

Bio242 - Physiologie Végétale

1^{ère} partie

Nutrition et autotrophie 6 cours – Stéphane Ravanel

I/ Nutrition carbonée

1/ Feuilles, chloroplastes et photosynthèse

- a – structure de la feuille
- b – structure du chloroplaste
- c – les 2 phases de la photosynthèse

2/ Pigments photosynthétiques et absorption de la lumière

- a – rappels sur les propriétés physiques de la lumière
- b – les pigments photosynthétiques
- c – absorption de la lumière par les pigments photosynthétiques

3/ Réactions photochimiques

- a – fonctionnement de la chaîne de transfert d'électrons
- b – photophosphorylation
- c – transfert cyclique d'électrons

4 / Assimilation du carbone

- a – cycle de Calvin
- b – synthèse de l'amidon et du saccharose

5/ Photosynthèse et photorespiration chez les plantes en C3

- a – activité oxygénase de la Rubisco
- b – la photorespiration

6/ Métabolisme photosynthétique des plantes en C4 et CAM

- a – photosynthèse en C4
- b – photosynthèse CAM

7/ Facteurs influençant la photosynthèse au niveau de la plante

- a – influence de la lumière
- b – influence de la concentration en CO₂
- c – influence de la température et des autres facteurs

II/ Absorption et transport de l'eau

1/ L'eau et les cellules végétales

- a – rôle de l'eau
- b – propriétés de l'eau
- c – mécanismes de transport de l'eau
- d – potentiel hydrique

2/ Relations hydriques dans la plante entière

- a – l'eau dans le sol
- b – absorption racinaire de l'eau
- c – transport de l'eau dans le xylème
- d – transpiration

3/ Adaptation des plantes au déficit hydrique

- a – réponses physiologiques
- b – adaptations évolutives

III/ Nutrition minérale

1/ Besoins en éléments minéraux des végétaux

- a – mise en évidence des besoins
- b – éléments nutritifs essentiels

2/ Interactions symbiotiques racines microorganismes

- a – les minéraux dans le sol
- b – interactions racines microorganismes

3/ Absorption racinaire des minéraux

- a – mécanismes de transport des ions
- b – transport des ions dans la racine

4/ Assimilation de l'azote

- a – cycle de l'azote
- b – absorption et réduction du nitrate et de l'ammonium
- c – assimilation de l'azote : cycle GS/GOGAT
- d – fixation symbiotique de l'azote atmosphérique

5/ Assimilation du sulfate et du fer

- a – assimilation du soufre
- b – assimilation du fer

IV/ Transport, distribution et utilisation des photoassimilats

1/ Relations sources - puits

- a – les organes sources – puits et la circulation des sèves
- b – structure du tissu phloémien

2/ Mécanismes de transport dans le phloème

- a – chargement du phloème
- b – déchargement du phloème

3/ Distribution des photoassimilats entre les puits

4/ Récupération de l'énergie des photoassimilats

- a – dégradation du saccharose et de l'amidon
- b – rappels sur le métabolisme énergétique
- c – propriétés spécifiques des mitochondries végétales

2^{ème} partie

Croissance et développement 3 cours – Gabrielle Tichtinsky

I/ Graines et germination

II/ Développement végétatif

III/ Développement reproducteur

IV/ Régulateurs du développement

Bio242

Physiologie végétale



Stéphane RAVANEL (UJF ; sravanel@cea.fr)
Laboratoire de Physiologie Cellulaire Végétale (CEA-Grenoble)

Ouvrages utilisés et recommandés***

- ✓ Campbell, Reece: *Biologie*, 7ème Edition (Pearson Education)
- ✓ Hopkins: *Physiologie végétale*, 2ème Edition (de Boeck)
- ✓ Taiz, Zeiger: *Plant physiology*, 4th edition (Sinauer)
- ✓ Buchanan et al.: *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*, (ASPB Publications)



Bio242 - Physiologie végétale

Bio242
S. Ravanel

Étude des grandes fonctions des plantes

- organisation et fonctionnement des organes et tissus
- nature des processus physiques et chimiques impliqués
- relations avec l'environnement

1ère partie - Nutrition et autotrophie (6 cours – S. Ravanel)

- I/ Nutrition carbonée
- II/ Absorption et transport de l'eau
- III/ Nutrition minérale
- IV/ Transport, distribution et utilisation des photoassimilats

2ème partie - Croissance et développement (3 cours – G. Tichtinsky)

- I/ Graines et germination
- II/ Développement végétatif
- III/ Développement reproducteur
- IV/ Régulateurs du développement

• 4 séances de TD

• 3 séances de TP de 3h (fiches d'évaluations = CC PhyV = 50% CC Bio242)

Caractéristiques du règne végétal : au niveau de l'organisme

Autotrophie : capacité à synthétiser des molécules organiques complexes à partir de composés inorganiques et de l'énergie lumineuse solaire

CO₂, H₂O, O₂, minéraux



Glucides (amidon)
Triglycérides
Acides aminés
Vitamines
Métabolites secondaires (alcaloïdes...)

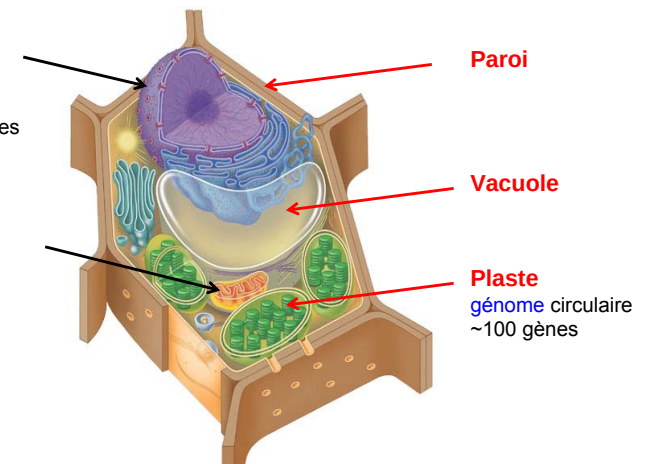
Capacité d'adaptation à l'environnement et à ses changements

- ✓ **Adaptations** biochimiques et morphologiques en fonction de la température, la disponibilité en eau... → **conditions adverses** et **stress abiotiques**
- ✓ **Lutte** contre les agressions d'agents pathogènes (virus, champignons...) → **stress biotiques**
- ✓ **Associations** (symbioses) et **interactions bénéfiques** avec les microorganismes du sol

Caractéristiques du règne végétal : au niveau cellulaire

Noyau
génomé organisé en chromosomes
25.000 - 40.000 gènes

Mitochondrie
génomé circulaire
~50 gènes

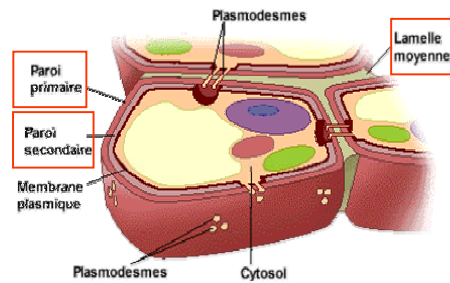


→ 3 systèmes génétiques indépendants dont l'expression doit être coordonnée

La paroi pecto-cellulosique

Rôles essentiels dans le **soutien**, la **protection** et le **contrôle du statut hydrique** des cellules.

