

INTRODUCTION

Les plantes sont organisées en tiges, feuilles et racines. Les tiges et les feuilles baignent dans l'atmosphère ambiante ou elles prélèvent le dioxyde de carbone (CO₂), connu sous le vocable gaz carbonique, et captent l'énergie du rayonnement solaire pour réaliser la photosynthèse (figure1). Les racines plongent dans le sol d'où elles tirent l'eau et les éléments minéraux nécessaires au métabolisme et à l'élaboration des molécules du monde végétal. Par la nutrition minérale des plantes les minéraux entrent dans la biosphère.

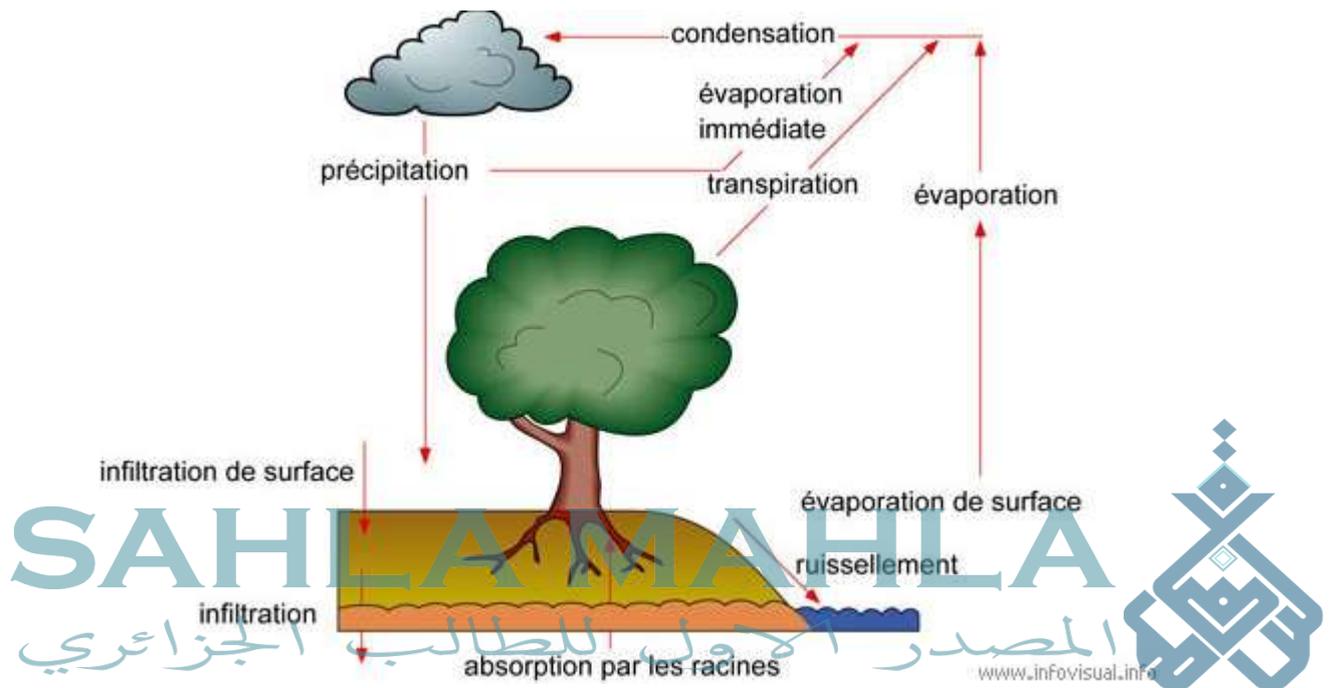


Figure1 : Cycle hydrologique

Les plantes grâce à leurs racines pompent l'eau du sol et la rejettent dans l'atmosphère sous forme de vapeur par transpiration des feuilles. Les plantes sont parcourues de fait en permanence par un courant d'eau qui circule des racines aux feuilles dans un système vasculaire original, le complexe libéro-ligneux. Les plantes étant à l'interface sol/atmosphère jouent ainsi un rôle déterminant dans le cycle de l'eau qui s'établit entre les couches superficielles de la croûte terrestre et l'atmosphère (Morot-Gaudry, 2017).

Par leurs feuilles, les plantes sont capables, en utilisant l'énergie de la lumière solaire, de fabriquer, à partir de composés minéraux, souvent oxydés comme le dioxyde de carbone, le nitrate et le sulfate, toutes les molécules organiques nécessaires à leur développement, des plus simples, sucres, acides aminés, acides gras, aux plus complexes, protéines, lignines,

vitamines par exemple. Les plantes sont autotrophes, particularité qu'elles partagent avec les algues, les mousses, les fougères et certains micro-organismes. Ce processus d'autotrophie qui dépend de la lumière est la photosynthèse.

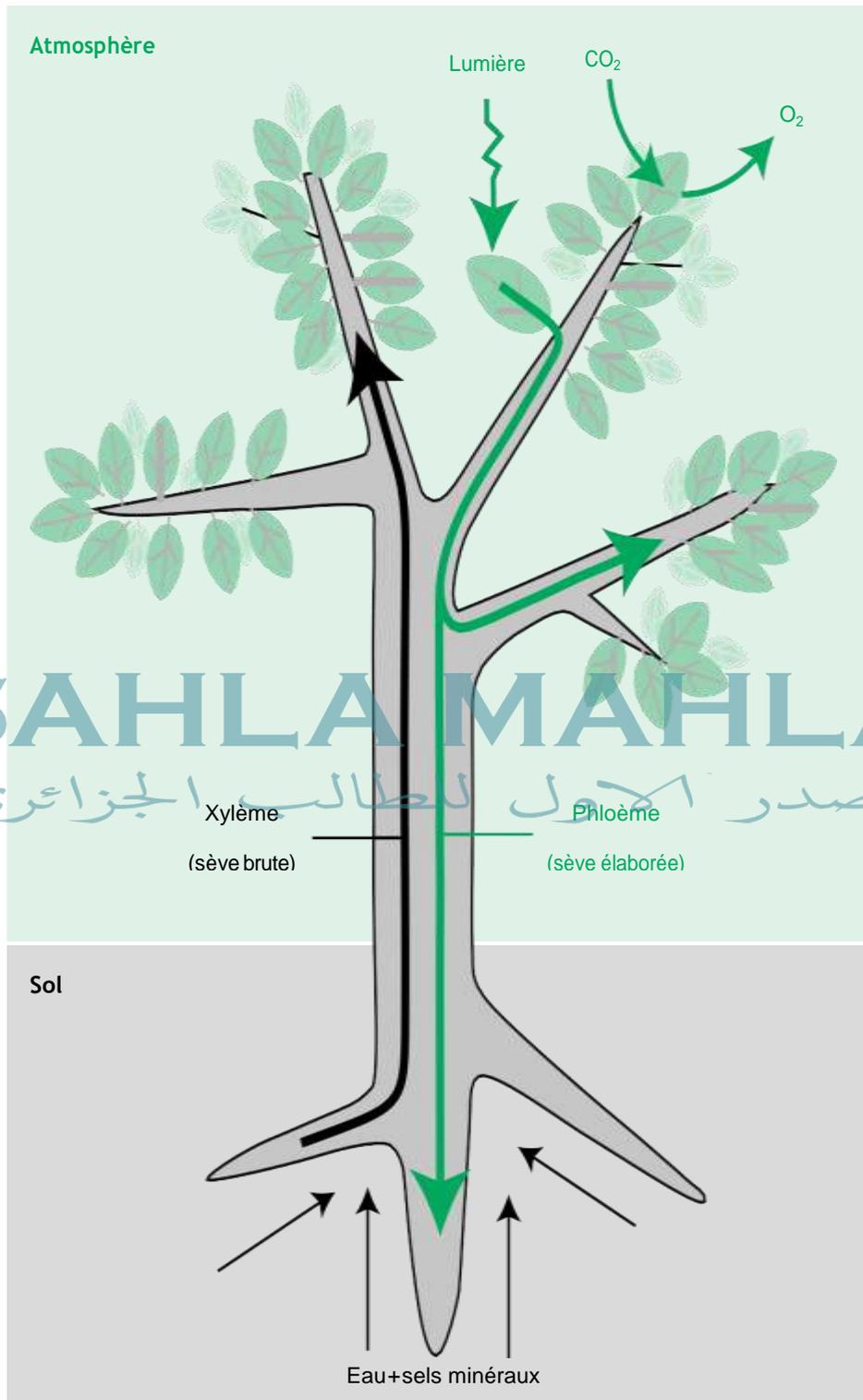


Figure 2 : Relation Plante/ Environnement (Morot-Gaudry, 2017)

Chapitre I

La nutrition hydrique des plantes

1.1. Relation Eau – Plante – Sol

1.1.1. L'eau dans le sol

L'eau est un composé peu ordinaire, non seulement du point de vue physicochimique mais aussi de point de vue biologique : son importance dans les processus biologiques découle de ses propriétés particulières.

La plus grande quantité d'eau absorbée provient du sol, mais il ne faut pas oublier l'eau qui est absorbée au niveau des feuilles.

Le sol est un mélange de terre minérale et de matières organiques (dont des êtres vivants). Les particules solides qui le composent déterminent sa texture (compacte ou non, poreuse ou non) et sa structure. Selon les particules du sol, l'eau ne sera pas disponible de la même façon. La nature du sol va donc influencer directement sur l'absorption de l'eau par les racines.

a/Liaisons de l'eau

L'humidité est exprimée en pourcentage de la masse. C'est une notion vague, car un sable, à 10 %, d'eau paraît humide alors qu'une tourbe à 50% d'eau sera sèche.

L'eau peut être libre ou liée aux constituants du sol. On trouve l'existence de plusieurs forces : osmotique, capillaire (tension superficielle), électrostatique (imbibition).

b/ Potentiel hydrique et succion

C'est la force d'attraction entre l'eau et le sol. Le potentiel hydrique est égal mais de signe opposé à l'énergie qu'il faut appliquer pour libérer 1 gramme d'eau. La valeur de ce potentiel est toujours inférieure à 0. Plus cette valeur est basse, plus les liaisons eau/sol sont fortes. Quand un sol se dessèche, va baisser. La succion représente la force d'attraction exercée du sol sur l'eau (cette succion est considérée comme une pression, ainsi que le potentiel hydrique).

c/ La capacité de rétention

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

d/ Le point de flétrissement

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

e/ 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.

1.1.2. L'eau dans la plante

a/ La teneur en eau des végétaux

Dans la plante (sa grande vacuole lui sert de réservoir d'eau), 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).

Le pourcentage en eau d'une plante est exprimé comme suit :

$$\emptyset = \% \text{eau} = [(MF - MS)/MF] * 100$$

MS = Matière Sèche

MF = Matière Fraîche

Le déficit en eau est exprimé comme suit :

$$\text{Déficit en eau : } D = (\emptyset_m - \emptyset) / \emptyset_m$$

\emptyset_m = teneur maximale ;

\emptyset = teneur réelle.

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

b/ Les états et rôles de l'eau dans la plante

On trouve l'eau sous deux états :

- **L'eau libre** : elle peut être en solution (dans les vacuoles ou les sèves), sous forme de vapeur (dans les méats, dans la chambre sous-stomatique),
- **L'eau liée** : elle peut être liée par la force osmotique, par la force capillaire (tension superficielle) et par les forces d'imbibition (force électrostatique ou colloïde).

Les colloïdes sont des macromolécules très hydrophiles, comme les argiles ou l'humus.

L'eau de constitution est l'eau intra-moléculaire qui fait intervenir des forces très énergétiques.

c/ La diffusion et la pression osmotique

Le passage de molécules dissoutes à travers la membrane (avec perméabilité spécifique) entraîne un phénomène passif. De part et d'autre de la membrane, on assiste à un équilibre grâce à l'agitation thermique : le mélange devient homogène. Avec une membrane hémiperméable, les courants d'eau vont égaliser les états énergétiques des deux côtés.

La pression osmotique d'une solution est l'attraction exercée par cette solution sur les molécules d'eau, lorsqu'elle est séparée par une membrane hémiperméable.

d/ Variation de la teneur en eau dans la cellule.

L'eau est en grande partie dans la vacuole. L'eau exerce, grâce à la vacuole, au cytoplasme, au plasmodesme, une pression de turgescence sur la paroi. Les ions et molécules, dans la vacuole, lui confèrent une pression osmotique qui attire l'eau : (*figure 1*).

