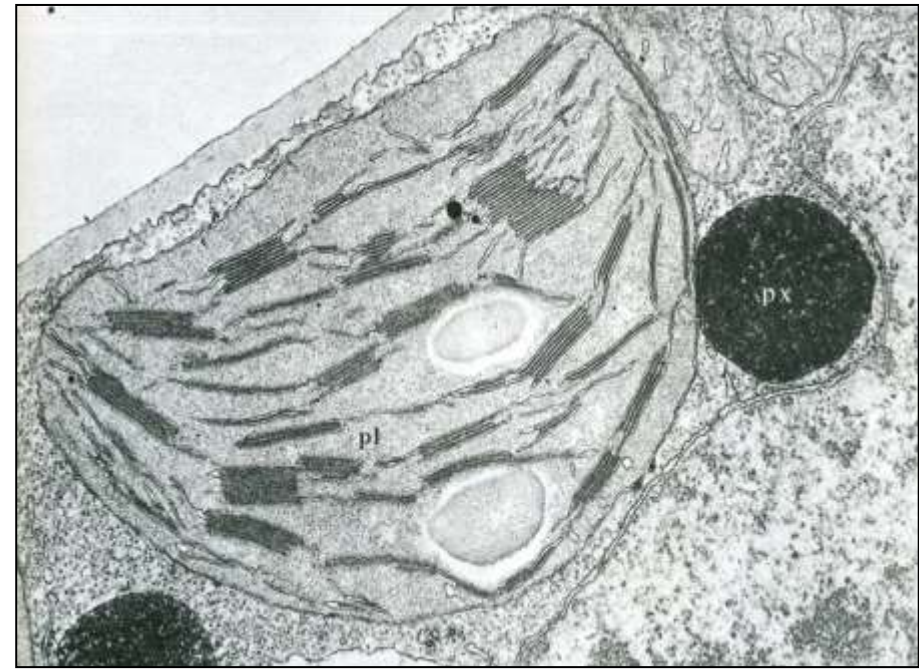
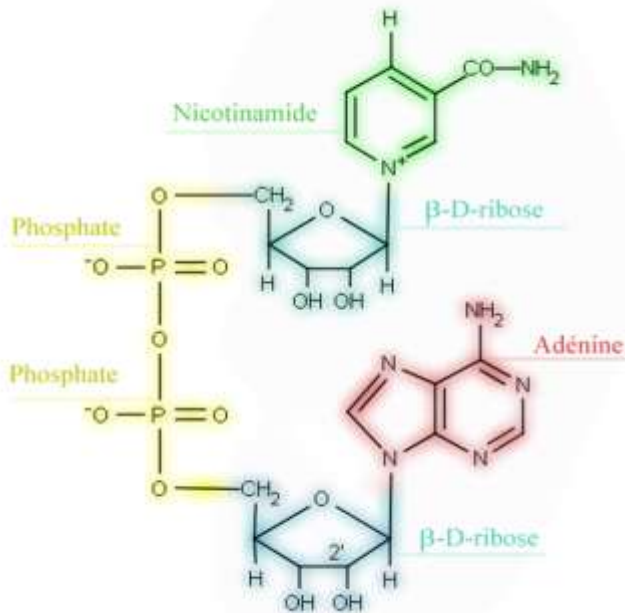
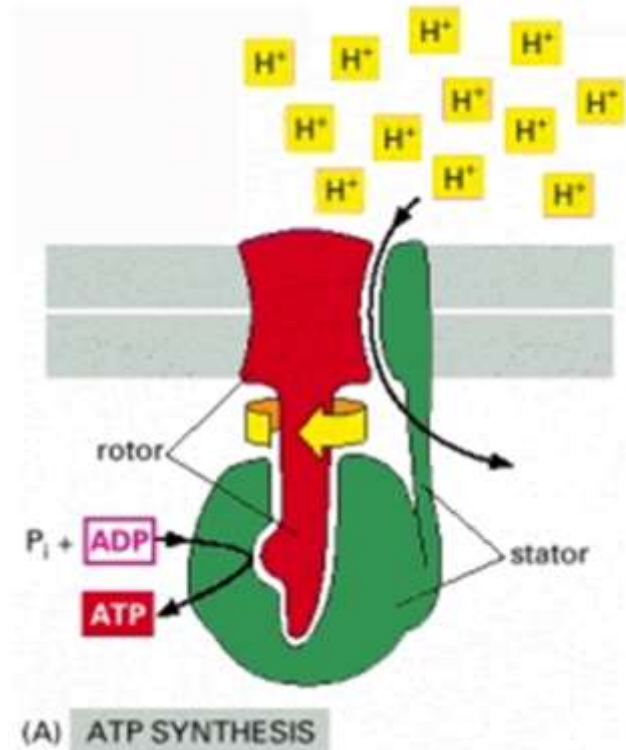


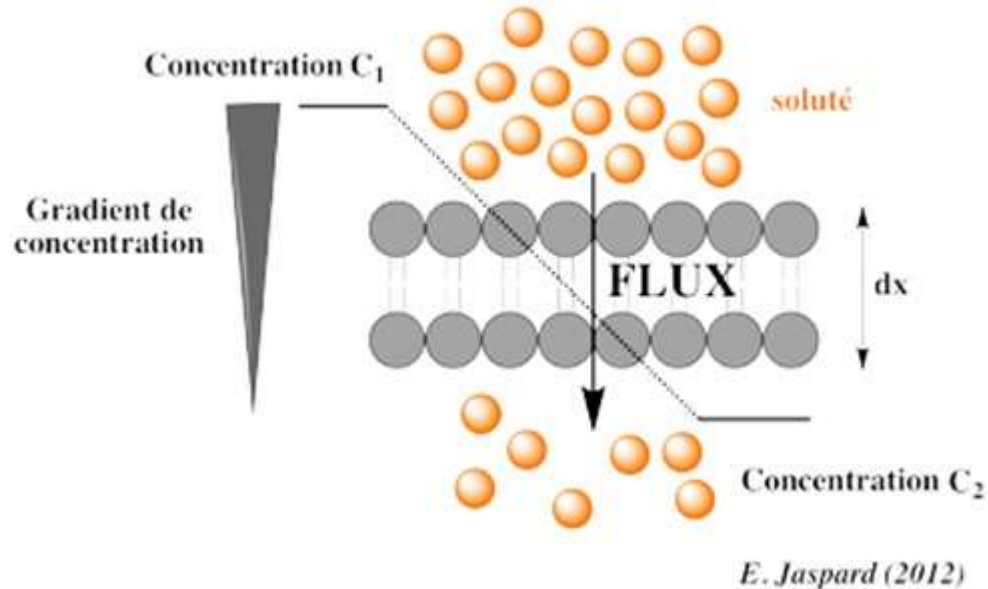
## SV – E – 1 :

# Métabolisme et formes d'énergie dans la cellule



# L'énergie de gradient transmembranaire

Pour une substance non chargée :



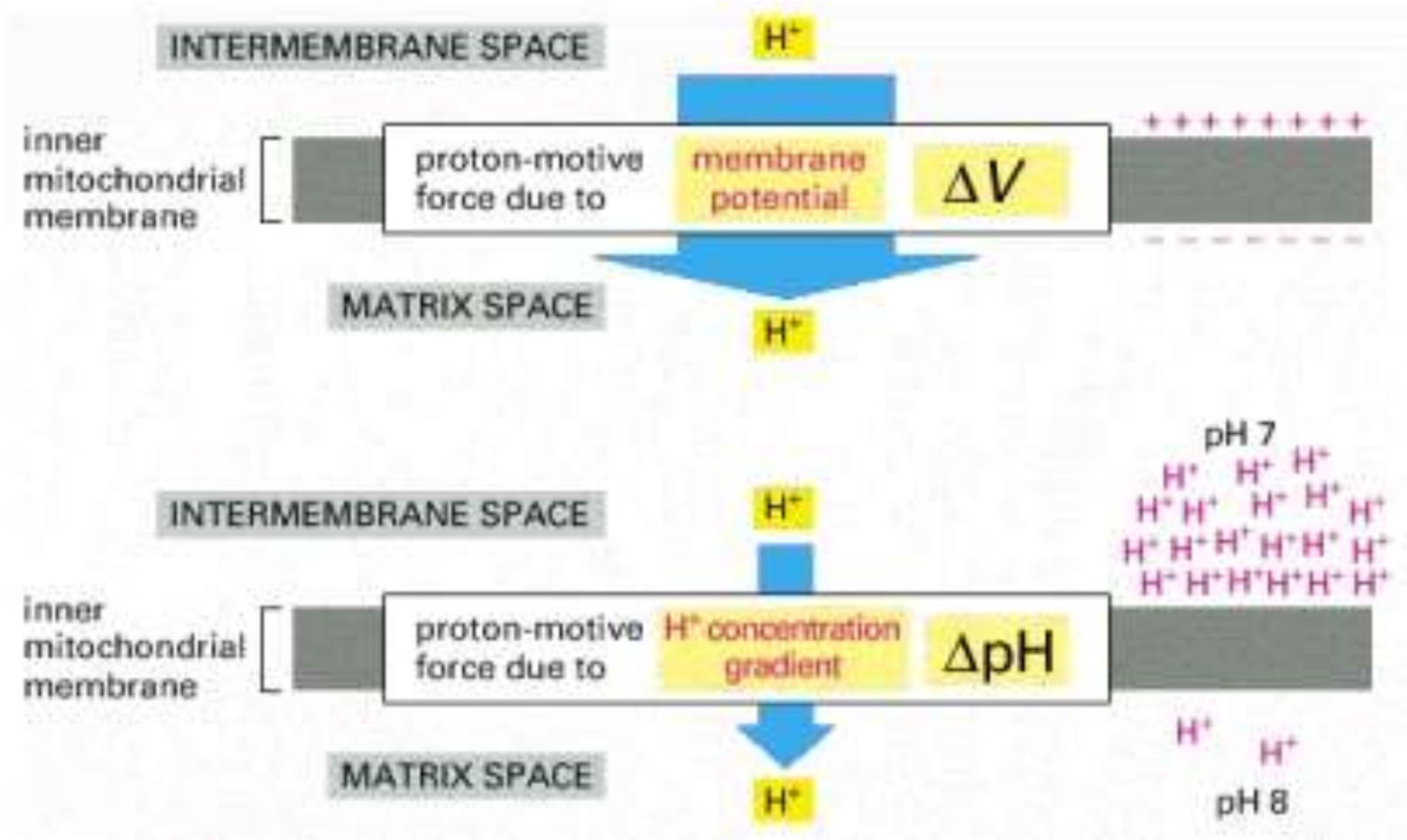
Pour un flux du compartiment 1 vers le compartiment 2 :

$$\Delta G = RT \ln C_2/C_1$$

Dans cet exemple,  $[C_1] > [C_2]$  donc  $\Delta G < 0$

# L'énergie de gradient transmembranaire

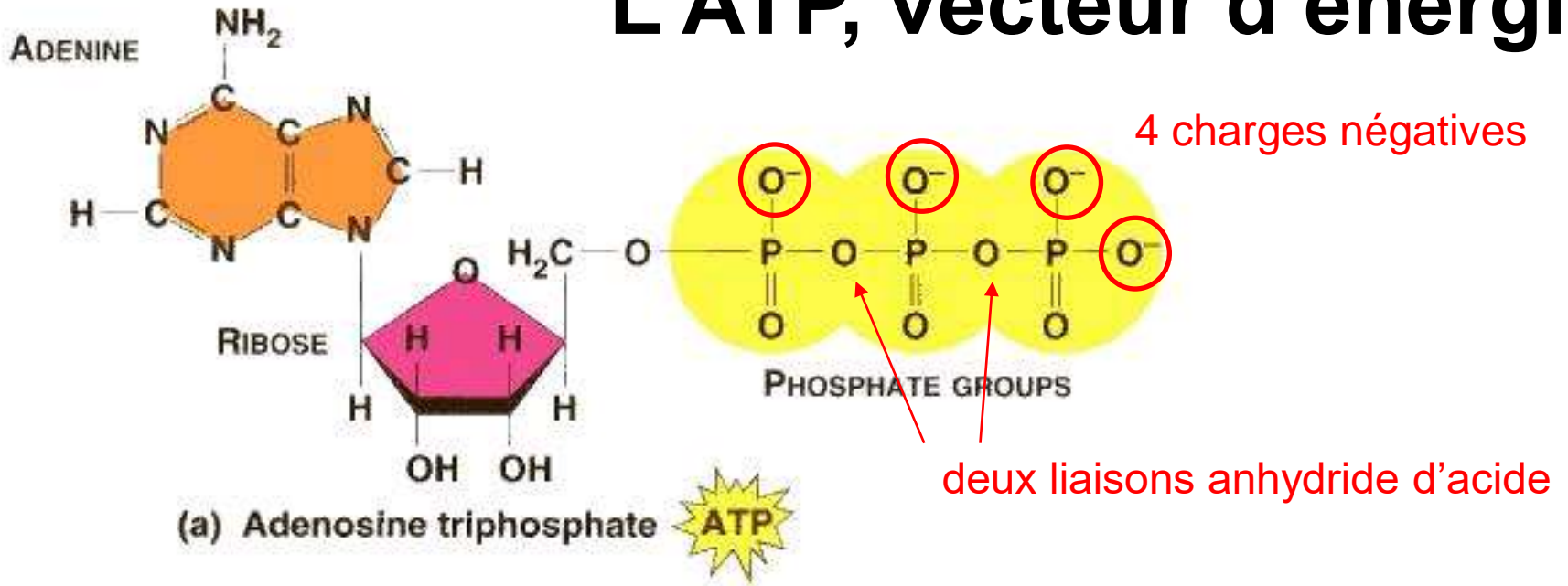
Pour une substance chargée (ici les protons) :