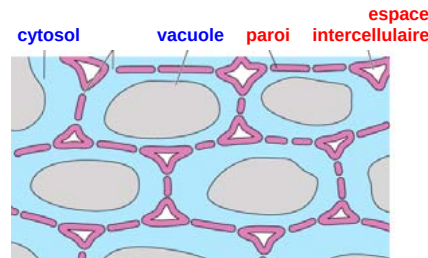
Compartment dynamique de la cellule végétale.



Plasmodesmes : perforations permettant de relier le cytoplasme de cellules adjacentes

Symplasme : réseau cytoplasmique continu entre les cellules

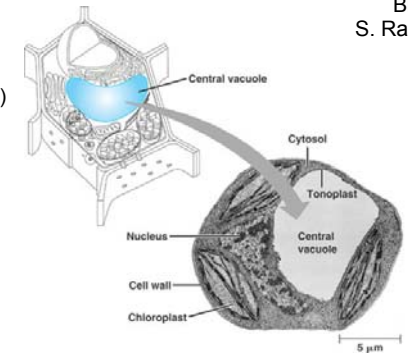
Apoplasme : réseau extracellulaire continu, non cytoplasmique, constitué des parois, des espaces intercellulaires et des cellules mortes



La vacuole

Rôles essentiels dans :

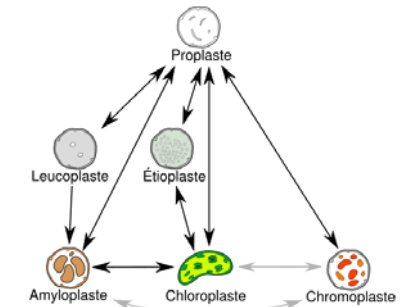
- ✓ la **croissance cellulaire** (pression de turgescence)
- ✓ le **contrôle du statut hydrique et de l'homéostasie cellulaire** (réservoir d'eau, d'ions, de molécules organiques)
- ✓ la **dégradation** et le **recyclage** de composés cellulaires (protéines...)
- ✓ la **protection** des cellules (détoxification des xénobiotiques)



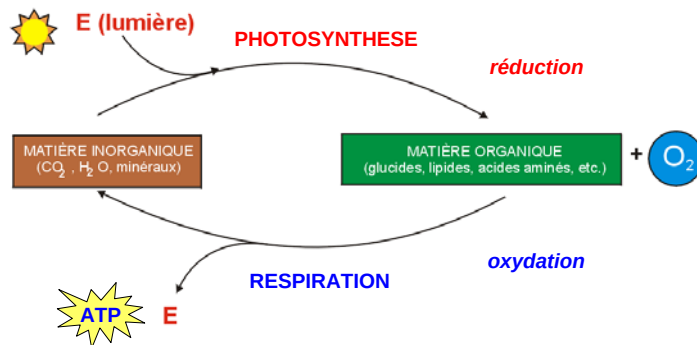
Les plastes

Rôles essentiels dans le métabolisme des plantes :

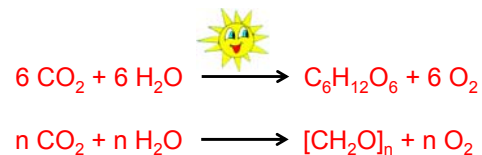
- ✓ la **photosynthèse**
- ✓ les **synthèses** des acides aminés, des bases puriques, de lipides, de vitamines...
- ✓ le **stockage** d'amidon, de lipides, de pigments



I - NUTRITION CARBONÉE



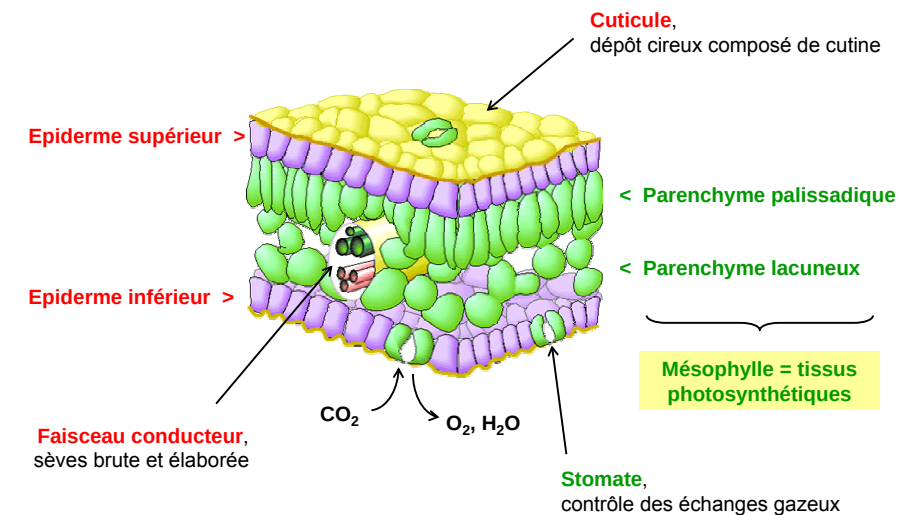
La **photosynthèse**, une **réduction photochimique** dont l'équation globale est :



