

Cours de physiologie végétale

La physiologie végétale est la science biologique qui étudie les fonctions organiques sous lesquelles la vie se manifeste et se maintient sous sa forme individuelle. Elle étudie principalement le métabolisme, la photosynthèse, la nutrition hydrique et minérale, la croissance, la floraison et la germination.

Partie I : Développement et croissance

Chapitre 1 : Germination des graines

I.1.1/ Rappel sur la graine

La graine est la structure qui contient et protège l'embryon végétal de certaines plantes. Elle est souvent contenue dans un fruit qui permet sa dissémination.

La graine permet à la plante d'échapper aux conditions d'un milieu devenu hostile en attendant le retour de circonstance favorable. Elle a un rôle de protection du nouvel individu grâce à son enveloppe durcie, et de nutrition grâce à des réserves de substances nourricières. Organe déshydraté (10% d'eau), grande résistance aux agents physiques et chimiques (résistance au froid ou aux températures élevées). Elle joue un rôle capital pour l'alimentation humaine. La figure 1, nous montre le schéma d'une coupe de graine chez les légumineuses (haricot).

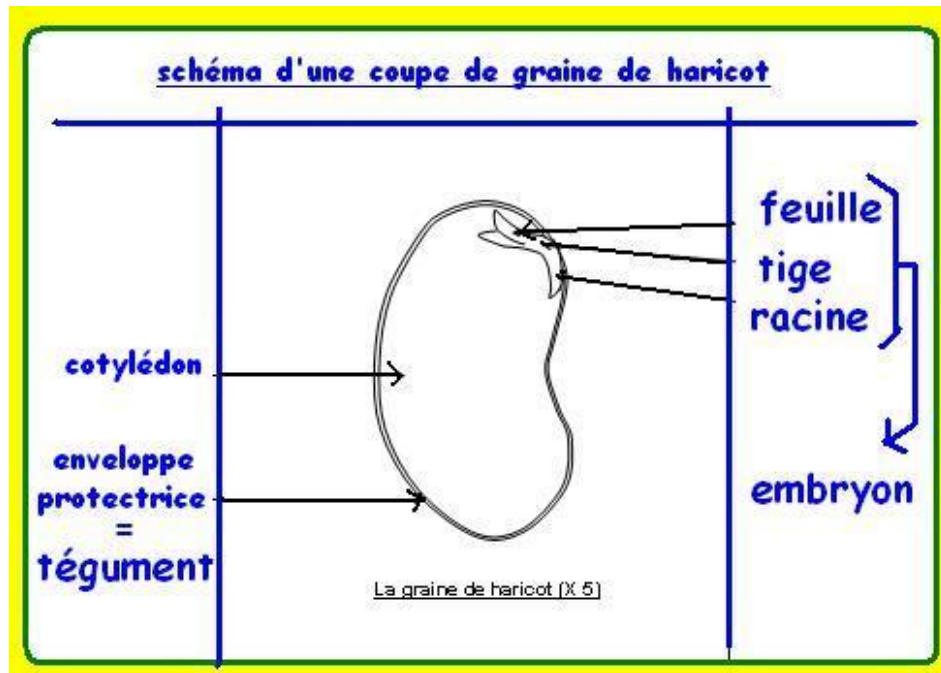


Figure 1. Schéma d'une coupe de graine d'haricot

La graine est formée par :

A/ Le Tégument : tissu protecteur, constitué d'une couche de plusieurs cellules et entoure l'embryon et ses réserves. Il a un rôle de protection et d'échange avec le milieu externe.

B/ l'albumen : Est un type de tissu de réserve nutritive de la graine chez les angiospermes. Lors de double fécondation, un des anthérozoïdes (gamète male) fusionne avec deux noyaux polaires contenus dans le sac embryonnaire (albumen est polyploïde), tandis que le 2 anthérozoïdes (gamète male) féconde l'oosphère, pour former l'embryon. Il peut contenir toutes les réserves nutritives, qui seront utilisées par l'embryon lors de la germination. Les graines de ce type sont dites « albuminées » (Exemple : Poacees, Liliacées et Arecacees : palmier) et les cotylédons sont très minces. Ou au contraire, les graines « Exalbuminées », les réserves sont stockées

directement dans les cotylédons, comme haricot (Exemple : Fabacées, Cucurbitacées et les Rosacées). L'albumen est très réduit.

C/ l'embryon : Partie essentielle de la graine, c'est le jeune végétal à son premier état.

Dans la graine mure, l'embryon comprend trois parties :

- La radicule : Qui deviendra la racine,
- la tigelle ou coléoptile : germe de la tige
- Gemmule : qui constitue les premières feuilles végétales (épicotyle).

D/ les cotylédons : Sont chargés de divers types de réserves, protéines, lipides et sucres. Ces réserves qui se trouvent sous formes complexes, sont dégradées au cours de la germination, par des enzymes. Les petites molécules issues de cette hydrolyse sont transportées vers l'embryon, qui les utilise pour continuer son cycle de développement. Les réserves contenues dans la graine, diffèrent d'une espèce à une autre.

I.1.2/ La germination des graines

Est le phénomène par lequel l'embryon contenu dans la graine sort de sa période de vie ralentie et se développe grâce aux réserves de la graine. Il existe deux types de germination :

Germination épigée (germination aérienne) : lorsque les cotylédons sont au-dessus du sol, on parle alors de germination épigée (Exemple : dicotylédones : haricot).

Germination hypogée (germination dans le sol) : Lorsque les cotylédons sont dans le sol, on dira que la plante à une germination hypogée (généralement les monocotylédones : graminées et liliacées).

I.2.1.1/ Phénomène physiologique et biochimique de la germination

La germination est formée de 3 phases :

1/ Phase d'imbibition de la graine : C'est – à- dire, l'absorption d'eau par la graine. La graine se gonfle, l'enveloppe se rompt. Cette entrée d'eau est accompagnée d'une augmentation de la consommation d'oxygène attribuée à l'activation des enzymes mitochondriales. Cette étape nécessite des dizaines d'heures (12 heures).

2/ Phase de germination stricte (Phase de germination stricte) : L'entrée d'eau dans la graine solubilise les minéraux, active et véhicule les enzymes, permettant l'hydrolyse des réserves nutritives : les macromolécules (protéines, lipides complexes, amidon) seront dégradées par les enzymes pour libérer les petites molécules (acides aminés, acides gras et glucose) afin de produire de l'énergie sous forme d'ATP. Les besoins en eau et en oxygène sont stables durant cette étape. La présence d'eau et d'oxygène permettent l'activation des processus respiratoires et mitotiques. Elle peut durer 36 heures. Cette phase se termine avec la percée du tégument par la radicule.

3/ Phase de croissance : Elle correspond au développement de l'embryon en plantule. Après l'apparition des racines, tiges et feuilles, la plantule rentre dans la phase de croissance. La quantité d'eau et d'oxygène est importante pour permettre la respiration et la synthèse de nouvelles enzymes.

