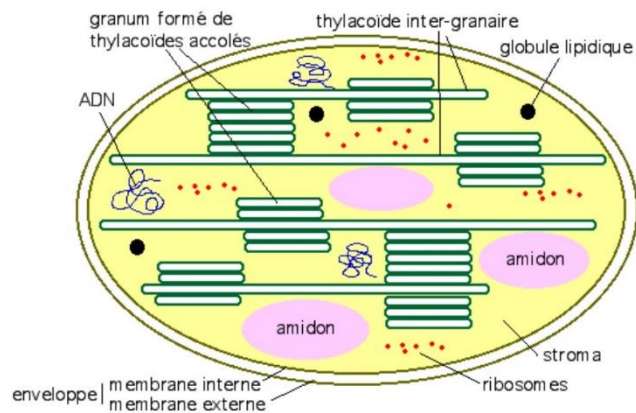


Métabolisme primaire (par opposition à métabolisme secondaire) nécessaire à la survie d'une cellule.

Structure d'un chloroplaste



La photosynthèse est composée de deux phases :

- Photochimique. Elle doit permettre de produire de l'énergie par l'utilisation de la lumière et de l'eau sous forme de NADPH et de l'ATP pour les besoins de la plante et la fixation du carbone.
- Le cycle de fixation du carbone ou de fabrication des glucides appelé cycle de Calvin. Il a lieu dans le stroma.

Rmq : NADP ressemble au NAD avec un groupement phosphate.

Il existe deux types de photosynthèse en présence ou de l'absence d'oxygène :

photosynthèse oxygénique	photosynthèse anoxygénique
$2H_2O + CO_2 \rightarrow O_2 + H_2O + CH_2O$	

Phytochimique

La phase photochimique permet de produire à partir de la lumière :

- Dans un premier temps un gradient H^+ dans la lumière des thylakoïdes qui sera utilisé pour fabriquer de l'ATP. Elle débute au niveau du photosystème II
- Un second temps du $NADP^+$ en NADPH. Son pouvoir réducteur en fait une molécule utilisée pour les réactions anaboliques. Le début est initialisé par le photosystème I.

Les produits serviront notamment à produire des sucres, un des quatre principaux constituants du vivant.

Les photosystèmes sont formés :

- D'un complexe du centre réactionnel. Il est constitué de deux molécules de chlorophylles de type a sans magnésium. Grâce à l'énergie lumineuse, elles perdent un électron qu'elles regagner en oxydant une molécule d'eau ou en plastocyanine.
- De plusieurs complexes collecteurs de lumière constitués d'environ 200 à 300 pigments. Ils élargissent le spectre et la surface de collecte de la lumière du centre réactionnel.

Les pigments sont des molécules spécialisées pour capter la lumière

Les pigments

Le spectre de lumière exploitée lors de la photosynthèse est contraint par l'utilisation de longueurs d'ondes :

- Supérieures à 380nm. En dessous, la lumière est filtrée par l'atmosphère et est néfaste pour les cellules.
- Inférieures à 750nm. Au-dessus, les ondes sont absorbées par l'eau, un constituant présent en grande quantité dans les organismes.

Radiation photosynthétique active ensemble des longueurs d'ondes utilisées par la plante.

Fonctionnement des pigments

La photosynthèse débute lorsqu'un pigment absorbe un photon. Un de ses électrons passe sur une orbitale avec une énergie potentielle plus élevée. Pour être absorbé, les photons doivent apporter l'énergie équivalente à la différence d'énergie entre l'état fondamental et excité.

Rmq : l'énergie d'un photon est sa longueur d'onde. Les photons verts ne sont pas absorbés car leur énergie ne correspond pas à la différence.

Rmq : Chaque molécule n'est capable d'absorber que des longueurs d'onde précises.

L'état excité est un état instable. Les électrons reviennent à l'état fondamental en libérant le surplus d'énergie sous forme :

- De chaleur.
- De lumière. Par exemple, un concentré de chlorophylle émet de la lumière rouge avec une longueur d'onde plus grande que le photon reçu (fluorescence).