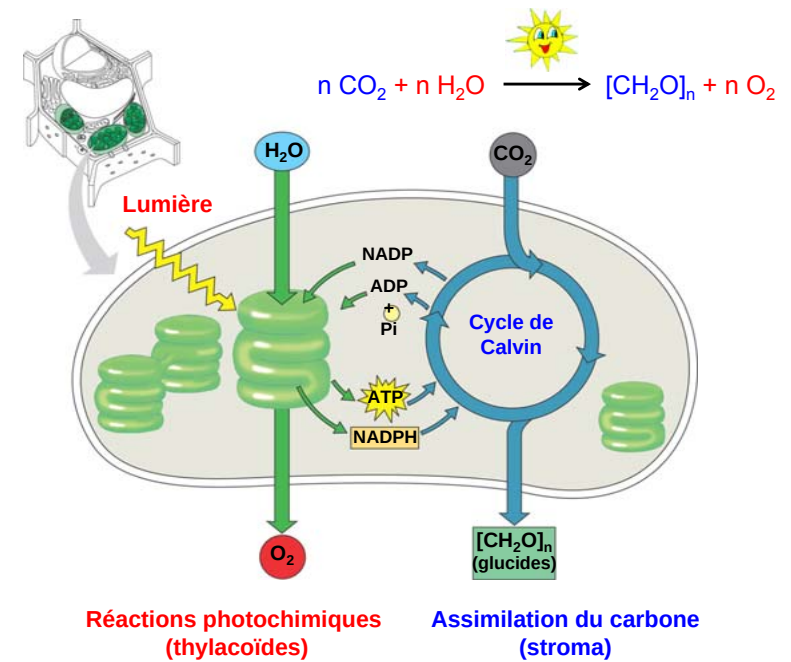
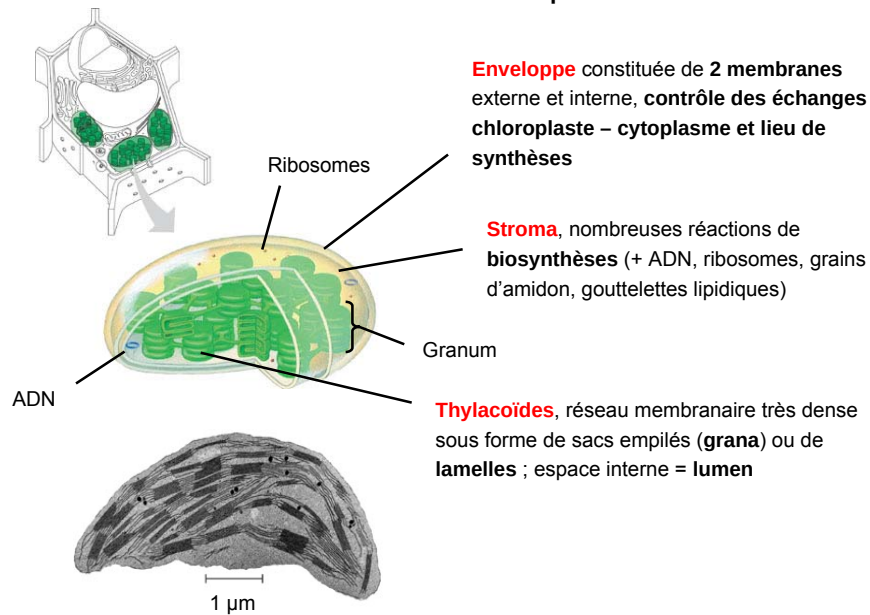
1/ Feuilles, chloroplastes et photosynthèse

A - Structure de la feuille

Éléments histologiques d'une feuille de Dicotylédones



B - Structure du chloroplaste

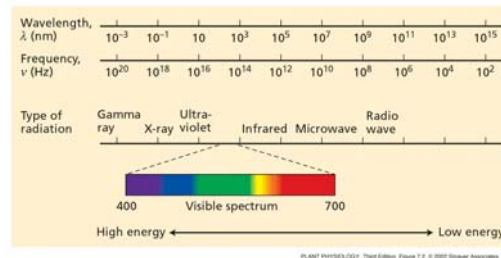
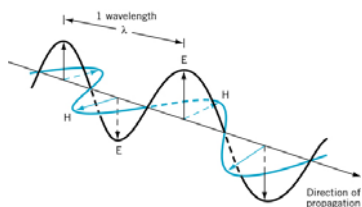


2/ Pigments photosynthétiques et absorption de la lumière

A - Propriétés physiques de la lumière

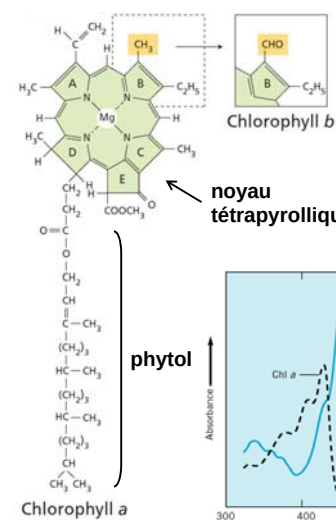
- ✓ **onde électromagnétique** de longueur λ , de fréquence ν , de vitesse $c = \lambda \cdot \nu$
- ✓ constituée de **photons** = entités élémentaires porteuses d'une **quantité d'énergie** appelée **quantum**
- ✓ l'**énergie** d'un photon vaut $E = h \cdot \nu$ (h , constante de Planck)

Les radiations actives pour la photosynthèse sont le bleu et le rouge
 $\rightarrow$ énergie photon bleu ($\sim 430 \text{ nm}$) > énergie photon rouge ($\sim 640 \text{ nm}$)

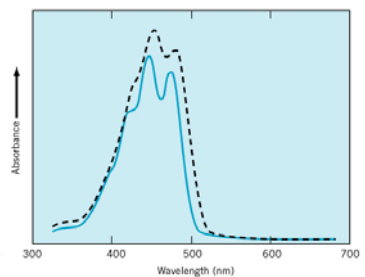
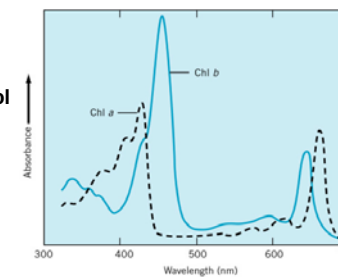
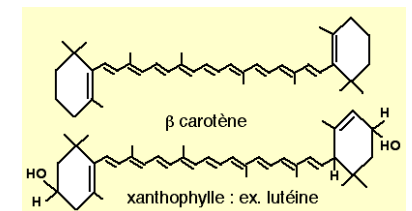


B - Les pigments photosynthétiques

Les chlorophylles



Les caroténoïdes



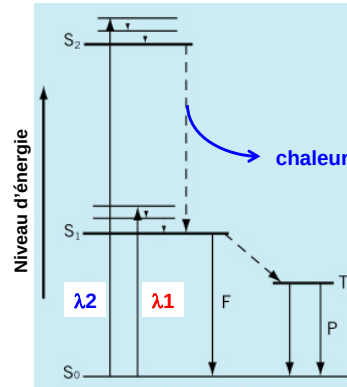
C - Absorption de la lumière par les pigments photosynthétiques

