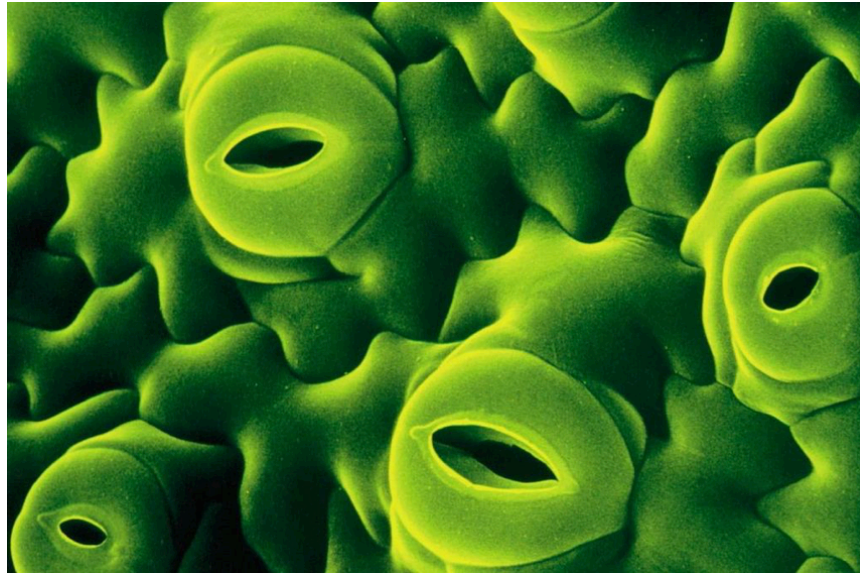


SV-E – Le métabolisme cellulaire

Chapitre 2 – L’approvisionnement en matière organique



Autotrophe et hétérotrophe

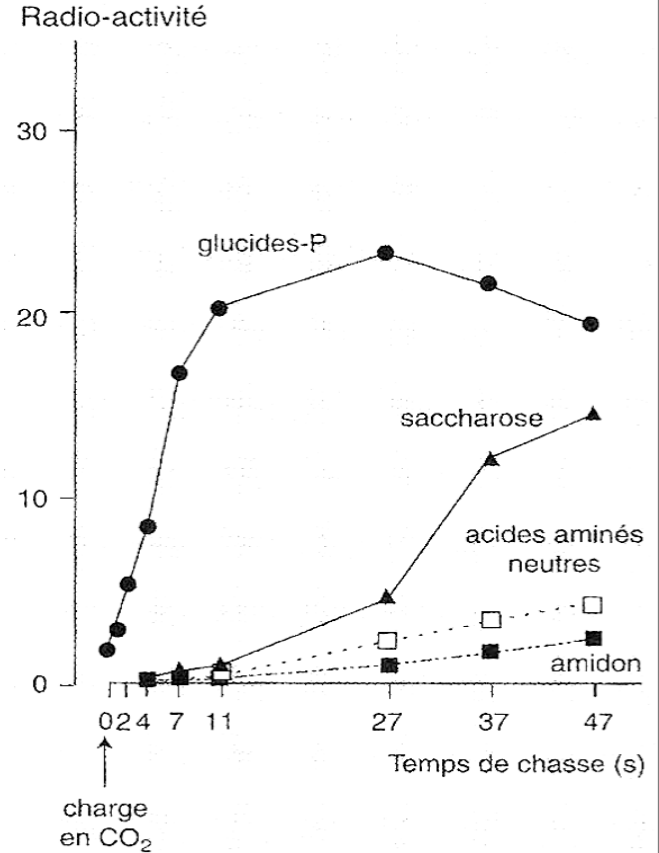
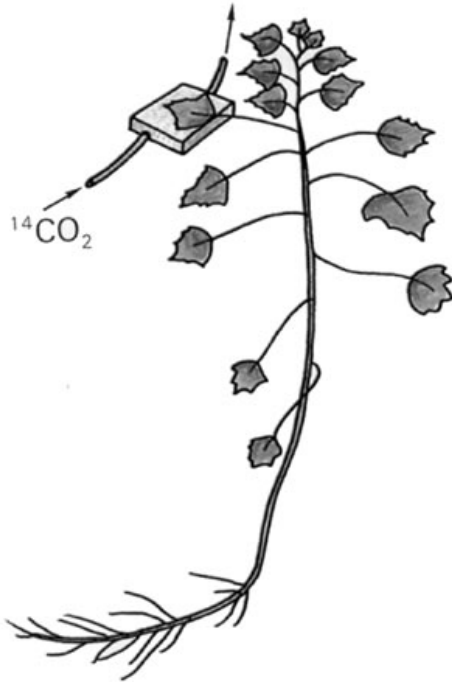
Source de matière minérale = autotrophe

Source de matière organique = hétérotrophe

Précision à donner selon l'élément

élément	Source(s) pour un autotrophe	Source(s) pour un hétérotrophe
carbone	CO_2	Molécules organiques
azote	NO_3^- , N_2 , NH_3	protéines, acides nucléiques

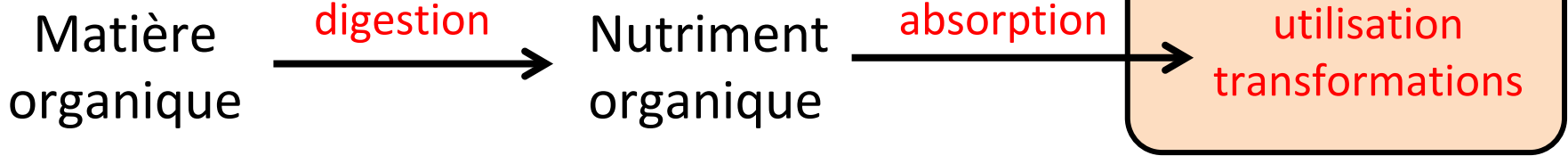
Une fixation du CO_2 réduit en saccharose



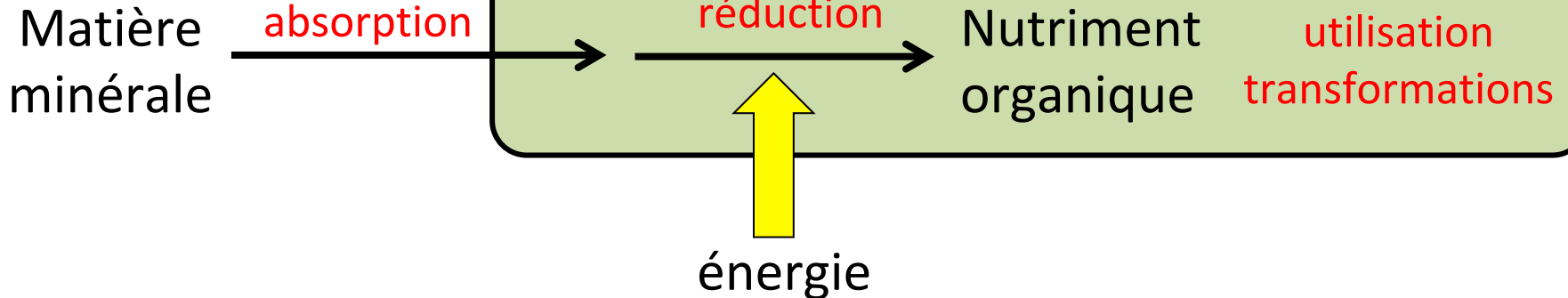
Deux modalités

Organisme fait de matière organique

Hétérotrophe



Autotrophe



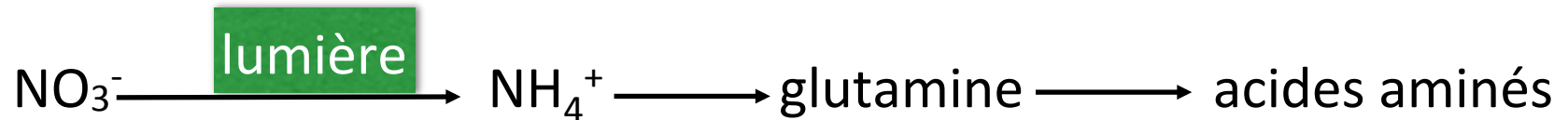
1. L'autotrophie des végétaux, une photolithotrophie

1.1. L'approvisionnement en matière minérale

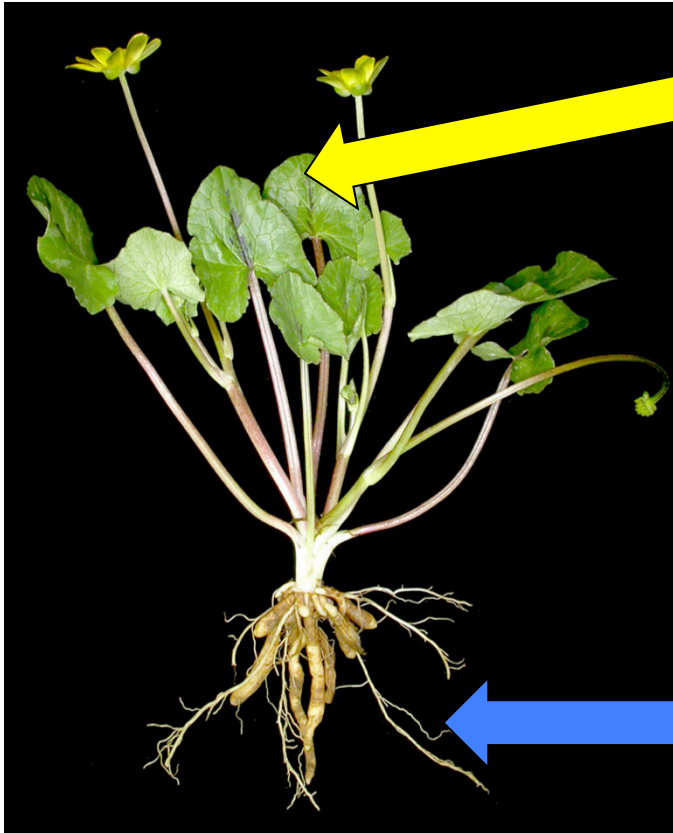
Les réactions de réduction de C et N nécessitent...

- **Matière** : des sources de C (CO_2) et N (sources variées)
- **Énergie** lumineuse et **électrons** formant des liaisons covalentes entre atomes
- **Enzymes** catalysant les réactions

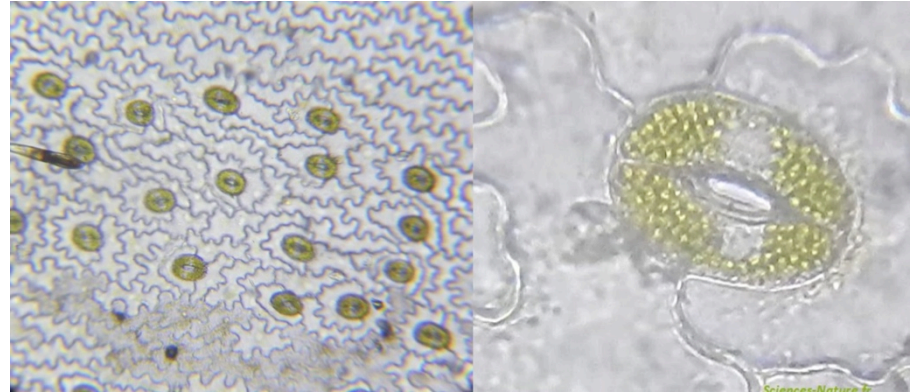
Réactions simplifiées de la photosynthèse sous l'effet de l'énergie lumineuse :



Origine du CO_2 , NO_3^- et H_2O



Entrée de CO_2 par les stomates



Source : sciences-nature.fr

Entrée d'eau et de nitrates par les poils absorbants et mycorhizes

1. L'autotrophie des végétaux

1.2. La synthèse de matière organique par les cellules chlorophylliennes

a) Le chloroplaste, organite spécialisé

Un organite spécialisé, le chloroplaste



12h à l'obscurité



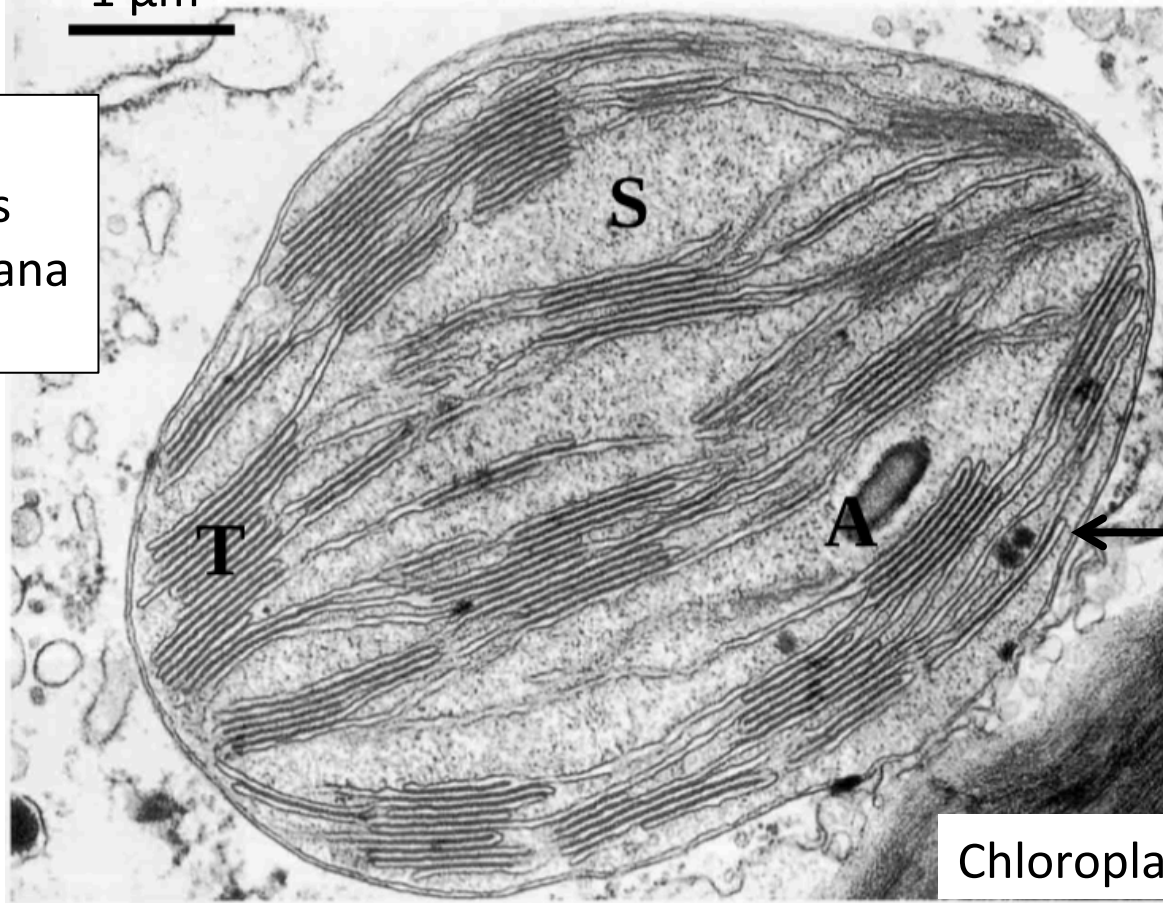
12h à la lumière

Cellules de feuille de Funaire colorées au lugol

Le chloroplaste

1 μm

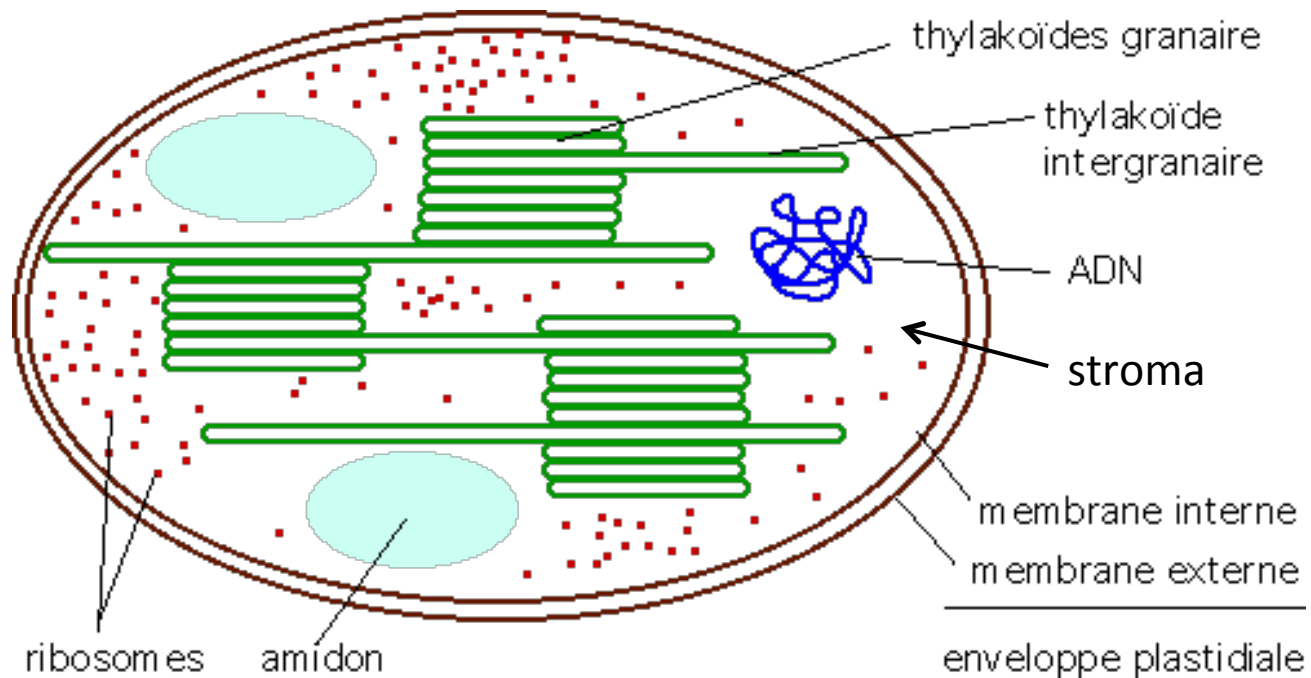
S : stroma
T : thylakoïdes
empilés en grana
A : amidon



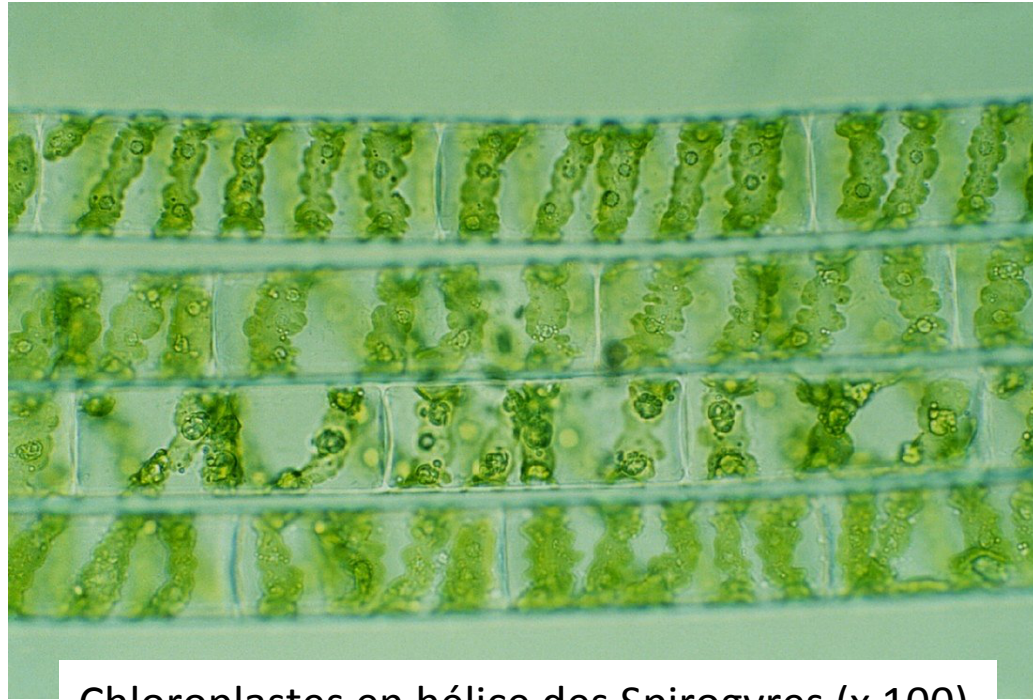
← 2 membranes

Chloroplaste d'Épinard

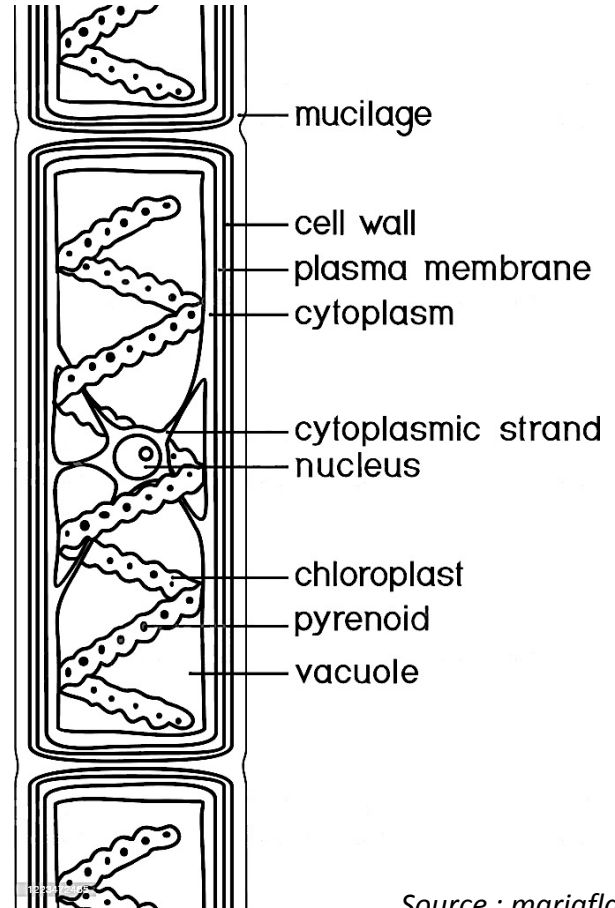
Un chloroplaste



Des variations possibles



Chloroplastes en hélice des Spirogyres (x 100)



rezo

La phase photochimique, c'est...

