THEME 1 :
Energie et Vie Cellulaire

Intro : L'énergie est nécessaire à la survie de toutes les cellules et provient du métabolisme : c'est l'ensemble des réactions chimiques et des échanges d'énergie dans une cellule. Le métabolisme se divise en catabolisme (dégradation de molécules) et anabolisme (synthèse/production de molécules). L'anabolisme permet de capter l'énergie grâce à la photosynthèse qui produit de la matière organique. A l'inverse, le catabolisme produit de l'énergie (respiration/fermentation).
Nous verrons comment l'anabolisme permet la production de matière organique grâce à la photosynthèse (chap 1) puis nous verrons comment la matière organique est dégradée pour produire de l'énergie (chap 2) et enfin nous étudierons comment l'énergie est utilisée pour réaliser diverses fonctions cellulaires (chap 3).

Problématique générale : Comment les cellules produisent-elles leur énergie cellulaire et comment utilisent-elles cette énergie ?

Chapitre 1 - La photosynthèse et l'autotrophie pour le carbone

Nous avons vu que toutes les cellules ont besoin de matière organique pour assurer leur production d'énergie.

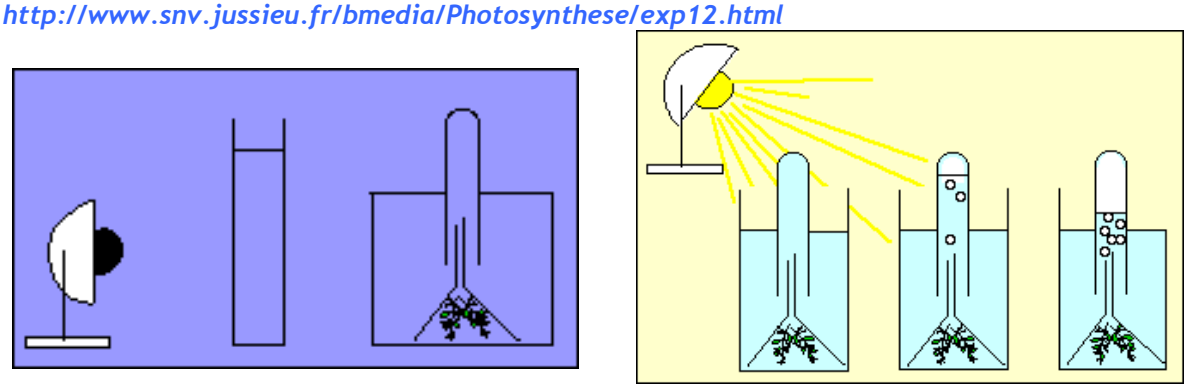
Problématique : D'où provient la matière organique nécessaire à l'ensemble des êtres vivants ?

I- Mise en évidence de la photosynthèse

TP1 - ECE 2017- Localisation cellulaire de la photosynthèse

1- Nature des échanges de la photosynthèse

Activité Pratique (non nécessaire) - Expériences classiques sur la photosynthèse (Elodée)
http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese/exp12.html



A l'obscurité

+ H_20 distillée | *+ Eau du robinet* | *+ HCO_3^-*

Document 1 : Les conditions de la photosynthèse

Des expériences simples permettent de montrer qu'une plante verte dégage du dioxygène à la lumière. Ce phénomène dépend de :

- **l'intensité lumineuse**
- **la température (température optimale environ 25°C – Impossible au dessus de 45°C)**
- **la présence de dioxyde de carbone.**

Des expériences d'ExAO montrent que la photosynthèse correspond à une consommation de CO2 et à une production d'O2. Cette production s'accompagne de la formation de glucose et d'amidon. On peut donc écrire l'équation bilan suivante :

PHOTOSYNTHESE : Lumière + CO2 + H2O → O2 + Glucose → Amidon

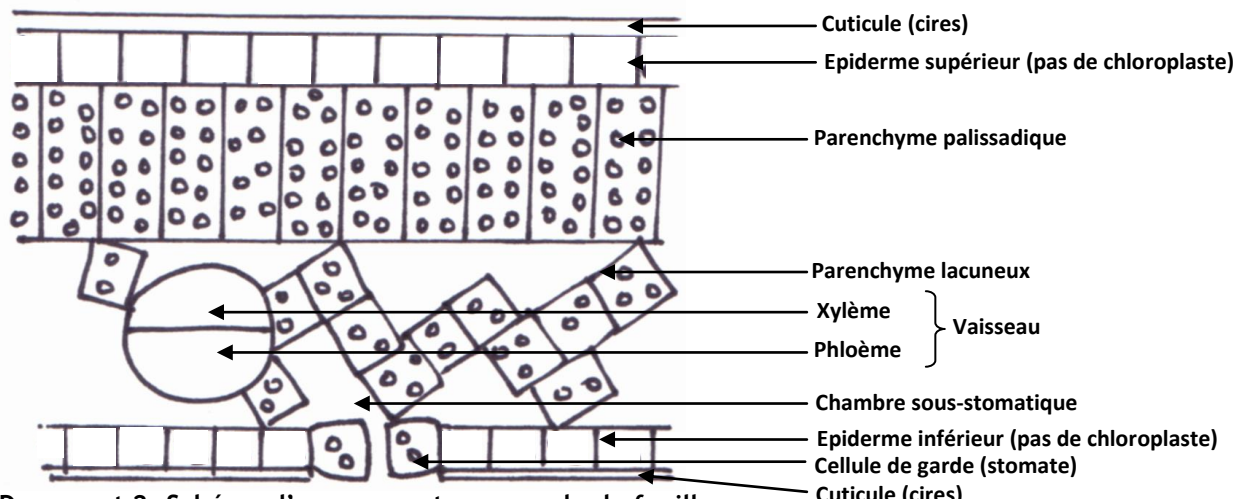
Problématique : A quels endroits se produisent les échanges de gaz CO_2 et O_2 entre la plante et le milieu extérieur ?

2- La feuille est le principal organe de la photosynthèse

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, la cuticule, peu perméable aux échanges de gaz ou de solutions.**
- **un parenchyme chlorophyllien palissadique constitué de cellules riches en chloroplastes, aux parois minces et aux vacuoles bien développées**
- **un parenchyme chlorophyllien lacuneux dans lequel les cellules sont disjointes (méats).**
- **un épiderme inférieur parfois interrompu par des perforations : les stomates.**

La feuille est une surface d'échange. Sa forme étalée est adaptée à la collecte de la lumière. A l'échelle cellulaire, les chloroplastes sont concentrés au niveau du parenchyme palissadique localisé à la face supérieure de la feuille ce qui optimise la photosynthèse.