Concerne les e- des **double liaisons conjuguées**

Un pigment excité est appelé **exciton** ; durée de vie 10^{-9} s

1 - Excitation

- ✓ à l'obscurité, **état fondamental** S_0 , e- sur une orbitale de faible énergie
- ✓ absorption d'un **photon bleu** (énergie) → passage d'un e- sur une orbitale supérieure = état excité supérieur ou **état singulet S_2**
- ✓ absorption d'un **photon rouge** (énergie) → état excité inférieur ou **état singulet S_1**



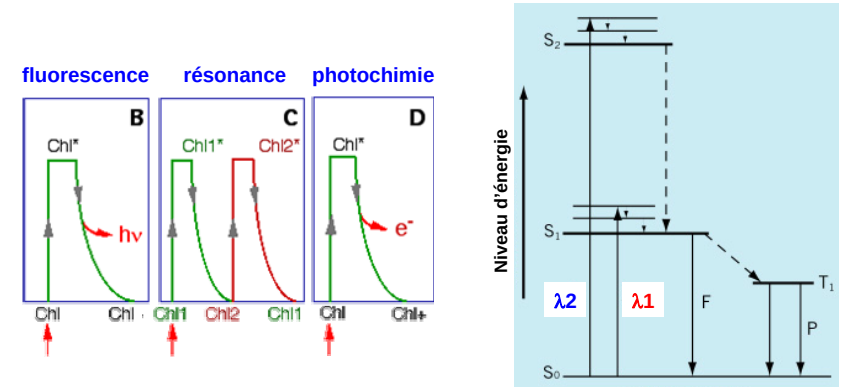
2 - Désexcitation

- ✓ état S_2 très instable → passage à l'état S_1 en émettant de la **chaleur**

→ pour la photosynthèse l'énergie des photons bleus et rouges est équivalente

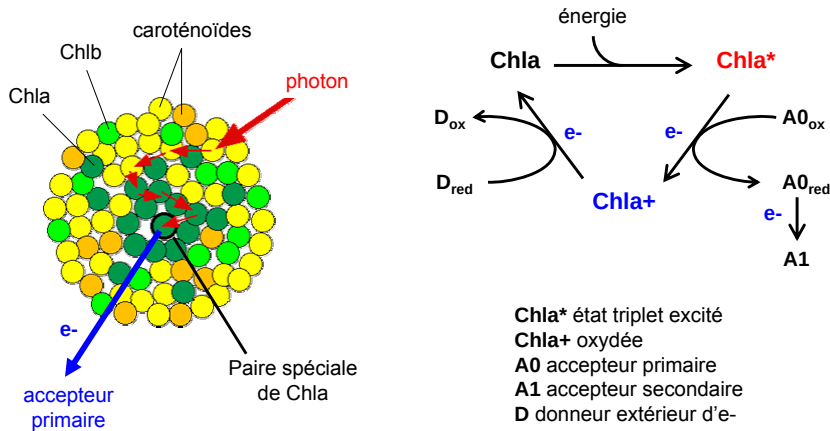
2 - Désexcitation : 3 possibilités de retour à l'état fondamental ($S_1 \rightarrow S_0$)

- ✓ émission de **fluorescence** (photon de plus faible énergie)
 - ✓ par **résonance** : transfert de l'énergie à une molécule de pigment proche
 - ✓ par **photochimie** : perte d'un e- à partir d'un **état triplet T_1** plus stable (10^{-3} s)
- Seules certaines molécules spécialisées sont capables de réaliser la réaction photochimique = **Chla des centres réactionnels**



Fonctionnement d'un centre réactionnel

- ✓ centres réactionnels localisés au cœur des **photosystèmes**
- ✓ les pigments (chlorophylles et caroténoïdes) forment une **antenne collectrice**
- ✓ l'énergie d'excitation est transmise par **résonance** jusqu'à la paire spécialisée de Chla
- ✓ **séparation de charge** et transfert d'e- sur l'accepteur primaire

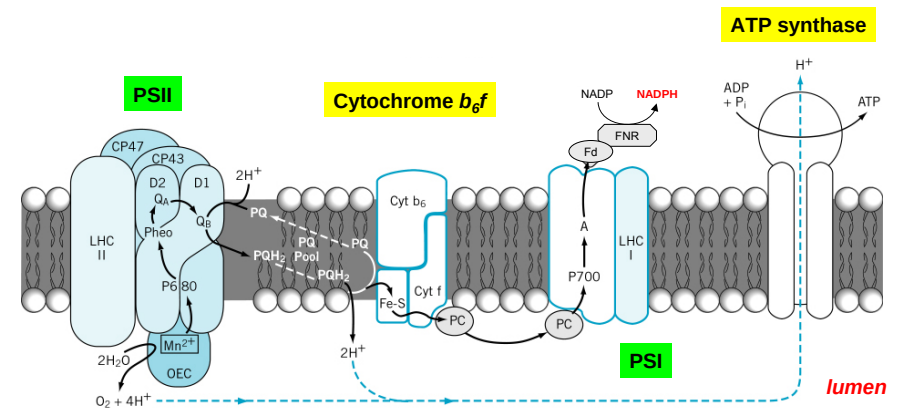


3/ Réactions photochimiques

A - Fonctionnement de la chaîne de transfert d'électrons

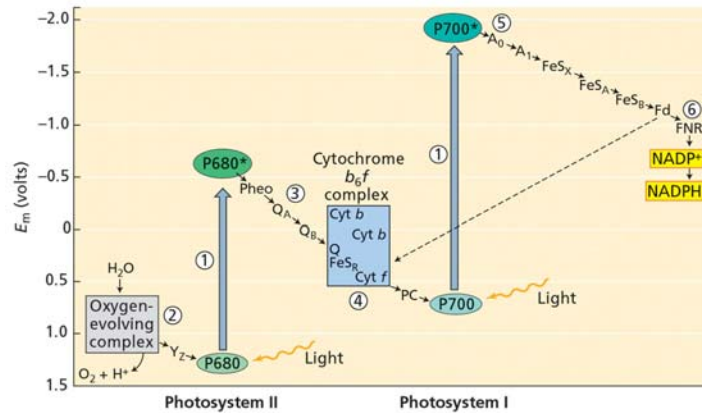
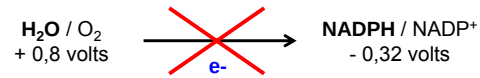
Transfert d'e- de $H_2O \rightarrow NADP^+$ et synthèse d'ATP

Représentation vectorielle de la membrane des thylacoïdes :



Représentation thermodynamique : le schéma en Z

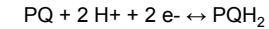
Loi thermodynamique : transfert d'e⁻ suivant le sens croissant de potentiel redox (E'₀)



