

Chapitre : III-Evolution et développement de la fleur

I-La reproduction chez les végétaux :

La reproduction peut être décrite en termes de cycles biologiques. Le cycle biologique d'une espèce est une séquence de stades qui conduit de l'adulte d'une génération à l'adulte de la génération suivante. Comme nous l'avons vu, un cycle biologique peut être sexué ou asexué

I-1-La multiplication végétative (reproduction asexuée) :

Chez les végétaux la multiplication végétative est soit naturelle soit se fait par l'intervention humaine. Cette multiplication végétative a une grande importance en horticulture et agriculture. S'effectue par mitoses et aboutit à la production d'une descendance génétiquement identique à celle du parent

I-1-1- La multiplication végétative naturelle :

On peut distinguer la fragmentation pure et simple de l'intervention de mécanismes spécialisés.

✓ Fragmentation :

Chez les végétaux qui ont une ramification abondante de leurs axes aériens ou souterrains au niveau du sol, on peut constater une différenciation de ces axes (enracinement des parties aériennes par exemple) suivie d'une séparation ultérieure.

De nombreuses graminées (chiendent) forment des racines à partir des axes aériens. Iris, Sceau de Salomon, Bambou produisent des tiges feuillées à partir d'organes souterrains ex : rhizomes

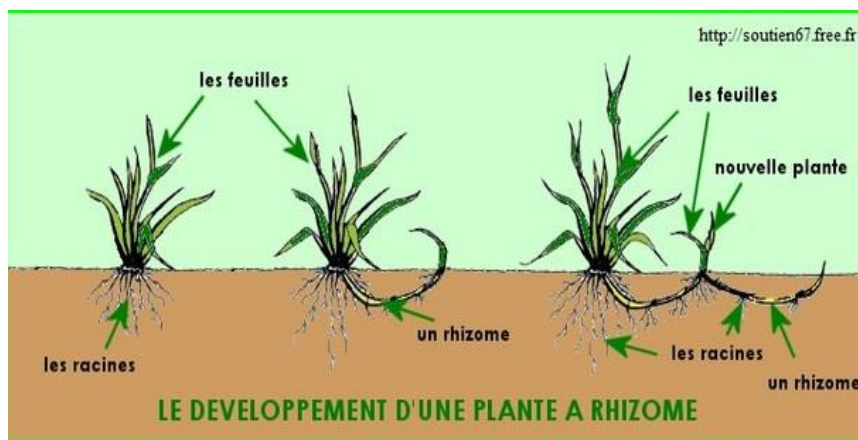


Figure 1 : le développement d'une plante a rhizome

✓ Intervention d'organes spécialisés :

Stolons : (Fraises – Ronces) tiges grêles horizontales susceptibles d'enracinement.

Dragons : Peuplier, racines horizontales susceptibles de bourgeonner.

Bulbilles : Bourgeons charnus en vie ralentie capables de repasser rapidement en vie active (lieu de formation variable), à l'aisselle des feuilles : *Ranunculus ficaria*, sur le limbe foliaire : *Bryophyllum* et de donner un individu autonome.

I-1-2-La multiplication végétative artificielle :

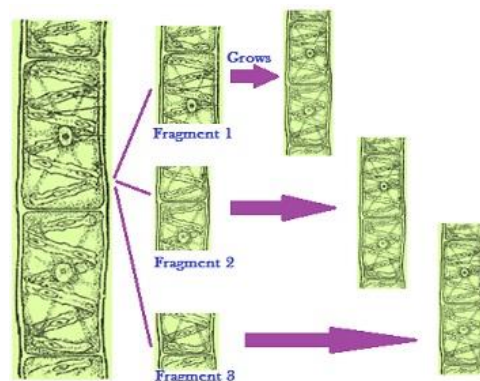
La multiplication végétative artificielle est pratiquée par l'homme en mettant en jeu diverses techniques pour répondre aux motivations suivantes :

- *Multiplication d'espèces dont la reproduction sexuée est impossible.
- * Espèces qui ne fructifient pas en dehors de leur climat d'origine (espèces exotiques en climat tempéré).
- *Espèces dioïques ou 1 seul sexe a été implanté (élodée).
- *Espèces dont on a sélectionné des variétés sans graines ou dont la constitution génétique interdit la multiplication sexuelle : bananier.
- * Accélération de la production (exemple de la pomme de terre : graines – 4 ans, tubercule – 1 an). La multiplication végétative accélère le cycle de développement par rapport au semis (palmier dattier).
- *Maintenance de la constitution génétique et obtention d'un **clone** dans le cas de plante à propriétés intéressantes. (L'ensemble des arbres représente un clone)

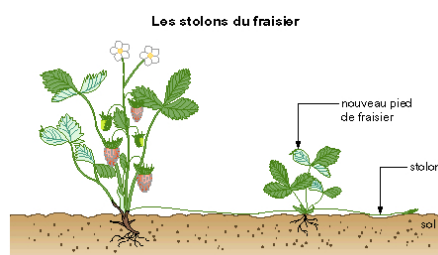
Les techniques utilisées sont classiques le bouturage (Peuplier, Vigne, Hortensia), le marcottage, la greffe.



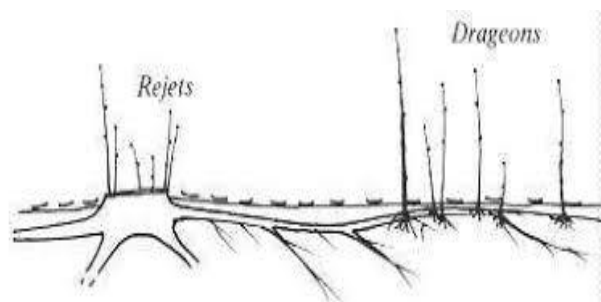
(A)



(b)



(B)



(C)

Figure 2 : La multiplication végétative (reproduction asexuée) (A) Bulbilles, (b) Fragmentation (B) stolons (C) drageons

I-2- la multiplication sexuée

La reproduction sexuée implique un parent de chaque sexe et aboutit à une descendance génétiquement nouvelle, composée d'individus génétiquement différents des parents et différents entre eux. Ils possèdent une partie des gènes recombinés de chaque parent.

En ce sens, la reproduction sexuée engendre de nouvelles recombinaisons génétiques. Bien que la reproduction sexuée se rencontre chez les plantes vivant dans tous les types d'environnements, elle est particulièrement importante chez les plantes vivant dans des conditions environnementales changeantes ou dans des environnements variés.

Chez les végétaux, la reproduction sexuée fait intervenir trois types de cellules reproductrices : les spores, les spermatozoïdes et les oosphères. **Une spore** se développe pour donner directement un nouvel organisme, sans fusion avec une autre cellule reproductrice. En revanche, **un spermatozoïde** (cellule reproductrice mâle) féconde **une oosphère** (cellule reproductrice femelle).

