenu dans le CO_2 atmosphérique et le lie aux atomes d'Hydrogène des molécules d'eau. L'enzyme Rubisco est la principale enzyme permettant la fixation du carbone dans la matière organique. Le carbone fixé est ensuite transformé en saccharose (sucre) dans le cytoplasme. Le sucre fabriqué descend dans les racines de la plante et est stocké dans les vacuoles des cellules. La majorité des végétaux fonctionnent avec ce mécanisme appelé C3. Pour certaines plantes tropicales ou de zones arides qui doivent limiter leurs pertes d'eau, le mécanisme se nomme C4, car il y a un atome de carbone supplémentaire.

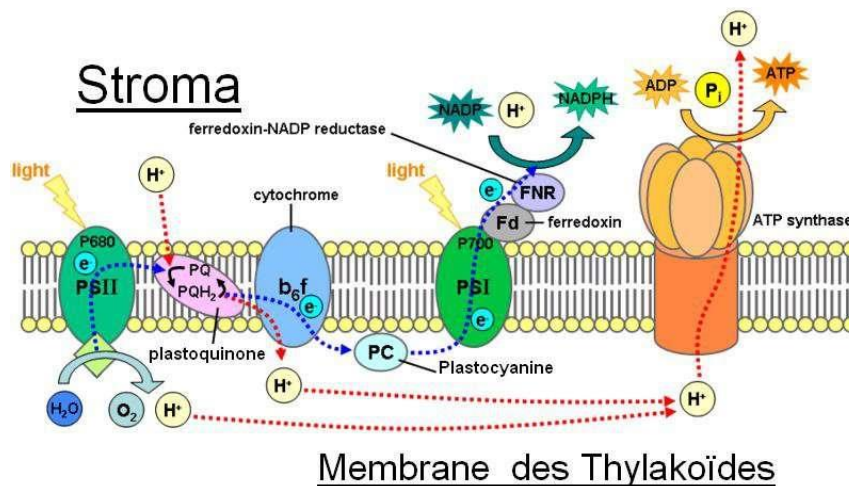


Figure 10 : Phase photochimique

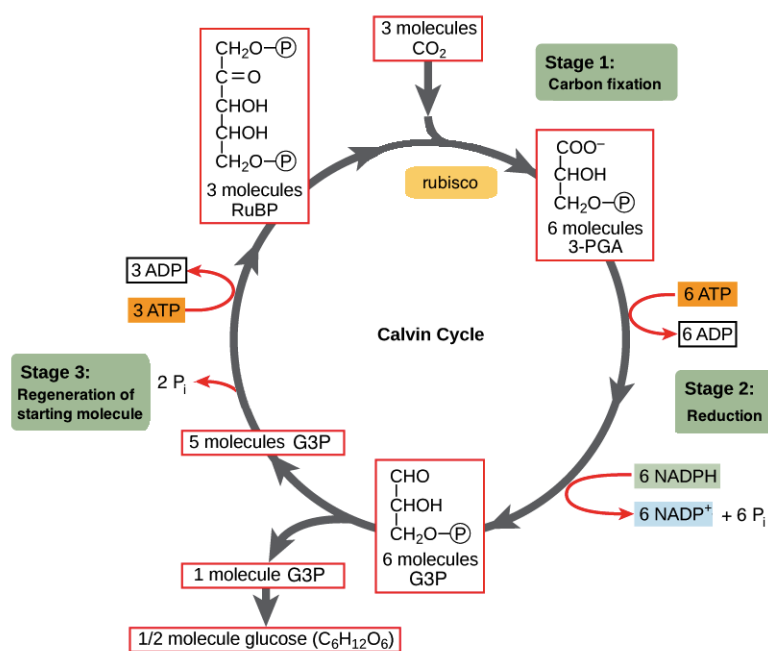


Figure 11 : Phase biochimique

4. Les différents types de fixation du carbone

Il y a trois mécanismes connus de fixation du dioxyde de carbone au cours de la photosynthèse : C3, C4 et CAM. Ces trois mécanismes diffèrent par l'efficacité de cette étape. Le mécanisme en C3 correspond au mécanisme « de base », c'est celui de 98% des plantes vertes.