... une conversion de l'énergie lumineuse
en une énergie utilisable par la cellule

mais quelles sont les énergies
potentielles d'une cellule ?

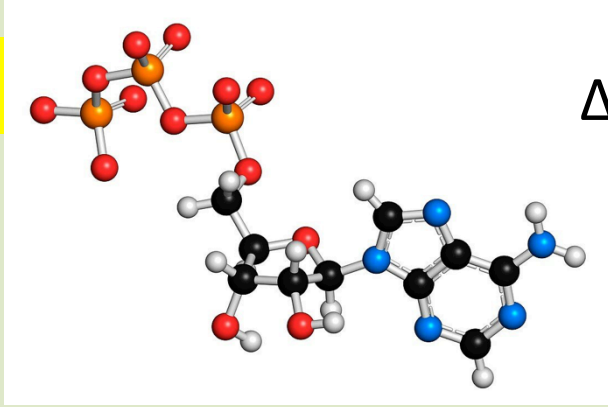
Les formes d'énergie

Énergie = capacité à développer une force

Nature des forces	dans le contexte cellulaire
chimique	molécules (propriétés chimiques et liaisons)
osmotique	mouvement d'ions entre 2 compartiments
rédox	transfert d'électrons entre 2 composés
thermique	négligé dans une cellule
mécanique	déformations moléculaires (non étudié ici)

Potentiel chimique

L'ATP



$$\Delta rG^{\circ\prime} = - 30,5 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

D'autres molécules à haut potentiel énergétique

1-3 BPG $\Delta rG^{\circ\prime} = - 54,5 \text{ kJ.mol}^{-1}$

PEP $\Delta rG^{\circ\prime} = - 62,0 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Potentiel rédox

Certaines molécules peuvent céder ou fixer des électrons.

Elles existent donc sous deux formes :

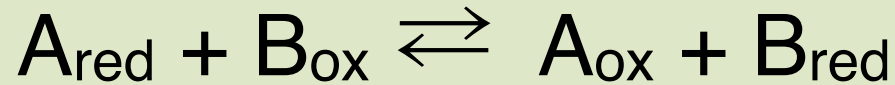
- forme **oxydée** = forme **déficiente** en électrons

- forme **réduite** = forme **riche** en électrons

Les électrons peuvent passer d'une forme réduite à une forme oxydée si le potentiel rédox du composé oxydé est supérieur au potentiel rédox du composé réduit.

Souvent, le transfert d'électrons s'accompagne de transferts de protons H^+ .

Potentiel rédox $E^{\circ'}$



$$\Delta rG_{A-B} = -n \mathcal{F} (E^{\circ'}_B - E^{\circ'}_A) = -n \mathcal{F} \Delta E^{\circ'}$$

En toute rigueur, il faut utiliser les E' issus de la relation de Nernst :

$$E' = E^{\circ'} + \frac{RT}{n\mathcal{F}} \ln \frac{[X_{\text{ox}}]}{[X_{\text{red}}]}$$

Exemples de potentiel rédox

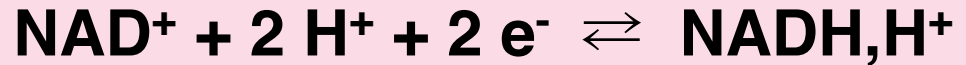
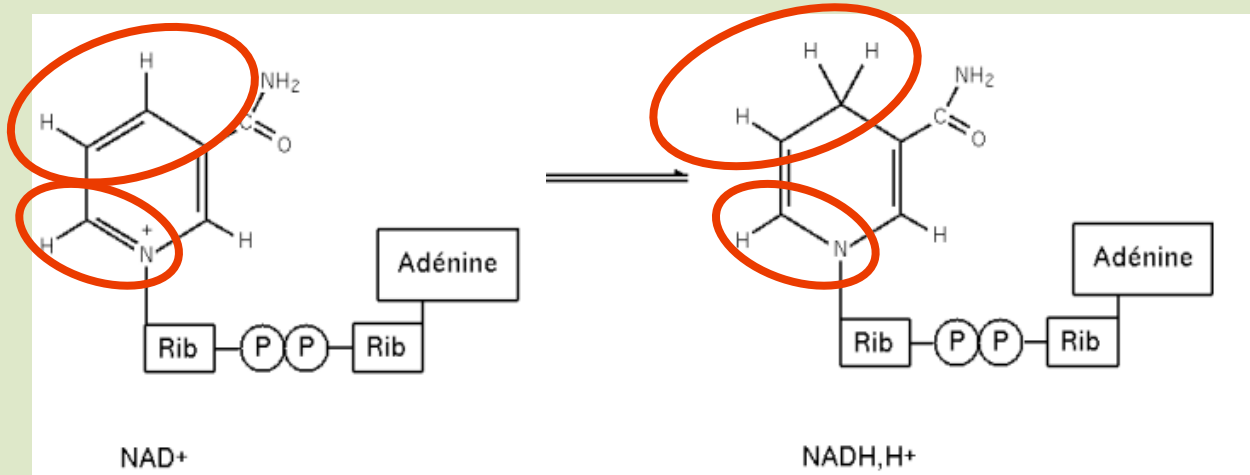
Forme oxydée	Forme réduite	E'° en mV
NAD ⁺	NADH,H ⁺	- 320
NADP ⁺	NADPH,H ⁺	- 320
3-phosphoglycérate	Glycéraldéhyde 3 phosphate	- 550
O ₂	H ₂ O	+ 820

$$\begin{aligned}\Delta rG_{\text{NADH} \rightarrow \text{O}_2} &= - 2 \mathcal{F} (0,820 + 0,320) = - 2 \times 96\,500 \times 1,140 \\ &= - 220 \text{ kJ.mol}^{-1}\end{aligned}$$

=> Le passage des électrons de NADH,H⁺ vers O₂ est exergonique

Des transporteurs d'électrons solubles

NAD⁺ : nicotinamide – adénine – dinucléotide
issu de la vitamine B3



Autres transporteurs : NADP⁺, FAD

Cofacteur = substance chimique liée à une protéine (enzyme ou autre) et nécessaire à l'activité de celle-ci.

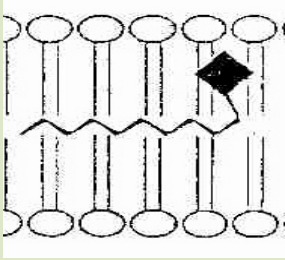
Il y a deux types de cofacteurs :

- ion métallique
- coenzyme

Le coenzyme est une molécule organique qui constitue un complexe stable avec l'enzyme, et nécessaire à son activité.

Des transporteurs membranaires d'électrons

➤ transporteurs d'électrons + protons



ubiquinone : transporteur membranaire mobile

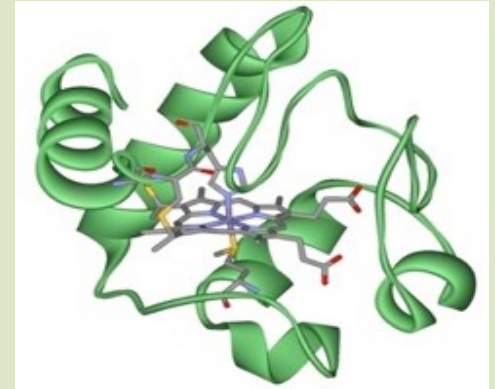
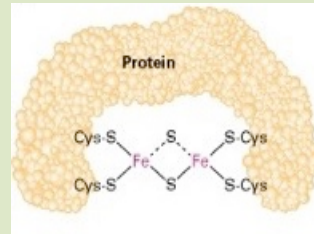


➤ transporteurs d'électrons seuls

Métalloprotéines

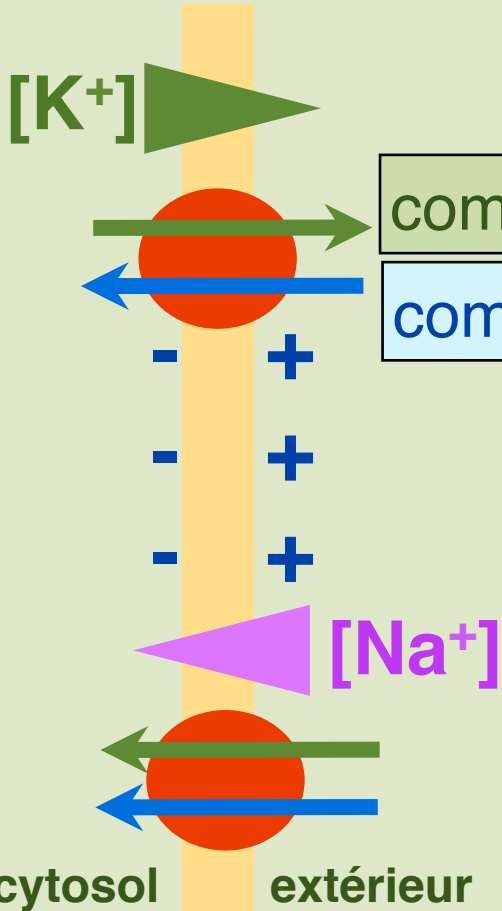
- cytochromes a et b à **Fe²⁺ héminique**
- protéines **Fe-S**

protéine Fe-S



cytochrome

Le potentiel osmotique



composante chimique : différence de concentration

composante électrique : différence de charges

L'ensemble des 2 composantes est la force «ion-motrice»

$$\Delta rG_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} = RT \ln \frac{[\text{ext}]}{[\text{int}]} - z \mathcal{F} \text{ ddp}$$

ddp = différence de potentiel membranaire = $E_{\text{int}} - E_{\text{ext}}$

1. L'autotrophie des végétaux

1.2. La synthèse de matière organique par les cellules chlorophylliennes

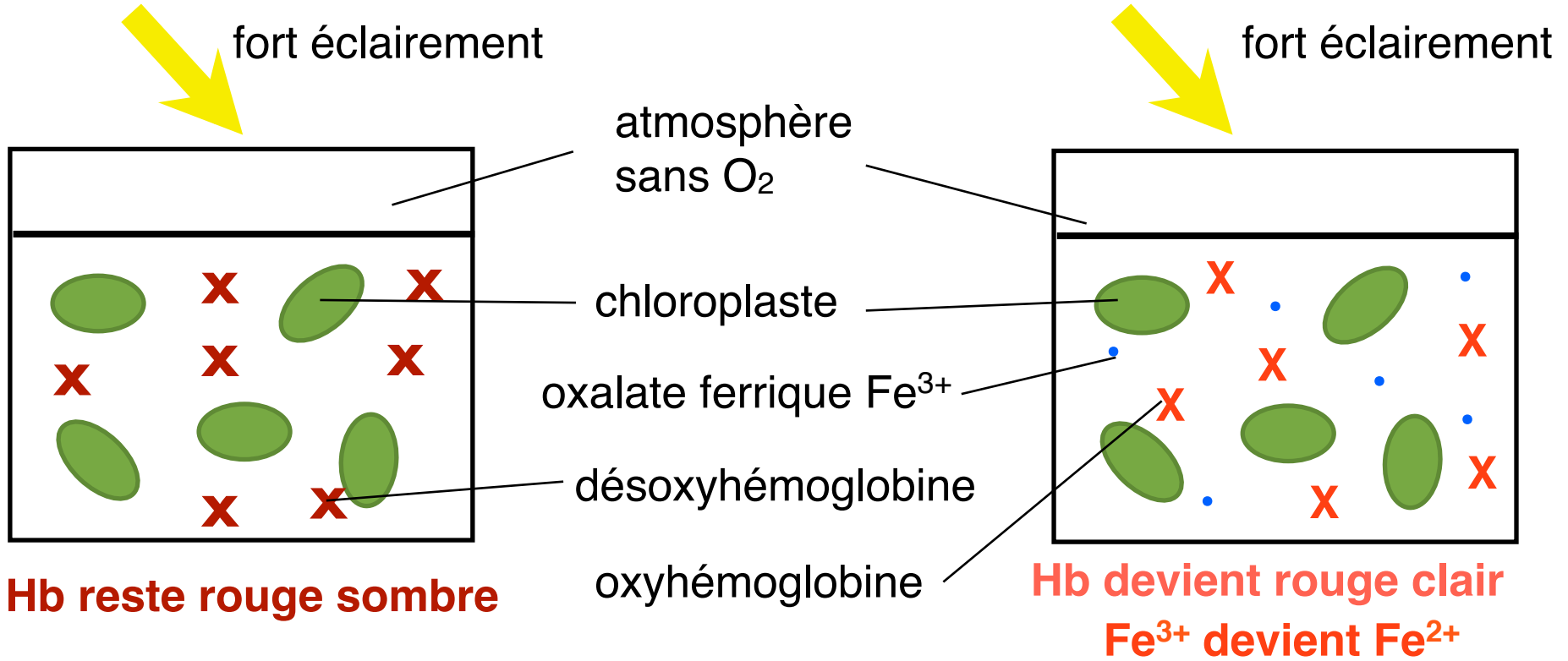
b) La phase photochimique : conversion de l'énergie lumineuse

La phase photochimique...

... est une conversion de l'énergie lumineuse
en potentiel rédox et ATP

énergie lumineuse = source énergétique initiale

Expérience de Hill



La lecture au spectroscope permettra de détecter le moindre changement de couleur de l'hémoglobine, c'est-à-dire le moindre dégagement de dioxygène.

Expérience de Ruben & Kamen (1941)

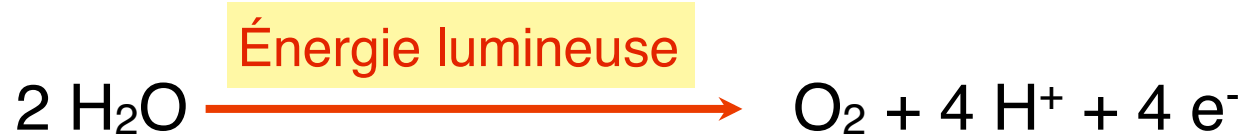
Culture de chlorelles en présence de lumière

- avec du C^{18}O_2 et H_2^{16}O \Rightarrow O_2 dégagé contient ^{16}O
- avec du C^{16}O_2 et H_2^{18}O \Rightarrow O_2 dégagé contient ^{18}O



Bilan des expériences de Hill et Ruben & Kamen

La lumière provoque l'oxydation de l'eau par la réaction redox



mécanisme ?

potentiel rédox

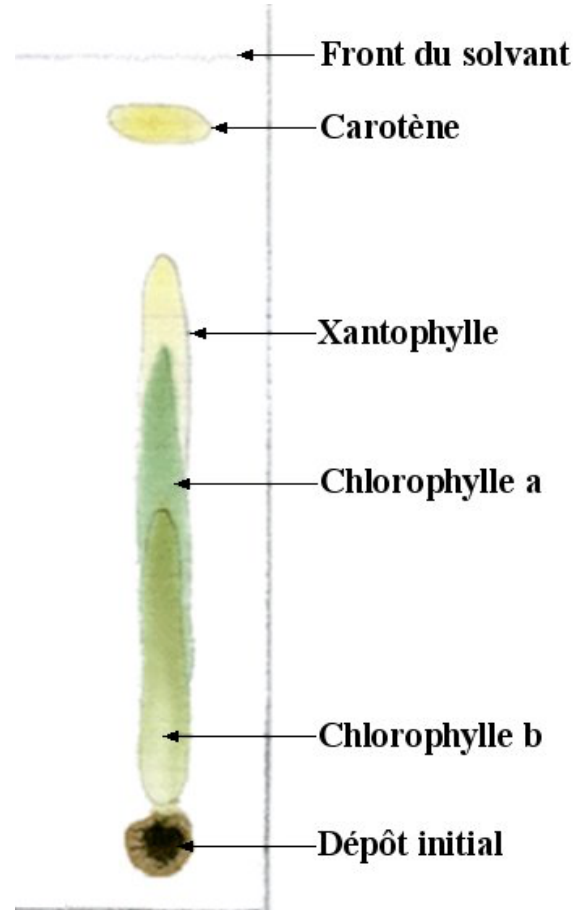
quelle prise en charge
des électrons ?

potentiel hydrogène pH

L'absorption de l'énergie lumineuse

les pigments photosynthétiques

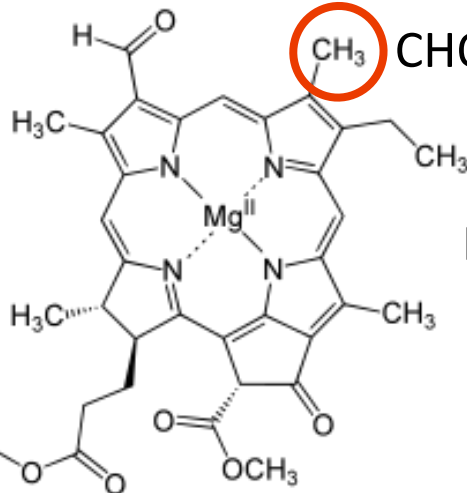
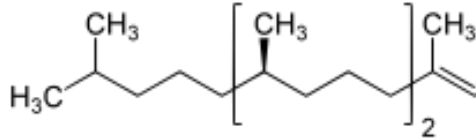
Chromatographie sur nitrocellulose
dans un solvant organique apolaire



