

**CHAPITRE V : ETUDE DES ORGANITES CELLULAIRES****V- LES CHLOROPLASTES ET LA PHOTOSYNTHESE****INTRODUCTION:**

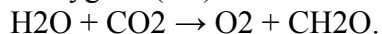
Certains organes des plantes renferment des plastes qui sont des organites limitées par une double membrane. Parmi ces plastes, on distingue celles qui renferment des pigments photosynthétiques capables de transformer l'énergie solaire en énergie chimique par un processus nommé « Photosynthèse ».

La photosynthèse, processus par lequel la plupart des végétaux (dont les algues) et certaines bactéries transforment l'énergie lumineuse en énergie chimique. Les organismes photosynthétiques sont dits autotrophes, car ils sont capables de fabriquer leur propre matière organique en utilisant l'énergie d'origine lumineuse. Ils s'opposent aux organismes hétérotrophes (animaux, champignons et la majorité des bactéries) qui puisent l'énergie dont ils ont besoin exclusivement dans des substances organiques existant déjà.

Chez les végétaux supérieurs, c'est dans les parties vertes de la plante que se déroule la photosynthèse. Plus précisément, ce sont les feuilles qui en sont responsables dans la plupart des cas, mais lorsque celles-ci sont de taille réduite, pour éviter les déperditions d'eau (épinés des cactées), la photosynthèse est majoritairement réalisée dans les tiges.

La photosynthèse, le processus biochimique le plus important sur Terre, produit une importante biomasse. 1m<sup>2</sup> de surface foliaire peut ainsi produire environ 1g de glucides par hectare, soit, pour l'ensemble de la végétation terrestre, un gain annuel d'environ 73 milliards de carbone, ce qui équivaut à vingt fois la production mondiale de charbon. En effet la végétation terrestre transforme chaque année à peu près 600 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> et libère environ 400 milliards de tonnes d'O<sub>2</sub>. La plus grande partie de cette activité est accomplie par le phytoplancton (algues unicellulaires vivant dans la mince couche superficielle des océans).

Le principe de base de la photosynthèse est de se servir de l'énergie lumineuse pour fabriquer des glucides (C<sub>m</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>), à partir d'eau et de dioxyde de carbone, avec production d'oxygène (O<sub>2</sub>). Cette réaction peut s'écrire sous l'équation simplifiée suivante :



Ce type de photosynthèse est le plus connu, mais il en existe d'autres, où l'eau est remplacée par le soufre. C'est le cas des bactéries vertes (chlorobactéries), et des bactéries pourpres soufrées (thiorhodacées), qui vivent dans des milieux particulièrement riches en soufre. Les bactéries pourpres (athiorhodacées) utilisent, quant à elles, des substances organiques particulières, comme l'isopropanol pour *Rhodospseudomonas*.

On peut diviser la photosynthèse en deux étapes. Pendant la première étape, les réactions photochimiques dépendantes de la lumière convertissent l'énergie solaire en énergie chimique qui est stockée dans les ATP et les NADPH.

Durant la deuxième étape, les réactions indépendantes de la lumière (réactions obscures) synthétisent des glucides à partir du CO<sub>2</sub> en utilisant l'énergie chimique produit lors de la première phase.

**HISTORIQUE :**

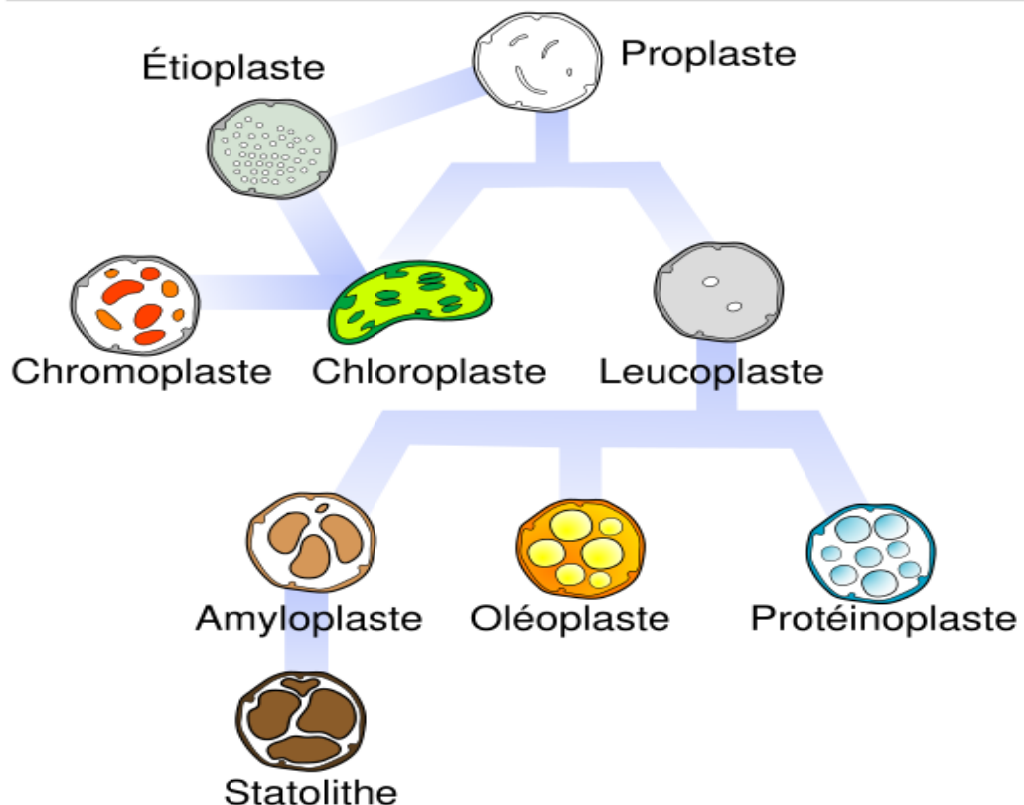
Le chloroplaste a été découvert seulement après les recherches scientifiques sur les plantes. Les premières recherches ont commencé par Joseph Priestley en 1771. Il était intéressé dans l'étude des gaz et il identifia plusieurs gaz. Plus tard, il démontra que les plantes sont capables de régénérer les gaz qui viennent des animaux.