Photosystème II

- ✓ **antennes** = Light Harvesting Complex II (LHCII) + complexes Chl-protéines (CP)
- ✓ **cœur** = protéines D1/D2 + **centre réactionnel P680**
- ✓ **complexe d'oxydation de l'eau** (OEC, *oxygen evolving complex*)
→ **dégagement d'O₂ et libération de H⁺ dans le lumen**

Plastoquinones : transporteurs mobiles de H⁺ et e⁻ entre PSII et cyt b₆f



→ **pompage de H⁺ du stroma vers le lumen**

Cytochrome b₆f : formé de 3 protéines majeures; fonctionnement complexe

Plastocyanine (PC) : protéine à cuivre ; **transporteur mobile d'e⁻** entre cyt b₆f et PSI

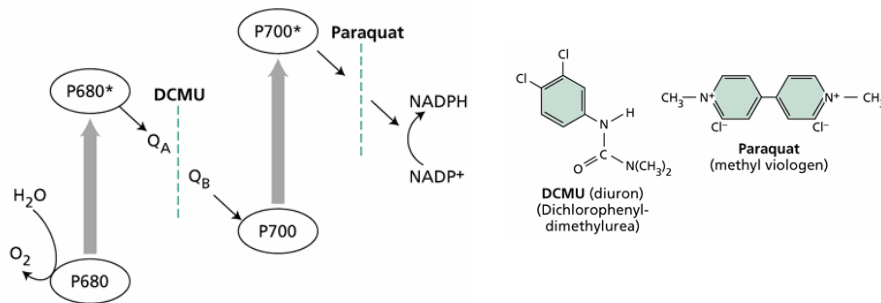
Photosystème I

- ✓ **antennes** = Light Harvesting Complex I (LHCI)
- ✓ **cœur** = protéines PsaA/PsaB + **centre réactionnel P700**

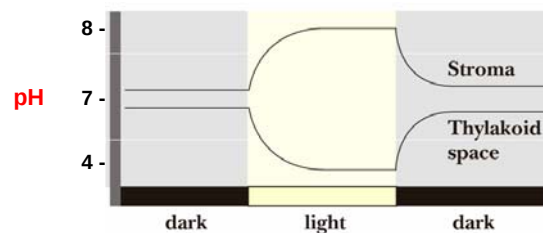
Ferrédoxine (Fd) et **Ferrédoxine-NADP réductase (FNR)** : protéines solubles du stroma

→ **réduction du NADP⁺** avec les e⁻ provenant du PSI

Inhibiteurs de la chaîne de transfert d'e⁻ des thylacoïdes = molécules herbicides



B - Photophosphorylation

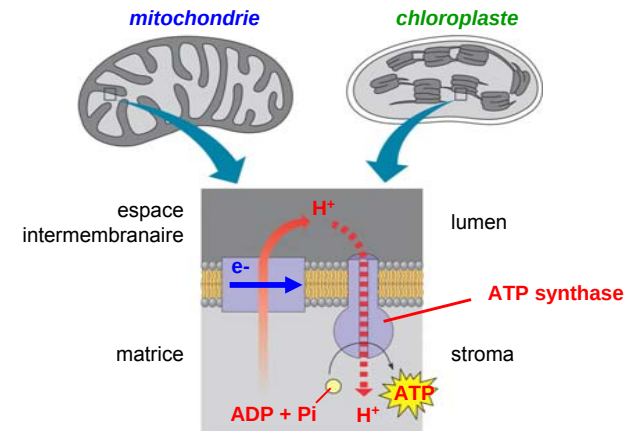


Théorie chimio-osmotique de Mitchell

Transfert d'e⁻ dans le plan de la membrane **couplé à un transfert de H⁺** à travers la membrane

→ création d'une **force proton-motrice** : ΔpH et ΔE (charge électrique)

→ l'**ATP synthase** utilise la force proton-motrice pour phosphoryler **ADP + Pi → ATP**

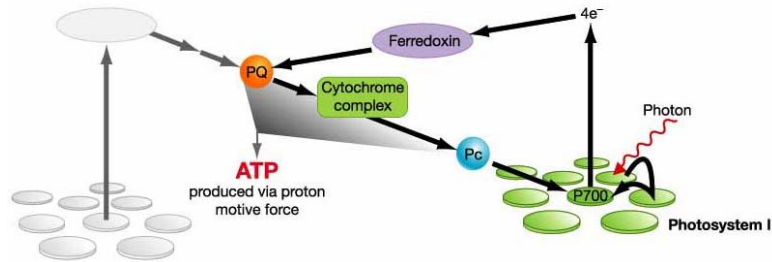


C - Transfert cyclique des électrons

✓ Transfert des e⁻ de ferrédoxine → cytochrome b₆f
→ pas de production de NADPH

✓ Intervention du cycle des plastoquinones → création d'un gradient de H⁺
→ **synthèse d'ATP** (photophosphorylation cyclique)

→ le transfert cyclique peut approvisionner la cellule en ATP en cas de faible activité respiratoire des mitochondries

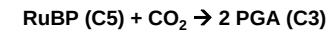


4/ Assimilation du carbone

A - Cycle de Calvin (cycle BBC Benson Basham Calvin)

- ✓ dans le **stroma** des chloroplastes
- ✓ **assimilation du CO₂** et **production de trioses P**
- ✓ 13 réactions regroupées en 3 étapes

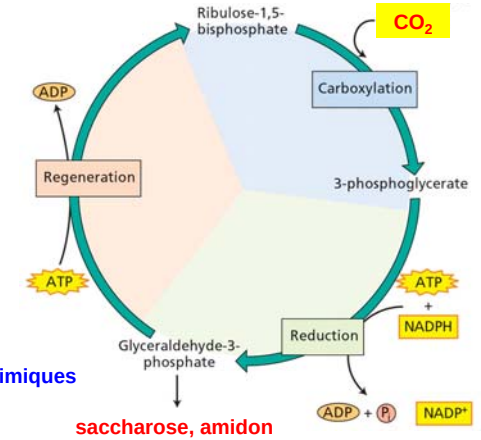
1/ Carboxylation :



2/ Réduction : PGA → G3P (triose P)