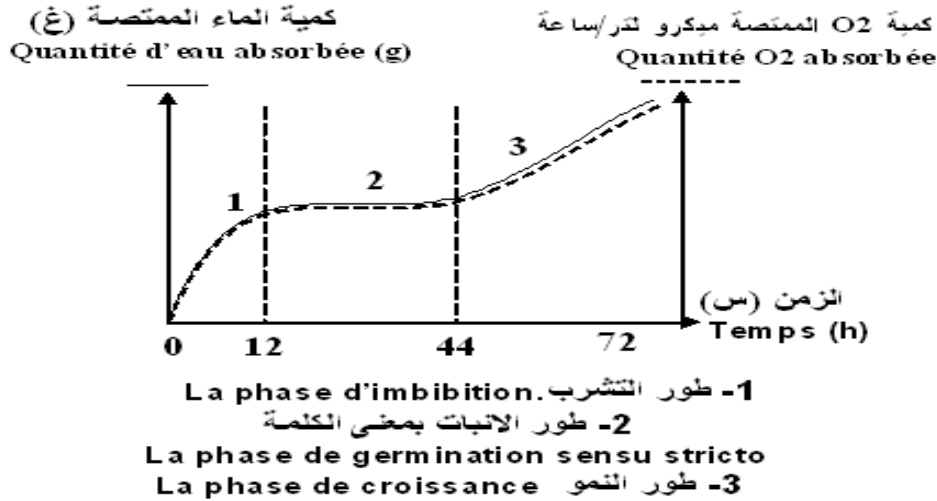


Figure 2 : Différentes phases de la germination

I.1.3/ Facteurs influençant la germination

La germination des graines dépend des facteurs externes et internes :

I.1.3.1/ Facteurs extrinsèques

A/ L'eau : pour faire germer les graines, l'eau doit être présente en quantité suffisante sous forme liquide : si l'eau manque, la germination ne peut se faire. Par contre s'il y a trop d'eau, l'embryon sera asphyxié. L'eau permet la division des cellules.

B/ Lumière : certaines espèces sont plus ou moins sensibles à l'intensité de la lumière. On dispose de 3 catégories :

1/ semences photosensibles positives : la germination est favorisée par la lumière.

2/ semences photosensibles négatives : la germination à l'obscurité. Exp : les liliacées

3/ semences photosensibles neutres : la germination à l'obscurité et à la lumière.
Exemple : les plantes cultivées (céréales, trèfles, concombre.....)

C/ Température : la température agit sur l'activité enzymatique. Des températures élevées peuvent empêcher la diffusion de l'oxygène. Les graines des céréales (blé, orge) préfèrent germer dans le sol à la température entre 0 et 7 °C (les graines ne germent pas à partir de 25 °C), les crucifères (Choux, navet) germent à la température entre 5 et 10 °C. La température optimale de germination se situe entre 15 et 27 °C. La luzerne germe à 21 °C.

D/ L'oxygène : Élément indispensable aux activités métaboliques. Les températures élevées diminuent la solubilité de l'oxygène dans l'embryon. La présence fréquente de composés Phénoliques dans les téguments diminue la quantité d'oxygène disponible pour l'embryon : quant la T° augmente, la solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue, alors que l'oxydation des phénols augmente (véritable piège à oxygène). Même avec une faible quantité d'oxygène, la germination peut se faire.

I.1.3.2/ Facteurs intrinsèques

Se sont des facteurs liés à la graine. Il faut que la graine soit mûre. Elle doit être saine (intacte), l'embryon vivant, et apte à germer (non dormante). Parfois, malgré que toutes les conditions soient réunies, la graine ne germe pas (phénomène de dormance).

a/ Contrôle de la germination par les gibbérellines (hormones) :

Les gibbérellines sont des terpènes tetracycliques (possédant 19 atomes de carbones : C₁₉H₂₂O₆), synthétisés au niveau des jeunes tiges, feuilles et racines. Elles

sont transportées par le xylème et le phloème. Les gibbérellines stimulent la germination en induisant les enzymes qui affaiblissent les barrières des tissus tégumentaires. Ces hormones migrent vers la zone d'aleurone (riche en protéines), permettant l'activation des enzymes (amylases, lipases et protéases) et augmente aussi la vitesse de diffusion de l'amylase de la zone d'aleurone vers l'amidon pour le dégrader afin de libérer le glucose. Les protéines de réserves sont essentiellement des albumines et les globulines.

AmidonAmylose.....glucose

Lipides..... triglycerides..... glycerol + acides gras

Protéines..... Peptides..... Acides aminés

b/ Longévité des graines

Est la capacité d'une graine à germer après sa maturation. Elle dépend de l'espèce. Cette longévité est de quelques mois pour le peuplier (*populus*) et ulmus (moins de 6 mois), de quelques années pour l'oignon, ail, carotte et épinard (1-3 ans), céréales, tomates (5 à 10 ans). Elle dépasse rarement quelques années pour les graines dont les réserves sont riches en lipides, car ces composés s'oxydent rapidement et devient toxiques (rancissement), comme la noix, tournesol et les noisettes. Par contre, les graines riches en protéines, présentent une longévité importante, comme le genre *Medicago* (luzerne), *Pisum* (Basilic), *Phaseolus* (Haricot), (10 – 25 ans). D'autres genre, tel que *Brassica* (Choux) peut atteindre 50 ans.

Tableau I : Composition de certaines graines de plantes

Graines	Protéines	lipides	Glucides	Sels minéraux
Blé	9 - 14	1,5 - 2	68 - 72	1,5 – 2,6
Orge	9 - 13	1,3 - 2	66 - 74	1,8 – 3
Pois	21 – 24	15 – 20	45 – 54	2,8 – 3,8
Haricot	35 - 40	3 - 6	25 - 28	2 – 2,5
Noix	14 – 16	53 – 55	11 – 15	1,6 – 2,3

I.1.4/ La dormance des graines

Est le blocage de la germination d'une graine intacte et viable malgré des conditions environnementales favorables.

I.1.4.1/ Les différents types de dormance des graines

La dormance morphologique (Embryonnaire) : l'embryon est dormant au moment de la récolte des semences (embryon sous développé) : à cause de sa malformation du aux conditions climatiques. Graine est impossible à germer.

La dormance physiologique : Est la forme la plus répandue, existant chez les gymnospermes et chez la majorité des angiospermes. Dans ce cas, les embryons sont simplement petits et leur développement avant la sortie de radicule nécessite beaucoup

de temps. Cela est dû aux mauvaises conditions externes et à la concentration élevée de certaines hormones (ABA).

La dormance physique : est causée par la structure ou la composition des téguments, qui sont imperméables à la rentrée d'eau (barrière physique) et d'oxygène (barrière chimique : piégeage de l'oxygène par les composés phénoliques), ou les téguments sont durs.

I.1.4.2/ Levée de la dormance des graines

On utilise généralement la méthode de l'alternance des températures :

- Mettre les graines pendant 5 jours au sec dans l'obscurité
- Mettre les graines pendant 3 jours au frigo
- Mettre les graines pendant 3 jours au congélateur

Certaines graines nécessitent d'autres méthodes pour lever la dormance :

- passage des graines dans le système digestif des animaux : exemple : graines du figuier et de l'olivier (Oiseaux).
- les plantes des zones tempérées : passage des graines dans la glace
- les plantes des zones tropicales : passage des graines dans un milieu à température élevée.

Chapitre 2 : La floraison

La fleur est l'organe le plus complexe de la plante avec des parties stériles et fertiles. Elle est le siège de la reproduction sexuée. La fleur provient de l'ovule fécondée.

