

# Cours n°8

## Les plastes et mitochondries

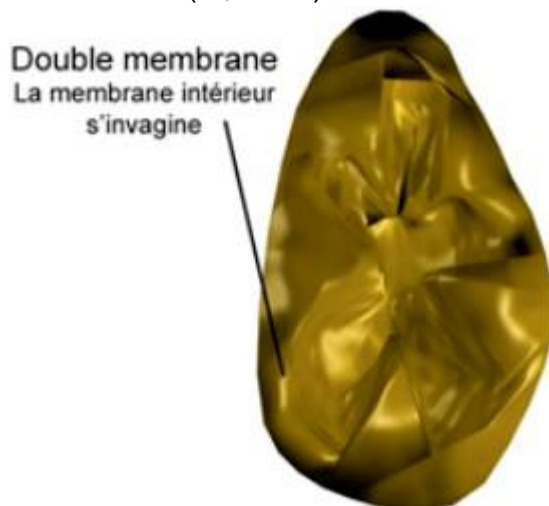
### I\_ Comparaison entre cellules eucaryotes et procaryotes

La cellule eucaryote est beaucoup plus compliquée et compartimentée que la cellule procaryote.

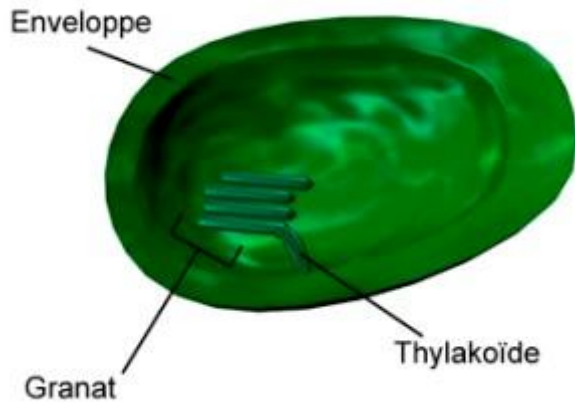
- | Cellule procaryote :
  - \_ Paroi extracellulaire : protection, rôle mineur dans les échanges
  - \_ Membrane biologique : barrière qui gère les échanges et qui peut s'invaginer
  - \_ Le génome n'est pas individualisé ni protégé
- | Cellule eucaryote :
  - \_ Noyau : regroupe les gènes
  - \_ Réticulums endoplasmiques : continus avec le noyau
  - \_ Appareil de Golgi : produit des vésicules de sécrétion

### II\_ Organisation comparative des plastes et mitochondries

q Mitochondries ( 0,1  $\mu\text{m}$  )



q Chloroplastes ( 1  $\mu\text{m}$  )



## A. Endosymbiose primaire

Origine :

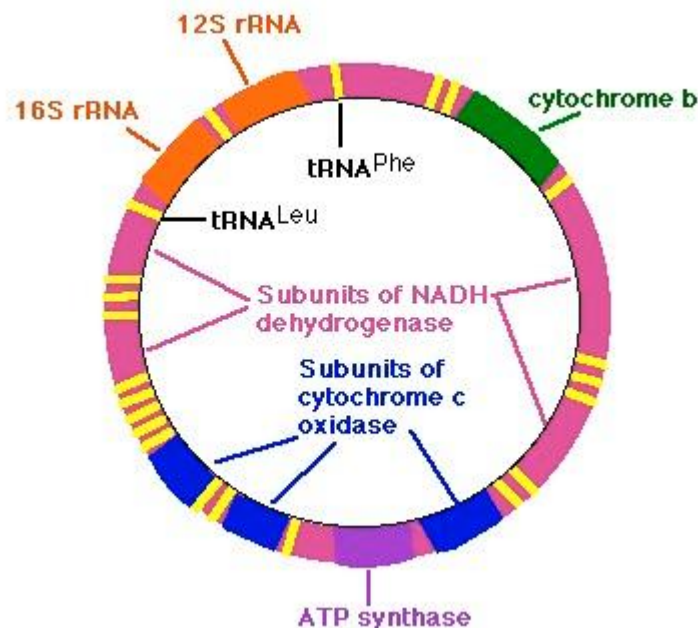
à Endosymbiose : association entre cellules eucaryotes animales primitives avec :

- Z Des bactéries (  $\alpha$ -protéobactéries ) : *Rickettsia* aurait donné nos mitochondries
- Z Des cyanobactéries : elles auraient donné les plastes ( notamment les chloroplastes )

## B. Existence de plusieurs ponts génétiques

Organisation génétique de la cellule eucaryote :

- \_ 99% **dans le noyau** est sous forme d'ADNn
- \_ Dans les mitochondries, de l'ADN mitochondrial ( ADNmt )
- \_ Dans les chloroplastes, de l'ADN chloroplastique



L'ADNmt humain est une molécule circulaire d'exactly 16 kpb qui lui est essentiel pour fonctionner.

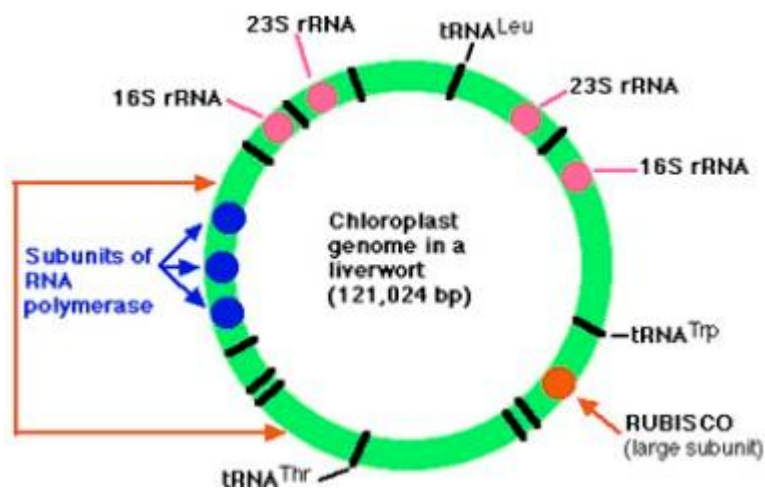
- q 2 gènes qui codent pour de l'ARNr
- q 22 gènes qui codent pour de l'ARNt

- q 13 gènes qui codent pour le métabolisme de la mitochondrie
  - q Pour la déshydrogénase ( NADN )
  - q Pour la cytochrome oxydase ( fonctionnement de la mitochondrie )
  - q Pour le cytochrome b

Or, on trouve un millier de protéines dans la mitochondrie. En effet la majeure partie est codée par l'ADNn.

è Au cours de l'évolution, une partie du génome mitochondrial a migré vers le noyau.

L'ADNn des plantes est plus grand et plus compliqué que l'ADNn des animaux mais l'ADNmt des plantes et des animaux sont très proches. L'essentiel de l'ADN est non-codant et est appelé "ADN poubelle".



L'ADN chloroplastique est beaucoup plus gros que l'ADNmt ( 121 kpb ).

- q 4 gènes qui codent pour des sous-unités d'ARNr
- q 4 gènes qui codent pour des ARN polymérase
- q 19 gènes qui codent pour des protéines de structure du ribosome
- q 16 gènes qui codent pour la photosynthèse
  - q Pour la protéine RubisCO
  - q Pour des protéines servant au photosystème I et II
  - q Pour le système enzymatique de l'ATP synthase ( fabrication de l'ATP )

Peu de gènes ont été retenus dans les mitochondries et les chloroplastes et ils servent essentiellement à générer de l'énergie. Ce sont en quelque sorte les "centrales énergétiques" de la cellule.

Le chloroplaste contient plus d'ADN répliqué que dans la mitochondrie.

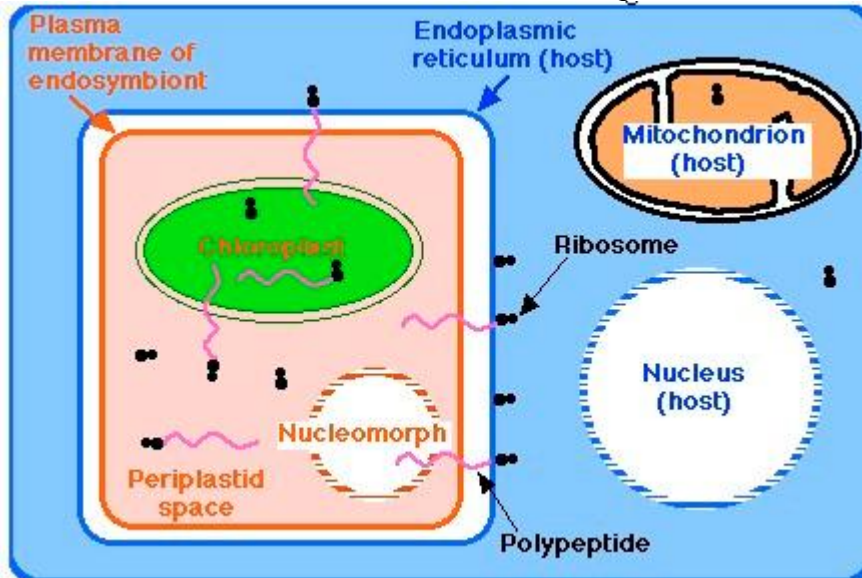
Les ARN provenant du noyau commencent toujours par le codon AUG qui code pour la Méthionine tandis que les ARN en provenance des mitochondries ou des chloroplastes commencent toujours par un codon pour la f-Met ( = formylméthionine ).