Les pigments sont regroupés au sein de structure appelée antenne collectrice. Il existe deux grandes familles de pigments :

Chlorophylle	Caroténoïde
--------------	-------------

Les algues utilisent des pigments supplémentaires pour réaliser la photosynthèse car le milieu aquatique modifie les propriétés de la lumière. Ils sont formés de complexe protéines et de pigments associés à des phycobiliprotéines appelé phycobiline.

Les caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments additionnels qui aident à capter :

- L'énergie lumineuse.

- À la photoprotection en dissipant le surplus d'énergie. Elle évite la formation de molécules oxydantes dangereuses dû à l'interaction entre les photons et l'oxygène qui peuvent.

Les caroténoïdes sont des molécules lipophiles présentes dans les membranes des thylakoïdes. Elles sont fabriquées dans les plastides à partir de terpènes. Leur pic d'absorption se situe à 450 nm. Leur structure est apparentée aux pigments présent dans notre œil.

Les chlorophylles

Les pigments chlorophylliens sont composés :

- Un noyau porphyrine hydrophile qui enserme un ion magnésium (Mg^{2+}) dans le stroma.
- Une queue phytol hydrophobe qui est ancrée dans la membrane des thylakoïdes.

Il existe quatre types de chlorophylle :

Type de chlorophylle (pics d'abs)	Présence
A (430 nm et 662 nm)	Universelle
B (454 nm)	Plantes et algues vertes
C1 et c2	Algues brunes
D	Algues rouges

Les différences de comportement des types de chlorophylle face à la lumière dépendent des groupements situés autour du noyau. Par exemple, pour les deux types de chlorophylles les plus présentes c'est à dire a et b, la différence de pics d'absorption s'explique par la substitution d'un groupement $-CH_3$ par un $-CHO$.

Un changement de l'état énergétique se produit dans la molécule de chlorophylle entre en contact avec un photon bleu ou rouge. Si le photon est de couleur bleu, elle libère le surplus d'énergie sous forme de chaleur pour se ramener à un photon rouge.

Il existe trois possibilités pour revenir à l'état initial c'est-à-dire pour dissiper l'énergie et revenir à une configuration stable :

- Fluorescence c'est-à-dire par l'émission d'un photon de plus faible énergie que celui reçu.
- Par résonance. L'énergie est transférée à la molécule suivante.
- Photochimie c'est-à-dire en cédant un électron.

Fluorescent produit de la lumière.

Phosphorescence restitue l'énergie lumineuse sous une autre fréquence généralement visible.

C'est parce que la chlorophylle est associée à d'autres protéines dans la cellule qu'elle n'émet pas de lumière.

Fonctionnement de la phase photochimique

La photosynthèse se déroule d'abord, dans le photosystème II où a lieu la production du gradient de H^+ utilisé notamment pour la chimiosmose de l'ATP.

1. Excitation des pigments par la lumière. L'énergie se propage vers le complexe du centre exciteur. L'électron excité transmet son état à un électron de la molécule voisine et retrouve son état fondamental.
2. P680 transfère un électron à l'accepteur primaire. Il devient alors $P680^+$.
3. Une enzyme construite autour de ions Mn (Manganèse) transfère les électrons de l'eau un par un vers $P680^+$ ($H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$) pour combler la charge manquante. La lyse de l'eau a lieu dans la lumière des thylakoïdes. Rmq : $P680^+$ est l'oxydant biologique le plus fort. Le centre accepte successivement 4 électrons pour oxyder l' O_2 .
4. L'accepteur primaire du photosystème cède son électron à la chaîne de transport constituée d'une succession de plastoquinones (Pq),

puis d'un complexe de cytochromes. Rmq : les cytochromes sont aussi appelés cycle Q et réalisent le transfert de H^+ du stroma vers la lumière des thylakoïdes.