I.2.1/ Les différentes parties de la fleur

I.2.1.1/ Les parties stériles (Périanthe)

a/ Les sépales (Calice : L'ensemble des sépales): souvent chlorophylliens et protège (rôle de protection) la fleur.

b/ Les pétales (Corolle : L'ensemble des pétales): sont généralement plus grands que les sépales, très colorés et présentes des structures très variées qui ont pour rôle d'attirer les pollinisateurs.

I.2.2/ Les parties fertiles

a/ L'Étamine (Androcée): se sont des pièces fertiles mâles. Elles sont formées du filet (sorte de tige supportant l'anthere) et des anthères (figure 3). Ces anthères comportent les grains de pollen, qui contiennent les gamètes mâles. L'ensemble des étamines forme l'androcée.

b/ Pistil (gynécée) : Elle est formée de stigmate (rôle est de recueillir le pollen), du style (sorte de tige supportant le stigmate) et de l'ovaire (figure 3). L'ovaire contient les carpelles qui portent les ovules (dans lesquels se trouve une oosphère : gamète

femelle). Ces carpelles sont des pièces fertiles femelles. L'ensemble des carpelles forme le pistil.

Les fleurs sont donc très souvent hermaphrodites (chaque fleur possède des organes mâles et des organes femelles : telles que le tournesol, la rose), néanmoins, certaines fleurs sont soit mâles (pas de pistil) soit femelle (pas d'étamine). Certaines plantes possèdent chaque type d'organe reproducteur sur des plants séparés (plants mâles et plants femelles). Ce sont des plantes **dioïques**, telles que le houblon, le houx ou l'ortie.

D'autres plantes possèdent les organes mâles et femelles sur le même plant, mais dans des fleurs séparées (fleurs mâles et fleurs femelles). Ce sont des plantes **monoïques**, telles que le maïs, le noisetier ou le châtaignier ou le blé.

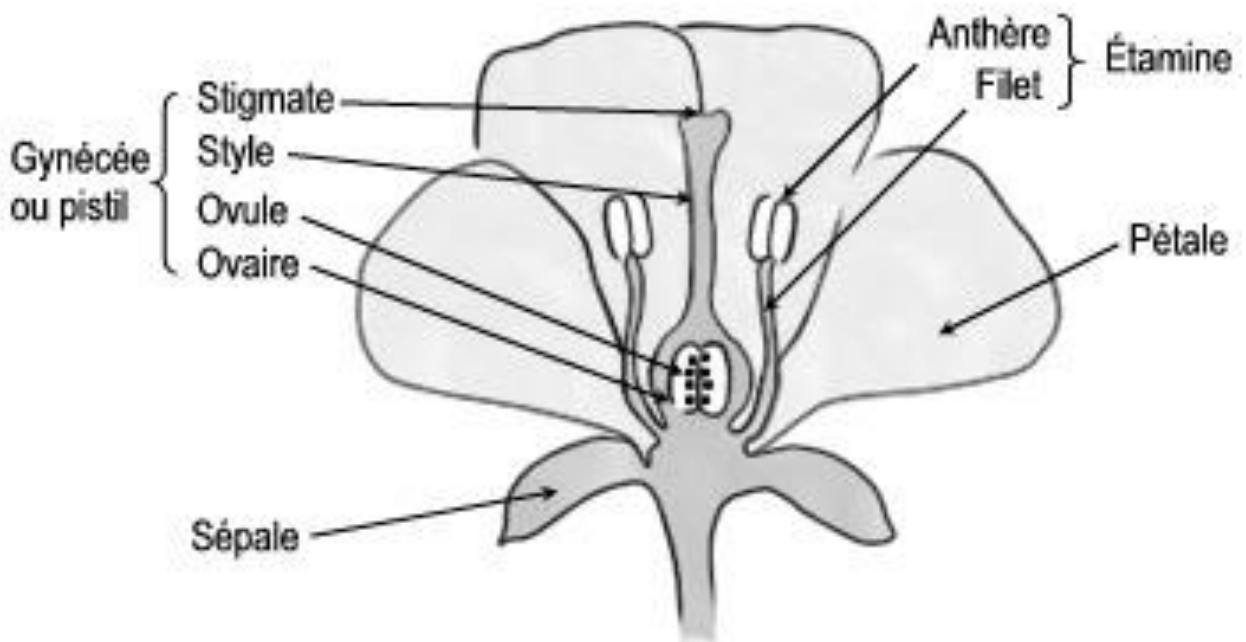


Figure 3 : structure de la fleur

I.2.3/ Condition de floraison : les conditions requises pour la floraison sont :

I.2.3.1/ Conditions internes

a/ Maturité de floraison : pour qu'une plante puisse fleurir, il faut qu'elle ait atteint un certain stade de développement végétatif, appelé maturité de floraison. Cette durée est variable selon les espèces :

Tomates : 13 Entre-nœuds. Seigle : 7 feuilles

Blé : 7 feuilles Chez les arbres : Poirier : 5 à 7 ans Chêne : 10 ans

Il ne serait pas bon pour une plante de fleurir avant qu'elle ait suffisamment développé son système végétatif (feuilles, racines) afin de permettre l'alimentation des organes le plus souvent non chlorophylliens : fleur, graine, fruit.

I.2.3.2/ Conditions externes

I.2.3.2.1/ La vernalisation (exigence thermiques)

C'est une transformation interne opérée par le froid qui confère à certaines plantes l'aptitude à fleurir. Elle est située généralement entre -2 et 5 °C.

Exemple : l'olivier a besoin chaque année de certains abaissements thermiques durant l'hiver sinon sa floraison est nulle (moyenne thermique de janvier inférieure à 10 °C).

I.2.3.2.2/ La photopériodisme

Désigne les réactions de certaines plantes à une alternance définie de la lumière et d'obscurité au cours d'un cycle de 24 heures. Elle est le rapport entre la durée du jour et de la nuit. On peut classer les espèces en 3 groupes :

a/ Espèces indifférentes : la floraison s'effectue quel que soit la durée de la photopériode (environ 5 h de lumière par jour). Exemple : Citronnier, pomme de terre, les petits pois, maïs

b/ les plantes de jour courts : Ils ne fleuriront que si la photopériode au moment de l'éclosion des bourgeons est inférieure ou égale à 12 heures d'éclairement. Exemple : le riz, soja, Cannabis

c/ les plantes de jour longs : qui ont besoin pour fleurir d'au moins 12 heures d'éclairement. Exemple : les pois, Fenouil, épinard.

Chapitre 3 : La croissance des végétaux

I.3.1/ Définition : La croissance est l'ensemble des processus biologiques qui se traduisent par une augmentation irréversible des dimensions et du poids d'un individu ou d'organes qui le composent. Elle résulte de deux processus, la division cellulaire (mérèse : augmentation en nombre de cellules) et l'expansion cellulaire (auxèse : agrandissement, élongation des cellules). Chez les arbres, la croissance dure toute la vie. Ils ont une croissance indéfinie au niveau des tiges et des racines.

I.3.1.1/ Mérèse (augmentation en nombre de cellules) :

Est une prolifération cellulaire qui consiste en une succession de divisions cellulaires ou mitose, qui s'opèrent dans les régions localisées (méristèmes).