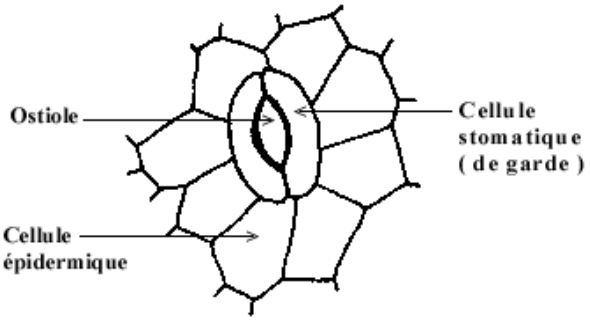


Document 2: Schéma d'une coupe transversale de feuille

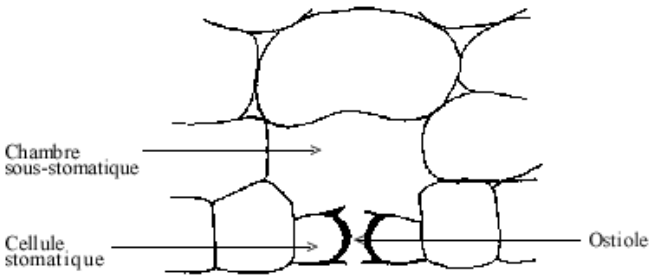
3- Les stomates contrôlent les échanges gazeux de la plante

Les stomates permettent les échanges gazeux entre l'atmosphère et le milieu intérieur de la plante (entrée de CO_2, sortie d'O_2 et évaporation d'eau H_2O). Les stomates sont formés par deux cellules de garde 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.



Stomate de face inférieure d'une feuille de Vigne



Stomate de feuille de Muguet (en coupe transversale)

Document 3 : Structure du stomate.

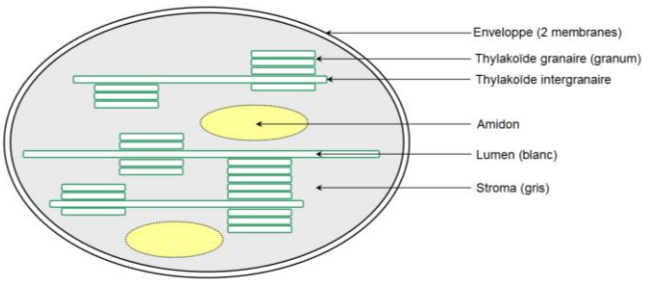
4- Le CO2 est fixé par les chloroplastes

Le CO_2 diffuse au niveau des espaces intracellulaires appelés méats et rejoint les chloroplastes. Ce sont des organites à double membrane qui contiennent des filaments : les thylakoïdes (granaires et inter-granaires). Ces thylakoïdes contiennent des pigments et ménagent 2 compartiments :

- **Le lumen (dans le thylakoïde)**
- **Le stroma (dans le chloroplaste mais en dehors du thylakoïde)**

Document 4 : Structure du chloroplaste - d'après Didier Secondes 2002.

Organisation schématique d'un chloroplaste
(taille 3 à 10 microns de diamètre et 1 à 2 microns d'épaisseur)

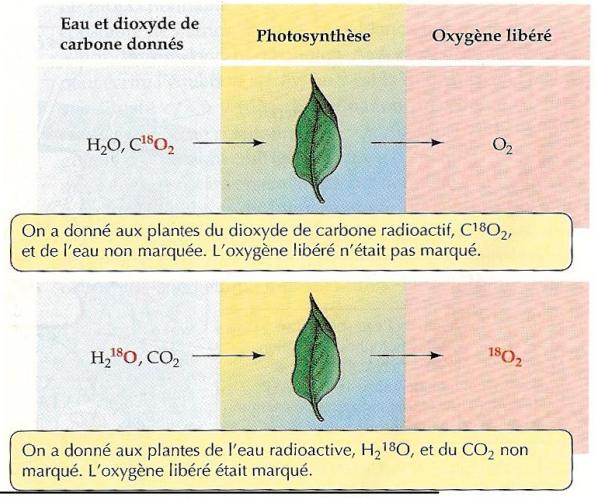


5- Les modalités générales de la photosynthèse : 2 phases

Document 5 : Expérience de Ruben et Kamen (1940)

En 1940, Ruben et Kamen placent une suspension d'algues vertes fortement éclairée, en présence de CO_2, dans de l'eau dont l'oxygène ^{16}O est remplacé par l'isotope ^{18}O ($H_2{}^{18}O$). Ils suivent le devenir de l'isotope ^{18}O et obtiennent des résultats qui peuvent se résumer par l'équation suivante :

$$6\ CO_2 + 12\ H_2{}^{18}O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ {}^{18}O_2 + 6\ H_2O$$



Conclusion :

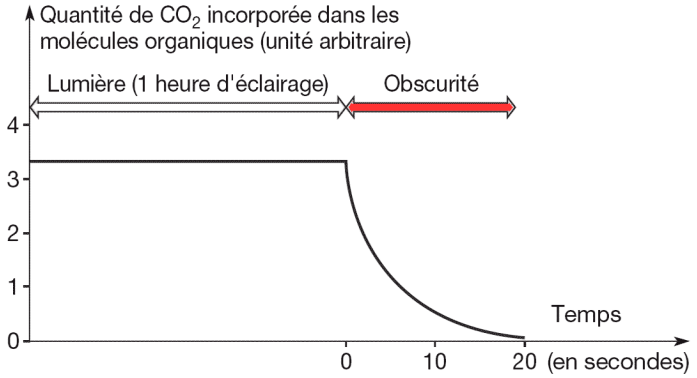
- L'O_2 provient des molécules d'eau absorbées par la plante.

- Le CO_2 ne permet pas la production d'O_2.

Document 6 : Expérience de Gaffron (1951)

En 1951, Gaffron et ses collaborateurs travaillent sur une suspension d'algues vertes unicellulaires (*Scenedesmus*). Ces algues sont cultivées dans un milieu dans lequel barbote du dioxyde de carbone radioactif ($^{14}CO_2$). La solution est éclairée pendant une heure par un faisceau lumineux de forte intensité, puis placée à l'obscurité.