À la suite de cette fusion, il y a formation d'un zygote qui donnera un embryon qui se développera ensuite en une nouvelle plante. Les spermatozoïdes et les oosphères sont appelés gamètes (du grec, gamein, mariage). Chez les gymnospermes et les angiospermes, l'embryon est contenu, avec des réserves nutritives, dans une graine entourée de téguments protecteurs.

La reproduction sexuée présente quelques risques car les oosphères ou les spermatozoïdes peuvent être endommagés ou détruits, empêchant toute fécondation d'avoir lieu. Certains scientifiques pensent que la reproduction sexuée joue un rôle essentiel dans l'élimination des gènes dommageables pour le maintien des potentialités des plantes.

La reproduction sexuée nécessite une très grande énergie. D'abord, il faut que la plante produise les spermatozoïdes et les oosphères. Puis le développement du zygote en embryon et les étapes de la transformation de ce dernier en plantule exigent encore beaucoup d'énergie.

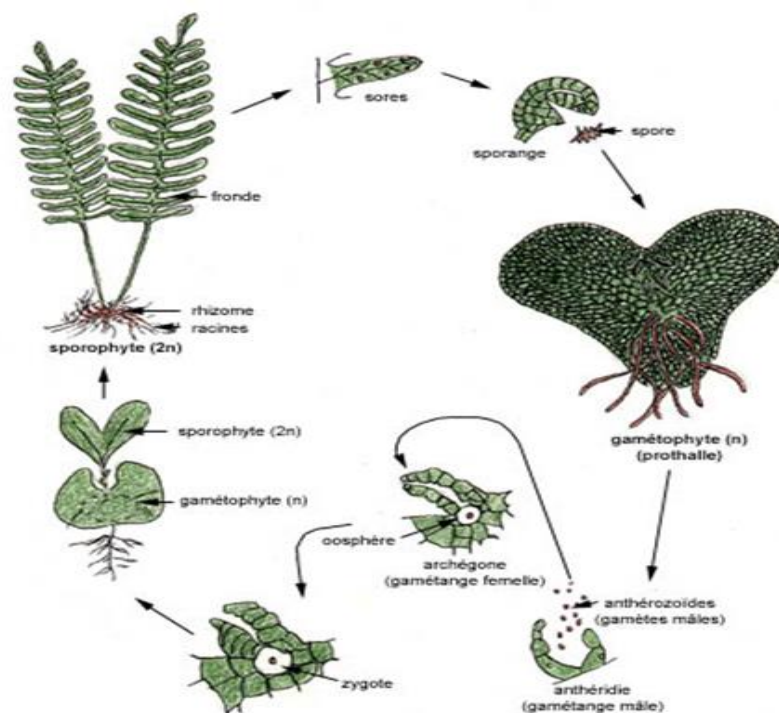


Figure 3 : La reproduction sexuée

II-Structure de cône et de fleur

Les cônes, également appelés **strobiles**, et les fleurs se forment après transformation des méristèmes apicaux caulinaires en méristèmes reproducteurs. Les deux structures possèdent des feuilles modifiées, appelées sporophylles, productrices de spores. Elles contiennent les sporanges qui sont des sortes de sacs dans lesquels sont produites les spores. Ces spores donnent ensuite naissance aux gamétophytes.

La pollinisation précède la fécondation. Les grains de pollen, connus sous le nom de **pollen**, représentent les gamétophytes mâles. Le transport du pollen de la partie mâle vers la partie femelle de la fleur correspond au phénomène de **pollinisation**. Il faut garder en mémoire que la pollinisation n'est pas une garantie de fécondation. Pour que la fécondation ait lieu, un spermatozoïde produit par un grain de pollen doit s'unir à une **oosphère**. Chaque oosphère est contenue à l'intérieur d'une structure appelée ovule (du latin ovulum, petit œuf). La fécondation ne suit pas immédiatement la pollinisation et peut même ne pas avoir lieu avant plusieurs mois. Après la fécondation, l'ovule se développe en **graine**

Les angiospermes, qui portent les gamétophytes mâles et femelles dans une même fleur, pratiquent l'**autopollinisation**

Chez d'autres angiospermes, les gamétophytes mâles et femelles sont dans différentes fleurs portées par la même plante. Ces espèces sont dites **monoïques** (du grec monos, oïco, une maison) car chaque plante possède une fleur mâle et une fleur femelle distinctes. La citrouille et le maïs en sont des exemples.

À l'inverse, chez certaines angiospermes, les fleurs mâles et femelles sont portées par des plantes différentes. Ces plantes sont dites dioïques (du grec dioïcos, deux maisons). Chez les espèces **dioïques**, on ne rencontre que la pollinisation croisée entre deux plantes séparées. La marijuana (*Cannabis sativa*) et le saule (*Salix*) sont des exemples de plantes dioïques.

II-1-Les méristèmes apicaux caulinaires produisent les cônes (Chez les gymnospermes)

Les gymnospermes sont caractérisées par la présence de cônes porteurs de graines nues. Les méristèmes apicaux reproducteurs se développent soit en cônes polliniques (parfois appelés cônes simples, ou **cônes mâles**), soit en cônes ovulés (parfois appelés cônes composés, ou **cônes femelles**).

Exemple pin :

Les cônes mâles sont disposés à la base des rameaux de l'année. Ils sont constitués de petites feuilles étroites, à l'aspect de papier de soie, insérées sur l'axe du cône ; elles portent les sporanges mâles qui contiennent les spores formées à la suite de la méiose.

Les cônes femelles sont appelés cônes ovulés, car ils contiennent des ovules portés à la face inférieure de l'échelle. Comme pour le cône mâle, il y a formation, à partir du méristème apical, d'un axe du cône qui porte les feuilles modifiées en bractées ligneuses.

Un bourgeon axillaire à la base de chaque bractée est à l'origine de la sporophylle, échelle qui porte à sa face inférieure deux ovules nus. Le vent transporte les gamétophytes mâles (grains de pollen) jusqu'aux gamétophytes femelles attachés sur les cônes ovulés.