I.3.1.2/ Auxèse (agrandissement, élongation des cellules) :

Est une augmentation des dimensions des cellules, soit par élongation (longitudinale), soit par radiale (croissance en épaisseur), soit par isodiamétrique (croissance à diamètre égaux).

Elongation cellulaire : L'eau rentre dans la cellule, le volume de la vacuole (eau + substances dissoutes : saccharose) augmente, la cellule est turgescente. Il en résulte une pression de turgescence, qui s'exerce sur toute la surface de la paroi par l'intermédiaire du cytoplasme. Cette pression de turgescence produit la force nécessaire au gonflement de la cellule et ainsi l'extension cellulaire.

La pression de turgescence vacuolaire et le relâchement de la paroi, permettent la croissance cellulaire.

I.3.2/ les différents types de croissances

A/ Croissance primaire

La croissance en longueur concerne tous les végétaux : dépend des saisons et coïncide en période printanière et estivale. Elle s'effectue à partir des bourgeons. Chez les arbustes et les arbres, les bourgeons sont dormants en hivers. Cette croissance a lieu au niveau des méristèmes apicaux. C'est le port herbacé des plantes.

B/ Croissance secondaire

Concerne que les espèces ligneuses (arbres et arbustes). Augmentation du diamètre des branches et des troncs. Correspond à l'ajout de couches successives de bois formant des cernes sous l'écorce. Cette croissance est discontinue. Elle commence au printemps et s'arrête à l'entrée de l'hiver.

I.3.3/ Les différents types de méristèmes

I.3.3.1/ Les méristèmes primaires

Sont localisés à l'extrémité des tiges (méristèmes caulinaires), des racines (méristèmes racinaires) et à la base des feuilles. Ils assurent la croissance en longueur. Ces cellules sont petites et parfaitement jointives (pas de méats). Elles possèdent un noyau central de grande taille. Mitochondries nombreuses, la vacuole est réduite.

I.3.3.2/ Les méristèmes secondaires

Ces méristèmes assurent la croissance des organes en largeur. Ils se rencontrent uniquement chez les angiospermes (dicotylédones) et les gymnospermes. Ces méristèmes sont constitués de deux assises génératrices : l'assise

subérophellodermique (Phellogène) et l'assise libéro-ligneuse (Cambium). L'assise subérophellodermique forme vers l'extérieur le suber ou le liège ayant un rôle de protection et vers l'intérieur le phelloderme ayant un rôle de réserve. L'assise libéro-ligneuse forme vers l'extérieur le liber (phloème secondaire) et vers l'intérieur le bois (xylème secondaire).

I.3.3/ Croissance des racines et des tiges

I.3.3.1/ Croissance racinaire

Lors de la germination, la croissance de la radicule forme la racine principale. Celle-ci s'allonge à partir de son extrémité (apex) et s'enfonce dans le sol. Sur cette racine principale, des ramifications se forment latéralement et constituent les racines secondaires, ainsi se constitue le réseau racinaire de la plante.

Les méristèmes primaires (Procambium) sont localisés à l'extrémité des racines (méristèmes racinaires). Ils se divisent par mitose en donnant d'autres cellules. Ces cellules sont celles du phloème primaire (conduction de la sève élaborée, rôle de soutien et de réserve) et du xylème primaire (conduction de la sève brute, rôle de soutien et de réserve), permettant ainsi la croissance en longueur. Les cellules du cambium (tissu secondaire) se divisent pour donner des cellules du phloème secondaire (conduction de la sève élaborée, rôle de soutien et de réserve) et des cellules du xylème secondaire. Le xylème secondaire et le phloème secondaire sont alternés. Par contre, le phellogène donne vers l'extérieur les cellules de suber (liège : rôle de protection) et vers l'intérieur les cellules de phelloderme (rôle de réserve), permettant ainsi la croissance en largeur.

I.3.3.2/ Croissance des tiges

Les méristèmes primaires (Procambium) sont localisés à l'extrémité des tiges (méristèmes caulinaires). Ils se divisent par mitose en donnant d'autres cellules, vers l'extérieur les cellules du phloème primaire (conduction de la sève élaborée, rôle de soutien et de réserve) et vers l'intérieur les cellules du xylème primaire (conduction de la sève brute, rôle de soutien et de réserve). Les cellules du cambium (tissu secondaire) se divisent pour donner des cellules du phloème secondaire (conduction de la sève élaborée, rôle de soutien et de réserve) vers l'extérieur et des cellules du xylème secondaire vers l'intérieur. Le xylème secondaire et le phloème secondaire sont superposés. Par contre le phellogène donne vers l'extérieur les cellules de suber (liège : rôle de protection) et vers l'intérieur les cellules de phelloderme (rôle de réserve), permettant ainsi la croissance en largeur. Le phloème contient des cellules conductrices de substances nutritives (élaborées). Il est constitué essentiellement de cellules vivantes. Le xylème est formé de cellules mortes.

I.3.3.3/ Croissance des feuilles

La croissance est bidirectionnelle. L'accroissement en épaisseur est très réduit par rapport à la surface foliaire.

I.3.4/ Contrôle de la croissance par l'auxine (hormone végétale)

L'auxine (AIA : Acide Indole Acétique) : molécule secrétée par les cellules de l'apex des tiges. Elle permet l'élongation des cellules : en permettant la plasticité des parois et l'activation des enzymes qui lient les liaisons des sucres de la paroi. Elle augmente la turgescence de la vacuole, et active les enzymes protéiques de la paroi.

Partie II : Nutrition

II. 1 : Nutrition hydrique

L'eau se trouve dans la nature sous 3 formes : liquide, solide (neige) et gaz (vapeur d'eau). Les plantes utilisent seulement l'eau sous sa forme liquide.

L'eau est formée de deux molécules d'hydrogène et d'une molécule d'oxygène.

L'eau est un solvant : Fait dissoudre plusieurs substances.

II.1.1 : Potentiel hydrique

Le potentiel hydrique est l'énergie nécessaire pour extraire l'eau contenue dans une solution (solution de sol, cytoplasme, vacuole). En effet, toute substance en solution aqueuse (ion ou molécule) exerce sur les molécules d'eau une force d'attraction. Plus la solution est concentrée et plus cette force d'attraction est forte, et moins les molécules d'eau ont le pouvoir de la quitter. Le potentiel hydrique noté Ψ représente donc le potentiel de l'eau à quitter un compartiment donné. Plus il est élevé (moins négatif) dans un compartiment, et plus l'eau a tendance à le quitter. Inversement l'eau a tendance à rentrer dans les compartiments ayant un faible potentiel hydrique (très négatif). Les molécules d'eau se déplacent toujours du potentiel hydrique fort vers le potentiel hydrique faible.

Une solution hypertonique a une concentration élevée en substances chimiques dissoutes (soluté), et donc un faible potentiel hydrique. Elle attire par osmose l'eau d'une autre solution. Une solution hypotonique a une concentration peu élevée en substances chimiques dissoutes (soluté), et donc un fort potentiel hydrique. Des solutions isotoniques ont des concentrations égales (iso-) de substances dissoutes.