Les chercheurs mesurent pendant toute la durée de l'expérience la quantité de $^{14}CO_2$ incorporé dans la matière organique par les algues vertes. Les résultats obtenus sont présentés dans le graphique ci-dessus.



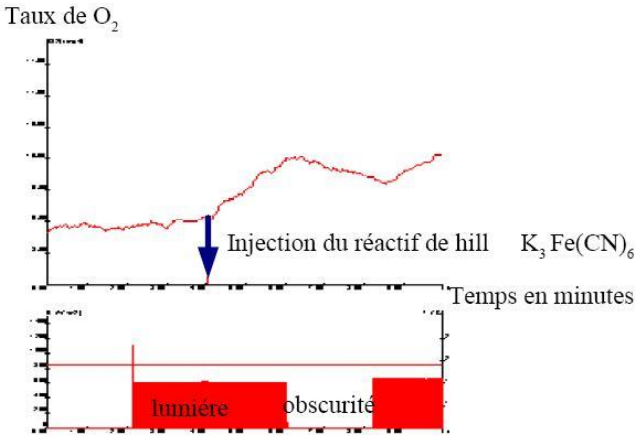
Conclusion :

- L'incorporation du CO_2 se fait à la lumière et cesse rapidement à l'obscurité. La fixation de CO_2 n'est donc pas directement dépendante de la lumière.

Document 7 : Expérience de Hill (1955)

En 1955, Hill montre que les **thylakoïdes** chloroplastiques permettent la production d'O_2 uniquement lorsque ceux-ci sont éclairés et en présence d'un accepteur d'électron (réactif de Hill)

Il montre également que le CO_2 n'est pas nécessaire à ces réactions.



Conclusion :

- L'O_2 est formé à la lumière et en présence d'un accepteur d'électrons.

La photosynthèse est constitué de deux phases complémentaires et simultanées, mais présentant des caractéristiques différentes :

- une phase photochimique qui dépend de l'intensité lumineuse et qui ne dépend pas de la température : la phase photochimique (également improprement appelée phase « claire »)

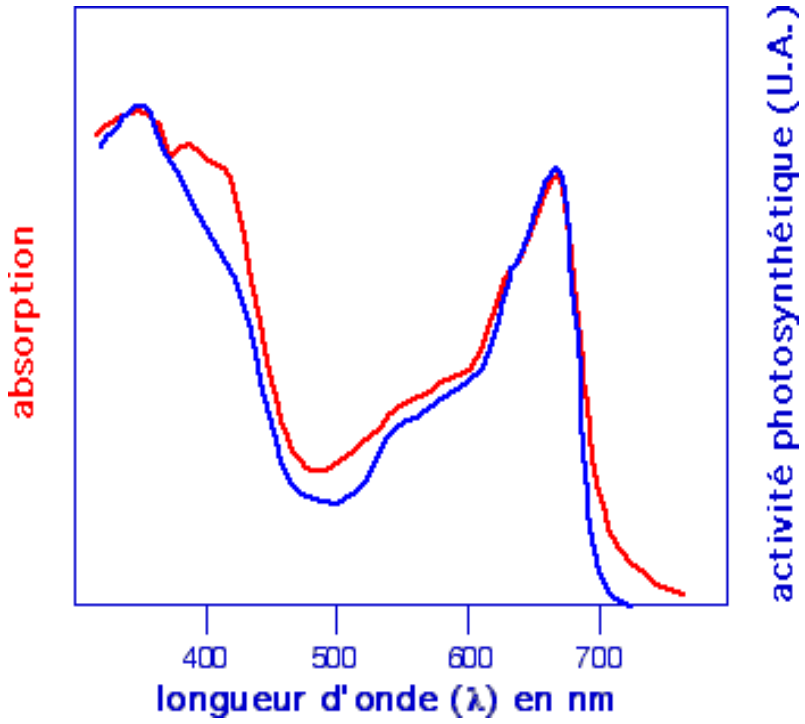
- une phase non photochimique qui dépend de la température et de la concentration en CO_2 : la phase thermochimique ou phase non photochimique (également appelée phase « sombre » car l'incorporation du CO_2 demeure possible à l'obscurité, mais seulement pendant quelques minutes et après une période de forte illumination).

Problématique : Comment est captée la lumière nécessaire à la photosynthèse ?

II- La phase photochimique de la photosynthèse

Hypothèse : La feuille contient des molécules qui permettent de capter certaines longueurs d'onde pour réaliser la photosynthèse.

1- Propriétés des pigments photosynthétiques



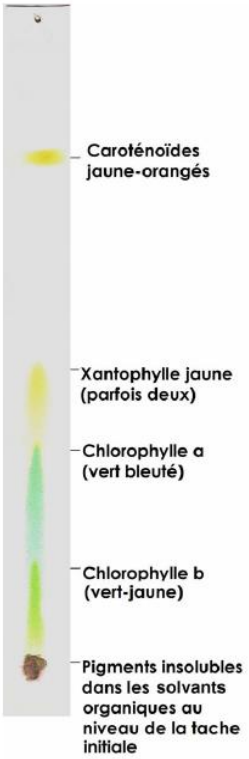
Document 8 : Comparaison entre le spectre d'absorption de pigments chlorophylliens et le spectre d'action de la lumière sur la photosynthèse d'une suspension d'algues unicellulaires (http://www.snv.jussieu.fr/).

TP2 - ECE 2008 - Couleur d'un végétal et capacité à la photosynthèse (extraction de pigments, chromatographie et spectroscopie).

L'efficacité de la photosynthèse dépend de la qualité (longueur d'onde) de la lumière. On remarque que la photosynthèse est active à 400 nm (bleu) et à 650/700 nm (rouge). Ces longueurs d'ondes sont absorbées par les pigments photosynthétiques.

Un pigment est une substance qui absorbe certaines longueurs d'ondes de la lumière et renvoie les autres (donnant une sensation de couleur). En utilisant un spectrophotomètre ou un spectroscope, 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).Les longueurs d'ondes vertes ne sont pas absorbées et sont renvoyées (aspect vert d'un végétal).

2- La diversité des pigments photosynthétiques



Il est possible d'extraire les différents pigments présents dans les chloroplastes des végétaux par chromatographie. La séparation se fait par un solvant organique.

Les pigments photosynthétiques présents sont :
- **les Chlorophylles (a et b) : vertes**
- **les Caroténoïdes (lycopène, carotène, xanthophylle) : rouges, orangés et jaunes**
- **les Flavonoïdes (flavones et anthocyanes) : jaunes à orangées et violettes à bleues**

NB : Les anthocyanes sont des pigments rouges, bruns et violets présents dans la vacuole. Ils n'ont pas d'activité photosynthétique.