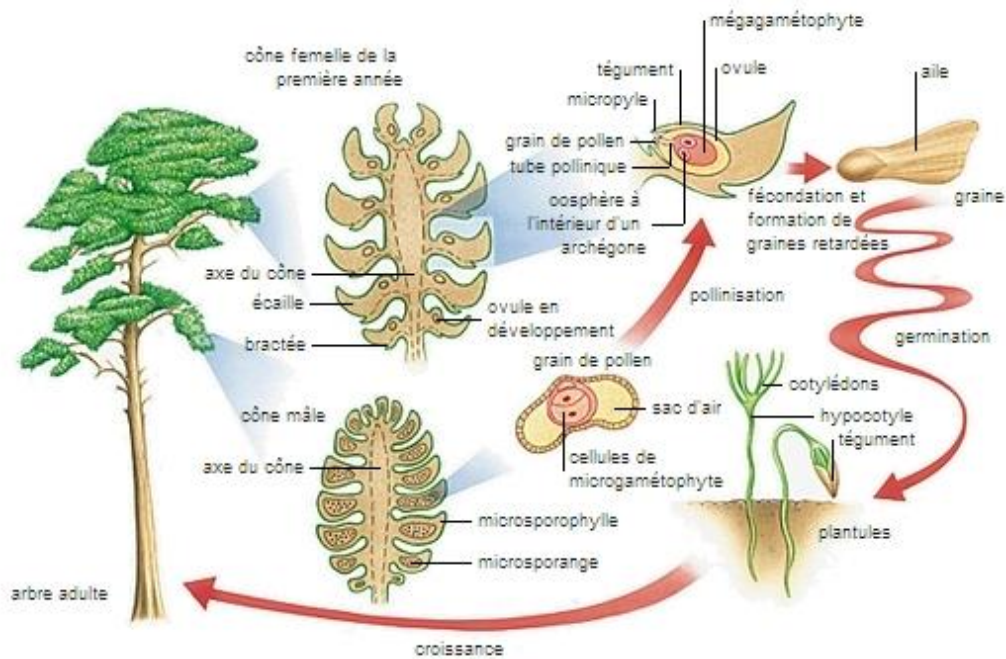


Figure 4 : organes reproducteurs des conifère (*Pinus halepensis*)

II-2- les méristèmes apicaux caulinaires produisent les fleurs (Chez les angiospermes)

Les angiospermes sont connues pour leurs fleurs caractéristiques et pour la protection de leurs graines. Les méristèmes apicaux caulinaires qui deviennent reproducteurs se développent en fleurs mâles, en fleurs femelles, ou en fleurs bisexuées, selon les espèces

Le vent, les insectes, les oiseaux et les mammifères (comme les chauves-souris) transportent le pollen jusqu'aux organes femelles de la fleur, Les pollinisateurs sont attirés par les couleurs des fleurs, par le nectar et par d'autres facteurs attractifs ; ils transportent involontairement le pollen produit par une fleur vers une autre fleur.

La fleur se trouve au sommet d'une tige florale appelée **pédoncule**. L'extrémité du pédoncule est renflée : il s'agit du réceptacle sur lequel sont attachés quatre types de feuilles modifiées : les **sépales**, les **pétales**, les **étamines** et les **carpelles** (également appelés pistils). Les sépales et les pétales sont stériles ; l'ensemble des sépales constitue le **calice**, l'ensemble des pétales constitue la **corolle**. Les étamines et les carpelles représentent les pièces fertiles. L'ensemble des étamines porte le nom **d'androcée** et l'ensemble des carpelles compose le **gynécée**

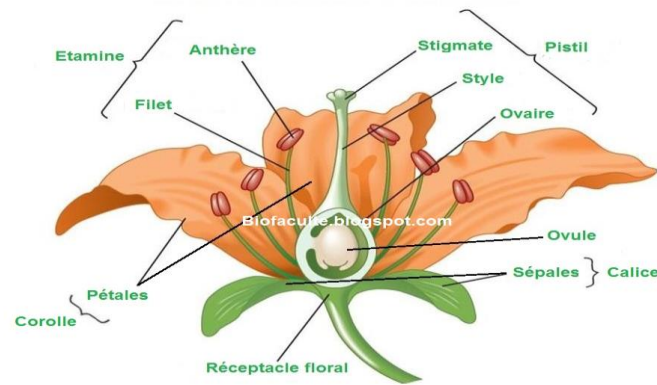
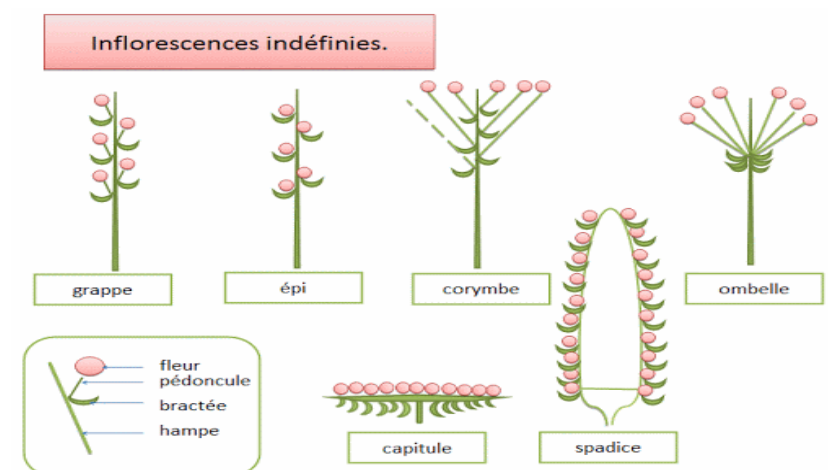


Figure 5 : structure générale d'une Fleur d'angiosperme

II-3- Les inflorescences portent un groupe de fleurs sur un pédoncule

On distingue deux types fondamentaux d'inflorescences. Chez les **inflorescences indéfinies**, racèmes, l'axe principal ne se termine pas par une fleur : la forme fondamentale est **la grappe** avec un aspect pyramidal. La grappe est simple (groseillier) ou composée (vigne) ; elle porte le nom de panicule chez le troène. **L'épi** est une grappe dont les fleurs sont sessiles et appliquées contre le pédoncule (pl. Quelques épis ont une organisation particulière : l'épillet des graminées dont l'axe se détache de l'axe de l'inflorescence ; le chaton simple ou composé regroupant les fleurs unisexuées (saule, bouleau, châtaignier, chêne) ; **le corymbe**, grappe dont les fleurs sont disposées sur un même plan en raison de l'inégalité de longueur de leur pédicelle (poirier). De même, **l'ombelle** simple est composée de rameaux florifères tous égaux et partant d'un même point ; si les rayons primaires de l'ombelle se ramifient, chaque fleur est remplacée par une petite ombelle, il s'agit alors d'une ombelle composée (ombelle d'ombellules). Enfin, **le capitule** est un groupe de fleurs sessiles insérées au sommet de la tige florifère élargie en réceptacle (*Leucanthemum vulgare*, artichaut).



Chez les inflorescences définies, cymes, l'axe primaire se termine par une fleur. Cet axe possède un nombre peu élevé et défini d'axes secondaires, se terminant tous par une fleur. On peut citer comme exemples la consoude, l'euphorbe, le sedum, la saponaire, le lin, le bégonia, la centaurée, le myosotis et le coléus.

VI- Les phytohormones ou régulateurs de croissance

Les régulateurs de croissance des plantes sont de petits produits chimiques simples capables de réguler leur croissance et leur développement. Les régulateurs de croissance des plantes sont des molécules qui influencent le développement des plantes et sont généralement actives à de très faibles concentrations. Il existe des régulateurs naturels, qui sont produits par la plante elle-même, ainsi que des régulateurs synthétiques ; ceux que l'on trouve naturellement dans les plantes sont appelés phytohormones ou hormones végétales.