Le potentiel hydrique d'une cellule végétale à deux composantes:

-Le potentiel osmotique ($\Psi\pi$)

- le potentiel de pression (Ψ_p)

$$\Psi = \Psi\pi(\Psi_s) + \Psi_p$$

(Ψ_s) = potentiel du aux solutés : le potentiel osmotique est égal à 0 dans l'eau pure (eau distillée), il sera toujours de valeur négative dans les cellules végétales. Il traduit la présence de substances dissoutes. Lié au nombre de particules solubles dissoutes dans l'eau ; Soluté augmente, (Ψ_s) (toujours négatif) diminue, donc Ψ_w = diminue

(Ψ_p) = potentiel de pression : Forces physiques exercées par l'eau sur l'environnement. Appelé aussi pression de turgescence. Il est toujours positif

Le potentiel hydrique permet de prédire les mouvements d'eau dans et hors des cellules.

Exemple 1 :

-Dans un milieu externe avec $\Psi_w = 0$ MPa

Intérieur de la cellule : (Ψ_p) = 0,5 MPa et (Ψ_s) = - 1,6 MPa

-L'eau rentre-t-elle dans la cellule ?

Réponse :

Calcul du potentiel hydrique de la cellule (Ψ_w)

$$\Psi_w = (\Psi_p) + (\Psi_s)$$

$$\Psi_w = 0,5 - 1,6$$

$$\Psi_w = - 1,1 \text{ MPa}$$

On doit comparer les deux potentiels hydriques (Cellule et milieu externe)

Le potentiel hydrique de la cellule ($\Psi_w = -1,1$ MPa) est inférieur à celui du milieu externe ($\Psi_w = 0$ MPa), donc l'eau rentre dans la cellule du milieu externe.

Exemple 2 :

-Dans un milieu externe avec $\Psi_w = -2,5$ MPa

Intérieur de la cellule : (Ψ_p) = 0 MPa et (Ψ_s) = - 2 MPa

L'eau rentre-t-elle dans la cellule ?

Réponse :

Calcul du potentiel hydrique de la cellule Ψ_w

$$\Psi_w = (\Psi_p) + (\Psi_s)$$

$$\Psi_w = 0 - 2 \qquad \Psi_w = -2 \text{ MPa}$$

Le potentiel hydrique de la cellule Ψ_w est supérieur à celui du milieu externe, de ce fait, l'eau sort de la cellule vers le milieu externe.

2. 1. 4/ transit de l'eau dans la plante

L'eau traverse la racine en empruntant 3 voies :

A/ en passant à travers la membrane des cellules = voie transcellulaire

B/ en passant de cellule en cellule par les plasmodesmes = voie symplaste

C/ en passant entre les cellules ou dans les cellules mortes = voie apoplaste

II. 2 : Nutrition minérale

La nutrition minérale de la plante intègre l'ensemble des mécanismes impliqués dans le prélèvement par les racines, le transport, le stockage et l'utilisation des ions minéraux nécessaires au métabolisme et à la croissance de la plante.

II.2.1/ Les éléments minéraux

II.2.1.1/ composition minérale des végétaux

La composition minérale d'un tissu se détermine sur le résidu sec, après minéralisation par voie humide. Les trois éléments caractéristiques des substances organiques (C. H. O) représentent en masse plus de 90% du résidu sec. Les autres éléments minéraux sont classés selon leur importance pondérale, en deux groupes :

Macroéléments : présents à des taux de l'ordre de quelques pour mille à quelques pour cent de la matière sèche de tissu

Oligoéléments : présents à des taux inférieurs à 1 pour mille (teneur de 1000 à 10000 fois plus faible).

Tableau II : les macroéléments et les oligoéléments

Macroéléments	Oligoéléments
Azote (N)	Fer (Fe)
Potassium (P)	Manganèse (Mn)
Calcium (Ca)	Zinc (Zn)

Magnesium (Mg)	Cuivre (Cu)
Soufre (S)	Bore (B)
Phosphore (P)	Aluminium (Al)
Sodium (Na)	Nickel (Ni)
Chlore (Cl)	Molybdène (Mo)
Silicium (Si)	Iode (I)
	Fluor (F)

II.2.2.2/ Rôle des éléments minéraux

II.2.2.2.1/ Rôle des macroéléments

A/ Phosphore (P) :

Constituant important des protéines phosphorées (Nucléoprotéines), un grand nombre de réactions métaboliques exigent des phosphorylations, Transfert énergétique : processus de stockage et de transport de l'énergie dans les cellules (ATP). Transmission des caractères héréditaires (acides nucléiques : ADN et ARN). La photosynthèse et la dégradation des glucides. Essentiel pour la floraison, grossissement des fruits et la maturation des graines. Le phosphate participe également au pouvoir tampon du cytosol, (PH=7,2). Disponible sous forme inorganique assimilable HPO_4^{-2}

Dans le sol, le phosphore, provient des roches, des dents et os d'animaux morts, des plantes mortes et micro-organismes. Il est mobile dans la plante, favorise le

développement des racines et doit être appliqué au début des cultures et agit pendant longtemps. La plupart des sols cultivables contiennent environ 180 à 720 Kg par hectare. Dans les sols acides, le fer et aluminium peuvent réagir avec le P et le rendre indisponible à la plante.

Carence : croissance ralentie, floraison et la maturation sont retardées, diminution de la production de protéines et vitamines. Malformation des feuilles, apparition de taches nécrotiques

B/ Potassium (K)

Le potassium (K^+) constitue le cation inorganique le plus abondant dans le cytosol de toute cellule végétale. L'ion principal des solutions cytoplasmiques. N'est pas un élément constitutif des glucides, lipides et protéines, mais joue le rôle d'activateur de différentes enzymes. Chez les plantes, il contrôle le potentiel hydrique et la pression de turgescence des cellules. Contrôle les mouvements cellulaires ou d'organes (ouverture des stomates). Assure l'équilibre acido-basique de la cellule. Améliore le rendement de l'assimilation chlorophyllienne et permet la résistance au gel. Augmente la pression cellulaire. Il est très mobile dans la plante, rôle primordiale dans le développement racinaire, dans l'absorption des cations (ions positifs : NH_4^+ , Ca^{+2} , Fe^{+2}).

On le trouve dans les roches et les argiles dans le sol. Les pommes de terre, les légumes en général et les betteraves sont plus exigeants que les céréales

Carence :

Apparition de taches brunes et jaunes sur les feuilles

Gout moins agréable des fruits et légumes

Réduction de la résistance au gel et à la sécheresse, mauvaise conservation des fruits et légumes, production de matière sèches restreintes (glucides, lipides et protéines).

Apparition de taches noires sur les fruits

C/ Calcium (Ca^{+2}) :

La cellule utilise le calcium (Ca^{2+}) en tant que cation divalent non toxique. Élément fondamental des parois cellulaires et de la vacuole des plantes. C'est lui qui donne la résistance tissulaire aux membranes pectiques. Il joue aussi un rôle dans la division cellulaire (mitose) et le maintien de la structure des chromosomes. Très abondant dans les feuilles et ne se déplace dans la plante, raison pour laquelle les applications tout au long de la saison sont nécessaires. Il est par contre très faiblement présent dans le cytosol. Régulation des échanges ioniques entre les racines et leur milieu. Il favorise la formation et la maturation des fruits et des graines. Nécessaire pour l'activité enzymatique (ATPases), Favoriser la croissance des jeunes racines en synergie avec les autres éléments

Carence : Feuilles déformées et nécrosées, systèmes racinaires peu développés, apparition de taches noires sur les fruits.