Les pigments photosynthétiques

Chlorophylle a

chaîne carbonée dans
la membrane

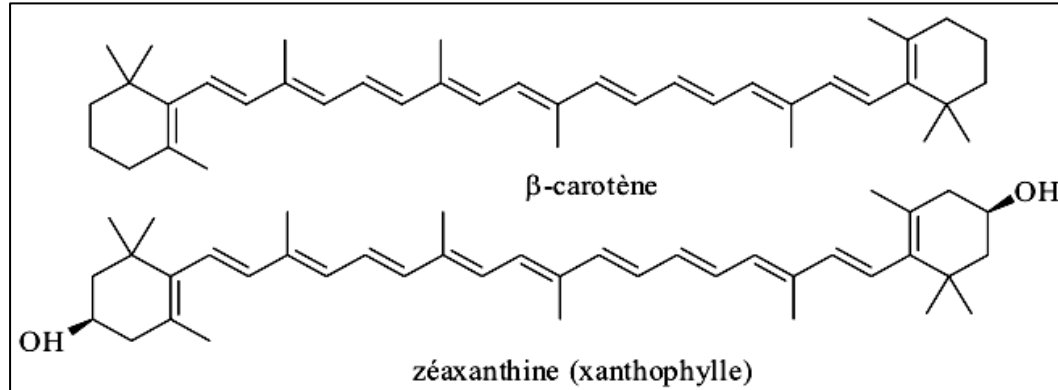
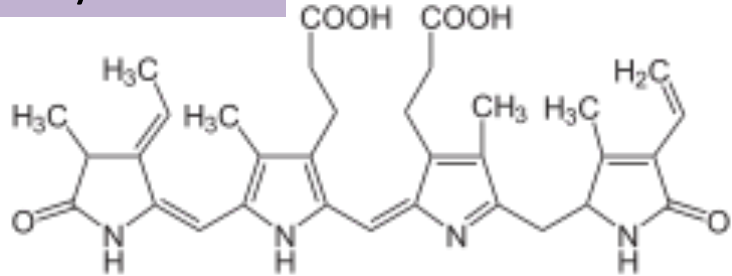


CHO dans la chlorophylle b

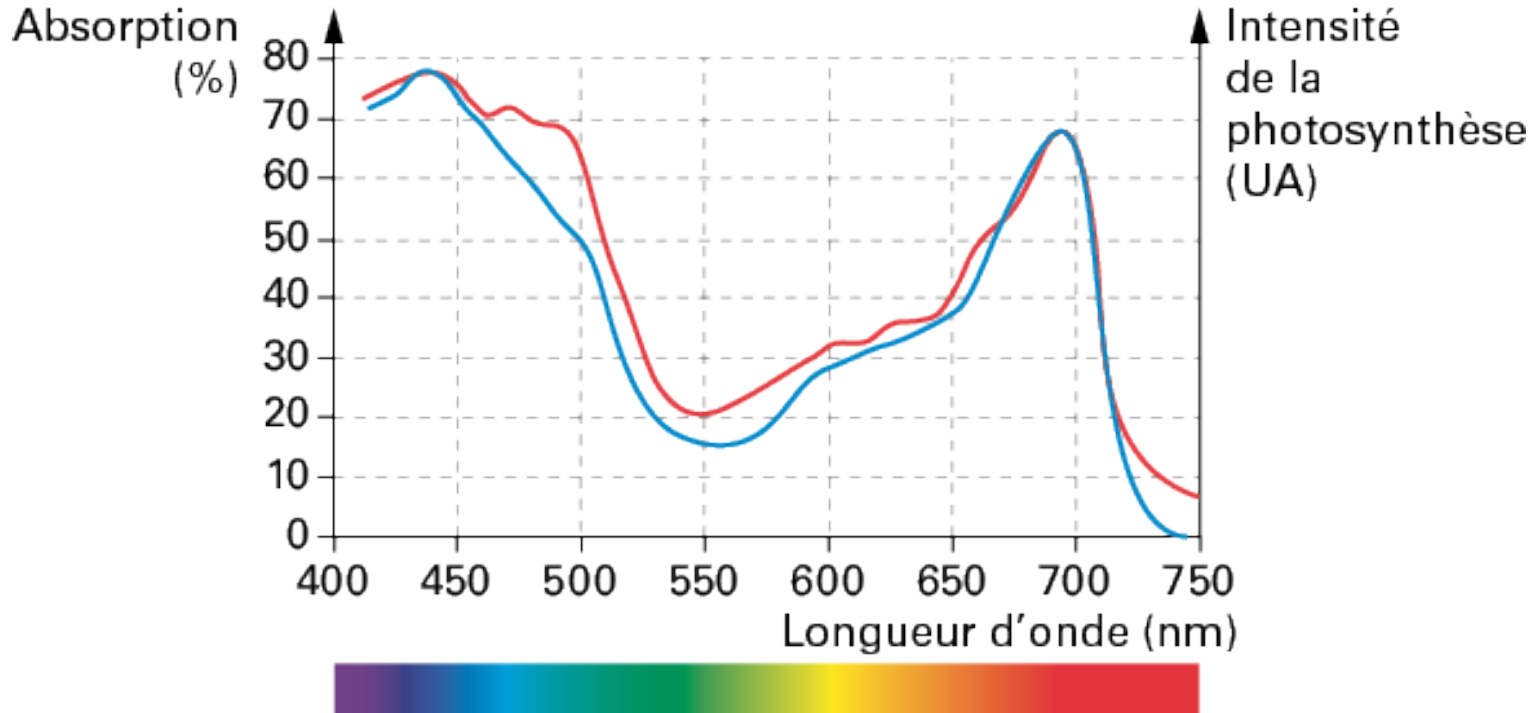
Noyau tétrapyrrolique à cœur de Mg^{2+}

Caroténoïdes

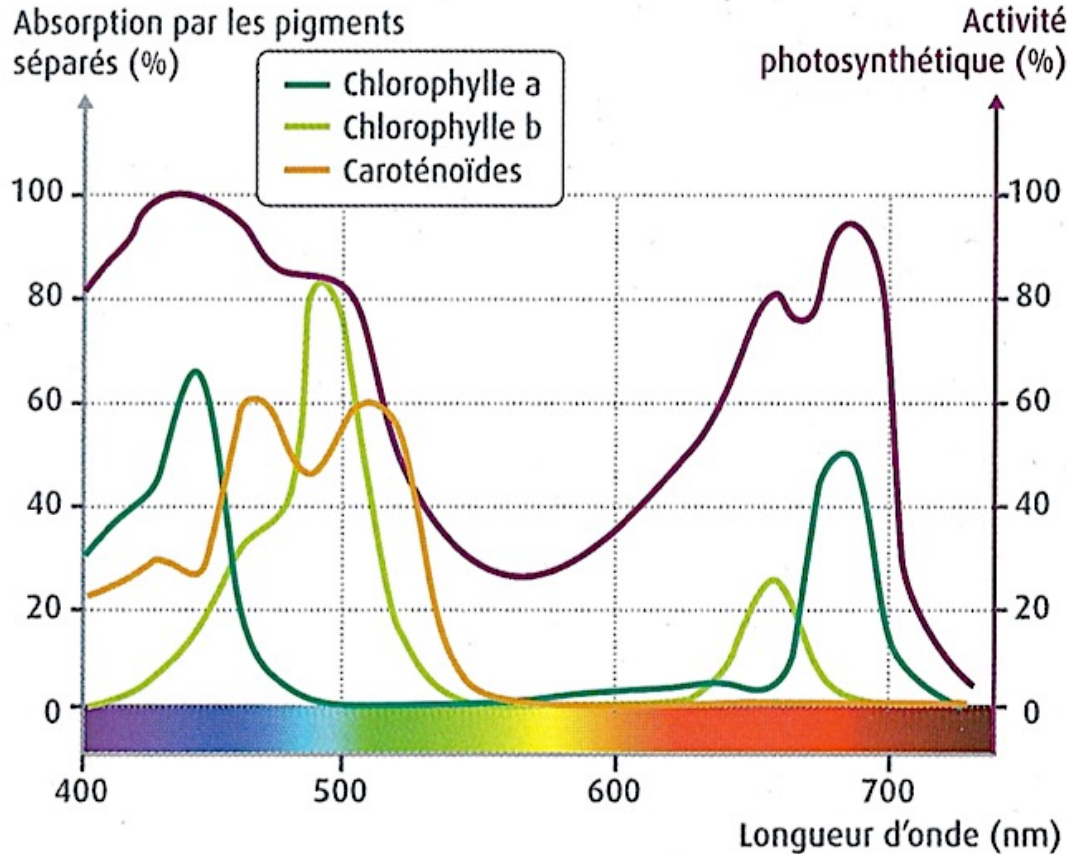
Phycobiline



Spectre d'action et d'absorption

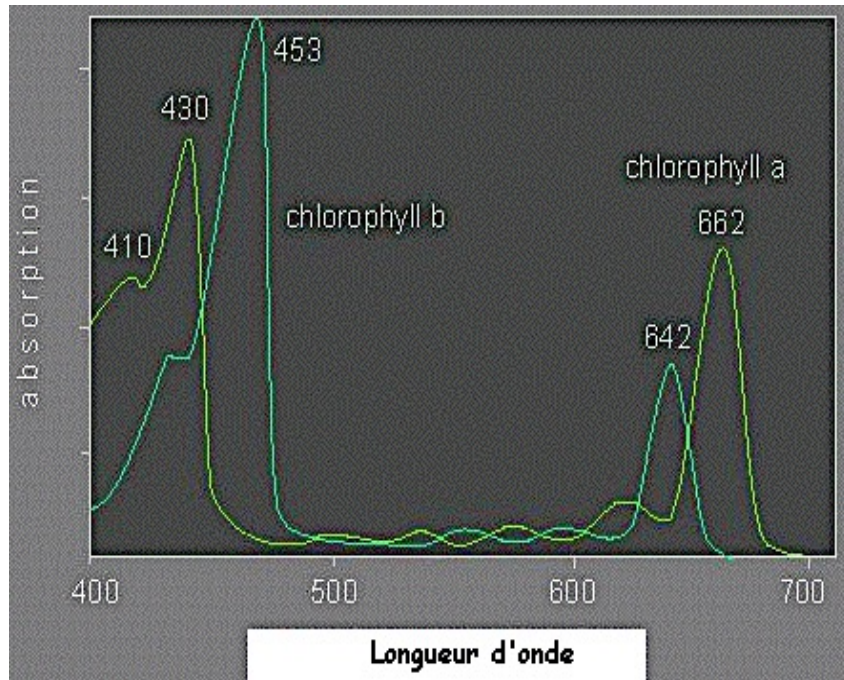


Spectre d'absorption des pigments séparés

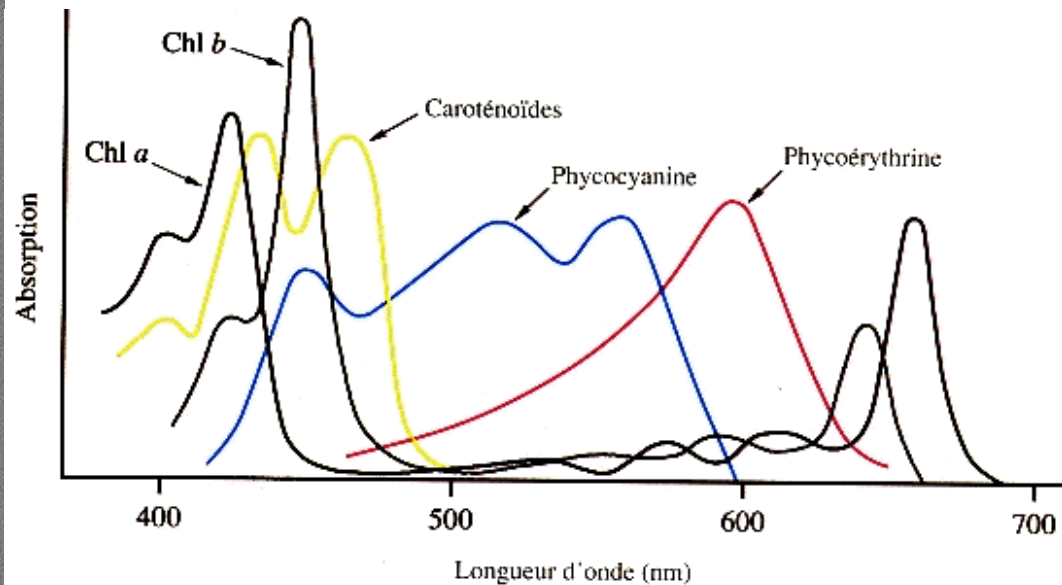


Absorption des radiations **bleues** et **rouges**

Spectre d'absorption des pigments séparés

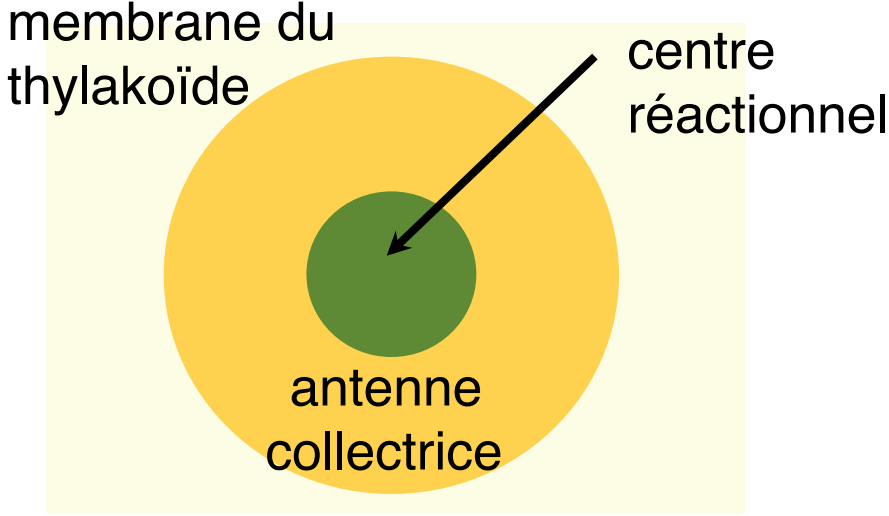


Chlorophylles

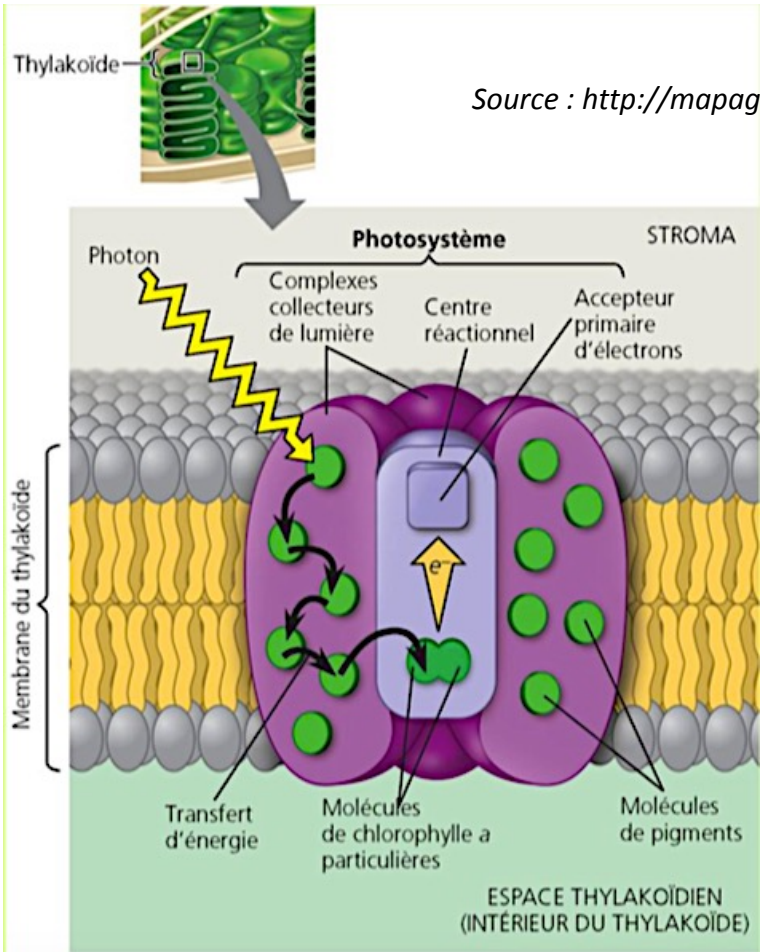


Tous pigments

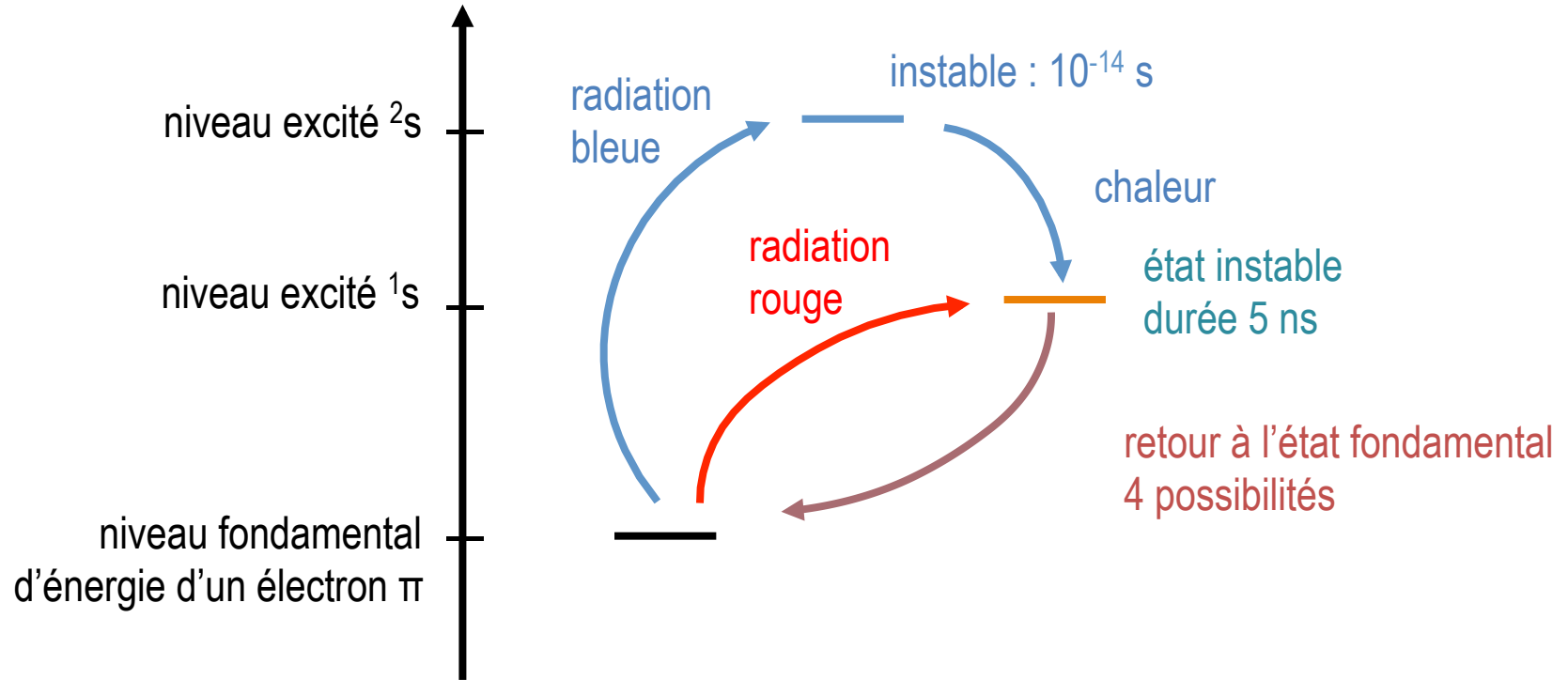
Les photosystèmes



Vue de dessus

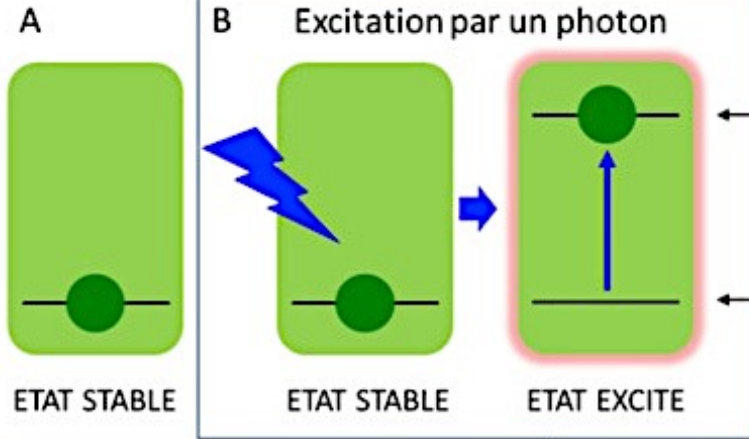


Effet des radiations rouges et bleues



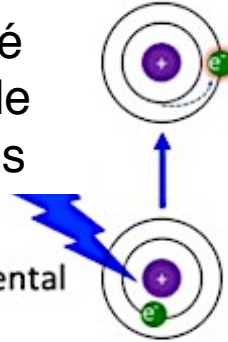
Que la radiation soit bleue ou rouge, l'effet est le même