Document 9 : Chromatographie des pigments photosynthétiques (document secours ECE 2008)

3- Localisation et rôle des pigments :

Les pigments sont majoritairement présents dans le chloroplaste. La couleur des végétaux est donnée par les chlorophylles a et b qui sont accumulées dans les chloroplastes. Ces pigments absorbent les longueurs d'ondes rouges et réfléchissent les longueurs d'ondes vertes, nous donnant la sensation que les végétaux sont verts.

Les pigments présents dans les chloroplastes sont appelés PIGMENTS PHOTOSYNTHETIQUES. Ils permettent de capter l'énergie lumineuse nécessaire à la photosynthèse.

Problématique : Quelles sont les réactions de réduction qui ont lieu dans le chloroplaste et comment les déterminer ?

4- L'importance des réactions rédox dans la phase photochimique

Les **travaux de Hill** ont montré que la phase photochimique, qui se déroule dans les **thylakoïdes** chloroplastiques, est une production d'O_2 actionnée par la lumière en présence d'eau, d'un accepteur d'électron (réactif de Hill), mais en l'absence de CO_2. En effet, c'est l'énergie transmise par les photons aux pigments des **photosystèmes** (complexe protéines-pigments photosynthétiques de la membrane des thylakoïdes) qui va déclencher l'oxydation de l'eau (**photolyse de l'eau**) :

$$H_2O \rightarrow 2\ H^+ + 2\ e^- + \frac{1}{2}\ O_2$$

Les **électrons** provenant de cette oxydation sont ensuite transmis à un accepteur final R^+ par l'intermédiaire d'un complexe de protéines (enzymes) situées dans la membrane des thylakoïdes : la **chaîne photosynthétique**. A l'issue de cette chaîne d'oxydoréduction, R^+ est réduit en un composé intermédiaire RH_2, un **coenzyme réduit**, indispensable aux autres réactions de la photosynthèse :

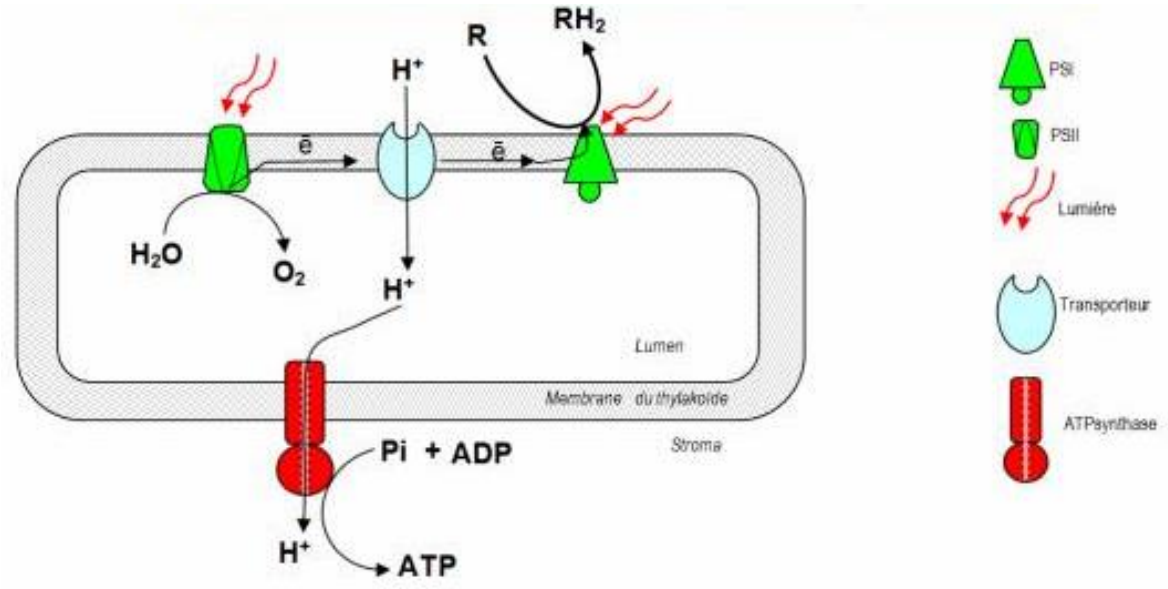
$$R^+ + 2\ H^+ + 2\ e^- \rightarrow RH_2$$

Les protons (H^+) provenant de l'oxydation de l'eau contribuent également à produire de l'**ATP** (adénosine triphosphate) à partir d'ADP et de phosphate inorganique, au cours d'une réaction de phosphorylation :

$$ADP + Pi \rightarrow ATP$$

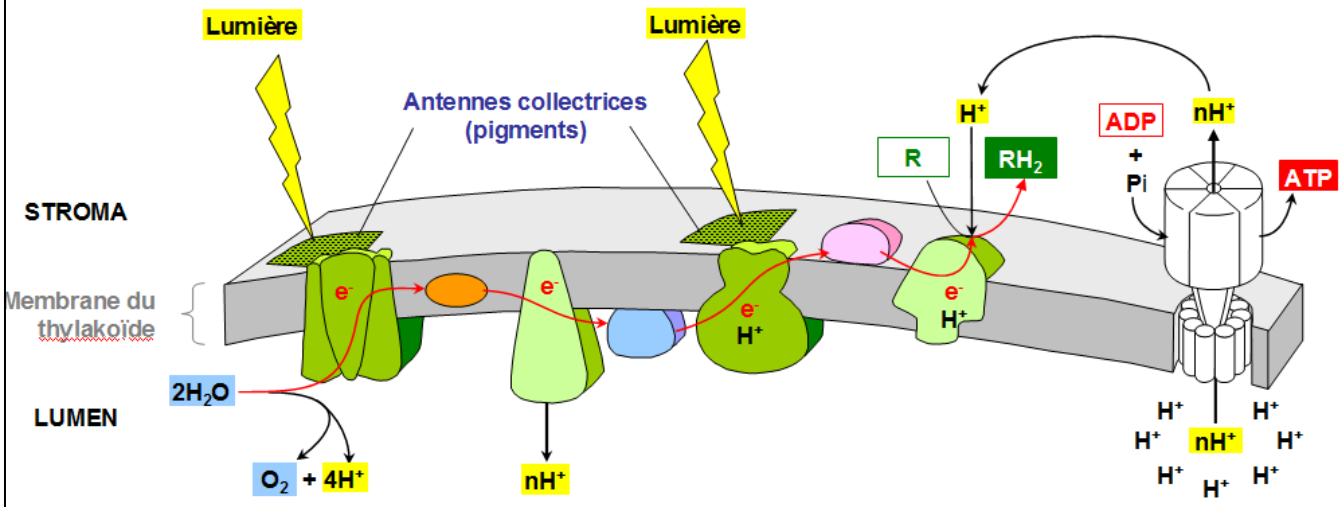
L'ATP est une molécule essentielle dans les transferts d'énergie indispensables aux réactions métaboliques.