La streptomycine et la rifampicine inhibent respectivement la traduction et la transcription des ADN et ARN des mitochondries et des chloroplastes mais n'agit pas sur le noyau.

## C. Endosymbiose secondaire

C'est l'absorption d'une cellule par une autre cellule. L'organisme final aura donc deux patrimoines génétiques.

à Cellule animale absorbant une cellule végétale :



Les organismes possédant cette organisation s'appellent les cryptomonades. Ce seraient des protozoaires qui auraient absorbé des algues rouges. Ces organismes disposent de 4 réservoirs génétiques : l'ADN du noyau, l'ADNmt, l'ADNct et un autre ADN appelé nucléomorphe. Il est beaucoup moins gros que celui de l'ADN nucléaire mais est quand même fonctionnel.

Le nucléomorphe est en fait le vestige du noyau absorbé :

- | Entouré par une double membrane parsemée de "pores nucléaires"
- | Organisé en chromosomes
- | Contient des gènes codant pour les histones ( chez les bactéries il n'y a pas ce type de gène )
- | Contient des gènes codant pour des ARNm, des ARNr et des ARNs ( = qui restent à l'intérieur du noyau ) ainsi que des gènes chloroplastiques.
- | Contient des gènes intervenant dans la réplication de l'ADN

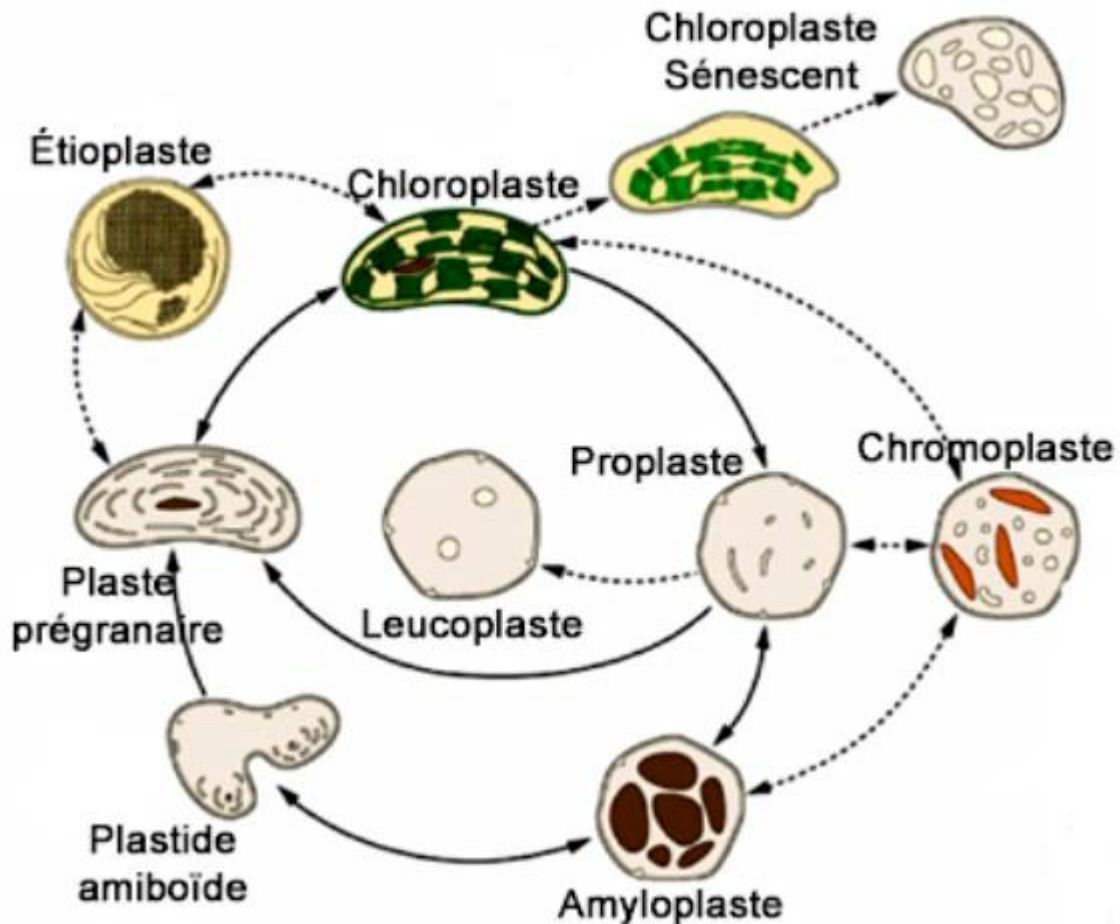
L'apicoplaste est un organe que l'on trouve chez certains protozoaires tels que *plasmodium falciparum* ( agent de la malaria ). Cet organe a une structure proche de celle du chloroplaste bien qu'il ne puisse pas effectuer de photosynthèse. Il est entouré par deux doubles membranes.

Il contient des gènes codant pour des ARNt, des ARNr, la réplication de l'ADN, la transcription, la traduction.

à On suppose que le protozoaire avait absorbé une cellule ne contenant qu'un chloroplaste, et que le nucléomorphe a disparu ou a migré et l'ADNct a muté.

## III\_ Types de plastes et évolution

Tous les plastes possèdent une double membrane appelée l'enveloppe. Ils peuvent avoir une morphologie variable.



Tous les plastes des cellules végétales dérivent du proplaste. Ce plaste est potentiellement vide, seulement quelques débuts de structure sont observables mais il possède une grande capacité de différenciation :

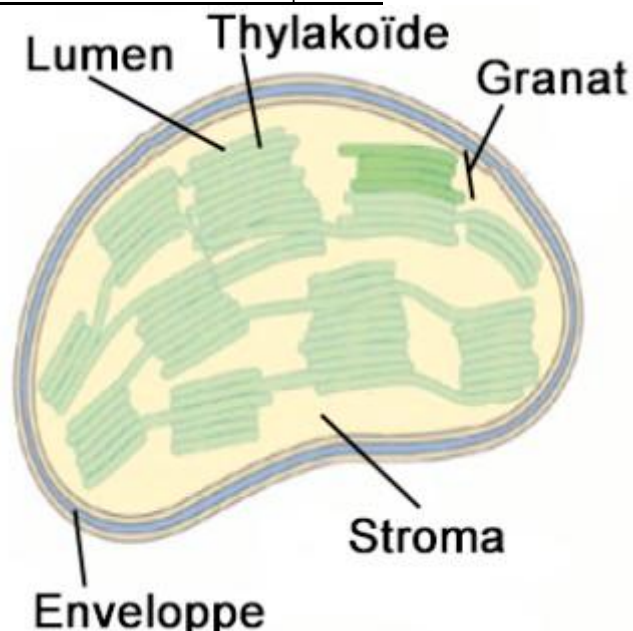
- q Chromoplaste ( ex : chez la tomate ) ; il contient des caroténoïdes de couleur orangée en grande quantité
  - q Fonction de stockage
  - q Peut se dédifférencier en proplaste
- q Amyloplaste ( ex : chez la pomme de terre ) ; il contient beaucoup d'amidons et des produits photosynthétiques
  - q Fonction de stockage
  - q Peut se dédifférencier en proplaste
- q Leucoplaste ; il contient des lipides particuliers
  - q Fonction de stockage
  - q Peut se dédifférencier en proplaste
- q Plaste prégranaire ; c'est une étape intermédiaire où les organites à l'intérieur du plaste se multiplient.
  - q Peut se dédifférencier en proplaste
- Z S'il ne reçoit pas de lumière, il se différencie en étioplaste ; ce plaste contient un corps prélamellaire
  - q Contient tous les "ingrédients" nécessaires pour être un chloroplaste. Il peut à tout moment en devenir un
  - q Peut se dédifférencier en plaste prégranaire



- Z S'il reçoit de la lumière, il se différencie en chloroplaste
- q S'il n'a pas de lumière, il devient un étioplaste
- q Peut se différencier en plaste prégranaire
- q Peut se différencier directement en proplaste
- q Quand le chloroplaste "vieillit", il se transforme peu à peu en chloroplaste sénéscent

## IV Les chloroplastes : photosynthèse, transport d'électrons et phosphorylation

Structure du chloroplaste :



À l'intérieur du chloroplaste ont lieu deux réactions très importantes :