3/ Régénération : G3P → RuBP

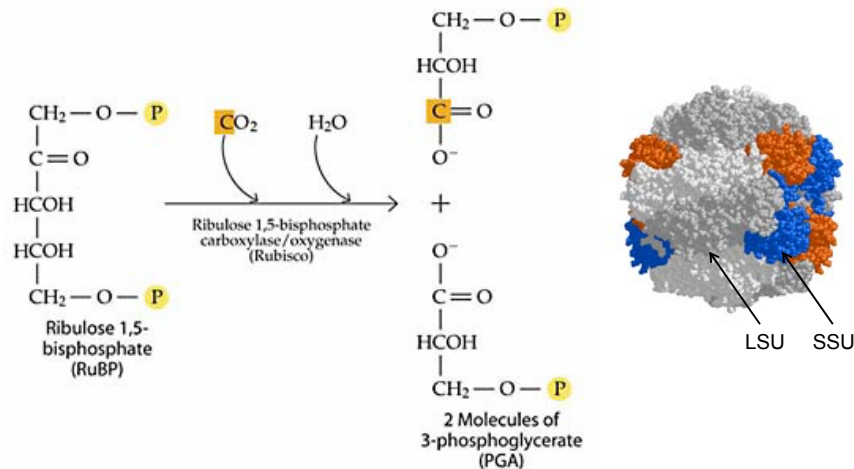
→ Utilisation du NADPH et de l'ATP produits au cours des réactions photochimiques



Carboxylation

Rubisco = Ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase

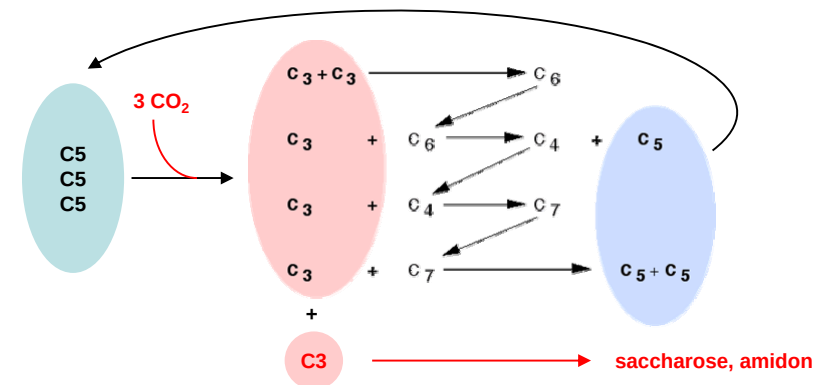
✓ activité de **carboxylation** et d'**oxygénation** du RuBP



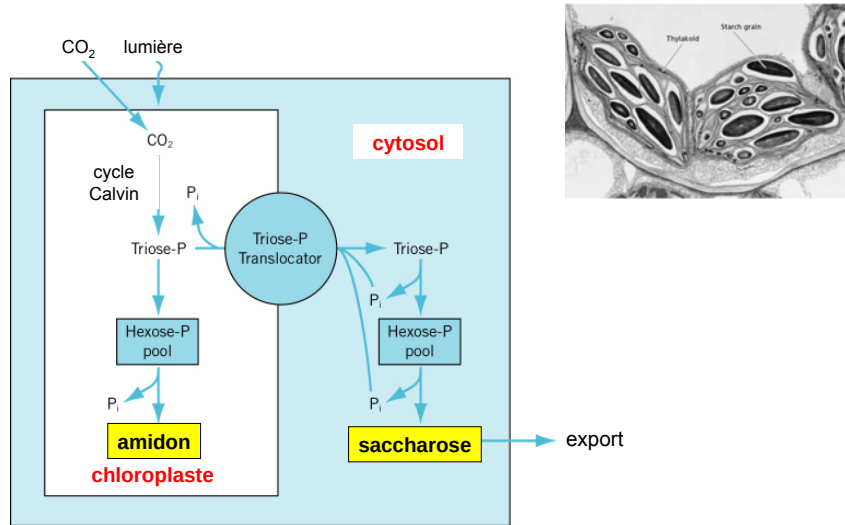
Régénération du RuBP et production nette de trioses P

- ✓ carboxylation de 3 RuBP + 3 CO₂ → 6 trioses P
- ✓ 5 trioses P utilisés pour régénérer 3 RuBP
- ✓ **gain net = 1 triose P** → synthèse de saccharose ou d'amidon

Bilan cycle Calvin : la production d'un hexose consomme 6 CO₂, 18 ATP et 12 NADPH

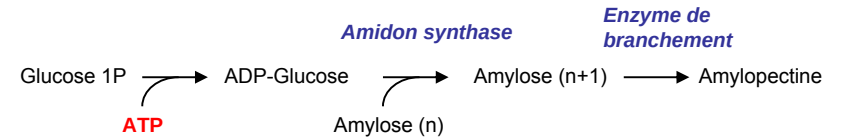


B - Synthèse de l'amidon et du saccharose



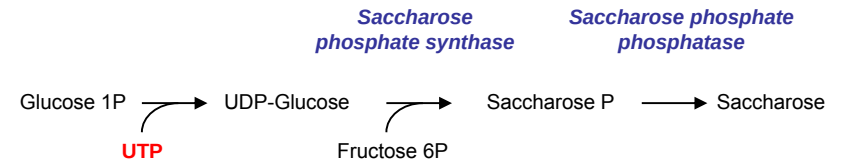
Synthèse de l'amidon

- ✓ Amidon = polymères de glucose de 2 types
 - amylose**, chaînes linéaires de >1.000 Glc
 - amylopectine**, chaîne ramifiée de >10.000 Glc
- ✓ Voie de synthèse consommatrice d'**ATP**



Synthèse du saccharose

- ✓ Saccharose = disaccharide formé de **glucose** et **fructose**
- ✓ Voie de synthèse consommatrice d'**UTP**

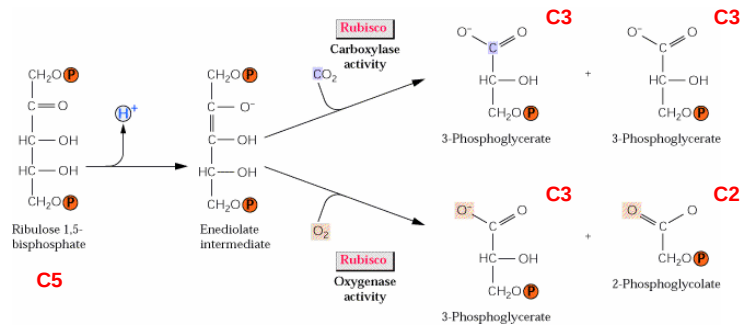


5/ Photosynthèse et photorespiration chez les plantes en C3

Plantes en C3 : assimilation du CO_2 → composé à 3 carbones (3-phosphoglycérate)