La phase photochimique se produit dans les thylakoïdes des chloroplastes.
Lors de cette phase, il y a :
1- collecte des photons par les pigments photosynthétiques (chlorophylle)
2- réalisation de réactions d'oxydoréductions permettant :
2a- l'oxydation de l'eau et la production d'O_2
2b- la production de composés intermédiaires RH_2 et ATP (l'adénosine triphosphate est produit à partir d'Adénosine DiPhosphate - ADP et de phosphate inorganique - Pi).

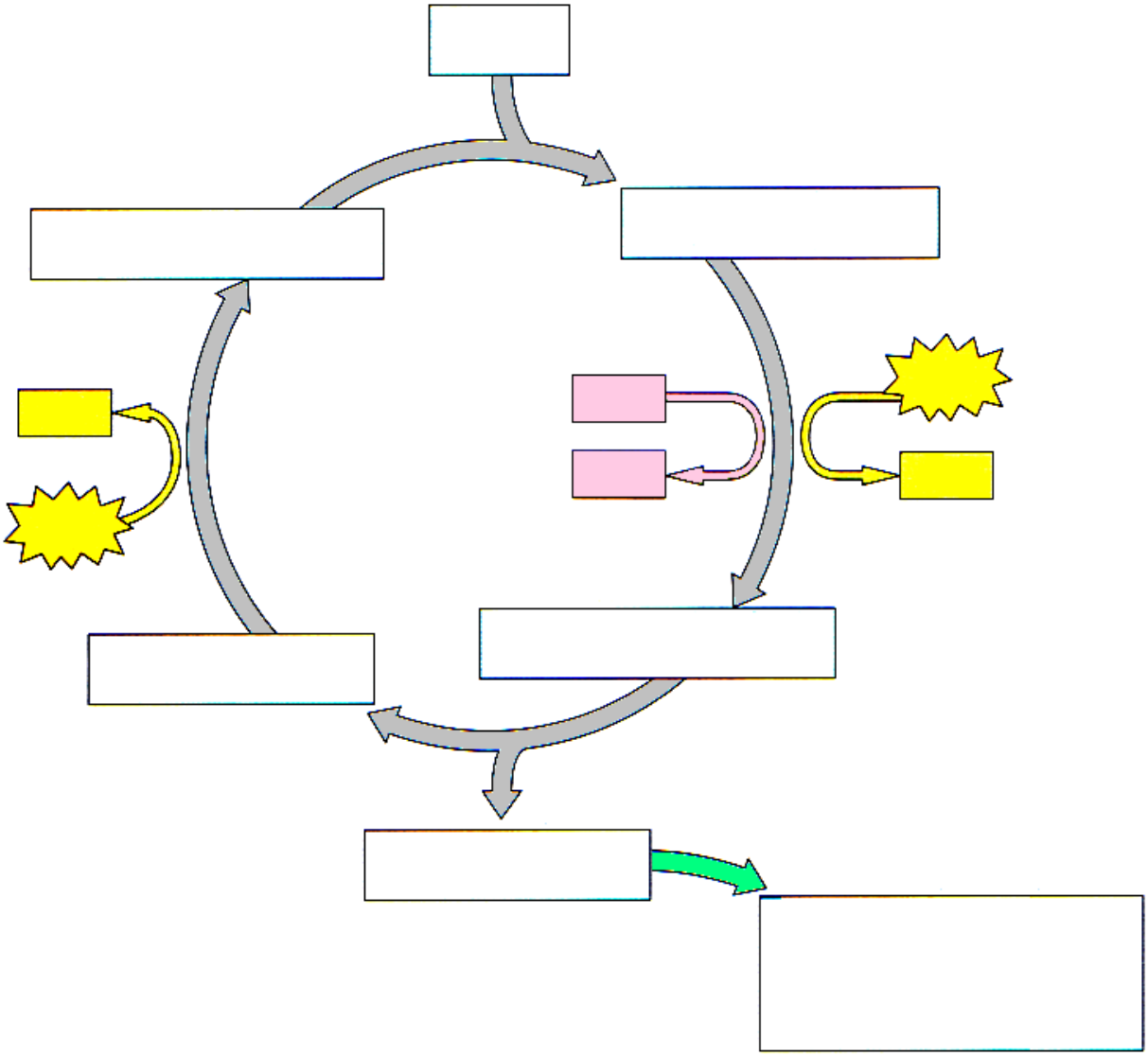


Document 10 : Schéma simplifié des réactions de la phase photochimique

Document 21 : Transferts d'électrons et de protons (H^+) au niveau de la membrane du thylakoïde (phase photochimique)



Document 22 : La phase non photochimique de la photosynthèse (cycle de Calvin Benson).



III- La phase non photochimique de la photosynthèse

1- Mise en évidence des molécules produites :

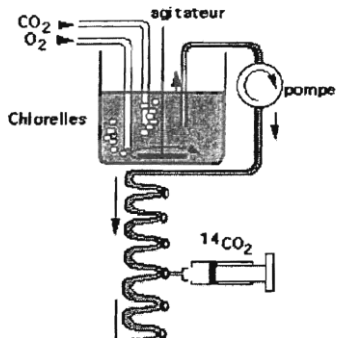
La phase non photochimique de la photosynthèse a été décrite par différentes expériences :

- **L'expérience d'Emerson et Arnold (1932) a montré que la phase photochimique produit très rapidement (10µs) des composés intermédiaires qui sont ensuite utilisés lentement dans la phase non photochimique selon des réactions dépendantes de la température (enzymes ?)**
- **L'expérience d'Arnon (1958) montre que la phase non photochimique a lieu dans le stroma du chloroplaste et nécessite à la fois de l'ATP et du RH2 (composés intermédiaires) pour permettre la fixation du CO2.**
- **Les expériences de Calvin et Bassham (Prix Nobel en 1961) montrent que la phase non photochimique contribue à la formation d'APG (Acide PhosphoGlycérique) à partir de CO2 et de Ribulose-1,5-BisPhosphate.**
- **Les expériences complémentaires de Calvin et Bassham ont permis d'identifier les différents composés produits par la photosynthèse (expérience de chromatographie 2D). Ces expériences montrent que la phase photochimique se produit selon un cycle : le cycle de Calvin.**

Document 23 : expériences de Calvin et Bassham (extrait de Bac Pondichéry 2010)

Document 23a : protocole expérimental

En fonction du débit de la pompe, on est capable très précisément de calculer le temps pendant lequel les Chlorelles situées dans le serpentin ont été en contact avec le CO_2 radioactif ($^{14}CO_2$) avant d'être fixées par l'éthanol bouillant.