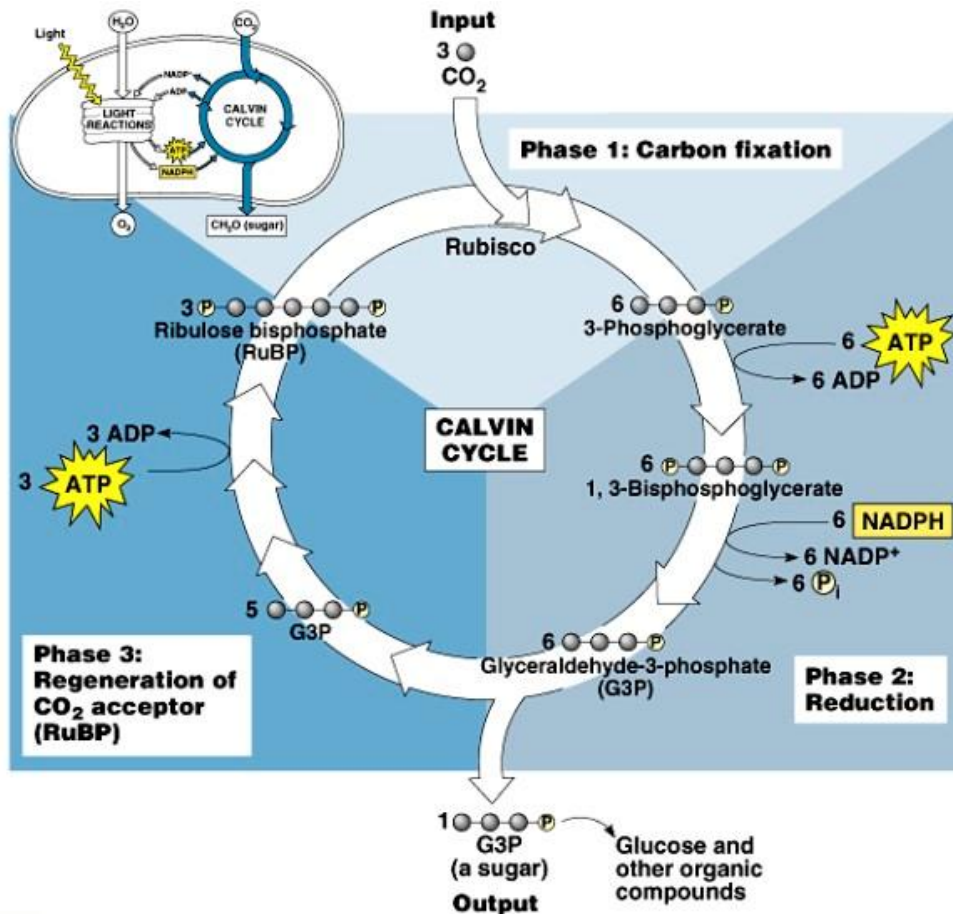
- \_ la fixation du  $\text{CO}_2$  à au niveau du stroma
- \_ la réaction de dégagement de  $\text{O}_2$  à au niveau du thylakoïde

### A. Le cycle de Calvin et les besoins en NADPH et en ATP dans le stroma

Grâce à la méthode de Calvin, on a pu connaître peu à peu les différentes molécules qui agissent pendant la photosynthèse.

On a ainsi le **cycle de Calvin** :

On peut remarquer que le cycle utilise de l'**ATP** ( Adénosine TriPhosphate ) et du **NADPH** ( Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate Hydrogénée ). Ils sont fabriqués au niveau des thylakoïdes lors du dégagement de  $\text{O}_2$ .



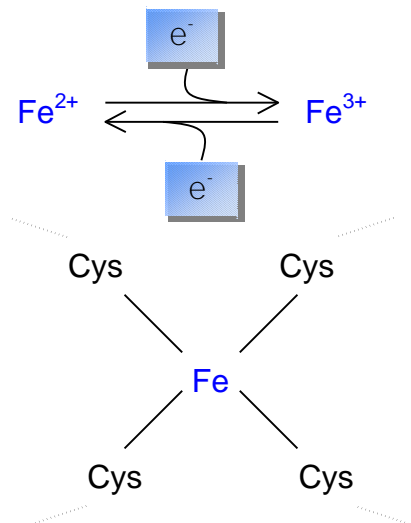
## B. Les composants des chaînes de transfert des électrons

Le transfert des électrons exploite une propriété chimique de l'atome de fer sous sa forme anionique :

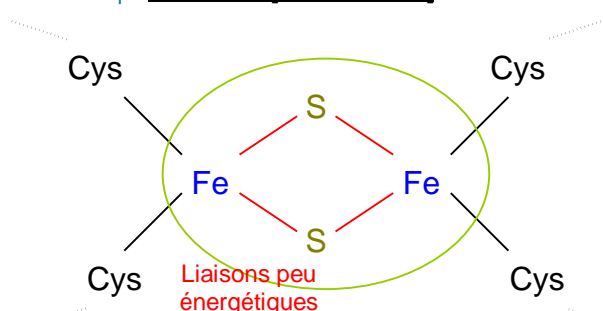
Plusieurs modèles atomiques permettent d'obtenir un transfert d'électrons :

I Centres fer - soufre :

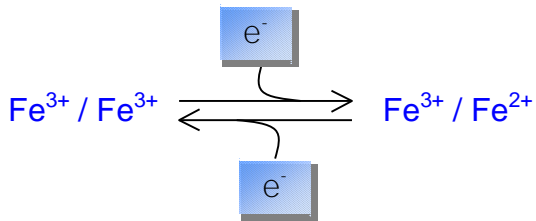
Chez les bactéries existe un mécanisme très ancien déjà présent dans les archéobactéries :



q Centres [ 2Fe - 2S ] :



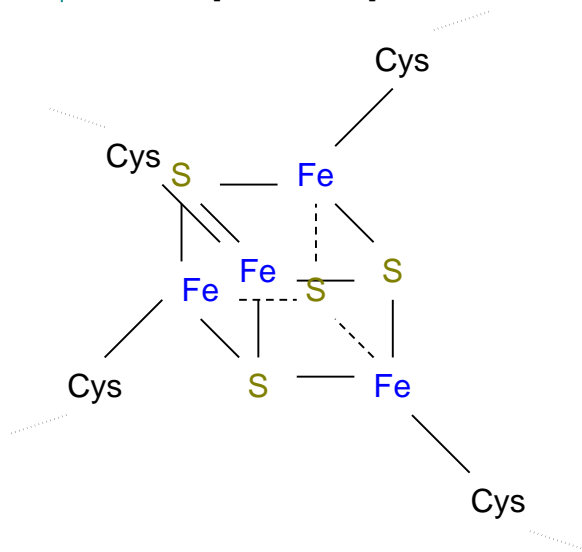
Z Mécanisme :



à Les ions sont normalement repoussés dans les membranes du type de celles des thylakoïdes. Ainsi on retrouve ces ions profondément enfoncés dans une protéine.

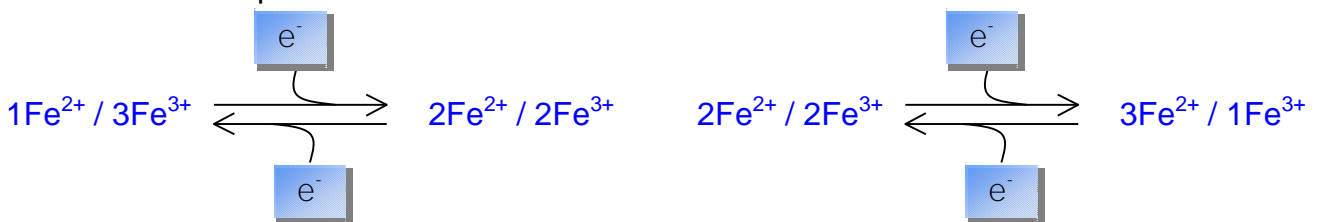
à On remarque aussi qu'un seul atome de fer participe à l'échange, l'autre ne semble participer qu'au maintien de la molécule.

q Centres [ 4Fe – 4S ] :



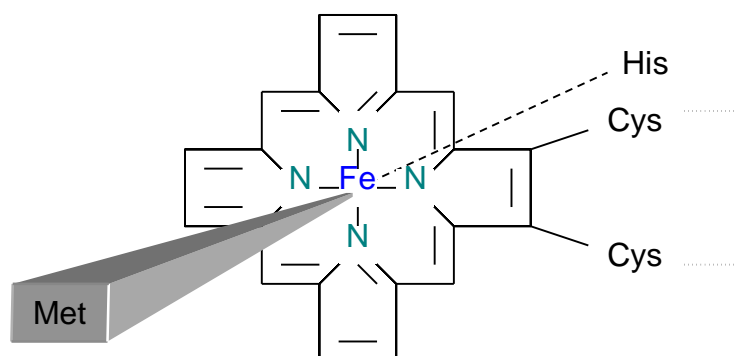
Z Mécanisme :

Cette structure ne permet que de transporter un électron à la fois, mais de deux manières possibles :



D'autres structures plus récentes dans l'évolution existent et utilisent d'autres atomes :

I Les hèmes :