Les types en C4 et CAM sont plus rares, mais on les trouve dans des espèces connues : le maïs est une plante C4, l'ananas une plante CAM. Ces sont des adaptations au stress hydrique ou à une réduction de disponibilité de CO₂ pendant la journée.

4.1. Le mécanisme des plantes en C3

La première des étapes du cycle de Calvin consiste en une carboxylation (fixation d'une molécule de CO₂) sur le ribulose 1,5 bisphosphate, catalysée par la RubisCO, pour donner deux molécules d'un composé à 3 atomes de carbone (Acide 3-phosphoglycérique, APG).

4.2. Le mécanisme des plantes en C4

Le métabolisme C4 dissocie *dans l'espace*, les phases photochimique et non photochimique. Les plantes qui l'utilisent captent le CO₂ atmosphérique, non directement par RubisCO, mais par l'action de la phospho-énol-pyruvate-carboxylase (PEP-carboxylase) qui produit un composé à **quatre** atomes de carbone (un acide dicarboxylique : oxaloacétate, puis malate ou aspartate). Ces réactions ont lieu dans le mésophylle .

4.3. Le mécanisme des plantes CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*)

Elles diffèrent des C4 du fait que la fixation du carbone n'est pas séparée dans l'espace mais dans le temps (nuit/jour). Durant la nuit, lorsque les stomates sont ouverts, un stock de malate est produit, puis stocké dans la vacuole des cellules photosynthétiques. Au cours de la journée, ces malates sont retransformés en dioxyde de carbone et le cycle de Calvin peut s'effectuer, le CO₂ restant disponible pour la photosynthèse malgré la fermeture des stomates. Ainsi les pertes d'eau par transpiration sont limitées. Ce mécanisme est observé notamment chez les Crassulaceae (« plantes grasses », comme le cactus).

Ce mécanisme existe aussi dans des milieux aquatiques, lorsque la disponibilité en CO₂ est réduite pendant la journée (par exemple du fait de la consommation par les plantes).

5. Le devenir des produits de la photosynthèse

La photosynthèse permet la fabrication de molécules organiques qui peuvent être stocké temporairement dans le chloroplaste sous forme d'amidon. La majorité de la MO synthétisé est ensuite exporté vers d'autres lieux d'utilisation comme par exemple les zones de croissance (tige, racine) ou les zones de stockage (graines, fruits, tubercule). Les parties non chlorophylliennes de la plante comme les racines se comportent comme des parties hétérotrophes et utilisent la MO fabriquée par les feuilles pour assurer leur fonctionnement.

6. Chargement du phloème

Les tubes criblés sont constitués de cellules allongées sans noyau, sans organites, ayant des parois cellululosiques et accompagnées de cellules compagnes dont elles sont dépendantes. En effet ces **cellules compagnes** sont accolées au tube et assurent leur approvisionnement par transfert de certains éléments comme le saccharose. Ces cellules possèdent des protubérances de la membrane plasmique, correspondant à des invaginations contenant beaucoup de mitochondrie qui sont le lieu de synthèse du saccharose.

Le passage du saccharose des cellules de transfert jusqu'aux tubes criblés, se fait par transfert de cellule à cellule par des cotransports saccharose-protons. Les pompes à protons utilisent de l'ATP pour un transport actif de protons vers la cellule compagne possédant le saccharose, par souci d'équilibre il y a alors efflux de protons dans le sens inverse, par un transport symport entraînant ainsi un mouvement de saccharose vers les tubes criblés. Ce processus est appelé **chargement du phloème** et est responsable de la diminution du potentiel hydrique.