Effet d'un photon excitateur



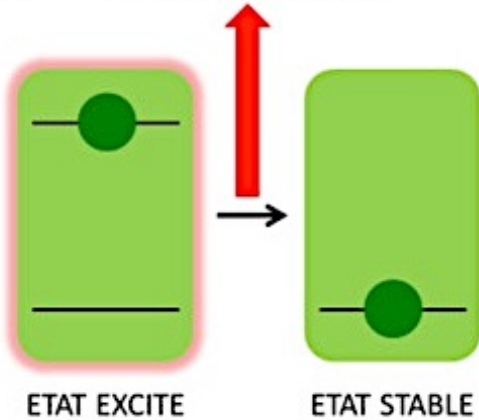
État excité
instable de
durée 5 ns

État fondamental

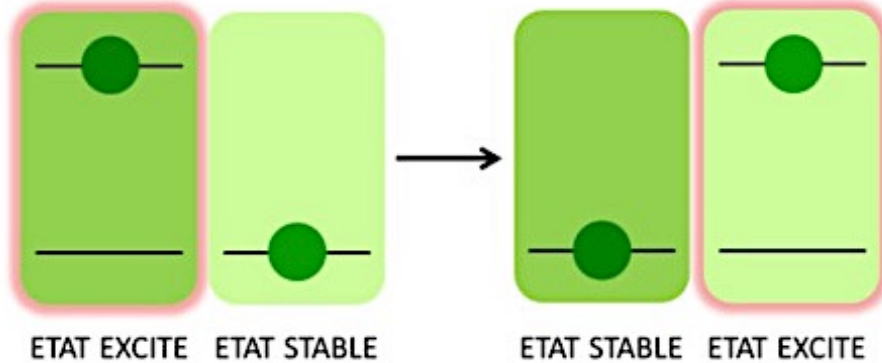


Si la longueur d'onde correspond à l'énergie d'activation du pigment, un électron est propulsé sur une orbitale externe.

C1 Lumière et chaleur



C2 Transfert d'énergie par résonance entre deux molécules de pigments adjacentes

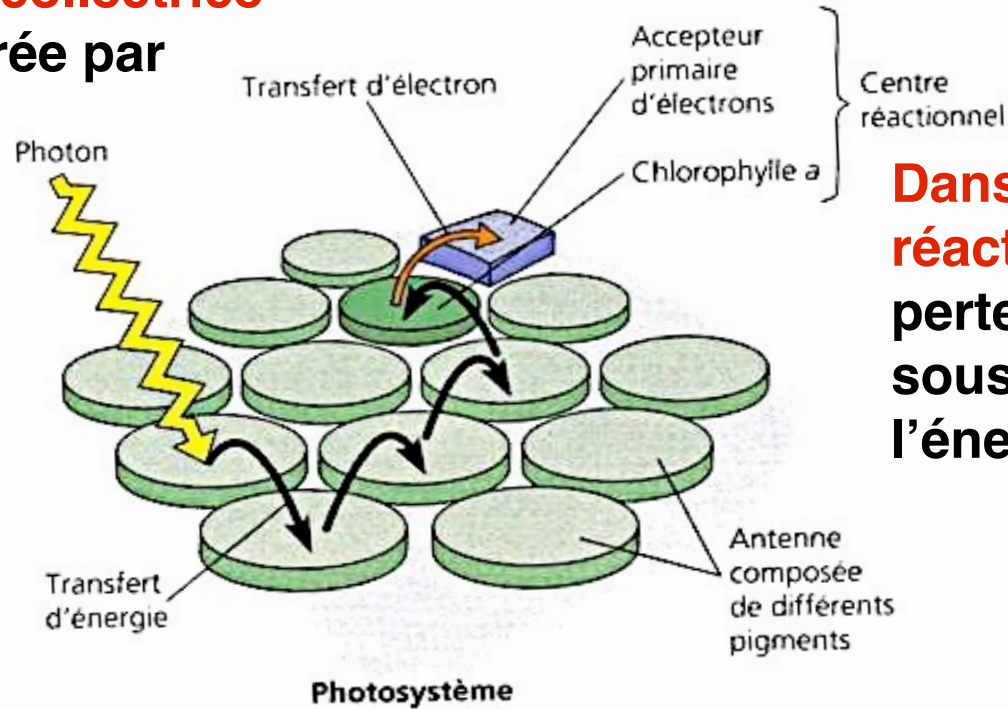


C3 transfert de l'électron à un accepteur

Dans le centre réactionnel

Transfert d'énergie au sein du photosystème

Dans l'antenne collectrice
énergie transférée par
résonance



Dans le centre
réactionnel
perte de l'électron
sous l'effet de
l'énergie absorbée

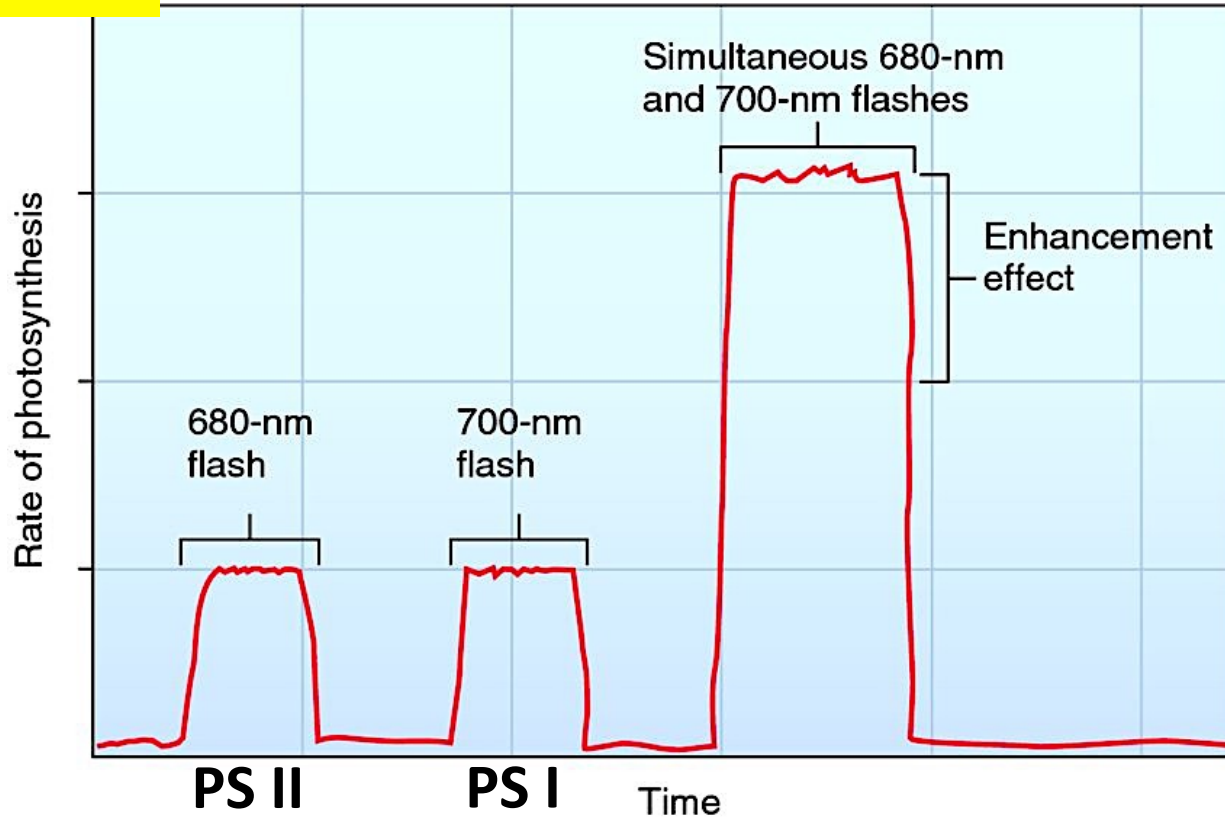
Énergie lumineuse



Perte d'électron

Deux types de photosystèmes

Effet Emerson



Transfert des électrons

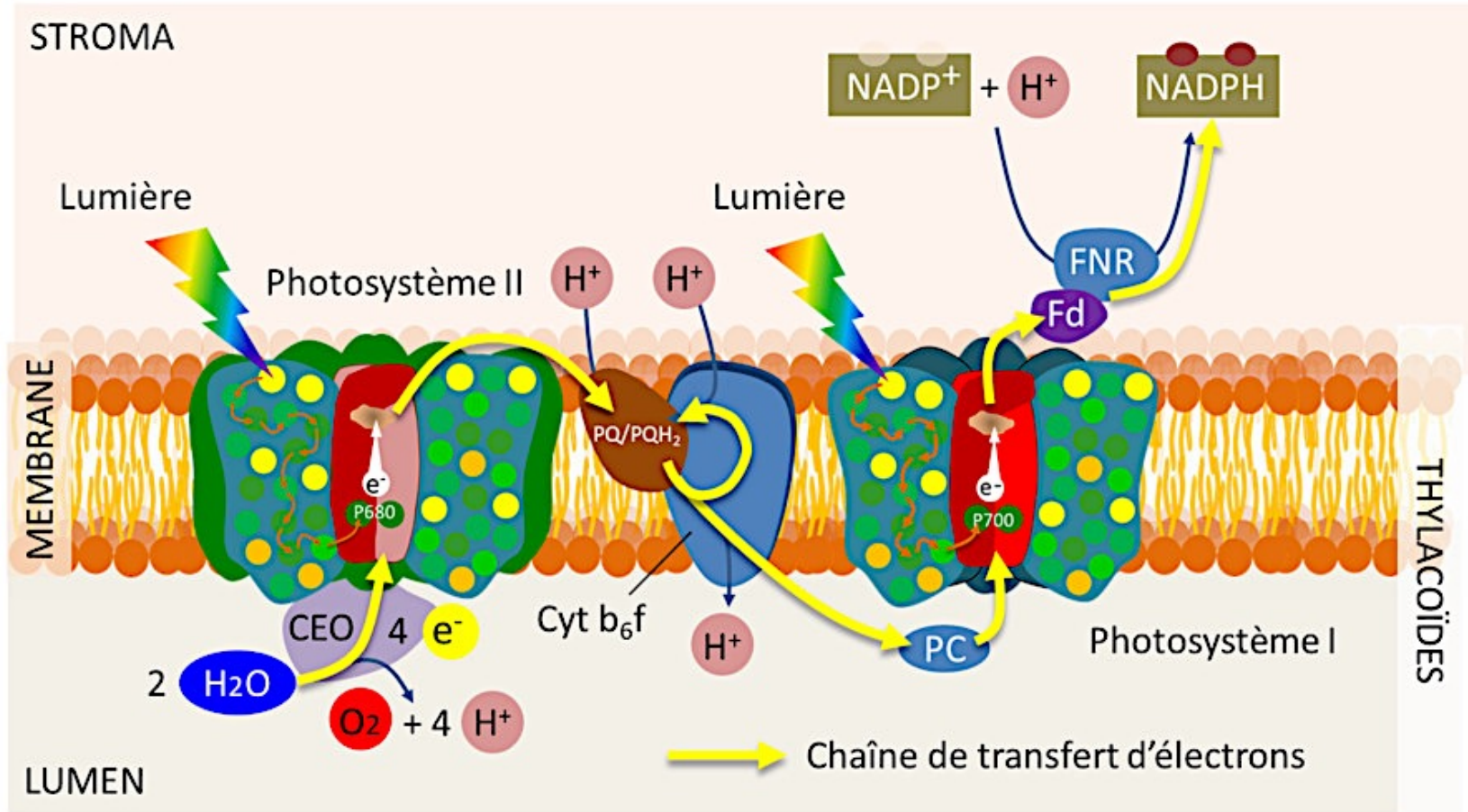
Couple redox	E° (V)
O ₂ / H ₂ O	+ 0,82
P680 / P680 ⁺	+ 0,9
P680*/P680	- 0,8
Pheo (red/ox)	- 0,6
QA-QB(red/ox)	- 0,2
PQ (red/ox)	0
b6f (red/ox)	- 0,2 et + 0,2
P700 / P700 ⁺	+ 0,4
P700* / P700	-1,3
Ao (red/ox)	-1,0
Fd (red/ox)	- 0,42
NADP ⁺ / NADPH	-0,32