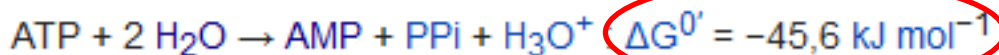
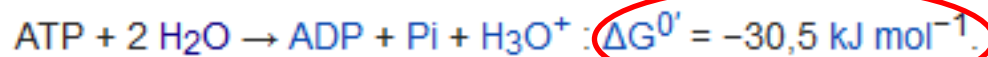
Deux composantes pour le gradient électrochimique

$$\Delta G = RT \ln C_2/C_1 + ZF\Delta V$$

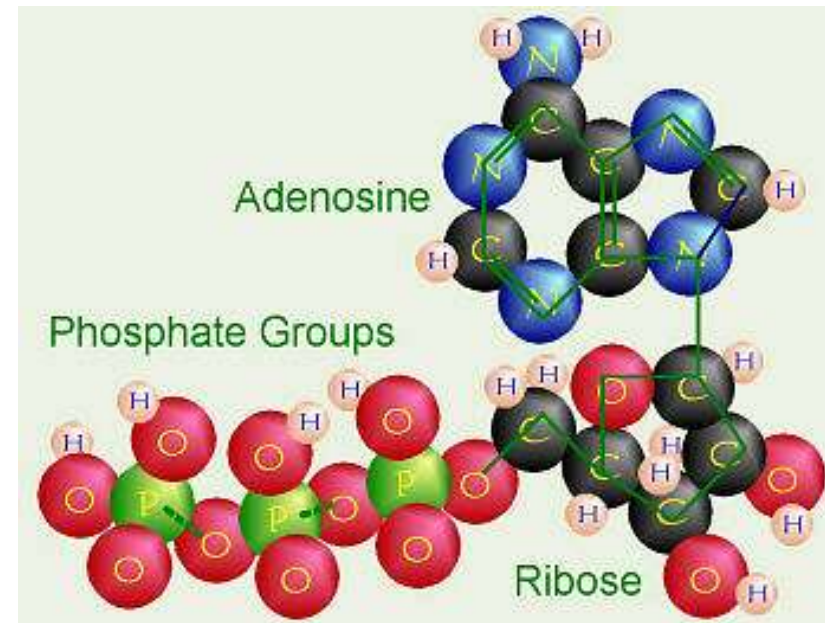
# L'ATP, vecteur d'énergie



## Document 1. L'ATP.

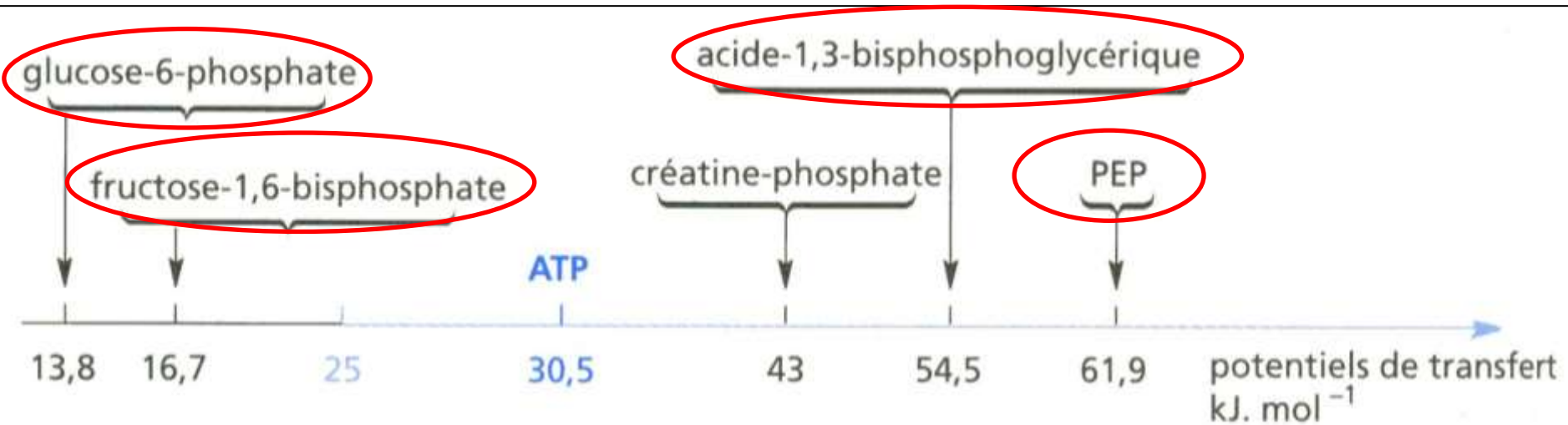


Un composé riche en énergie





## Composés que l'on retrouve dans la glycolyse

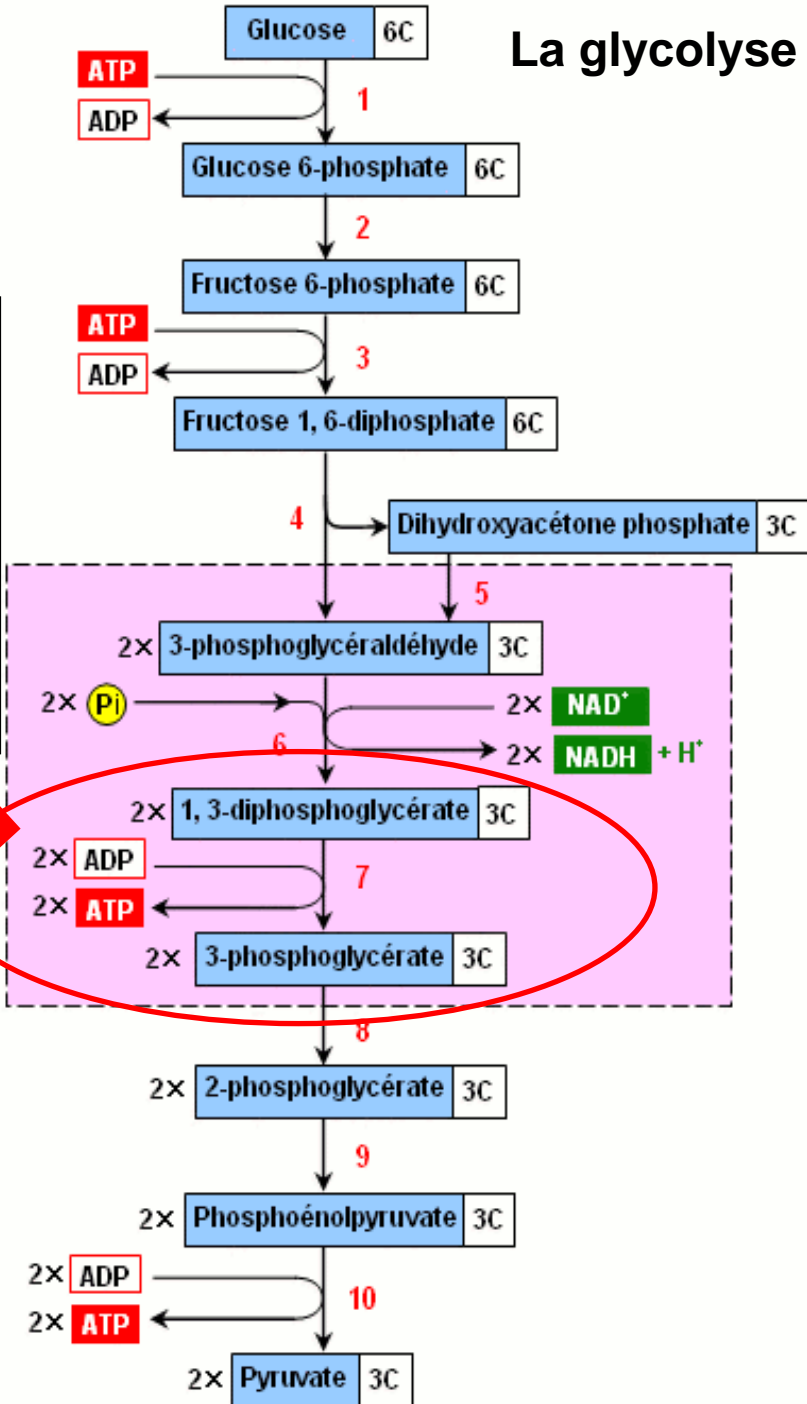
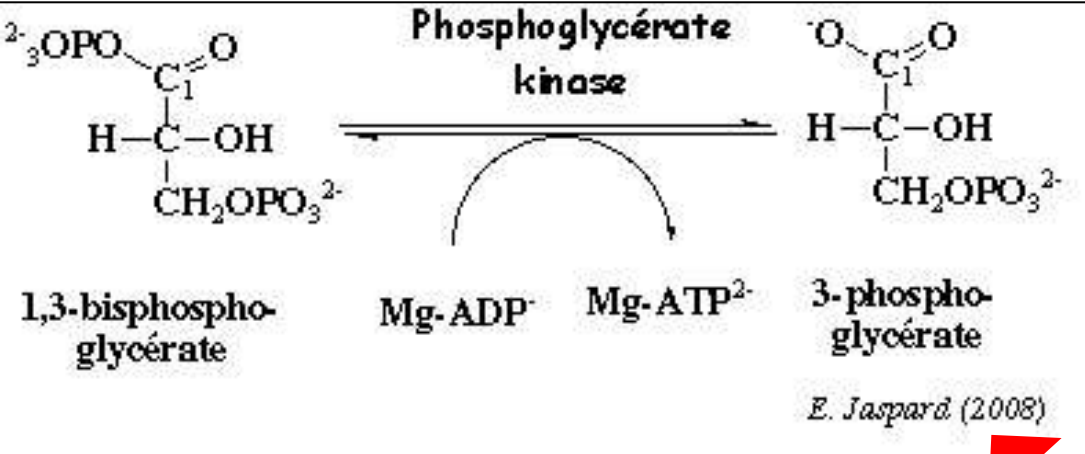


## Document 2. Echelle des potentiels de transfert de quelques composés.

(Peycru P. et coll., " Biologie 1<sup>ère</sup> année BCPST ", Dunod Ed., 2007).

# Document 3. Synthèse de l'ATP par transphosphorylation.

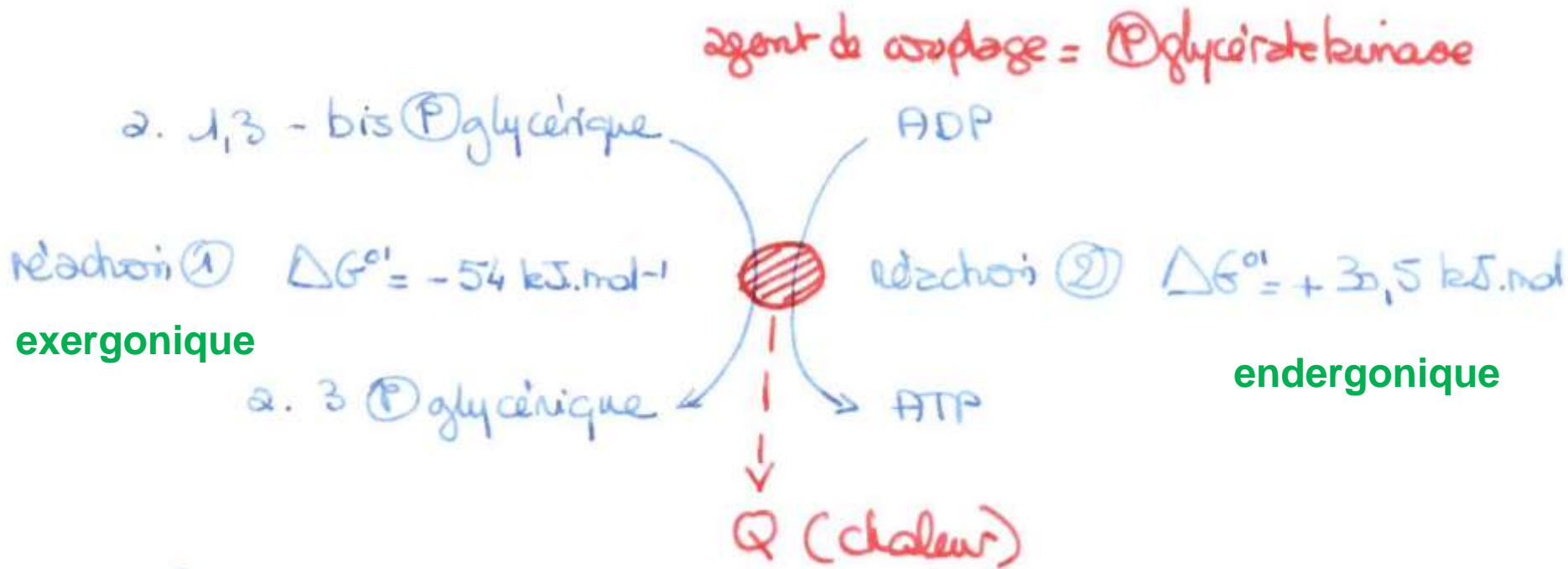
La glycolyse

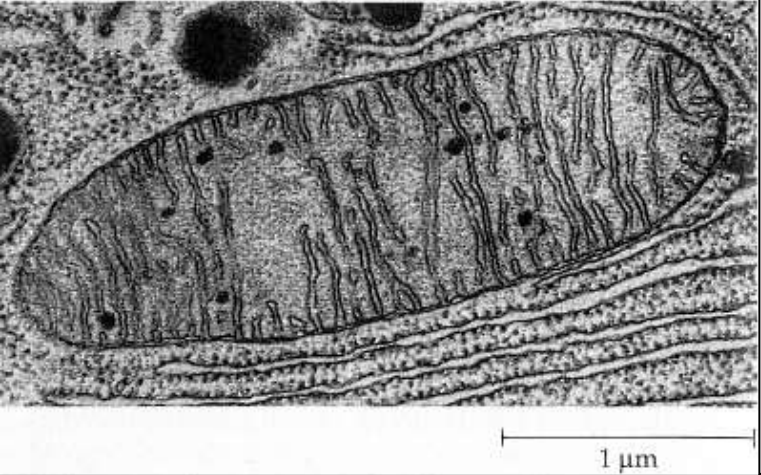


Transfert d'énergie grâce à un couplage chimio-chimique

(<http://biochimej.univ-angers.fr/Page2/COURS/Zsuite/3BiochMetab/4Glycolyse/1Glycolyse.htm>) et [http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/article.php3?id\\_article=1279](http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/article.php3?id_article=1279)