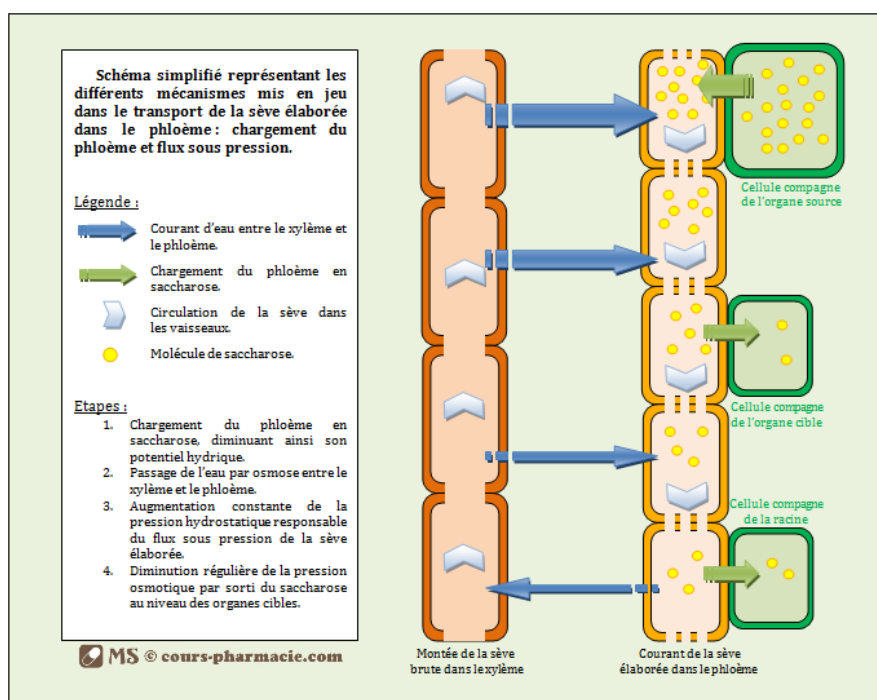


Figure 12 : La circulation de la sève élaborée

7. La Respiration cellulaire

La respiration cellulaire est une réaction chimique d'oxydo-réduction qui fournit l'énergie nécessaire à une cellule pour fonctionner et qui se passe dans les mitochondries

Une espèce chimique (atome, molécule, ion) qui capte un ou plusieurs électrons est un oxydant.

Une espèce chimique qui donne un ou plusieurs électrons est un réducteur.

Quand un réducteur perd des électrons, il s'oxyde. Quand un oxydant capte des électrons, il se réduit.

Ces réactions sont appelées des réactions d'oxydoréduction.

Puisqu'un donneur d'électrons nécessite un receveur d'électrons, l'oxydation et la réduction vont toujours ensembles.

La respiration cellulaire nécessite :

- un carburant : il s'agit du glucose, d'acides gras ou d'autres molécules organiques (acides aminés, corps cétoniques) ;
- un comburant, le dioxygène.

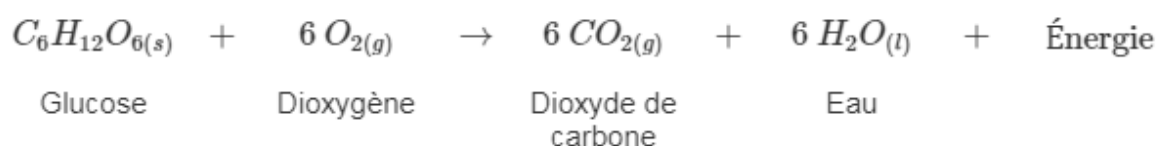
Cette réaction produit : □ du dioxyde de carbone ; □ de l'eau ; □ parfois de l'urée, si le carburant contient de l'azote (ex: acides aminés).

Le glucose, s'il n'est pas stocké sous forme de glycogène, sera dégradé afin de fournir de l'énergie directement utilisable par la cellule. Il existe deux voies métaboliques principales pour cela :

- la respiration cellulaire en milieu aérobie (milieu où il y a présence d'oxygène) ;
- la fermentation : fermentation alcoolique, butyrique... en milieu anaérobie (milieu dépourvu d'oxygène).

Lors de la respiration cellulaire, la dégradation du glucose se fait grâce à des transferts d'électrons (ce qui libère l'énergie).