5. La plastocyanine (Pc), une molécule mobile, transfère les électrons au photosystème I.

Dans le photosystème I pour produire du NADPH :

6. L'énergie lumineuse active PSI de la même façon que PSII pour remonter l'énergie de l'électron.
7. L'électron est transféré à la ferrédoxine (Fd) puis à l' $NADP^+$ réductase qui catalyse le $NADP^+$ en NADPH au niveau du stroma. Cela contribue également à la baisse de la concentration de H^+ dans le stroma.

Photolyse de l'eau dissociation d'une molécule d'eau par la lumière.

Dans la photosynthèse oxygénique, le CO_2 joue le rôle d'accepteur d'électrons. Il est possible de réaliser la photosynthèse sans CO_2 en utilisant un autre réducteur comme Fe^{3+} .

Rendement de la phosphorylation acyclique

Cela correspond à l'ATP produit par nombre d'électrons générés au départ.

- La lyse de l'eau $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$
- Par électron, le cytochrome transfère entre 4 à 8 H^+ du stroma vers le lumen.

Au niveau de l'ATP synthase, on sait que comme il y a trois sites de synthèse et qu'un tour nécessite 10 H^+ .

Bilan :

- Nombre de protons maximum générés $4H^+ + 4 \times 8H^+ = 40H^+$
- $ATP = \frac{10H^+}{3} = 3,33$

Conclusion : Le rendement est $\frac{ATP}{4e^-} = \frac{ATP}{H^+} \times \frac{H^+}{4e^-} = \frac{1}{3,33} \times \frac{40}{4} = 3$

Structure des photosystèmes

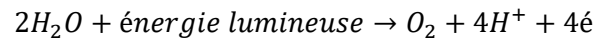
La phase photochimique a lieu en deux étapes. Elles sont commencées par un photosystème qui agissent successivement et qui sont le lieu de la conversion de l'énergie lumineuse en chimique en réalisant une réduction :

Le photosystème II (P680)	Le photosystème I (P700)
---------------------------	--------------------------

Rmq : les herbicides sont des inhibiteurs de la chaîne de transport des électrons.

Photosystème II

Le photosystème II réalise la réaction :



La longueur d'onde pour réaliser une oxydation de l'eau est comprise entre 660 et 680 nm. Il est composé de trois parties :

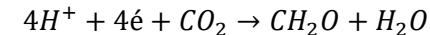
- Une antenne collectrice de photons libre qui navigue dans la membrane des thylakoïdes et peut aller sur le complexe I. Il est composé de :
 - Des pigments associés grâce à des protéines d'amarrage.
 - De protéines périphériques (ou distales).
- Un centre réactionnel composé de deux sous unités dimère D1 et D2.
- Un complexe d'oxydation de l'eau situé dans la lumière des thylakoïdes associé à un atome de manganèse (Mn).

Le fonction du site réactionnel

1. Chlorophylle reçoit la lumière cède électron.
2. PSII $2H_2O \rightarrow$ oxydé cède un électron à $O_2 + H^+ + 4e^-$
3. Retiré les électron complexe d'oxydation vient compenser la perte
4. Quatre électrons de l'oxydation de l'eau viennent un à un produit 3 émissions de photons pour l'étape est lieu.

Photosystème I

Le photosystème I réalise la réaction :



Il est constitué de :

- Une antenne collectrice
- Un centre réactionnel constitué d'un dimère de chlorophylle

Coordination de l'activité entre les photosystèmes I et II

Le deux photosystèmes fonctionnent successivement et à vitesse similaire. Leur activité est coordonnée par l'intermédiaire de la concentration de plastoquinone (PQH_2) qui est le produit et le substrat des deux réactions.

Le transport cyclique du photosystème I

Le transport cyclique est PSI le transport cyclique (circuit fermé)

Ferrédoxine cède son électron au cytochrome puis vers PSI avant de revenir à la ferrédoxine. Génère de l'ATP.

L'apparition du transport cyclique semble précéder celui de

Le transport cyclique semble être apparu en premier au cours de l'évolution. Certaines Bactéries possède uniquement le PSI pour synthétiser l'ATP dont elles ont besoin.

Les plantes dépourvues de ce système poussent sous faible lumière mais Il semble que le transport cyclique est un rôle de photoprotecteur servant à dissiper le surplus d'énergie de la photosynthèse.