Différentes hormones peuvent être classées en différentes classes, en fonction de leur structure chimique

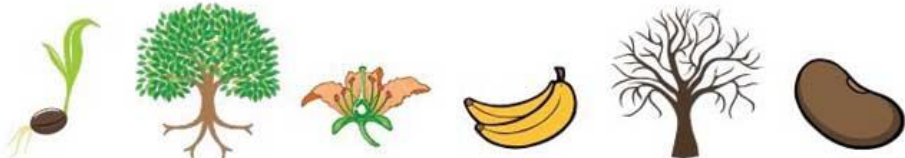
Les phytohormones ou hormones végétales répondent exactement à la définition des hormones dans le monde animal ; ce sont des substances organiques, de poids moléculaire moyen.

Produites par certaines cellules, elles sont généralement transportées à quelque distance de leur lieu de formation et règlent un processus physiologique spécifique. Donc on peut donner une définition à ces phytohormones :

- * Substances naturelles présentes dans les végétaux,
- * Qui sont fabriquées dans une zone de la plante,
- * qui peuvent circuler plus ou moins loin selon le cas,
- * Et agir sur des cellules cibles possédant des récepteurs de leurs correspondants

Tableau1- Les différents types d'hormones et leurs interactions

Phytohormones
(Plant hormones)



	Germination	Growth to Maturity	Flowering	Fruit Development	Abscission	Seed Dormancy
Gibberellin	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Auxin	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Cytokinins	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Ethylene	✗	✗	✓	✓	✓	✗
Abscisic Acid	✗	✗	✗	✗	✓	✓

Auxine

L'auxine est surtout fabriquée au niveau des bourgeons terminaux.

- Elle ne peut circuler que de l'apex vers la base par la sève.
- Elle inhibe les bourgeons qu'elle rencontre. (Dominance apicale)
- Elle stimule la croissance primaire (en longueur des cellules de la tige).

- Elle stimule la croissance secondaire (en épaisseur) en provoquant la division des cellules du cambium et en influençant sur la différenciation du xylème secondaire.
- Lorsque la plantule est jeune, la concentration en auxine arrivant aux niveaux de l'apex racinaire est forte et elle stimule la rhizogenèse.
- Puis en grandissant, la distance entre les bourgeons terminaux (lieux de synthèse de l'auxine) et les racines augmente ; La concentration en auxine diminue. Elle stimule alors l'élongation des cellules au niveau de la racine.

Les cytokinines

Régulation de la division et de la différenciation cellulaire :

- * Le rapport des concentrations des 2 hormones a son importance :
- * A concentration égale, les cellules se divisent et il se forme de nombreuses cals.
- * S'il y a plus de cytokine que d'auxine, des pousses émergent des cals.
- * S'il y a moins de cytokine que d'auxine, ce sont des racines qui se forment

Les gibbérellines

- * Elles stimulent l'élongation des tiges et des limbes des feuilles.
- * Elle stimule la germination des graines.
- * Elle stimule la maturation des fruits.
- * L'acide gibbérellique ou GA3 est utilisé pour :
 - L'induction de la parthénocarpie sur tomate, citrus, vigne (raisin de table), poiriers...
 - L'induction florale. (poirier, artichaut)
 - L'activation de l'élongation des tiges (vigne),
 - Levée de dormance de certaines semences – Induction de la mise à fruit parthénocarpique après le gel chez le poirier

L'acide abscissique

- * Elle intervient dans les situations de stress de la plante.
- * Contre le froid, elle met en dormance le pante
- * Dans le bourgeon, elle ralentit la croissance et provoque la transformation des pièces primaires foliaires en écailles protectrices.
- * Elle ralentit la division des cellules du cambium.
- * Contre le froid, elle provoque l'entrée en dormance des graines.
- * En cas de stress hydrique, elle provoque la fermeture des stomates.

Chapitre VI : Croissance et développement de la plante.

I. Les végétaux et eau (La transpiration) :

Tout déficit de saturation en vapeur d'eau existant dans l'atmosphère entourant une plante, entraîne l'évaporation continue de l'eau imbibant les tissus de celle-ci : c'est le phénomène de la transpiration qui crée un appel continu d'eau dans le végétal et est le moteur principal de la montée de la sève de la plante.

La transpiration entraîne pour la plante des besoins en eau considérables surtout quand elle est trop intense ; elle ne peut être compensée par une alimentation en eau suffisante et entraîne le flétrissement de la plante et le ralentissement de son métabolisme général. Un flétrissement trop avancé devient irréversible si bien que la transpiration représente un danger potentiel pour la plante.

La transpiration est soumise à des contraintes physiques et physiologiques qu'elle surmonte grâce à des dispositifs anatomiques et à des systèmes de régulation dont le plus efficace est le degré d'ouverture des stomates notamment pour pouvoir s'adapter aux climats très secs.

I-1- Mise en évidence du phénomène de transpiration :

A- une plante en pot non arrosée se fane et son poids diminue en prenant toute précaution pour éviter que de l'eau ne s'évapore du pot, en l'enfermant par exemple dans un sac en plastique qui ne laisse traverser que la tige.

B- La mise sous cloche (avec les mêmes précautions que précédemment), elle donne lieu à des dépôts de gouttelettes le long du verre.

C- Une plante ou un rameau de plante enfermé dans un sac en plastique donne lieu à un dépôt de gouttelettes sur la surface interne du sac ; cela ne se produit pas si la plante est effeuillée : la montée d'eau résulte d'une aspiration au niveau des feuilles, en conséquence, il existe une véritable transpiration foliaire

D- Par le potomètre de Vesque (Un potomètre, ou transpiromètre, est un instrument, un appareil, un dispositif, qui permet de mesurer le taux d'absorption (la consommation) de l'eau par une plante feuillue par unité de temps. Les causes de l'absorption d'eau sont la photosynthèse et l'évapotranspiration.)

: Le déplacement du niveau du liquide dans le tube fin concrétise la transpiration de la plante.

