

# Physiologie Végétale



SCIENCES DE LA  
VIE



## Shop



- Cahiers de Biologie + Lexique
- Accessoires de Biologie



## Etudier



Visiter [Biologie Maroc](http://www.biologie-maroc.com) pour étudier et passer des QUIZ et QCM en ligne et Télécharger TD, TP et Examens résolus.



## Emploi



- CV • Lettres de motivation • Demandes...
- Offres d'emploi
- Offres de stage & PFE

# **Séance 1 du cours de physiologie végétale**

## **Photosynthèse**

Svi S4  
2020-2021

### **Résumé**

La physiologie végétale c'est la science qui étudie le fonctionnement de la plante, comment se maintient en vie et explique à travers des lois physiques et chimiques comment les plantes sont capables d'utiliser l'énergie lumineuse et les substances inorganiques pour synthétiser des molécules organiques qui forment la structure complexe du corps de la plante. Aussi explique comment les plantes sont capables de se développer et de se reproduire.

Les végétaux ont un rôle très important et unique dans le développement de la vie sur terre. Grâce à la photosynthèse les plantes ont pu diminuer le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique et aussi enrichir l'atmosphère en O<sub>2</sub> qui est nécessaire pour la respiration.

Les plantes et les végétaux en général constituent le support primordial de la chaîne trophique (alimentaire) de l'environnement terrestre. Elles nous fournissent les constituants vitaux de notre base d'alimentation (matière organique, énergie, fibre, vitamine...).

Pour ce la, il est considéré d'une importance primordiale connaître le fonctionnement interne des végétaux et leur mode d'adaptation dans le milieu où ils vivent, ce type d'information contribue sans doute à augmenter les relations bénéfiques entre l'homme et la plante.

Les plantes ont un certain nombre de besoins nutritionnels primordiaux qui sont nécessaires pour leurs survies et leur croissance et qu'on peut classer en trois types :

- Nutrition hydrique : L'eau représente plus de 80% du poids de la matière végétale. Le volume d'eau pénétrant est toujours supérieur à celui retenu par la plante, une grande partie est perdue par transpiration.

- Nutrition carbonée : Caractérisée par des échanges gazeux entre l'atmosphère et la plante par photosynthèse ayant lieu dans des organes aériens pourvu de chlorophylle, la plante absorbe le  $\text{CO}_2$  et libère l' $\text{O}_2$  dans l'atmosphère, et par respiration ayant lieu dans tous les organes de la plante, l' $\text{O}_2$  est absorbé par la plante et le  $\text{CO}_2$  est libéré dans l'atmosphère.

- Nutrition minérale

## **Introduction**

Chaque jour, la terre reçoit une énorme quantité d'énergie qui provient du soleil sous forme de radiation solaire. Sans l'intervention des plantes cette énergie aurait pu être

renvoyée à l'obscurité de l'espace sans servir à rien d'autre que fournir de la chaleur à la surface terrestre.

Les plantes puisent directement leur énergie du rayonnement solaire. En effet, par le phénomène de la photosynthèse, la chlorophylle des plantes capte l'énergie de la lumière solaire pour fabriquer des molécules organiques à partir de substances inorganiques (gaz carbonique notamment). Les molécules organiques produites, en particulier des glucides, sont hautement énergétiques. Elles sont directement utilisées par la plante, ou bien stockées dans les tubercules ou les racines ; elles forment alors l'« aliment » des nouvelles pousses, dont la croissance nécessite de grandes quantités d'énergie. De même, les réserves énergétiques stockées dans les graines nourrissent la jeune plante jusqu'à ce qu'elle soit capable de réaliser sa propre photosynthèse.

## **1- Définition de la photosynthèse**

Photo = lumière    Synthèse = Processus anabolique

L'anabolisme : Ensemble de réactions métaboliques aboutissant à la synthèse des constituants nécessaires (énergie et matière organique) à la croissance, au développement et au maintien des structures d'un organisme.

La photosynthèse en sens large peut être définie comme une transformation de la radiation lumineuse en potentiel énergétique et réducteur, ces derniers seront

postérieurement utilisés pour la formation des molécules organiques réduites (surtouts les hydrates de carbones) à partir des substances inorganiques oxydées (principalement  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) avec libération de l' $\text{O}_2$ .

## **2- Rôle de la photosynthèse**

La photosynthèse est un processus unique dans la nature, car c'est le seul qui permet la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique, et permet un équilibre entre les molécules de carbones organiques et inorganiques, et permet la fermeture de cycle de carbone dans la biosphère il joue le même rôle dans le cycle de l'oxygène, puisque c'est le seul processus biologique qui permet son retour à l'atmosphère.

La photosynthèse est un phénomène indispensable dans la vie puisqu'elle :

- Fournit les molécules organiques réduites nécessaires pour l'alimentation des êtres hétérotrophes.

- Permet le maintient de 21 % de l' $\text{O}_2$  dans l'atmosphère pour cela elle est indispensable pour la respiration.

- Permet de diminuer la quantité du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère à 0.03% sinon cette quantité augmentera à des niveaux toxiques par la respiration des animaux et des végétaux.

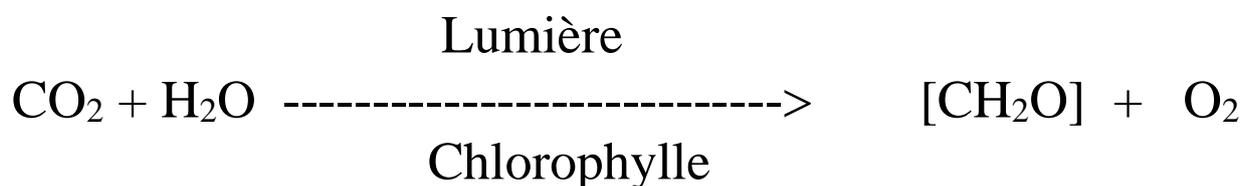
La photosynthèse fournit des avantages écologiques, qui ont joué un rôle important dans l'apparition sur terre des êtres de plus en plus évolués comme les cyanobactéries, algues vertes et plantes vasculaires.

La libération de l'O<sub>2</sub> a permis la modification de l'environnement, la formation de la couche d'ozone qui absorbe les radiations ultraviolettes et a permis la vie sur terre.

La photosynthèse favorise aussi la régularisation de la température de la terre, puisque ce facteur dépend de la quantité de CO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère. Chaque fois que la teneur de ces derniers augmente, la température de la surface terrestre augmente aussi. Ceci constitue la base de la théorie du changement climatique.

### 3-Origine de la photosynthèse

#### 3.1 Equation générale de la photosynthèse



Oxydation de l'eau



### 3.2 D'où provient l'O<sub>2</sub> pour la photosynthèse

Plusieurs hypothèses ont été émises :

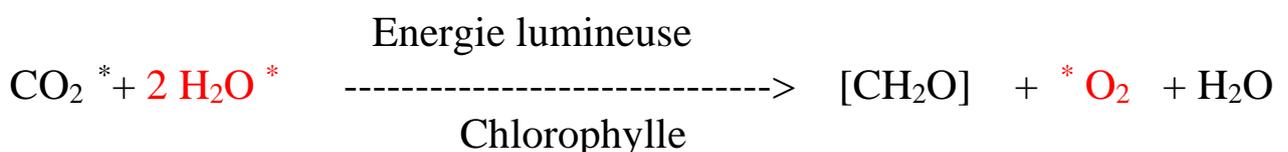
1- En observant l'équation antérieure, on admet qu'au moins une partie de l'O<sub>2</sub> provient du CO<sub>2</sub> par conséquent la lumière a dû décomposer la molécule de CO<sub>2</sub> en deux composantes, liant le C à l'H<sub>2</sub>O pour donner les hydrates de carbones et l'O<sub>2</sub> qui provient totalement du CO<sub>2</sub>.

2- Une autre hypothèse a été émise pour expliquer l'origine de l'oxygène et ce ci par la rupture de la molécule d'eau et du CO<sub>2</sub>.

3- En 1937 Hill a réalisé la réaction qui a pris son nom par la suite et dans laquelle il a obtenu une libération de l'oxygène en illuminant des chloroplastes isolés en absence de CO<sub>2</sub>.

4- La confirmation définitive a été apportée par Ruben et Kamen (1941), qui ont utilisé le O<sup>18</sup> marquant alternativement l'H<sub>2</sub>O\* et le CO<sub>2</sub>\* les résultats ont montré que tout l'O<sub>2</sub> marqué provient de l'H<sub>2</sub>O et non du CO<sub>2</sub>.

L'équation définitive de la photosynthèse est la suivante :



## 4- L'appareil photosynthétique

L'appareil photosynthétique c'est le lieu où se fait la captation de l'énergie lumineuse et la synthèse des molécules organiques réduites (hydrates de carbonés).

En allant des procaryotes photosynthétiques aux plantes supérieures l'appareil photosynthétique est de plus en plus complexe et de plus en plus spécialisé.

a- Bactéries photosynthétiques (cyanobactéries) et algues bleu-vert (cyanophycées) possèdent des petites lamelles parallèles dans la partie la plus externe du cytoplasme (ectoplasme) et elles n'ont pas de membrane qui sépare le reste de cytoplasme.

b- Algues vertes (chlorophycées) possèdent un appareil photosynthétique différencié avec une membrane qui le sépare du reste de la cellule, le chromatophore.

c- Algues rouges (rhodophycées) et brunes (phéophycées) sont les espèces les plus évoluées des algues puisqu'elles possèdent des vrais organules photosynthétiques (rhodoplaste et phéoplastes

respectivement), sont de petite taille, lenticulaires et nombreux par cellules, leurs pigment principal c'est la chlorophylle mais en plus ils possèdent d'autres pigments comme la phycobiline et et la fucoxanthine.

d- Plantes supérieures possèdent des chloroplastes, organites très bien différenciés, de petite taille, lenticulaire, de couleur verte et sont nombreux par cellule. Les chloroplastes constituent l'appareil photosynthétique pour les plantes supérieures, ce sont des plastes avec pigments et sont photosynthétiques.

## **5- Structure des chloroplastes**

Au microscope les chloroplastes sont visibles sous forme de disques lenticulaires d'environ 5  $\mu\text{m}$  de longueur, 2  $\mu\text{m}$  de largeur et 2  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

Par microscope ultraviolet on a pu observer l'existence dans les chloroplastes de granules de pigments sous forme de disques de 0.2 à 0.4  $\mu\text{m}$  de diamètre.

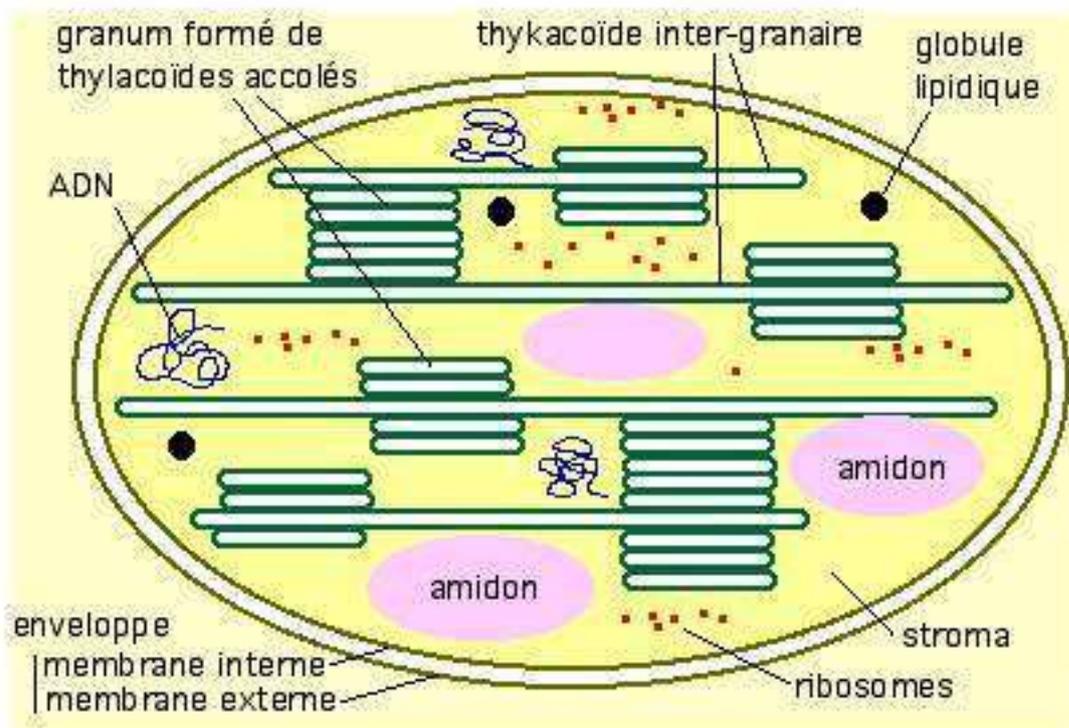
Par microscopes optiques il a été mis en évidence, que les chloroplastes possèdent des mouvements.