Quatre ans plus tard, Jan Ingenhousz reprend les travaux de Priestley et il montre que le dégagement d'oxygène se produit seulement à la lumière. Pendant la nuit, les plantes rejettent un gaz, et ce gaz fait que la combustion d'une bougie est impossible.

À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, les recherches ont conclu que les plantes respirent comme tout le monde. En 1837, Dutrochet découvre que le pigment vert dans les feuilles est la chlorophylle. En 1862, Julius von Sachs, le plus grand physiologiste de son temps, prouve que l'assimilation chlorophyllienne se déroule dans des chloroplastes. C'est ce que confirme le biologiste Allemand Théodore Engelmann en 1881 concernant les chloroplastes comme le siège de la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique. Seulement en 1898, le scientifique Barnes invente le terme photosynthèse.

**I- LES PLASTES :**

Tous les organes végétaux renferment des plastes, qui sont issues des proplastides qui sont de structure simple et non différenciés que l'on trouve généralement dans les méristèmes. Le plaste est un organe cellulaire possédant un ADN propre, il est dit semi-autonome. Un plaste possède une membrane interne et une membrane externe qui forment l'enveloppe plastidiale. On le rencontre dans les cellules eucaryotes de tous les végétaux chlorophylliens (algues et plantes). Il est certainement le fruit de l'évolution d'une symbiose entre une cellule végétale et une bactérie photosynthétique (=théorie de l'endosymbiose).

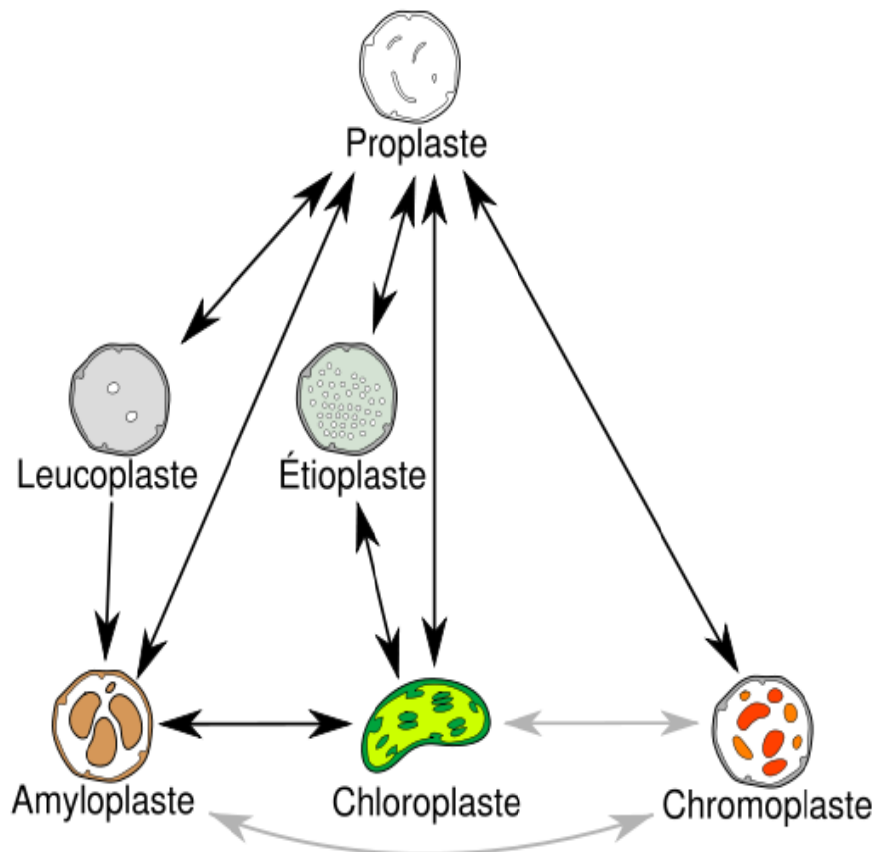
**Plastes**

On distingue de nombreux types de plastes, dont 6 sont interconvertibles entre eux :

- les proplastes, ou plastes non différenciés.
- les chloroplastes, où a lieu la photosynthèse ; ils contiennent de la chlorophylle.
- les chromoplastes. Ils contiennent des pigments autres que la chlorophylle : les caroténoïdes (dont les xanthophylles ou le lycopène).
- les leucoplastes, sans pigment.
- les amyloplastes servent au stockage des grains d'amidon.
- les étioplastes, chez les plantes qui manquent de lumière.

Un plaste peut changer de type. C'est le processus d'interconversion plastidiale. Par exemple: un leucoplaste de pommes de terre peut se transformer en chloroplaste à la lumière; un chloroplaste de citron devient chromoplaste au cours de la maturation du fruit. Il existe aussi les oléoplastes, les protéoplastes,...