donneur d'électron



accepteur d'électron

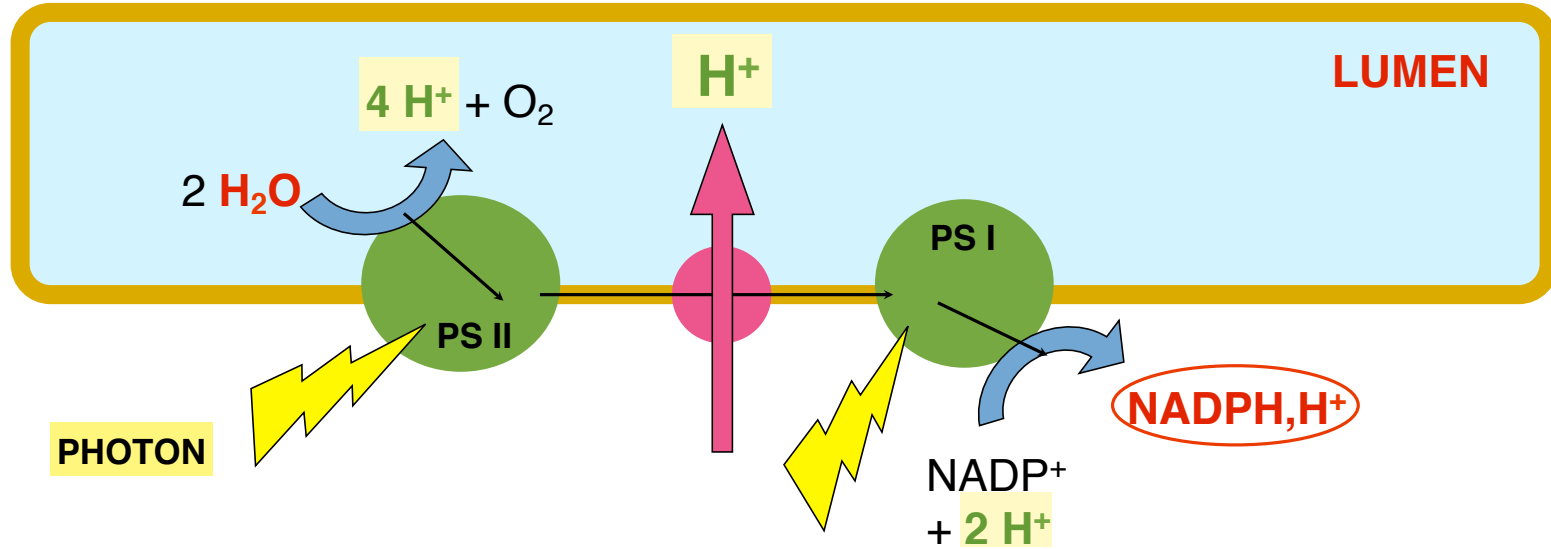
Le transport des électrons



BILAN

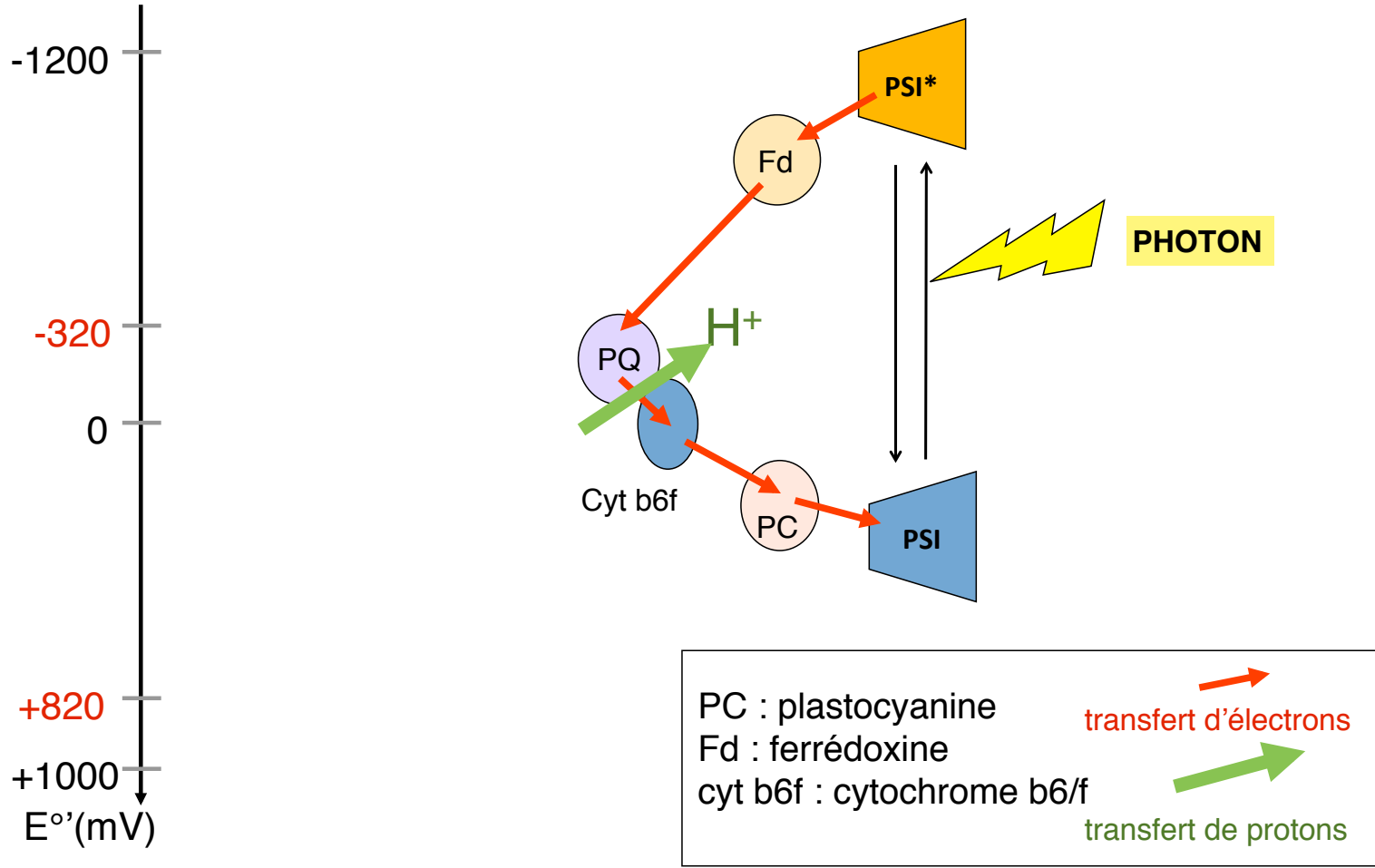
Schéma simplifié d'un thylakoïde

STROMA

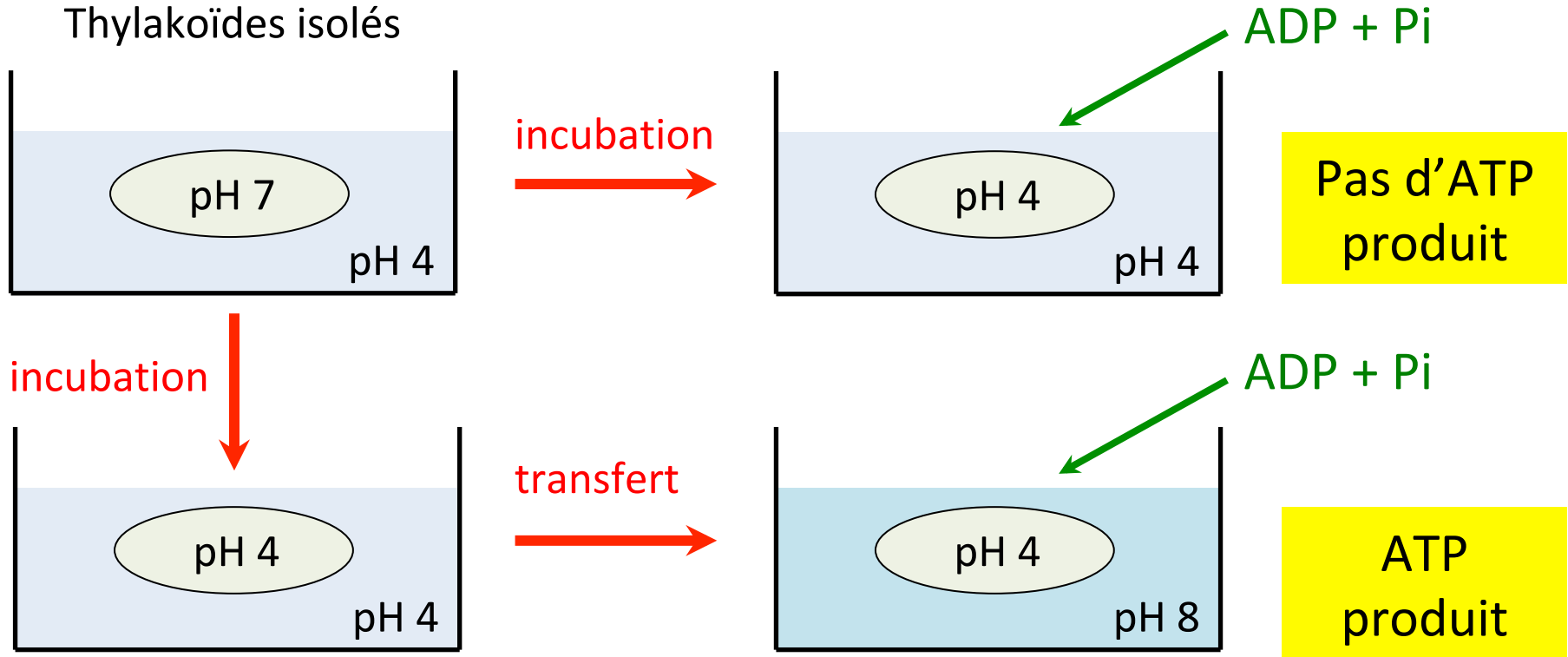


L'énergie lumineuse a permis de transférer les électrons de molécules d'eau vers le NADP^+ et de former un gradient de protons entre lumen et stroma

Le transport cyclique

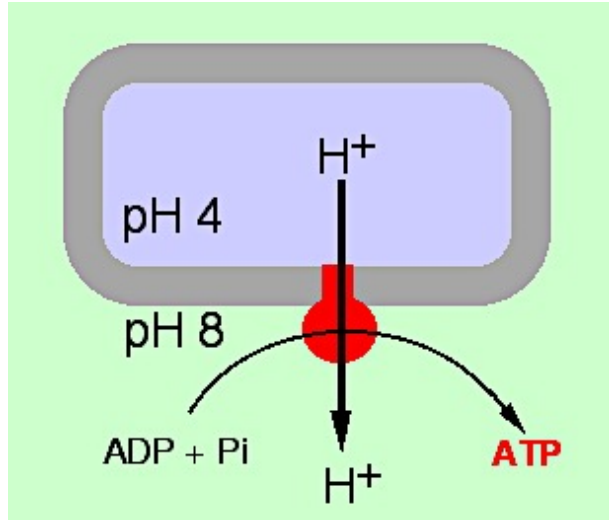


Expérience de Jagendorf et Uribe (1966)

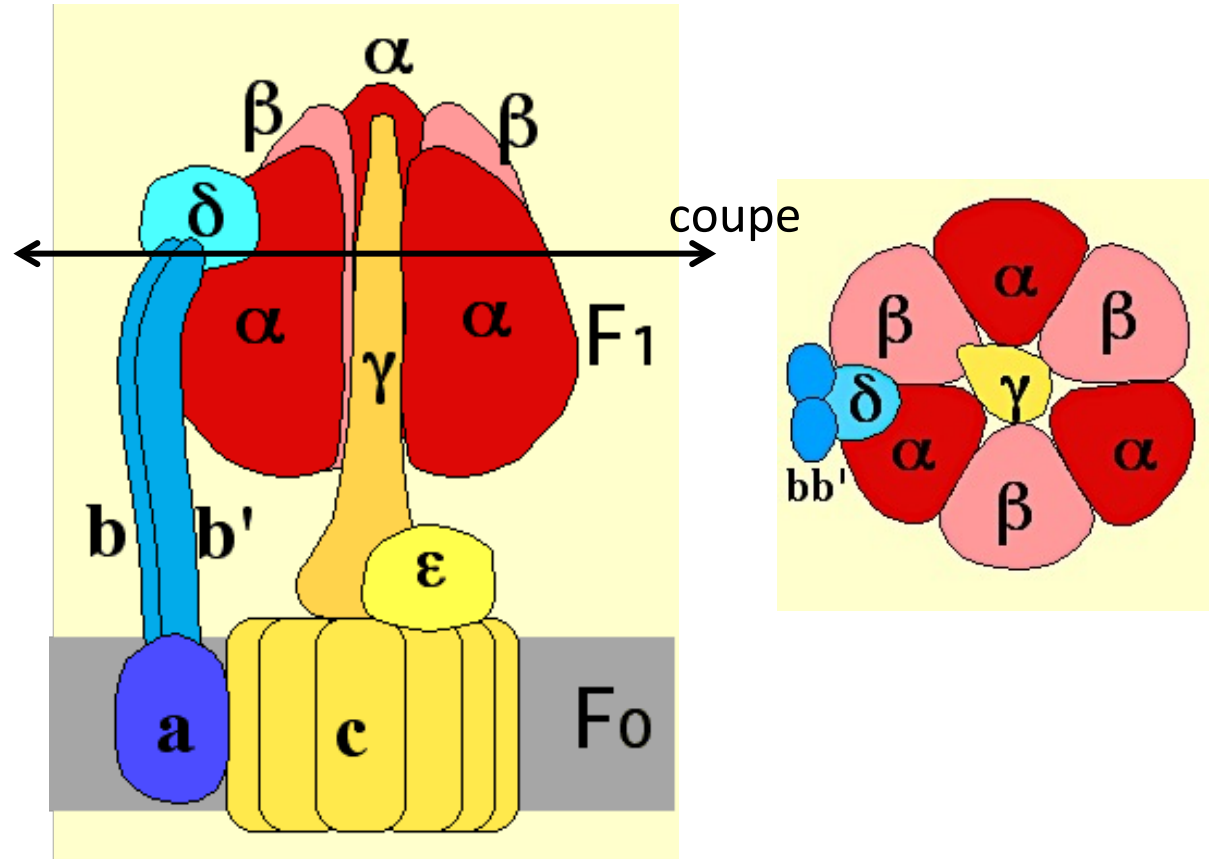


Expérience réalisée à l'obscurité et en absence de composés rédox

L'ATP synthase

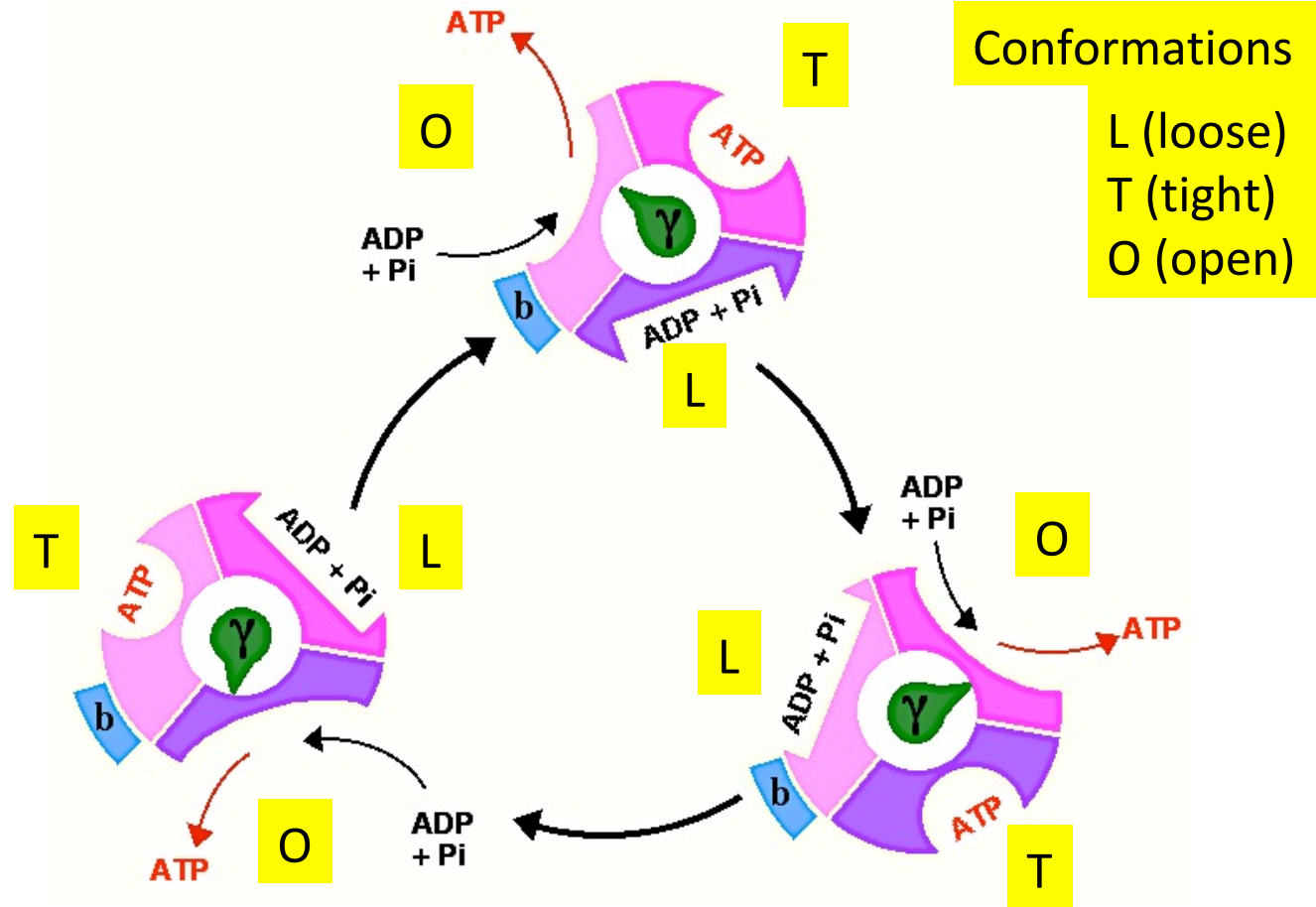
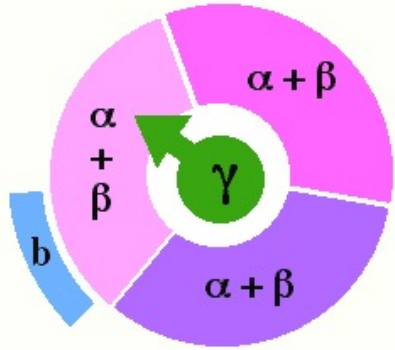


Un couplage osmo-
chimique à l'origine
de l'ATP.



Une sous-unité β a été enlevée pour voir la tige γ

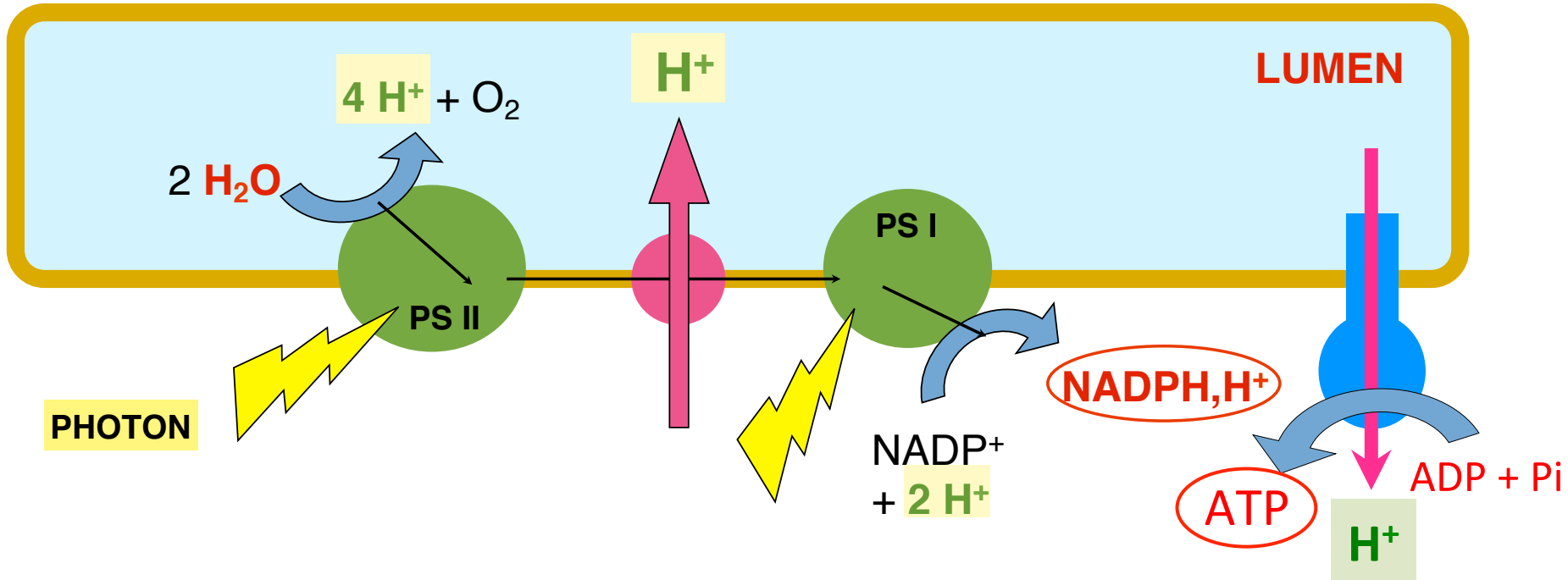
L'ATP synthase : mécanisme



Bilan de la phase photochimique

Schéma simplifié d'un thylakoïde

STROMA



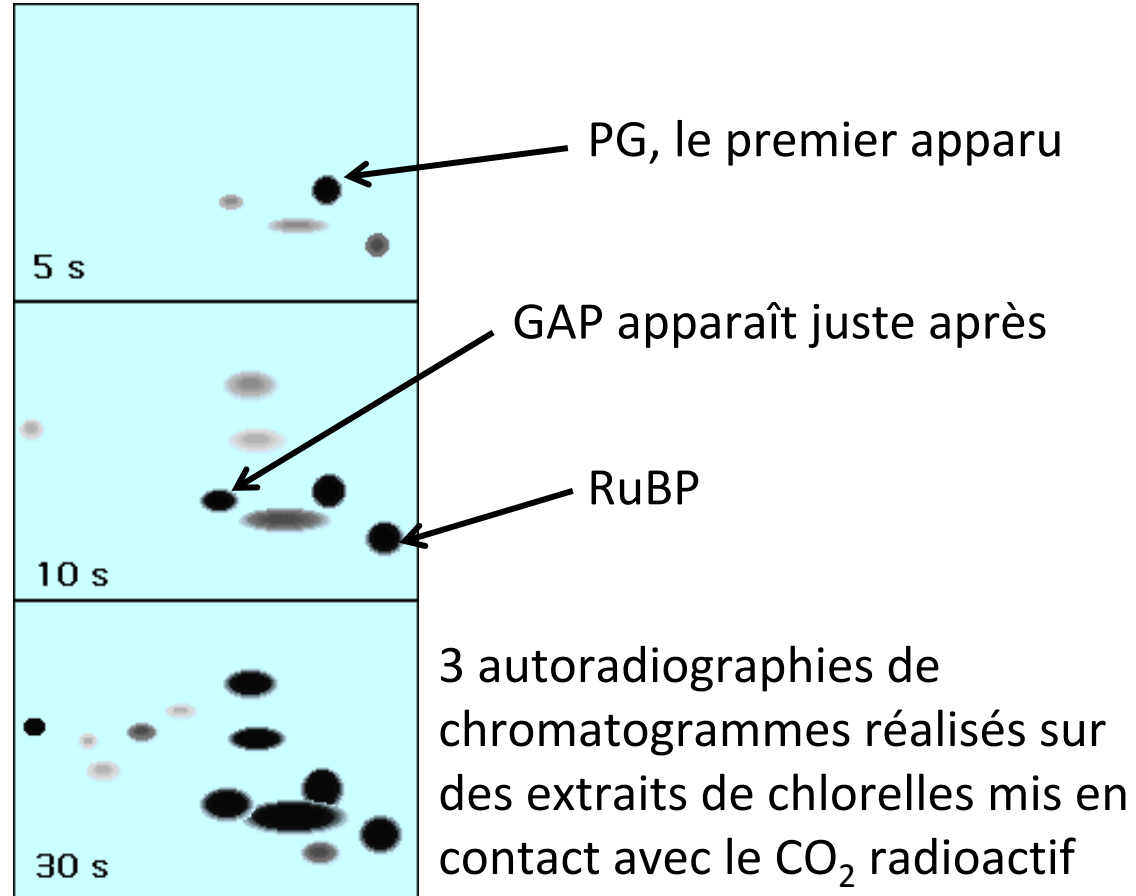
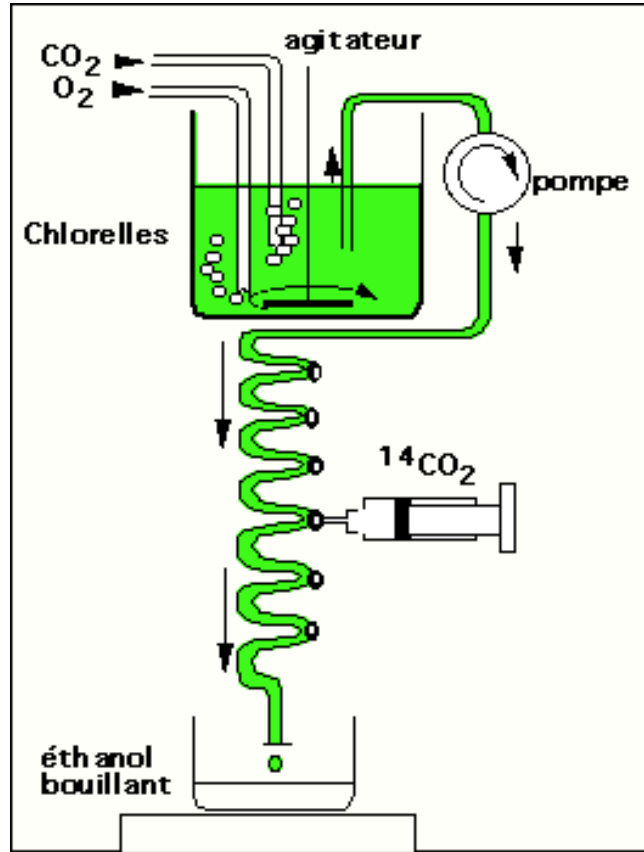
Énergie lumineuse convertie en ATP et NADPH, H⁺