- D'orientation, qui dépendent de l'intensité de la lumière qu'ils reçoivent. Si l'intensité de la lumière est basse ils sont orientés d'une manière perpendiculaire aux rayons lumineux, de façon à capter la plus grande quantité de la

lumière. Si l'intensité est élevée, ils s'orientent de profil (parallèle aux rayons) pour éviter l'excès des rayons.

- De contraction et dilatation: On a détecté l'existence dans les chloroplastes des chloromyosines et chloroactine, protéines qui ont la même fonction que les myosines et les actines des muscles striés des animaux.

## 5.1 Structure des chloroplastes



© Biologie et Multimédia - R. Prat

Structure d'un chloroplaste

## Séance 2 du cours de physiologie végétale Photosynthèse

Svi S4  
2020-2021

Les photos par microscopes électroniques montrent trois régions structurales bien définies:

**A- Membranes:** les chloroplastes sont séparés du reste du cytoplasme par une double membrane une membrane externe et une membrane interne avec un espace inter membranaire ou locus.

La membrane interne constitue une barrière sélective pour les chloroplastes. Elle se caractérise par une faible perméabilité aux composés organiques, par sa perméabilité au CO<sub>2</sub> et à certains acides mono carboxylique (acétique, glycérique, glycolique etc.)

**B- Structure lamellaire:** La membrane interne présente des invaginations (repléments) qui traversent l'intérieur du chloroplaste d'une façon parallèle à son grand axe et forment les lamelles ou thylacoïdes intergranaire ou stromatiques. On observe aussi des disques aplatis appelés des lamelles ou les thylakoïdes granaires qui sont intercalés avec les précédentes. Les thylakoïdes s'entassent et forment les granas (ensemble de granum). Les thylakoïdes jouent un

rôle essentiel dans la photosynthèse, permettant le transfert de l'excitation de pigment à pigment.

Les thylacoïdes sont constitués par les polypeptides, lipides, hydrates de carbones, coenzymes et micro éléments.

**1- Polypeptides ou protéines** : Sont ceux qui forment le complexe photosystème I (CPSI) et le complexe photosystème II. (CPSII).

Les deux complexes photosystèmes (PSI et PSII) sont formés de pigments photosynthétiques qui sont arrangés dans les thylakoïdes des chloroplastes en complexes antennaires appelés antennes de captation de la lumière (LHC). (Light harvesting complex), ce complexe antennaire absorbe l'énergie lumineuse (photonique) et aussi sont formés par des chlorophylles a.

le CPSI possède la chlorophylle a P700 (n'absorbe pas de longueurs d'onde supérieures à 700 nm et le CPSII possède la chlorophylle a P680 (n'absorbe pas une longueur d'onde supérieure à 680nm).

Ces chlorophylles sont capables de transformer l'énergie photonique en énergie chimique redox (sous forme des électrons).

A ces chlorophylles sont connectés une série d'éléments redox qui s'oxydent et se réduisent alternativement, ces éléments redox forment la chaîne de transporteur d'électrons (ce sont généralement des coenzymes). Le premier donneur de cette chaîne de transfert d'électrons

c'est l'eau qui s'oxyde et donne des électrons des protons et de l'oxygène et le dernier accepteur d'électrons c'est le  $\text{NADP}^+$  qui se réduit et forme le NADPH.

Au cours de ce flux des électrons il y a aussi formation de l'ATP. Ce phénomène est appelé photophosphorylation.

En général la photophosphorylation est l'ensemble des processus aboutissant à la production d'ATP et couplée à la production de NADPH par oxydation de l'eau et en présence de l'énergie lumineuse.

Ces processus sont essentiels pour le déroulement de la photosynthèse.

## 2- Les lipides sont de deux types :

- Les diacile diglycerides : On trouve les Monogalactosyl diacylglycerol, digalactosyl diacylglycérol, phosphatidyl glycérol, etc.

- Les pigments :

### a- Chlorophylles a et b

- La chlorophylle a : Pigment principal du CPSI et du CPSII.



La chlorophylle a absorbe l'énergie des longueurs d'onde de 430nm et 660nm et reflète la couleur verte.

- La chlorophylle b absorbe des longueurs d'ondes de 445nm et 645nm et reflète la couleur verte.



Les deux chlorophylles a et b forment partie du complexe LHC.

### b-Caroténoïdes:

- Carotènes  $\text{C}_{40}\text{H}_{56}$
- Xanthophylles  $(\text{C}_{40}\text{H}_{56}\text{O})_n$

Les caroténoïdes forment partie de l'antenne de captation de radiation lumineuse, ont un rôle protecteur de la photosynthèse.

Les caroténoïdes absorbent des longueurs d'ondes entre (400 et 500nm) et reflètent les couleurs jaune, orange et rouge.

### 3- Les hydrates de carbones

4- Les coenzymes : Composants des thylakoïdes qui possèdent la capacité d'être soumis alternativement à des oxydations et des réductions. On trouve les cytochromes les plastocyanines, ferrédoxines, des quinones etc.

### 5- Les microéléments

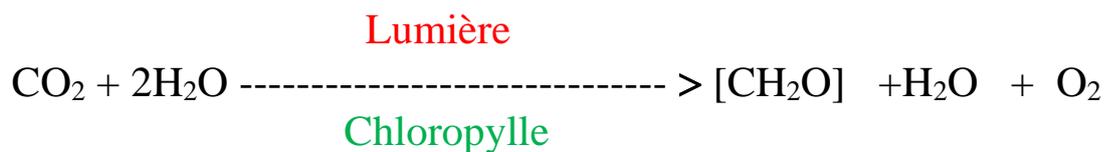
**C- Stroma amorphe:** Tout le système lamellaire se trouve immergé dans le stroma, un liquide qui remplit l'intérieur des chloroplastes et contient une équipe enzymatique fondamentalement les enzymes du cycle de Calvin. Son constituant principal est l'enzyme appelée fraction I et identifiée par le nom de Ribulose 1-5 difosphate carboxilase oxygénase (**Rubisco**), on trouve des grains d'amidon, plastoglobules et acides nucléiques.

Parmi les acides nucléiques on trouve : ADN, ARNm, ARNr, ARNt. Dans le stroma se déroulent les étapes chimiques de la photosynthèse depuis la fixation initiale du CO<sub>2</sub> jusqu'à la formation des hydrates de carbone (cycle de Calvin).

## 6- Déroulement de la photosynthèse

### 6-1 Etapes de la photosynthèse

L'équation générale de la photosynthèse est la suivante :



### Bilan énergétique de la photosynthèse

Il faut 6 molécules de CO<sub>2</sub> et 6 molécules de H<sub>2</sub>O pour synthétiser une molécule de glucose

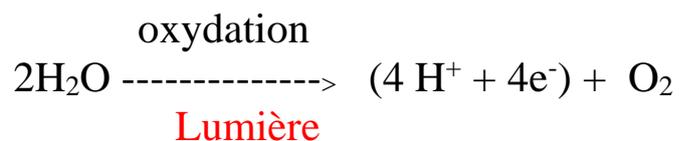


Hill a démontré que l'équation générale de la photosynthèse se déroule en deux étapes séparément : Etape lumineuse ou photochimique et étape obscure (indépendante de la lumière) ou biochimique

### **a/ Etape lumineuse ou photochimique (voir schéma ci-dessous)**

Cette équation se déroule dans les thylakoïdes du chloroplaste et en présence de la lumière il ya :

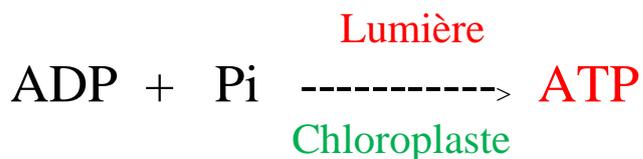
**1-Photoxydation** de l'eau qui libère les électrons et les protons et de l'oxygène.



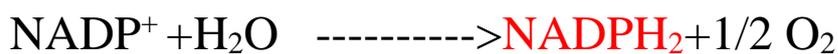
La photoxydation de l'eau produit l'oxygène moléculaire, les électrons et les protons. Les électrons se transmettent grâce à une série de transporteurs d'électrons jusqu'au  $\text{NADP}^+$  pour donner Le  $\text{NADPH}_2$ .

**2-Photophosphorylation** qui abouti à la formation de l'ATP (pouvoir énergétique) et NADPH (pouvoir réducteur), les deux pouvoirs sont nécessaires pour le déroulement de la deuxième réaction et la formation des hydrates de carbone.

**Photophosphorylation :**

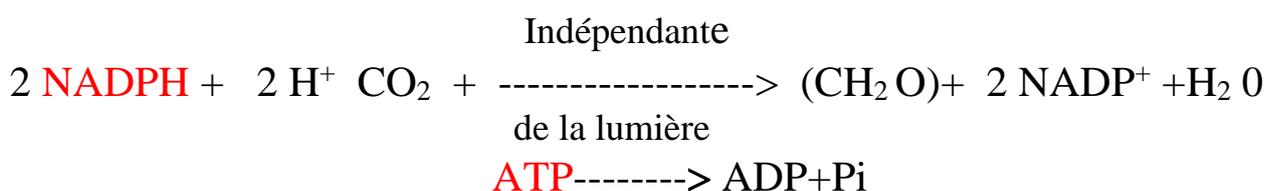


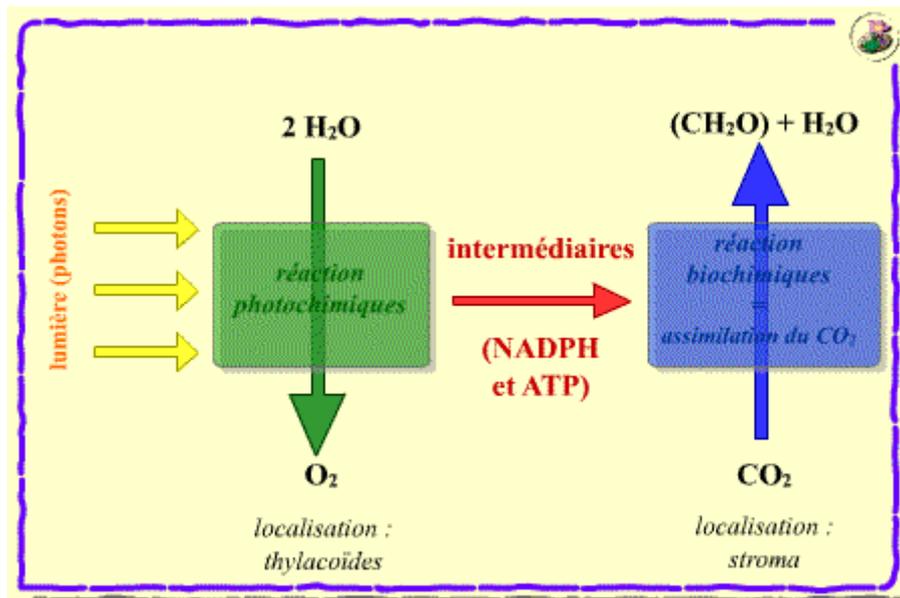
De même la réduction du  $\text{NADP}^+$  abouti à la formation du NADPH



**b/ Etape obscure (indépendante de la lumière) ou biochimique (voir schéma ci-dessous)**

La réaction obscure à lieu dans le stroma du chloroplaste où l'énergie stockée sous forme d'ATP et de  $\text{NADPH}_2$  est utilisée pour réduire le dioxyde de carbone en carbone organique sous forme de glucide ( $\text{CH}_2\text{O}$ )

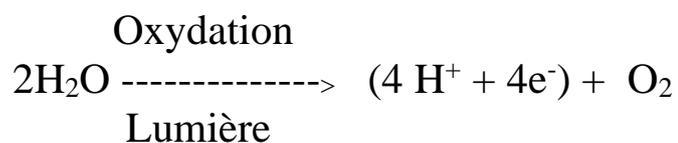




## Résumé

Au cours de la photosynthèse il y'a,

1-Photoxydation de l'eau :



Le premier donneur de la chaîne de transporteur d'électrons c'est l'eau, qui s'oxyde dans les thylakoïdes et donne des électrons, des protons et libère de l'oxygène, et le dernier accepteur c'est le  $\text{NADP}^+$  qui est réduit dans le stroma et forme le NADPH (pouvoir réducteur). Ce flux

d'électrons est accompagné par la synthèse de l'ATP (pouvoir énergétique) catalysée par l'ATP synthétase. Les deux pouvoirs sont nécessaires pour le déroulement de la phase obscure de la photosynthèse.