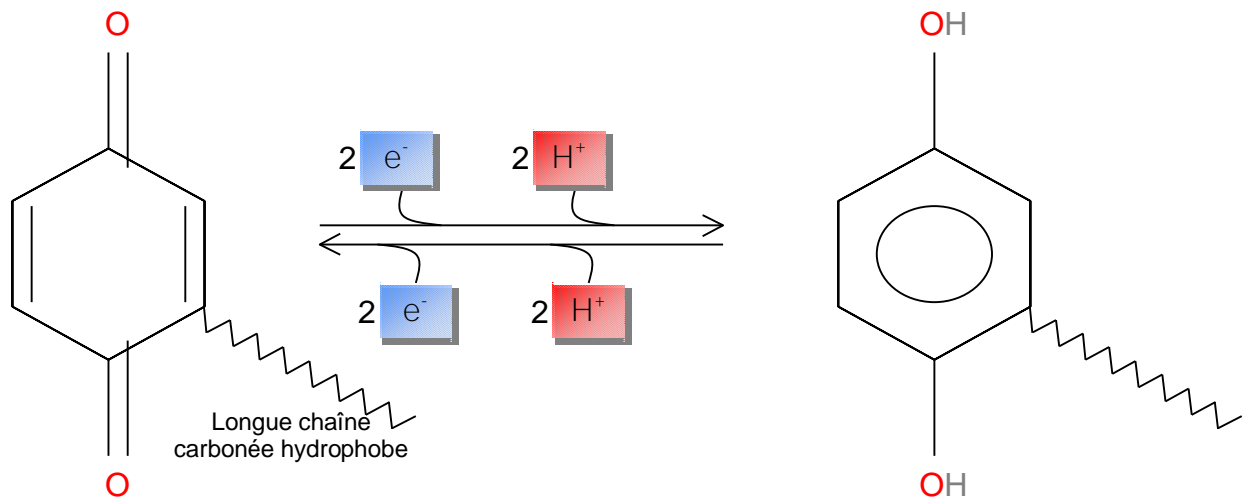


Les hèmes sont liés à l'intérieur d'une protéine : les hémoprotéines. Ayant un caractère hydrophobe, ils se cachent à l'intérieur de la protéine.

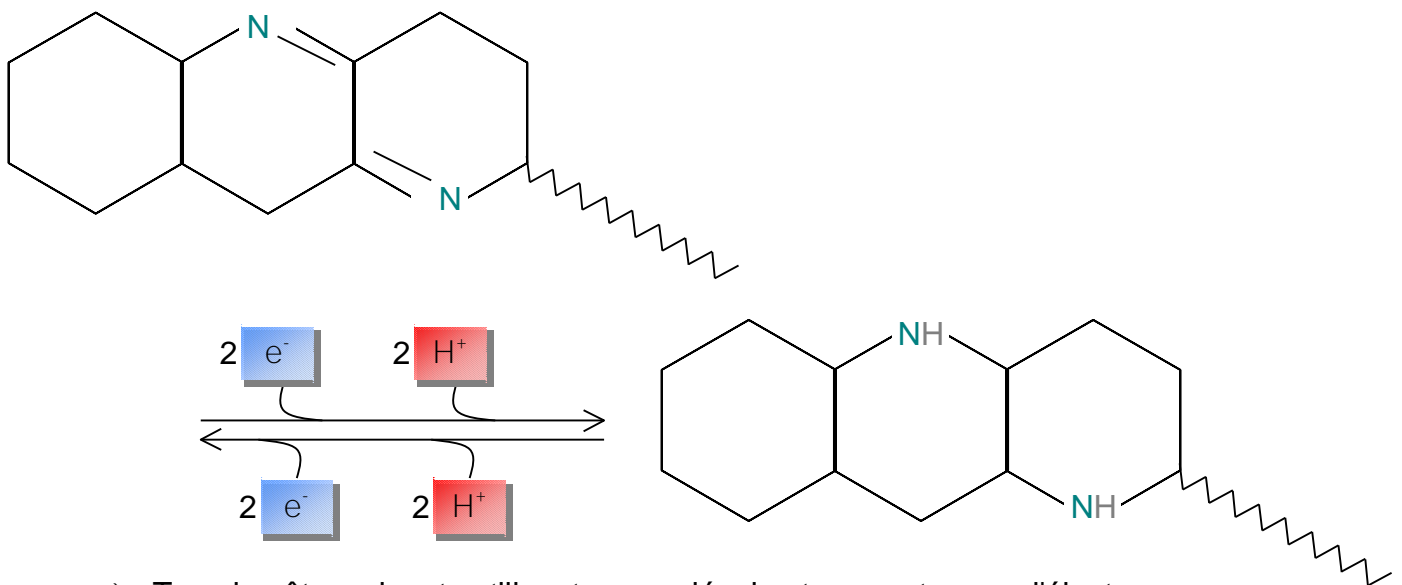
Ces hémoprotéines ont plusieurs formes :

- \_ cytochromes a : Fe + Cu
- \_ cytochromes b : Fe
- \_ cytochromes c

### I Les quinones



### I Les flavines



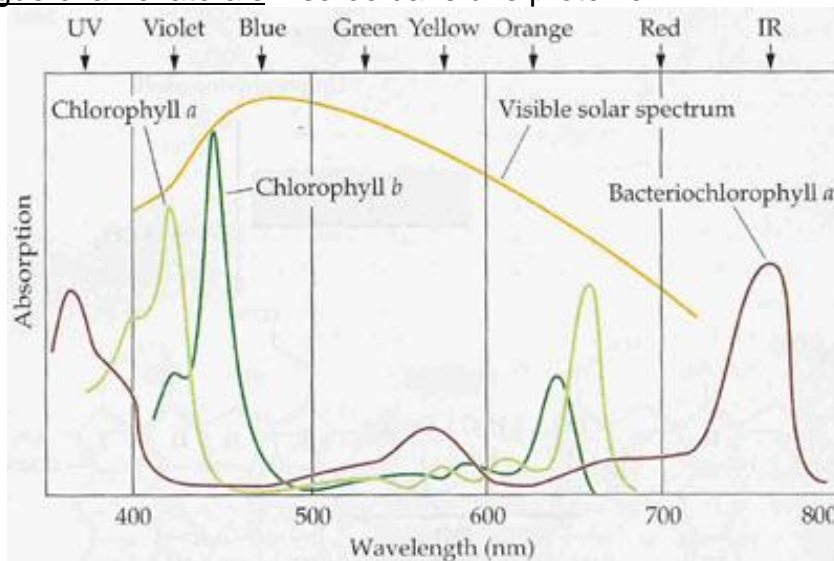
è Tous les êtres vivants utilisent ces molécules transporteuses d'électrons.

## C. Les pigments de la photosynthèse

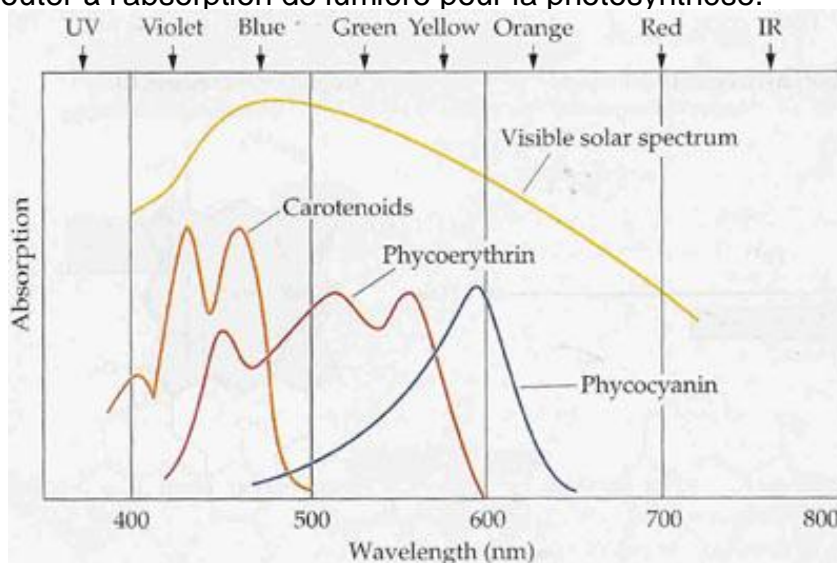
Il y a besoin d'énergie pour fabriquer le glucose à partir de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>. Pour cela, la cellule dispose de pigments :

- Z Chlorophylle a : elle joue le rôle principal dans la photosynthèse
  - q C'est la plus effective et la plus commune
- Z Chlorophylle b
- Z Bactériochlorophylle a : dans certaines bactéries

La chlorophylle est formée d'un hème avec du magnésium à la place du fer plus une longue chaîne latérale insérée dans une protéine.



Les différences entre les chlorophylles viennent de leurs absorptions. D'autres pigments complémentaires ( tels que les caroténoïdes qui ont un rôle protecteur ) viennent s'ajouter à l'absorption de lumière pour la photosynthèse.