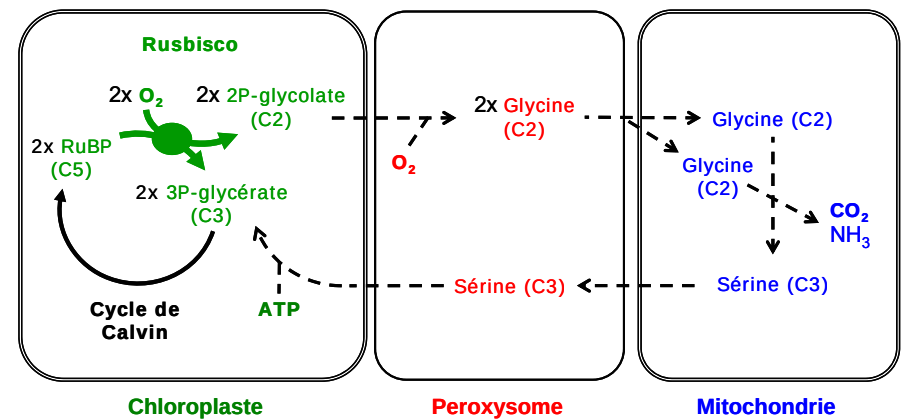
A - Activité oxygénase de la Rubisco

- ✓ *in vitro* : carboxylation/oxygénation = 100
- ✓ atmosphère = 21% O_2 et 0,037% CO_2
 - *in vivo* : **carboxylation/oxygénation = 3**
 - **perte d'efficacité de la photosynthèse**



B - La photorespiration (cycle C2 du glycolate)

- ✓ permet de **recupérer 75% du carbone présent dans le 2P-glycolate** produit par l'activité oxygénase de la Rubisco (sans photorespiration, perte de 4C/10 ; avec photorespiration, perte de 1C/10)



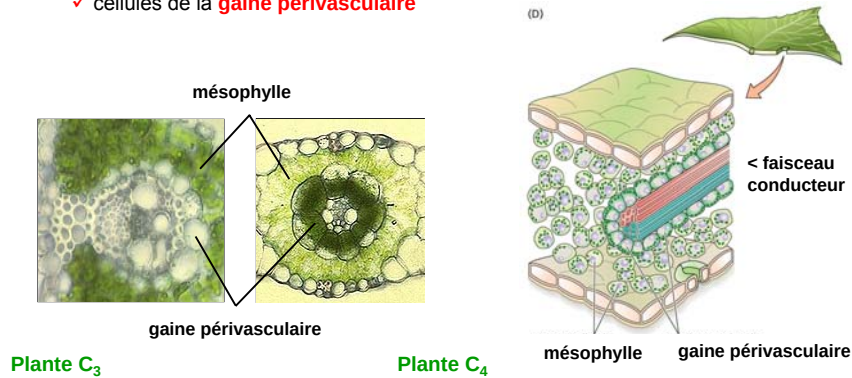
6/ Métabolisme photosynthétique des plantes en C4 et CAM

A - Photosynthèse en C4

- ✓ plantes en C4 : **assimilation du CO₂ → synthèse d'un composé à 4 carbones**
- ✓ plantes tropicales adaptées aux climats tempérés : **maïs, sorgho, canne à sucre...**

Caractéristiques anatomiques = 2 types de cellules assimilatrices de CO₂

- ✓ cellules du **mésophylle**
- ✓ cellules de la **gaine périvasculaire**

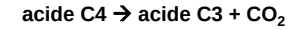


Métabolisme photosynthétique en C4

- ✓ pas de Rubisco dans les cellules du **mésophylle** → la **PEP carboxylase** assimile le CO₂



- ✓ acide C4 transporté vers les cellules de la **gaine** → **décarboxylation**

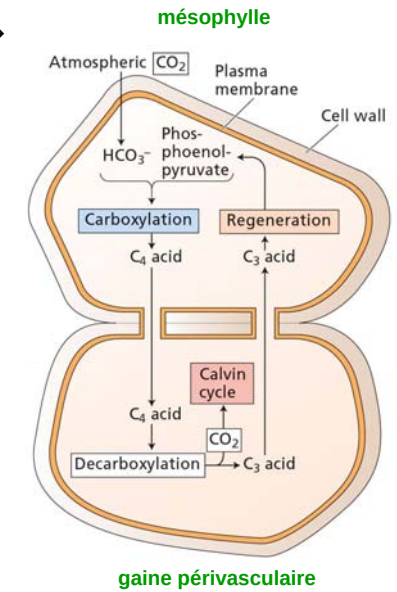


- ✓ CO₂ utilisé par la **Rubisco** dans les cellules de la **gaine** → cycle de Calvin

→ ce **métabolisme découplé dans l'espace** permet de **concentrer le CO₂ dans les cellules de la gaine**

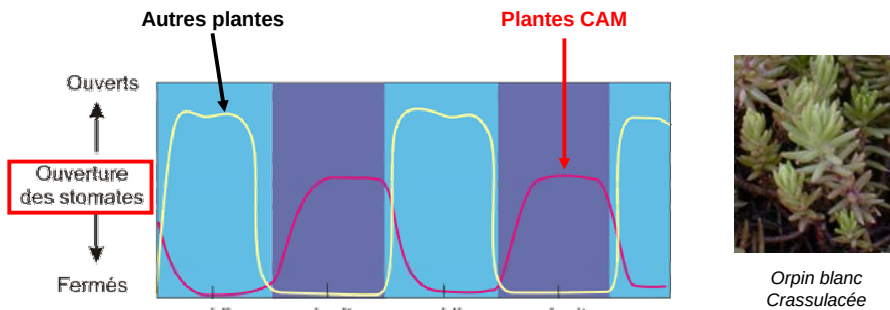
→ **très peu/pas de photorespiration** → **efficacité**

→ **Coût énergétique** : 30 ATP / hexose (18 pour les plantes C3)



B - Photosynthèse CAM (Crassulacean acid metabolism)

- ✓ **plantes adaptées aux climats arides secs** : Crassulacées, Cactacées...
- ✓ **plantes grasses ou succulentes** à feuilles généralement charnues qui stockent de l'eau dans les vacuoles pour faire face aux périodes de sécheresse
- ✓ cactus (>2.000 espèces), ananas, vanille...
- ✓ **survie** dans les climats arides secs assurée par une **fermeture des stomates le jour**
 - **limite les pertes d'eau** par transpiration
 - **empêche l'entrée de CO₂** pour la photosynthèse



Métabolisme photosynthétique CAM

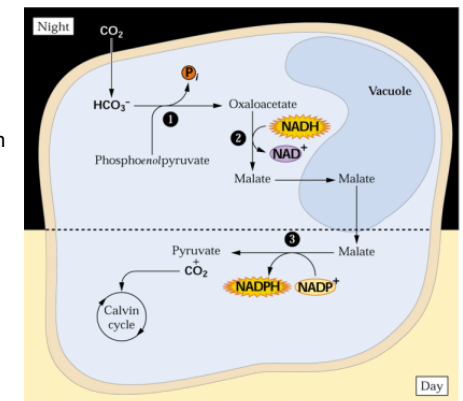
La nuit, stomates ouverts :