2- Synthèse de l'ATP (photophosphorylation).

3-Réduction du  $\text{NADP}^+$  en NADPH.

4-Réduction de  $\text{CO}_2$  en carbone organique sous forme de glucide.

5- Production des glucides, notamment de l'amidon. Cet amidon sera hydrolysé postérieurement, en glucides solubles ces derniers se dirigent vers le phloème (sève élaborée).

Par utilisation de  $\text{C}^{14}$  et de la chromatographie sur papier il a été démontré que le premier produit stable formé comme résultat de l'assimilation photosynthétique du  $\text{CO}_2$  n'est pas l'amidon si non un hydrate de carbone de 3 carbones : acide phosphoglycérique.  $\text{COOH-CHOH-CH}_2\text{OP}$ , l'amidon se forme quand le niveau de glucose libre dans les tissus dépasse une certaine limite, dans ce cas ces molécules se combinent pour former l'amidon.

6 - Les échanges gazeux : Les gazes ( $\text{O}_2$  et  $\text{CO}_2$ )

## 6-2 Ecophotosynthèse

De 250 Kcal qui proviennent du soleil, arrivent seulement à la biosphère 100 Kcal, le reste est réfléchi ou absorbé par les couches supérieures de l'atmosphère ou par les particules cosmiques etc.

- De 100 Kcal : 70% se perdent (50% forment les radiations infrarouges qui ne sont pas profitables) et 20% sont réfléchis par l'eau, plantes, etc. et 30% sont absorbée par la biosphère.

De ces 30 Kcal absorbés seulement 1 Kcal est utilisée pour le processus de la photosynthèse.

# Séance 3 du cours de physiologie végétale

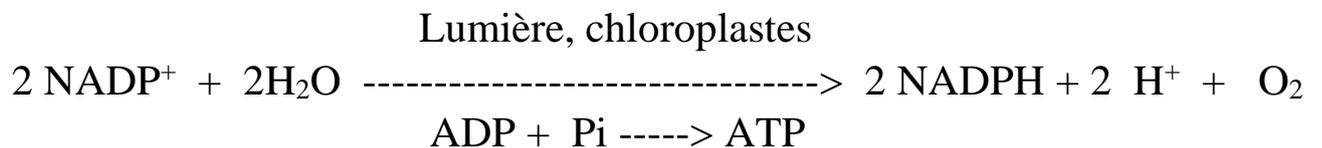
## Photosynthèse

Svi S4  
2020-2021

### 7- Etapes de la photosynthèse suivant les types de plantes

#### 7-1 Etape de la photosynthèse voie C3

##### a) Etape lumineuse

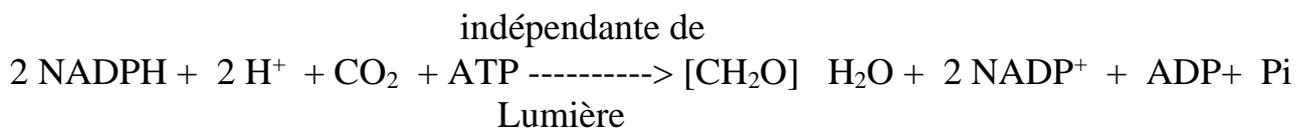


Dans l'étape lumineuse de la photosynthèse l'énergie utilisée c'est l'énergie lumineuse absorbée par les pigments photosynthétique pour réaliser la photo oxydation de l'eau ce qui conduit à une libération de l'oxygène et un transport des électrons et aussi une accumulation de l'énergie sous forme d'un pouvoir énergétique (ATP) et réducteur (NADPH+ H).

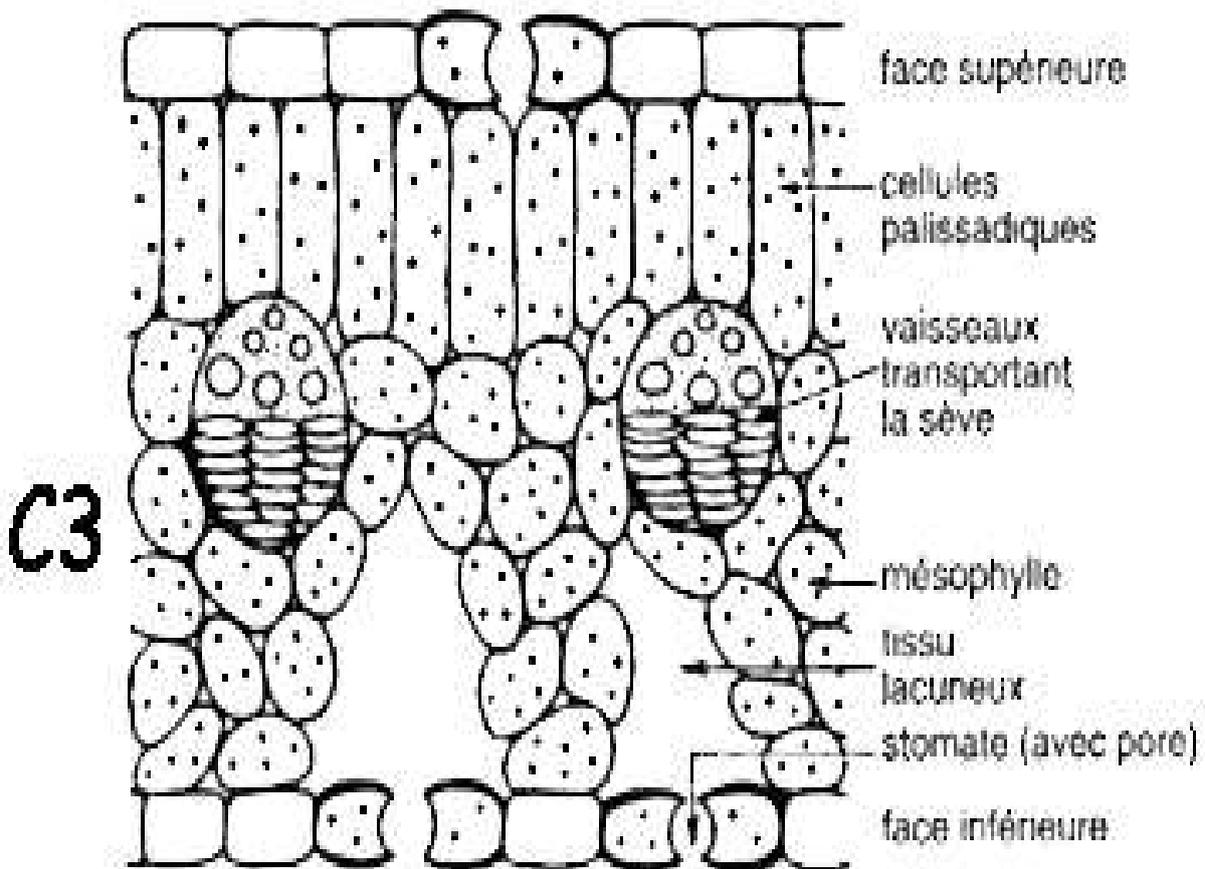
## b) Etape obscure : Cycle de Calvin

Cette phase ne nécessite pas l'obscurité, le terme obscure ou sombre indique qu'elle n'est pas conditionnée par la lumière. En réalité elle est indirectement conditionnée par la lumière : Les coenzymes nécessaires à sa réalisation font vite défaut en absence de la lumière.

Dans cette étape la photosynthèse profite du pouvoir énergétique (ATP) et du pouvoir réducteur ( $\text{NADPH} + \text{H}^+$ ) formées dans l'étape lumineuse, pour la fixation et la réduction du  $\text{CO}_2$  pour l'obtention des hydrates de carbonés



En 1953, Calvin et ses collaborateurs ont déterminé une voie d'assimilation du  $\text{CO}_2$  dans l'étape obscure. Cette voie est connue par la voie de cycle de Calvin ou cycle  $\text{C}_3$ . Les espèces végétales qui suivent cette voie sont (blé, orge, avoine, le riz, pomme de terre, betterave,...etc.) Ces plantes type  $\text{C}_3$  sont les plus répandues dans la nature. Leurs feuilles présentent un parenchyme palissadique et lacuneux superposé (voir schéma ci-dessous).



Durant cette époque on a pensé que l'étape obscure suivait la même voie pour tous les végétaux supérieurs.

En 1966 grâce aux travaux de Hatch et Slak il a été découvert l'existence d'autres espèces végétales (comme par exemple la canne à sucre, le Maïs, le seigle etc.) qui suivaient d'autres voies pour l'assimilation du  $\text{CO}_2$  cette voie est appelée voie de Hatch, Slach ou la voie  $\text{C}_4$ .

Il existe aussi d'autres types d'espèces végétales en particulier les plantes succulentes (opuntia, etc.) qui possèdent le métabolisme appelé CAM (Métabolisme acide des crassulacées).

## **1-Fixation et réduction photosynthétique du CO<sub>2</sub> chez les espèces C3 (voir cycle de Calvin)**

Le CO<sub>2</sub> atmosphérique se fixe sur un sucre phosphorylé de 5 atomes de carbone, le Ribulose 1,5 diphosphate (RuDP), formant l'acide 3- phosphoglycérique (APG) de 3 C. La fixation du CO<sub>2</sub> se fait grâce à l'enzyme Ribulose 1,5 diphosphate carboxylase oxygénase (RuBisco). Pour chaque tour de cycle il est nécessaire la fixation de 3 CO<sub>2</sub> sur 3 RuDP, formant 6 APG.

En présence de 6 ATP et sous l'action de APG kinase, il y'a formation d'acide 1,3- diphosphoglycérique (ADPG).

ADPG en présence de 6 NADPH + H<sup>+</sup> et sous l'action de la NADP 3- phosphoglyceraldehyde déshydrogénase (NADP-PGal-DH) est réduit à 6 triose- phosphate.

**Un de ces 6 triose- P sort du cycle, et exactement un PGal, qui postérieurement va s'unir à autre triose -P pour donner lieu aux hydrates de carbone (Amidon et saccharose).**

Des 5 trioses-P qui restent, deux (un Pgal et un PDHA), vont donner un fructose 1,6- diphosphate (FruDP) par action de la fruDP- aldolase. Ce dernier et sous l'action de la Fru- diphosphatase, forme le fructose M phosphate (FruMP).