## D. Le centre réactionnel bactérien, le prototype des centres réactionnels

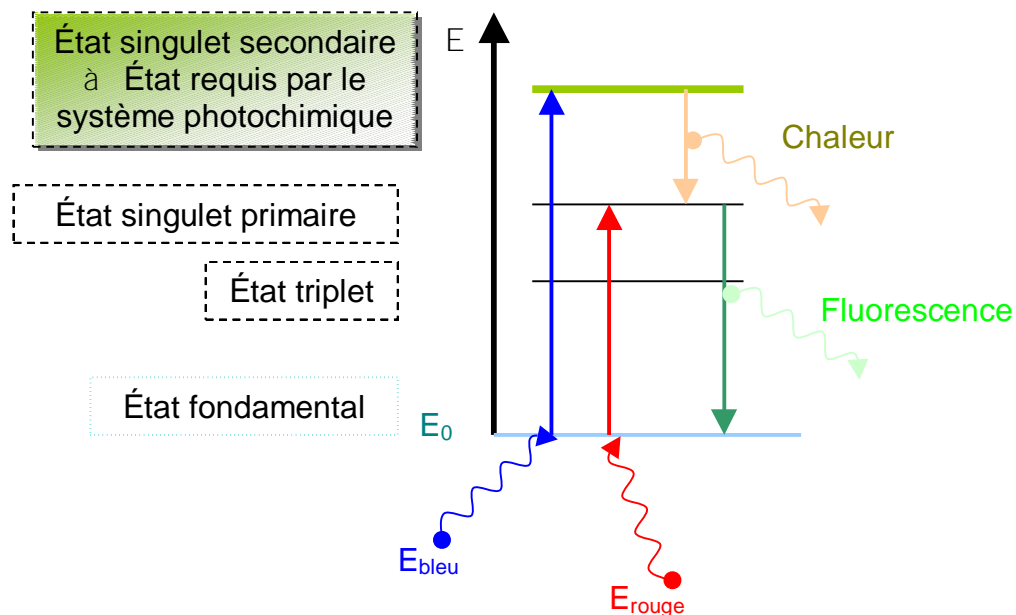
Précisions sur l'énergie quantique mise en jeu :

La quantité d'énergie délivrée par un photon dépend en partie de sa longueur d'onde. Ainsi on a :  $E_{\text{bleu}} = 240 \text{ kJ.mol}^{-1}$  et  $E_{\text{rouge}} = 170 \text{ kJ.mol}^{-1}$ .

à Dans le système photochimique, l'énergie est captée par le magnésium central : il doit passer à l'état singulet secondaire grâce à un photon bleu :

La perte d'énergie une fois captée se fait sous forme d'émission de chaleur ou de fluorescence ( minoritairement ), mais aussi par transfert d'énergie entre chlorophylles avec perte d'énergie (  $\bar{\nu}$  tend vers le rouge ). Mais aussi et surtout, il y

a séparation de charge, c'est-à-dire qu'un électron va être émis puis va être capturé par un accepteur d'électron.

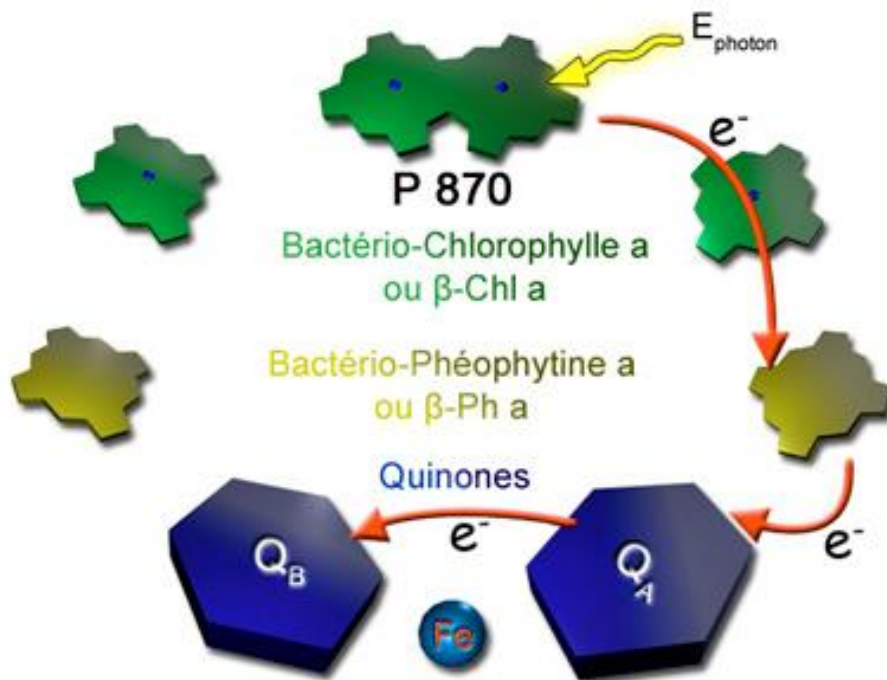


### I Centre réactionnel

Les bactéries photosynthétiques ne peuvent que faire de la photosynthèse anoxygénée. Leur système est plus simple et il pourrait être considéré comme l'ancêtre du chloroplaste.

Les réactions du centre réactionnel s'effectuent entre la membrane externe et la membrane interne des thylakoïdes, appelé espace pérимembranaire. À l'intérieur de cet espace se trouve la paire de bactériochlorophylle a appelée P 870.

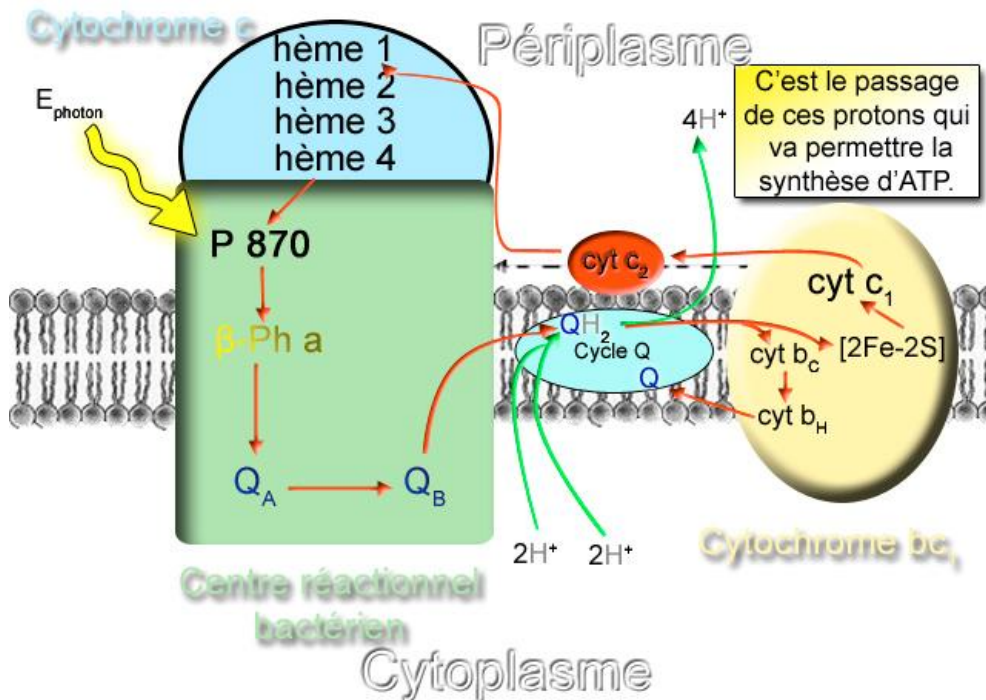
Il est important de noter que c'est toujours le même chemin qui est emprunté pour le passage des électrons.



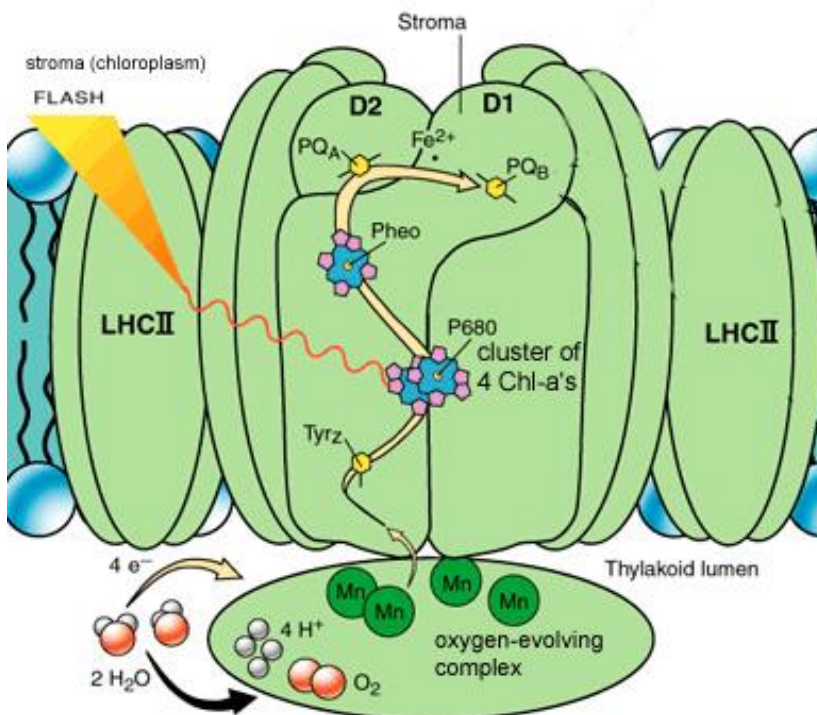
I Mécanisme complet :

Le transport des électrons le long du mécanisme va permettre le passage de protons à l'intérieur du périplasme qui, grâce à la différence de gradient, permettra de synthétiser de l'**ATP**.