- quand la cellule est dans un milieu hypotonique, l'eau rentre dans la cellule qui devient turgescente à cause d'une variation de volume cellulaire.
- quand la cellule est dans un milieu hypertonique, l'eau sort et on assiste à une plasmolyse

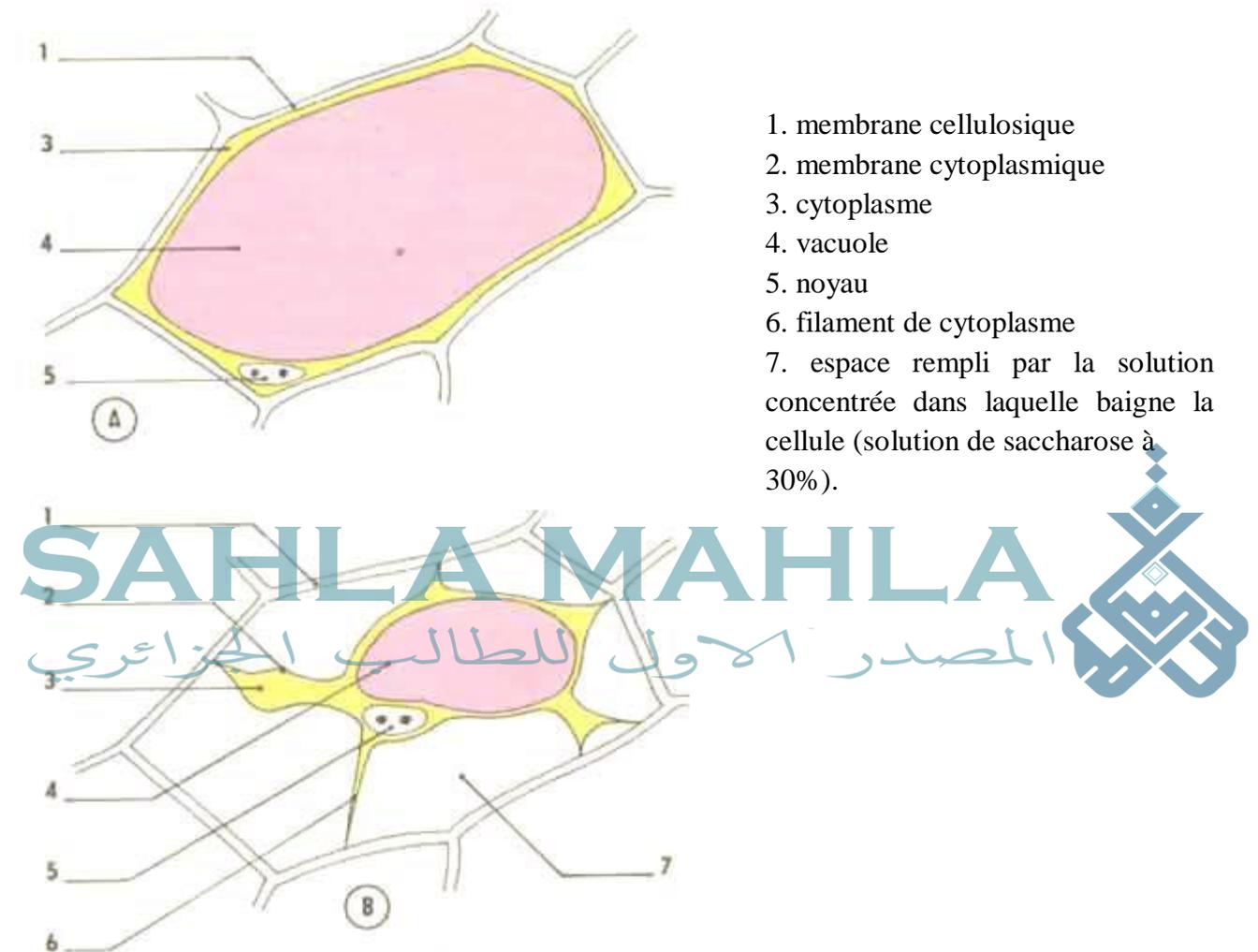


Figure 1 : Teneur en eau dans la cellule.

(A) Schéma d'une cellule turgescente (B) Schéma d'une cellule plasmolysée

e/ Absorption de l'eau

En un jour, la plante absorbe un volume d'eau équivalent à sa masse. Les plantes aquatiques absorbent l'eau sur toute leur surface. Les plantes supérieures ont leur absorption assurée par leurs poils absorbants (*figure 2*) (fixés sur les racines. C'est l'eau la moins liée au sol qui va être utilisée par la plante (on parle de liaisons osmotiques et capillaires).

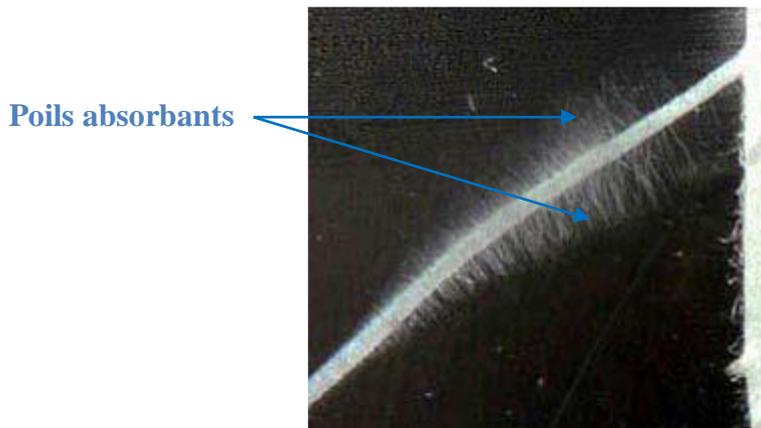


Figure 2 : Poils absorbants sur une racine

f/ 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 (phénomènes physiques). 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 oblige un passage par voie symplastique.

Jusqu'au cylindre central, la pression (poussée) est racinaire. C'est un processus nécessitant de l'énergie métabolique.

Au niveau du cylindre central, on a un cheminement vertical qui se fait dans le xylème. Au début, la pression racinaire devient importante, au fur et à mesure de l'élévation par un processus physique fondé sur l'existence d'un gradient de potentiel hydrique (différence de potentiel entre le sol et l'atmosphère). L'assimilation (ou aspiration) par les feuilles permet l'évaporation (phénomène transpiratoire). L'atmosphère a un potentiel hydrique très négatif et soutire en permanence l'eau de la plante, créant ainsi un flux transpiratoire. Cette aspiration entraîne une dépression dans les vaisseaux du xylème.

g/ Emission d'eau par la plante

Pour qu'il y ait transpiration, il faut que soit très négatif. La différence de potentiel dépend de l'humidité relative de l'air. Le transport est réalisé par les stomates aquifères qui expulsent de l'eau. Pour cette vaporisation, il y a un besoin d'énergie solaire (95 pour cent par les stomates, 5% par la cuticule).

h/ Les stomates

Ce sont des cellules particulières situées dans les feuilles. Elles ont une forme réniforme et sont accompagnées de 2 grosses cellules (cellules compagnes ou annexes) : c'est l'ostiole (là où circulent les gaz). Souvent, on observe la présence d'une chambre sous-stomatique.

NB :

Chez les monocotylédones, les stomates se trouvent sur les 2 faces des feuilles.

i/ Circulation des sèves

➤ **Sève brute**

Une fois arrivée dans les vaisseaux du xylème, l'eau et les ions constituent la sève brute. Cette sève sera alors distribuée principalement dans les feuilles où a lieu la photosynthèse.

La sève brute va pouvoir monter jusqu'au sommet de la plante grâce à un phénomène d'aspiration foliaire. Les vaisseaux qui constituent le xylème, sont des cellules mortes dont la paroi est renforcée de lignine, ce qui empêche tout échange. Les forces de capillarité dans les vaisseaux permettent une certaine attraction de la sève vers le haut mais ce n'est pas suffisant, c'est principalement l'eau perdue par transpiration au niveau des feuilles qui va aspirer la sève. Cette différence entre la partie aérienne et le sol fait monter la sève brute.

➤ **Sève élaborée**

Le saccharose produit lors de la photosynthèse va sortir de la cellule et se diriger vers les vaisseaux du phloème. La sève élaborée est donc chargée de molécules organiques. Comme l'eau dans la racine, elle peut suivre les deux voies, apo- ou symplasmique, la dernière étant plus rapide en raison de la grosseur de la molécule.

Dans le phloème constitué de cellules vivantes, cette sève est transportée bidirectionnellement, du bas vers le haut et inversement, pour atteindre toutes les parties de la plante. Cette circulation se fait avec une pression positive : on parle de flux de pression. Cette sève contient de 50 à 300 g de matière sèche par litre.

1.2. Absorption de l'eau par les racines

En botanique, la **racine** est l'organe souterrain d'une plante servant à la fixer au sol et à y puiser l'eau et les éléments nutritifs nécessaires à son développement.

Prolongement de la tige vers le bas, elle en diffère par plusieurs caractères : sa structure interne, la présence d'une coiffe terminale et de poils absorbants, l'absence de feuilles et de bourgeons. C'est ce dernier caractère qui la distingue fondamentalement de la tige.

Les racines sont souvent le siège de symbioses avec les bactéries du sol, en particulier pour le métabolisme de l'azote. Les racines peuvent présenter des adaptations afin de faciliter le développement de la plante dans un environnement particulier. Dans certains cas, les racines servent aussi à stocker des nutriments (carotte, radis, betterave, navet, etc.). Certaines racines de plantes sont comestibles ou à usage médicinal, d'autres sont hautement toxiques.

Les racines sont les organes de pénétration des herbicides racinaires, employés pour lutter contre les adventices.

1.2.1. Structure de la racine

C'est le plus souvent un organe souterrain ayant pour rôle principal d'absorber l'eau et les sels minéraux indispensables à la plante et de fixer celle-ci dans le sol. La racine peut avoir également un rôle de réserve.

La racine **principale** est celle qui prolonge la tige. Les racines qui se détachent de la racine principale sont dites des racines **latérales du premier ordre** ; elles portent à leurs tours d'autres racines. Aux ramifications les plus fines, on donne le nom de **radicelles**.

On peut définir 4 parties dans une racine (*figure 3*) :

La zone subéreuse (4): correspond à la partie la plus âgée de la racine; elle porte les racines secondaires ou radicelles. Elle est recouverte de suber ou liège ; c'est la plus longue des régions de la racine

La zone pilifère (3) : émet des poils absorbants. Ce sont eux qui permettent l'absorption de l'eau et des sels minéraux. A mesure que la racine s'allonge, les poils supérieurs tombent et de nouveaux poils absorbants apparaissent vers le bas.

La zone d'accroissement (2) : lisse, de 1 à 2 cm de longueur, située derrière la coiffe, elle est responsable de la multiplication cellulaire.

La coiffe (1) : c'est un capuchon qui protège l'extrémité de la racine.

C'est elle qui permet la pénétration dans le sol. Elle s'use et se régénère au fur et à mesure de la pénétration de la racine

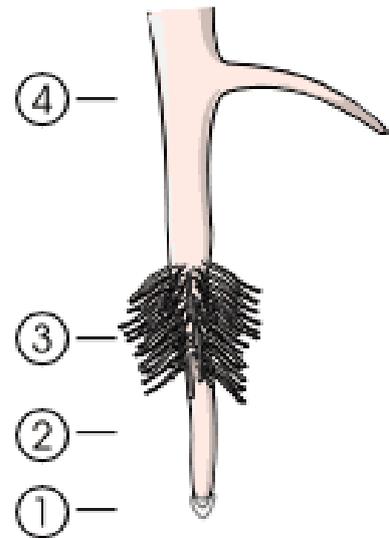


Figure 3 : Schéma montrant les différentes parties d'une racine

1.2.2. Classification morphologique des racines

On distingue plusieurs types de racines selon:

- Leur forme :
 - Racine pivotante,
 - Racine fasciculée,
 - Racine traçante.
- L'accumulation des réserves :
 - Racines pivotantes tubérisées,
 - Racines fasciculées tubérisées.
- Leur origine :
 - Racine adventive,
 - Racines crampons.
- Leur milieu où elles évoluent :
 - Racines souterraines,
 - Racines aériennes,
 - Racines aquatiques.