### Interconversions possibles des plastes



- **Les proplast**es sont des petits organites spécifiques des cellules végétales de structure simple et non différenciés que l'on trouve généralement dans les méristèmes
- **Les chloroplast**es sont des organites présents dans le cytoplasme des cellules végétales. Ils sont sensibles aux expositions des différentes ondes du spectre lumineux. Par l'intermédiaire de la chlorophylle qu'ils possèdent.
- **Les étioplast**es sont soit des chloroplastes pas encore différenciés, soit des chloroplastes étiolés par manque de lumière. Ils sont généralement rencontrés dans les plantes ayant poussé à l'obscurité.
- **Un chromoplaste** est un organite observé dans les cellules des organes végétaux riches en pigments non chlorophylliens, comme les xanthophylles, les carotènes, colorés de jaune à orange (par exemple les cellules de pétales de fleurs).
- **Les leucoplast**es représentent une catégorie de plastes, N'ayant pas de pigments, les leucoplastes ne sont pas verts, ce qui suggère une localisation dans les racines et dans les tissus non photosynthétiques. Ils peuvent se spécialiser pour stocker des réserves d'amidon, de lipides ou de protéines, ils sont alors respectivement appelés **amyloplast**es, **oléoplast**es, ou **protéinoplast**es.
- **Un amyloplaste** est un plaste qui s'est spécialisé dans le stockage de l'amidon. Il est présent en particulier dans les cellules des organes de réserves, comme les tiges souterraines hypertrophiées (tubercules) de pomme de terre.
- **Les oléoplast**es sont des organites spécifiques des cellules végétales spécialisés dans le stockage des lipides, essentiellement sous forme de plastoglobules (gouttelettes lipidiques sphériques).
- Les **protéinoplast**es (parfois appelés *protéoplastes*, *aleuoplastes*, ou *aleuronoplastes*) sont des organites spécialisés et spécifiques des cellules végétales. Ils contiennent des corps cristallins de protéines dont certaines peuvent être des enzymes. Les protéinoplastes sont présents dans de nombreuses graines, telles que les cacahuètes.

## II- AUTOTROPHIE ET HETEROTROPHIE :

On appelle hétérotrophe les organismes qui dépendent d'une source extérieure de molécules organique. Dans les temps anciens, tous les organismes vivants étaient hétérotrophes qui devaient trouver leur matière première et leur énergie dans des molécules organiques simples dissoutes dans leur environnement aquatique. Ces organismes aquatiques hétérotrophes ont colonisés le milieu terrestre avec l'évolution en appliquant une nouvelle stratégie métabolique. Ce nouveau type d'organisme avait la capacité de fabriquer ses propres aliments organiques. Cet organisme est appelé Autotrophe.

Au cours de l'évolution, deux types principaux d'Autotrophes ont évolués qui peuvent se distinguer par leur sources d'énergie : les Chimiotrophes et les Phototrophes.

Les chimiotrophes sont des organismes qui utilisent l'énergie stockée dans les molécules inorganiques comme l'ammoniac, le sulfure d'hydrogène ou les nitrites pour transformer l'eau en composés organiques.

Les Phototrophes par contre utilisent l'énergie du rayonnement solaire pour réaliser la même tâche. Parmi les phototrophes on distingue, les plantes, les algues Eucaryotes, les protistes flagellés et certaines bactéries telles que : les B ; sulfureuses, les B. vertes et les Cyanobactéries.

Les premiers groupes de phototrophes, qui ont sans doute dominés la terre pendant deux milliards d'années, utilisaient le sulfure d'hydrogène comme source d'électrons pour la photosynthèse et effectuaient la réaction globale  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} + \text{lumière} \rightarrow (2\text{CH}_2\text{O}) + 2\text{S}$ . Il y a environ 2,5 milliards d'années est apparu sur terre un nouveau type de procaryote photosynthétique capable d'utiliser une source d'électrons beaucoup plus abondante, l'eau. Non seulement l'eau permettait à ces organismes (Cyanobactéries) d'exploiter un éventail beaucoup plus diversifié d'habitats sur terre, mais ils produisaient un déchet qui eut des conséquences énormes pour toutes les formes de vie. Le déchet en question était l'oxygène moléculaire ( $\text{O}_2$ ) provenant de la réaction globale :  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{lumière} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$ . Non seulement l'évolution d'un type de photosynthèse libérant l'oxygène préparait la route qui a permis aux cyanobactéries de devenir les formes de vie dominantes, mais elle donnait aux organismes la possibilité de développer par l'évolution un métabolisme aérobie.

### III- ORIGINE DES CHLOROPLASTES :

La présence d'une double membrane, d'un ADN circulaire et des ribosomes qui possèdent une constante de sédimentation qui est très proche de celle des procaryotes ainsi que des lipides dans la membrane interne semblable à ceux des bactéries font penser à une origine bactérienne.