D/ Magnésium (Mg) :

Constituant de la chlorophylle (15 à 20% du Mg se trouve dans la chlorophylle), favorise la synthèse des pigments (carotènes et xanthophylles) chlorophylliens, entre dans la composition des pectines et des protéines. Favorise l'absorption du phosphore,

activateur d'enzymes en particulier celles qui sont à l'origine des protéosynthèses. Dans le sol, le magnésium se rencontre dans les minéraux silicatés, argileux et carbonatés.

E/ Soufre (S) : Constituant des acides aminés (Cystéine et Méthionine), des protéines, des lipides et des coenzymes. Entre dans la composition des phytochélatines (protéines qui detoxifient les métaux lourds). Il joue un rôle dans le métabolisme des vitamines. Certaines plantes comme, les légumineuses, liliacées et les crucifères sont riches en produits soufrés. Il est absorbé par les racines du sol sous forme de SO_4^{2-} .

F/ Chlore (Cl) : L'un des principaux ions responsable de la turgescence cellulaire, Nécessaire à la photosynthèse (transfert des électrons de l'eau à la chlorophylle). Sa carence sévère peut causer le non fructification des plantes.

G/ L'azote (N) : Est un élément nutritif essentiel à la croissance et développement des végétaux et donc à la production de biomasse pour les plantes cultivées (N importante : Croissance rapide et une couleur verte profonde). C'est un constituant des acides aminés, protéines, chlorophylle, hormones végétales, lipides complexes, acide nucléiques et de plusieurs vitamines. Les ions nitrates (NO_3^-), sont stockés dans la vacuole. Il participe ainsi au contrôle du potentiel osmotique et de la turgescence de la cellule. Il est le plus abondant dans les plantes.

Plus de 80 millions de tonnes d'engrais azotés sont utilisés chaque année dans le monde. L'azote est disponible sous forme organique (acide aminés : humus) et inorganique (minérale : Ammonium et nitrate et gazeux : N_2).

Sa carence : provoque la diminution marquée de la chlorophylle, d'où la chlorose (jaunissement) d'abord des vieilles feuilles, puis des jeunes (lorsque elle est sévère), suivie du ralentissement et de l'arrêt de la photosynthèse. Les organes des plantes sont petits et les rendements diminués. Quant la carence est sévère, les feuilles deviendront jaunes ou brunes et tomberont.

Malgré que l'azote est l'élément le plus abondant dans l'air (78%).

II. 3/ Nutrition azotée des plantes :

La Vie sur terre est influencée par la composition de l'atmosphère à travers le recyclage d'un élément, l'azote (N). Ce gaz est le premier en importance dans l'atmosphère terrestre (78%). Il s'y trouve sous sa forme moléculaire normale diatomique N_2 , un gaz relativement inerte (peu réactif). Les organismes ont besoin d'azote pour fabriquer des protéines et des acides nucléiques, mais la plupart ne peuvent utiliser la molécule N_2 . Ils ont besoin de ce qu'on nomme l'azote fixée dans lequel les atomes d'azote sont liés à d'autres types d'atomes comme par exemple à l'hydrogène dans l'ammoniac NH_3 ou à l'oxygène dans les ions nitrates NO_3^- . Le bilan global de l'azote est :

- 60% d'azote est issu de la fixation biologique de l'azote atmosphérique
- 30% de l'azote minéral
- 10% d'azote est issu des combustions et des éclairs.

Le cycle de l'azote est très complexe, le schéma suivant en présente une simplification.

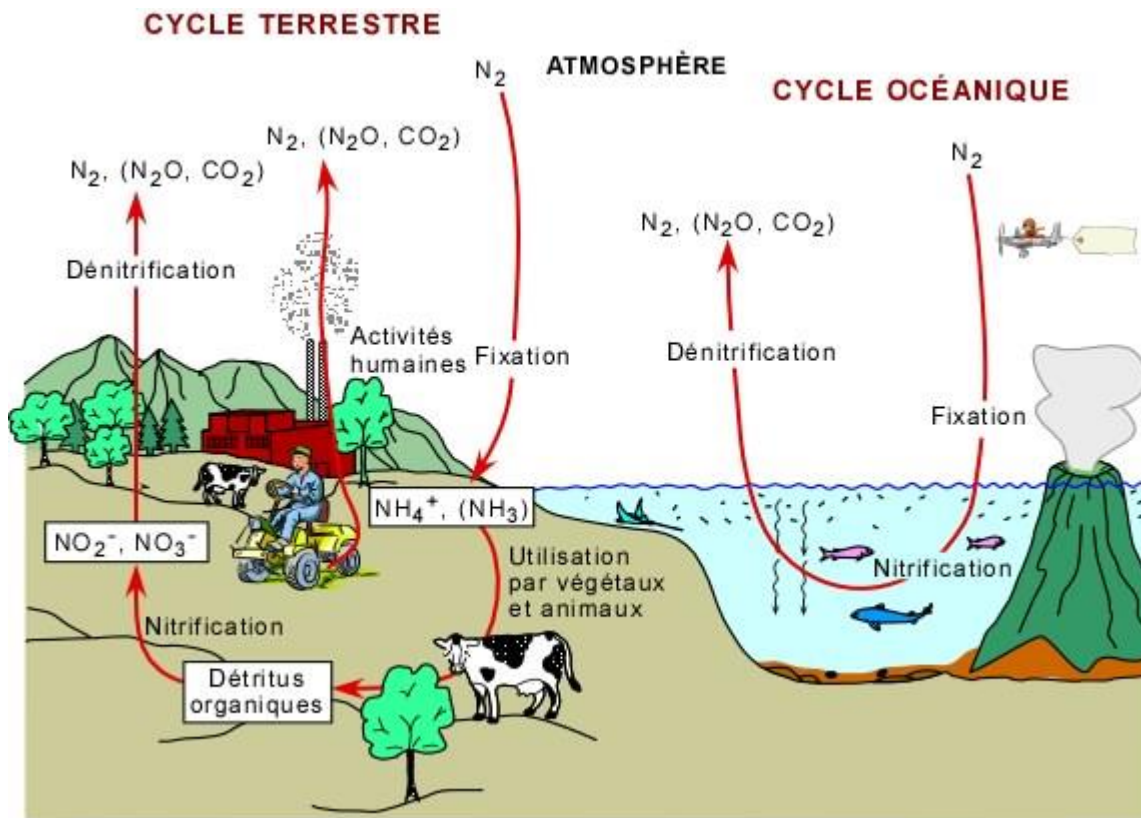


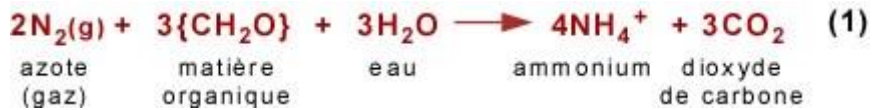
Figure 4 : Cycle de l'azote

II. 3.1/ Les différentes étapes du cycle de l'azote

Trois processus de base sont impliqués dans le recyclage de l'azote :

A/ la fixation de l'azote atmosphérique.

