

## Thème 2: Énergie et cellule vivante

« Tout système vivant échange de la matière et de l'énergie avec ce qui l'entoure. Il est le siège de couplages énergétiques. »

Les végétaux chlorophylliens sont autotrophes au carbone: ils produisent leur propre matière organique en utilisant uniquement des matières minérales (eau, sels minéraux) et de l'énergie lumineuse lors de la photosynthèse. À l'inverse, les organismes hétérotrophes au carbone doivent prélever, dans leur environnement, de la matière organique élaborée par d'autres êtres vivants pour élaborer leur propre matière organique. La matière organique est aussi utilisée pour produire l'énergie nécessaire au métabolisme cellulaire, et aux activités consommatrices d'énergie telles que la contraction musculaire qui met en œuvre une énergie mécanique. Il existe ainsi, à l'échelle de la biosphère et des écosystèmes, un flux énergétique intimement lié aux cycles de la matière permettant de passer de l'énergie lumineuse à l'énergie chimique et mécanique.

Comment la matière organique est-elle fabriquée par les végétaux chlorophylliens puis utilisée comme source d'énergie par les cellules ?

### Chapitre I: La photosynthèse: de l'énergie lumineuse à l'énergie chimique

Grâce à l'énergie lumineuse, les végétaux réalisent la photosynthèse dans leurs parties chlorophylliennes. Ils synthétisent ainsi de la matière organique à partir d'eau, de sels minéraux et de dioxyde de carbone selon la réaction suivante:  $2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{lumière} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$

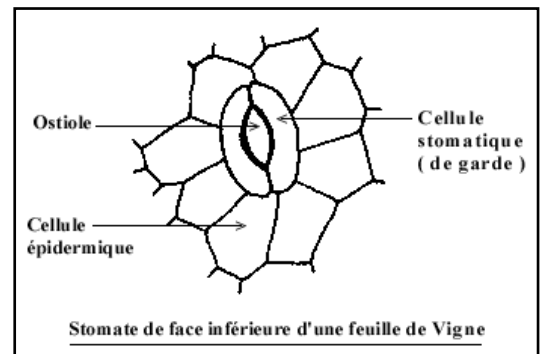
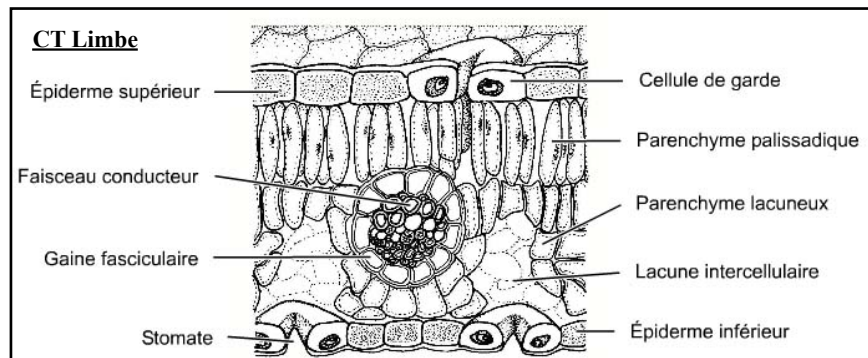
Comment l'énergie lumineuse est-elle convertie en "énergie chimique" par les cellules chlorophylliennes ?

### I: La cellule chlorophyllienne et la photosynthèse

#### 1: La feuille, un organe spécialisé dans la photosynthèse

Les feuilles présentent un rapport surface/volume très élevé: la surface est maximale et le volume est minimal grâce à une structure plate. Des coupes transversales de feuilles de végétaux montrent :