SAHLA MAHLA

المصدر الأول للطالب الزراعي



Chapitre II :

La nutrition minérale des plantes

Introduction :

La plante se nourrit de sels minéraux qui existent dans le sol sous forme d'ions et qui pénètrent dans les racines. De grandes surfaces racinaires et des systèmes actifs d'absorption expliquent que, malgré les faibles concentrations des ions dans la solution du sol, l'acquisition des nutriments minéraux par les plantes est un processus très efficace. Par ailleurs, des symbioses formées entre des bactéries ou des champignons (mycorhizes) et les racines, participent à l'acquisition de ces éléments minéraux. D'immenses progrès ont été réalisés récemment dans la compréhension des mécanismes moléculaires du transport ionique ainsi que des gènes impliqués dans la nutrition minérale.

Les végétaux chlorophylliens puisent des matières minérales indispensables à leur bon fonctionnement dans leurs milieux environnant (sol, eau et air). L'absence ou carence de ces matières perturbe leur développement.

2-1- Détermination des besoins nutritifs des végétaux chlorophylliens

2.1.1. Les éléments minéraux et la fertilité du sol

Les principaux éléments minéraux dont la plante a besoin pour sa croissance sont dits essentiels et sont classés, selon les quantités absorbées, en

- *Macroéléments principaux* : azote(N), phosphore(P), potassium(K) ;

- *Macroéléments Secondaires*: calcium(Ca), magnésium(Mg), soufre(S), sodium(Na). L'azote constitue un des éléments majeurs pour la croissance des végétaux, sa carence ayant un très fort impact sur la réduction de croissance. Il entre dans la constitution des protéines, des acides aminés, de la chlorophylle ainsi que de l'ADN. Le phosphore intervient dans la photosynthèse, la gestion de l'énergie métabolique (ATP) et entre dans la constitution d'enzymes ainsi que de nombreuses molécules. Il stimule la croissance et le développement des racines et des fruits. Le potassium a un rôle très important dans le contrôle de la pression osmotique, la régulation stomatique, l'économie de l'eau, ainsi que dans les résistances au stress hydrique, au gel et aux maladies.

- *Les oligo-éléments* : Manganèse (Mn), Zinc (Zn), (Cl), Bore (B), Molybdène (Mo), Cobalt (Co). On trouve ces éléments au niveau des enzymes avec différentes variations selon les espèces. On trouve le soufre chez les crucifères, le potassium chez les algues, le silicium chez des graminées, les prêles et les fougères. On trouve des variations selon les organes d'une plante. La graine est plus riche en phosphore pauvre en potassium que la plante. Les parties âgées sont plus riches en calcium alors que les parties jeunes sont riches en potassium, phosphore et azote. Il est donc nécessaire d'entretenir la fertilité du sol en reconstituant ses

réserves par des apports de matières fertilisantes adaptées. Ces apports dépendront de la richesse du sol et des besoins des plantes. L'examen de la phase solide du sol montre qu'il est constitué, en général, de particules d'argile associées à des composés organiques, l'humus, en formant des complexes argilo-humiques (CAH). Les CAH sont des gels colloïdaux chargés négativement qui se lient aux ions chargés positivement (cations: K^+ , Ca^{++} , H^+ , Mg^{++} , NH_4^+ ,...). Ils sont ainsi des réservoirs de cations, caractérisés par leur capacité d'échange cationique ou CEC. Les ions chargés négativement (anions : NO_3^- , SO_4^{--} ,...) sont libres et circulent dans l'eau du sol.

2.1.2. L'origine des minéraux.

Dans le sol, les ions sont en solution, ils varient selon la nature et le pH du sol. Ils sont, soit à l'état fixé dans le complexe argilo-humique (dans des solutions colloïdales), dans le complexe anionique. Si c'est une fixation par un cation, et si celui-ci est divalent, il fixera l'anion au sol. Si le sol a beaucoup de complexes argilo-humiques, il sera riche. La majorité des ions sont transformés par la plante pour pouvoir être utilisés. On a par exemple, les sulfates réduits au niveau des chloroplastes. Ces ions seront souvent à faibles concentrations. On trouve aussi dans la plante, des ions à concentrations élevées. On observe, chez une plante, une sélectivité pour l'absorption des ions et pour le maintien de la concentration de ces ions.

Dans le complexe argilo-humique, Les ions sont fortement liés : il y a compétition entre la plante et le complexe ionique pour capter des ions, d'où une dépense d'énergie par le végétal.

2.2. Modalités et mécanismes de l'absorption

Connaître les mécanismes de nutrition des végétaux permet de raisonner la fertilisation pour obtenir des plantes de qualité et résistantes aux maladies 2-1- Modalités. Une fois l'absorption effectuée par les poils absorbants ou les mycorhizes, l'absorption est réalisée dans les cultures de manière spécifique. Par exemple, dans un verger, on fait absorber à une plante des oligo-éléments, l'absorption foliaire de fer par une plante chlorosée est le seul moyen de faire absorber ce fer sur les sols calcaires. Les ions circulent par voie symplastique (dans le cytoplasme) jusqu'au xylème puis ils passent dans la sève brute. Certains ions sont retenus au niveau des parois, comme le calcium, d'autres s'accumulent dans la vacuole sont excrétés. La vacuole est une poubelle ou une réserve.

2.2.1. Mécanismes de l'absorption.

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

a/ La simple diffusion.

La membrane cellulaire permet à l'eau et aux molécules non polaires de pénétrer par simple diffusion mais aussi a quelques petites molécules polaires comme l'urée, le glycérol, le CO₂, peuvent pénétrer.

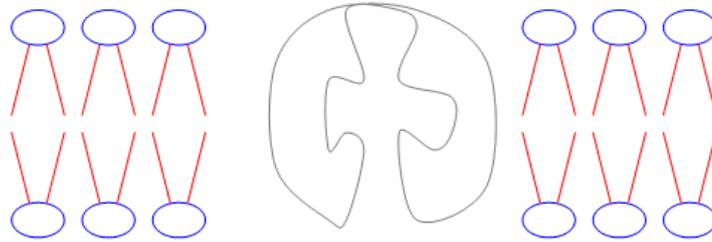


Schéma d'une membrane avec une protéine porteuse.

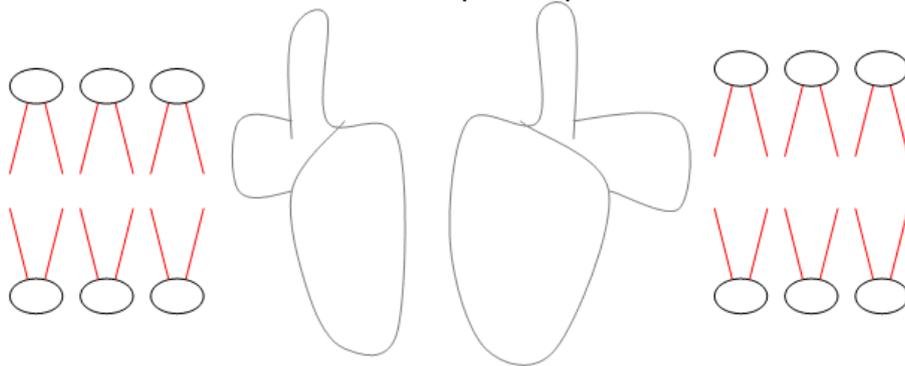


Schéma d'une membrane avec un canal protéique.

Figure 4 : transport des minéraux

SAHLA MAHLA

b/ Le transport passif et la diffusion facilitée.

المصدر الاول كتاب البستاني

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

Dans la diffusion facilitée le transport est réalisé dans le sens du gradient. Le transport des molécules est réalisé par des canaux protéiques, par des protéines porteuses et par perméabilité membranaire. On trouve deux types de protéines porteuses, des protéines qui permettent un transport passif et des protéines qui réalisent ce transport grâce à de l'énergie : c'est un transport actif.

c/ Mécanisme actif.

Lapicque a mis en évidence le phénomène d'épictèse : c'est une absorption active des ions et des petites molécules. Une cellule végétale dans une solution hypertonique, concentrée en saccharose est plasmolysée. Au bout d'un certain temps, la cellule redevient turgescence : la

cellule rétablit son hypertonie en absorbant des ions (ou des petites molécules) contre le gradient du potentiel électro-chimique. Ce phénomène explique qu'une cellule est capable de concentrer des ions. Ces déplacements nécessitent de l'énergie d'origine chimique, par exemple l'ATP, d'origine physique : le gradient ionique, due aux déplacements d'électrons. Cette énergie permet le fonctionnement des pompes ioniques donc le type le plus représenté est le type des pompes à protons. On trouve deux types de pompes (Figure 5) :

- Des pompes rédox donc la circulation est réalisée grâce à des déplacements d'électrons. Ces pompes produisent de l'ATP.
- Des pompes de type ATPase : elles expulsent les protons au niveau de la membrane du plasmalème ou du tonoplaste (transports actifs). Elles utilisent de l'énergie. Le transport des protons par ces ATPases est un transport actif primaire.

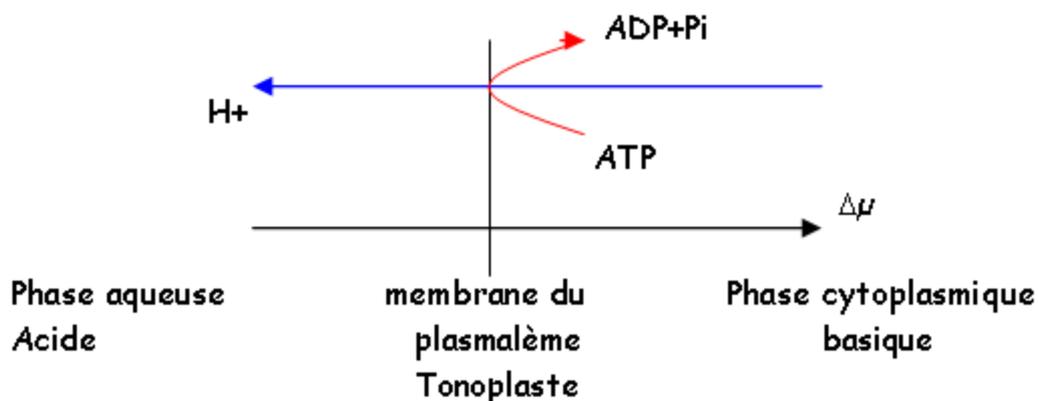


Figure 5 : Pompe à protons

Cette émission de protons crée la «force motrice protonique», qui permet à son tour d'énergiser le déplacement d'autres espèces ioniques. On parle de transports actifs secondaires. Ce transport actif secondaire se fait dans le sens opposé au gradient, en demandant donc de l'énergie. S'il y a transport d'un seul soluté, on parle de système uniport. Si deux solutés traversent dans le même sens, c'est un système symport. Si les 2 solutés traversent dans un sens différent, c'est un transport antiport.

2.3. Rôles des ions dans la plante.

2.3.1. Rôles physiques.

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

2.3-2. Rôles physiologiques. Les rôles constitutifs sont tenus par les éléments phosphorylés, comme les phospholipides, les composés phosphorylés, les nucléotides, et les acides nucléiques. On trouve le soufre dans les acides aminés et dans les protéines. On trouve le calcium dans les parois où ils forment avec les peptides, des pectates ; dans la vacuole il est

sous forme de cristaux d'oxalate de calcium ; dans le cytoplasme il est associé à la calmoduline.

On trouve le fer (Fe) au niveau des hèmes et des cytochromes. Le calcium se trouve dans les chloroplastes (en formant les plastocyanines) et dans les mitochondries où ils forment les cytochromes oxydases. On trouve du molybdène dans les nitrate-réductases et dans les nitrogénases. Le phosphore est en importante quantité pendant la floraison et dans les graines. Le potassium est impliqué dans le métabolisme des glucides. Le calcium se trouve le plus souvent dans les lieux de stockage des produits toxiques (en général se sont les vacuoles).