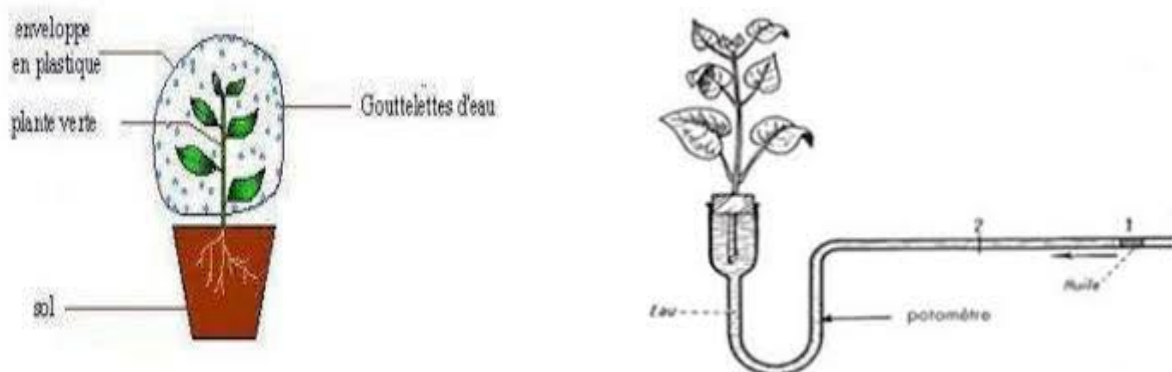


Figure 6 : Transpiration, mise en évidence

I-2-Mesure de la transpiration :

C'est la quantité d'eau émise par unité de temps et par unité de masse (ou de surface) de matière respirante

*Cette quantité peut être mesurée simplement par le poids perdu par une plante en pot non arrosée ou par un organe détaché de la plante mère (fruit, feuille...) pendant un temps donné et limite. Il faut parfois tenir compte de la perte de CO₂ par respiration.

*On peut aussi, pour connaître la transpiration, mesurer la quantité d'eau émise en l'absorbant par un corps chimique de nature hygroscopique tel que : chlorure de cobalt (CaCl₂) ; (P₂O₃) ou l'acide sulfurique (H₂SO₄) au fur et à mesure de son émission.

D'autres méthodes plus modernes ont été mises au point : détermination de l'humidité de l'air et de ses variations par la mesure de son pouvoir absorbant en infrarouge.

*Mesure de l'eau absorbée grâce au potomètre de Vesque

I-3-Localisation de la transpiration au niveau de la plante :

Elle se produit essentiellement par les feuilles mais aussi par les jeunes troncs et les pièces florales. Elle s'effectue pour une part au travers de la cuticule (pellicule lipidique qui recouvre l'épiderme) si celle-ci est suffisamment mince, mais surtout par les stomates.

Les stomates sont des structures formées de deux cellules (**cellules de garde**) en regard, réniformes, laissant entre elles une ouverture ; l'**ostiole** plus ou moins fermée selon les conditions ambiantes (jusqu'à 8µm à l'ouverture maximale). La paroi des cellules de garde est plus ou moins épaisse que celle des cellules épidermiques voisines surtout les faces qui délimitent l'ostiole ; cette particularité morphologique joue un rôle capital dans le mécanisme d'ouverture. Sous les cellules de garde se trouve une vaste lacune : la chambre sous stomatique.

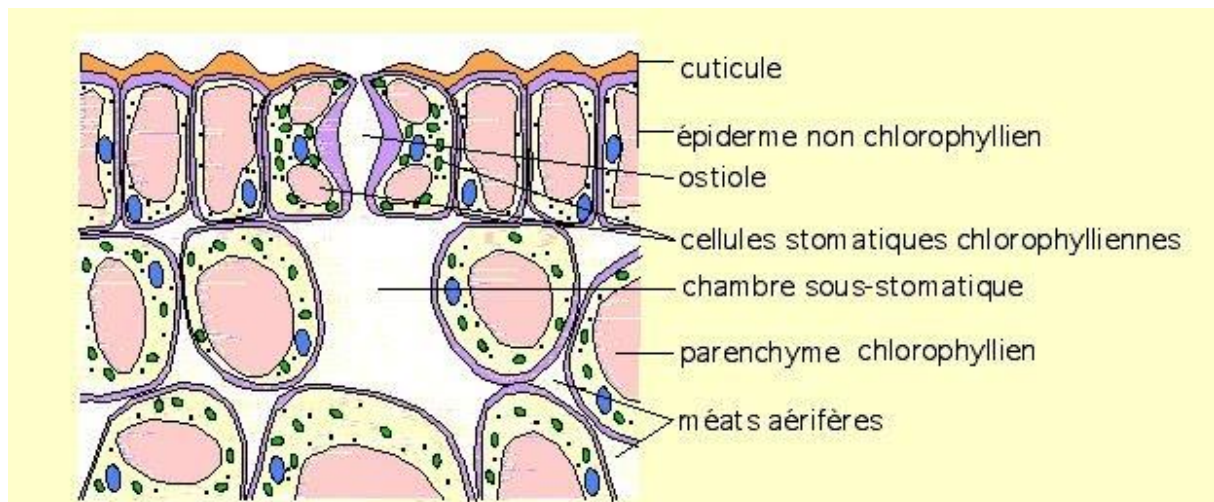


Figure 7 : Structure des stomates

I-4- Mécanismes d'ouverture des stomates

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

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

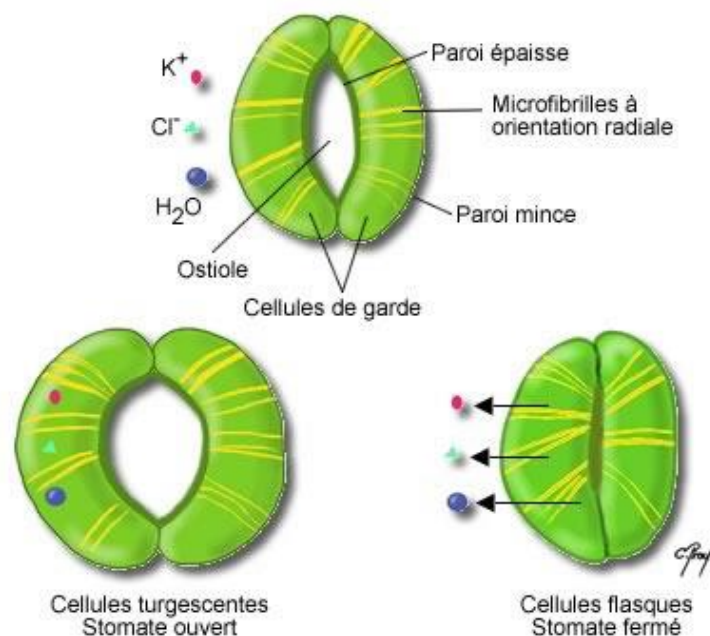


Figure 8 : Ouverture et fermeture des stomate

I-5- Rôle de la transpiration dans la circulation de la sève brute

La sève brute est une solution très diluée de faible pression osmotique. La sève circule dans les vaisseaux de bois à une vitesse de 1 à 6 m/h, jusqu'à 100 m/h pour une transpiration maximale.

L'eau est transpirée par la feuille, d'autant plus que la demande climatique est élevée. Elle « coule » depuis le sol où elle est peu retenue (fort potentiel hydrique) vers les feuilles où elle est plus retenue (faible potentiel hydrique). Ce mouvement peut être décrit par une équation de transfert où le flux est d'autant plus fort que la différence de potentiel hydrique est grande, et que la résistance au transfert est faible.