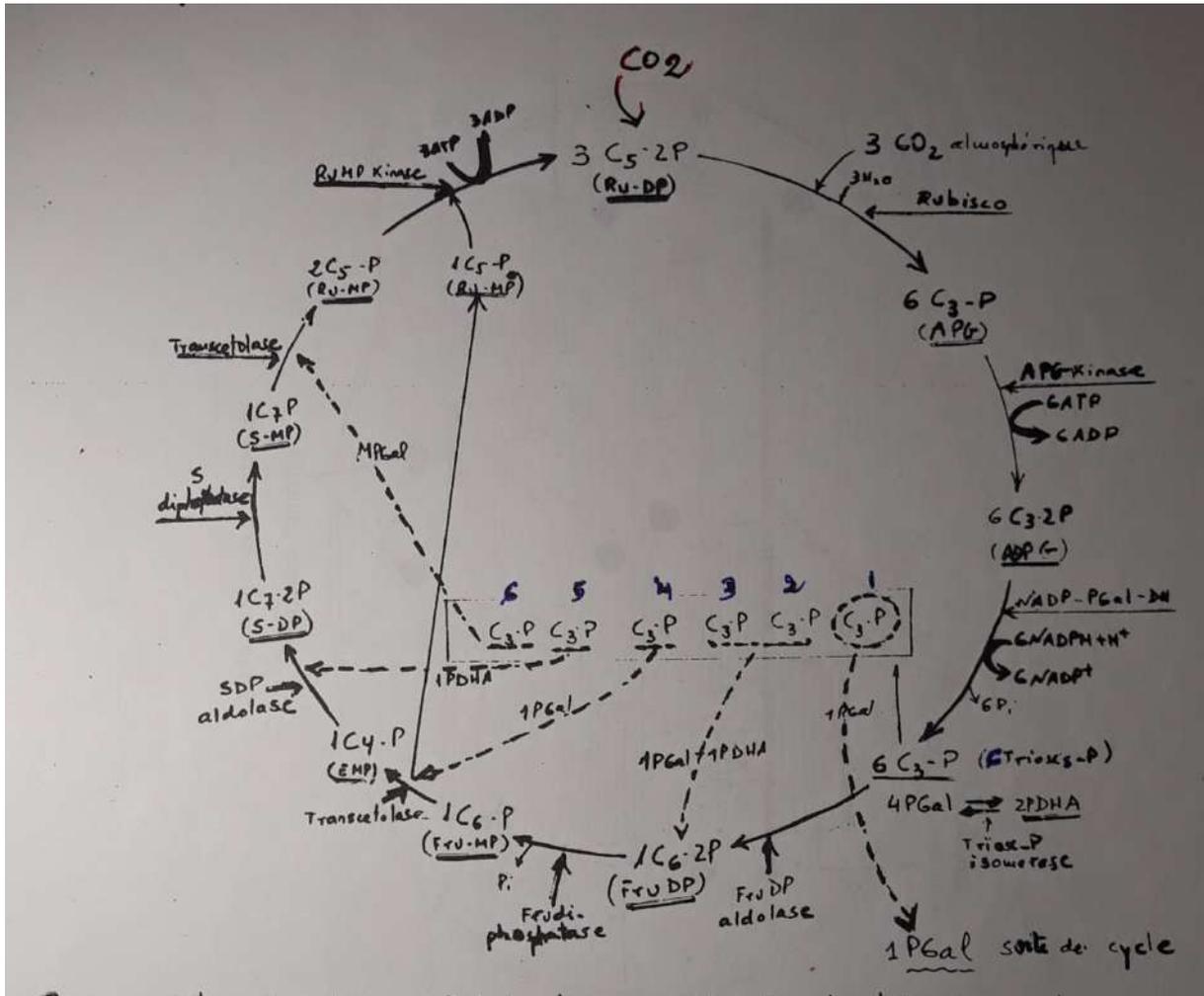
Des 3 trioses-P restant, un ( 1 Pgal) s'unit à la FruMP pour donner deux composants un de 4 atomes de C, la eritrose monophosphate ( EMP), et un autre de 5 C, la ribulose monophosphate ( RuMP\* ), pas directement mais après plusieurs étapes intermédiaires ).

A la EMP s'unit une triose-P des deux qui restent (1 PDHA) pour donner un composant de 7 C, la sedoheptulose 1-7, diphosphate ( SDP), par action de la SDP- aldolase.

Ce dernier par action de la sedoheptulose diphosphatase donne SMP.

A la SMP s'unit une dernière PGal qui restent, par l'intermédiaires d'une transcetolase, et donnent deux composants de 5 C, deux RuMP.

Ces 2 RuMP, avec la RuMP\* avec 3 ATP et l'action de la RuMP-kinase régénèrent les 3 RUDP de départ



## Résumé du cycle de Calvin

Même si en théorie l'assimilation du  $\text{CO}_2$  est indépendante de la lumière, en pratique le cycle de Calvin se déroule en présence de la lumière et ceci pour avoir une réserve suffisante d'ATP et NADPH, en absence de la lumière la concentration de ces derniers peut diminuer dans les chloroplastes mais ne s'annulent jamais.

De plus la présence de la lumière est indispensable pour le fonctionnement de certaines enzymes du cycle comme Rubisco, NADP-Pgal-DH, Fru-di-phosphatase, et RuMP-kinase.

Les trioses-P formés pendant la réduction du CO<sub>2</sub> peuvent se convertir en lipides, glucides, aminoacides ou protéines. Mais la voie principale c'est celle qui conduit à la formation du saccharose et de l'amidon.

Les structures vertes des plantes supérieures orientent une grande partie de leur production photosynthétique pour la formation du saccharose, hydrate de carbone le plus exporté par le phloème vers les organes verts.

Une autre voie importante peut être celle d'accumulation de l'amidon dans les chloroplastes, dans lesquelles une partie sera dégradée à l'obscurité pour fournir le carbone et de l'énergie aux structures photosynthétique quand la lumière manque.

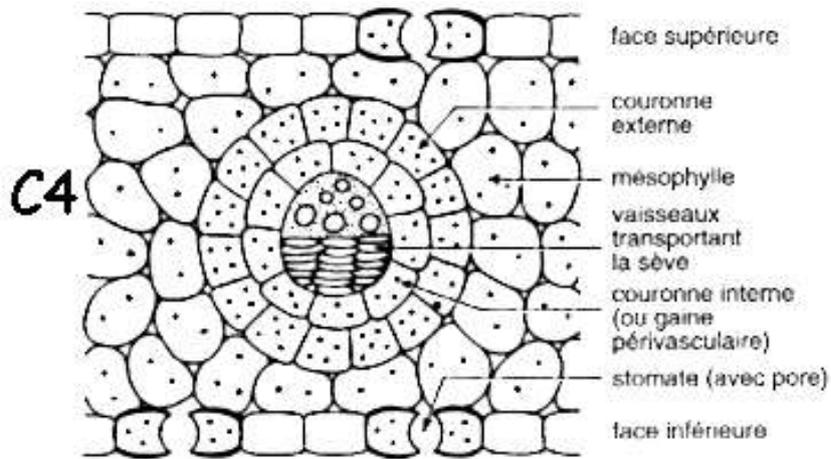
## **7-2 Voie C4**

### **7-2-1 Anatomie des plantes C4**

On connaît actuellement 13 familles (Exp famille des graminée, chénopodiacée, amarantacée..) ayant au moins 485 espèces appartenant au type C4.

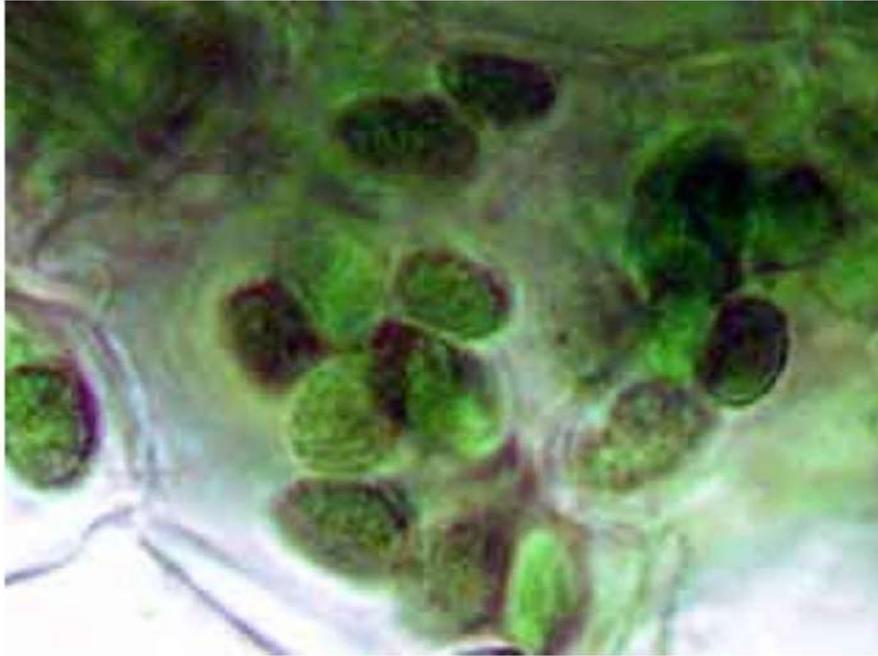
Exemple : Maïs, canne à sucre, sorgho....

La coupe transversale des feuilles des plantes C4 (voir schéma ci-dessous) montre la présence d'un seul parenchyme (mésophylle) et les vaisseaux criblovasculaires sont entourés par une gaine périvasculaire .

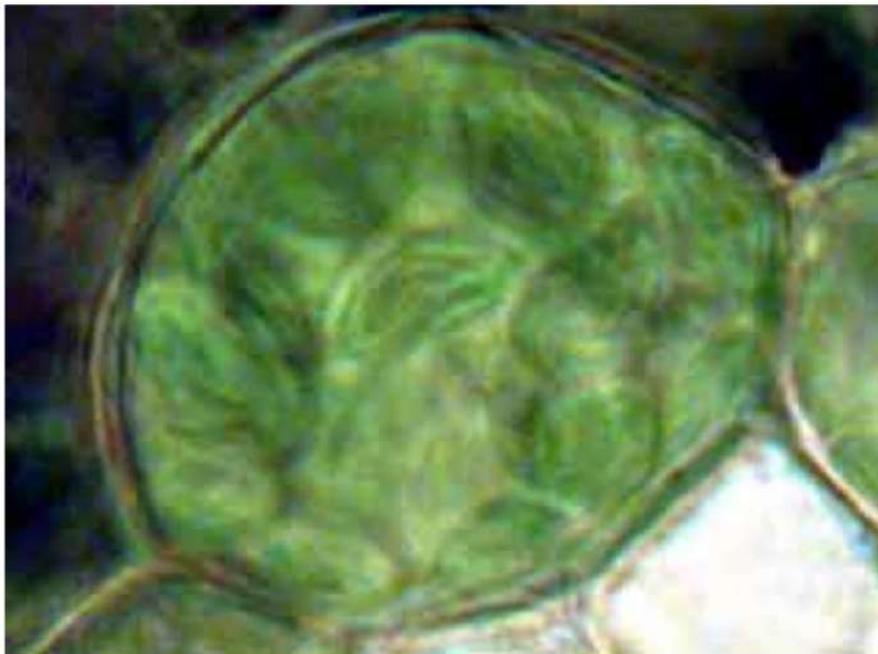


Les feuilles des plantes C4 présentent deux types de chloroplastes :

- Les chloroplastes des cellules de mésophylle sont petits et présentent une structure granulaire classique.
- Les chloroplastes des cellules de la gaine périvasculaire sont de grande taille avec une structure présentant peu ou pas d'empilement de tylakoïdes.