2.3.3. Quelques particularités.

- Le calcium : Face à la présence du calcium, on trouve deux types de plantes :
 - Les calcicoles, qui tolèrent (ou supportent) le calcium. Quand la concentration en calcium va augmenter, le pH va aussi augmenter (solution basique).
 - Les calcifuges, qui ne supportent pas le calcium. Leur concentration en Ca diminue en entraînant une diminution du pH (acidification). Les plantes calcicoles peuvent modifier la composition de leur membrane pour limiter l'entrée de Ca.
- Le fer : Sur un sol basique, le fer ne peut pas être absorbé car il précipite.
- Le sodium : On trouve des plantes halofuges (qui ne supportent pas le sel) et des plantes halophiles (les halophytes) qui supportent le sel. Ces halophytes poussent dans les eaux saumâtres ou près de la mer (des eaux salées). Soit, elles excluent le sel, soit, elles l'accumulent dans leurs vacuoles ou dans des glandes à sel. Ces plantes ont l'aspect de plantes grasses.

SAHLA MAHLA

المصدر الأول للطالب الجزائري



Chapitre III : Métabolisme de la plante (Nutrition carbonée)

3.1. Photosynthèse

3.1.1. Introduction :

La Photosynthèse est une propriété fondamentale du règne végétal. Elle lui confère l'indépendance vis-à-vis des autres formes de vie. Son mécanisme consiste à utiliser l'énergie solaire pour briser la molécule d'eau en ses deux éléments constitutifs ; l'oxygène inutile est rejeté, l'hydrogène va constituer une « force motrice » destinée à transformer le gaz carbonique atmosphérique en sucres (Figure 6).

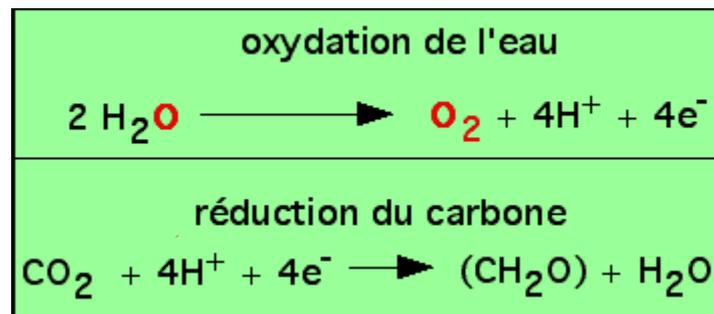


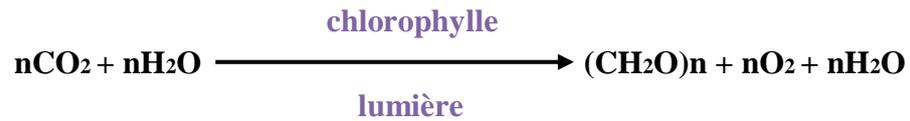
Figure 6 : Décomposition de la réaction photosynthétique en deux groupes de réactions Redox

3.1.2. Définition :

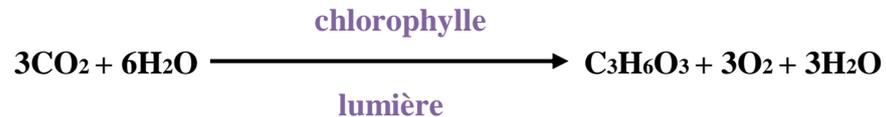
La photosynthèse est le processus responsable de la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique au niveau de la plante, autrement dit : processus permettant de synthétiser de la matière organique (sucres) à partir de la lumière du soleil. Elle se réalise au niveau des chloroplastes qui sont des organites cellulaires spécialisées, et permet une consommation de dioxyde de carbone et d'eau afin de produire du dioxygène et des molécules organiques telles que le glucose. Pour se faire la photosynthèse se réalise en deux grandes phases, la phase claire et la phase sombre.

- La **phase claire** est un ensemble de réactions photochimiques, qui dépendent de la lumière, et au cours desquels les électrons sont transportés à travers les deux photosystèmes (PSI et PSII) afin de produire de l'ATP (molécule riche en énergie) et du NADPH + H₊ (potentiel réducteur). La phase claire permet donc directement la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique.
- La **phase sombre** correspond au cycle de Calvin, entièrement enzymatique et indépendante de la lumière, au cours duquel l'ATP et le NADPH + H₊ sont utilisés pour la conversion du dioxyde de carbone et de l'eau en glucides. Cette seconde partie permet l'assimilation du gaz carbonique.

3.1.3. Formulation :



Actuellement on sait que le sucre formé contient 3 atomes de carbone (aldéhyde phosphoglycérique-sucre en C36), la réaction s'écrit :



3.1.4. Localisation :

La photosynthèse se réalise principalement au niveau des feuilles, au niveau des tissus palissadiques qui se trouvent sous l'épiderme supérieur et qui récupèrent les photons lumineux. Les caractéristiques des cellules responsables de la photosynthèse leurs sont données par les chloroplastes, qu'elles possèdent et qui renferment des pigments photorécepteurs : **la chlorophylle** et les pigments associés.

3.1.4.1. Le chloroplaste, siège de la photosynthèse

Le chloroplaste est un organe semi-autonome de la cellule végétale (Figure 7). Il possède donc, comme la mitochondrie, son propre matériel génétique, ainsi qu'une double membrane phospholipidique (membrane externe et membrane interne).

- La **membrane externe** est une double couche phospholipidique formée comme toute membrane biologique de phospholipides et de protéines. Elle a la propriété d'être relativement perméable.
- La **membrane interne** a, contrairement à la précédente, la propriété d'être peu perméable et de présenter des replis appelés des **thylakoïdes**. Ces replis sont soit empilés et forment des granas (un **granum** = thylakoïde granaire), soit isolés (= thylakoïde somatique). La membrane interne est la plus intéressante pour la photosynthèse et délimite la partie interne du chloroplaste, le **stroma**. La membrane présente des acides gras insaturés qui assurent la fluidité membranaire, et des pigments (chlorophylle et caroténoïde) souvent associés à des protéines. Des structures transmembranaires permettent la formation de complexes protéiques associés à la chlorophylle que l'on appelle des photosystèmes (PSI et PSII).

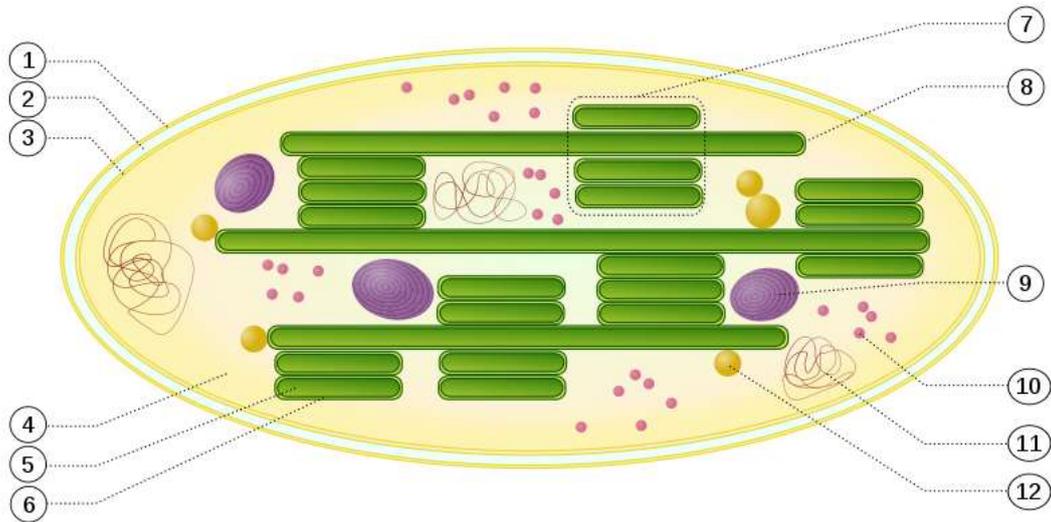


Figure 7 : Ultra-structure d'un chloroplaste

1. membrane externe
2. espace intermembranaire
3. membrane interne (1+2+3: enveloppe)
4. stroma (fluide aqueux)
5. lumen du thylakoïde
6. membrane du thylakoïde
7. granum (thylakoïdes accolés)
8. thylakoïde inter-granaire (lamelle)
9. grain d'amidon
10. ribosome
11. ADN plastidial
12. plastoglobule (gouttelette lipidique)

3.1.4.2. Structure des photosystèmes :

Les **photosystèmes** sont les centres photorécepteurs de la membrane des thylakoïdes contenus dans les chloroplastes. Ils sont constitués d'une **antenne collectrice** et d'un **centre réactionnel** situé au centre de l'antenne. L'antenne collectrice permet de capter l'énergie lumineuse grâce à des pigments de plusieurs types : chlorophylle a, b et caroténoïde. L'énergie captée est transmise au centre réactionnel qui est un emplacement spécialisé constitué d'amas de pigments contenant seulement une paire de chlorophylle « a » capable de céder ses électrons à l'**accepteur primaire**, premier accepteur de la chaîne d'accepteurs d'électrons. L'accepteur primaire du photosystème I (PSI) est la **chlorophylle A₀** (chlorophylle « a » modifiée) et du photosystème II (PSII) est la **phéophytine**. La chaîne d'accepteurs d'électrons permet le transport des électrons de molécule en molécule dans le sens de l'augmentation du potentiel. La grande différence qui distingue le photosystème I du

photosystème II est la longueur d'onde d'absorption, pourtant les centres réactionnels des deux photosystèmes présentent tous les deux une paire de chlorophylle « a ». Ceci est expliqué par le fait que les protéines associées à la chlorophylle jouent un grand rôle dans ses propriétés physiques. De cette manière le photosystème II (PSII) présente un complexe moléculaire appelé **P680** et le photosystème I (PSI) présente un complexe moléculaire appelé **P700**. Au cours de la phase claire, 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). En effet c'est bien le photosystème II qui démarre la photosynthèse.

3.1.4.3. Mécanisme des photosystèmes

- *Le photosystème II (PSII)* L'énergie lumineuse est tout d'abord absorbée par l'antenne collectrice qui transmet ensuite son énergie au complexe P680. La chlorophylle « a » présente dans le complexe P680 libère alors les électrons qui seront captés par l'accepteur primaire (chlorophylle A0 = chlorophylle « a » modifiée) et transportés par la chaîne d'accepteurs d'électrons (Figure 8). Ces électrons passent ensuite par le **complexe de cytochromes** où ils induisent le passage de protons du stroma vers l'espace intra-thylakoïdien. Les protons ainsi accumulés forment ce que l'on appelle le **gradient de protons**, qui permettra à l'**ATP synthétase** de produire de l'ATP. En quittant le complexe de cytochromes, les électrons sont transmis au photosystème I (PSI). La chlorophylle « a » du P680 a donc perdu des électrons qu'elle doit récupérer pour continuer à fonctionner ; ils lui sont fournis via la photolyse de l'eau.

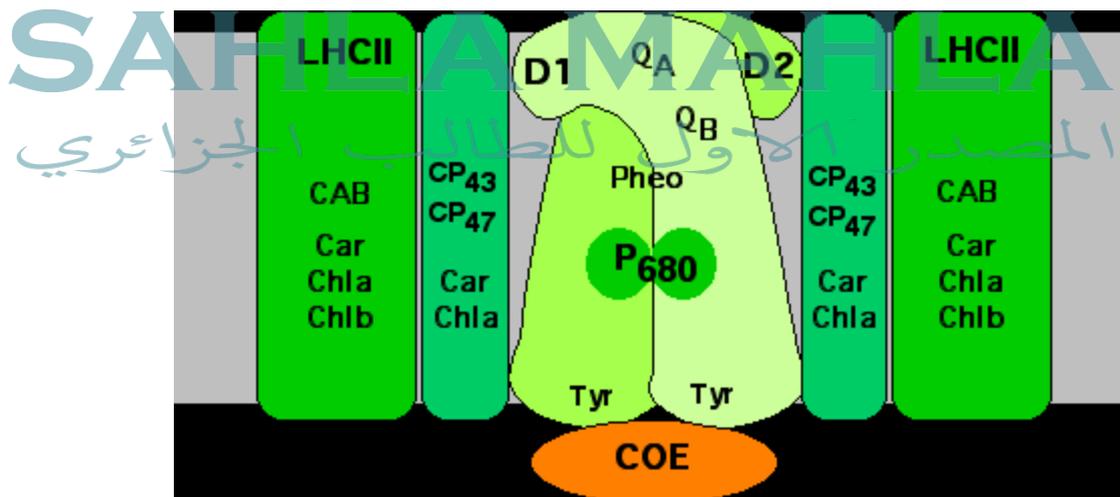


Figure 8 : Représentation schématique du photosystème II dans la membrane du thylacoïde.