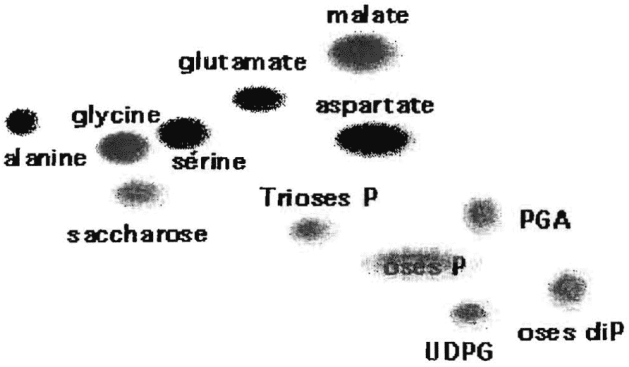


Document 23b : première expérience

Après incubation en présence de CO_2 à la lumière, la suspension de Chlorelles (Algues vertes) est fixée rapidement par l'éthanol bouillant. Cet extrait est traité par chromatographie bidimensionnelle (séparation et coloration des différents constituants).

Une chromatographie bidimensionnelle après coloration permet de repérer les différentes substances solubles présentes dans un extrait (voir ci-contre).

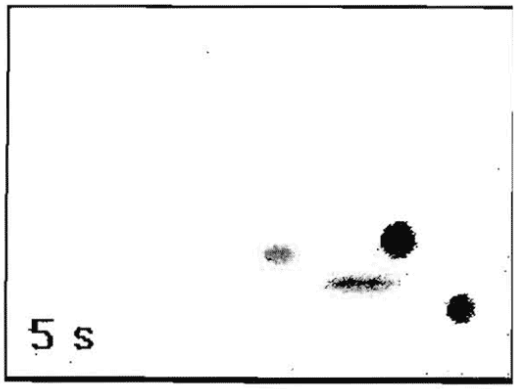
NB : PGA: Phosphoglycérate, Trioses P : Triose phosphate (C3P), osesdiP : Oses diphosphate (C5P2), oses P : Pentoses phosphate (C5P) et hexoses phosphates (C6P), UDPG : Uridine DiPhosphoGlucose.

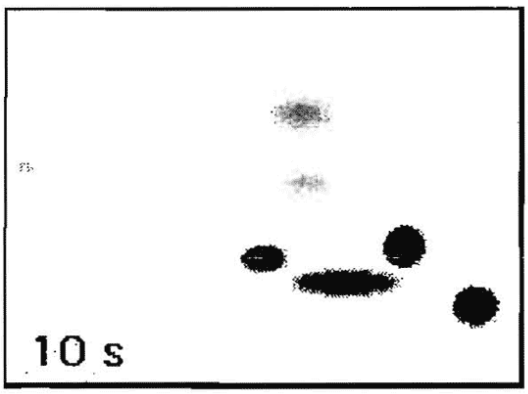


Document 23c : deuxième expérience

Des chromatogrammes non colorés sont placés contre un film photographique à l'obscurité. Après un temps d'exposition, le film est révélé. Les taches indiquent la présence des composés radioactifs qui se sont formés.

La comparaison du chromatogramme coloré et des chromatogrammes révélés par autoradiographie permet de savoir quels produits ont été synthétisés à partir du contact avec le $^{14}CO_2$. Deux autoradiographies de chromatogrammes réalisés sur des extraits de chlorelles mis en contact avec le CO_2 radioactif pendant 5 et 10 secondes.





2- Les réactions de la phase photochimique

La phase non photochimique de la photosynthèse a lieu dans le stroma. Elle permet :

1- l'incorporation et la réduction du CO_2 pour la synthèse de glucides.