1. L'autotrophie des végétaux, une photolithotrophie

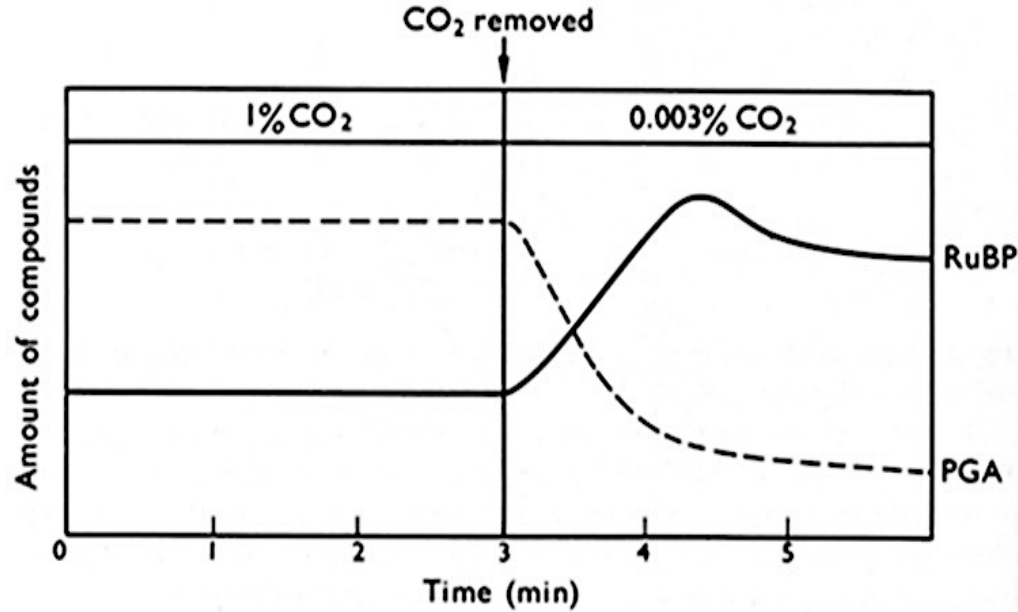
1.2. La synthèse de matière organique par les cellules chlorophylliennes

c) La réduction du CO_2 en matière organique exploite l'ATP et le potentiel réducteur

L'expérience de Calvin & Benson



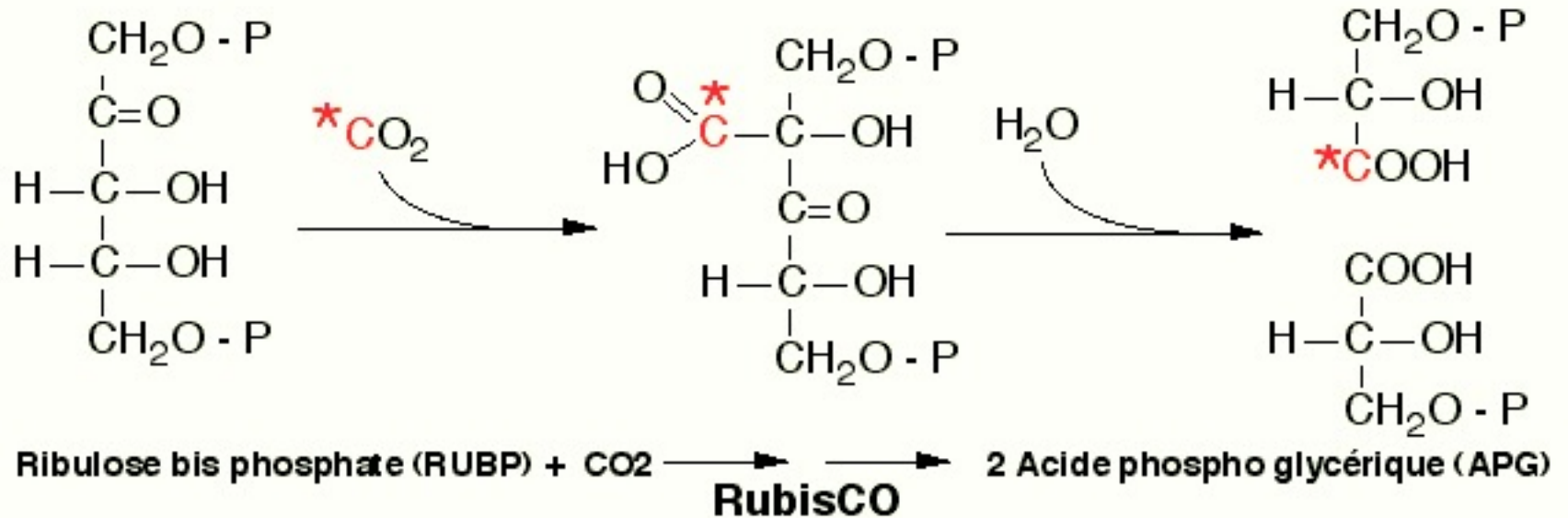
PG et RuBP sont interdépendants



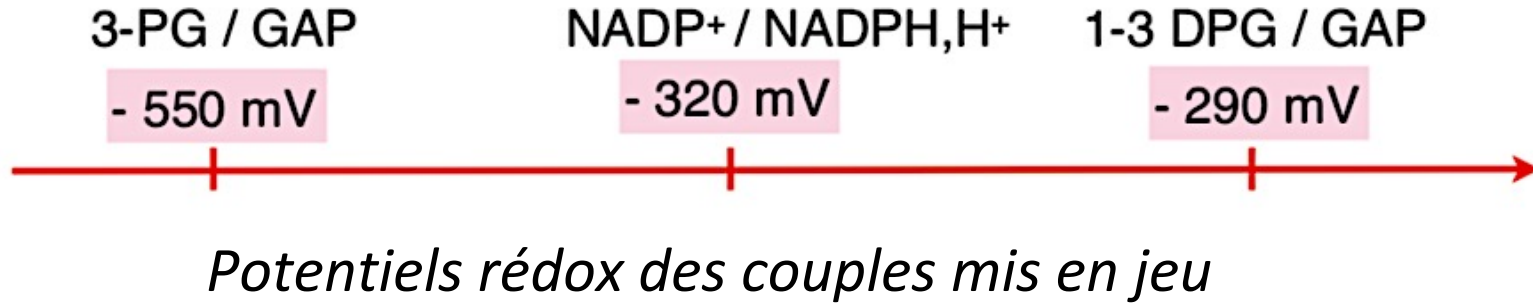
Idée : $\text{CO}_2 + \text{RuBP} \longrightarrow 2 \text{ PG}$

Mais aussi : $\text{PG} \longrightarrow \text{RuBP}$

La fixation du CO₂



La réduction de PG en GAP observée



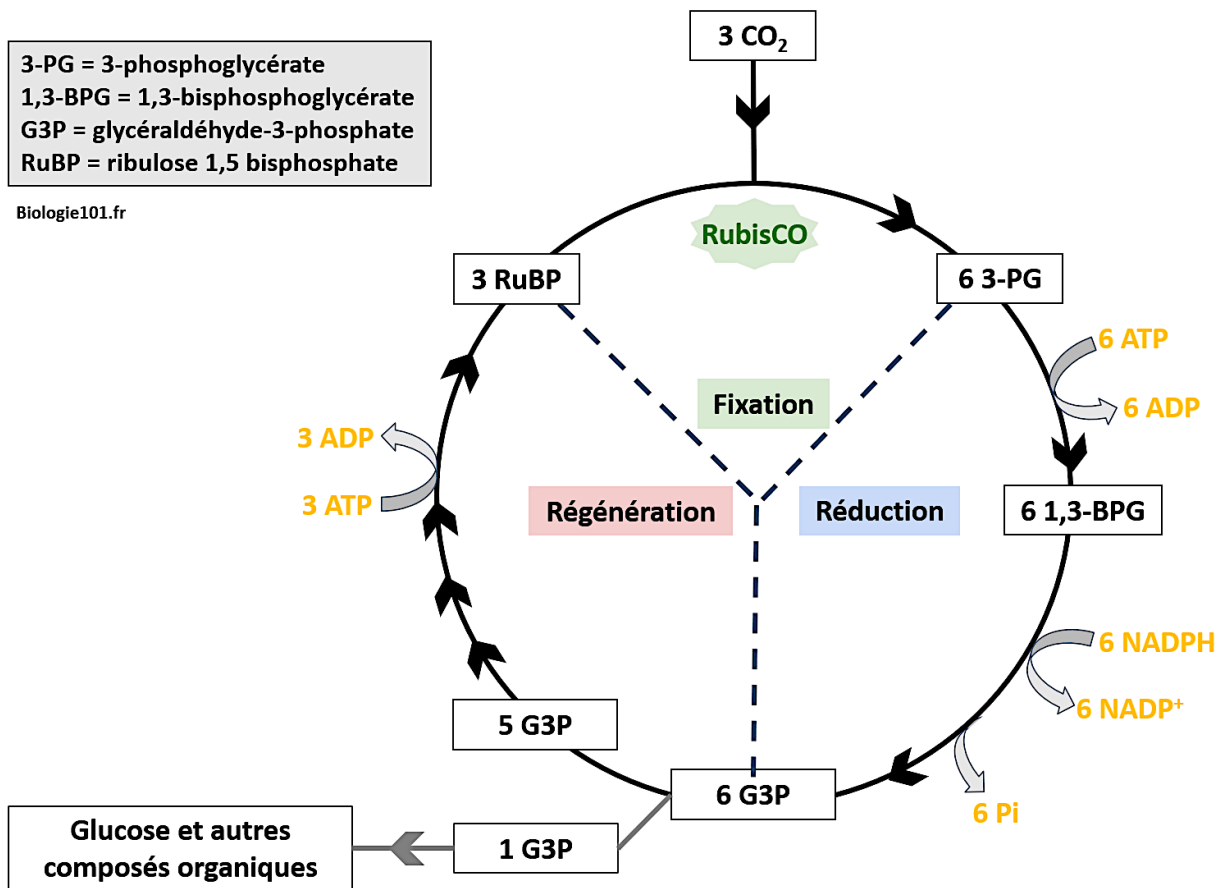
La réduction directe de PG en GAP est-elle thermodynamiquement spontanée ?

Avec quelle étape supplémentaire est-ce rendu possible ?

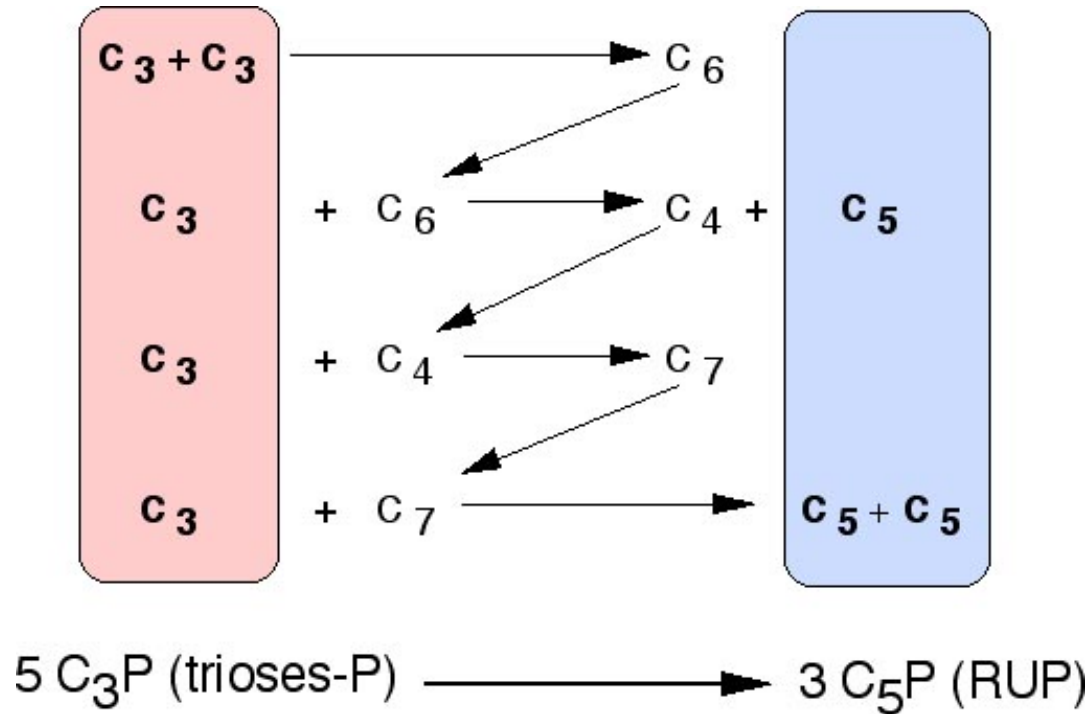
Le cycle de Benson & Calvin (& Bassham)

3-PG = 3-phosphoglycérate
1,3-BPG = 1,3-bisphosphoglycérate
G3P = glycéraldéhyde-3-phosphate
RuBP = ribulose 1,5 bisphosphate

Biologie101.fr



La régénération du RuBP est complexe

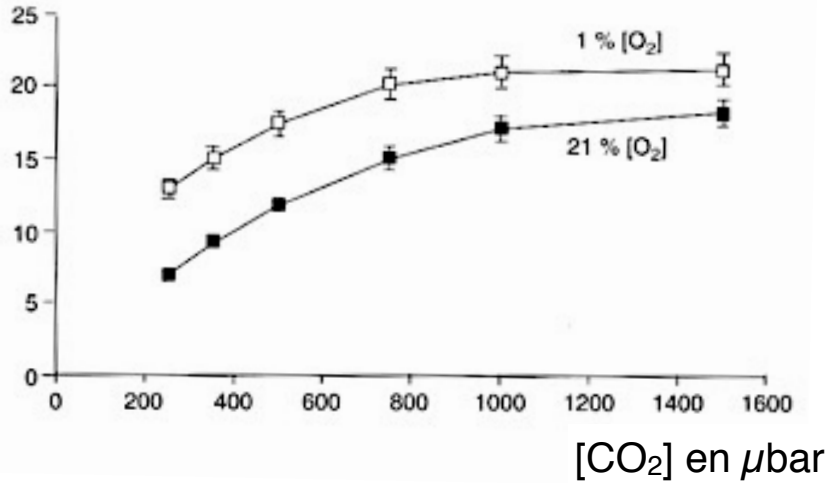


Une enzyme : la RubisCO

- Protéine la plus **abondante** de la biosphère
- Enzyme à structure quaternaire
 - **8 petites sous-unités S** : régulatrices, codées par le génome nucléaire
 - **8 grandes sous-unités L** : catalytiques, codées par le génome du chloroplaste
- activée par la RubisCO activase, elle-même activée par l'**ATP**
- allostérique : activateur **NADPH, H⁺ (lumière)**

Une dualité enzymatique

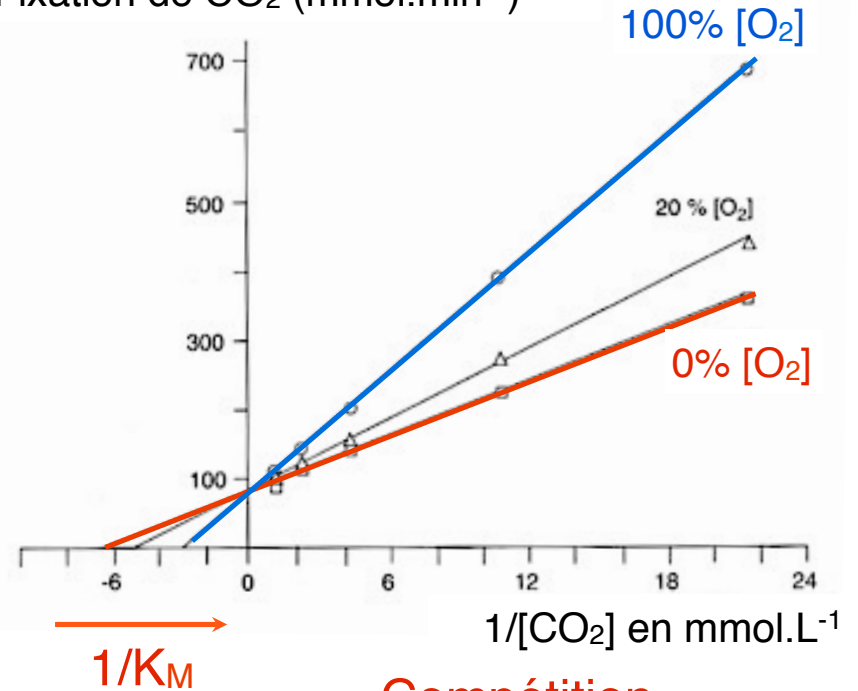
Fixation de CO₂ ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)



Fixation de CO₂ diminuée en présence de O₂

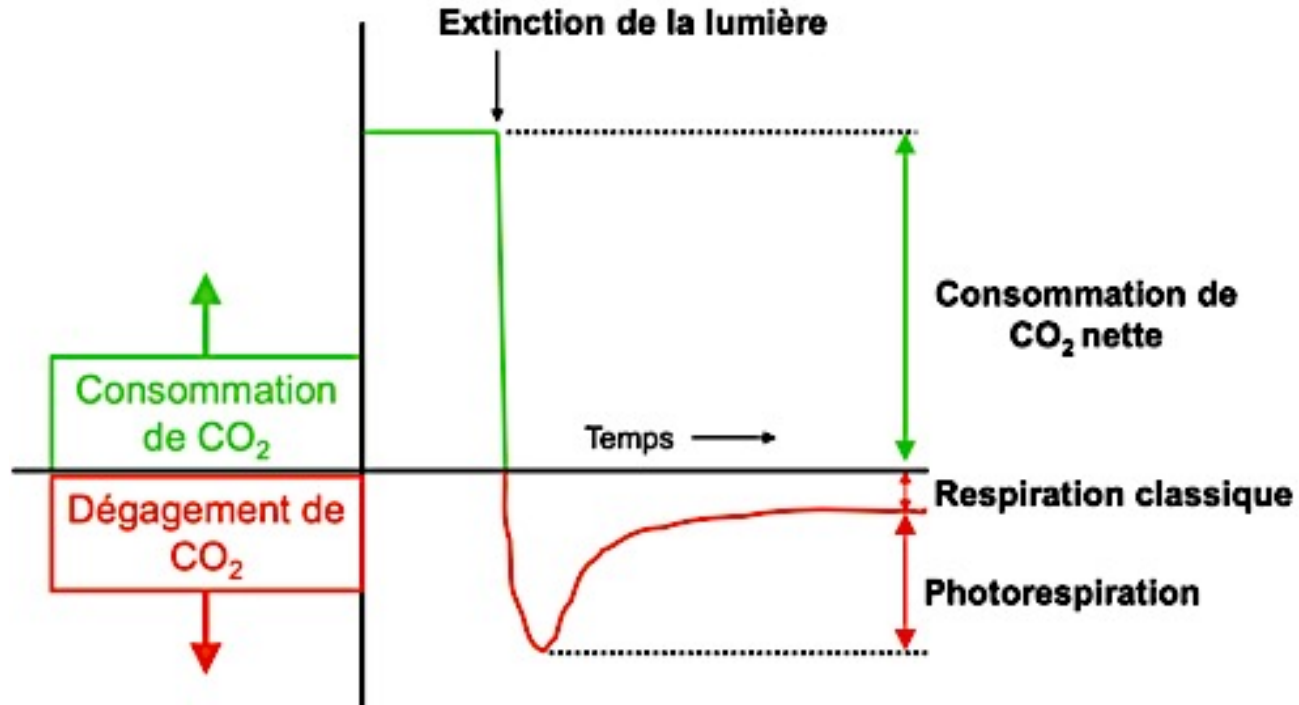
Attention ! La RubisCO est oligomérique mais présente une cinétique michaelienne !