Il existe des ressemblances entre les mitochondries et les chloroplastes même si le principe de création du gradient est différent :

- $NADPH + H^+$ et l'ATP sont produits dans le stroma où a lieu le cycle de la synthèse des glucides (Calvin).
- Les réactions se déroulent dans la membrane.

Produit des molécules à 3 atomes de carbones 3 phosphoglyceraldéhyde (PGAL) 3moles de CO₂

1. Le CO₂ est ajouté à la ribulose di phosphate (5C)
2. Enzyme ribulose di phosphate carboxylase/oxygénase. Elle catalyse la réaction mais ne distingue pas le CO₂ du O₂. Dans.
3. C'est l'enzyme la plus abondante sur Terre.

Synthèse d'ATP

L'acidification du lumen est utilisée pour synthétiser de l'ATP. Les protons servent à créer à activer des ATP synthase, une machine moléculaire. Elle possède deux domaines :

Intra membranaire	Extra membranaire (dans le stroma)
-------------------	------------------------------------

La structure diffère légèrement entre les espèces mais le principe reste le même. Le rotor poussé par les protons modifie successivement des trois sites de catalyse en changeant leur conformation. Il passe d'ouvert, à relâché, puis à fermer.

Les protons font tourner le rotor qui entraîne le stator là où trois sites de catalyse de l'ATP. Un tour nécessite 10 protons et produit une molécule d'ATP. Une ATP synthase tourne 130 fois par seconde.

Efficacité de la photosynthèse

L'efficacité de la photosynthèse dépend de :

La lumière	La concentration de CO ₂
------------	-------------------------------------

Rmq. : Le facteur limitant dans l'activité de photosynthèse est le CO₂ qui ne constitue que 3% de l'air.

Photosynthèse net production d'oxygène moins sa consommation par la respiration cellulaire.

Rmq. : La photosynthèse net se mesure en suivant l'évolution de la concentration de CO₂ ou celle d'O₂.

Point de compensation seuil à partir duquel la photosynthèse net devient positive.

Les plantes ne sont pas toutes efficaces pour réaliser la photosynthèse. Cela dépend de leur mode de vie. On distingue les plantes :

D'ombre	De lumière
---------	------------

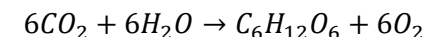
Rmq. : Les plantes d'ombre ont un point de compensation inférieur à celle de lumière mais leur valeur maximale est inférieure.

Certaines plantes ont développé des adaptations pour pallier le manque de CO₂.

Le métabolisme carboné

La phase biochimique d'assimilation du CO₂ (ou cycle de Calvin)

La phase biochimique d'assimilation du CO₂ a lieu dans le stroma. Elle permet de récupérer le carbone d'une molécule de CO₂ pour fabriquer une molécule organique. Elle forme un cycle c'est-à-dire qu'une partie du produit est utilisée pour renouveler la réaction.



La phase est composée de trois parties :

1. Carboxylation. La fixation du CO₂ sur une molécule organique.
2. Réduction. 1/6 du produit quitte le cycle sous forme de sucre et 5/6 est utilisé pour régénérer le substrat.

La carboxylation

La carboxylation est réalisée par la lumière par l'intermédiaire de la Rubisco dont l'activité dépend :

- Du pH
- Du flux de Mg⁺ lumière crée un flux de Mg⁺.

- De la concentration de CO₂ augmente active
- La fixation d'une protéine activatrice, la RubisCo activase, sur la RubisCo transforme le groupement NH₃⁺ d'une lysine en N-COO⁻ lorsque le milieu est basique. Sans elle, la RubisCo ne fonctionne pas.

La réduction

La réduction se déroule :

1. **APG → ABPG** Le transfert d'un groupement phosphate d'ATP vers APG.
2. **APG → 2 aldose PG** La réduction de NADPH

La régulation du cycle de Calvin se fait par

Inhibiteur : DCMU et DTT utilisé en laboratoire qui bloque la chaîne de transfert d'électrons.