# Couplage chimio-chimique permettant la synthèse d'ATP par transphosphorylation





**Document 4. Mise en évidence des « sphères pédonculées » dans la membrane interne des mitochondries.**

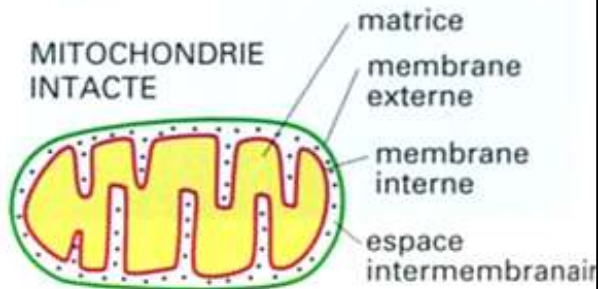
A gauche : mitochondrie entière en MET.  
(*"Biologie"* Campbell 1995 Ed. DeBoeck Universités).



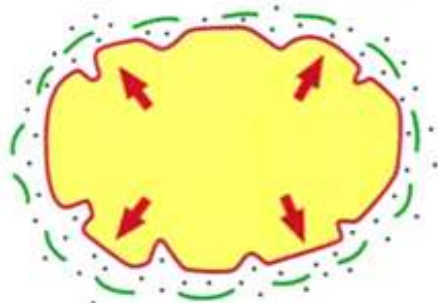
Ci-contre : les membranes ont été isolées sous forme de lambeaux (MET x 200 000).

(ROLAND J.-C. et coll., « *Biologie cellulaire* », Dunod ed., 2001).





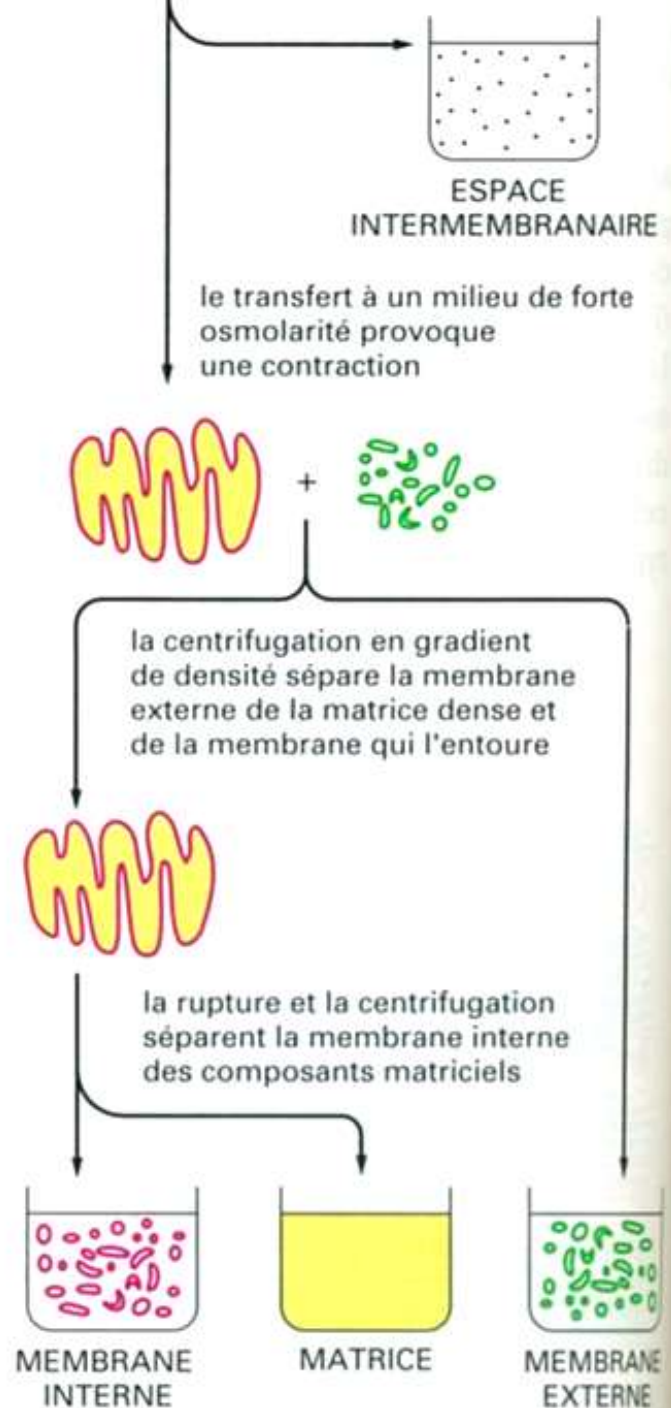
dans un milieu de faible osmolarité, l'entrée d'eau provoque le gonflement de la mitochondrie et la rupture de la membrane externe avec libération du contenu de l'espace intermembranaire ; la membrane interne reste intacte



la centrifugation laisse le contenu de l'espace intermembranaire dans la fraction non sédimentée

## Document 5. Fractionnement des mitochondries purifiées en composants séparés.

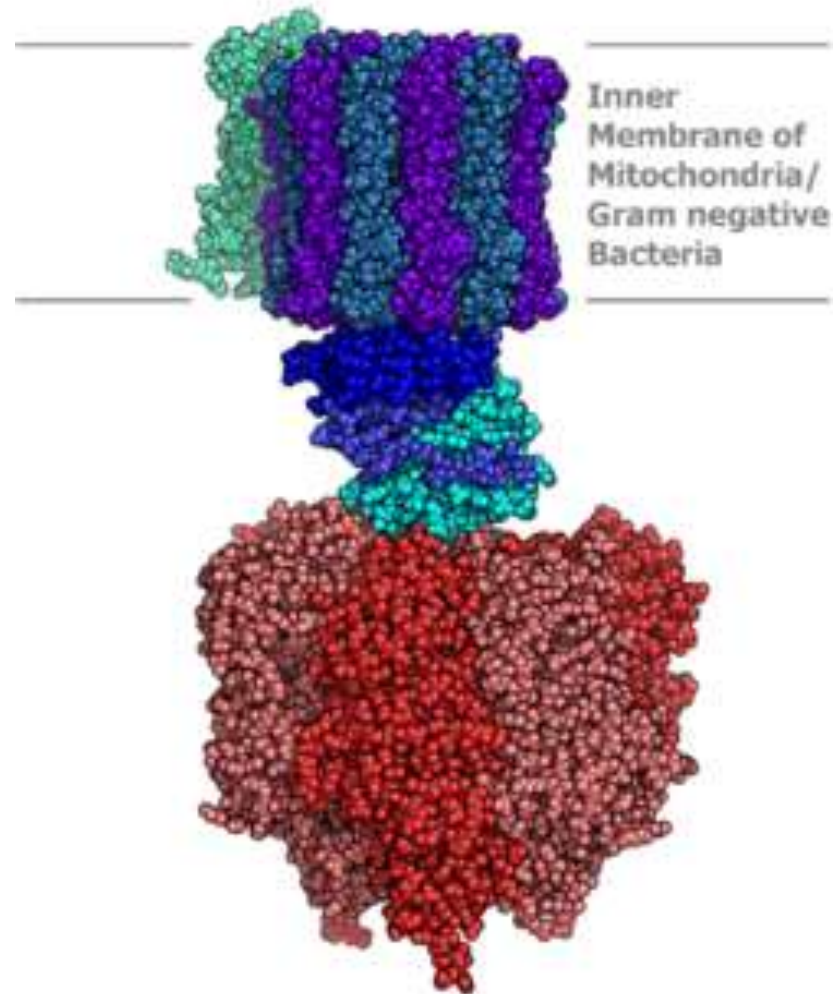
(ALBERTS B. et coll., " Biologie moléculaire de la cellule", Flammarion Médecine – Sciences Ed. ; 1995).



<b>Membrane externe</b>	Protéines (62 %) et lipides (38 %) de nature proche de celles de la membrane plasmique.
<b>Membrane interne et crêtes</b>	Protéines (80 %) et lipides (20 %) de natures très différentes de celles de la membrane plasmique (enzymes participant à des réactions d'oxydo-réduction, ATPsynthase).
<b>Matrice</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Petites molécules carbonées (pyruvate, acides aminés, acides gras...)</li> <li>– Nombreuses enzymes (deshydrogénases, décarboxylases, cytochrome-oxydase intervenant dans la réaction  <math display="block">\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ \rightarrow H_2O</math>)</li> <li>– Transporteurs réduits ou oxydés (T, TH<sub>2</sub>)</li> <li>– ATP, ADP, Pi</li> </ul>

## **Document 6. Analyse biochimique des différentes structures mitochondriales.**

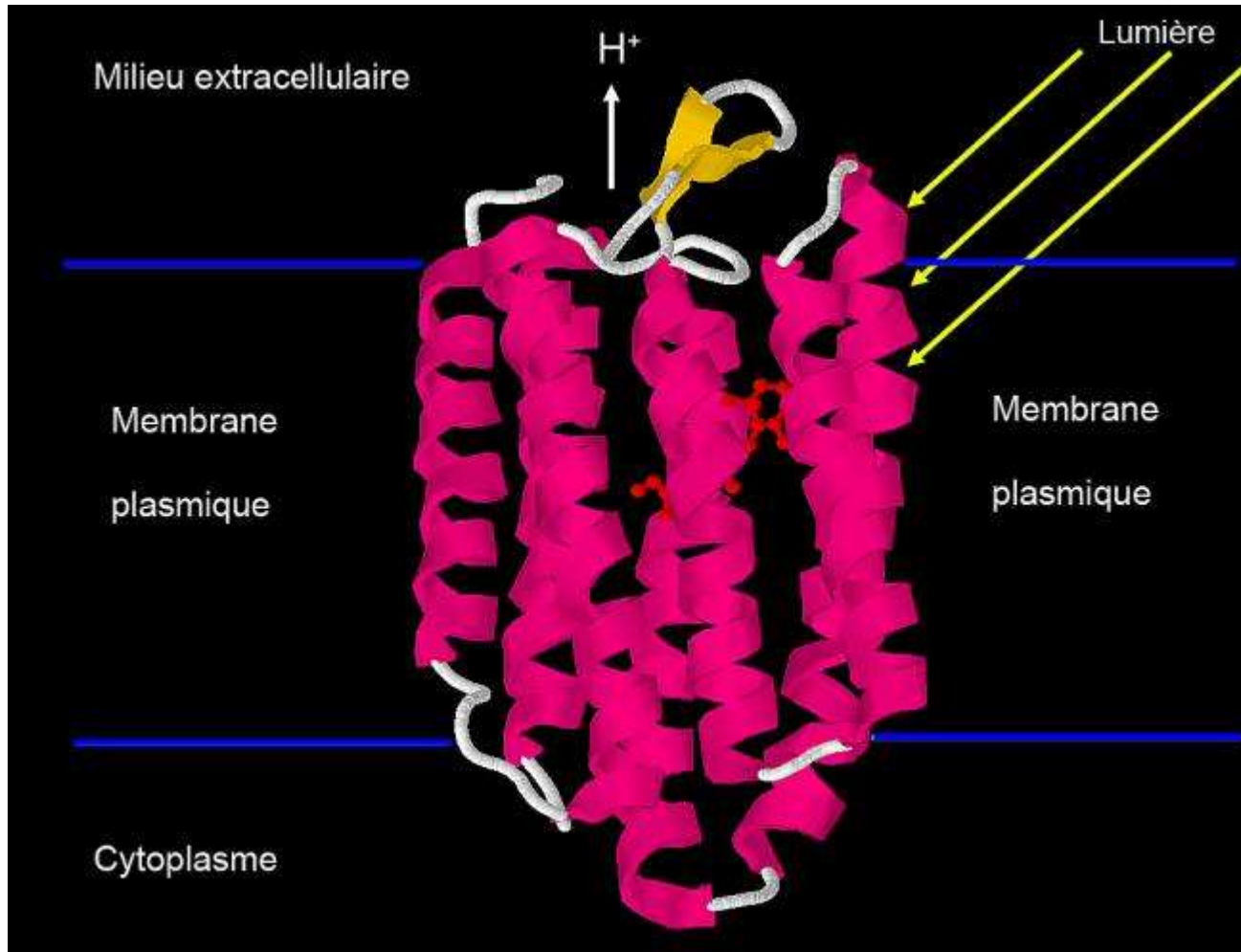
(« SVTT°S spécialité », Nathan Ed., 2002).