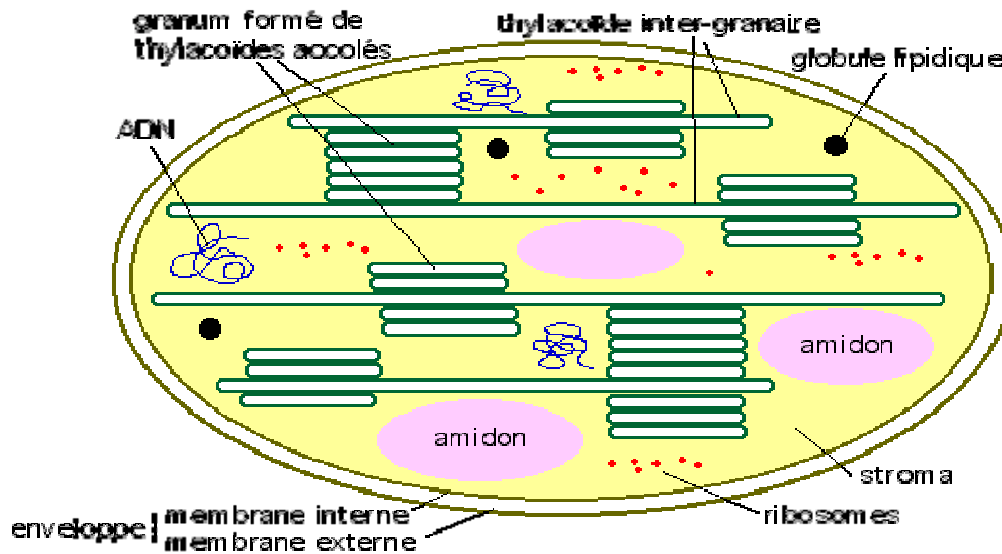
Dès le début du 20<sup>ème</sup> siècle, les chercheurs pensaient que les plastes et les mitochondries peuvent provenir sans doute de bactéries d'où le théorème endosymbiotique.

Les chloroplastes (comme les mitochondries) sont le résultat d'une endosymbiose, c'est-à-dire que des cellules primitives ont ingéré des bactéries (cyanobactéries pour les chloroplastes, et actinobactéries (gram +) pour les mitochondries) puis ont vécu en symbiose avec ces dernières. Une cellule eucaryote ingère une bactérie, celle-ci devenant un chloroplaste avec deux membranes ayant pour origine la membrane de la bactérie pour la membrane interne, la membrane cytoplasmique pour la membrane externe (Rhodophyta et Chlorobionta).

### IV- STRUCTURE DES CHLOROPLASTES:

La taille des chloroplastes est de l'ordre du micron. Ils prennent souvent la forme de disques aplatis de 2 à 10 microns de diamètre pour une épaisseur d'environ 1 micron. Le chloroplaste est un organite composé de deux membranes séparées par un espace inter membranaire. Il contient un réseau membraneux constitué de sacs aplatis nommés thylakoïdes qui baignent dans le stroma (liquide intra-chloroplastique). Les thylakoïdes contiennent de la chlorophylle (pigments verts) et des caroténoïdes (pigments jaune orange). Un empilement de thylakoïdes se nomme granum (au pluriel : des grana).

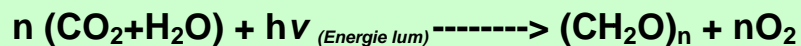
De plus, ces organites contiennent de l'ADN circulaire (dont la taille et la structure rappellent celui d'une bactérie) et des ribosomes leur permettant de se dupliquer seuls. D'autre part, le stroma contient quelques réserves sous forme d'amidon ou de gouttelettes lipidiques.



## V- LA PHOTOSYNTHESE :

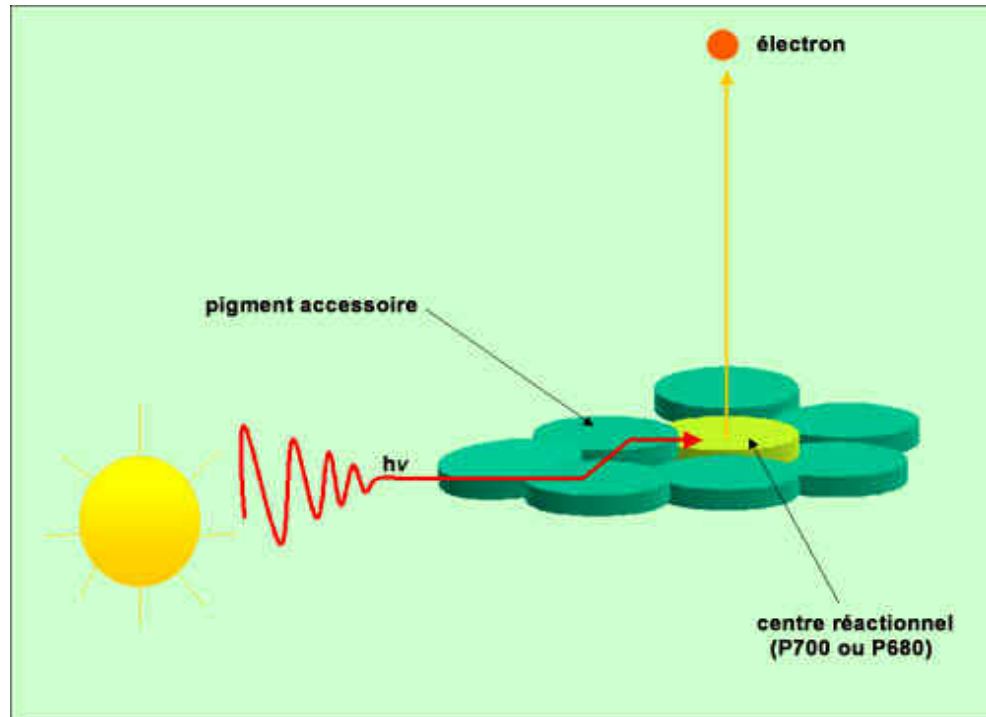
La photosynthèse est un phénomène biochimique au cours duquel l'énergie chimique est utilisée pour produire des composés organique et l'oxygène à partir de l'eau et le désoxyde de carbone.