Il faut noter que la présence du cytochrome c dépend de l'espèce étudiée, celui-ci peut être remplacé par un autre.



E. Le centre réactionnel PS II et la génération de  $O_2$

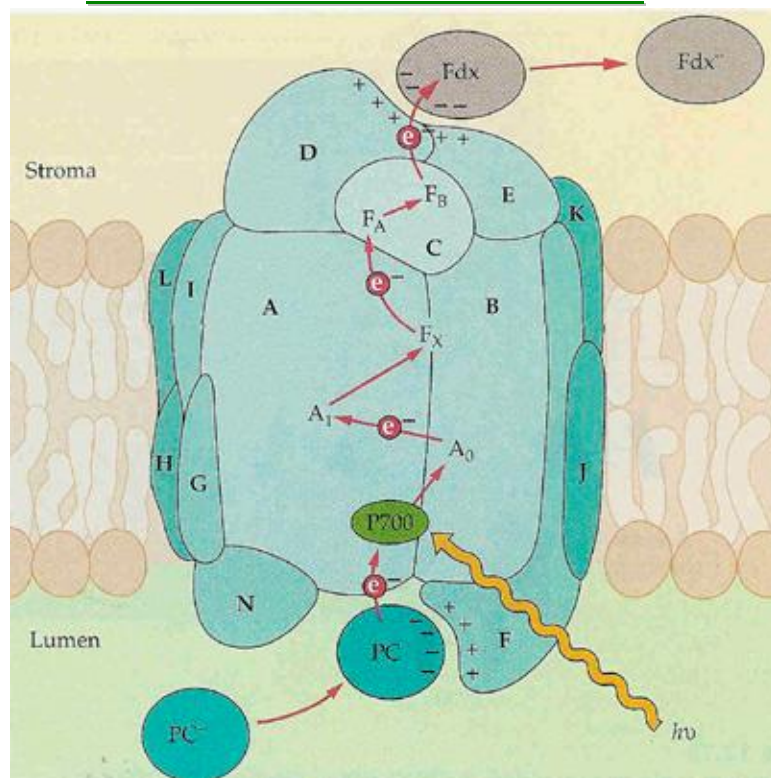




Les LHC sont majoritairement formés de chlorophylles et servent à transmettre de la lumière à P680. L'OEC ( Oxygen Evolving Center ) sert à fabriquer du dioxygène ainsi que des ions hydrogènes.

Les protéines qui contiennent le PhotoSystème II sont très fragiles, et on observe qu'elles sont constamment régénérées.

## F. Le centre Réactionnel PS I



PC désigne la plastocyanine, un accepteur d'électrons qui a un site de reconnaissance avec F très précis. F<sub>x</sub>, F<sub>A</sub> et F<sub>B</sub> sont des centres [ 4 Fe – 4S ]. Fd ou Fdx est la férédoxine, elle contient un centre [ 2 Fe – 2 S ].

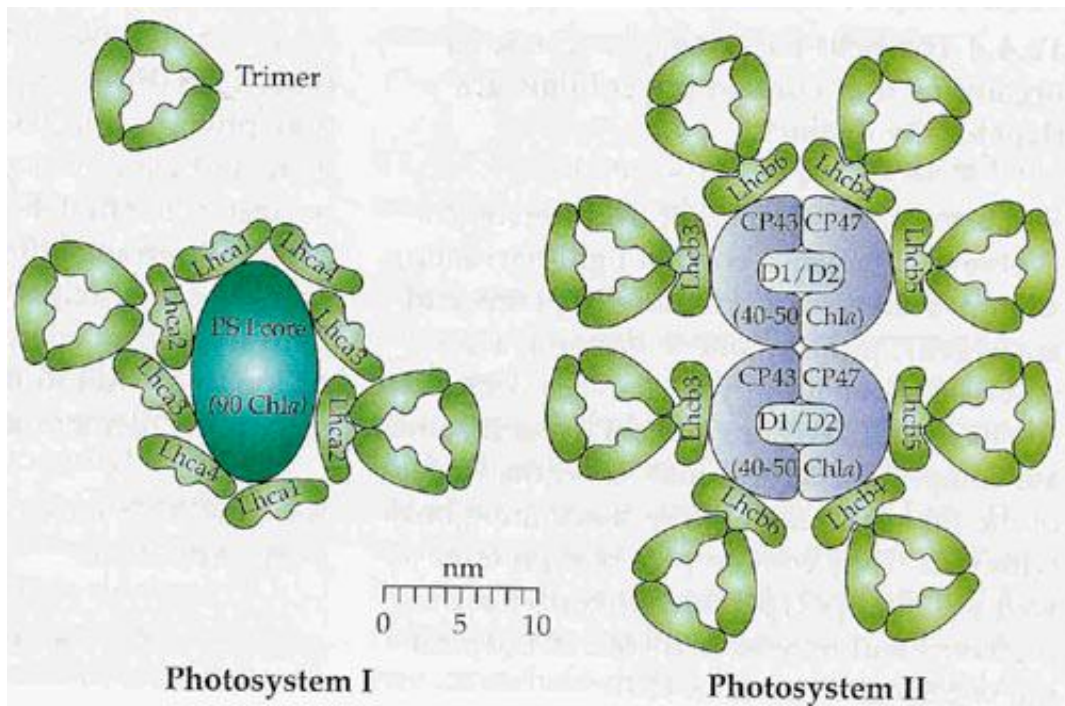
### I Différences entre PS I et PS II :

PS I	PS II
P 700	P 680
Chlorophylle a	Phéophytine a
Phylloquinone	Plastoquinone Q <sub>A</sub>
F <sub>x</sub> [Fe-S]	Plastoquinone Q <sub>B</sub>

On remarque qu'il y a une différence dans la capacité d'absorption de la lumière ( P 700 et P 680 ). Il y a aussi des différences entre les transporteurs d'électrons.

## G. Les antennes collectrices

D'autres molécules de chlorophylles agencées autour des PSII et PSI jouent un rôle dans le mécanisme photosynthétique. Ce sont les antennes collectrices.

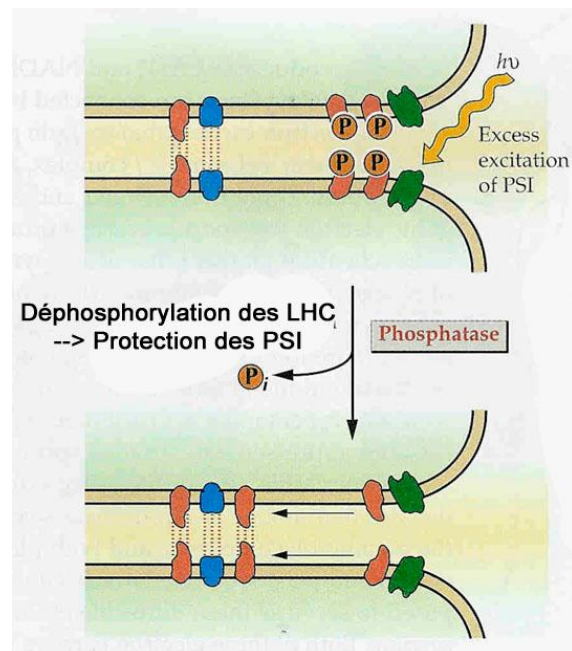
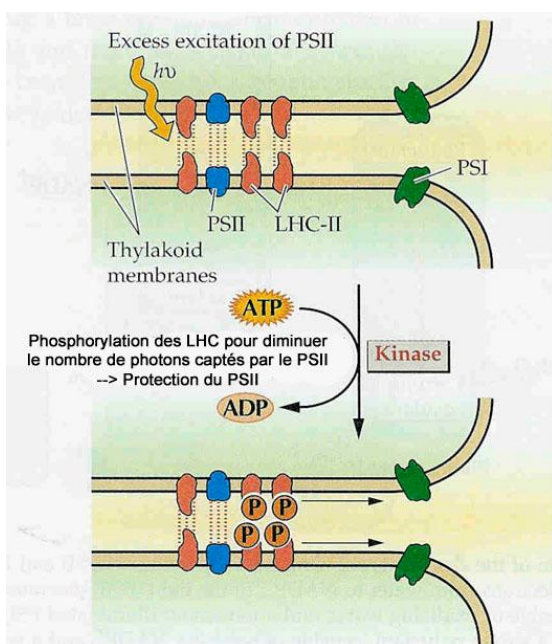


On les appelle les **LHC** ( II pour PSII et I pour PSI ... ). Ce sont le plus souvent des trimères de mêmes sous-unités. Elles peuvent lier de nombreuses chlorophylles a et b, ceci grâce aux lipides MGDG et DGDG, présents dans la membrane des thylakoïdes, qui lient les sous-unités.