Photorespiration : le cycle du C2 du glycolate (photorespiration)

La rubisco est l'enzyme la plus présente sur Terre, elle représente 50% de la proportion des molécules foliaires. Son nom vient de 1,5 rubilose bi phosphate carboxylase/oxygénase abrégé en RubisCo. Elle est bifonctionnelle. Elle fixe sur un ribose bi phosphate soit :

CO ₂	O ₂
-----------------	----------------

L'enzyme a beaucoup plus d'affinité pour le CO₂ que pour le O₂. La probabilité de liaison avec le substrat dépend de la concentration en CO₂. On considère qu'en condition standard un 1/3 du temps elle fixe du O₂ ce qui réduit jusqu'à 50% l'activité photosynthétique des plantes en région tempérée.

Point de compensation rapport entre la concentration de O₂ et CO₂ produite.

Photorespiration processus qui produit du CO₂ et qui dépend de la lumière.

La concentration du CO₂ et d'O₂ dans les feuilles est directement à la solubilité des gaz qui dépend de :

La température. Elle diminue plus vite pour le CO₂

Différence entre la photorespiration et la

CO ₂	2 APG
O ₂	1APG+1 (2-polycolate)

Le glycolate (2-polycate) qui est exploité dans la respiration cellulaire. Il est d'abord :

1. Dans les chloroplaste enlever le phosphate.
2. Dans les péroxysomes, transformer un glycine par un oxydation (perte de 2é et 2H⁺).
3. Dans les mitochondries, à partir de deux glycines est produit une sérine accompagné d'une décarboxylation (production de CO₂).
4. Dans les péroxysomes, la sérine est retransformée en glycérate.

La respiration constitue pour la plante à la fois :

Un cout énergétique	Une perte de carbone
---------------------	----------------------

Les raisons qui expliquent la présence de ce mécanisme :

- un héritage de l'évolution. Lorsque la photosynthèse est apparue, l'atmosphère était dépourvue en O₂. Il n'était pas nécessaire que la RubisCo distingue O₂ et CO₂. Or la photosynthèse a changé la composition atmosphérique faisant passer la quantité d'oxygène d'une valeur négligeable à 21% et le CO₂ à 0,3%. Ainsi le problème serait apparu après.
- Photoprotection. Lors de fortes chaleurs ou en condition de manque d'eau les stomates sont fermés pour limiter l'évaporation. La lumière continue de faire fonctionner les systèmes

photosynthétiques même lorsque la concentration de CO_2 trop faible. C'est le O_2 qui réduit générant du O_2^- , une molécule très réactive pouvant altérer les molécules voisines. La respiration servirait à maintenir du CO_2 dans la plante éviter la formation de O_2^-

Plantes au métabolisme C4

Le métabolisme C4 concerne 1500 espèces principalement tropicales ou subtropical et monocotylédone (par exemple, le maïs, la canne à sucre...).

L'efficacité du métabolisme C4 par rapport au C3 dépend de la durée d'ouverture des stomates qui dépend eux-mêmes de la température. Il est plus efficace lorsque les stomates sont fermés, ce qui permet d'expliquer pourquoi il est présent chez les espèces tropicales.

Il permet d'augmenter la quantité de CO_2 disponible pour la plante. Ce métabolisme est apparu indépendamment chez plusieurs espèces avec des différences dans la molécule de transport. Il est accompagné de spécialisations morphologiques :

- Les cellules de la gaine périvasculaire spécialisées dans le cycle de Calvin. Les chloroplastes possèdent des thylakoïdes lisses.
- Les cellules du mésophylle avec des chloroplastes avec beaucoup de granums qui concentrent de nombreux photosystème II permettant de produire de l'ATP et du NADPH.

Le métabolisme C4 permet d'obtenir une concentration en CO_2 entre 5 à 10 supérieur à celle des autres parties de la plante :

1. 1^{er} produit formé CO_2 fixé sur phosphénol pyruvate (PEP) pour former sur oxaloacétate (une molécule à 4 carbones d'où le métabolisme qualifié de C4) ce qui empêche le CO_2 de ressortir.
2. Acheminement vers les chloroplastes de la gaine périvasculaire où l'oxaloacétate est décarboxylé pour libérer le CO_2 et régénérer le substrat PEP.