La formule générale de la photosynthèse est:



### Le principe :

L'ensemble structural impliqué dans la photosynthèse est appelé photosystème: ce sont des groupes de plusieurs centaines de molécules de chlorophylles contenus dans un thylakoïde (unité structurale composée de sacs et de vésicules) où a lieu la photosynthèse. Les eucaryotes (organismes dont les cellules ont un noyau individualisé) ont deux types de photosystèmes: I et II (respectivement P700 et P680). Les pigments accessoires absorbent la lumière et transmettent l'énergie de molécule en molécule de la périphérie du système jusqu'au centre réactionnel qui comprend une paire de molécules de *chlorophylle a* spécialisées. Ces molécules sont les seules qui, lorsqu'elles sont excitées par les photons, peuvent donner des électrons à l'accepteur d'électron.

Schéma d'un photosystème

Les électrons excités par la lumière seront acceptés par des molécules appartenant à une chaîne de transport d'électron. Ces réactions se font dans les membranes des thylakoides et sont appelées "*réactions photochimiques*".

La photosynthèse comprend deux phases distinctes et successives : la phase lumineuse, et la phase obscure. La première, dite phase lumineuse parce qu'elle est déclenchée par la lumière, dépend étroitement de la chlorophylle et dégage une énergie suffisante pour produire de l'ATP et du NADPH (NADP), deux molécules importantes utilisées dans la phase suivante.

La deuxième phase est dite phase obscure, non pas parce qu'elle a lieu dans le noir, mais parce que, à la différence de la première, elle n'a pas besoin de lumière. Dans cette phase, les atomes de carbone du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) se lient entre eux pour former du glucose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ), suivant un processus graduel, qui se fait par étapes, au cours duquel sont consommés de l'ATP et du NADPH.

**A- LA PHASE CLAIRE:****les deux types de réactions photochimiques :**

On considère la photophosphorylation cyclique et acyclique, toutes les deux photodépendantes.

- **la photophosphorylation cyclique:**

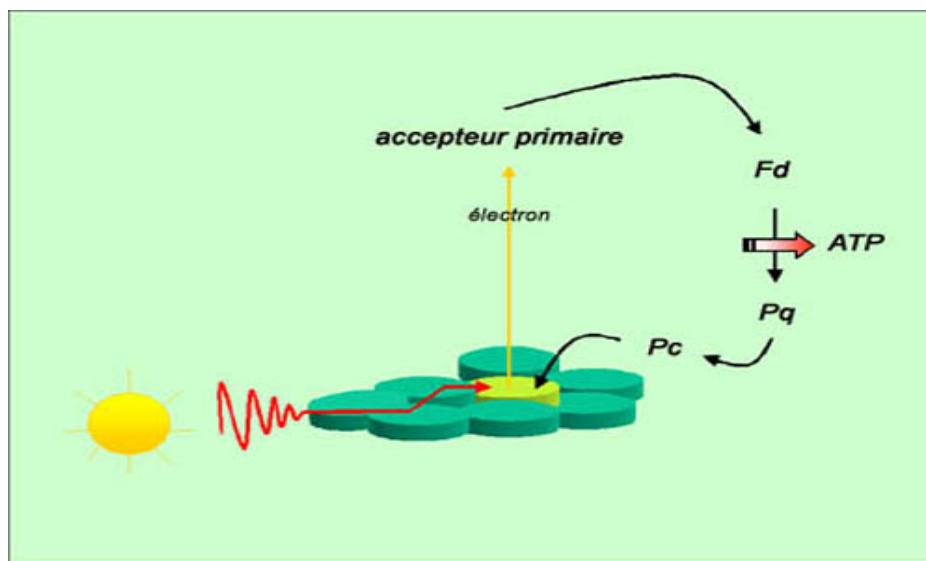
C'est le trajet le plus simple pour l'électron excité.

- Il y a production d' ATP (Adénosine Triphosphate: molécule hautement énergétique) mais pas d'O<sub>2</sub> ni de NADPH (Nicotinamide adénosine diphosphate à pouvoir réducteur).

- Les électrons excités quittent le chlorophylle du centre réactionnel, passent par une courte chaîne de transport d'électrons et retournent au centre réactionnel.

- C'est une série d'oxydoréductions (redox) qui transporte l'électron d'une protéine à une autre.

- Ceci se fait dans la membrane interne des thylakoïdes.

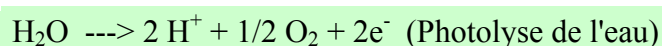


L' ATP est produit de façon indirecte par la force proton motrice (création d'un gradient électrochimique) due aux passages de protons de l'extérieur de la membrane du thylakoïde vers l'intérieur.

- **la photophosphorylation acyclique :**

Cette réaction implique les deux photosytèmes (I et II) avec les centres réactionnels (P700 et P680).