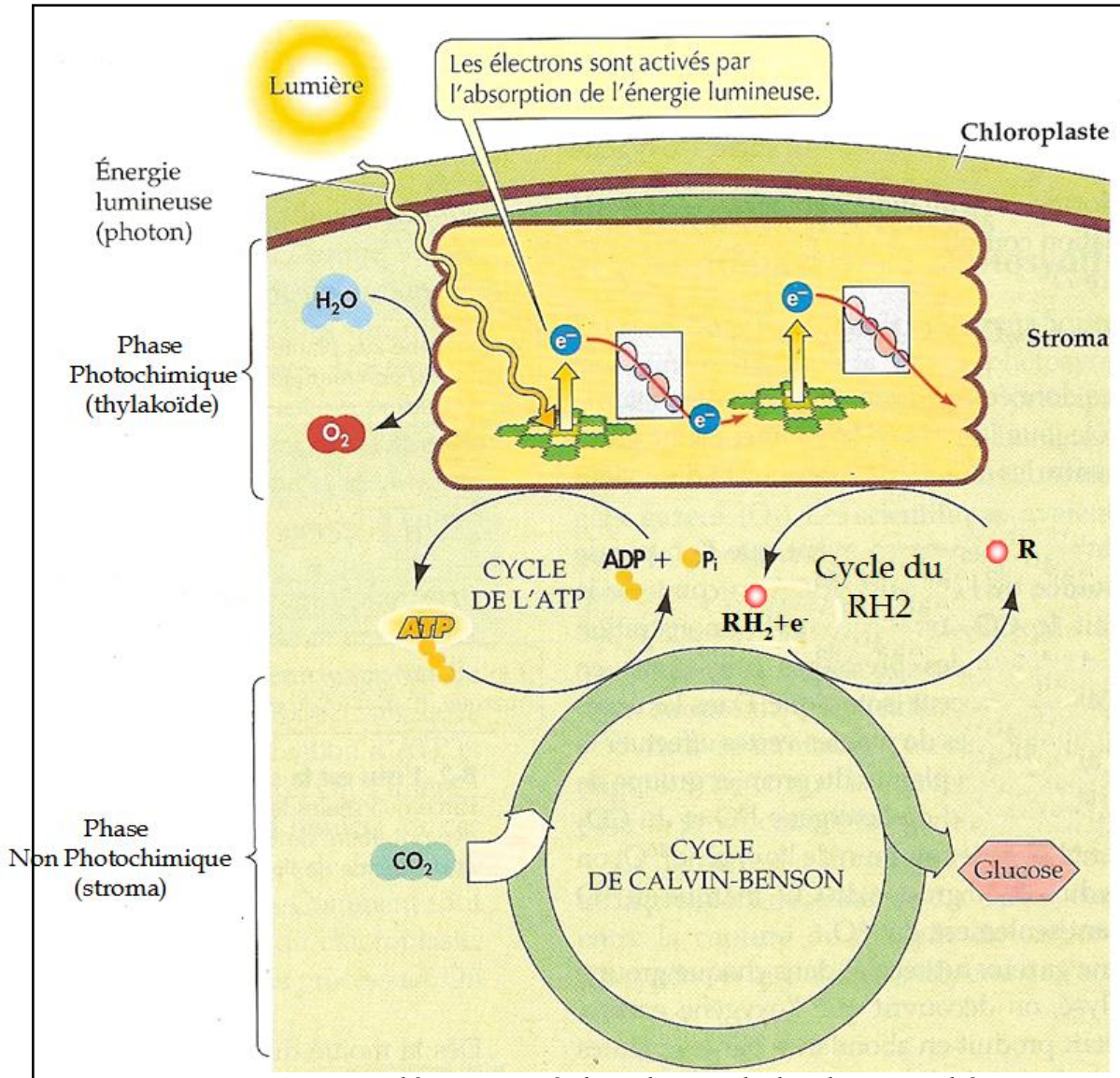
L'incorporation de CO_2 se fait par condensation sur le Ribulose-1,5-BisPhosphate (RuBP : Ribulose-1,5-BisPhosphate, glucide à 5 carbones et 2 phosphate : C5P2). Le glucide à 6 carbones ainsi produit est immédiatement clivé en glucides à 3 carbones : le PGA (PhosphoGlyceric Acid ou phosphoglycérate).

Les molécules de PGA sont ensuite réduits en C3P (Trioses phosphates, 1,3BPG : 1,3-BisPhosphoGlycérate et G3P : Glycéraldéhyde-3-Phosphate). Cette étape est couteuse en énergie et nécessite l'utilisation de l'ATP et du coenzyme réduit RH2 produits au cours de la phase photochimique.

2- La production de matière organique sous la forme de glucides simples et d'acides aminés.

Les C3P produits vont d'une part, contribuer à régénérer le RuBP (ce qui permet de réaliser un nouveau cycle de Calvin) et d'autre part, être convertis en glucides phosphorylés simples, en saccharose, en glucides plus complexes comme l'amidon, mais également en acides aminés.

3. Les deux phases de la photosynthèse sont complémentaires :



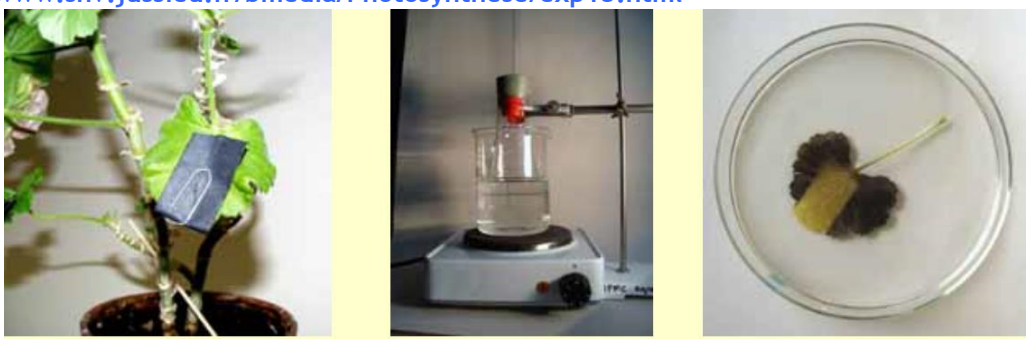
Document 24 : La complémentarité des phases de la photosynthèse.

IV. Le devenir des produits de la photosynthèse

1. Le stockage sur place

Document 25 : Le stockage sur place

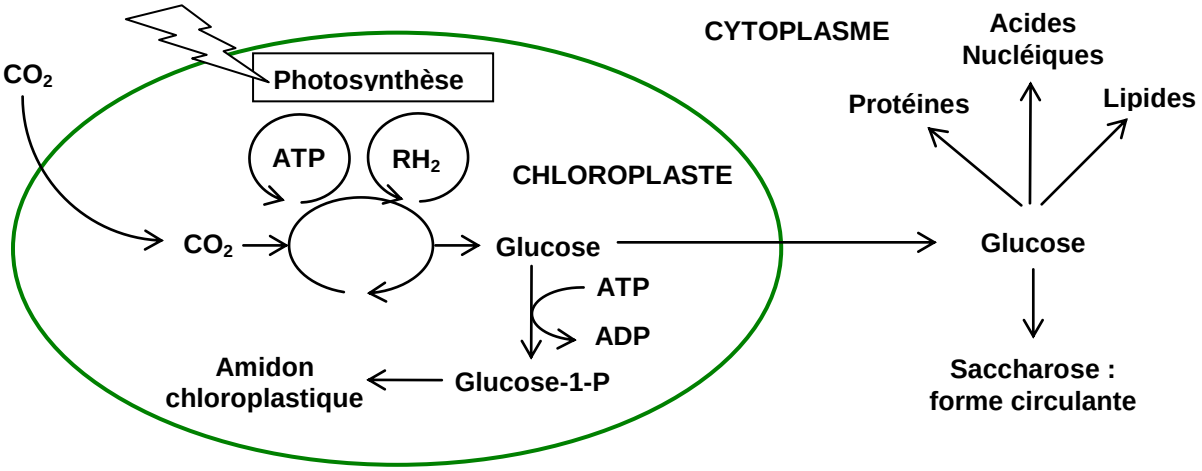
Activité Pratique : Mise en évidence de l'amidon dans une feuille de Pélargonium (+ caches).
http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese/exp13.html