De cette manière plus la plante transpire plus la succion sera efficace, et plus la plante absorbera de l'eau dans le sol. La plante utilise ainsi des phénomènes de variations de l'ouverture des stomates afin de faire varier la force d'absorption lorsque le sol ou l'air est trop

sec. Mais ceci n'est vrai que jusqu'à un certain seuil au-delà duquel la plante sera à un stade de stress hydrique trop important, l'obligeant à fermer les stomates afin de se préserver.

I-6- Fermeture des stomates et poussée raculaire

Chez une plante en déficit hydrique, les stomates sont partiellement fermés. Ceci diminue le flux d'eau, et donc la différence de potentiel hydrique entre le sol et les racines, diminuant la quantité d'eau qui sera absorbée par les racines. Cette fermeture stomatique est donc un processus adaptatif nécessaire à la survie de la plante. Elle a pour inconvénient de ralentir la photosynthèse et de causer l'échauffement de la feuille.

En absence de transpiration, on observe un phénomène appelé la poussée raculaire, qui permet malgré la fermeture des stomates (par exemple pendant la nuit) d'avoir une absorption d'eau au niveau des racines. L'eau ne sera donc plus sous tension comme pour la transpiration, mais sous pression. Lors de ce phénomène, le potentiel hydrique est rétabli (diminution) par la sécrétion d'ions dans le xylème, permettant ainsi à l'eau d'y pénétrer par osmose à travers les cellules voisines.

1-7-Facteurs influençant la transpiration

a) Facteurs structuraux

Au niveau de la plante la transpiration stomatique dépend de son anatomie, autrement dit de la surface d'évaporation. De cette manière on distingue ainsi différents facteurs structuraux :

La surface foliaire correspond à la surface des feuilles de la plante. Les stomates étant présents au niveau des feuilles, sa réduction (chute des feuilles, feuilles réduites à des aiguilles, ...) permet une baisse de la transpiration.

La constitution foliaire, en effet certaines espèces de plantes vivant en climat aride, présentent un collenchyme qui permet un épaississement de la feuille par de la cellulose ou une cuticule épaisse qui est imperméable au gaz permettant une protection contre les pertes d'eau.

La densité des stomates.

b) Facteurs externes

Les facteurs externes correspondent à l'environnement de la plante, les plus importants sont

La nature du sol : Un sol chargé en ion possède une pression osmotique plus élevée, ce qui nécessite une augmentation de la succion des plantes concernées et ainsi de la transpiration, l'extraction y étant plus difficile. Au bout d'un certain seuil, lorsque la plante est soumise à un stress hydrique trop important les stomates se ferment diminuant la transpiration afin de se préserver.

L'humidité du sol : Lorsque le sol s'assèche, la concentration en ion augmente, donc les forces osmotiques sont plus importantes, ce qui entraîne également une extraction plus difficile et une nécessité d'augmentation de la transpiration. De la même manière que précédemment, au bout d'un certain seuil, lorsque la plante est soumise à un stress hydrique trop important les stomates se ferment diminuant la transpiration afin de se préserver.

L'humidité de l'air : L'humidité de l'air agit différemment suivant le seuil atteint. Il faut comprendre que les cellules épidermiques perdent leur eau plus facilement que les cellules stomatiques dont la paroi est plus épaisse. Ainsi, une sécheresse modérée provoque une diminution de la turgescence des cellules épidermiques sans modifier notablement celle des cellules stomatiques. La pression exercée par les cellules épidermiques sur les cellules

stomatiques diminue et les ostioles ont tendance à s'ouvrir, augmentant ainsi la transpiration. Ce phénomène est intensifié par le fait que l'air sec exerce une succion importante sur l'eau de la plante. Si la sécheresse de l'air augmente au-dessus d'un certain seuil, au point d'entraîner l'évaporation de l'eau des cellules stomatiques, la diminution de leur turgescence tend à les accoler plus étroitement ce qui diminue le diamètre des ostioles et aboutit à une diminution de la transpiration.

L'agitation de l'air : L'évaporation est favorisée par le renouvellement de l'air au voisinage des feuilles. Ainsi, l'augmentation de l'agitation de l'air entraîne tout d'abord l'ouverture des stomates. Cependant, si l'agitation dépasse un certain seuil, elle entraînera leur fermeture. Le vent a d'autant plus un pouvoir desséchant qu'il élimine la « couche limite » qui protège les feuilles.

La température : La température agit également sur l'évaporation de l'eau cellulaire. En effet, son augmentation entraîne de la même manière une augmentation de l'ouverture des stomates et donc de la transpiration. De plus, lorsque la température dépasse un certain seuil (environ 30°C), elle provoque la fermeture des stomates et donc une diminution de la transpiration.

La luminosité : La lumière entraîne, pour la majorité des plantes, l'ouverture des stomates et donc l'augmentation de la transpiration. Cependant, la sensibilité des plantes varie selon l'espèce. Contrairement aux facteurs précédents, la lumière n'a pas d'action sur l'évaporation de l'eau cellulaire mais sur le métabolisme des cellules stomatiques, en stimulant l'activité de leurs ATPases membranaires responsable de l'entrée d'ions K^+ contre la sortie d'ions H^+). Le K^+ s'accumule ainsi dans les vacuoles, permettant l'entrée d'eau dans les cellules de garde, l'augmentation de la pression de turgescence et donc l'ouverture des stomates.

II-Les végétaux et lumière (La photosynthèse) :

II-1-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.

II-2- 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

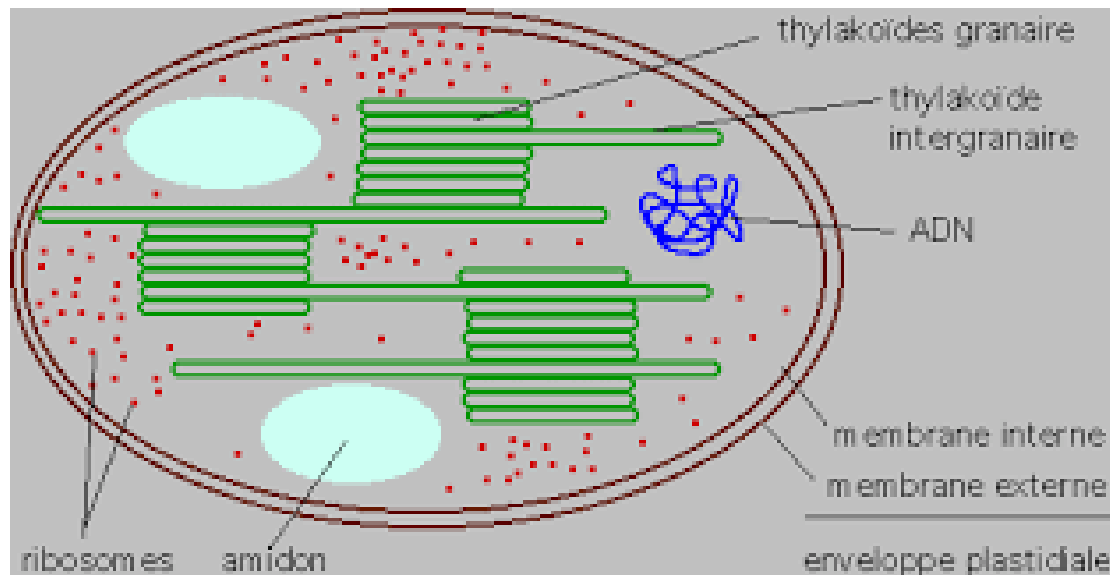


Figure : structure de chloroplaste

II-2-1-Le chloroplaste, siège de la photosynthèse :