- *Le photosystème I (PSI)* La poursuite de la photosynthèse nécessite encore de l'énergie lumineuse qui sera absorbée par l'antenne collectrice et qui sera transmise au complexe P700 (Figure 9). Le rôle du complexe P700 sera de charger en énergie les électrons transmis par le complexe des cytochromes. Ces électrons seront captés par l'accepteur primaire (**phéophytine**) et seront transportés par la chaîne d'accepteurs d'électrons jusqu'à la **ferrédoxine**. Elle-même les transportera jusqu'à la **NADP réductase** qui réduira le NADP^+ en $\text{NADPH} + \text{H}^+$. La chlorophylle « a » du P700 a donc perdu deux électrons qu'elle doit récupérer pour que le système fonctionne ; ces électrons lui sont fournis par le PSII.

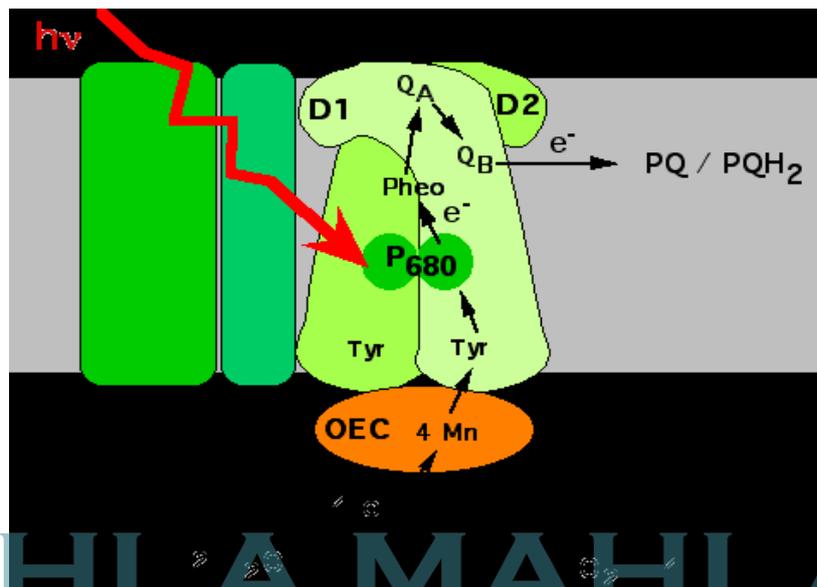


Figure 9 : Fonctionnement du PSII en place dans la membrane du thylacoïde.

3.1.5. Mesure de l'activité photosynthétique :

3.1.5.1. Mesure des échanges gazeux :

- Numération des bulles dégagées par un fragment de plante verte aquatique pendant un temps donné. On considère que toutes les bulles ont les mêmes dimensions, la bulle est considérée comme l'unité de volume de gaz dégagée.
- Analyse de l'air : (Fig.) : La composition de l'air circulant est analysée à l'entrée puis à la sortie de la chambre expérimentale ; la différence correspond à la quantité d' O_2 dégagé ou du CO_2 absorbé.

Les dosages de gaz peuvent se faire à l'aide de substances chimiques qui absorbent le CO_2 (potasse ou baryte) ou O_2 (pyrogallate de potasse ou phosphore) soit à l'aide de dispositifs magnétiques sensibles (analyseur à infrarouge pour CO_2 , analyseur paramagnétique pour O_2).

- Méthodes manométriques –appareil de warburg : un tampon $\text{CO}_3\text{K}_2 + \text{CO}_3\text{HK}$, maintient constant le taux de CO_2 . La dénivellation observée en un temps donné entre les deux branches du manomètre, correspond au volume d' O_2 dégagé.

3.1.5.2. Emploi d'isotopes : C^{14} , O^{16} et O^{18}

Quelle que soit la méthode employée, il est indispensable de faire une mesure de la respiration : dégagement de CO_2 et absorption de O_2 , en plaçant la plante à l'obscurité- par exemple - ou en utilisant des inhibiteurs de la photosynthèse (éther ou chloroforme, hydroxylamine NH_2OH). Ceci permet de corriger les résultats dus à la photosynthèse.

3.1.6. Intensité de la photosynthèse :

L'intensité de la photosynthétique se mesure et se définit par la quantité d'oxygène dégagé (ou de gaz carbonique absorbé) par l'unité de poids sec végétal (g.) pendant l'unité de temps (h)

Elle est de 10 à 20 fois plus grande que l'intensité des échanges respiratoires qui se font en sens inverse.

L'air pur contient environ 0.03% de CO_2 en volume soit 0.16 mg de C par litre.

1 g. de matière sèche (soit 10 à 15 g. de tissu frais) contient 450 à 500 mg de C.

Donc pour synthétiser 1 g. de matière sèche, il faut 3000 l. d'air.

Dans des conditions très favorables, l'intensité maximale peut atteindre 2g. (1000 ml) de CO_2 fixés par heure pour 100 g. de feuilles fraîches dans une atmosphère contenant 1% de CO_2 (valeur environ 10 fois moins élevée dans l'air ordinaire). En fait, les résultats très variables ; les variations peuvent être liées à des causes internes :

- Teneur en chlorophylle qui intervient seulement comme condition limitante
- Ouverture des stomates et épaisseur de la cuticule qui agissent sur les échanges gazeux
- Engorgement due à l'accumulation de produits synthétisés
- Etat physiologique des cellules et âge des feuilles
- Structure anatomique des feuilles
- Surtout à l'action des facteurs externes.

SAHILA MAHLA
المصدر الأول للطالب الجزائري



3.1.7. Réactions métaboliques:

3.1.7.1. Transport des électrons dans la phase claire

a) *La photolyse de l'eau et le transport non cyclique des électrons*

Au niveau du PSII va s'opérer une étape majeure de la photosynthèse : la **photolyse de l'eau**. A chaque fois que PSII est photo-oxydé, l'eau lui fournit un électron pour compenser la perte qu'il vient de subir et permettre sa régénération. L'eau est donc le donneur d'électrons primaire de la photosynthèse (Figure10). La molécule d'eau doit ainsi subir une réaction d'oxydation sous l'action de la lumière. Cette réaction sera à l'origine de la libération d'électrons de protons et d'oxygène. Les électrons seront capturés par le PSII, les protons produits iront s'accumuler dans l'espace intra-thylakoïdien pour participer au gradient de proton, et l'oxygène sera libéré dans l'atmosphère. L'oxygène est donc un déchet de la photosynthèse. L'électron au cours de ces différents transferts perd un peu d'énergie. Cette énergie est utilisée par certains transporteurs pour amener des protons H^+ du stroma (espace extra-thylakoïdien) vers l'espace intra-thylakoïdien.

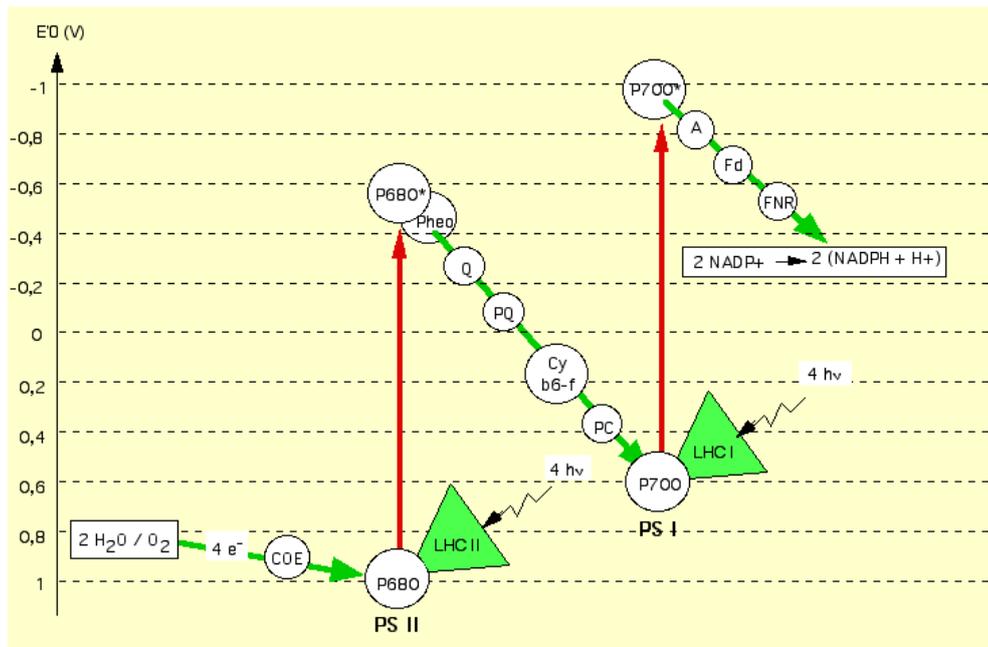


Figure 10 : Schéma "en Z", transfert acyclique des électrons.

b) Le transport cyclique des électrons

Les électrons peuvent suivre un trajet cyclique qui n'implique que le photosystème I. La ferredoxine, au lieu de fournir les électrons à la NADP réductase, va les transmettre à la plastoquinone (PQ) par l'intermédiaire d'un cytochrome. Les électrons suivent alors la première chaîne de transporteurs qui les fait revenir au photosystème I, où ils vont combler les vides qu'ils avaient laissés. Ce trajet cyclique (Figure 11) permet d'accumuler des protons supplémentaires dans l'espace intra-thylakoidien sans réduire de NADP^+ mais en favorisant la production d'ATP (relargué au niveau du stroma).

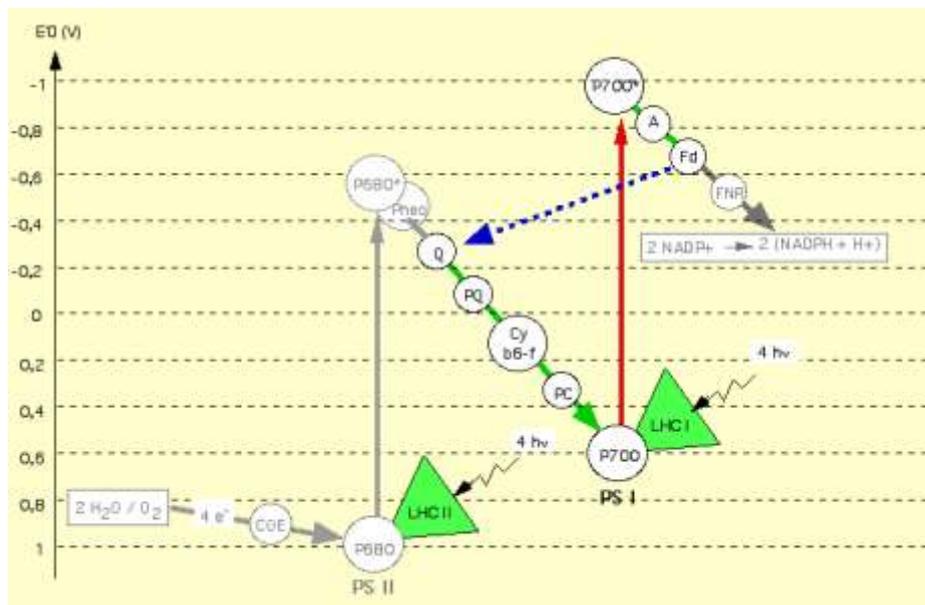


Figure 11 : Transfert cyclique de électrons autour du PSI.

3.1.7.2. Les mécanismes de la phase sombre :

La phase sombre correspond à la phase d'assimilation du CO_2 qui utilise les molécules énergétiques produites lors de la phase claire et qui est réalisée de manière cyclique. Ce cycle est appelé **cycle de Calvin** (Figure 12) et il se déroule dans le stroma du chloroplaste.

L'assimilation du CO_2 se fait en quatre étapes principales dont les trois premières se déroulent au sein du cycle de Calvin :

1. Fixation du CO_2 (carboxylation).
2. Réduction du carbone fixé.
3. Régénération de l'accepteur de CO_2 .
4. Synthèse des sucres.