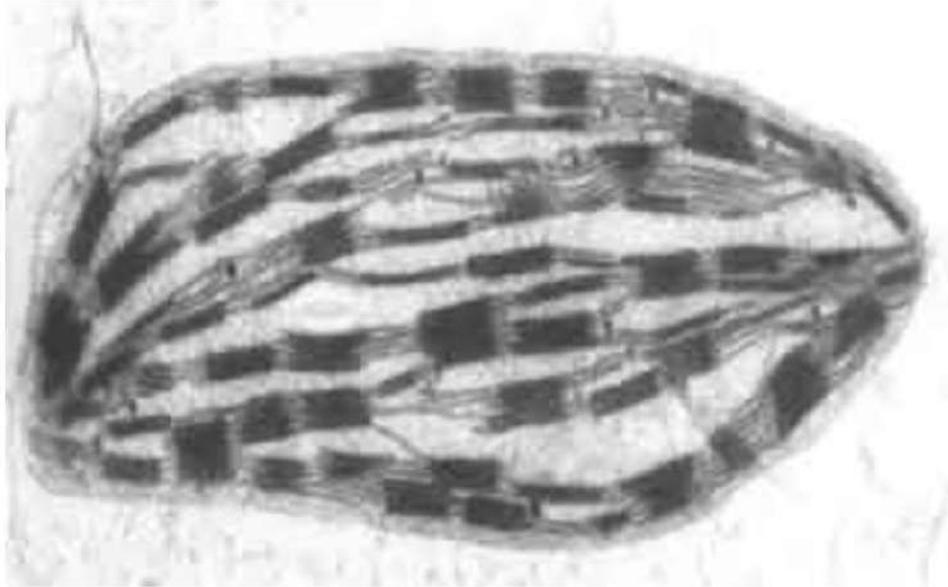


*Cellule du mésophylle, les chloroplastes, petits montrent une structure granulaire (présence de grana).*

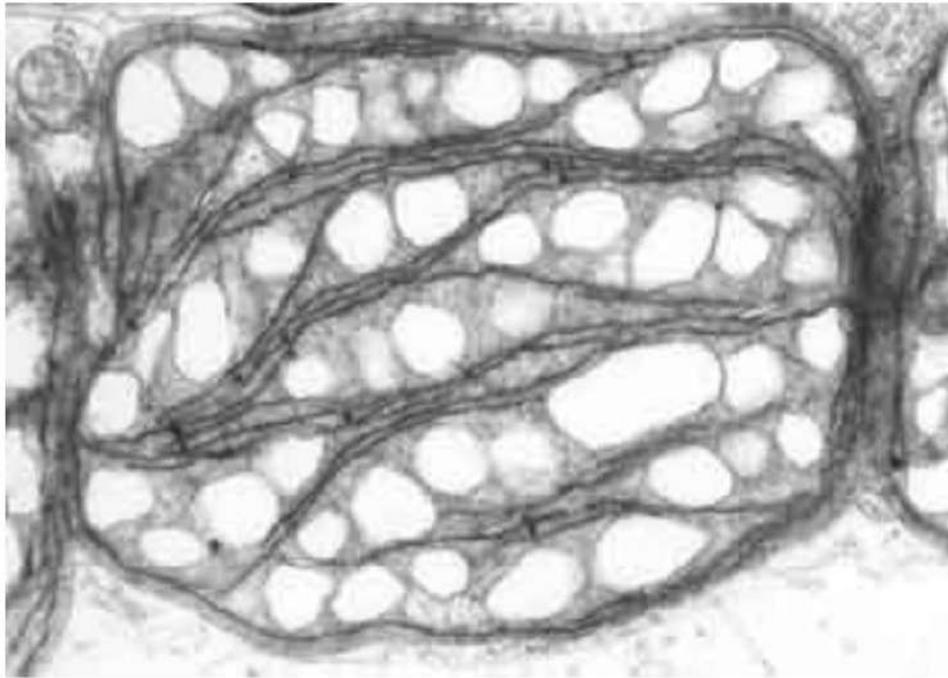


*Cellule de la graine périvasculaire : les chloroplastes, plus grands présentent une structure agranaire.*

Ces caractéristiques apparaissent plus clairement en microscopie électronique à transmission (MET).



***Chloroplaste de mésophylle (MET): La structure est classique, le chloroplaste contient de nombreux thylacoïdes empilés en grana.***

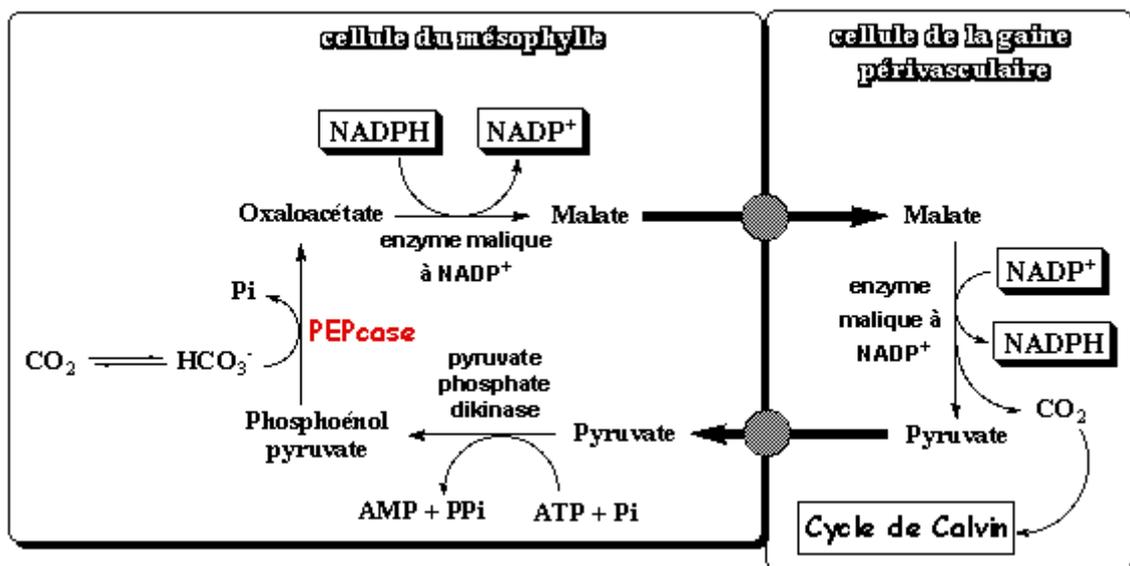


***Chloroplaste de gaine (MET): Le chloroplaste ne contient pas de grana mais seulement de longs thylacoïdes non empilés.***

## 7-2-2 Métabolisme photosynthétique de la voie C4

L'assimilation primaire du CO<sub>2</sub> atmosphérique a lieu dans les chloroplastes des cellules du mésophylles sur un composant de 3 atomes de carbones, l'acide phosphénolpyruvique (PEP) cette réaction est catalysée par la PEP- carboxylase pour donner l'oxaloacétate à 4 C (d'où le nom de métabolisme), ce dernier donne lieu au malate ou aspartate (selon les espèces), ces derniers passent à la cellule de la gaine périvasculaire ou vont être décarboxylés (élimination de CO<sub>2</sub>) en un composé de 3 C. Le CO<sub>2</sub> libéré après décarboxylation va se fixer grâce à la rubisco sur le ribuose diphosphate pour donner des trioses de l'amidon et du saccharose (cycle de calvin).

Le composé de 3C (pyruvate) passe dans la cellule de mesophylle, et grâce à la pyruvate phosphatase dikinase régénère le premier produit de fixation de CO<sub>2</sub> (PEP).



Résumé de la voie en C4

### 7-2-3 Caractéristiques des plantes C4

- Les plantes C4 sont dans la plus part des cas originaires des régions chaudes où l'éclairement est élevé, elles peuvent s'adapter d'avantage à un environnement sec et chaleureux que les plantes C3, et s'adaptent mieux au climat aride du fait de leur faible transpiration.
- Les plantes C4 peuvent réaliser la photosynthèse à une vitesse élevée même avec des concentrations faibles en CO<sub>2</sub> ceci leur permet d'avoir les stomates moins ouverts que les plantes C3 et leur permet aussi de réduire la perte d'eau par transpiration.
- Les plantes C4 utilisent mieux le CO<sub>2</sub> aux faibles concentrations mais consomment beaucoup d'énergie 5 ATP pour la fixation de CO<sub>2</sub>.
- Le mécanisme C4 permet à la plante d'accumuler une réserve de CO<sub>2</sub> sous forme de malate ou aspartate (selon les espèces) et ceci pour l'utiliser en cas carence, quand l'assimilation du CO<sub>2</sub> atmosphérique est interrompue par une fermeture brusque des stomates.
- Les plantes C4 s'adaptent plus que les plantes C3 aux conditions de salinité.

## Comparaison de la photosynthèse nette entre les espèces en C3 et en C4

| Type de plante           | IP nette (mg CO <sub>2</sub> / dm <sup>2</sup> / h) |
|--------------------------|---|
| <b>Espèces en C3</b>     |   |
| <b>Plantes de soleil</b> | <b>20-45</b>  |
| <b>Plantes d'ombre</b>   | <b>4- 20</b>  |
| <b>Espèces en C4</b>     | <b>30-80</b>  |

On remarque que l'intensité photosynthétique pour les plantes C4 varie entre 30 et 80(mg CO<sub>2</sub> / dm<sup>2</sup>/ h) alors que pour les plantes C3 varie entre 4 et 45(mg CO<sub>2</sub> / dm<sup>2</sup>/ h). Aussi on remarque que les plantes d'ombre possèdent une intensité photosynthétique plus basse que les plantes de soleil.

# **Séance 4 du cours de physiologie végétale**

## **Photosynthèse**

Svi S4  
2020-2021

### **7-3 Etapes de la photosynthèse : Voie CAM**

#### **7-3-1 Caractéristiques des plantes CAM**

Le métabolisme CAM a été observé la première fois chez quelques espèces de la famille des crassulacées (famille des plantes ayant des feuilles généralement charnues, ce sont des plantes succulentes), pour cela on a donné à ce métabolisme le nom de métabolisme acide des crassulacées (CAM).

Même si presque toutes les plantes succulentes (plantes à tiges et feuilles épaisses et charnues retenant de l'eau) présentent un mécanisme CAM il existe des plantes succulentes qui ne sont pas CAM et des plantes CAM qui ne sont pas succulentes.

Un grand nombre de familles contiennent des espèces CAM. Ex : Aizoacées, Cactacées, cucurbitacées, portulacées, asparagacées, bromeliacées etc.

Ex de plantes CAM : Cactus, agave, ananas....

On peut trouver des cas où les plantes C<sub>3</sub> sous des conditions de sécheresse développent une structure de plantes succulentes avec métabolisme CAM.

L'anatomie des plantes CAM se caractérise par la présence d'une couche de cellules palissadiques peu développée et un parenchyme lacuneux (ou spongieux), qui contient des

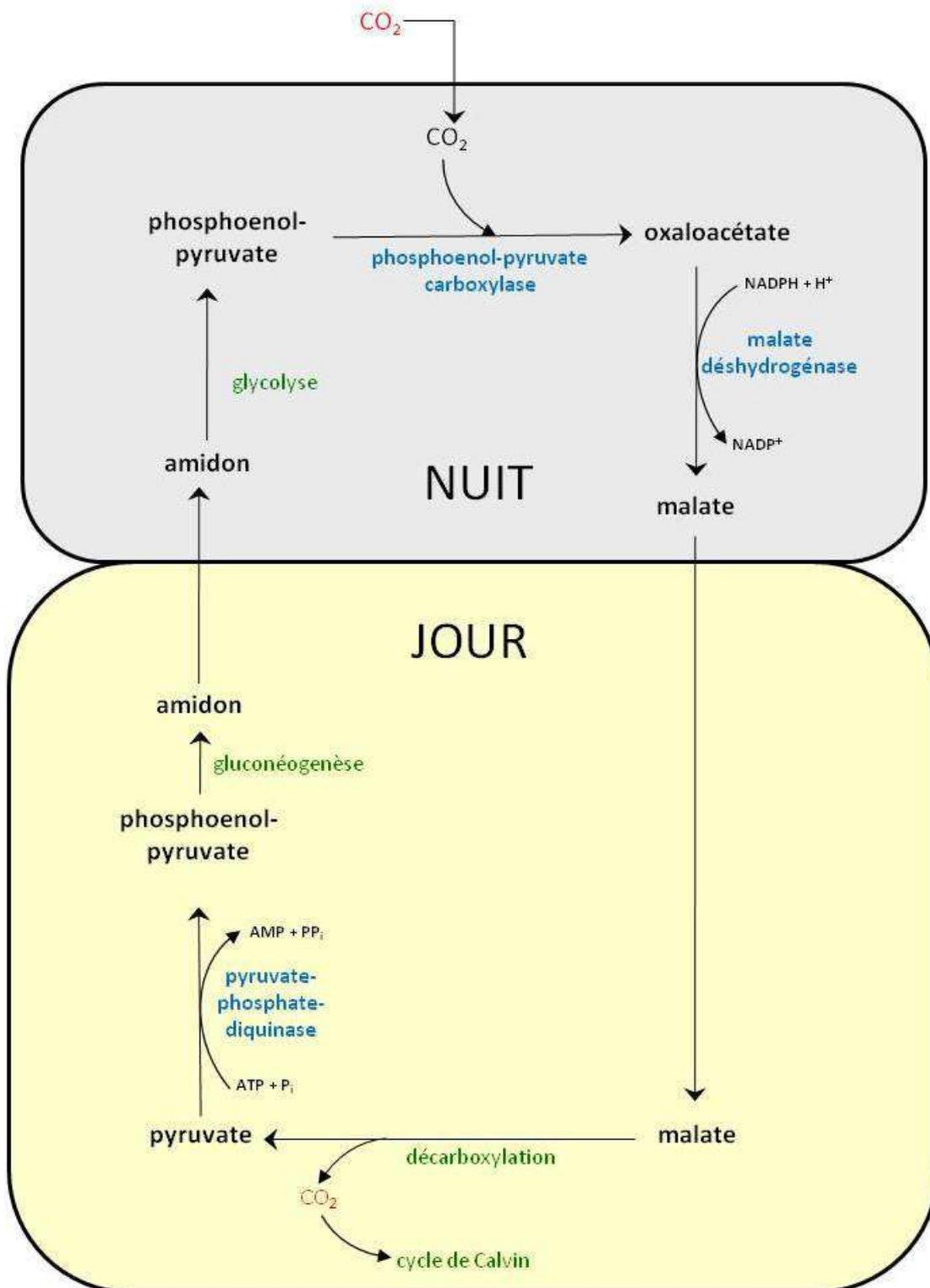
chloroplastes et de grandes vacuoles remplies d'eau. Ces plantes sont adaptées aux régions sèches, de chaleur intense pendant le jour et une basse température la nuit.