**Structure des « sphères pédonculées déterminées par diffraction aux RX (stator non représenté)**

[https://en.wikipedia.org/wiki/ATP\\_synthase](https://en.wikipedia.org/wiki/ATP_synthase)

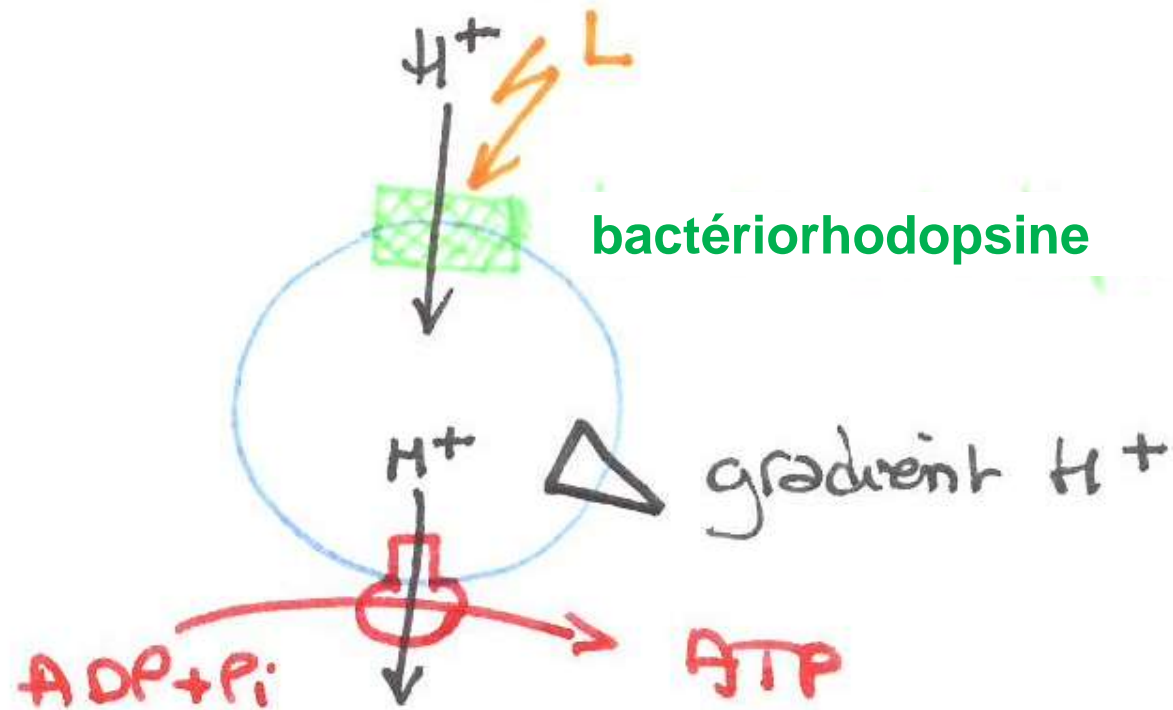




## La bactériorhodopsine



# Mise en évidence expérimentale de l'utilisation de la force proton motrice pour la synthèse d'ATP



# Détermination de la dissipation d'énergie libre $\Delta G$ liée au transfert d'un ion $H^+$

Pour le transfert d'un  $H^+$  de l'espace intermembranaire (1) à la matrice mitochondriale (2) :

$$\Delta G_{1-2} = RT \ln C_2/C_1 + z F \Delta V$$

devient (car  $pH = -\log_{10} [H^+]$ ) :

$$\Delta G_{1-2} = 2,3 RT [pH_1 - pH_2] + z F \Delta V$$

Avec  $R = 8,31$   $T = 310$   $K$   $z = 1$  et  $F = 96485$   $c/mol$

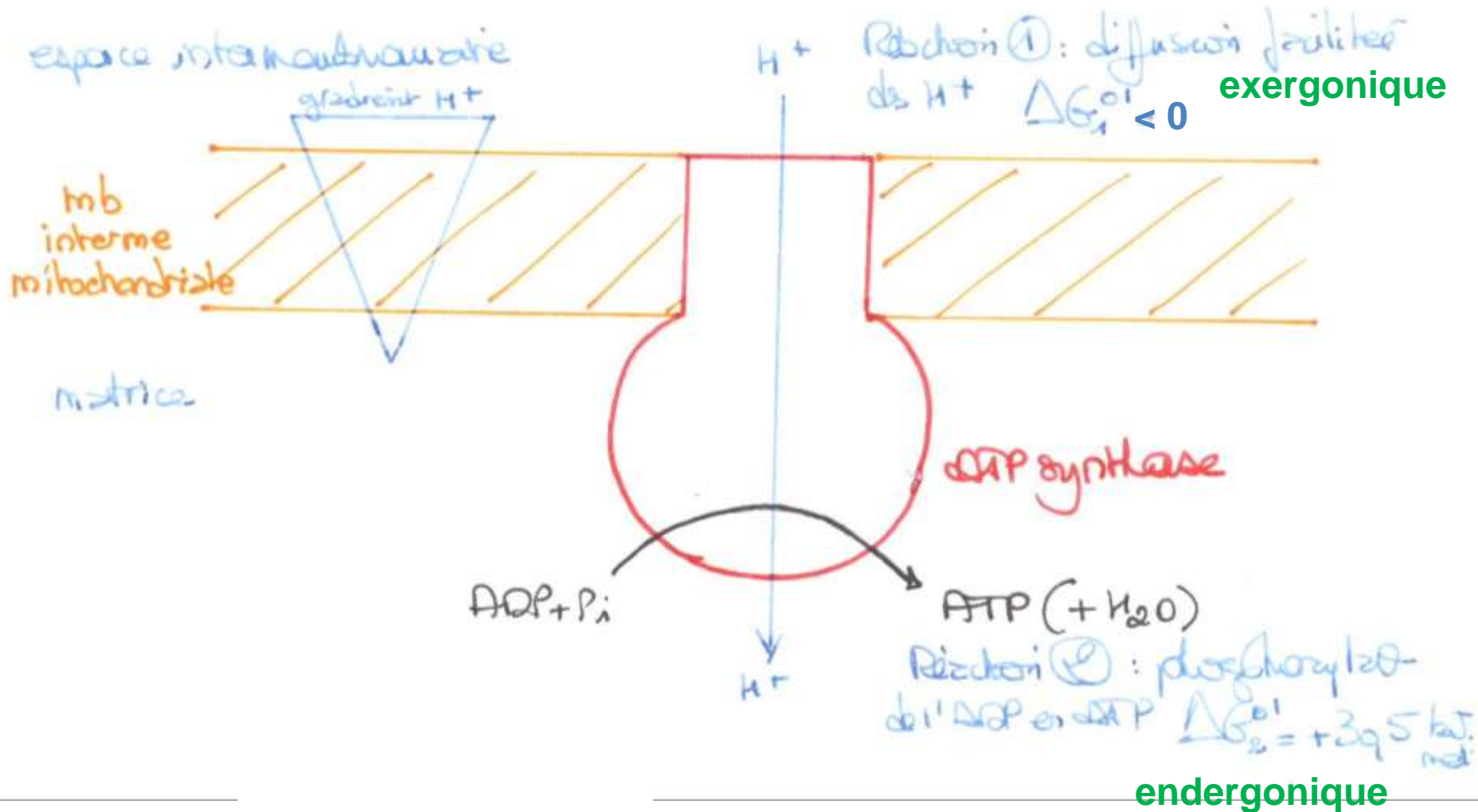
Dans les conditions physiologiques ( $37^\circ C$ ) :  $\Delta pH = -1$  et  $\Delta V = -0,14$   $V$

d'où :  **$\Delta G = -19,5$   $kJ/mol$  de protons expulsés**

**$\Delta G$  synthèse ATP serait proche de  $50$   $kJ/mol$  dans les conditions de vie cellulaire  $\rightarrow$  flux de  $3$   $H^+$  nécessaire pour un ATP ?**

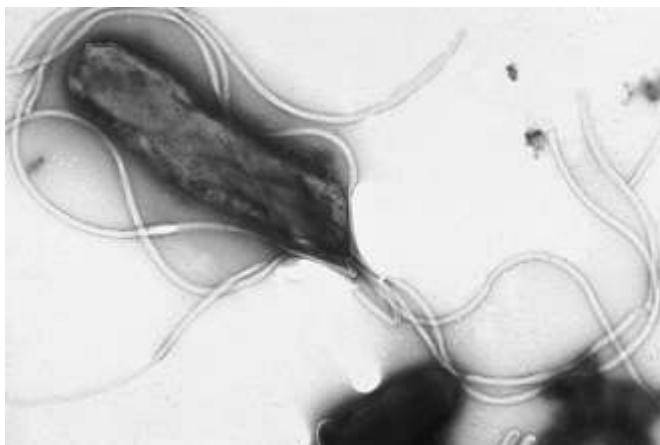
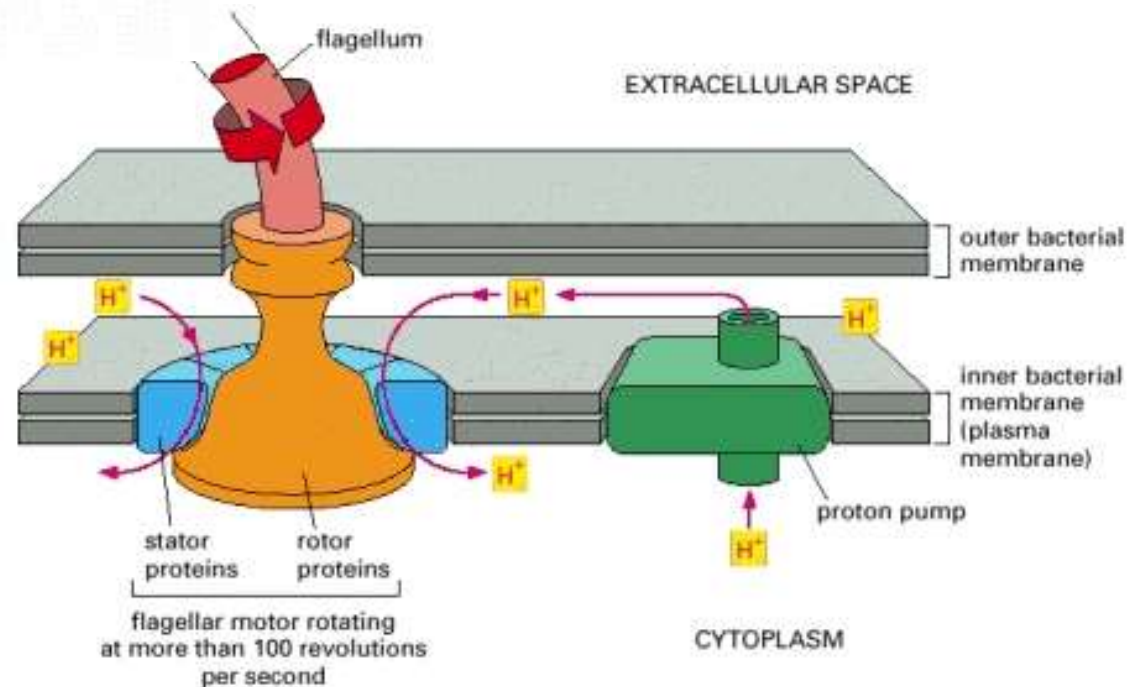
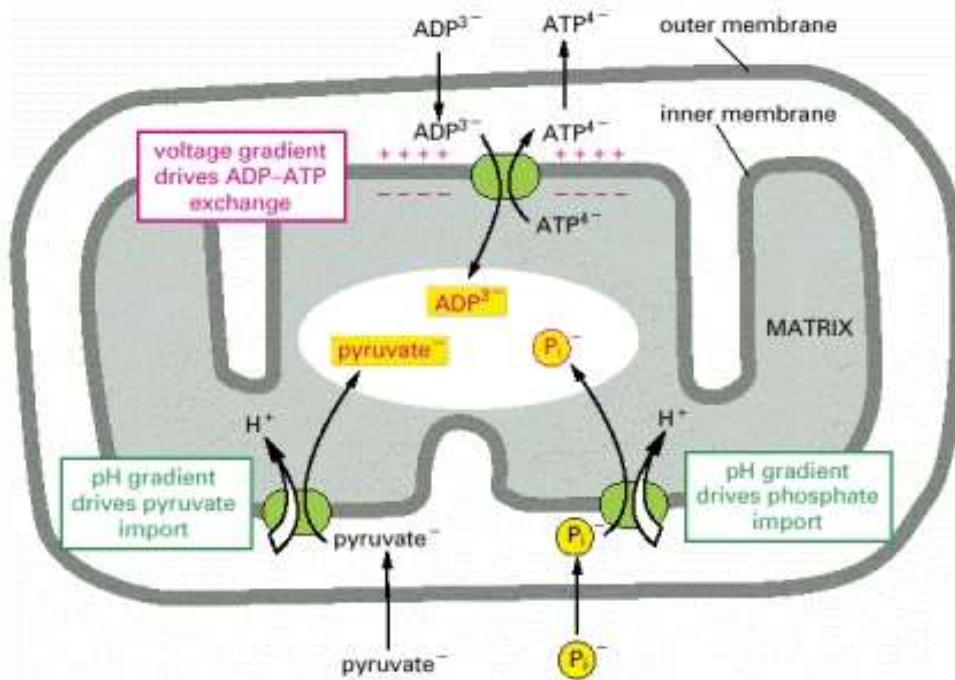
Ce  $\Delta G$  peut varier selon la différence de  $pH$  et le  $\Delta V$ ...