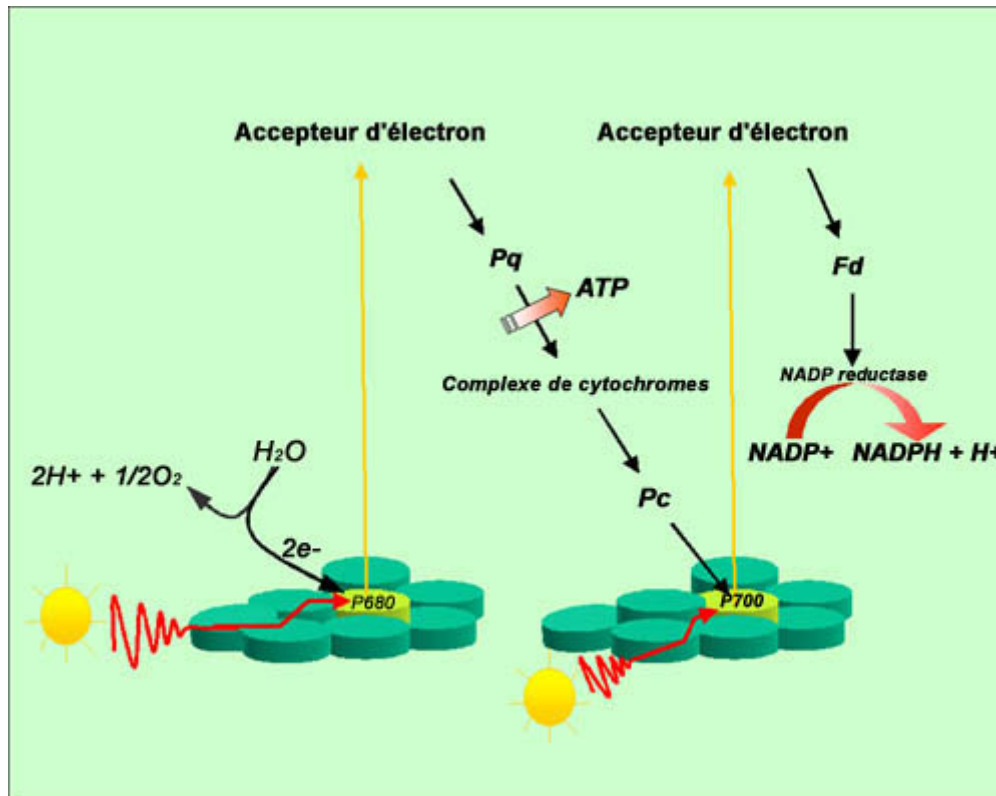
L'énergie lumineuse provoque l'excitation et le départ d'un électron d'une molécule de chlorophylle du photosystème II. Pour compenser cette perte, ce dernier récupère un électron à partir de la photolyse de la molécule d'eau:



Il y a production d'O<sub>2</sub>, d'ATP (indirectement par la force proton-motrice) et le NADP<sup>+</sup> est réduit en NADPH et H<sup>+</sup>.

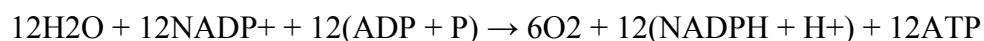
C' est donc l'eau qui est le donneur d'électron et le NADP<sup>+</sup> qui est l'accepteur final; l' O<sub>2</sub>, libéré dans l'atmosphère, est utilisé dans la respiration cellulaire.





Les phases lumineuses permettent donc de convertir l'énergie solaire captée par les pigments en énergie chimique qui est entreposée dans les molécules d'ATP très énergétiques et dans les molécules de NADPH (pouvoir réducteur). La synthèse de l'ATP se fait donc grâce à la force proton-motrice et à l'ATP synthétase qui permet la réaction  $ADP + P_i \rightarrow ATP$ . Grâce à la formation de ces deux molécules, la fixation du  $CO_2$  est favorisée: c'est le cycle de Calvin.

On peut résumer la réaction sous cette formule :