### **7-3-2 Voie CAM**

Les stomates des plantes CAM sont ouverts la nuit afin que la perte d'eau soit contrôlable, période pendant laquelle se fait la fixation du  $\text{CO}_2$  (carboxylation) atmosphérique sur le phosphoenol-pyruvate (PEP), cette réaction est catalysée par la PEP carboxylase pour donner l'oxaloacétate, cette dernière donne le malate par la malate déshydrogénase. Le malate formé s'accumule dans les vacuoles et se transforme partiellement en autres acides comme acide acétique et isocitrique. Cette concentration est élevée à la fin de la nuit, ce qui explique le goût acide des feuilles des plantes CAM au début de la matinée.

Durant le jour les stomates se ferment mais le  $\text{CO}_2$  est disponible sous forme de malate. Le malate et les autres acides formés sortent des vacuoles, ces acides accumulés sont décarboxylés (décarboxylation est une réaction chimique au cours de laquelle une molécule de  $\text{CO}_2$  est éliminée d'une molécule organique portant un groupement carboxyle  $\text{COOH}$ ) et donne le pyruvate et le  $\text{CO}_2$  libéré va être réassimilé par le cycle de Calvin pour donner des sucres. Le pyruvate grâce à la pyruvate phosphatédiquinase donne le PEP qui par la gluconéogenèse (synthèse du glucose à partir de composés non glucidique) donne l'amidon.

La nuit suivante, l'amidon par glycolyse permet la régénération du PEP.



**Résumé du cycle CAM**

## **8- Caractéristiques structurales des plantes CAM**

Les caractéristiques structurales des plantes CAM ont permis à ces plantes de se développer dans des endroits où les autres plantes ne peuvent pas survivre.

**Les racines** sont peu profondes et leur fonction s'arrête lorsqu'il y'a un manque d'eau. Lorsque le sol devient humide la plante développe de nouvelles racines et de nombreux poils absorbants qui aident à l'absorption d'eau. On peut trouver des plantes CAM qui possèdent des racines profondes et ceci pour pouvoir absorber la faible quantité d'eau qui peut exister dans la profondeur.

**-Les tiges** sont de forme variable peuvent être étalées, formant un coussin pour se protéger du vent ou formant des colonnes.

**-Les feuilles** généralement absentes, sont rudimentaires (simples), réduites à des épines ou écaille ou apparaissent sous forme de poils. Leurs formes et leurs couleurs sont variables. Elles peuvent être épaisses et charnues plus ou moins rondes, ovales ou bien longues.

**Au niveau des tissus :** Le tissu épidermique est dur présente une cuticule épaisse qui lui donne une grande résistance cuticulaire qui minimise la perte de la vapeur

d'eau dans un climat sec évitant ainsi une transpiration excessive. Il présente des stomates en nombre réduits et cachés ou enfoncés dans l'épiderme. Les stomates s'ouvrent durant la nuit et se ferment durant le jour.

Les plantes CAM possèdent un parenchyme lacuneux, c'est un parenchyme très bien développé où s'accumule l'eau avec des substances mucilagineuses (qui contiennent un liquide visqueux à base de sucre et de pectine), Il possède des parois fines et élastiques ce qui donne aux feuilles et aux tiges de ces plantes une grande capacité d'emmagasiner de l'eau.

## **9- Habitat des plantes CAM**

Les plantes CAM se trouvent dans des milieux secs, de biomasse faible. Le métabolisme CAM permet aux plantes de résister au climat aride, caractérisé par les périodes de pluie très faibles. Leur productivité diminue chaque fois que les réserves hydriques du sol diminuent, pourtant elles sont capables d'utiliser l'eau mieux que les autres plantes, et sont capables aussi de vivre dans des zones où les autres types de plantes sont incapables de vivre pour la rareté d'eau. Elles se trouvent aussi dans des terrains sableux où l'eau de pluie s'infiltrerait très rapidement vers la profondeur, dans des régions tropicales et subtropicales où les jours sont chauds et les nuits sont très froides avec une alternance de période de sécheresse et de pluie abondante. Ces plantes tolèrent les hautes températures mais on peut les trouver aussi dans des endroits où la température peut atteindre  $-10^{\circ}\text{C}$  durant quelques heures.

## **10- Comparaison de quelques caractéristiques des plantes C3, C4, CAM.**

Les plantes ayant un métabolisme CAM présentent une série de caractéristiques structurales et métaboliques qui les différencient des plantes C3 et C4.

-De point de vue structure : Les feuilles des plantes CAM possèdent beaucoup de parenchyme lacuneux et peu de parenchyme palissadique.

Les feuilles des plantes C3 présentent un parenchyme palissadique et lacuneux superposé.

Les feuilles des plantes C4 possèdent un seul parenchyme (mésophylle) et les vaisseaux criblovasculaires sont entourés par une gaine périvasculaire

- De point de vue métabolique : A l'obscurité les plantes CAM sont capables de fixer une grande quantité de CO<sub>2</sub> externe, accumulant l'acide organique (l'acide malique principalement) dans les vacuoles. A la lumière les acides accumulés sont décarboxylés et le CO<sub>2</sub> libéré est fixé par le cycle de calvin

Les plantes en C3 convertissent le CO<sub>2</sub> en un composé de 3 carbones (PGA) grâce à la (Rubisco).

Les plantes en C4 et les plantes CAM convertissent le CO<sub>2</sub> en un composé à 4 carbones (oxaloacetate) grâce à la phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC).

Le métabolisme C4 est séparé dans l'espace : Il se déroule dans le mesophylle et dans la gaine perivasculaire, alors que le métabolisme CAM est séparé dans le temps : Il se déroule durant le jour et durant la nuit.

De point de vue écologique : Les plantes C3 sont adaptées à des climats frais, alors que les plantes C4 supportent la sécheresse, un fort ensoleillement et une haute température. Les plantes C4 peuvent continuer à photosynthétiser même à très faible concentration en CO<sub>2</sub>.

Les plantes CAM sont adaptées aux climats désertiques supportent une sécheresse et de la chaleur intense pendant le jour et une basse température la nuit aussi s'adaptent aux climats tropicaux d'une aridité variable et de longue durée, les plantes CAM ont l'avantage d'éviter une perte excessive de l'eau par transpiration, alors qu'elles sont défavorisées par rapport aux plantes C3 et C4 car leur capacité photosynthétique est faible.

## **11-Devenir des produits photosynthétiques**

Le glucose formé durant le processus de la photosynthèse dans la majorité des cas ne reste pas accumulé dans les cellules des plantes vertes. Si non il est utilisé soit comme source d'énergie chimique dans divers processus métabolique pour les plantes ou bien se transforme en autres molécules biochimiques. Une partie de ce glucose se transforme en saccharose et l'autre partie en amidon. Ce dernier, s'accumule dans les cellules des plantes surtout des graines des racines et des tubercules. Le glucose peut se transformer en cellulose  $(C_6H_{12}O_5)_n$ , qui sert pour la construction de la paroi cellulaire de la plante, il peut subir aussi une série de transformations pour se convertir en graisse et huiles qui s'accumulent dans la majorité des cas dans les graines. Certains produits provenant de glucose entrent en réaction avec l'azote et le soufre pour former des acides aminés qui se combinent pour former des protéines, ces derniers se concentrent dans les parties actives de la croissance de la plante et dans la graine.

## 12- Grandeurs photosynthétiques

L'intensité photosynthétique (IP), égale à la quantité de gazes échangé (O<sub>2</sub> dégagé ou CO<sub>2</sub> absorbé) par unité de matière végétale et par unité de temps

$$\text{IP} = \text{ml d'O}_2 \text{ dégagé/ g de matières fraîches / heure}$$
$$\mu\text{mole d'O}_2 \text{ dégagé/ Kg de M.F./ jour}$$

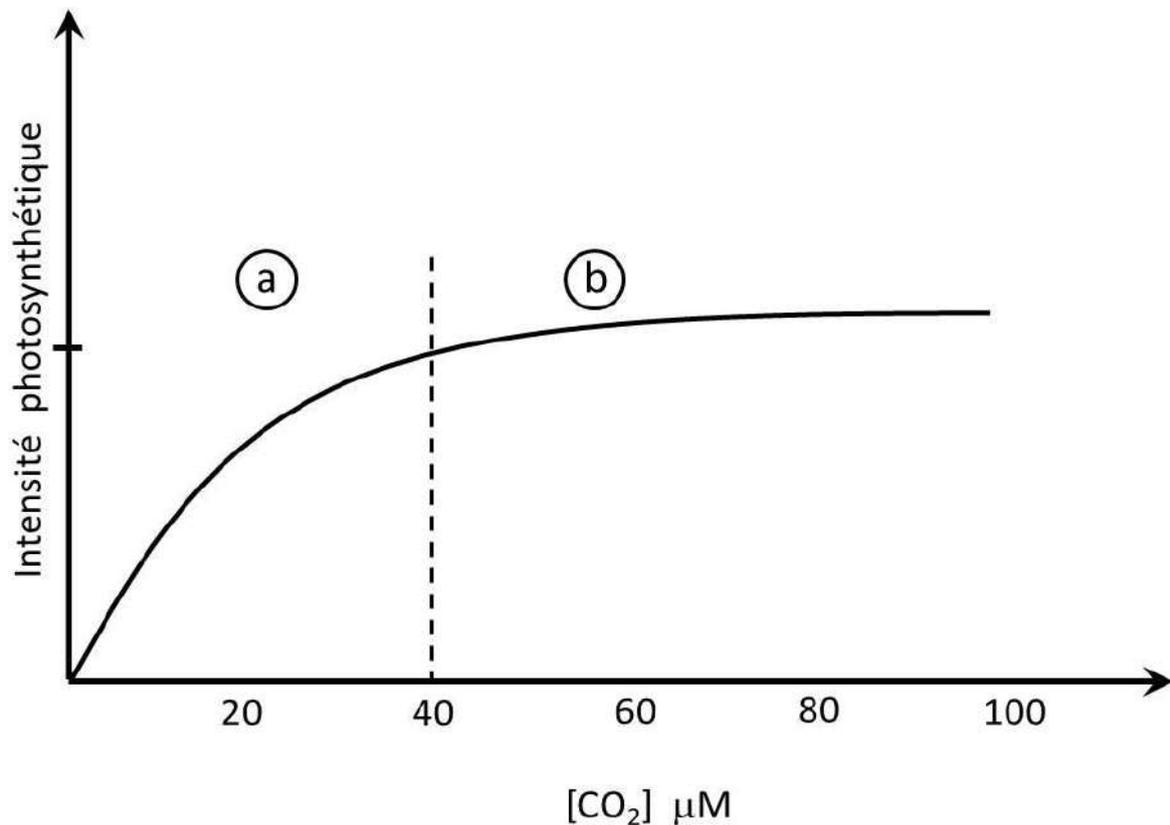
**Séance 5 du cours de physiologie végétale**  
**Photosynthèse**  
Svi S4  
2020-2021

### **13- Facteurs de régulation de la photosynthèse**

L'intensité photosynthétique est contrôlée par plusieurs facteurs : Température, éclairement, teneur de l'air en CO<sub>2</sub>, teneur en O<sub>2</sub>, l'état hydrique de la plante etc. et par d'autres facteurs liés au stade de développement de la plante.