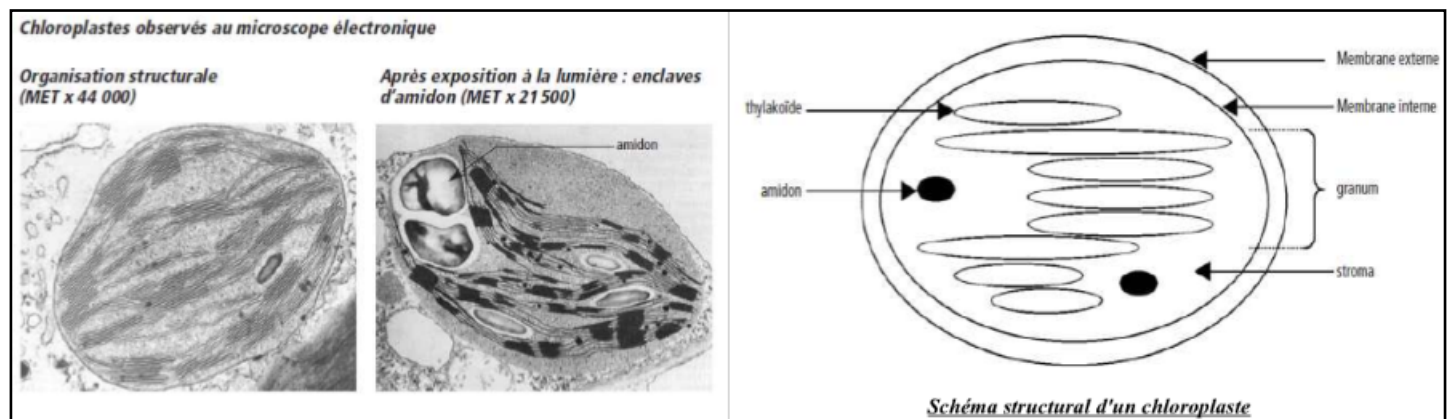
- Un épiderme supérieur formé d'une seule couche de cellules non chlorophylliennes, parfois recouvert d'une couche cireuse (protectrice), la cuticule, peu perméable aux échanges de gaz ou d'eau (évite la dessiccation).
- Un parenchyme chlorophyllien palissadique constitué de cellules riches en chloroplastes, aux parois minces et aux vacuoles bien développées: ce tissu situé dans la face supérieure de la feuille particulièrement exposée à la lumière est la zone principale de capture de l'énergie lumineuse.
- Un parenchyme chlorophyllien lacuneux dans lequel les cellules sont disjointes (méats) : c'est une surface d'échange où la capture de l'énergie lumineuse est moindre mais où la capture du  $\text{CO}_2$  est très forte.
- Un épiderme inférieur, non chlorophyllien, recouvert de cires et régulièrement interrompu par des perforations: les stomates



Les stomates permettent les échanges gazeux entre l'atmosphère et le milieu intérieur de la plante (entrée de  $\text{CO}_2$ , sortie d' $\text{O}_2$  et évaporation d'eau). Les stomates sont formés par deux cellules de garde (chlorophylliennes) entourant un orifice appelé ostiole. L'ouverture de l'ostiole est variable et peut être contrôlée. Ils s'ouvrent à la lumière et se ferment à l'obscurité ou lors de fortes chaleurs. Les stomates sont présents principalement sur les faces inférieures des feuilles afin de réaliser une économie d'eau.

#### 2: Les chloroplastes, des organites spécialisés dans la photosynthèse

Les chloroplastes sont des organites spécifiques du règne végétal, caractéristiques des cellules chlorophylliennes où se déroule la photosynthèse. Le chloroplaste est constitué d'une double membrane, comme les mitochondries, délimitant un espace interne appelé le stroma. Dans le compartiment interne du chloroplaste se trouvent de nombreux disques ou thylakoïdes, qui, empilés, forment le Granum). Les membranes de ces thylakoïdes sont très riches en protéines (transporteurs de protons, d'électrons, ATPsynthétase) et pigments photosynthétiques.



## 2.1: L'absorption de la lumière par les pigments chlorophylliens

Il est possible d'extraire, par chromatographie, les différents pigments présents dans les chloroplastes d'une feuille. On distingue ainsi les chlorophylles a et b, les xanthophylles et les carotènes. Les pigments photosynthétiques sont regroupés dans la membrane des thylakoïdes en complexes pigment protéine appelés photosystèmes.

Un pigment est une substance colorée qui absorbe certaines longueurs d'ondes de la lumière et renvoie toutes les autres (ce qui détermine la couleur du végétal). En utilisant un spectromètre, on détermine le spectre d'absorption des pigments verts chlorophylliens qui absorbent la lumière pour des longueurs d'ondes de 450-500 nm (bleu) et 650-700 nm (rouge).

Le spectre d'absorption de la chlorophylle brute correspond à la combinaison des spectres d'absorption des différents pigments constituant la chlorophylle brute; la diversité des pigments permet d'élargir le spectre d'absorption de la chlorophylle brute ce qui permet à la plante d'absorber de nombreuses longueurs d'ondes différentes.

Comme le spectre d'absorption des pigments correspond au spectre d'action de la photosynthèse mis en évidence par l'expérience d'Engelmann, on peut dire que c'est l'absorption de certaines longueurs d'ondes par les pigments qui permet la photosynthèse; on parle de pigments photosynthétiques.