Les LHC sont en fait des protéines transmembranaires qui lient jusqu'à 12 molécules de chlorophylle a et b ainsi que des caroténoïdes.

Ces antennes servent à collecter des photons pour la paire spéciale et de les faire tendre vers le bleu, couleur plus efficace pour la photosynthèse.

Grâce à la kinase ou à la phosphatase, il est possible de déplacer les LHC plutôt vers le PSI ou PSII pour protéger l'un ou l'autre.



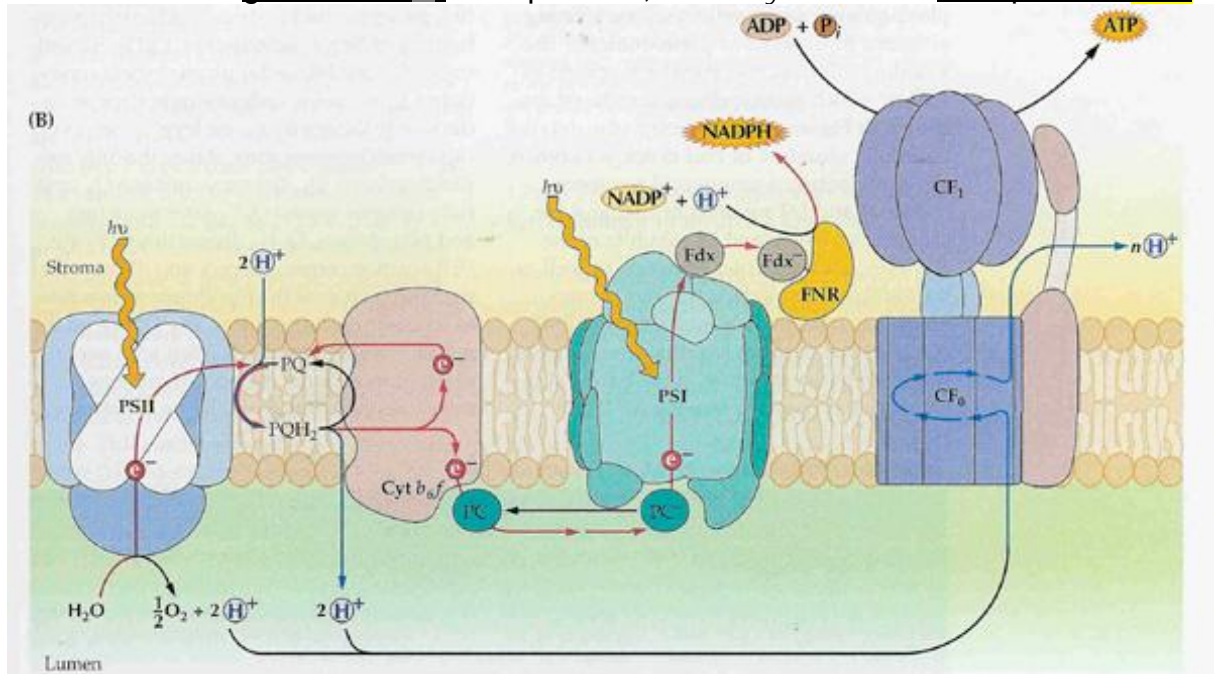


## H. Mécanisme du photosystème

Le cytochrome  $b_6f$  et la plastocyanine ( PC ) servent à communiquer les électrons entre le PSII et le PSI.

La férédoxine va servir à **renouveler NADP<sup>+</sup> en NADPH** grâce à un proton et un électron véhiculé grâce à la férédoxine.

Grâce au gradient de  $H^+$  créé par PSII, l'ATP synthase va **fabriquer de l'ATP**.



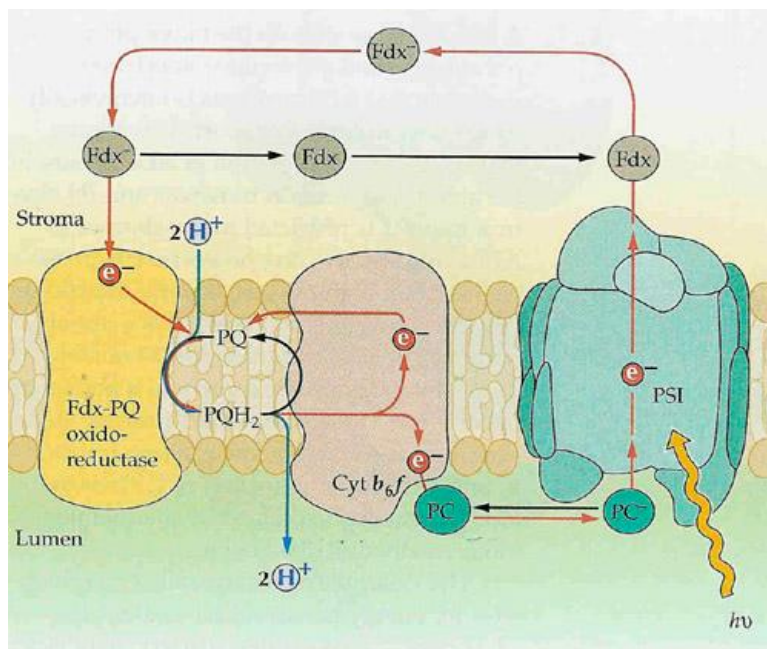
Le cycle électronique suit une séquence de réactions favorables ou rendues favorables par l'apport d'énergie des photons.

Le gradient de  $H^+$  entre le lumen et le stroma est très important ; le pH est de 5 dans le lumen et de 8 dans le stroma. Ce gradient crée un très fort potentiel chimique.

## I. Transfert d'électrons cyclique

On observe que dans le centre réactionnel bactérien, les électrons reviennent à leur point de départ mais pas chez les plantes.

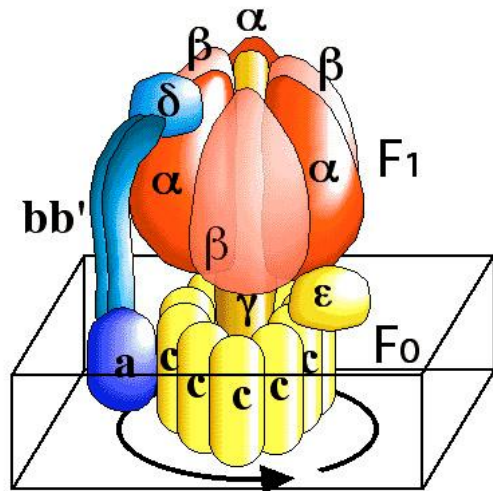
à Il est possible qu'un cycle se produise grâce à la férédoxine :



Ce mécanisme est peut-être un reste de l'ancien système bactérien. Il peut aussi être utile si la plante a besoin de plus d'**ATP** qu'elle n'a besoin de **NADPH** ; ce devient alors un mécanisme adaptatif.

### J. La CF<sub>0</sub>/CF<sub>1</sub> ATP synthase.

Cette molécule comporte deux parties : CF<sub>0</sub>, le  **pied** , à l'intérieur de la membrane du thylakoïde, et CF<sub>1</sub>, la  **tête** , du côté du stroma.



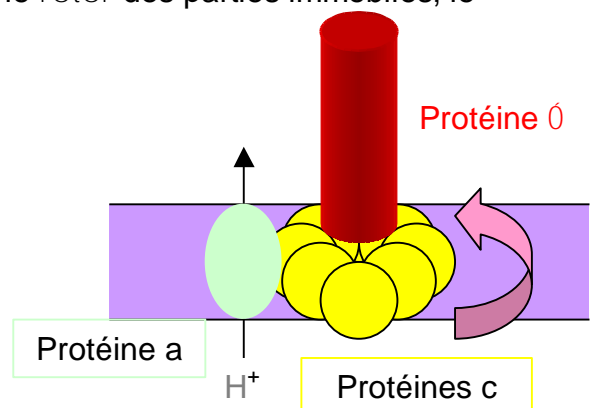
**Légende :**

<u>Protéines du rotor</u>	
q	Protéines c et protéine $\hat{O}$
q	Protéine $\hat{O}$
<u>Protéines du stator</u>	
q	Protéines $\tilde{N}$ et protéines $\hat{O}$
q	Protéines bb' et protéine $\hat{O}$
q	Protéine a

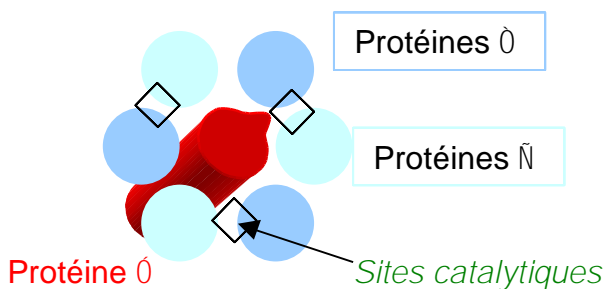
En fait, on distingue les parties mobiles, le rotor des parties immobiles, le stator.