#### **1-Effet de la concentration de CO<sub>2</sub>**

Une étude est faite sur une suspension de petites algues vertes, les chlorelles. On a mesuré l'intensité photosynthétique en fonction de la teneur du milieu en CO<sub>2</sub>. On obtient une courbe d'allure hyperbolique



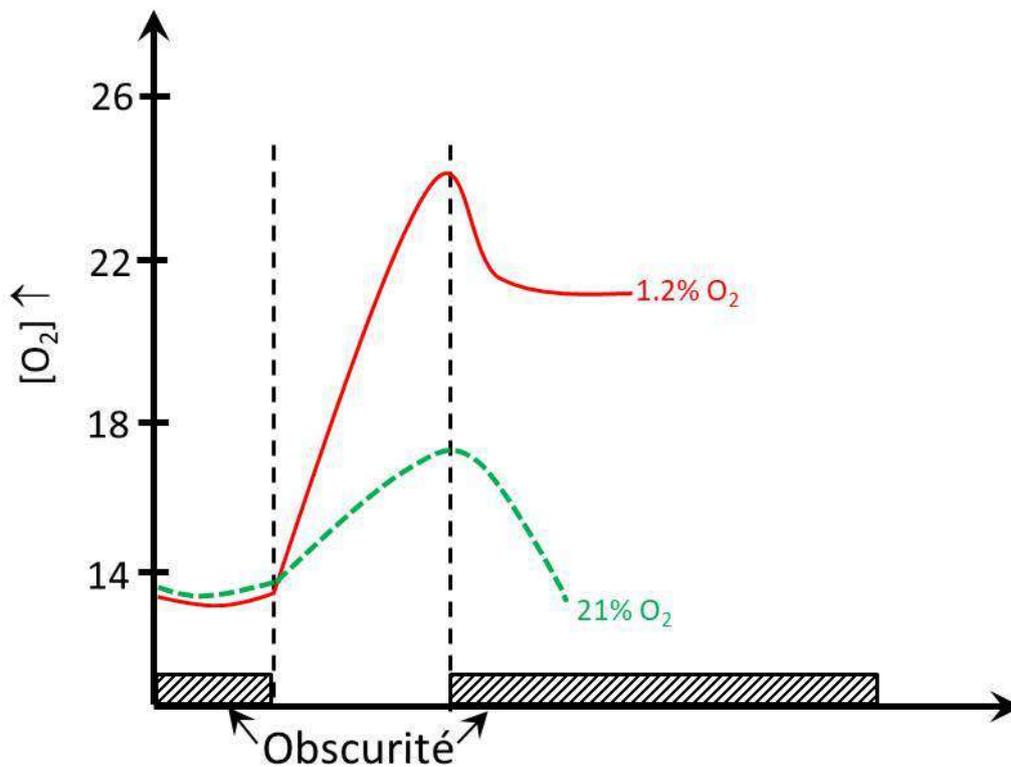
Effet de la concentration du CO<sub>2</sub> du milieu sur l'intensité photosynthétique d'une suspension de chlorelle

- Au faible [CO<sub>2</sub>] (a), l'IP est étroitement dépendante de la quantité de CO<sub>2</sub>: Chaque fois qu'on augmente la concentration de CO<sub>2</sub> l'intensité photosynthétique augmente aussi.
- Au-dessus d'un certain seuil, l'IP devient pratiquement indépendante de la [CO<sub>2</sub>] du milieu(b).

## 2- Effet de la concentration de l'oxygène dans le milieu

Une expérience est réalisée sur une suspension de chloroplaste d'Épinard placée à la lumière.

On suit le dégagement d' $O_2$  pendant une période de temps (Lumière et obscurité) en fonction de deux concentrations d' $O_2$  du milieu.



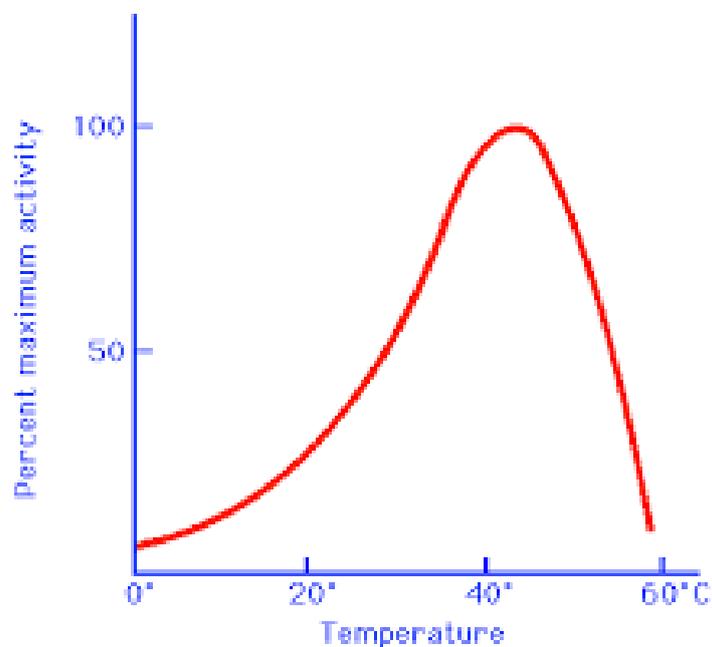
Effet de la concentration de l'oxygène du milieu sur le dégagement de l'oxygène photosynthétique

On remarque que lorsqu'on augmente l'oxygène du milieu (de 1.2% à 21 %) l'activité photosynthétique diminue.

De même en analysant le tableau ci-dessous on remarque que lorsqu'on augmente le pourcentage de l'oxygène du milieu la photosynthèse nette diminue aussi pour la plus part des espèces étudiées.

| Espèce                 | Photosynthèse nette (mg CO <sub>2</sub> / dm <sup>2</sup> /h) |                     |
|------------------------|---|---------------------|
|                        | 21% d'O <sub>2</sub>  | 2% d'O <sub>2</sub> |
| <b>Orge</b>            | <b>28</b>   | <b>40</b>           |
| <b>Blé</b>             | <b>17</b>   | <b>23</b>           |
| <b>Tournesol</b>       | <b>37</b>   | <b>53</b>           |
| <b>Tabac</b>           | <b>17</b>   | <b>24</b>           |
| <b>Betterave rouge</b> | <b>25</b>   | <b>35</b>           |
| <b>Maïs</b>            | <b>49</b>   | <b>52</b>           |
| <b>Canne à sucre</b>   | <b>52</b>   | <b>52</b>           |

### 3- Effet de la température :



Effet de la température sur l'activité photosynthétique

Comme pour toutes activités métaboliques, il y'a d'abord un effet positif de la température sur l'intensité photosynthétique jusqu'à 30-40°C au-delà de cette intervalle, il se produit une diminution et une annulation totale vers (45°C à 60°). Mais ces limites sont très variables suivant les différentes espèces. Par exemple les lichens arctiques peuvent photosynthétiser à -18° C avec un optimum à 0°C, alors qu'on peut trouver des bactéries qui peuvent réaliser la photosynthèse à 70°C. Les végétaux supérieurs peuvent atteindre un optimum entre un intervalle de 10-20 °C pour les plantes d'ombre, et entre 20-30 °C pour les plantes C3 et entre 30-40° C pour les plantes C 4.

# Séance 6 du cours de physiologie végétale

## Photosynthèse

Svi S4

2020-2021

### 4- Effet de l'éclairement :

L'éclairement : Puissance lumineuse reçue par unité de surface

Il s'exprime en Watts/ m<sup>2</sup> (w/ m<sup>2</sup>)

Erg / cm<sup>2</sup> / s = Erg.cm/s

( 1W = 4.5 ergs)

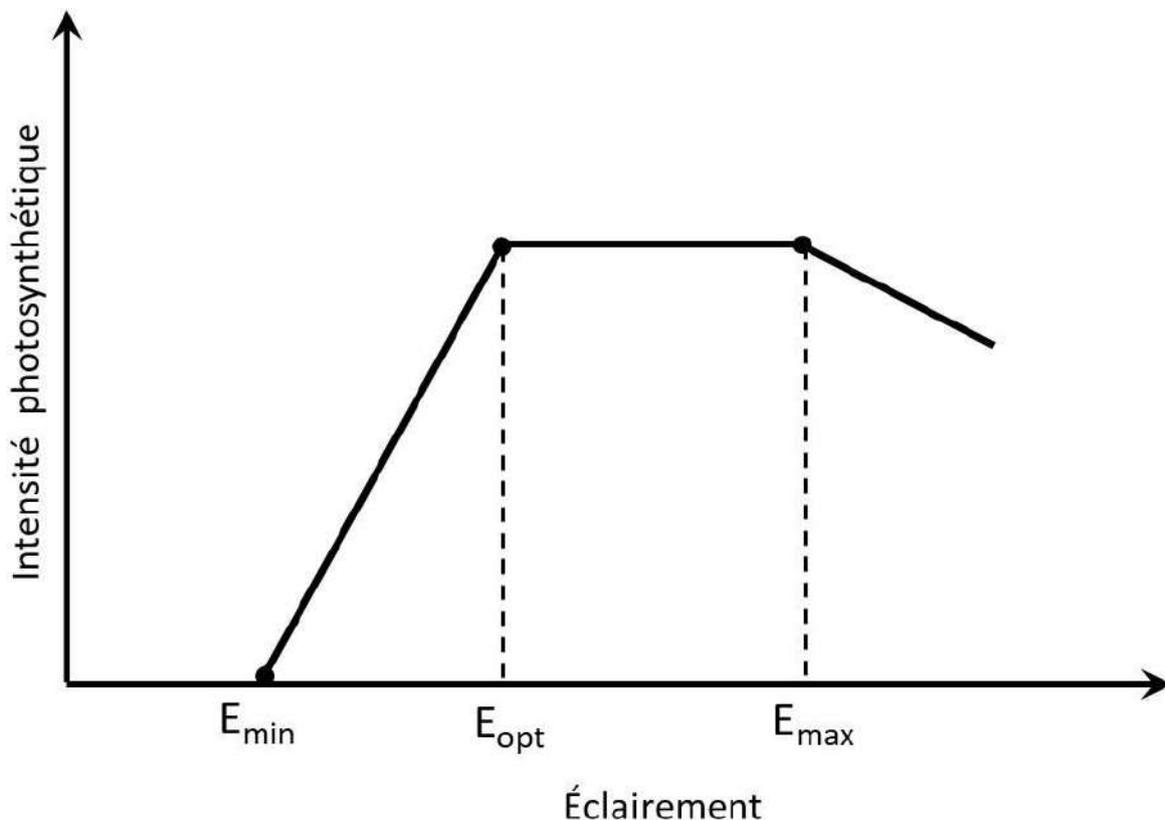
Il s'exprime aussi en lux. et en plusieurs autres unités.