# La synthèse d'ATP par utilisation d'une force proton motrice : un couplage osmochimique



# Quelques utilisations de l'énergie de gradient protonique

Certains transports actifs dans la mitochondrie utilisent le gradient de protons.



*Helicobacter pylori* avec ses nombreux flagelles (MET)

La rotation du flagelle bactérien est entraînée par un flux de protons.



# Importance des réactions d'oxydo-réduction dans le métabolisme cellulaire

exemple, la respiration cellulaire :



Le C de la matière organique est oxydé

Une réaction d'oxydation :  $A \rightarrow A^+ + e^-$

**Une oxydation est exergonique**

A / A<sup>+</sup> et B / B<sup>+</sup>  
constituent des  
**couples redox**

Une réaction de réduction :  $B^+ + e^- \rightarrow B$

**Une réduction est endergonique**

Si ces deux couples sont mis en présence :



Dépend du **potentiel redox E de ces deux couples !**

On peut **prévoir le sens d'une réaction :**

**Transfert des e<sup>-</sup> spontané  
dans le sens des potentiels redox croissant**

**Une différence de potentiel redox entre deux couples correspond à une forme d'énergie potentielle :**

$$\Delta G = - n F \Delta E \quad n : \text{nb d'électrons impliqués}$$

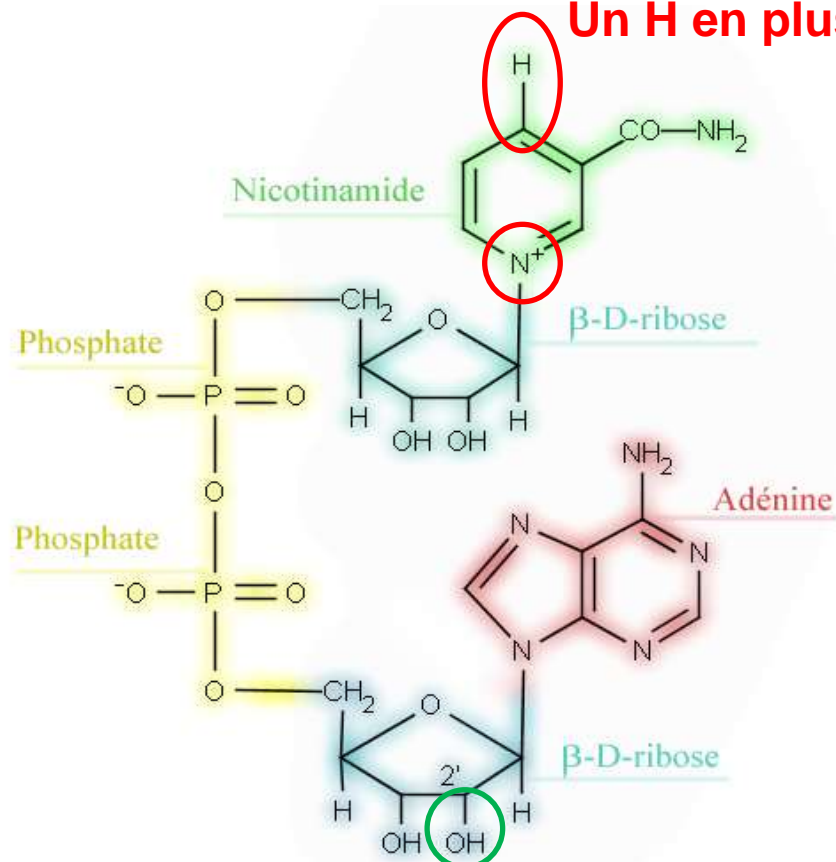
Avec  $\Delta E$  : différence de potentiel redox entre les couples considérés. Le signe « - » exprime le fait que les électrons passent spontanément des bas aux hauts potentiels ( $\Delta E$  positif).

Si  $E^0_{A^+/A} < E^0_{B^+/B}$  : quelle est la réaction spontanée ?

Un H en plus dans la forme réduite

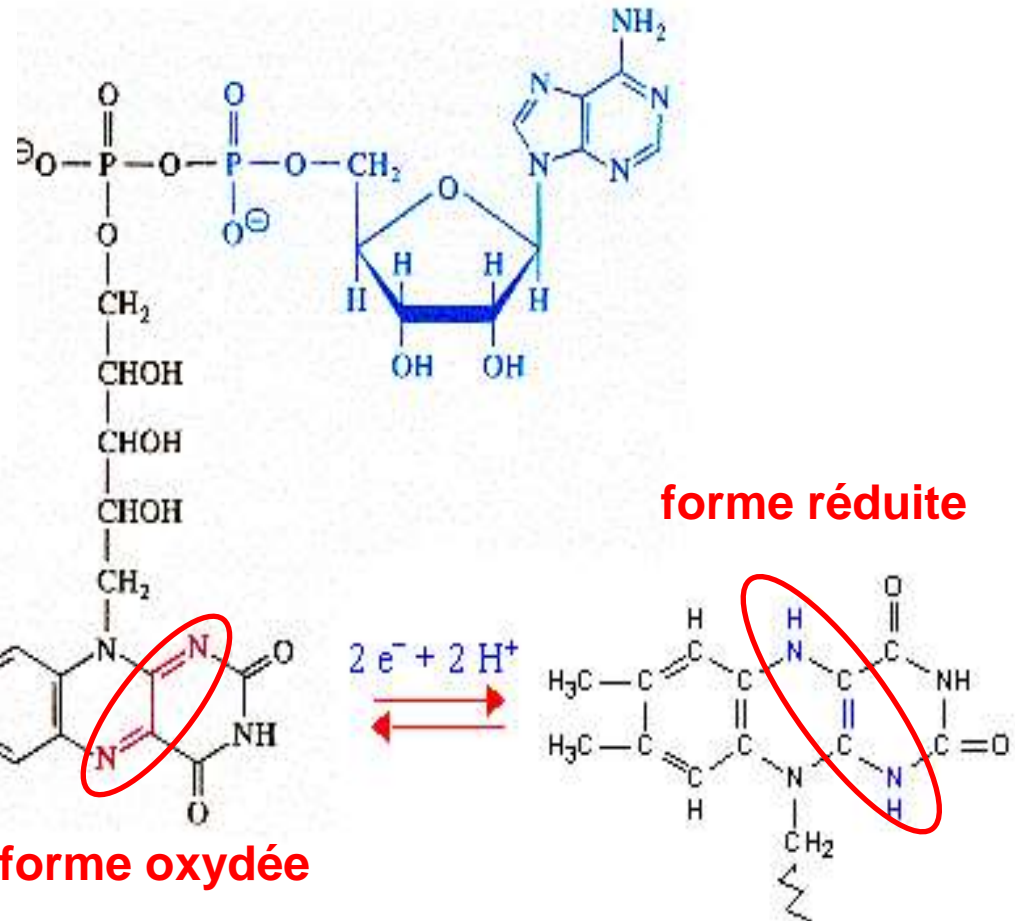
## Document 7. Structure des coenzymes d'oxydoréduction.

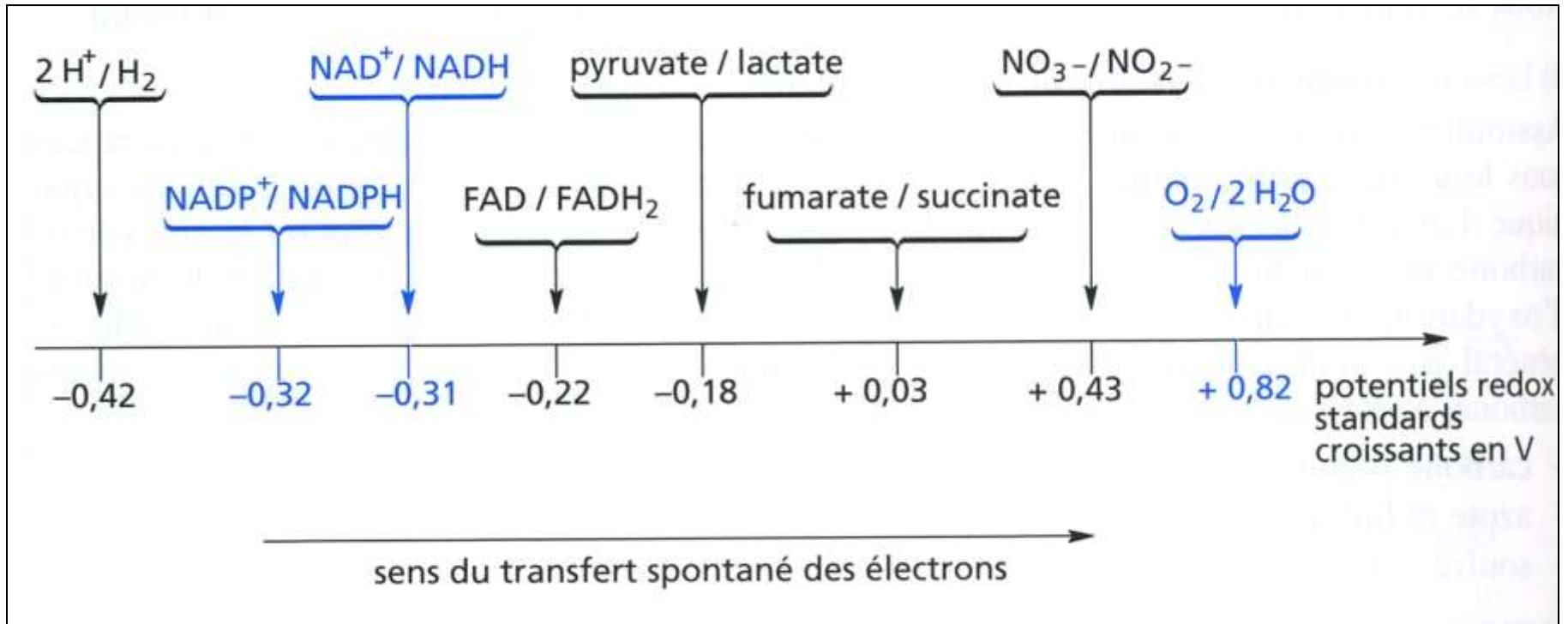
NAD<sup>+</sup> ou nicotinamide adénine dinucléotide  
= forme oxydée



Groupement P  
ici pour le  
NADP<sup>+</sup>

La flavine adénine  
dinucléotide (FAD)



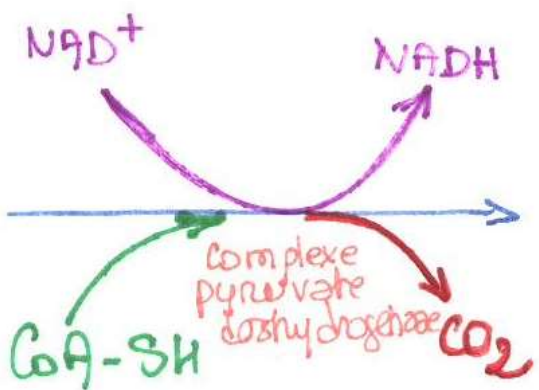
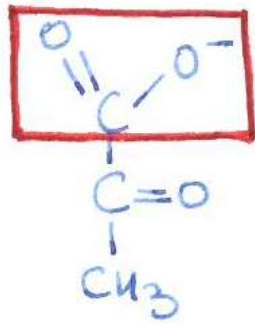


## Document 8. Echelle des valeurs du potentiel redox standard de quelques couples.

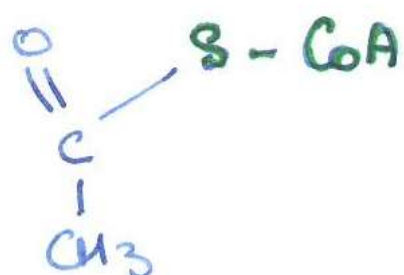
(Peycru P. et coll., " Biologie 1<sup>ère</sup> année BCPST ", Dunod Ed., 2007).