L'absorption de la lumière par les chloroplastes s'accompagne d'une libération de  $O_2$ . Les expériences de Ruben montrent que le d'oxygène libéré provient de l'oxydation de l'eau. A l'obscurité, la production de  $O_2$  cesse instantanément (Gaffron): **la lumière est indispensable pour l'oxydation de l'eau; on parle de photolyse de l'eau ou phase photochimique:  $2 H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$**

## 2.2: La réduction du carbone

La coloration à l'eau iodée de chloroplastes préalablement éclairés révèle la présence d'amidon formant des grains d'amidon au sein du stroma (absents chez le témoin non éclairé). On en déduit que **la synthèse de molécules organique a lieu dans les chloroplastes**.

Après autoradiographie on observe une importante radioactivité au niveau des molécules organiques élaborées dans les chloroplastes des feuilles exposées à une atmosphère enrichie en  $^{14}CO_2$ . On en déduit que **le carbone organique constituant les molécules organiques élaborées provient du carbone minéral du  $CO_2$  gazeux** (ou dissous pour les plantes aquatiques)

**Il y a donc, dans le chloroplaste, réduction du carbone:  $CO_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow CH_2O + H_2O$**

A l'obscurité la fixation de  $CO_2$  diminue progressivement (Gaffron). La réduction du carbone ne dépend donc pas directement de la lumière mais requiert la participation d'intermédiaires produits au cours de la phase photochimique; on parle d'une **phase chimique ou non photochimique**.

La photosynthèse est une réaction d'oxydo-réduction complexe qui se déroule dans les chloroplastes des tissus verts chlorophylliens. Il s'agit d'un couplage entre 2 réactions:

- **L'oxydation de l'eau qui nécessite de la lumière (phase photochimique):  $2 H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$**
- **La réduction du carbone (phase non photochimique):  $CO_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow CH_2O + H_2O$**

$$2 H_2O + CO_2 \rightarrow CH_2O + H_2O + O_2$$

## II: La phase photochimique

L'énergie lumineuse des photons excite la chlorophylle qui transfère ses électrons via une chaîne d'accepteurs localisés dans la membrane des thylakoïdes vers un accepteur final R oxydant qui se trouve alors réduit en  $RH_2$ . Il s'agit d'un couplage entre l'oxydation de la chlorophylle et la réduction de l'accepteur final:

- **Oxydation de la chlorophylle:  $4 \text{ Chl réduites} \rightarrow 4 \text{ Chl}^* \text{ oxydées} + 4 e^-$**
- **Réduction de l'accepteur final:  $2 R + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 RH_2$**

Les chlorophylles ayant perdu un électron se retrouvent oxydées (photo-excitation). Il y a eu conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique ( $RH_2$ ) grâce aux propriétés des pigments chlorophylliens.

Pour pouvoir absorber à nouveau des photons, les chlorophylles oxydées doivent revenir à leur état initial (état fondamental) en étant réduites; pour cela elles acceptent (elles arrachent) des électrons de l'eau provoquant ainsi l'oxydation de l'eau dans le lumen et la libération de dioxygène. Il s'agit d'un couplage entre la réduction de la chlorophylle et l'oxydation de l'eau:

- **Réduction de la chlorophylle:  $4 \text{ Chl}^* \text{ oxydées} + 4 e^- \rightarrow 4 \text{ Chl réduites}$**
- **Oxydation de l'eau:  $2 H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$**

L'oxydation de l'eau dans le lumen crée un gradient de proton (lumen fortement concentré en proton / stroma faiblement concentré). Cette force proto-motrice active une enzyme: l'ATP synthétase située sur la membrane du thylakoïde qui catalyse la phosphorylation de l'ADP adénosine diphosphate en ATP adénosine triphosphate, molécule qui stocke de l'énergie chimique.  **$ADP + Pi + ATPase + \text{Énergie (F proto motrice)} \rightarrow ATP$**

La phase photochimique se déroule dans les thylakoïdes. Les photons induisent, à partir de l'excitation de la chlorophylle, des réactions d'oxydoréductions au niveau de la membrane des thylakoïdes qui aboutissent à la synthèse d'ATP et à la réduction d'un accepteur final R en  $RH_2$ .

L'énergie des photons est ainsi convertie en énergie chimique sous forme d'ATP (dont l'hydrolyse peut libérer une grande quantité d'énergie) et de  $RH_2$  (possédant un fort pouvoir réducteur)

Le fonctionnement de ces chaînes d'oxydoréductions nécessite une régénération de chlorophylle à l'état réduit : ceci est permis par l'oxydation de l'eau, à l'origine d'un dégagement de dioxygène.

Cette phase est résumée par les deux équations simplifiées qui suivent :

$$2 R + 2 H_2O \rightarrow 2 RH_2 + O_2$$
$$ADP + Pi \rightarrow ATP$$