Si on suppose que 1 cm de surface reçoit le long du jour 400 à 700 calories de l'énergie lumineuse qui provient du soleil, (cette quantité dépend des conditions chimiques de la zone et de la période de l'année). De cette quantité une feuille peut absorber 85% selon sa structure, et le reste est transmis aux feuilles inférieures ou peut être réfléchi. De la quantité totale de l'énergie absorbée par une feuille un peu près 95% se perdent sous forme de chaleur. Ainsi, dans le cas le plus favorable la feuille utilise 5% de cette énergie dans la photosynthèse.

- Dans des expériences où on a placé une plante donnée dans les conditions de température et de  $\text{CO}_2$  convenable, l'intensité photosynthétique augmente avec l'éclairement jusqu'à une valeur  $E_{\text{opt}}$  (éclairement optimal) et il diminue ensuite à un éclairement supérieur  $E_{\text{max}}$  (éclairement maximal).

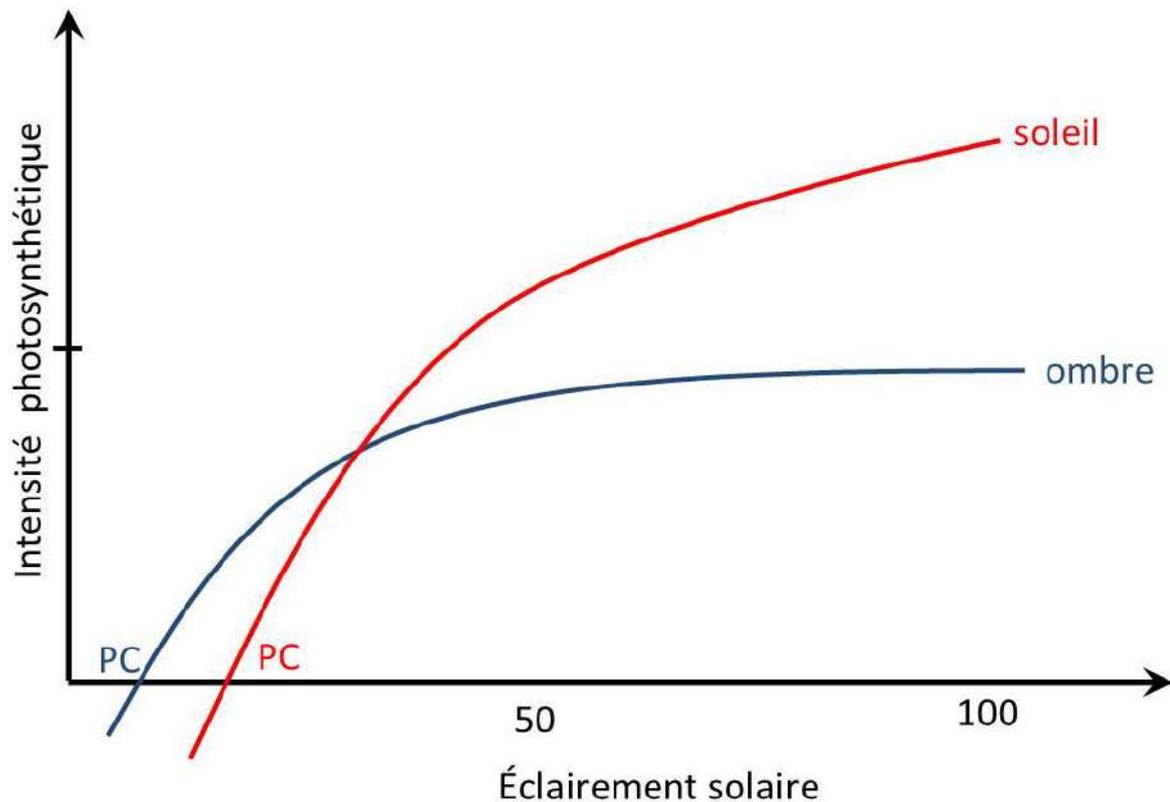
La lumière intense peut augmenter la transpiration ce qui provoque la fermeture des stomates et par conséquent la diminution de la photosynthèse.

Les valeurs de  $E_{\text{min}}$  (éclairement minimal), de  $E_{\text{opt}}$  et  $E_{\text{max}}$  varient selon les espèces végétales.



Variation de l'intensité photosynthétique en fonction de l'éclairement

On distingue deux types de plantes selon leur comportement vis à vis de la lumière : Plantes d'ombres (sciaphiles) exemple fougère, Mousse, etc ..et des plantes de soleil (héliophiles) exemple les épinards, tomates, etc.... Les plantes d'ombre possèdent un taux de photosynthèse très bas même avec une illumination intense, alors que les plantes de soleil augmentent leur intensité photosynthétique au fur et à mesure qu'on augmente l'intensité lumineuse. La distinction entre une plante d'ombre et une plante de soleil se traduit par une différence anatomique et aussi métabolique. Les feuilles d'ombre possèdent une surface foliaire plus grande, plus de chlorophylle par unité de poids que les feuilles exposées au soleil mais leur capacité photosynthétique est faible par rapport aux feuilles de soleil.



Intensité photosynthétique des plantes d'ombres et de soleil en fonction de l'éclairement solaire

## Effet de la photopériode

La photosynthèse est directement proportionnelle à la durée du jour. Aux jours longs elle est plus importante qu'aux jours courts puisque la plante reçoit un nombre d'heures de lumière plus élevé ceci se reflète sur la croissance de la plante qui va être aussi importante. Donc, le rendement photosynthétique est étroitement lié à la photopériode (Alternance de l'éclairement et de l'obscurité au cours de cycle nyctéméral ou cycle photopériodique (24h)). Ceci permet de

classifier les plantes en plantes de jours courts ou plantes nyctipériodiques qui ne fleurissent qu'en jours courts( riz, soja...) et des plantes de jours longs ou plantes héméropériodiques(blé, pomme de terre..), dont la floraison est plus rapide en jours longs, et des plantes indifférentes de la durée de jour et de nuit( quelques mauvaise herbes...). La photopériode peut être maîtrisée expérimentalement en serre. En contrôlant la durée des heures de la lumière on augmente l'activité photosynthétique et aussi la croissance de la plante et le rendement de la récolte.

## **6- L'eau :**

Le phénomène de la photosynthèse ne nécessite pas un grand apport d'eau. Pourtant on observe une diminution importante de la photosynthèse dans des sols pauvrement hydratés. Ceci est dû à des effets indirects que provoque le manque d'eau comme par exemple une diminution de l'hydratation du protoplasme (cytoplasme et noyau) qui affecte sa structure et de cette manière il influe sur le processus métabolique de la photosynthèse, aussi l'influence des enzymes qui interviennent dans la photosynthèse est très liée à l'hydratation du protoplasme. Mais le facteur principal de la diminution de la vitesse de photosynthèse par le déficit hydrique c'est la fermeture des stomates (pour éviter la transpiration et déshydratation de la plante) qui fait diminuer et même annuler pratiquement l'absorption du CO<sub>2</sub>.

## **7- Transport des hydrates de carbonnes :**

La vitesse de déplacement des hydrates de carbonnes peut être un mécanisme de contrôle interne de la photosynthèse. On a pu vérifier ceci en éliminant un des organes récepteurs par exemple fruits, tubercules, etc. On a détecté après quelques jours une inhibition de l'activité photosynthétique des feuilles proches des organes éliminés.

# Suite de la séance 6 du cours de la photosynthèse

SVI S4

2020-2021

## 8- Influence des nutriments minéraux :

Un déficit de nutriments minéraux affecte la photosynthèse, puisque l'un des premiers symptômes de carence de n'importe quel élément minéral est en général la perte de la chlorophylle (chlorose) et une altération de la structure des chloroplastes.

Un déficit en azote entraîne une diminution du taux d'assimilation du CO<sub>2</sub>

Des feuilles situées dans une atmosphère avec 2% d'N fixent le CO<sub>2</sub> à raison de 8.5 mg/dm<sup>2</sup> /h

Des feuilles situées dans une atmosphère avec 5% d' N fixent le CO<sub>2</sub> à raison de 15 mg/dm<sup>2</sup> /h

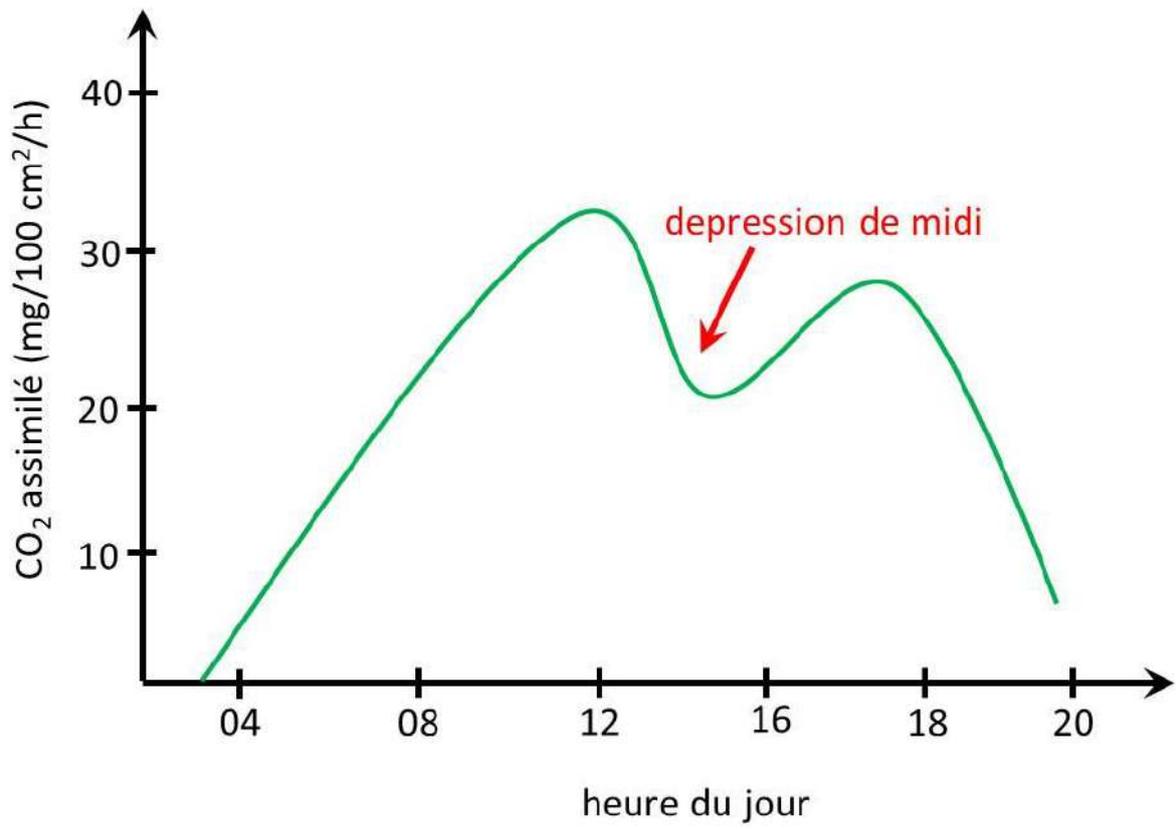
## **9- L'âge de la feuille**

La capacité de la photosynthèse d'une feuille augmente avec l'âge de la feuille jusqu'à ce qu'elle atteigne sa maturité, à partir de ce stade la photosynthèse commence à diminuer. Les feuilles âgées perdent leurs chlorophylles et par conséquent leur capacité photosynthétique.

## **10- Régulation stomatique**

L'ouverture des stomates intervient dans les échanges gazeux (photosynthèse et respiration) aussi dans la transpiration.

L'intensité photosynthétique augmente pendant les premières heures de la journée, diminue vers midi où les stomates se ferment (en général par augmentation de la température) pour éviter un excès de transpiration et augmente de nouveau à l'après midi pour diminuer ensuite le soir où les stomates se ferment par absence de la lumière.



# Bon courage



## LIENS UTILES 🙌

### Visiter :

1. <https://biologie-maroc.com>

- Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. <https://biologie-maroc.com/shop/>

- Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
- Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
- Trouver des bourses et des écoles privées

3. <https://biologie-maroc.com/emploi/>

- Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
- Trouver des offres d'emploi et de stage