Pyruvate



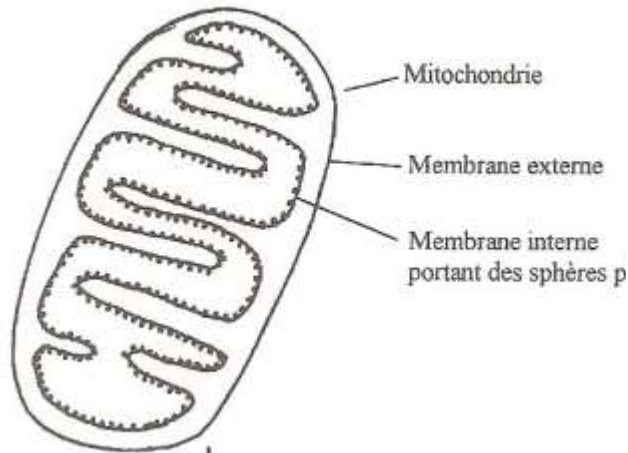
Acetyl-CoA



$$\Delta G^{\circ} = -33,4 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Un exemple de décarboxylation oxydative

# Mise en évidence de l'utilisation d'un gradient protonique pour la synthèse d'ATP à l'aide de particules submitochondriales

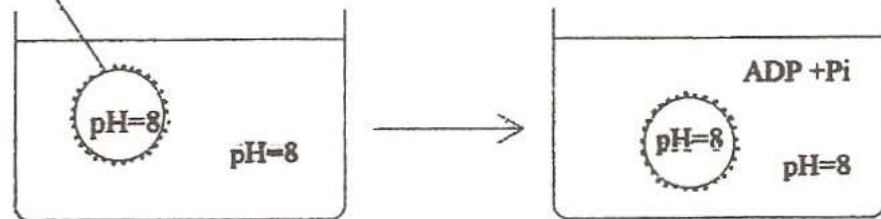


Fragmentation par ultrasons

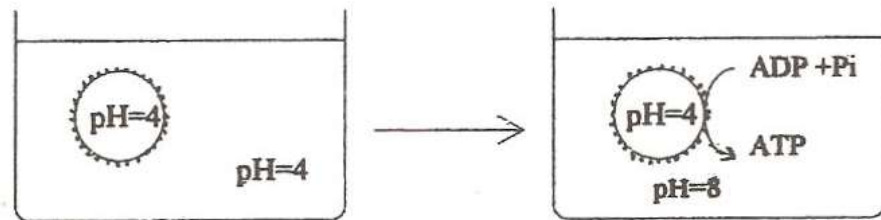


Particules submitochondriales  
= vésicules de membrane interne

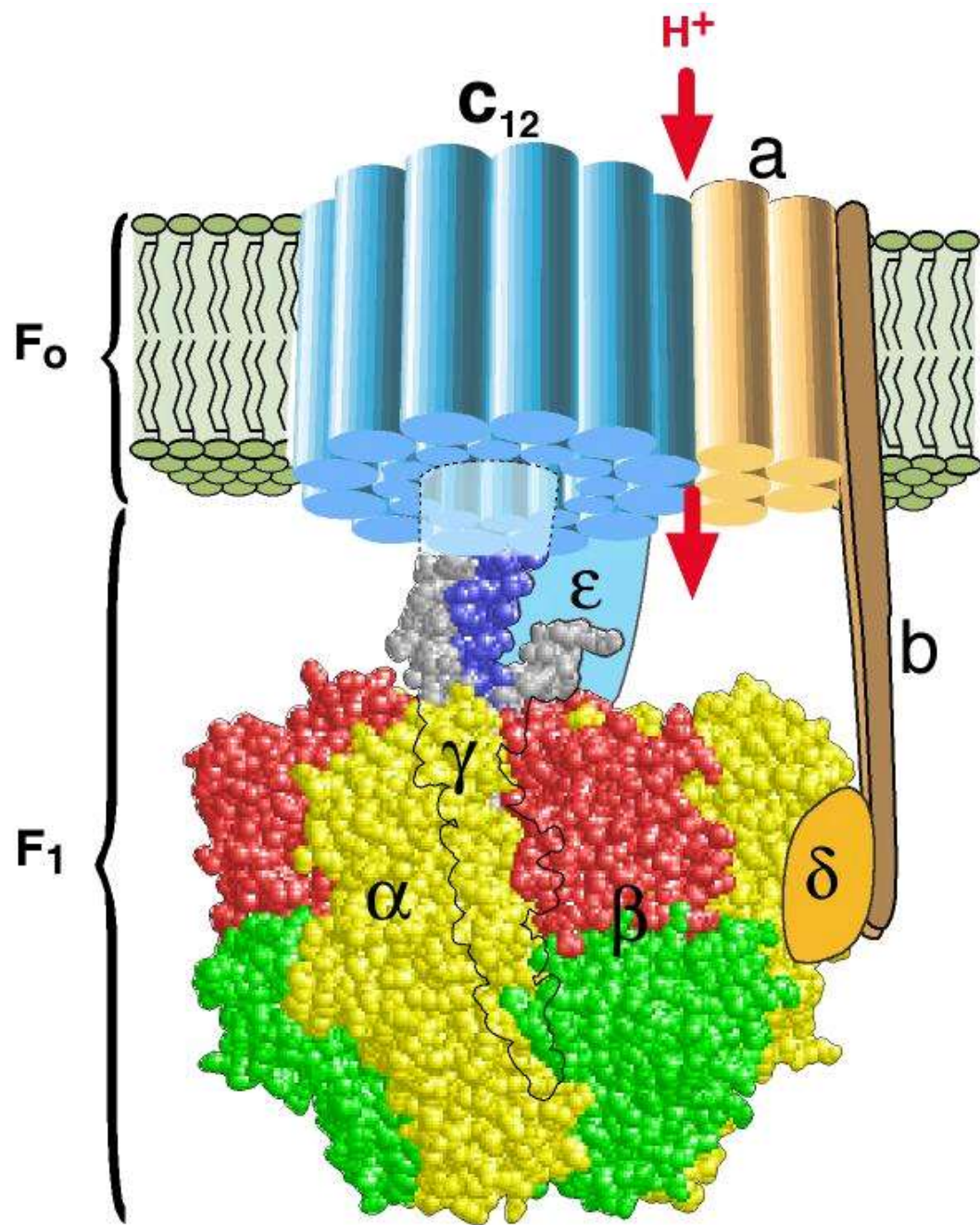
Particule submitochondriale



a/ Lorsque le pH de la vésicule interne est égal ou supérieure à celui du milieu extravésiculaire il n'y a pas formation d'ATP



b/ Lorsque le pH de la vésicule interne est inférieur à celui du milieu extravésiculaire on constate la synthèse d'ATP



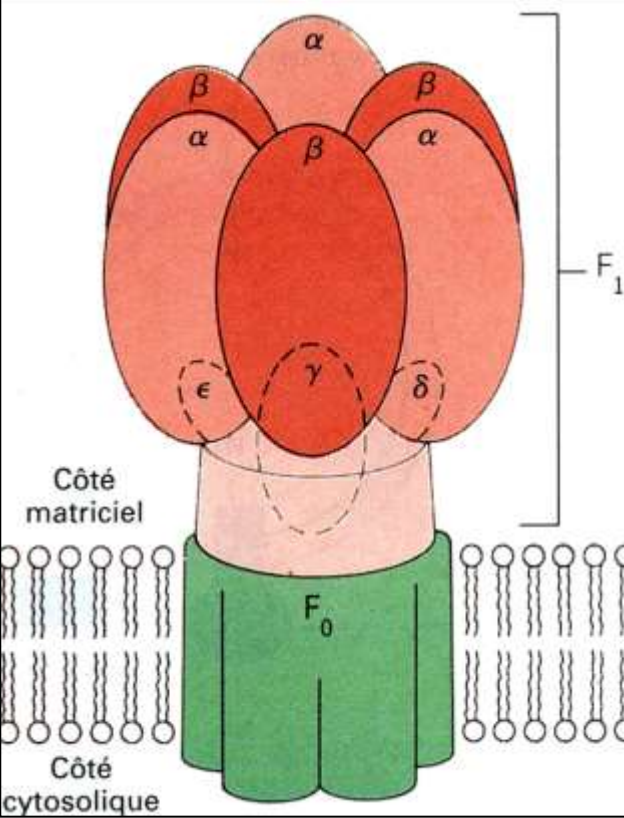
# Modèle structural de l'ATP synthase

Peter D. Mitchell  
Prix Nobel chimie  
1978



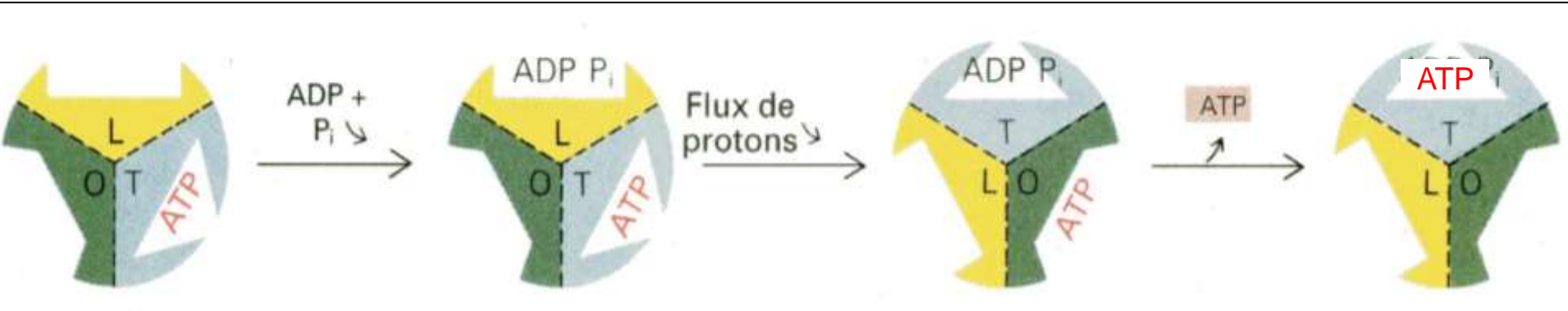
## Document 9. Représentation schématique de l'ATP synthase.

(STRYER L., « La biochimie » Flammarion Médecine – Sciences Ed. 1997).



Voir [l'animation !](https://youtu.be/kXpzp4RDGJI)

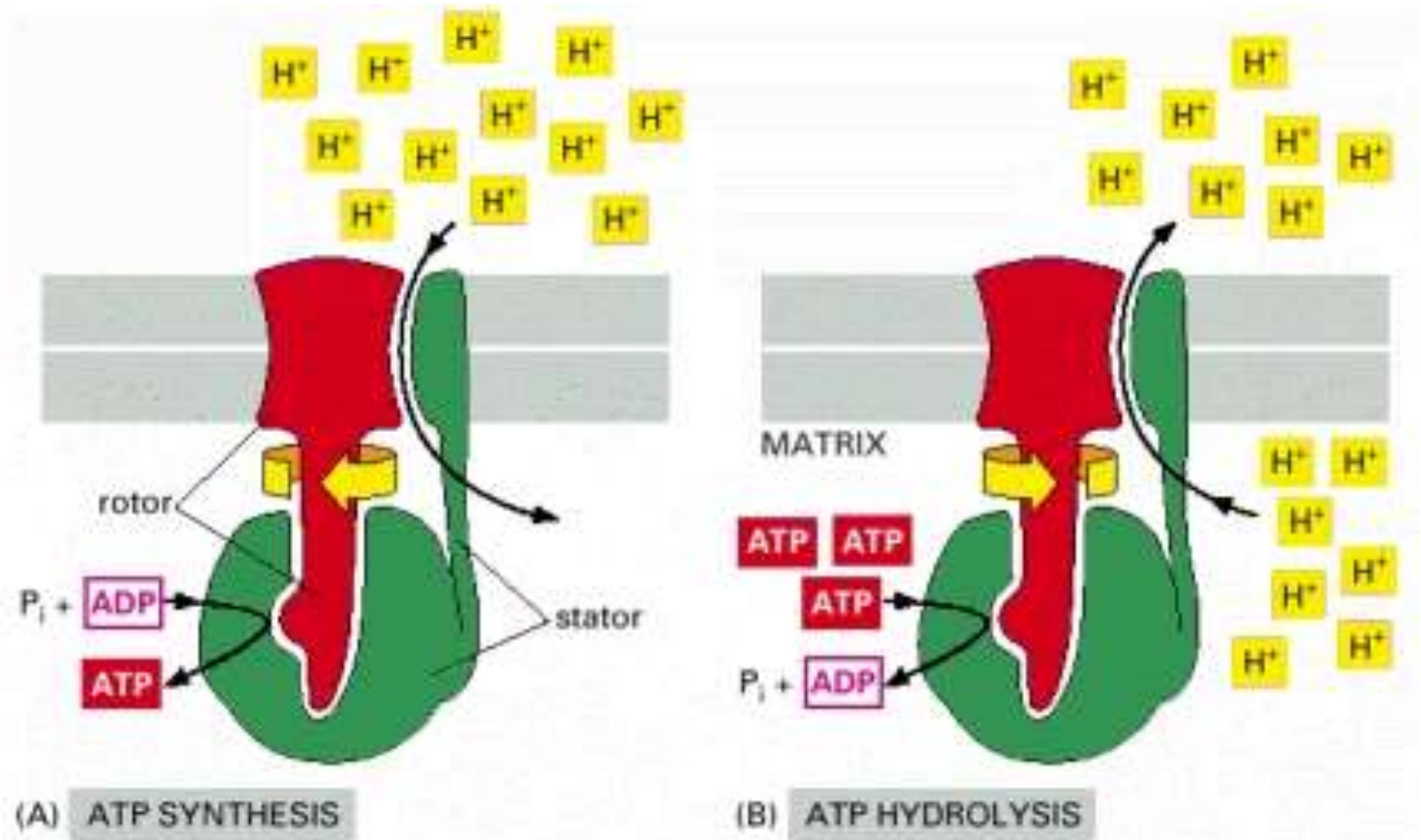
<https://youtu.be/kXpzp4RDGJI>



## Document 10. Modèle de fonctionnement de l'ATP synthase.

(d'après STRYER L., « La biochimie » Flammarion Médecine – Sciences Ed. ; 1997).