1/Fixation de CO₂ (mmol.min^{-1})

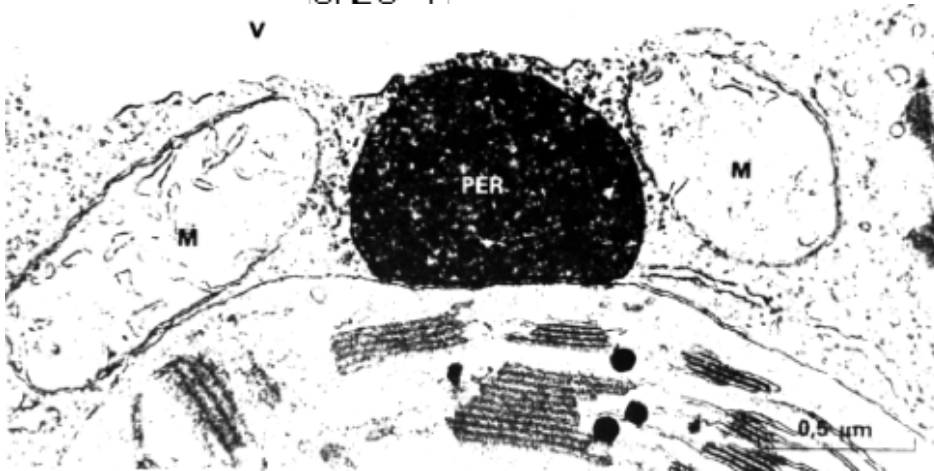
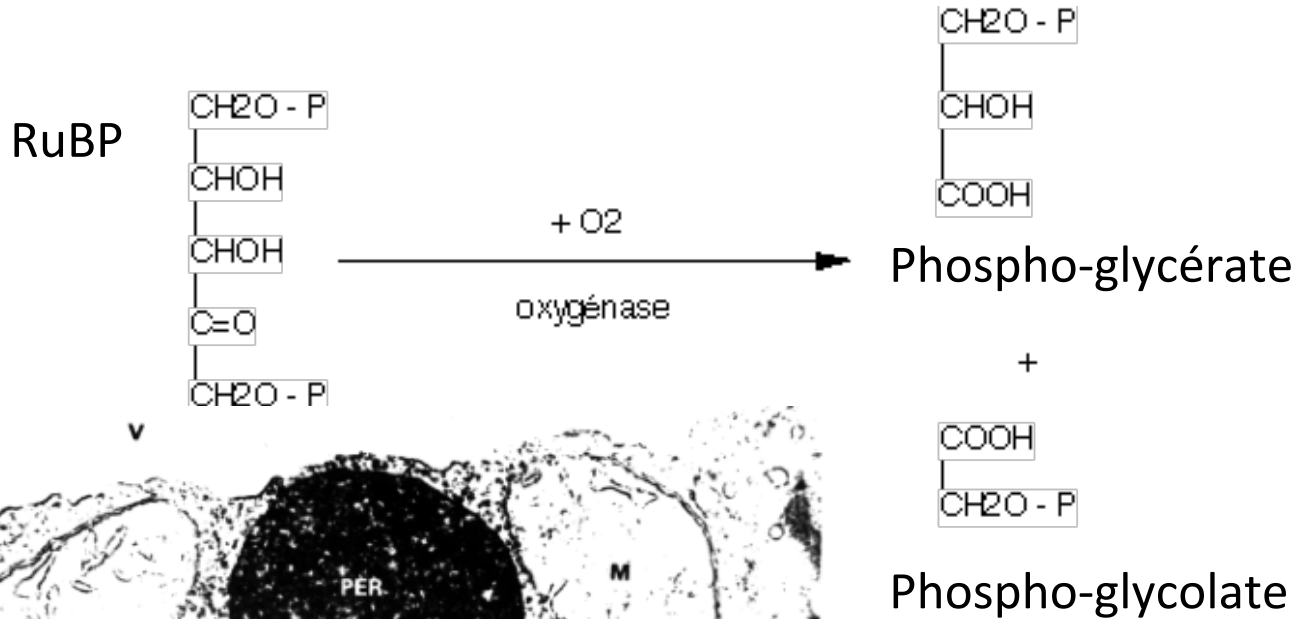


Compétition entre CO₂ et O₂

Deux voies possibles

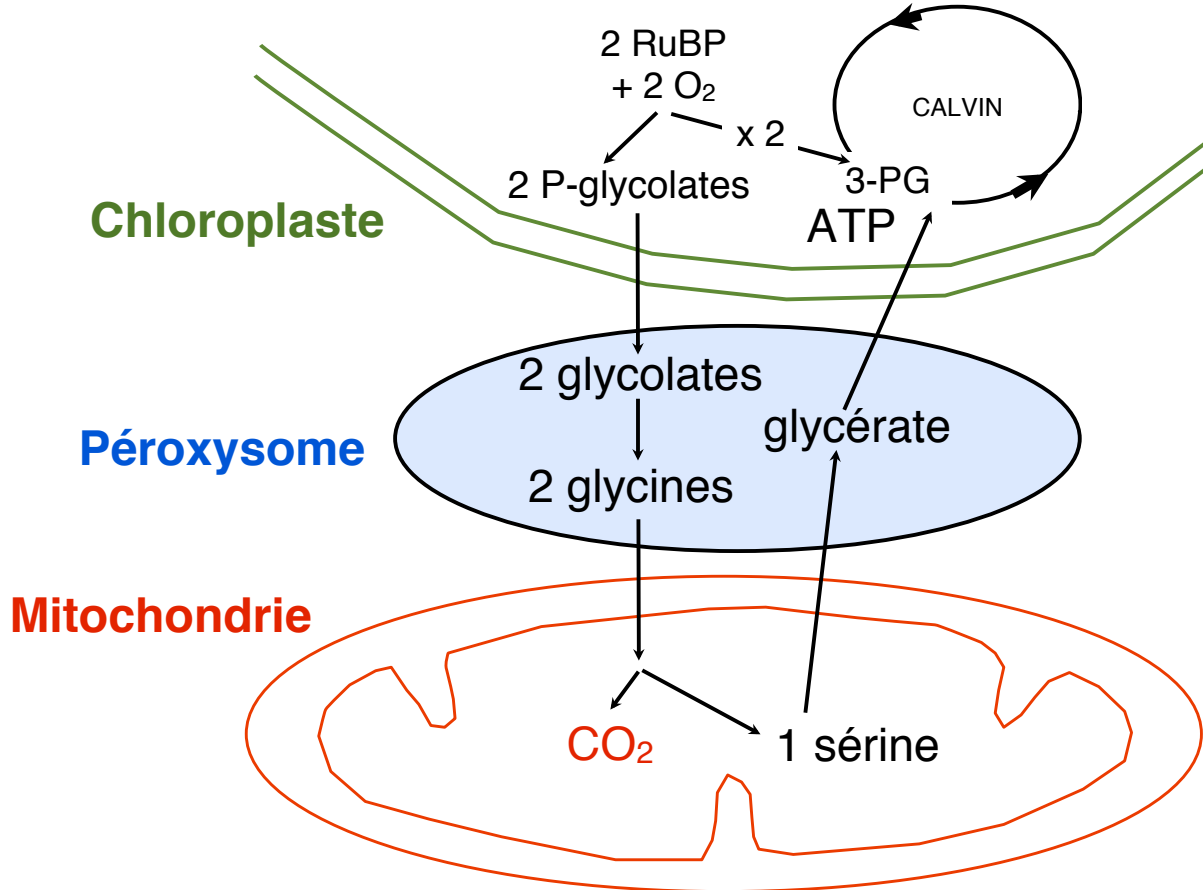


Quand la RubisCO fixe O₂



Des flux de molécules entre les 3 organites

Des transformations

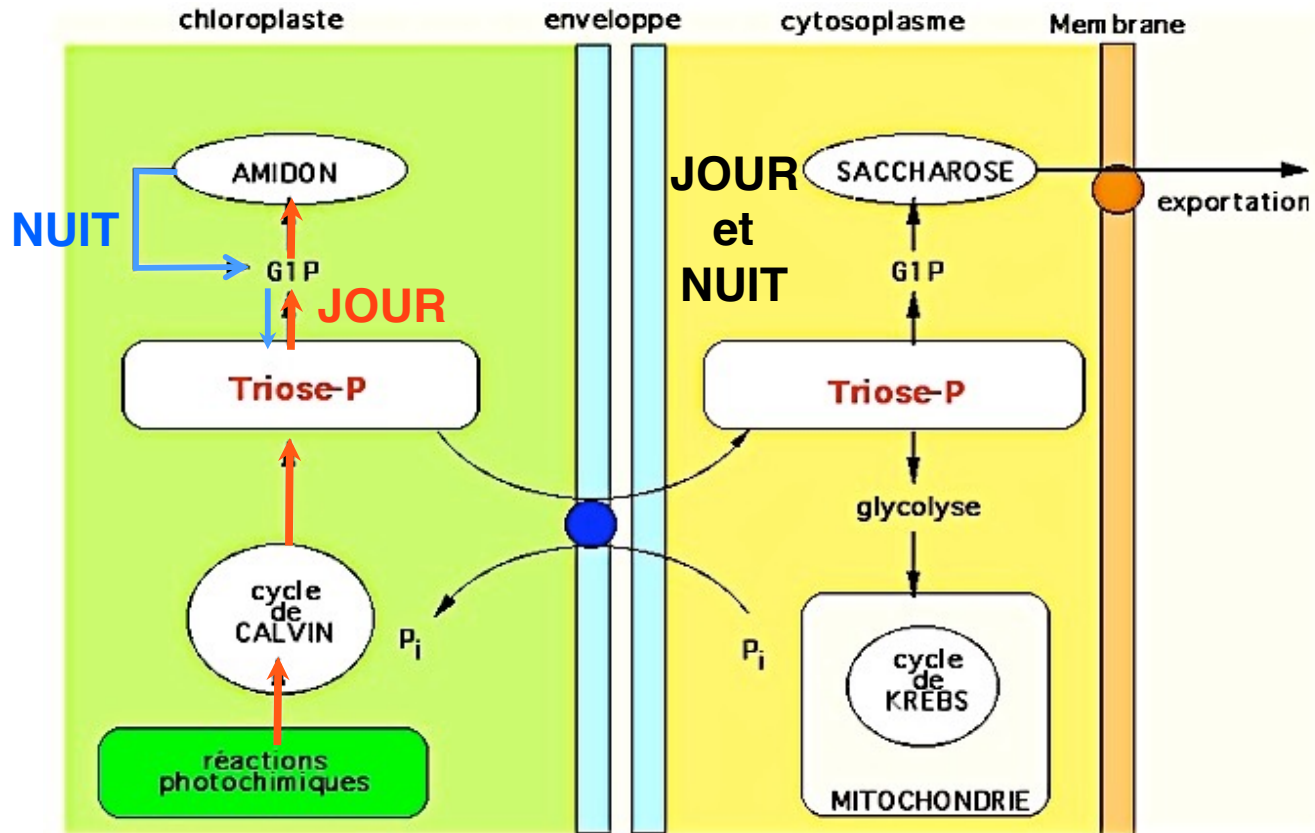


BILAN

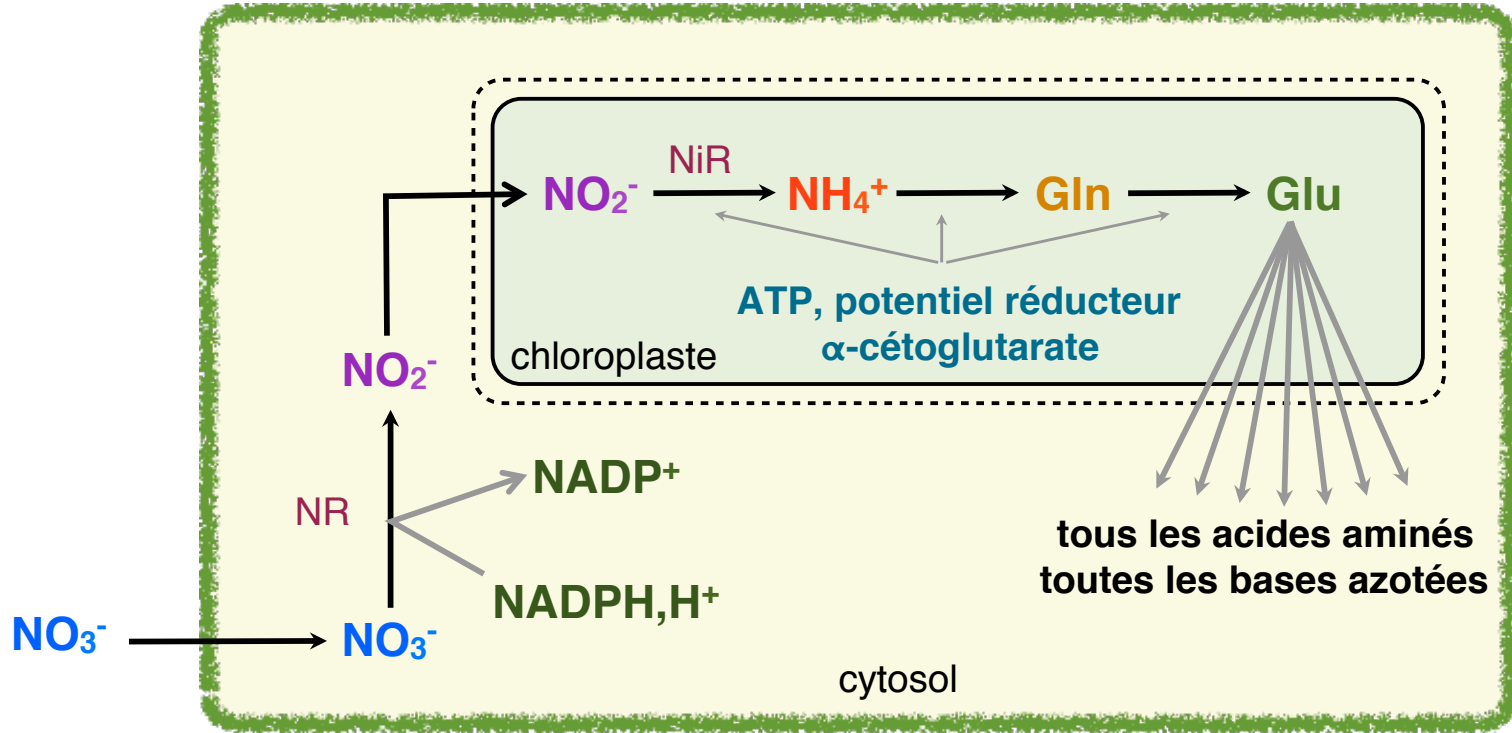
La RubisCO est une enzyme qui fonctionne :

- en **carboxylase** : elle fixe alors CO_2 et le cycle de Calvin produit un triose, le GAP ;
- en **oxygénase** : elle fixe alors O_2 ce qui a pour conséquence de libérer du CO_2 et de consommer l'ATP et le NADPH, H^+ produits à la lumière.

Remarque : le devenir des molécules



Remarque : la fixation de l'azote



Gln = glutamine

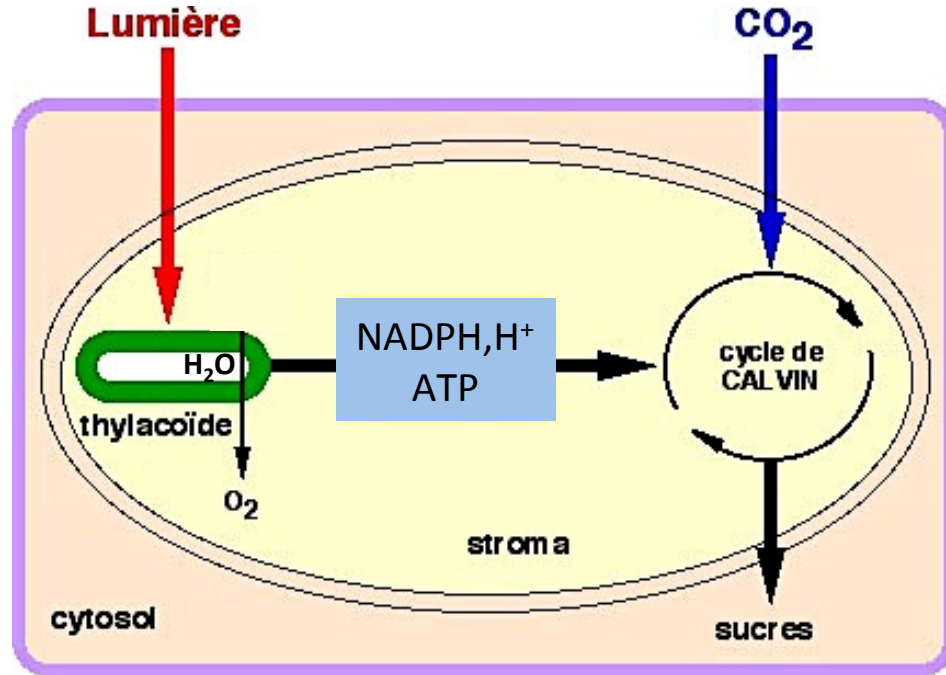
Glu = glutamate

NR = nitrate réductase

NiR = nitrite réductase

BILAN

La photolithotrophie des végétaux

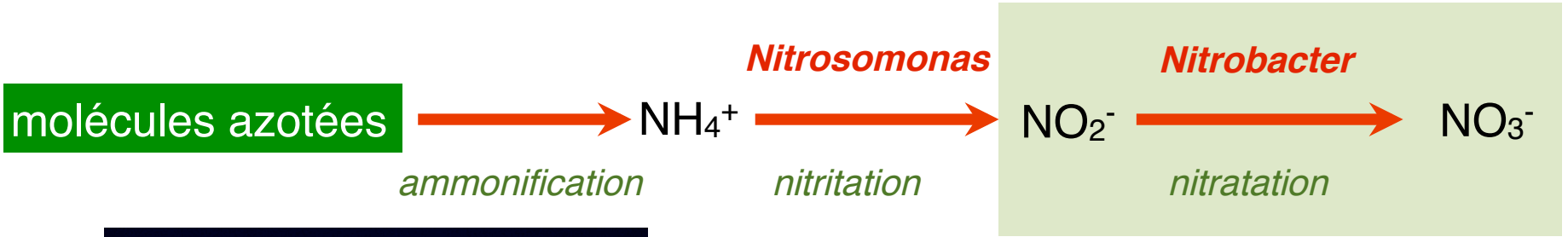


2. L'autotrophie des bactéries nitratantes, une chimiolithotrophie

2.1. Nitrobacter et le cycle de l'azote

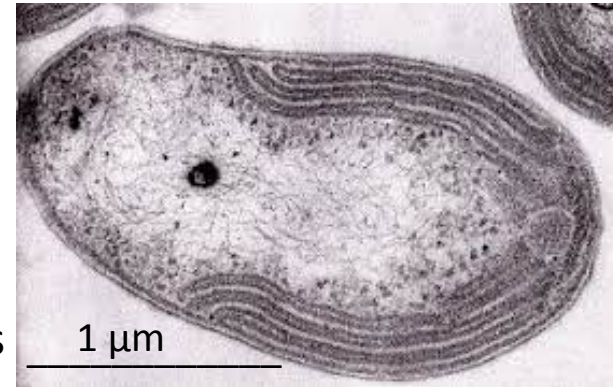
Nitrobacter, une bactérie du sol

La nitratisation est un processus de minéralisation qui a lieu dans le sol, lors de la décomposition des molécules azotées.