A. Le cycle de Calvin.

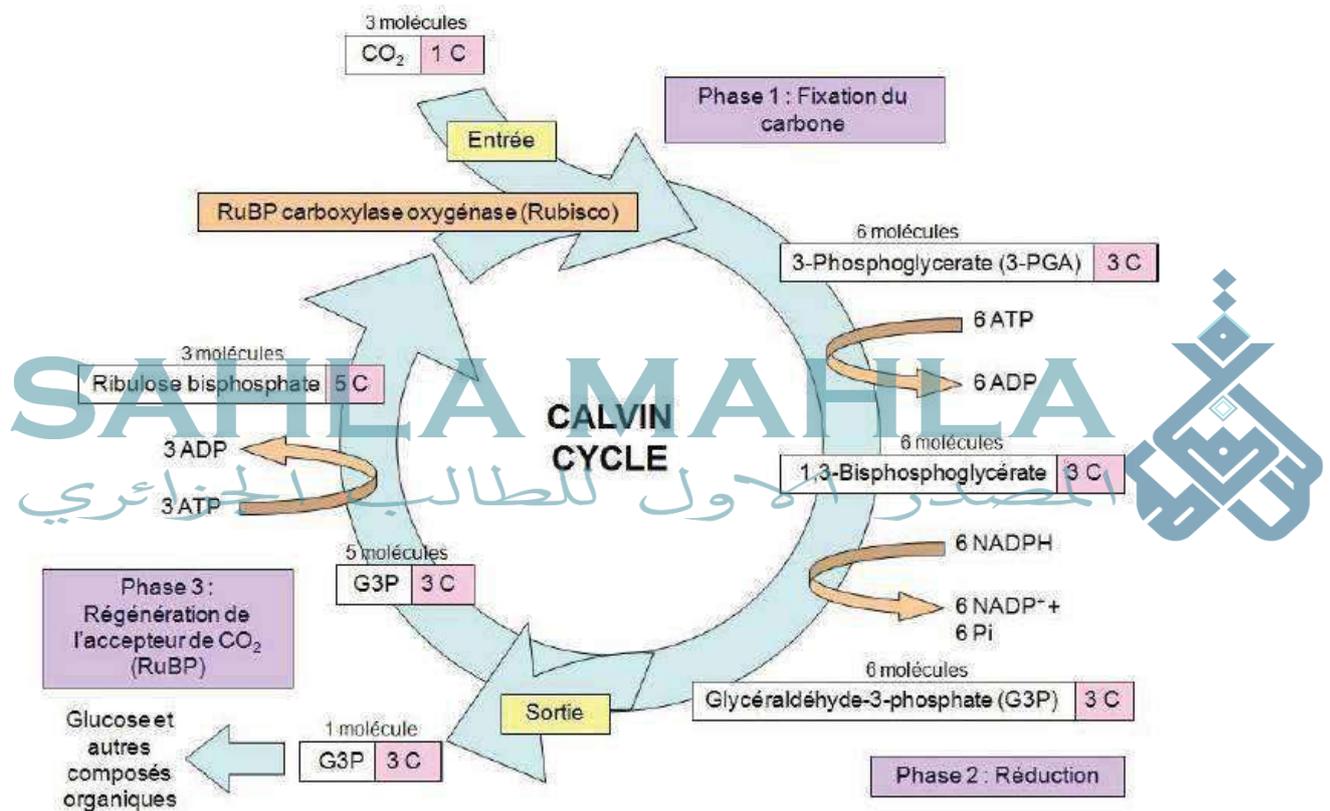


Figure 12 : Cycle de Calvin

a- Fixation du CO_2

La première molécule du cycle de Calvin est le **ribulose-biphosphate (RuBP)** possédant 5 carbones. La fixation du CO_2 sur cette molécule nécessitera l'utilisation d'une enzyme appelée la **Rubisco** (pour *Ribulose Biphosphate Carboxylase Oxygénase*). Cette enzyme permettra la formation d'une molécule instable à 6 carbones qui donnera rapidement deux molécules de **3-phosphoglycérate** à 3 carbones.

b-Réduction du carbone fixé

La deuxième phase du cycle de Calvin correspondra à la réduction du 3-phosphoglycérate. Celui-ci sera tout d'abord phosphorylé par de l'**ATP** pour donner l'**acide biphosphoglycérique**, qui sera lui-même réduit par le **NADPH** pour former le **3-phosphoglyceraldéhyde (G3P)** qui est un sucre.

c-Régénération de l'accepteur de CO₂

Le G3P formé peut avoir différentes destinées ; un sixième de celui-ci sera utilisé par la cellule comme composant glucidique (*cf. suite du cours*) et les cinq sixièmes restant seront utilisés pour poursuivre le cycle de Calvin. La reformation du RuBP, qui sera réutilisée pour fixer le CO₂, se fera en plusieurs étapes et nécessitera l'utilisation d'**ATP**.

B. Synthèse des sucres

Comme vu précédemment, un sixième du 3-phosphoglyceraldéhyde (G3P) produit dans le cycle de Calvin va entrer dans les réactions métaboliques de la plante, dans lesquelles ils seront principalement transformés en glucides :

- Soit sous forme de saccharose (α -Glu-Fruct) qui est la forme de transporté dans la sève élaborée.
- Soit sous forme d'amidon qui est la forme de mise en réserve (α -1,4-Glu). Bilan.
 - il faut 6 tours de cycle pour fabriquer 1 hexose
 - il faut donner 12 ATP pour phosphoryler 12 molécules de 3-P glycérate en 1,3 bisphosphoglycérate
 - 12 NADPH utilisés pour réduire 12 molécules de 1,3 bisphosphoglycérate en glyceraldéhyde 3-P

C. Bilan

Par molécule de CO₂ incorporée on a donc consommation de 3 ATP et de 2 NADPH. Or il se trouve que les glucides de base entrant dans les mécanismes énergétiques sont des hexoses. Pour la formation d'un de ces hexoses, il faut donc 6 molécules de CO₂ fixées, avec 6 tours de cycle et la consommation de 18 ATP et 12 NADPH. Le rendement est donc très faible.

3.1.7. 2. Rendement de la photosynthèse

1. ΔG° pour réduire le CO₂ en hexose = + 114 kcal /mole
2. Par tour de cycle de Calvin il faut 3 ATP et 2 NADPH or réduction NADP⁺ en NADPH : 2 e⁻, 2 NADP⁺ : 4 e⁻
 - Captage de 4 photons par PS II, puis 4 photons par PS I (soit 8 photons) 1 mole de photons (600 nm) a un contenu énergétique de 47,6 kcal
 - $8 \times 47,6 = 381$ kcal Efficacité de la photosynthèse : $114 \times 100 / 381 = 30 \%$ 5.

Chapitre IV: La germination des semences

4.1. Introduction

Le semis est un moyen efficace pour implanter rapidement sur le sol une couverture végétale de protection. Or l'utilisation réussie des semences ne peut être envisagée sans une connaissance précise de leur physiologie ; en effet, le semis correspond à une dispersion artificielle de la semence. Celle-ci représente l'organe de dissémination de l'espèce et, à ce titre, les mécanismes plus ou moins complexes de la reprise de son activité sont adaptés aux conditions des milieux potentiellement colonisables par l'espèce.

La graine provient du développement de l'ovule après la fécondation. D'autres organes, comme les fruits indéhiscents (akènes de laitue, de tournesol, ...), peuvent assurer le même rôle.

Les sacs embryonnaires (dans le nucelle) sont composés de huit noyaux haploïdes : l'oosphère et les noyaux polaires (ou accessoires). Ce sont ces derniers qui seront fécondés. Les noyaux accessoires vont donner un tissu à 3 N chromosomes (l'albumen) (Figure 13).

" Amande " + les téguments = graine plus péricarpe = fruit.

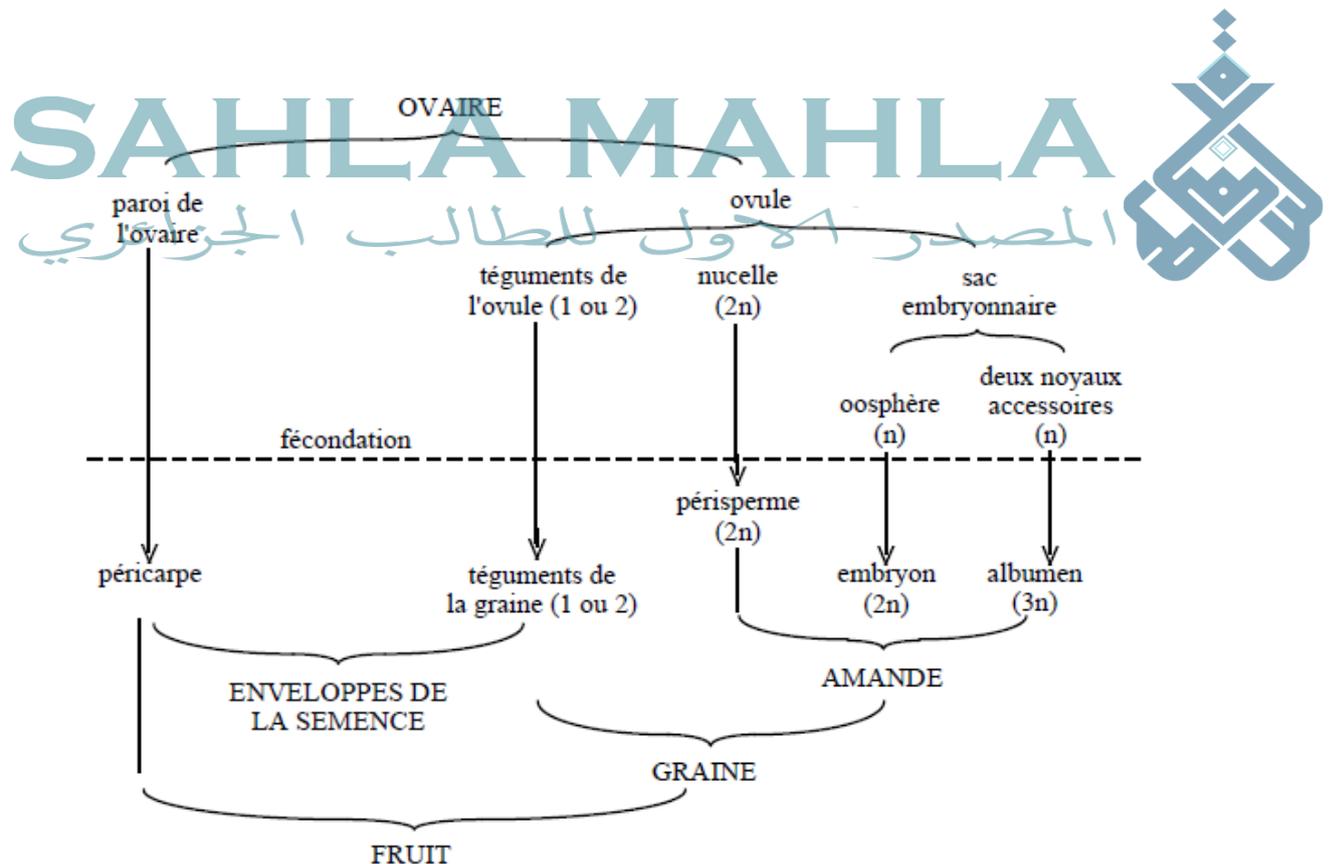


Figure 13 : Origine des diverses structures constitutives des semences (Côte, 1970).

4.2. Définition de la germination

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 qui sont assez bien identifiés aujourd'hui. En 1957, Evenari propose la définition suivante : « la germination est un processus dont les limites sont le début de l'hydratation de la semence et le tout début de la croissance de la radicule ».

Cette définition, adoptée par les physiologistes, est validée par des mesures d'imbibition et d'activité respiratoire effectuées sur des semences en cours de germination. Il est ainsi démontré que la germination comprend trois phases successives : la phase d'imbibition, la phase de germination *stricto sensu* et la phase de croissance (Figure 14).