Au sein des cellules chlorophylliennes, la photosynthèse se déroule dans les chloroplastes. Ces organites de grande taille (environ 10 micromètres de long) possèdent une enveloppe composée d'une double membrane, et un système endomembranaire formant des saccules : les thylakoïdes. La conversion de l'énergie lumineuse en énergie de liaison chimique et en pouvoir réducteur se réalise au niveau des membranes des thylakoïdes. La réduction du carbone inorganique (CO_2) en carbone organique a lieu dans le stroma du chloroplaste. Cette matière organique synthétisée peut être stockée temporairement sous la forme de grains d'amidon. Des structures transmembranaires permettent la formation de complexes protéiques associés à la chlorophylle que l'on appelle des photosystèmes (PSI et PSII).

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. Il sera ainsi présenté en premier dans le cours.

B-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 ») et transportés par la chaîne d'accepteurs d'électrons.

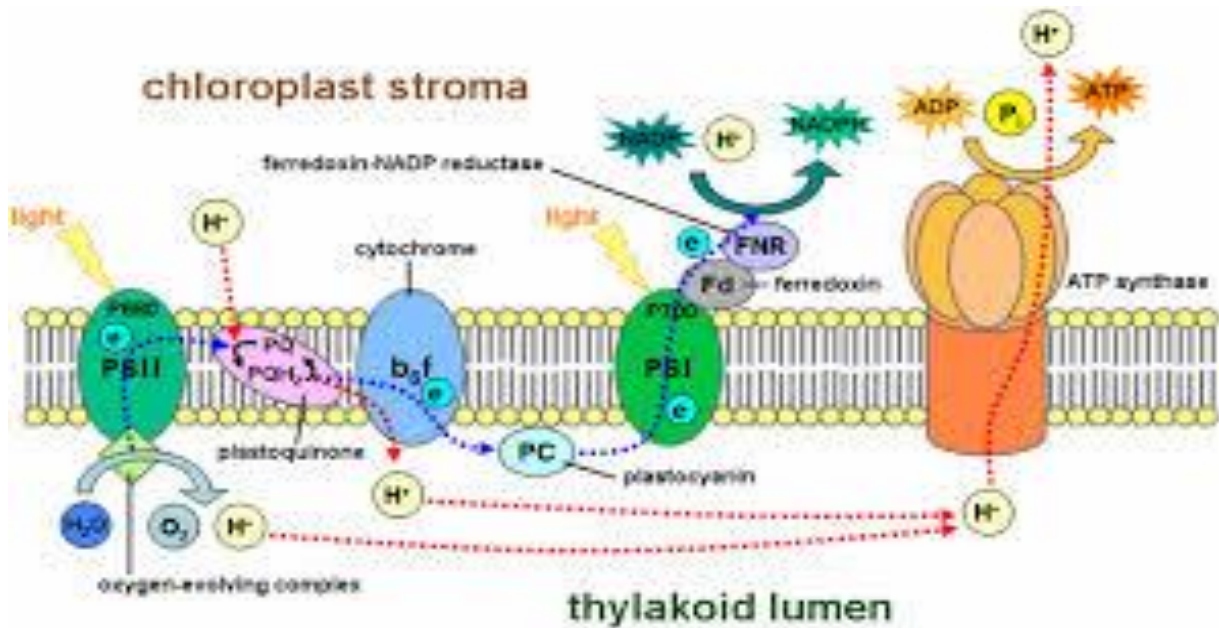
Ces électrons passent ensuite par le complexe de cytochromes où ils induisent le passage de protons du stroma vers l'espace intra-thylakoïdien. Les protons ainsi accumulés forment ce que l'on appelle le gradient de protons, qui permettra à l'ATP synthétase de produire de l'ATP.

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.

➤ **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. 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 NADPH + 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

II-2-2- Equation globale de la photosynthèse :

Diverses expériences permettent d'aboutir à une équation globale, résumant les mécanismes de la photosynthèse. Nous revenons ici sur quelques expériences permettant d'en démontrer les différents éléments, et donc de construire progressivement cette équation.

✓ Production de dioxygène, utilisation de dioxyde de carbone

On peut tout d'abord chercher si certains échanges gazeux se réalisent chez les plantes chlorophylliennes, en présence de lumière. On utilisera pour cela une plante aquatique, l'Elodée du Canada, et comme source de CO₂, de l'hydrogénocarbonate (bicarbonate) de sodium. Celui-ci, soluble dans l'eau est absorbé par la plante et converti en CO₂ grâce à une anhydrase carbonique selon la réaction : $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Ces expériences permettent donc de démontrer qu'en présence de lumière, les végétaux chlorophylliens consomment du CO₂ et libèrent de l'O₂. Toutefois, ces expériences seules ne nous permettent pas d'expliquer ce que permettent ces échanges gazeux pour la plante.

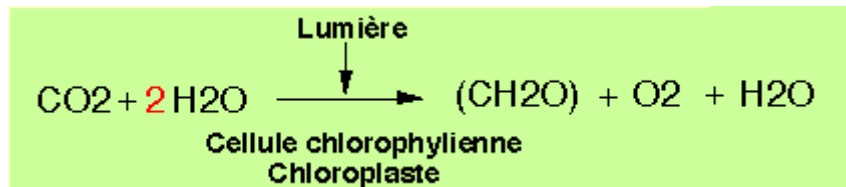
✓ Production de glucides

Dans un deuxième temps, on recherche si l'exposition à la lumière a des conséquences sur la matière organique (et plus particulièrement glucidique) présente au sein du végétal. Des expériences utilisant des isotopes radioactifs démontrent ainsi que l'énergie lumineuse permet, indirectement, la synthèse de glucides simples.

Toutefois, il est difficile de caractériser ces glucides simples produits par la photosynthèse dans des expériences utilisant du matériel simple. Il est possible par contre de caractériser l'amidon (un polymère de glucose mis en réserve lorsque la photosynthèse est très active). Cette caractérisation se réalise avec le Lugol, un réactif spécifique de l'amidon.