**Le fonctionnement de l'ATP synthase est réversible :  
l'hydrolyse d'ATP peut financer un transport de protons.**

# Document 11. Les couples redox de la membrane mitochondriale interne.

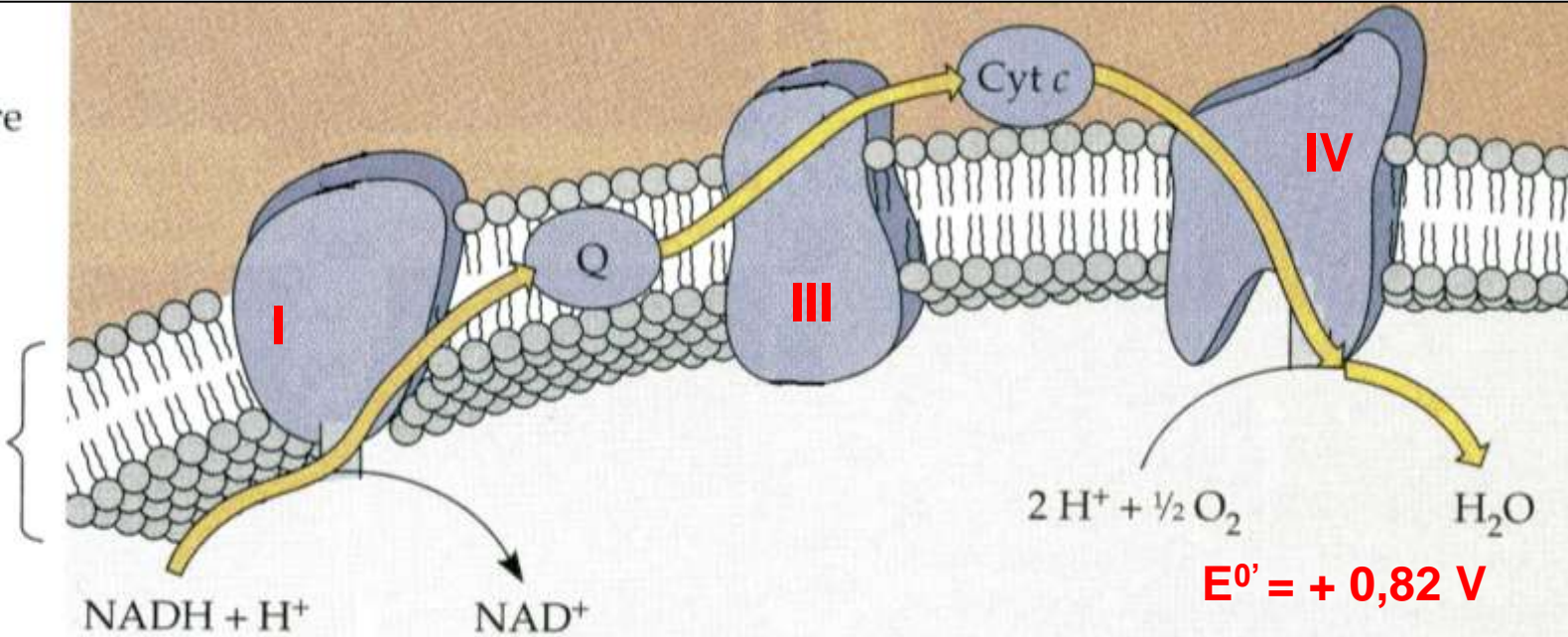
Composant	Nomenclature	Composition	E°' (V)
Complexe I	NADH déshydrogénase	25 ss-unités dont plusieurs <b>protéines Fe-S</b> et un centre <b>FMN</b> (flavine mononucléotide)	- 0,12
Ubiquinone ou coenzyme Q	Ubiquinone ou coenzyme Q	Polyisoprène : <b>lipide</b> au sens large présentant <b>une forme réduite et une forme oxydée</b>	0,045
Complexe III	Cytochrome c réductase	8 sous-unités dont une <b>protéine fer-soufre</b> et des <b>cytochromes (b et c1)</b>	b : 0,077 c1 : 0,215
Cytochrome C	Cytochrome C	<b>Cytochrome c</b>	0,235
Complexe IV	Cytochrome C oxydase	13 sous-unités dont des <b>cytochromes (a et a3)</b>	a : 0,29 a3 : 0,385

**Protéines fer-soufre** : possèdent Fe et S qui peuvent changer de valence → **transporteurs d'électrons.**

**Cytochromes** : protéines avec groupement prosthétique (=non protéique) à Fe ou Cu, qui peuvent changer de valence → **transporteurs d'électrons.**

Espace intermembranaire

Membrane mitochondriale interne



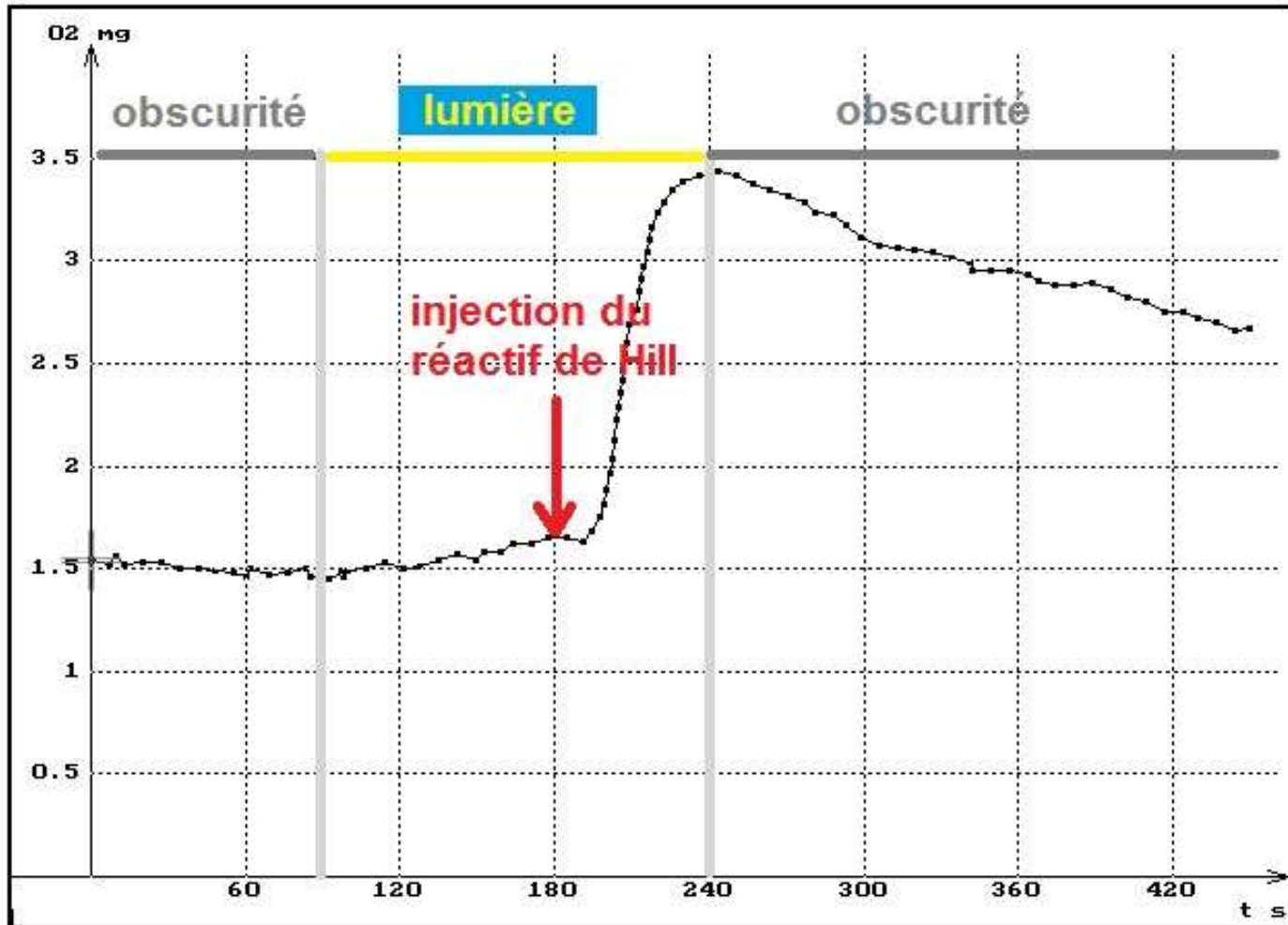
$$E^{\circ} = - 0,31 \text{ V}$$

## Document 12. La chaîne de transport des électrons dans la membrane mitochondriale interne.

Composants	Composition	Propriétés redox
Lipides structuraux	Glycolipides, sulfolipides très insaturés	
PSI	Pigments (dont chlorophylles, caroténoïdes) apparentés aux lipides par leurs propriétés hydrophobes, associés à des protéines	oui pour la chlorophylle a de ces complexes
PSII	Pigments (dont chlorophylles) apparentés aux lipides par leurs propriétés hydrophobes, associés à des protéines	
Quinone Q Plastoquinone	Polyisoprènes : lipides au sens large avec une forme réduite et une forme oxydée	oui
Plastocyanine	Protéine à Cu	oui
Complexe b6f	cytochromes	oui
Ferrédoxine	Protéine Fe-S	oui
ATP synthase	Comparable à celle des mitochondries	

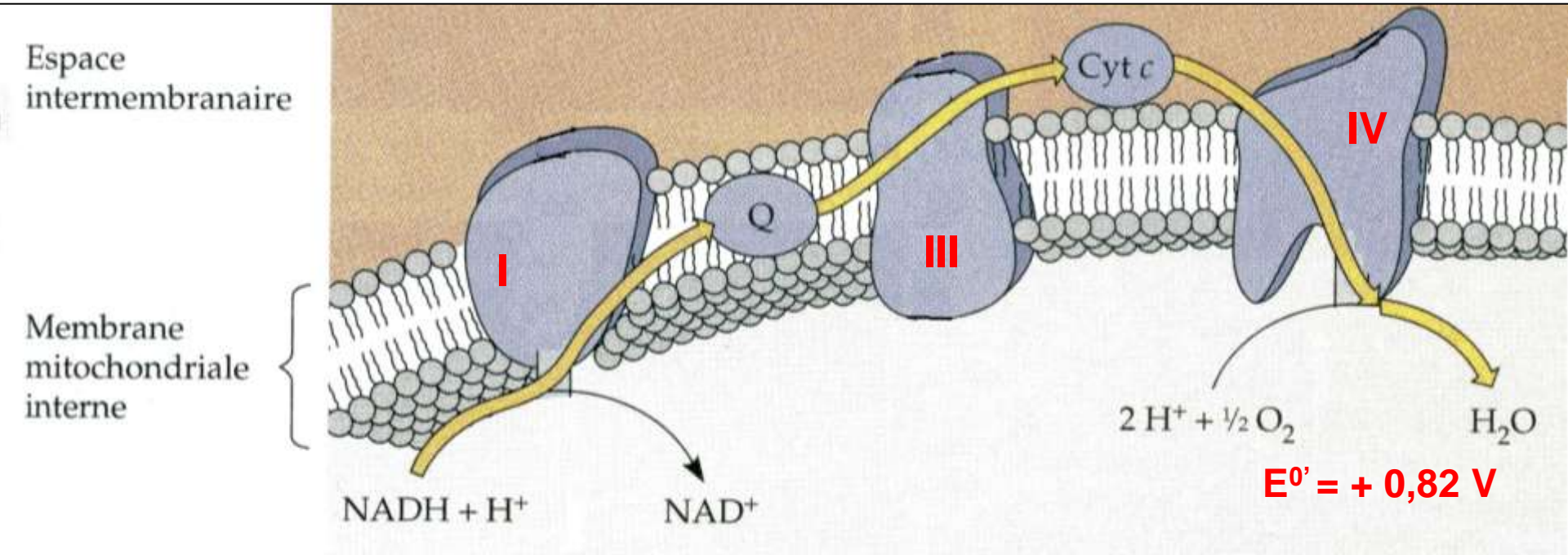
## Document 13. Les principaux constituants de la membrane des thylacoïdes.