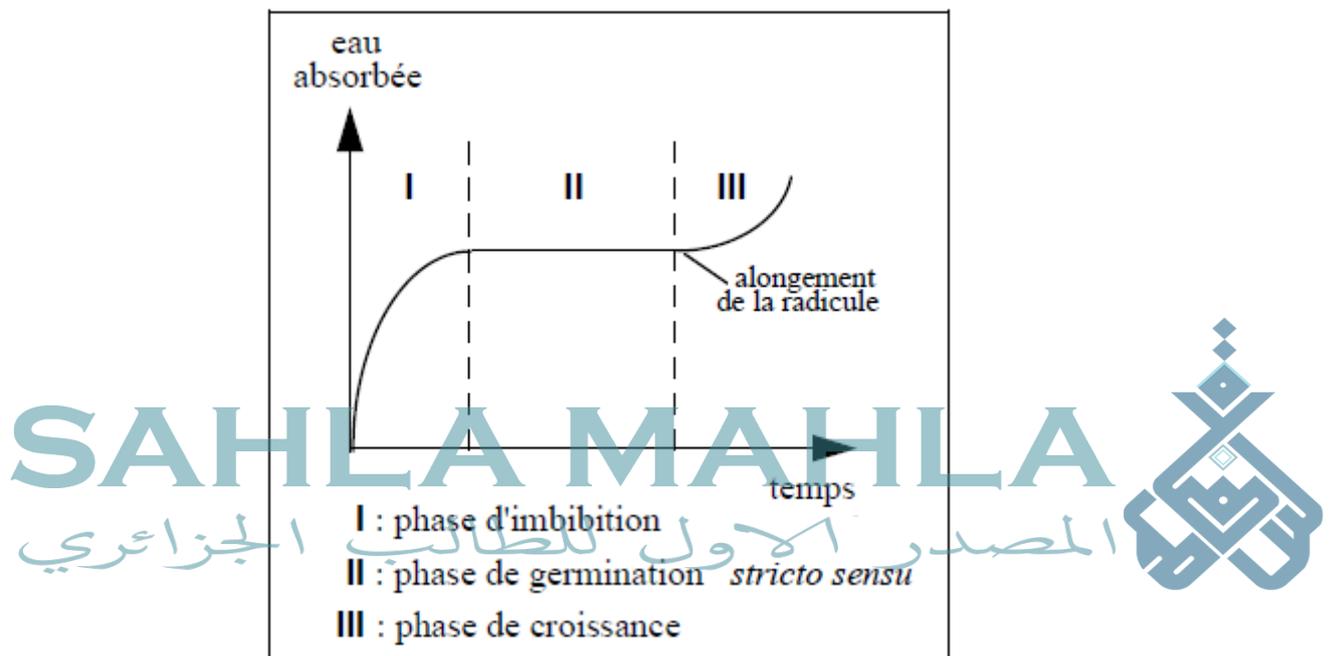


Figure 14 : Courbe théorique des trois phases de germination (Côme, 1982).

- **La phase I: phase d'imbibition:**

Elle correspond à une forte hydratation des tissus par absorption d'eau aboutissant au gonflement de la graine. 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.

- **Phase II : phase de germination sensu-stricto :**

Elle est 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 48), la graine peut être réversiblement déshydratée et réhydratée sans dommage apparent pour sa viabilité. Elle s'achève avec l'émergence de la radicule hors des téguments.

- **Phase III : phase de croissance :**

Elle est 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 radicule puis la tigelle (marquée par un changement profond d'état physiologique). 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 (Fig. phase III bis) par suite de l'épuisement des réserves. A ce stade, la déshydratation des tissus cause la mort de la semence. Le passage de la germination sensu-stricto à la croissance constitue donc l'étape la plus importante, c'est pourquoi les chercheurs essaient de préciser ce qui différencie ces deux phénomènes.

4.3. Conditions de la germination

4.3.1. Conditions externes

a) 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 possession de la maturité ne confère pas forcément le pouvoir de germer, car la graine peut être **dormante(1)**.

b) La longévité :

Elle 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. La conservation du **pouvoir germinatif (2)** dépend de cette longévité qui définit trois types de semences :

- *Graines microbiontiques* dont la longévité peut être de quelques jours (cas du saule ou du bouleau, par exemple).
- *Graines macrobiontiques* à l'opposé du cas précédent, elles ont une longévité d'une centaine d'années ou plus (certaines légumineuses sans oublier la légende des grains de blé des pyramides égyptiennes).
- *Graines mésobiontiques* dont la durée de vie est comprise entre un et dix ans (cas général)

1. **Dormance :** On parle de dormance lorsque des semences, placées dans de bonnes conditions de germination, ne germent pas

2. **Pouvoir germinatif = Faculté germinative**

4.3.1. Conditions internes

a) L'eau :

Indispensable, elle doit être disponible dans le milieu extérieur en quantités suffisantes mais aussi sous des liaisons faibles pour que la graine puisse l'absorber.

b) L'oxygène :

Indispensable à la germination même pour les plantes aquatiques qui disposent de l'oxygène dissout. D'où l'importance de l'aération des sols pour la levée des semis. Cependant les taux d'O₂ exigés par les embryons eux-mêmes, sont faibles de l'ordre de 0.5% mais il y a lieu de tenir compte de l'obstacle mis par les téguments et l'albumen à la diffusion des gaz. En fait pour ces derniers, étant des structures poreuses, elles retiennent des gaz adsorbés, qui seront libérés partiellement au moment de l'imbibition.

c) 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.

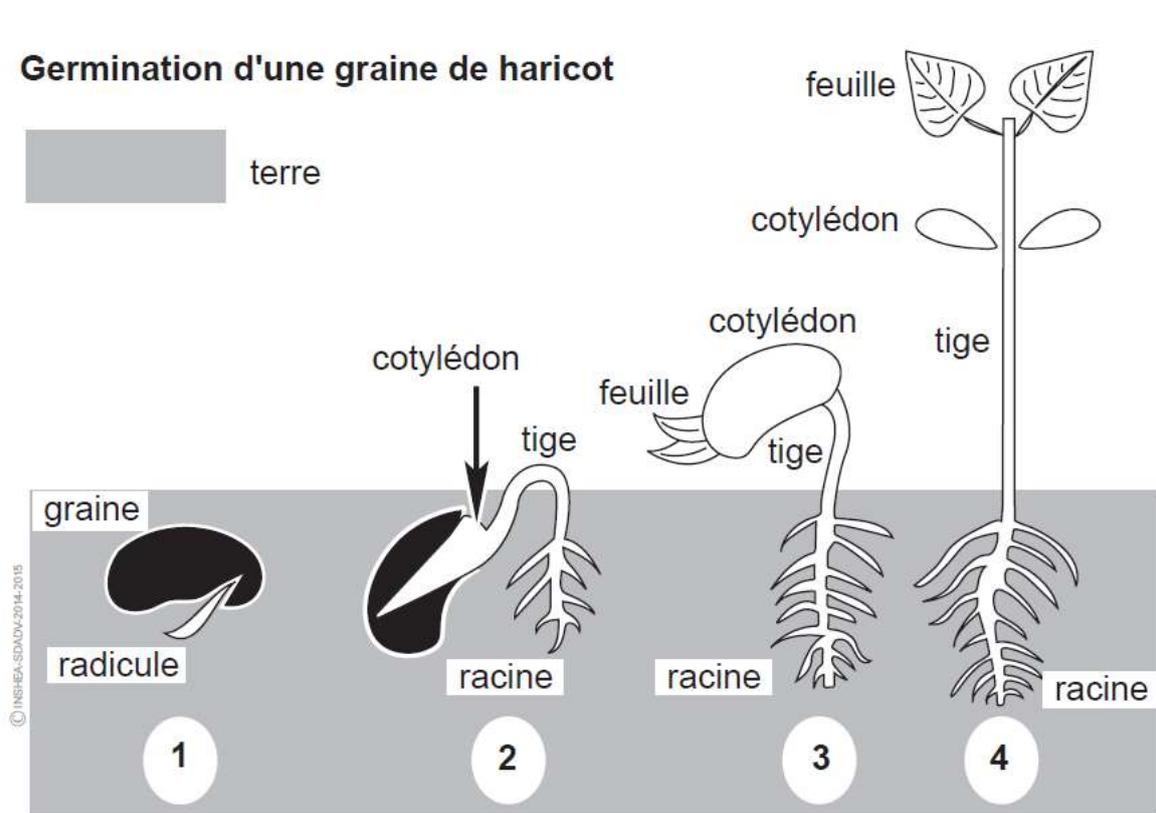
La gamme de températures compatibles avec la germination, varie d'une espèce à l'autre. Elle peut être étroite ou au contraire très large ; espèce des climats tempérés (températures basses = 0°C), espèces tropicales (températures élevées).

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 des plantes mères, l'état de maturité et l'âge de la semence. Elles dépendent beaucoup aussi des conditions auxquelles elles sont soumises entre le moment de leur récolte et celui où elles sont mises à germer.

d) 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.

Exemple :

SAHLA MAHLA

- ① La graine d'où se détache la radicule poussant vers le bas.
- ② La graine s'ouvre et dégage le cotylédon relié à une tige qui commence à sortir de terre. La tige est reliée aux racines sous terre.
- ③ Les racines se développent, hors de terre, le cotylédon a grossi, des feuilles apparaissent.
- ④ Les racines s'amplifient sous terre, le cotylédon se dédouble et les feuilles ont grandi.

Chapitre V: La croissance des plantes

5.1. Introduction

Contrairement à la plupart des animaux, les plantes présentent une croissance indéfinie, c'est à dire qu'elles poursuivent leur croissance tout au long de leur vie.

La croissance et le développement d'une culture représentent les transformations quantitatives et qualitatives qui accompagnent le parcours des différentes étapes de sa vie depuis l'implantation jusqu'à la maturité. Les connaissances actuelles en biologie et physiologie des plantes permettent de caractériser ces transformations pour chacune des étapes considérées et à différentes échelles.

5.2. Définition de la croissance

La croissance est l'augmentation continue de toutes les dimensions de la plante : longueur, largeur, diamètre, surface, volume et masse.

Elle se distingue du développement qui traduit l'acquisition de propriétés nouvelles. Cependant, cette distinction inappropriée, diffère quand il s'agit d'un être vivant animal ; le végétal ne peut croître qu'en formant de nouveaux tissus voire de nouveaux organes (Branches, rameaux, feuilles).

La croissance d'une plante entière (ou d'un couvert végétal) fait intervenir en fait deux phénomènes :

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

5.3. Croissance cellulaire et différenciation des tissus

Chez les organismes pluricellulaires, la croissance est obtenue non seulement par le grandissement des jeunes cellules, mais aussi par l'augmentation de leur nombre ; ce qui suppose que le développement de l'organisme ou d'un de ses organes, implique trois processus dans l'ordre de leur mise en œuvre : La mèresè, l'auxèse et la différenciation.

5.3.1. La mèresè :

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 surface du limbe).

5.3.2. 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.
- *Longitudinale* (élongation) : cas le plus général.

- *Radiale* : croissance en épaisseur.

Ce phénomène présente chez les végétaux des caractères particuliers du fait de la présence de la paroi pectocellulosique.

5.3.3. La différenciation :

C'est le processus qui permet aux cellules d'acquérir des caractères morphologiques particuliers, différents suivant les tissus. Ce phénomène est moins marqué chez les végétaux que chez les animaux où il s'agit d'une spécialisation plus poussée. Elle porte sur :

- La structure de la paroi (dépôt de cellulose, de lignine et de subérine)
- Sur le pouvoir de synthèse (tissus assimilateurs, sécréteurs et de réserve).
- Sur l'acquisition de potentialités physiologiques nouvelles telles que le virage floral (la mise à fleur).

On peut faire assimiler ce phénomène de différenciation à la morphogenèse qui est l'élaboration de nouvelles structures laquelle s'exprime au niveau des tissus (*histogenèse*), ou au niveau des organes (*organogenèse*) qui comprend la *rhizogenèse* (racines) et la *caulogenèse* (tiges).

Chez les végétaux, la mérése et l'auxèse sont le plus souvent séparées dans le temps et dans l'espace ; et comme la différenciation ne se s'opère qu'en deuxième stade, les méristèmes subsistent pendant toute la vie du végétal. Les plantes conservent donc une potentialité permanente de morphogénèse, ce qui représente une différence fondamentale avec les animaux chez lesquels, la différenciation ne concerne que les régions embryonnaires et la croissance de l'organisme s'arrête.