On peut ainsi observer la présence d'amidon au sein des chloroplastes de cellules de feuille d'élodée mises à la lumière.

On peut donc déduire de ces expériences qu'une plante éclairée fabrique des glucides (CH₂O) dans ses chloroplastes à partir du CO₂ du milieu. Afin d'obtenir un équilibre chimique de cette réaction, on rajoute H₂O, mais sans que les expériences présentées ici aient permis de démontrer son utilisation réelle.



II-3 - Réactions métaboliques

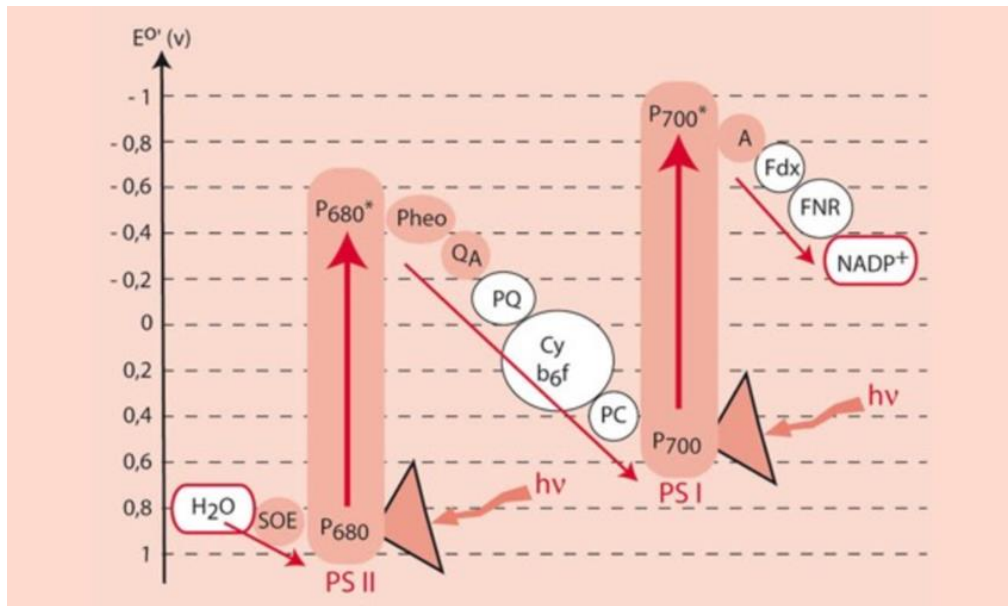
II-3-1-Transport des électrons dans la phase claire

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.

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 intrathylakoïdien 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 extrathylakoïdien) vers l'espace intra-thylakoïdien.



B- Le transport cyclique des électrons

Les électrons peuvent suivre un trajet cyclique qui n'implique que le photosystème I. La ferrédoxine, 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 permet d'accumuler des protons supplémentaires dans l'espace intra-thylakoïdien sans réduire de NADP⁺ mais en favorisant la production d'ATP (relargué au niveau du stroma).

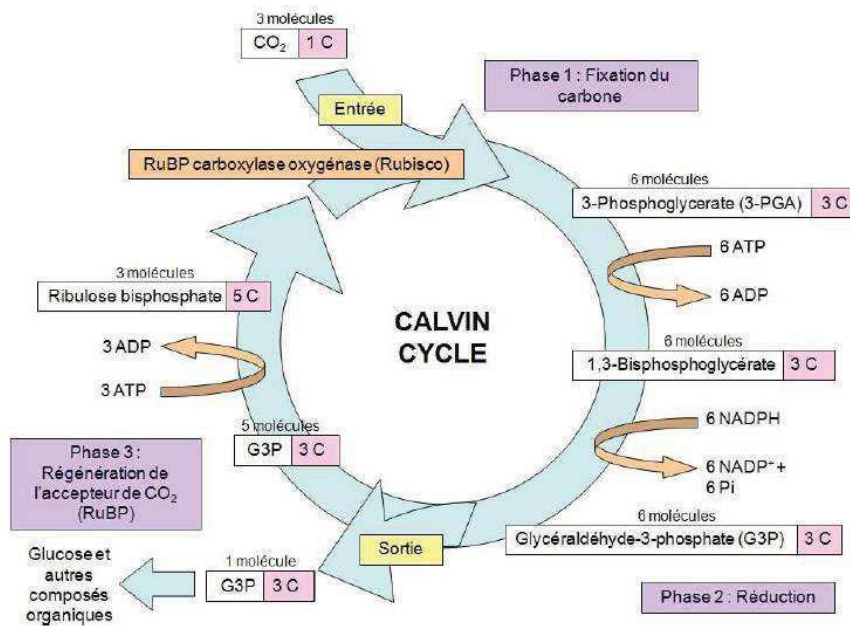
II-3-2- Les mécanismes de la phase sombre :

La phase sombre correspond à la phase d'assimilation du CO₂ 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 et il se déroule dans le stroma du chloroplaste.

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 -Le cycle de Calvin.



➤ 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.

Mode d'action de la rubisco :

Comme son nom l'indique, la Rubisco possède deux activités catalytiques :

*La première correspond à son activité carboxylase qui permet, à partir du RuBP, la formation de deux molécules d'acide phosphoglycérique.

* La deuxième correspond à son activité oxygénase qui permet, à partir du RuBP, la formation d'une molécule d'acide phospho-glycolique et d'une molécule d'acide phosphoglycérique (PGA). Cette seconde activité freine donc la photosynthèse, ne permettant pas la poursuite du cycle de Calvin.

On se demande alors dans quelle condition chacune sera active. Pour répondre à cette question il est essentiel de prendre en compte deux facteurs : tout d'abord l'activité dominante en quantité équivalente d'oxygène et de dioxyde de carbone, puis l'environnement dans lequel la plante est placée.

En effet l'activité dominante en quantité équivalente d'oxygène et de dioxyde de carbone est la carboxylase, car l'affinité de cette enzyme pour le CO₂ est plus importante que l'affinité pour l'O₂. Par contre l'atmosphère est bien plus chargée en O₂ qu'en CO₂ obligeant la Rubisco à fonctionner en oxygénase.

Il est important de préciser que l'activité de la Rubisco varie également face à des variations de température. En vertu d'une propriété intrinsèque de cette enzyme et aussi à cause de l'effet différentiel de la température sur la solubilité du CO₂ et de l'O₂, le rapport de l'activité

oxygénase sur l'activité carboxylase de la Rubisco varie dans le même sens que la température. Autrement dit la fixation du CO₂ par cette enzyme est favorisée à de faible température.

➤ **-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 3phosphoglyceraldéhyde (G3P) qui est un sucre.

➤ **-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 • 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

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.

D-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.

II-4-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 CO₂ 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 CO₂ fixés par heure pour 100 g. de feuilles fraîches dans une atmosphère contenant 1% de CO₂ (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.