Mise en évidence, de la synthèse d'amidon par les feuilles. *A gauche, sur un pied de pélargonium une partie d'une feuille est masquée par du papier noir et est vivement éclairée ; au centre, la feuille est décolorée par de l'éthanol bouillant, un réfrigérant permet d'éviter les vapeurs éthyliques (prévoir un récipient d'eau froide en cas d'ébullition exagérée et utiliser un système de chauffage électrique et non pas à gaz) ; à droite, la feuille plongée dans une boîte de Pétri contenant du lugol développe une coloration bleu-noir uniquement dans les parties éclairées, elle a donc synthétisé de l'amidon.*

Les composés glucidiques formés par la réduction du CO_2 sont exportés hors du chloroplaste vers le cytoplasme des cellules chlorophylliennes. Ils peuvent être temporairement stockés dans le chloroplaste sous forme de grains d'amidon. Les cellules spécialisées comportent des AMYLOPLASTES, organistes spécialisés dans le stockage d'amidon. L'amidon est un polymère de glucose comportant plusieurs milliers de monomères de glucose.

Dans le cytoplasme, les produits de la photosynthèse permettent essentiellement la synthèse de SACCHAROSE mais aussi de tous les autres constituants chimiques des êtres vivants (glucides, lipides, protéines, acides nucléiques…).



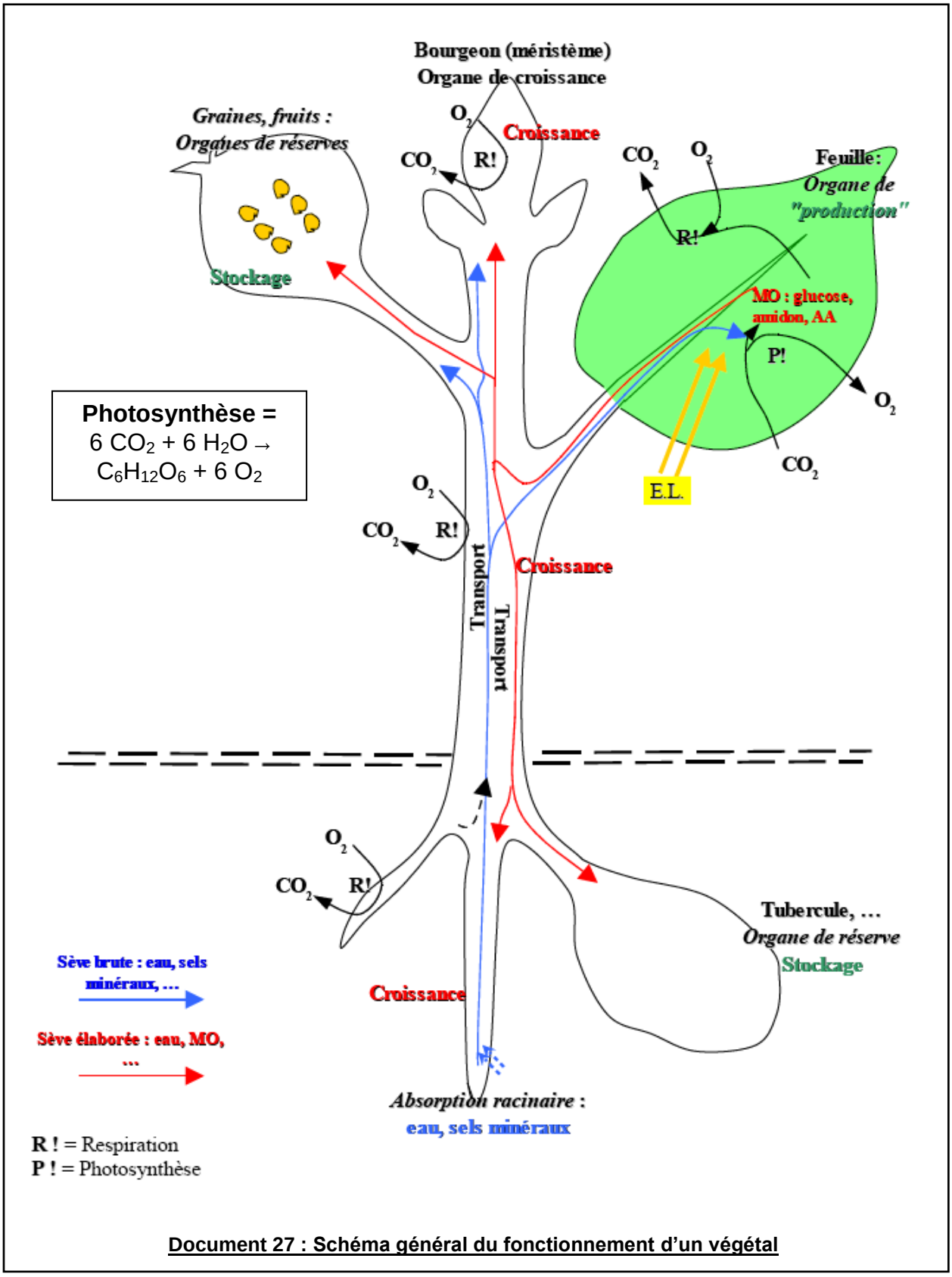
Document 26 : La synthèse de l'amidon dans une cellule végétale.

2. L'exportation vers les autres organes de la plante

TP3 - ECE 2007 - Stockage et synthèse de l'amidon de tubercule de pomme de terre

Le saccharose des cellules foliaires, en partie utilisé sur place, est majoritairement exporté hors des feuilles par la sève élaborée vers d'autres lieux d'utilisation telles que les cellules des zones en croissance (méristème) et celles des zones de stockage (graines, fruits et organes de réserve, parties pérennes de la plantes, paroi cellulosique et bois). Les zones non chlorophylliennes d'une plante se comportent alors comme des parties hétérotrophes d'un être autotrophe.

3- Bilan des réactions de photosynthèse à l'échelle de la plante



Document 27 : Schéma général du fonctionnement d'un végétal

Une plante utilise son système racinaire pour prélever l'eau et les sels minéraux du sol. Ces composés sont ensuite chargés dans la sève brute, conduite par le xylème et remonte vers les tiges et les feuilles.

La photosynthèse permet la production de glucides qui sont alors chargés dans la sève élaborée, conduite par le phloème. Le phloème distribue la sève élaborée vers les tiges, les racines.