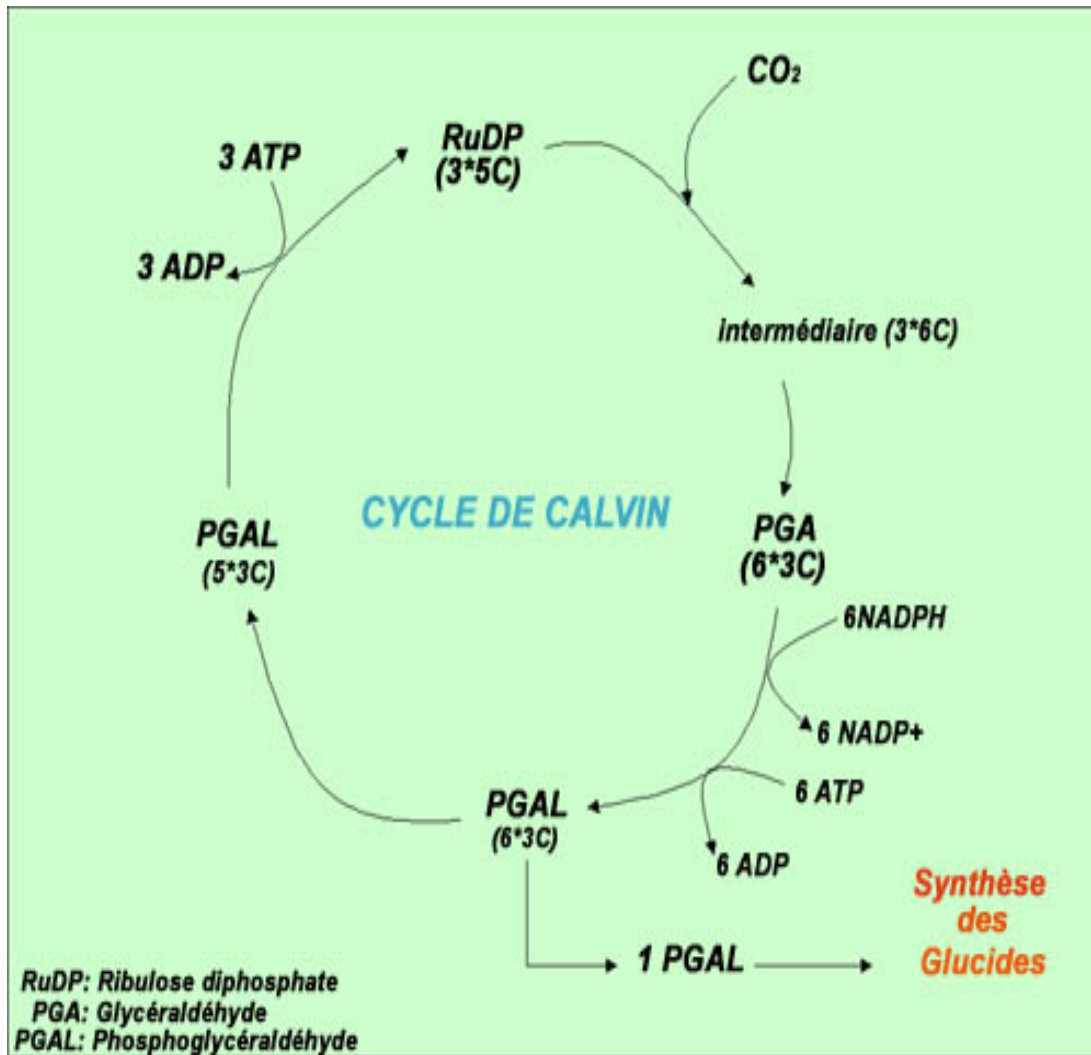
### **B : LA PHASE SOMBRE :**

Le cycle de Calvin se fait dans le stroma des chloroplastes chez les eucaryotes. C'est la dernière étape de la Photosynthèse où l'ATP et le NADPH, produits pendant les réactions photochimiques, sont utilisés.

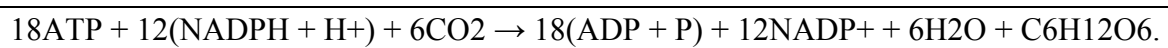
Ce cycle est une succession de réactions biochimiques, régularisées par différents enzymes pour permettre la réduction et l'incorporation du  $CO_2$  atmosphérique dans des molécules organiques.

L'enzyme clé de ce cycle est la *Rubisco* car elle permet la fixation du  $CO_2$  au RuBP: cette *Rubisco* ou *ribulose-1-5-biphosphate carboxylase* représente jusqu'à 16 % des protéines totales du chloroplaste; c'est une des protéines les plus importantes et abondantes sur terre.

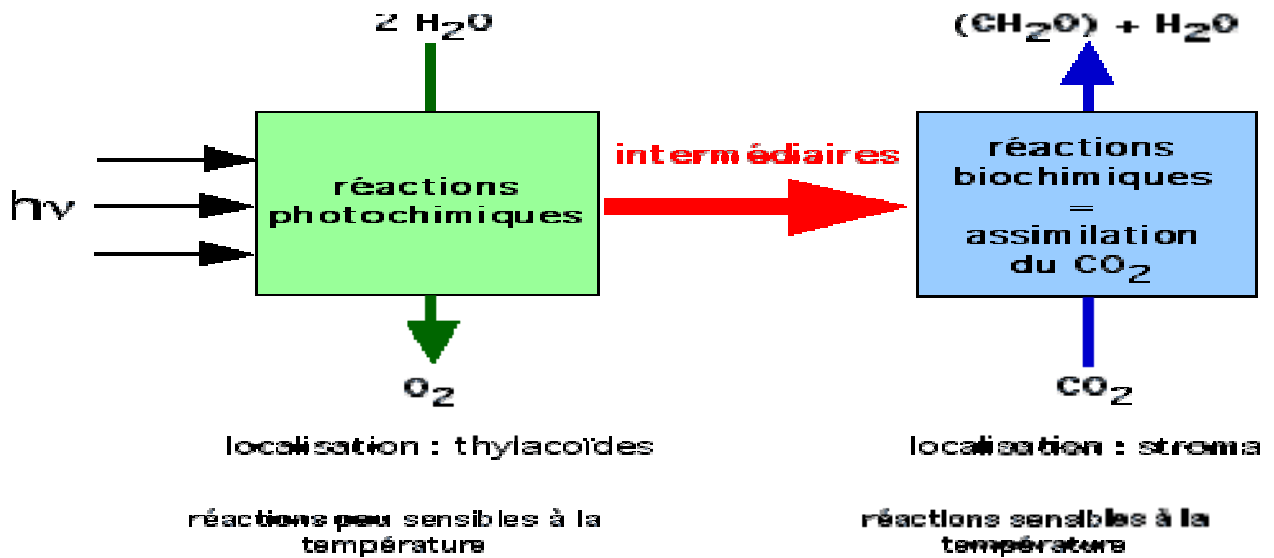
Ce cycle se répète 6 fois (donc 6 incorporation de  $CO_2$ ) pour former une molécule de glucose par exemple. Ce glucose pourra ensuite servir dans la synthèse de polysaccharides, d'acides gras, d'acides aminés, nucléotides et toutes les autres molécules nécessaires à la vie de la plante.