La réaction globale est :



Chapitre 6 : La Nutrition azotée

Introduction

Comme la nutrition carbonée, l'azote est également très important dans le fonctionnement des plantes. L'azote organique se trouve dans les acides nucléiques, protéines, cofacteurs, ATP, certain pigments, avec leur hétérocycle azoté. Il y a des composés secondaires, les alcaloïdes, qui sont des dérivés des composés azotés, et qui servent à défendre la plante. Les plus connus : Morphine, Héroïne, cocaïne, caféine etc... L'azote minéral se trouve dans le sol sous forme de nitrate (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+). L'azote minéral se trouve également dans l'atmosphère en grande quantité (80%) sous forme de N_2 pouvant être oxydé en N_2O (Protoxyde d'azote).

1. L'absorption de l'azote minéral

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

Autour de la racine, on constate que le pH augmente (alcalinisation) quand est NO_3^- absorbé, on pense que les ions NO_3^- rentrent en même temps que les ions H^+ , ce qui fait ainsi augmenter le pH du milieu. Ce symport (Transport de deux molécules de charge différente qui vont dans le même compartiment) implique qu'il faut rejeter ces H^+ absorbés.

2. Transport des ions de la racine au xylème

NO_3^- Exporté directement dans le xylème Réduit sur place par la nitrate réductase, puis par la nitrite réductase. Cette réduction permettra l'utilisation de l'azote pour la formation d'acides aminés. Accumulé dans la vacuole, pour un simple équilibre avec le cytosol, ou bien permettre la concentration en ions dans la cellule, créant ainsi une pression osmotique impliquant l'entrée d'eau dans la cellule. → Le NO_3^- va circuler de manière symplasmique, par l'intermédiaire des plasmodesmes, et ce par différents gradients de concentration. NH_4^+ Il ne partira pas vers le xylème, mais sera utilisé directement sur place.

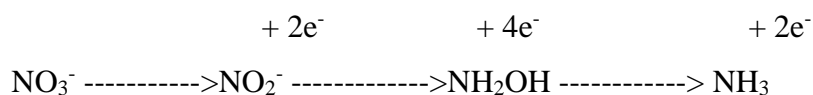
3. L'utilisation de l'azote ammoniacal

L'ion NH_4^+ peut être utilisé par les plantes. Dans le sol, à l'état naturel, les dérivés ammoniacaux résultant de la décomposition de l'humus et des matières organiques d'origine animale sont oxydés en nitrates par les bactéries de ce sol (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*) et la teneur en ions NH_4^+ disponible pour les végétaux est faible. Toutefois, les pratiques agricoles, par suite de l'emploi d'engrais ammoniacaux augmentent considérablement cette teneur.

L'ammoniaque, très toxique, doit être métabolisé dès sa pénétration dans la cellule, la majeure partie se combine à l'acide glutamique pour donner de la glutamine (acide aminé).

4. L'utilisation de l'azote nitrique

Dans la nature, la source principale de l'azote est en fait constituée par les ions nitrate, qui, par rapport à l'ion ammoniacal, présentent l'avantage d'être très peu toxiques pour les végétaux. Les ions nitriques, une fois absorbés, sont réduits par la plante en nitrites puis en ammoniaque immédiatement métabolisé:



La réduction des nitrates est due à une nitrate-réductase ayant pour cofacteur du Molybdène qui est couplé avec la chaîne des transporteurs d'électrons.

5. L'utilisation de l'azote atmosphérique:

Les Rhizobiums, bactéries aérobies, qui, à l'état libre sont incapables de fixer l'azote atmosphérique, acquièrent cette propriété lorsqu'ils pénètrent dans les jeunes racines des légumineuses, la réaction de l'hôte se traduisant par de petits renflements appelés nodosités.

La spécificité de cette symbiose est assez grande, chaque espèce de légumineuses étant envahie par une variété bien précise de bactéries. La nitrogénase est l'enzyme assurant la fixation de l'azote atmosphérique par les nodosités de légumineuses