Cette étape correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux. Elle se fait par certaines bactéries qui vivent dans les sols ou dans l'eau et qui réussissent à assimiler l'azote diatomique N_2 . Il s'agit en particulier des cyanobactéries, Azotobacters, Chlostridium (bactéries libres) et de certaines bactéries vivant en symbiose avec des plantes (entre autres, des légumineuses : Rhizobium). La réaction chimique type est:

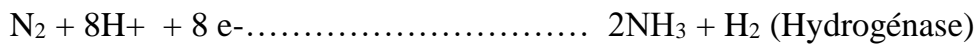


L'ammonium est la forme assimilable par les plantes

Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux:



L'enzyme clé de la fixation d'azote atmosphérique est la Nitrogénase. Chez les cyanobactéries, la Nitrogénase est localisée dans les hétérocystes.

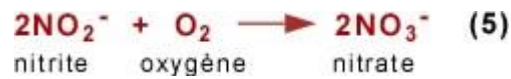


La réaction nécessite un apport d'énergie de la photosynthèse (cyanobactéries et symbiotes de légumineuses). Cette fixation tend à produire des composés ammoniacés tels l'ammonium NH_4^+ et son acide conjugué l'ammoniac NH_3 . Il s'agit ici d'une réaction de réduction qui se fait par l'intermédiaire de substances organiques notées $\{\text{CH}_2\text{O}\}$ dans l'équation 1.

B/ La nitrification : transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , NH_3) en NO_x (soient NO_2^- et NO_3^-), des nitrites et nitrates. C'est une réaction d'oxydation qui se fait par catalyse enzymatique reliée à des bactéries dans les sols et dans l'eau. La réaction en chaîne est de type:



soit:



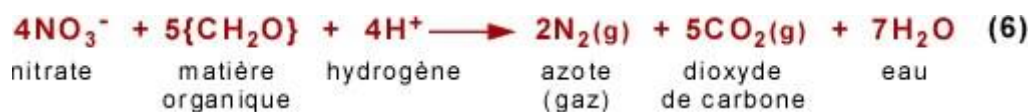
Nitrosomonas et nitrococcus



Nitrobacter



C/ La dénitrification : Elle consiste à retourner l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N_2 , avec comme produit secondaire du CO_2 et de protoxyde d'azote N_2O (gaz à effet de serre) et les oxydes d'azote (NO , NO_2) qui contribuent à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère. Il s'agit d'une réaction de réduction de NO_3^- par l'intermédiaire de bactéries transformant la matière organique. La réaction est de type :



Paracoccus denitrificans



L'activité humaine contribue à l'augmentation de la dénitrification, entre autres, par l'utilisation des engrais qui ajoutent aux sols des composés ammoniacués (NH_4^+ , NH_3)

et des nitrates (NO_3^-). L'utilisation des combustibles fossiles dans les moteurs ou les centrales thermiques transforme l'azote en oxyde d'azote NO_2^- . Avec N_2 et CO_2 , la dénitrification émet dans l'atmosphère une faible quantité d'oxyde d'azote N_2O . La concentration de ce gaz est faible, 300 ppb (parties par milliard). Cependant, il faut savoir qu'une molécule de N_2O est 200 fois plus efficace qu'une molécule de CO_2 pour créer un effet de serre. On évalue aujourd'hui que la concentration en N_2O atmosphérique augmente annuellement de 0.3% et que cette augmentation est pratiquement reliée entièrement aux émissions dues à la dénitrification des sols. Les études des carottes glaciaires de l'Antarctique ont montré que la concentration en N_2O atmosphérique était de 270 ppb à la fin du dernier âge glaciaire (il y a 10 000 ans) et que cette concentration s'est maintenue à ce niveau jusqu'à l'ère industrielle où elle a fait un bond pour atteindre son niveau actuel de 300 ppb; une augmentation de 11%.

II.2.2.2/ Rôle des Oligoéléments

A/ Fer (Fe) : L'un des éléments les plus abondants (4ème), mais n'est souvent disponible aux plantes. Important dans la synthèse de la chlorophylle, Constituant de divers enzymes catalysant les réactions d'oxydo-réduction, Constituant des protéines enzymatiques (nitrogénase).

B/ Cobalt (Co) : Indispensable à la fixation de l'azote atmosphérique par les bactéries et les champignons des légumineuses (Rhizobium).

C/ Zinc (Zn): Constituant d'un grand nombre d'enzymes, participe à la fabrication des auxines (hormones) de croissances, augmente l'activité de la catalase, peroxydase et les oxydases.

Sa carence : Entre-noueds raccourcis, feuilles de petites tailles.

D/ Bore (B) :

Indispensable aux végétaux : fonctionnement des méristèmes et différenciation des organes, agit sur le métabolisme et le transport des glucides. Transport des minéraux. La quasi-totalité du bore est contenu dans les parois.

Sa carence s'accompagne par une accumulation anormale des sucres et d'amidon et perturbe le transport des minéraux.

E/ Molybdène (Mo) : Est indispensable au métabolisme de l'azote. Constituant du nitrate réductase (réduction de nitrate en nitrite) et de la nitrogénase (réduction de l'azote atmosphérique).

F/ Cuivre (Cu)

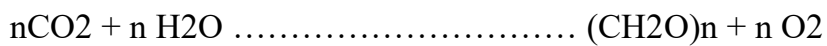
Participe au transfert d'électrons en photosynthèse. Le cuivre est lié également au fonctionnement de cytochrome oxydase de la chaîne respiratoire et de la superoxyde dismutase (SOD), enzyme de détoxification des formes actives de l'oxygène. Nécessaire au moment de la floraison des céréales.

Sa carence : Provoque la stérilité mâle, croissance ralentie.

II. 3 : Nutrition carbonée

II. 3.1/ Photosynthèse

La photosynthèse est un processus complexe et fondamental du règne végétal au cours duquel les plantes contenant de la chlorophylle synthétisent de la matière organique à partir du gaz carbonique (CO₂) et de l'eau (H₂O), en présence de l'énergie solaire. Les composés organiques formés par la photosynthèse s'accompagne d'un dégagement d'O₂. L'équation globale peut s'écrire :



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. Le siège de la photosynthèse est les chloroplastes qui renferment des pigments photorécepteurs.

3.1.2/ Structure des chloroplastes

Le chloroplaste est un organite semi-autotrophe de la cellule végétale. Il est volumineux, dont le diamètre varie de 4 à 10 micromètre et d'épaisseur de 1 à 4 micromètre. Il possède son propre matériel génétique (ADN), ainsi qu'une double membrane phospholipidique (interne et externe).

-La membrane externe est formée de phospholipides et de protéines. Elle a la propriété d'être relativement perméable.

-**La membrane interne** qui a la propriété d'être peu perméable et de présenter des replis appelés thylakoides (réseau membranaire très dense sous forme de sacs empilés : Granum ou de lamelles). Cette membrane présente des acides gras et des pigments (chlorophylliens et caroténoïdes) 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).

-**Le stroma** : assure de nombreuses réactions de biosynthèse. Il est constitué d'ADN, ribosomes, grains d'amidons, gouttelettes lipidiques.

-**Thylacoïdes** : réseau membranaire très dense sous forme de sacs empilés (Granum) ou de lamelles.

Dans les chloroplastes, il y a 30 à 50 chloroplastes par cellule végétale.