#### I Fonctionnement de l'ATP synthase :

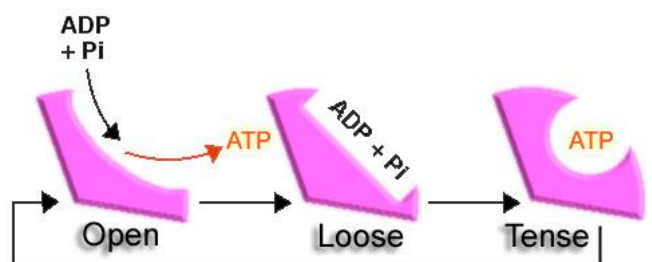
Les H<sup>+</sup> du côté du lumen sont attirés par leur gradient vers le stroma. Pour cela, ils passent à travers la protéine a, qui va enclencher un décalage des protéines c et ainsi faire tourner la protéine centrale  $\hat{O}$ . Elle effectue 130 tours par seconde.



La protéine  $\hat{O}$  étant asymétrique, elle entraîne des déformations au niveau des protéines  $\tilde{N}$  et  $\hat{O}$ , qui vont alors actionner les sites catalytiques de manière à former de l'**ATP** à partir d'ADP+P.



Les sites catalytiques peuvent alors prendre plusieurs configurations possibles : configurations ouvertes ( *O = Open* ), relâchées ( *L = Loose* ) et serrées ( *T = Tense* ).



à Lorsque le gradient de protons est absent, l'ATP synthase a une fonction inverse, elle transforme de l'**ATP** en ADP+P tout en laissant entrer des protons. C'est en fait une pompe à protons.

## V\_ La mitochondrie

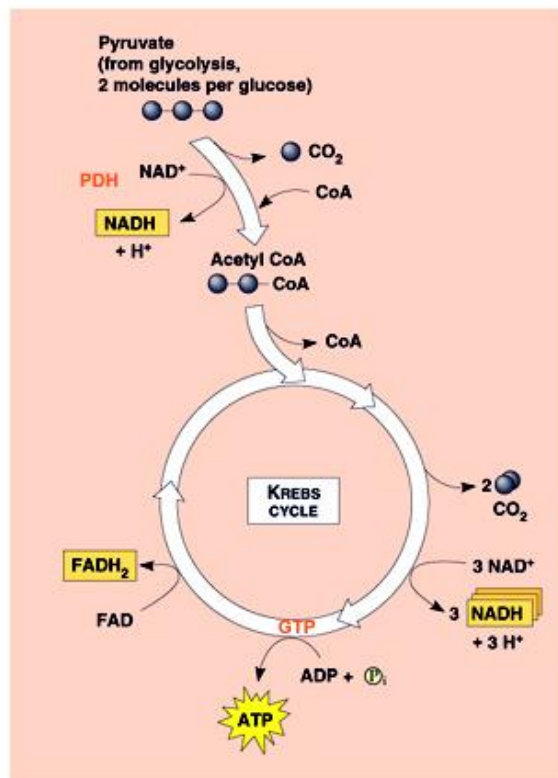
### A. Cycle de Krebs

La travail de la mitochondrie consiste en gros à tirer de l'énergie chimique à partir du glucose en fabriquant de l'énergie transportable ( de l'**ATP** ) et de la chaleur.

Tout d'abord a lieu la *glycolyse*, dans le cytosol, qui va transformer une molécule de glucose en deux molécules de pyruvate, tout en générant deux molécules de **NADH** à partir de **NAD<sup>+</sup>**, grâce à la *glycéraldéhyde-3-P-déshydrogénase*.

Ensuite, une fois dans la matrice mitochondriale, ce produit doit être transformé en acétyl-CoA ( 1 molécule de pyruvate donnant deux molécules d'acétyl-CoA ). Ce procédé génère deux molécules de **NADH** et une molécule de **CO<sub>2</sub>**, grâce à la *pyruvate-déshydrogénase*.

Cette molécule est enfin prête à subir plusieurs fois le *cycle de Krebs*, qui à chaque tour produit deux molécules de **CO<sub>2</sub>**, trois molécules de **NADH** et une molécule de **FADH<sub>2</sub>**.

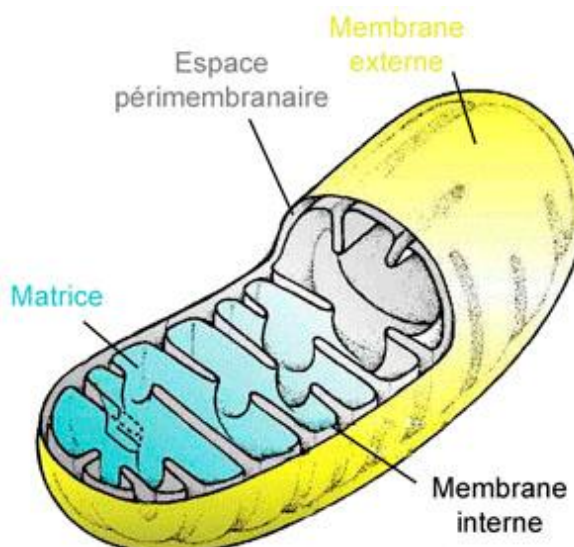


Presque toutes les enzymes font partie de la matrice mitochondriale, sauf la *succinate-déshydrogénase*, qui forme le complexe II dans la membrane interne.

### B. Structure de la mitochondrie

Les membranes des mitochondries sont excessivement concentrées en protéines ( 50 % pour la membrane interne ), surtout les faces tournées vers l'espace pérिमембранаire. Ce sont pour la plupart, des complexes de transfert d'électrons.

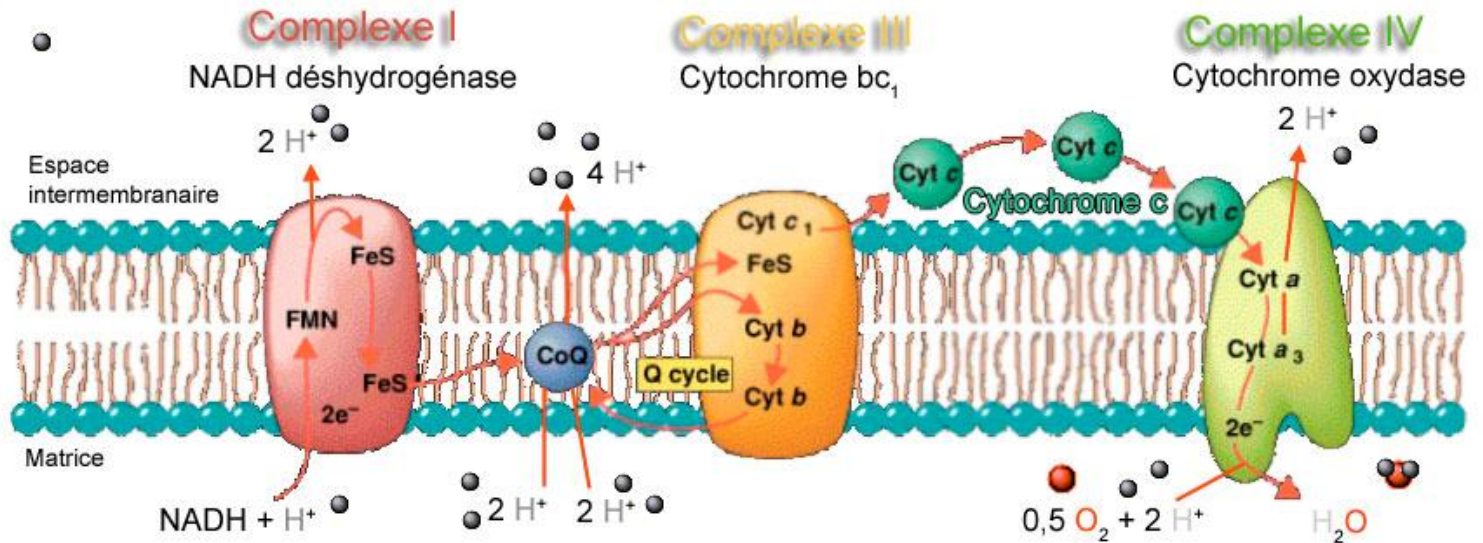
à On observe que lors d'une activité intense, l'espace pérिमембранаire augmente énormément.





## C. Mécanisme

Toutes les réactions mitochondriales suivent le gradient thermodynamique. Elle n'a donc besoin d'aucun apport énergétique extérieur pour fonctionner.



La FMN est une flavine et elle sert à capter les protons de NADH+H<sup>+</sup>.

La Coenzyme Q est similaire à une quinone.

La cytochrome c est un transporteur d'électrons extramembranaire.

à Ce système est similaire à celui des plastes.

Le gradient de H<sup>+</sup> créé va aussi servir à fabriquer de l'ATP grâce à des ATP synthases. Les H<sup>+</sup> et les cyt c du côté de l'espace intermembranaire ne s'en échappent pas malgré le nombre important de pores de grandes tailles du côté de la membrane externe.

Par ailleurs, un mécanisme d'apoptose est rendu possible par l'éjection des cytochromes c.