La courbe de croissance traduit une évolution de la plante. On peut observer quatre phases distinctes (Fig.16):

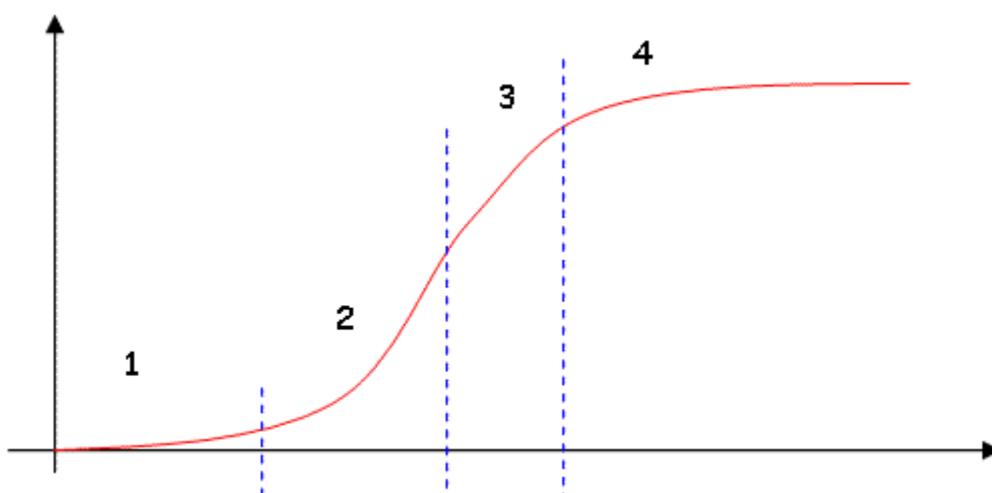


Figure 16 : Courbe de croissance des plantes.

1. La phase de latence.
2. La phase accélérée
3. La phase linéaire : Cette phase est parfois virtuelle
4. La phase de ralentissement : c'est une phase de sénescence.

5.4. Sites et formes de croissance

5.4.1. Au niveau de la plante et des organes

Grâce aux méristèmes, la croissance d'une plante est en générale indéfinie (notion de taille adulte pour des organes). Une plante est soumise à deux types de croissance :

- La croissance primaire : c'est l'élongation. Elle a lieu au niveau des méristèmes apicaux (organogènes). Ce type de développement est remarquable chez tous les végétaux : c'est le port herbacé des plantes.
- La croissance secondaire : c'est l'augmentation en épaisseur. Elle a lieu au niveau des cambiums ou de zones génératrices (histogènes). Ce développement n'a lieu que chez les plantes ligneuses. La croissance d'une plante présente des caractères commutatifs et itératifs (qui se répètent plusieurs fois).

Une plante a un développement indéfini, mais la capacité d'extension des organes est éphémère et leur grandissement se produit selon des gradients plus ou moins nets et diversement orientés suivant les organes et les espèces.

- ✓ **La racine** : l'élongation est réalisée par les méristèmes primaires (zone de croissance) qui permettent l'avancée dans le sol. Cette croissance (primaire) est localisée et polarisée. L'élargissement (croissance secondaire) se produit très en arrière de la coiffe.
- ✓ **La tige** : on ne trouve pas d'axe continu, mais des unités successives (les primarium + les ébauches foliaires). Ces unités permettent l'élongation simultanée sur plusieurs entre-noeuds successifs. Au niveau de la tige, on a un étagement du gradient de croissance qui est due à la persistance de cellules méristématiques résiduelles, juste au-dessus de chaque entre-noeuds.
- ✓ **Les feuilles** : l'augmentation est bidirectionnelle. L'accroissement en épaisseur est très réduit par rapport à la surface foliaire.
- ✓ **Les fruits** : c'est le résultat d'une hypertrophie due, dans le cas de la pomme de terre, à la croissance primaire, ou, à la croissance secondaire dans le cas du radis.

5.4.2. Au niveau cellulaire

L'extension symplastique est effectuée avec interposition constante de cellules isodiamétriques (isotropes) et cylindriques (anisotropes). L'extension apicale est intrusive ou extrusive. L'extension symplastique est constante : les cellules augmentent comme un ensemble solidaire, en maintenant leurs liaisons et leurs communications.

Le cas des extensions extrusives et intrusives : la cellule acquière une autonomie plus ou moins importante par rapport aux cellules voisines.

- **Extension extrusive** : les cellules épidermiques (ou du rhizoderme) vont donner des poils (ex : les fibres du coton).
- **Extension intrusive** : elle se déroule vers l'intérieur des organes, au niveau de la lamelle moyenne (ex : les fibres de lin). L'augmentation du nombre d'individus (cellules) entraîne une augmentation des dimensions (surface, masse, ...) d'un composé particulier. Pour la majorité des végétaux, on observe une augmentation de quelques centimètres par jour, avec toutefois, quelques exceptions : les asperges, 30cm/j ; les bambous, 60cm/j ; les champignons, 5mm/min.

5.5. Influences des facteurs et conditions du milieu

5.5.1. Facteurs de croissance

Ce sont les éléments internes (liés à la plante) et externes (liés au milieu) qui interviennent dans la fabrication de la matière sèche ; ils ont une action quantitative donnant lieu à un bilan d'énergie et de matière :

- Energie solaire ;
- Eléments minéraux ;
- Eau ;
- Température.

5.5.2. Conditions de croissance

Les processus de fabrication de matière sèche, et donc l'utilisation des facteurs de croissance, peuvent se dérouler sous certaines conditions et être limités sous d'autres.

Exemples :

- température suffisante permettant de déclencher les processus comme la germination, le développement foliaire et l'extension racinaire ;
- régulation thermique, conditions hydriques et ouverture stomatique ;
- aération autour des racines pour la diffusion de l'oxygène ;
- état structural permettant la croissance des racines ;
- forte concentration en sels entraînant la toxicité des plantes.

Ces conditions sont souvent en interaction ; leur *lois d'action sont mal connues* et elles jouent fréquemment par des *effets seuils*. L'eau est à la fois facteur et condition de croissance.

La plupart des plantes cultivées connaissent des phases sensibles et des stades critiques de croissance et de développement lorsque les états du milieu imposent des limitations à ces processus. Ces contraintes de milieu (stress hydrique, stress thermique, stress minéral, stress salin, etc.) peuvent entraîner des conséquences irréversibles et souvent dommageables pour le rendement.

5.6. Hormones de la croissance et du développement

5.6.1. Définition d'une hormone

Composé organique qui, synthétisé dans *une partie* de la plante et *transloqué* dans une *autre partie*, cause une réponse physiologique, à de *très faibles concentrations* (1|LIM et moins).

NB : *Il existe des composés qui entraînent des réponses physiologiques importantes mais qui ne sont pas des hormones naturelles, tels que :*

- *ion K⁺, inorganique,*
- *2,4-D, auxine synthétique,*
- *saccharose, composé synthétisé puis transloqué mais jouant à forte concentration.*

5.6.2. Nature et fonctions des hormones naturelles

Il existe cinq groupes d'hormones naturelles :

- Au moins une auxine, ou acide indol-3-acétique (IAA),
- Plusieurs gibbérellines (GA_j, GA₂,..., GA_n),
- Plusieurs cytokinines (CK),
- Acide abscissique (ABA) et composés inhibiteurs,
- Ethylène.

a/ Les auxines

Celles-ci sont essentiellement produites dans les méristèmes et régions de croissance active au niveau des parties aériennes. Elles se trouvent dans la plupart des tissus de la plante y compris dans les feuilles en sénescence. Le transport des auxines se fait dans le phloème, des parties aériennes vers les parties racinaires, mais également de cellule à cellule (transport orienté).

Les auxines activent l'élongation des coléoptiles et des tiges et favorisent le phototropisme et le géotropisme. Elles jouent un rôle important dans l'initiation et la formation des racines adventives et dans la différenciation du xylème. Par contre, elles inhibent l'élongation racinaire. La croissance des bourgeons axillaires est également inhibée par le maintien de la **dominance apicale**, qui est sous le contrôle des auxines. Enfin elles retardent la sénescence des feuilles et la chute des fruits.

La production des auxines est inhibée par la déficience en zinc et en phosphore, elle est favorisée par les gibbérellines et les cytokinines, qui en stimulent le transport.

L'effet des auxines peut varier selon leurs concentrations, le type de cellules et le stade de développement de la plante.

b/ Les cytokinines

Celles-ci sont synthétisées dans les apex des racines, mais on les trouve aussi dans les parties aériennes, les semences et les fruits n'ayant pas atteint la maturité physiologique. Elles sont transloquées dans le xylème depuis les racines jusqu'aux parties aériennes. Au niveau de celles-ci, les cytokinines circulent lentement de cellule à cellule.

Les cytokinines jouent un rôle important dans la germination et favorisent la division cellulaire. Elles activent l'initiation des feuilles, des tiges et des stolons, et favorisent l'extension des feuilles et des cotylédons ainsi que la translocation des assimilats.

Leur rôle dans la transpiration est également rapporté. Les cytokinines inhibent la sénescence des feuilles et permettent la levée de la dormance des graines ainsi que celle de la dominance apicale des bourgeons axillaires chez certaines plantes.

Les facteurs affectant la synthèse, la translocation et l'activité des cytokinines sont peu connus. Cependant 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.

c/ Les gibbérellines

Celles-ci sont synthétisées dans les apex racinaires. On les trouve aussi dans les semences, les jeunes feuilles et les tiges. Leur transport des racines aux parties aériennes se fait dans le xylème. Le transport des gibbérellines au niveau des parties aériennes se fait aussi de cellule à cellule et, au niveau des feuilles, il se fait dans le phloème.

La germination des semences, l'élongation des tiges, l'expansion des feuilles, la floraison des plantes de jours longs et la croissance des fruits sont des processus physiologiques qui sont activés par les gibbérellines. Elles lèvent la dormance des semences et la dominance apicale. Mais elles inhibent la sénescence des feuilles et la maturation des fruits.

La synthèse des gibbérellines dans les racines et leur transport vers les parties aériennes sont inhibés par l'excès d'eau et par l'effet des jours courts.

d/ L'éthylène

Celui-ci est produit par toutes les parties de la plante, plus particulièrement, dans les régions apicales en croissance active et au cours de la maturation des fruits. Étant donné sa nature volatile, son transport est peu connu, mais il circule des racines vers les parties aériennes.

La maturation des fruits, la sénescence des feuilles et la chute des organes ainsi que la levée de la dominance apicale des bourgeons axillaires sont les principaux effets produits par l'éthylène. Cette hormone 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 et l'effet des autres hormones. Sa production est inhibée par la lumière et par des conditions d'anaérobiose. Le métabolisme de l'éthylène et son transport au sein de la plante sont peu connus.

e/ L'acide abscissique

La synthèse de l'acide abscissique se fait essentiellement dans la partie terminale des racines. On le trouve aussi dans les feuilles, les bourgeons, les semences, les fruits et tubercules. Cette hormone circule facilement au niveau des cotylédons, des feuilles et des racines. Le transport se fait de cellule à cellule dans les parties aériennes.

La fermeture des stomates, la sénescence des feuilles, l'abscission, la dormance des bourgeons, et la formation des tubercules et des racines adventives sont des effets bien connus

de l'acide abscissique. Son rôle dans la régulation stomatique en relation avec les réponses adaptatives des plantes au stress hydrique est essentiel.

L'acide abscissique 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. Mais le transport de cette hormone et son métabolisme ne sont pas encore clairement élucidés.

5.6.3. Rôle des phytohormones en agriculture

Les activités promotrices et inhibitrices des différentes hormones naturelles, et leur implication dans la régulation de la croissance et du développement, ont suscité l'intérêt de fabriquer au laboratoire des molécules de synthèse ayant des effets spécifiques.

Le cas le plus spectaculaire est celui de l'auxine synthétique ou 2,4-D, largement utilisé comme herbicide.

Plusieurs autres molécules de synthèse, de la famille des cytokinines, des gibbérellines et de l'acide abscissique sont actuellement disponibles pour diverses utilisations en agriculture : herbicides, régulateurs de croissance, inhibition de la germination, levée de la dormance, levée de la dominance apicale, retard de la sénescence, etc.

L'application d'un produit tel que le cycocel (CCC) permet une meilleure répartition des assimilais entre les fruits qui sont, de ce fait, de tailles homogènes.

Dans le cas des céréales, l'application des molécules de synthèse de cette nature permet un développement adéquat des épis et un remplissage homogène des grains.

SAHLA MAHLA

المصدر الأول للطالب الجزائري