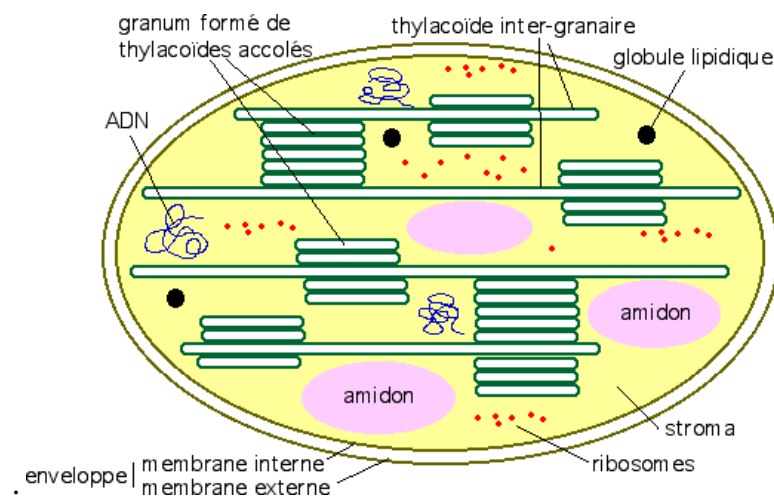


Figure 5 : Schéma d'un chloroplaste

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 1 (PSI est la chlorophylle A) et du photosystème 2 (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 2 (PSII) présente un complexe moléculaire appelé P680 et le photosystème 1 (PSI) présente un complexe moléculaire appelé P700.

3.2/ Pigments assimilateurs

A/ pigments chlorophylliens

Il existe plusieurs chlorophylles. Toutes les chlorophylles sont formées de cinq éléments (C, H, O, N, Mg). La chlorophylle *a* ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$) est le pigment

photosynthétique le plus commun du règne végétal ; il est présent chez tous les végétaux aquatiques et terrestres. La chlorophylle *b* ($C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$) se trouve chez les cormophytes (végétaux supérieurs) et les chlorophycées (algues vertes) à des teneurs moindres. Ces deux chlorophylle *a* et *b* ont des pics d'absorptions dans le bleu (vers 450 nm). La chlorophylle *a* absorptions fortement à 430 nm (le bleu) et 660 nm (Rouge), par contre, la chlorophylle *b* absorptions fortement à 445 nm (le bleu) et 645 nm (Rouge). La chlorophylle C ($C_{35}H_{30}O_5N_4Mg$) : se trouve chez les phéophycées (*algues brunes*). Par contre, la chlorophylle d ($C_{54}H_{70}O_6N_4Mg$) se retrouve chez les Rhodophytes (algues rouges).

B/ Carotenoides et xanthophylles

Se sont des pigments respectivement rouge et jaune. Les carotenoides sont des pigments accessoires. Ils se rencontrent chez tous les végétaux. Les carotenoides et xanthophylles absorbent dans le bleu vert avec un maximum de 480 – 500 nm.

3.3/ Les différentes phases de la photosynthèse

A/ Phase claire

La conversion du CO_2 en glucides est une réaction qui se fait par étapes. Dans une première étape appelée phase claire, interviennent des transporteurs d'électrons de la chaîne photosynthétique localisée dans les membranes thylacoidales, grâce à un apport d'énergie lumineuse. Des électrons sont arrachés à l'eau. Les électrons sont tout d'abord fournis par l'eau au photosystème 2 (PSII), puis par la suite ils sont transmis au photosystème 1 (PSI).

($H_2O \dots\dots\dots 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^-$) et transportés jusqu'à un accepteur le $NADP^+$ qui est réduit en $NADPH + H^+$



Une partie de l'énergie perdue par les électrons au cours de leurs transports est récupérée par la phosphorylation des molécules d'ADP en ATP.

L'énergie de la lumière sera transformée en ATP et en NADPH + H⁺.

B/ phase sombre

Dans cette étape de la photosynthèse qui se déroule dans le stroma des chloroplastes, le NADPH + H⁺ et l'ATP qui sont produits sous l'action de la lumière sont utilisés pour la réduction du CO₂. En fait, NADPH + H⁺ et l'ATP ainsi produits ne servent pas uniquement à la réduction du CO₂ en glucides. Ils sont utilisés pour diverses autres réductions, soit dans le chloroplaste lui-même (nitrates et sulfates) soit dans le cytosol (nitrates). Ce cycle est dit **Cycle de Calvin**.

Cycle du calvin

L'assimilation du CO₂ se fait en quatre étapes principales dont les trois premières se déroulent au sein du cycle de Calvin :

- Fixation du CO₂ (carboxylation).
- Réduction du carbone fixé.
- Régénération de l'accepteur de CO₂.
- Synthèse des sucres.

A/ Fixation du CO₂

La première molécule du cycle de Calvin est le ribulose-biphosphate (RuBP) possédant 5 carbones. La fixation du CO₂ 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 biphospho- glycérique, qui sera lui-même réduit par leNADPH pour formé 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 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.

D/ 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).

- 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 biphosphoglycérate

- 12 NADPH utilisés pour réduire 12 molécules de 1,3 bisphosphoglycérate en glyceraldéhyde 3-P .

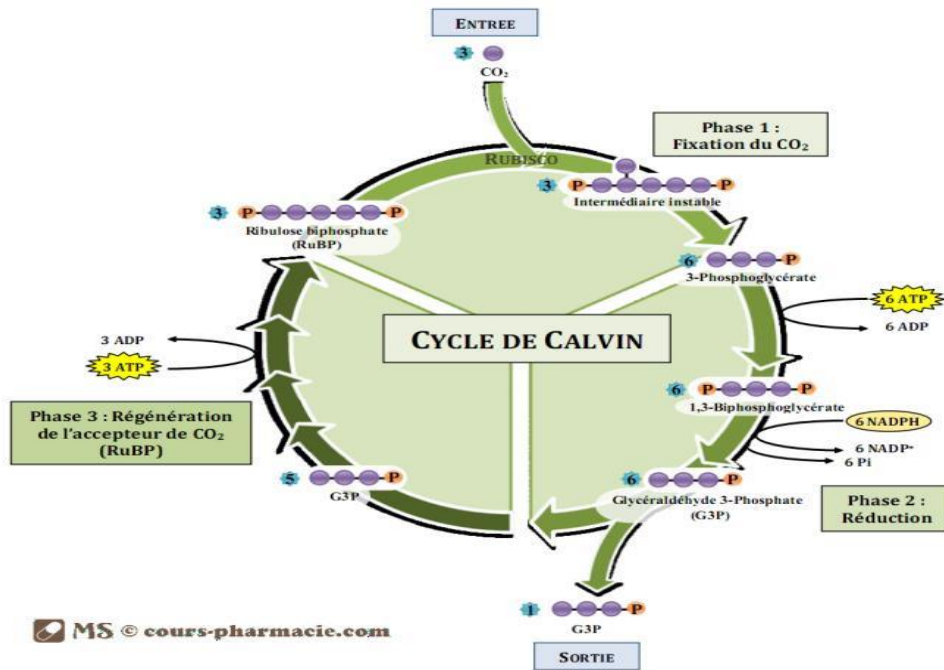


Figure 6 : Cycle de Calvin