Le métabolisme C4 ajout un coût de 2ATP au cycle de Calvin qui utilise déjà 3ATP.

Les enzymes importantes du métabolisme C4 :

- PEPcase (PEP est le phosphénol pyruvate). Elle catalyse $\text{PEP} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{OAA}$ (OAA est l'oxaloacétate). Elle est régulée par la lumière et inhibée par un de ses produits, le malate.
- Malate déshydrogénase (MDH) $\text{OAA} \rightarrow \text{malate}$. C'est le malate qui est décarboxylé dans la gaine périvasculaire c'est-à-dire qui libère le CO_2 .

NB : Le malate et la PEP sont des métabolites présents dans plusieurs voies métaboliques, comme la glycolyse pour la PEP.

Le métabolisme CAM le métabolisme acide des crassulacées

Le métabolisme CAM concerne les plantes vivant dans des milieux extrêmement secs. Ce type de métabolisme est apparu plusieurs fois dans plusieurs familles d'espèces au cours de l'évolution, caractère analogue.

Chez les cactus, la tige est devenue l'organe photosynthétique de la plante au détriment des feuilles qui ont soit disparu soit se sont transformées en épines, des organes de défense.

L'ouverture des stomates a lieu lorsque les températures ne sont pas trop élevées notamment la nuit. Le CO_2 est fixé sur un oxaloacétate qui devient un malate puis stocké sous forme d'acide malique dans la vacuole. Le jour, CO_2 est libéré et l'oxaloacétate est retransformé en amidon.

PEPcase active la PEP malate régulation précise.

Malate déshydrogénase

1. Libération du CO_2 catalysée par l'enzyme malique à NADP.

Rmq : il y a compétition entre la PEPcase et la rubisco pour le CO_2 . La relation de PEPcase se fait par la lumière grâce à l'intervention d'une kinase.

Le rendement des CAM est 50% inférieur au C3 et 66% à celui des C4.

Certaines plantes sont CAM facultatives. Elles sont capables de changer de métabolisme en fonction des conditions environnementales.

Utilisation des sucres

Le produit du cycle de Calvin est le triose phosphate. Sa concentration augmente dans les mitochondries plus le cycle se réalise ce qui ralentit la vitesse réaction. L'enthalpie libre s'approche du minimum. Pour limiter le ralentissement, le triose phosphate est :

- Exporté dans le cytosol et dans le reste de la plante principalement sous forme de saccharose.
- Stocké sous forme de polymères de glucose : d'amidon (sans ramification) ou d'amylose (avec ramification).

Les sucres sont alors disponibles pour le métabolisme et la synthèse de composé organique.

Rmq : L'amidon est regroupé en grain.

Métabolisme secondaire

Métabolite molécule produite par le métabolisme.

Les végétaux disposent d'un métabolisme non essentiel à leur survie appelé métabolisme secondaire (par opposition au métabolisme primaire qui est vital). Il existe d'importantes disparités entre les espèces.

Plus de 200 000 métabolites associés au métabolisme secondaire ont été recensés. Ils servent principalement à :

- Repousser les prédateurs ou les organismes nuisibles et se défendre contre les agressions.
- Compétition entre et avec les autres plantes.

- Favoriser la symbiose avec d'autres organismes (bactéries, champignons, pollinisateurs...)

Il existe trois types de métabolites secondaires :

- Composés phénoliques ou les polyphénols issus de la voie de l'acide shikimique et acétate/malonate) sont synthétisés en réponse au stress.
- Les alcaloïdes ou les composés azotés qui dérivent des acides aminés, sont généralement des molécules toxiques.
- Les terpènes dérivés de l'isopentényl pyrophosphate (IPP), une molécule à 5C, sont de nature volatile et dégage une forte odeur qui sert notamment dans la protection.
- Les glycosides qui contiennent une molécule de sucres.