L'équation globale de ces réactions est la suivante :



En résumé, on peut compléter le schéma précédent :



### Conclusion :

Le mécanisme de la photosynthèse peut se partager en deux phases essentielles, indépendantes sur le plan des réactions spécifiques mais parfaitement coordonnées entre elles grâce aux intermédiaires énergétiques formés.

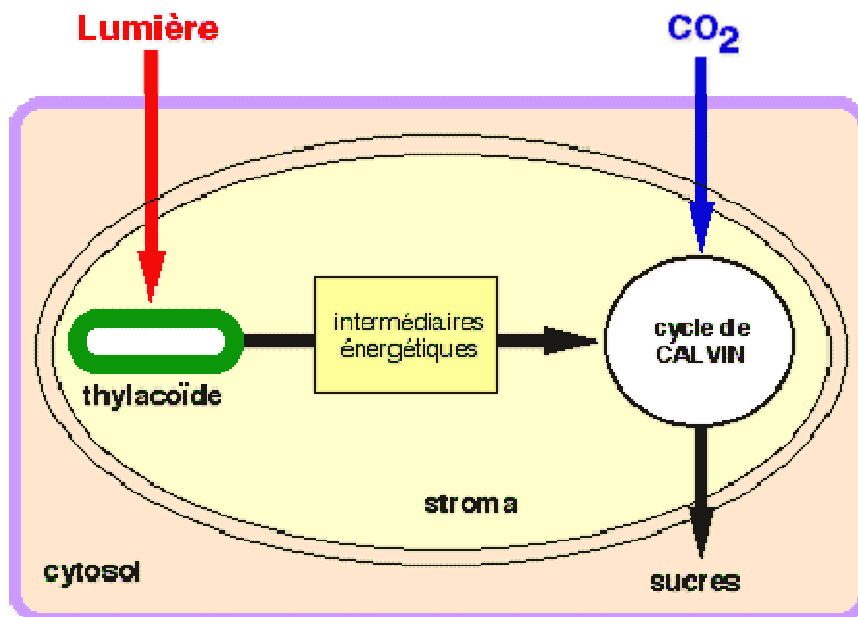
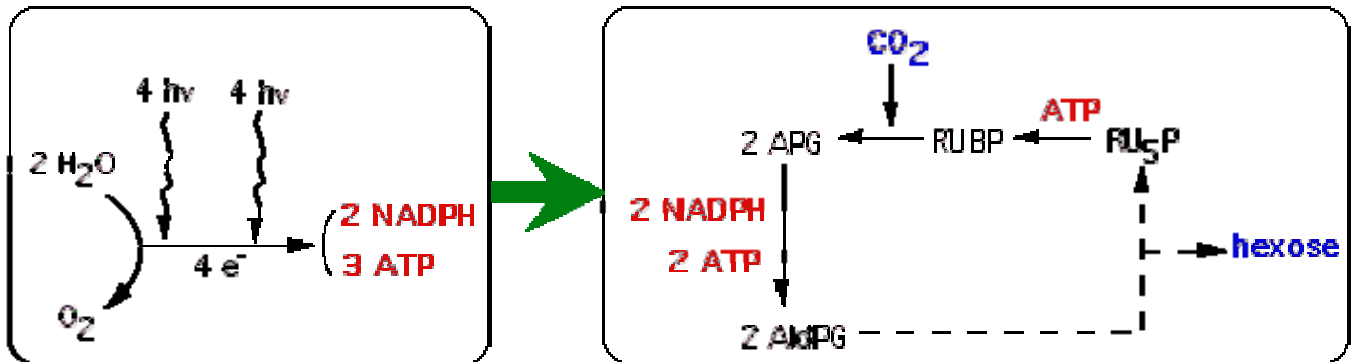


Schéma général de la photosynthèse dans le chloroplaste:

- à gauche, la phase photochimique réalisée dans les membranes des thylacoïdes,
- à droite, la phase biochimique représentée par le cycle de Calvin dans le stroma,
- au centre, les intermédiaires, NADP/NADPH et ADP/ATP.

L'ATP est un intermédiaire énergétique qui doit être continuellement reformé à partir de l'ADP (couple ADP/ATP). Le NADPH est un intermédiaire d'oxydoréduction qui doit être maintenu continuellement à l'état réduit (couple NADPH / NADP). En d'autre terme, le NADPH et l'ATP produits par la phase photochimique permettent la réalisation de la phase biochimique mais leur régénération par la phase photochimique est indispensable à la poursuite de la phase biochimique.

Le bilan de la fixation d'une molécule de  $\text{CO}_2$  par les plantes au cours de la photosynthèse en  $\text{C}_3$  peut être calculé.



Représentation schématique du bilan de la photosynthèse pour la fixation d'une molécule de  $\text{CO}_2$ .

#### BILAN

- 1 - La réduction de 2 APG en 2 AldPG nécessite 2 NADPH et 2ATP.
- 2 - La régénération de 1 RUBP à partir de 1 RU5P nécessite 1 ATP.
- 3 - La formation des 2 NADPH à partir de 2  $\text{NADP}^+$  (transfert de 4 électrons) est réalisée par l'oxydation de 2 molécules d'eau.
- 4 -Il faut 2 x 4 photons pour exciter successivement le PSII puis le PSI et permettre le transfert de 4 électrons de  $\text{H}_2\text{O}$  au  $\text{NADP}^+$ .