Bacilles gram -

MET en fausses couleurs
X 6 000



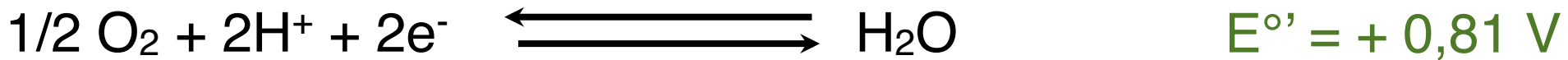
Source : Watson, Microbiology, an Evolving Science, 2014

2. L'autotrophie des bactéries nitratantes, une chimiolithotrophie

2.2. Métabolisme de *Nitrobacter*

Nitrobacter, bactérie autotrophe pour C

couples mis en jeu

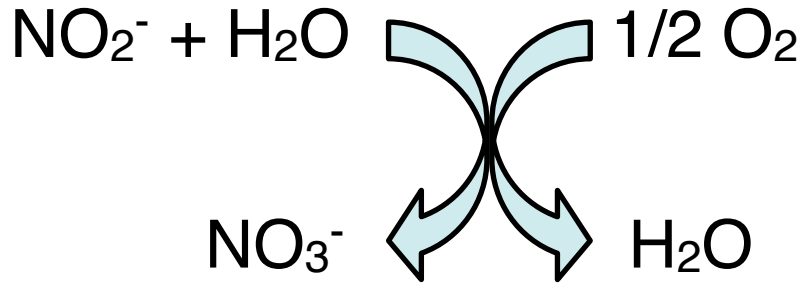


Quelle est la réaction bilan favorable ? Calculer $\Delta_r G^{\circ'}$

Étude de la réaction rédox




Réaction de nitratisation



Comment est réalisé le transfert des électrons ?

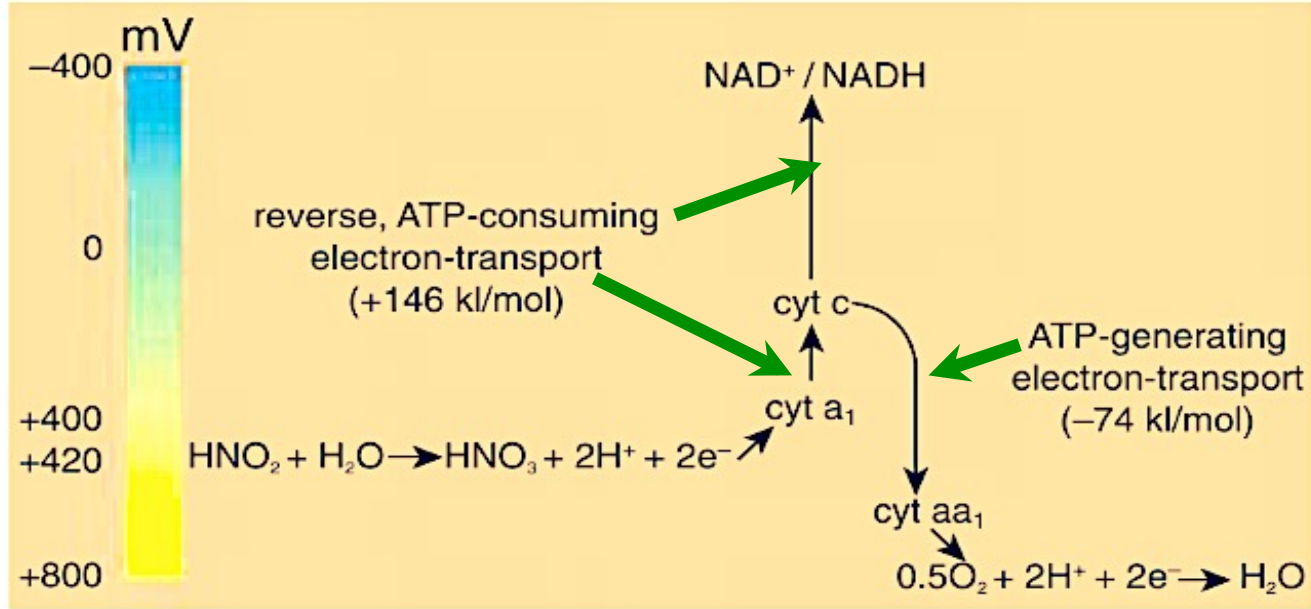
La chaîne de transport des électrons

Composé rédox mis en jeu	E° en mV
NO_2^-	+ 420
cytochrome a1c1	+ 310
cytochrome c	+ 260
cytochrome a1a3	+ 385
O_2	+ 810

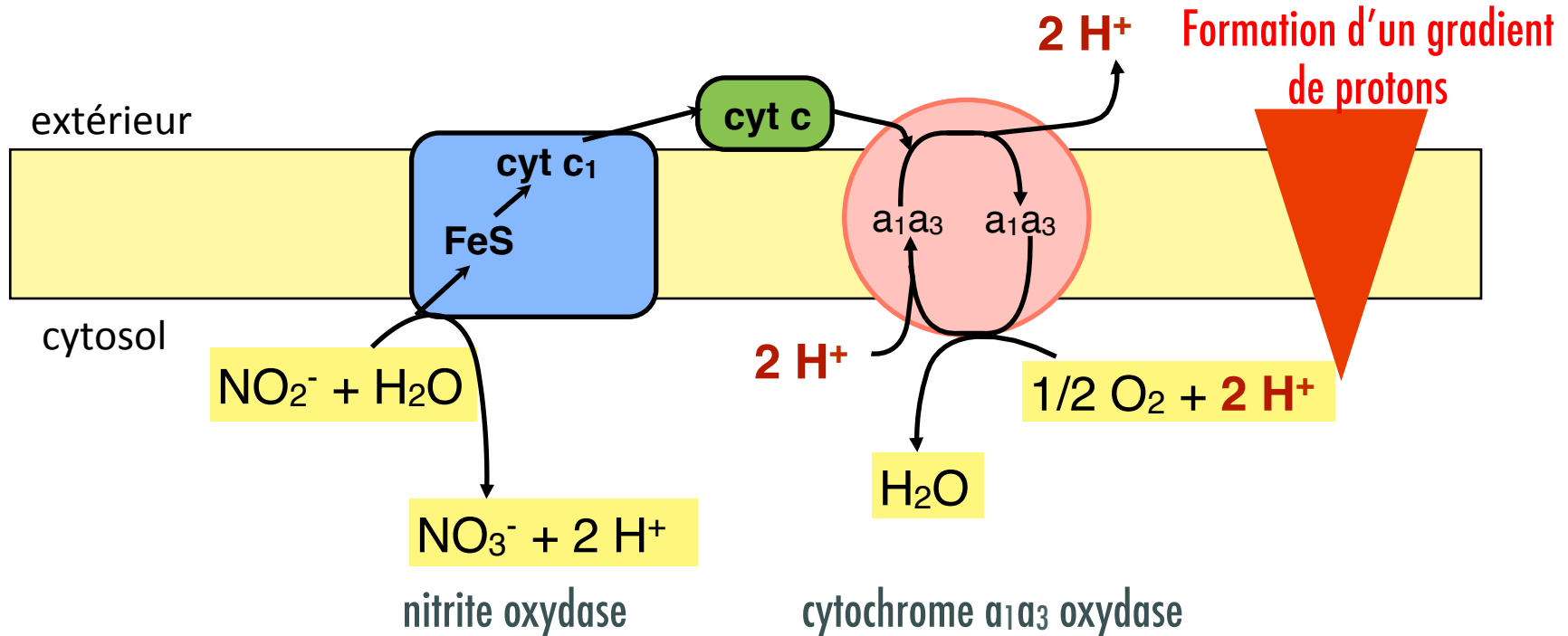


sens de transfert des électrons

Transfert d'électrons chez *Nitrobacter*



Formation d'un gradient de protons



L'oxydation de NO_2^- permet de former un gradient de protons exploitable pour produire de l'ATP.

Les 2 utilisations du gradient de protons

La production de NADH, H^+ est défavorable à partir de NO_2^- mais un système force le passage des électrons vers NAD^+ en utilisant le potentiel osmotique du gradient d' H^+ .

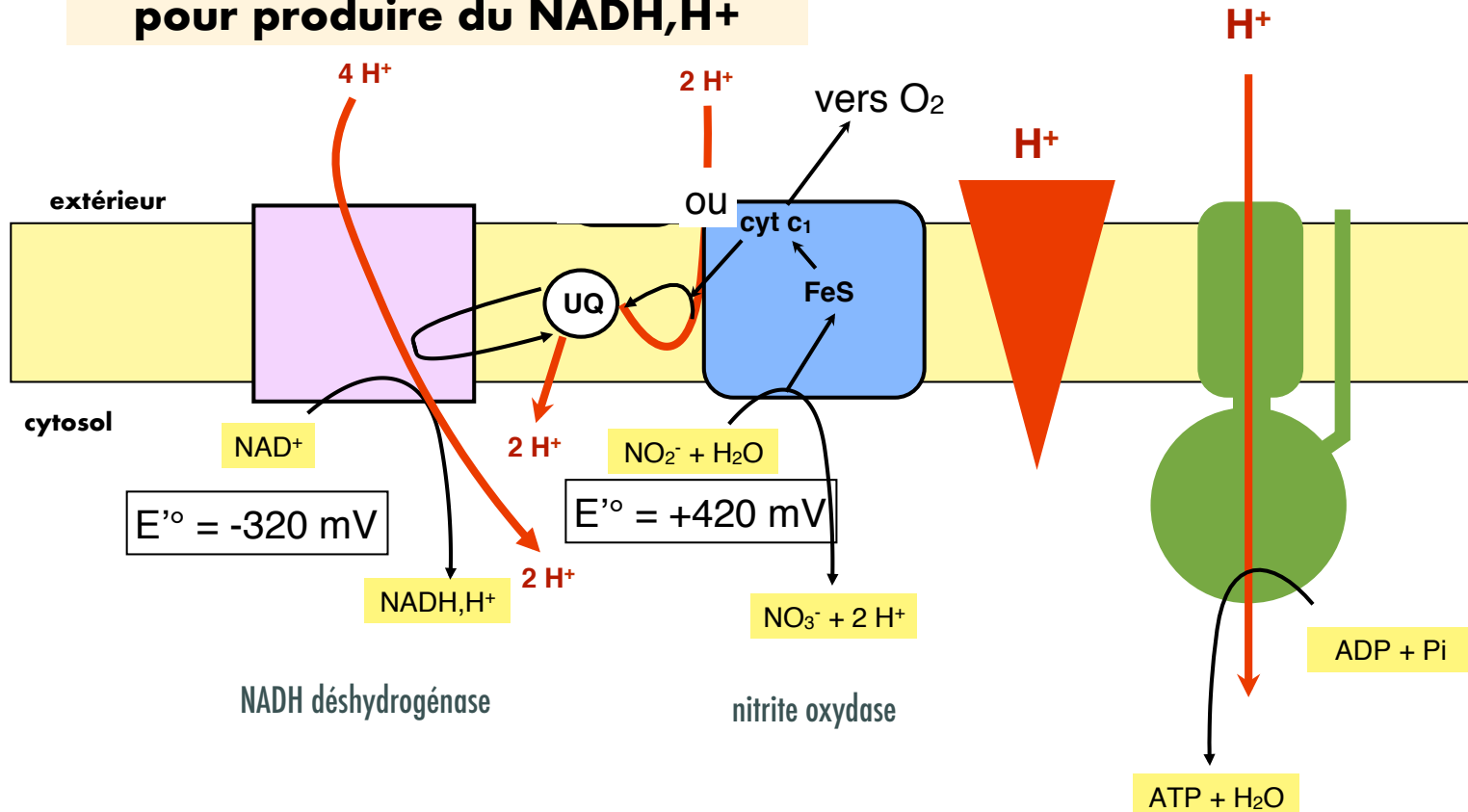
Le gradient d' H^+ est aussi converti en ATP par une ATP synthase.

Analogie avec le chloroplaste (et la mitochondrie)

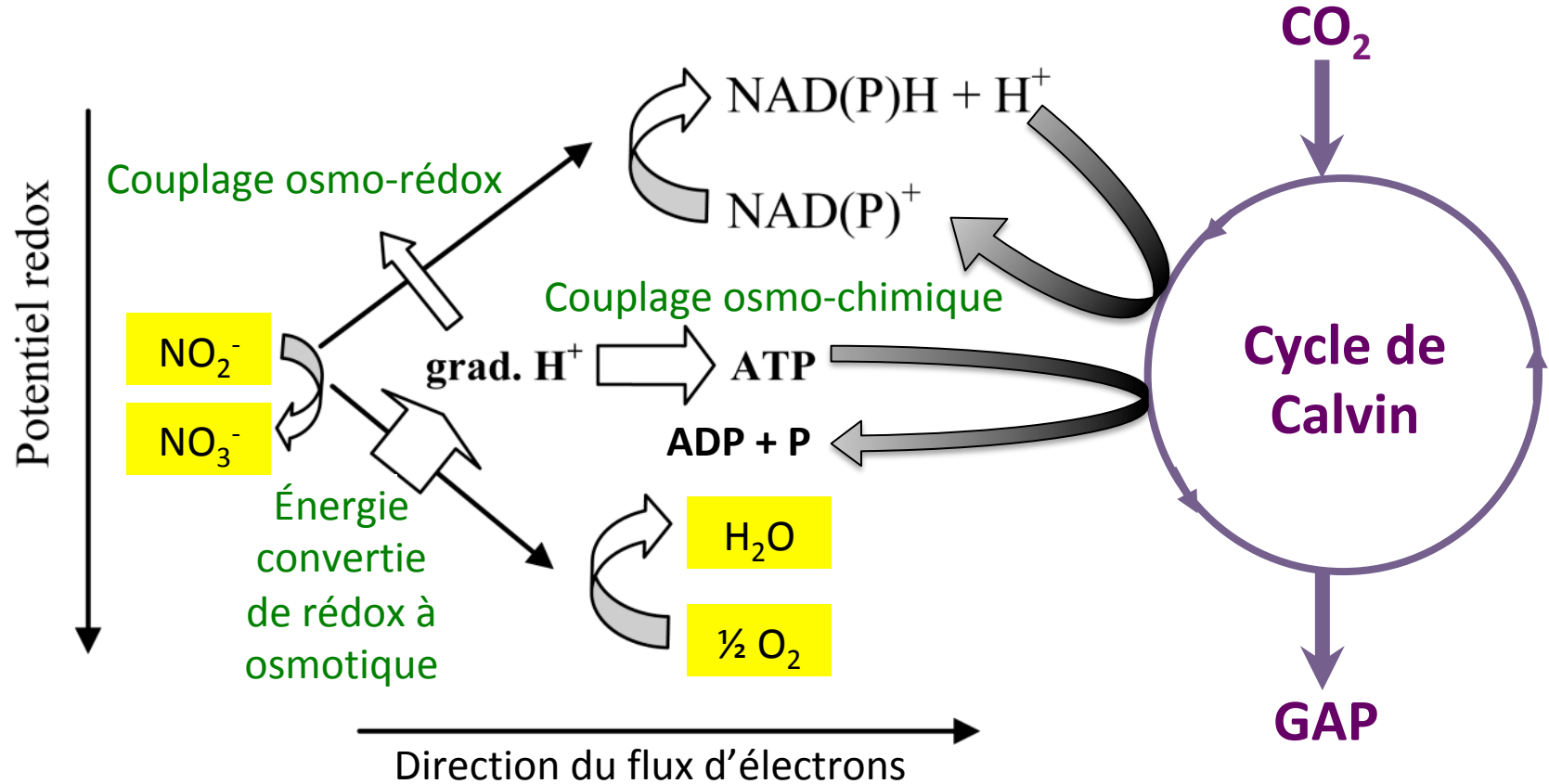
Les 2 utilisations du gradient de protons

Forcer le transfert d'électrons pour produire du NADH, H⁺

Produire de l'ATP



BILAN



Bilan de *Nitrobacter*

L'oxydation de NO_2^- est utilisée pour :

- produire de l'ATP par une chaîne rédox spontanée et l'exploitation d'un gradient de protons ;
- produire du NADH, H^+ par une voie endergonique dépendante d'un gradient de protons.

ATP et NADH, H^+ permettent à la bactérie de réduire CO_2 pour produire de la matière organique : la bactérie est donc **autotrophe**.

Elle ne nécessite pas de lumière puisque sa source énergétique est l'oxydation de matière minérale (énergie chimique).

***Nitrobacter* est dite « chimiolithotrophe ».**

3. L'hétérotrophie des Mammifères, une chimio-organotrophie

Construire un schéma montrant l'enchaînement des étapes depuis l'ingestion des aliments jusqu'à l'entrée des nutriments dans la cellule.

Exemple pris : le glucose issu de l'amidon

Ingestion d'amidon

Amidon

amylase

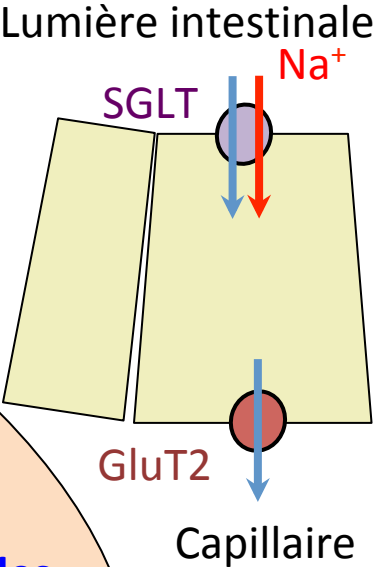
Glucose

Absorption par les entérocytes

Circulation sanguine

Absorption par la cellule (perméase)

Détail de l'absorption intestinale



CONCLUSION

		Source de matière	
		minérale	organique
Source d'énergie	lumineuse	Photolithotrophe bactéries photosynthétiques, algues, plantes	Photo-organotrophe pas d'espèce, état transitoire
	chimique	Chimiolithotrophe bactéries nitrifiantes (Nitrobacter), archées	Chimio-organotrophe animaux, champignons, certaines bactéries