- ✓ **assimilation du CO₂** par la **PEP carboxylase**
- PEP (C3) + CO₂ → oxaloacétate → **acide malique (C4)**
- ✓ transport et **accumulation de l'acide malique dans la vacuole**
- ✓ en fin de nuit les feuilles sont légèrement acides (*Crassulacean acid metabolism*)

Le jour, stomates fermés :

- ✓ **l'acide malique sort de la vacuole et est décarboxylé**
- acide malique → C3 + CO₂
- ✓ CO₂ utilisé par la **Rubisco** → cycle de Calvin
- **synthèse d'amidon et de saccharose**

→ **le métabolisme photosynthétique CAM est découplé dans le temps**



7/ Facteurs influençant la photosynthèse au niveau de la plante

La photosynthèse est influencée par divers **facteurs environnementaux** :

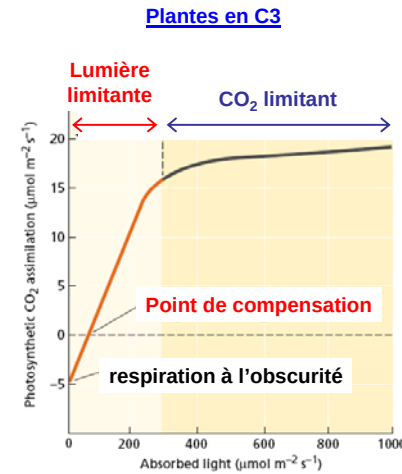
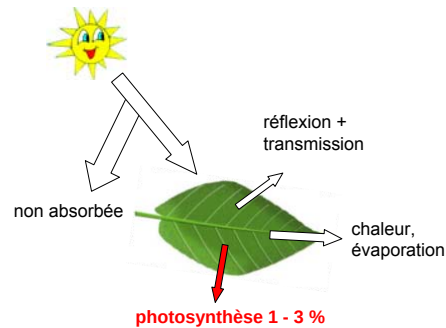
- ✓ la **lumière** (source d'énergie)
- ✓ le **CO₂** (source de carbone)
- ✓ la **température**, le **statut hydrique et minéral** de la plante...

A - Influence de la lumière

Aspect qualitatif : radiations photosynthétiques actives (PAR) → 400-700 nm

Aspect quantitatif :

- ✓ 1 à 3 % de la lumière solaire est utilisée par la photosynthèse
- ✓ influence de l'habitat

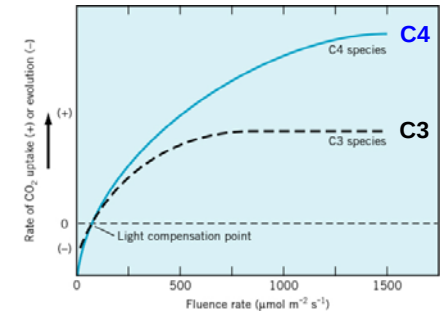


Point de compensation pour la lumière → les échanges nets de CO₂ de la plante sont nuls (intensité photosynthèse = intensité respiration)

Plantes en C4

Concentration du CO₂ dans les cellules de la gaine périvasculaire

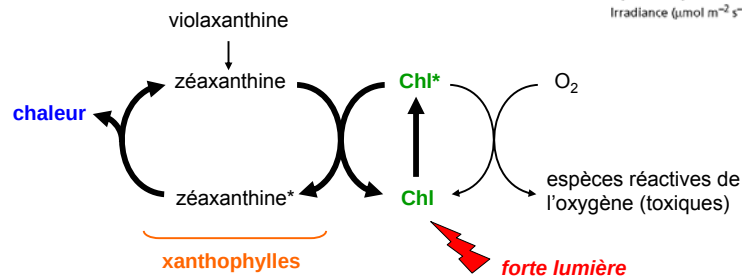
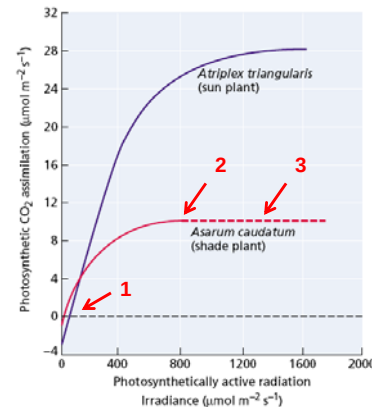
- la [CO₂] atmosphérique n'est pas limitante
- pas de saturation de la photosynthèse à forte lumière



Plantes d'ombre vs. plantes de soleil

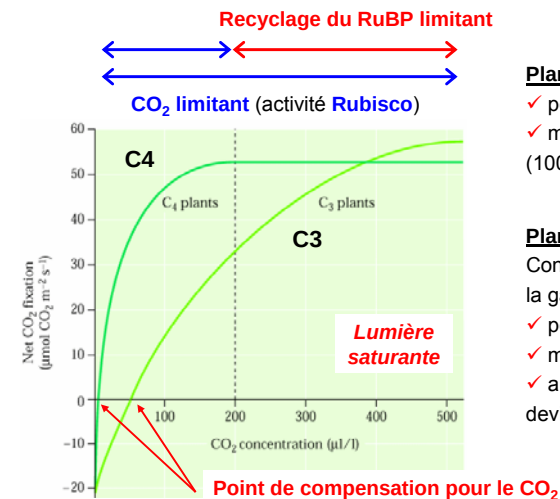
- 1/ intensité de compensation très faible (respiration moins importante)
- 2/ saturation atteinte pour une plus faible intensité (plus de chlorophylles)
- 3/ plantes non adaptées aux forts éclaircements → **photo-inhibition** = endommagement de l'appareil photosynthétique

- ✓ Dissipation de l'énergie des Chl* par quenching non photochimique → **cycle des xanthophylles**



B - Influence de la concentration en CO₂

- ✓ atmosphère : 0,037% (370 ppm) de CO₂
- ✓ **Point de compensation pour le CO₂** → photosynthèse = respiration



Plantes en C3

- ✓ point de compensation élevé (50 ppm)
- ✓ maximum atteint pour de fortes [CO₂] (1000-1500 ppm)

Plantes en C4

Concentration du CO₂ dans les cellules de la gaine périvasculaire

- ✓ point de compensation bas (<10 ppm)
- ✓ maximum atteint pour de faibles [CO₂]
- ✓ aux fortes [CO₂] le recyclage du RuBP devient le facteur limitant