# Document 14. Résultats de l'expérience de Hill





# Document 12. La chaîne de transport des électrons dans la membrane mitochondriale interne.



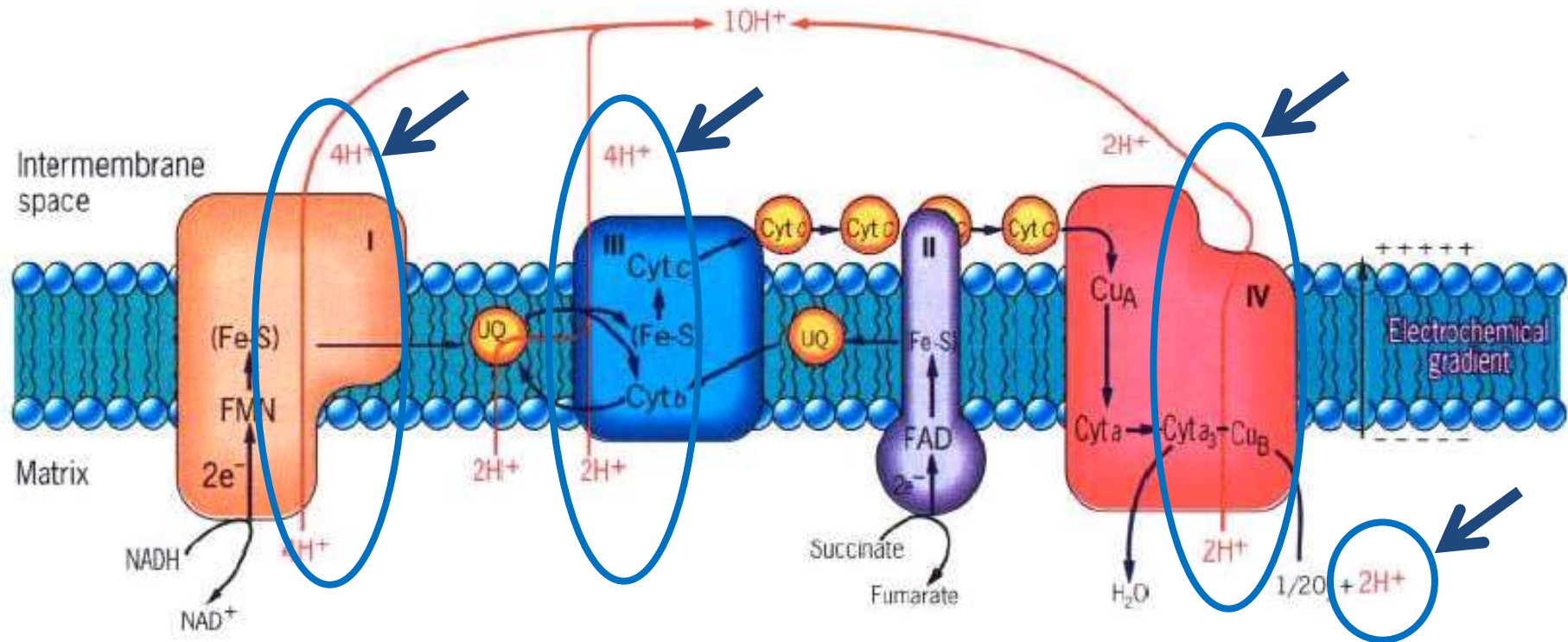
$$E^{\circ} = - 0,31 \text{ V}$$

$$\Delta G = - n F \Delta E$$

avec :  $E^{\circ}(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) = 0,82 \text{ V}$  et  $E^{\circ}(\text{NAD}^+/\text{NADH}) = - 0,31 \text{ V}$

$$\Delta G^{\circ} = - 2 \times 96\,500 \times 1,13 = - 220 \text{ kJ/mol}$$

# Trajet des électrons dans la chaîne respiratoire et translocation de protons



Complex I  
NADH Dehydrogenase

Complex III  
Cytochrome bc<sub>1</sub>

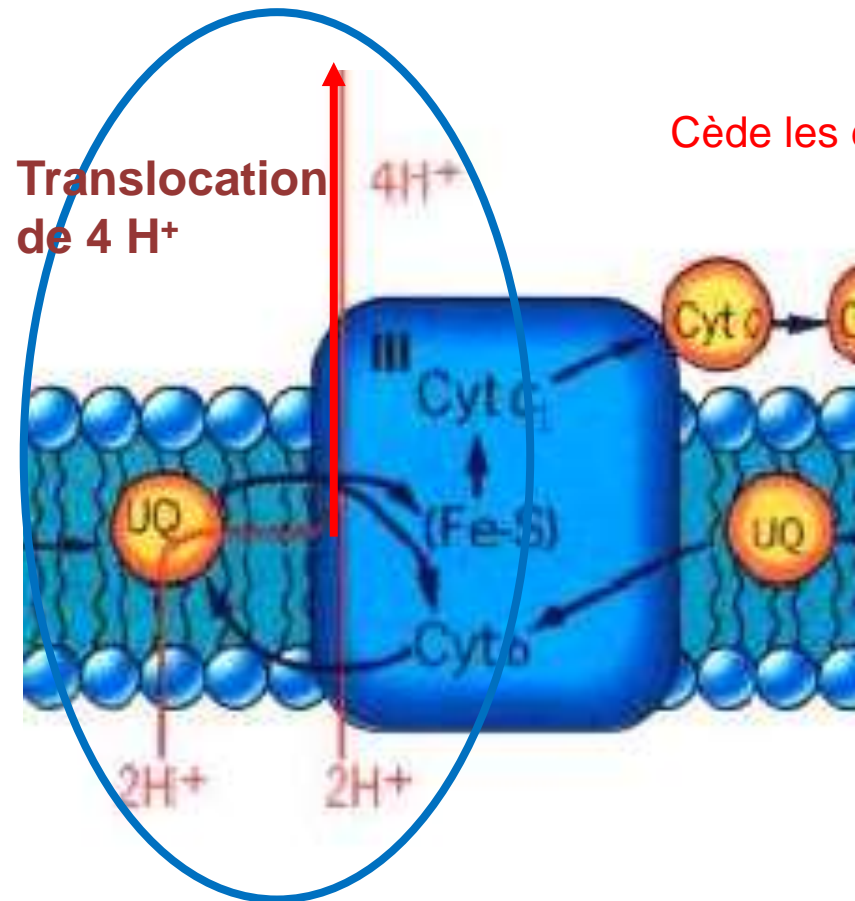
Complex II  
Succinate dehydrogenase

Complex IV  
Cytochrome c Oxidase

Reçoit les électrons de NADH

Reçoit les électrons de FADH<sub>2</sub>

# Trajet des électrons dans la chaîne respiratoire et translocation de protons : les acteurs du cycle Q

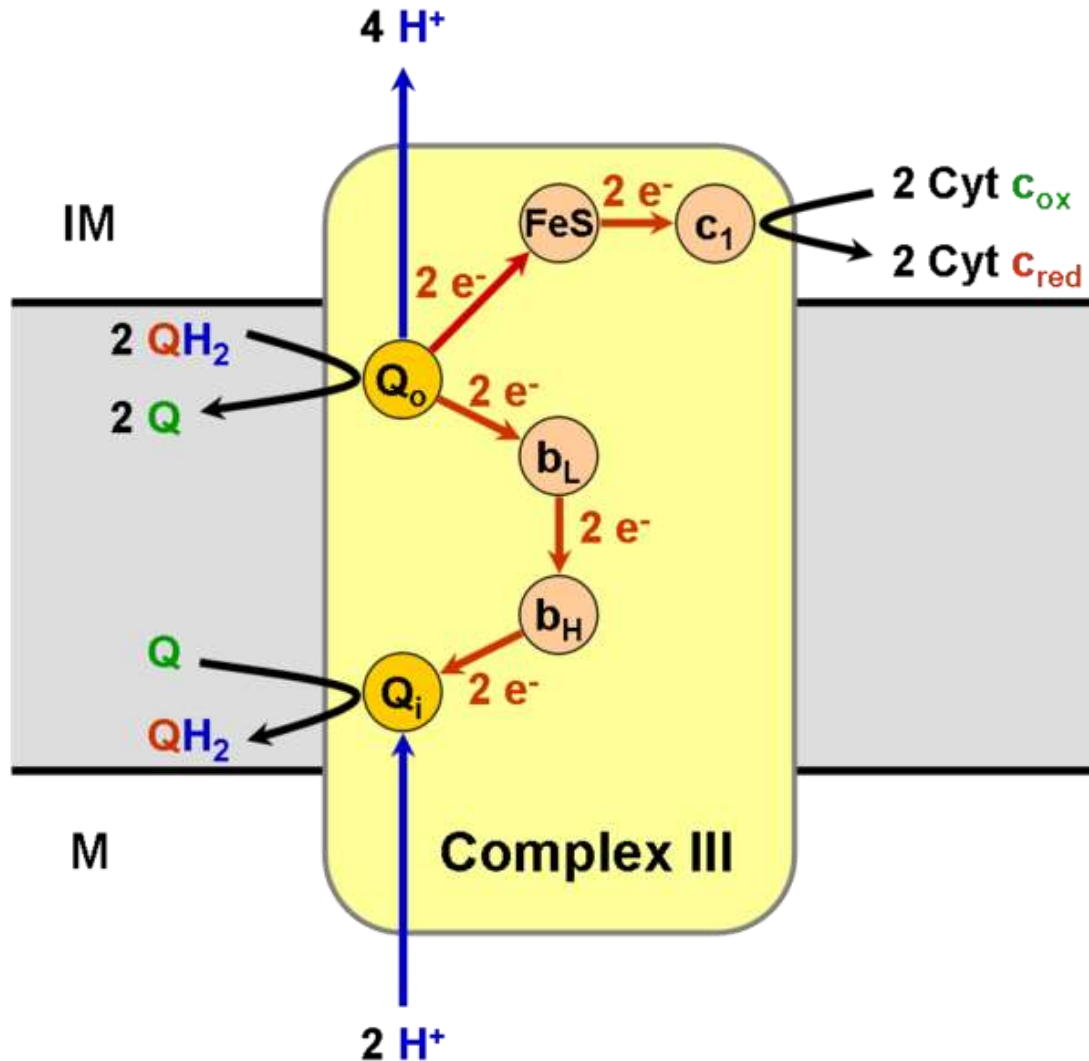


Cède les électrons à cyt c

Le complexe III

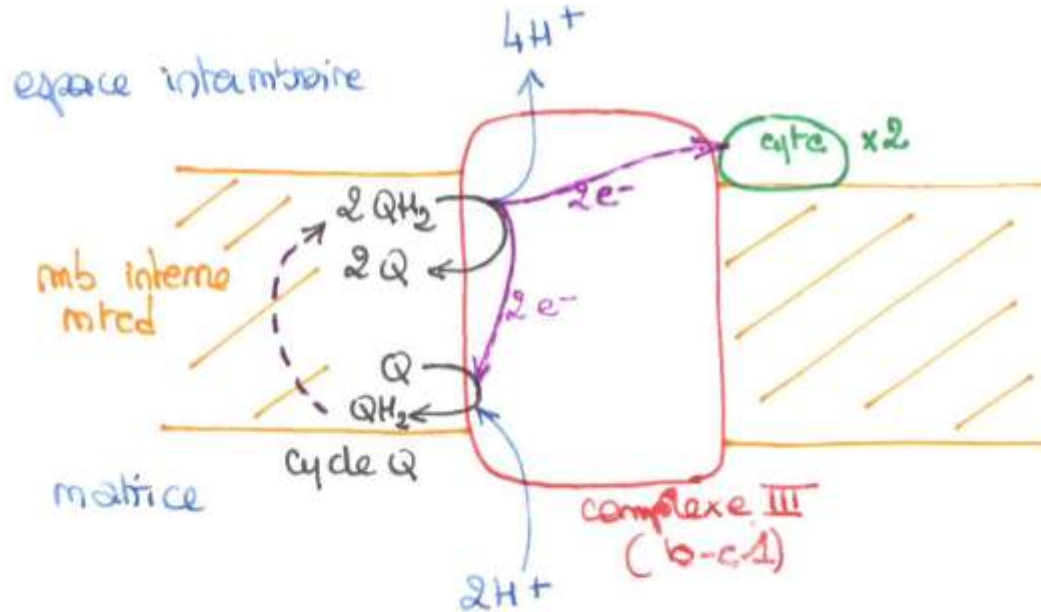
Reçoit les électrons de UQ

# Translocation des protons lors du fonctionnement du complexe b-c1.

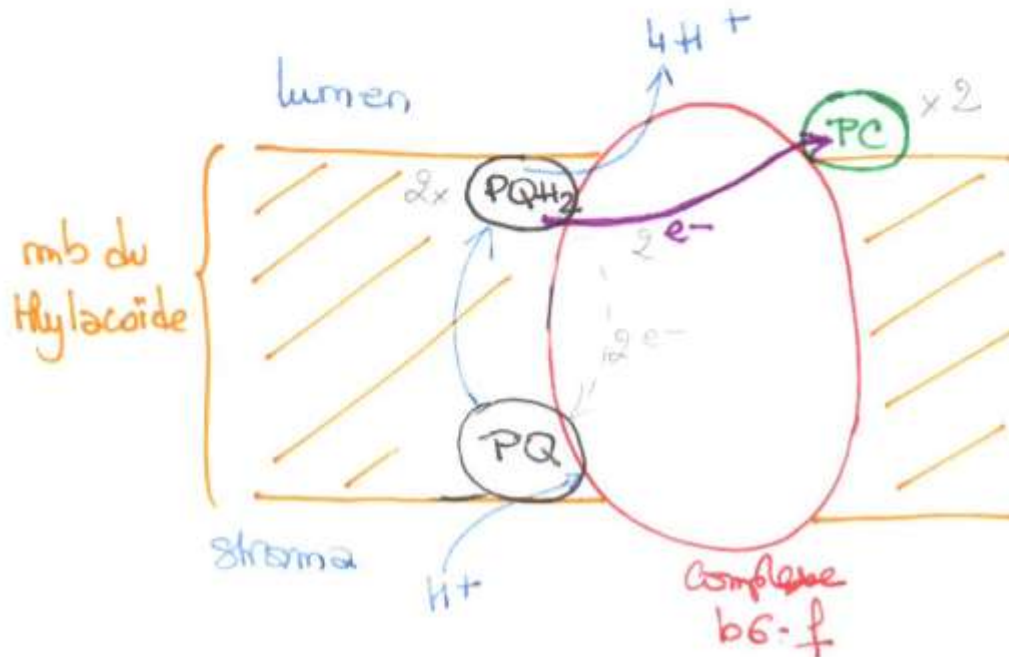




# Cycle Q (mitochondrie) et cycle PQ (chloroplaste)

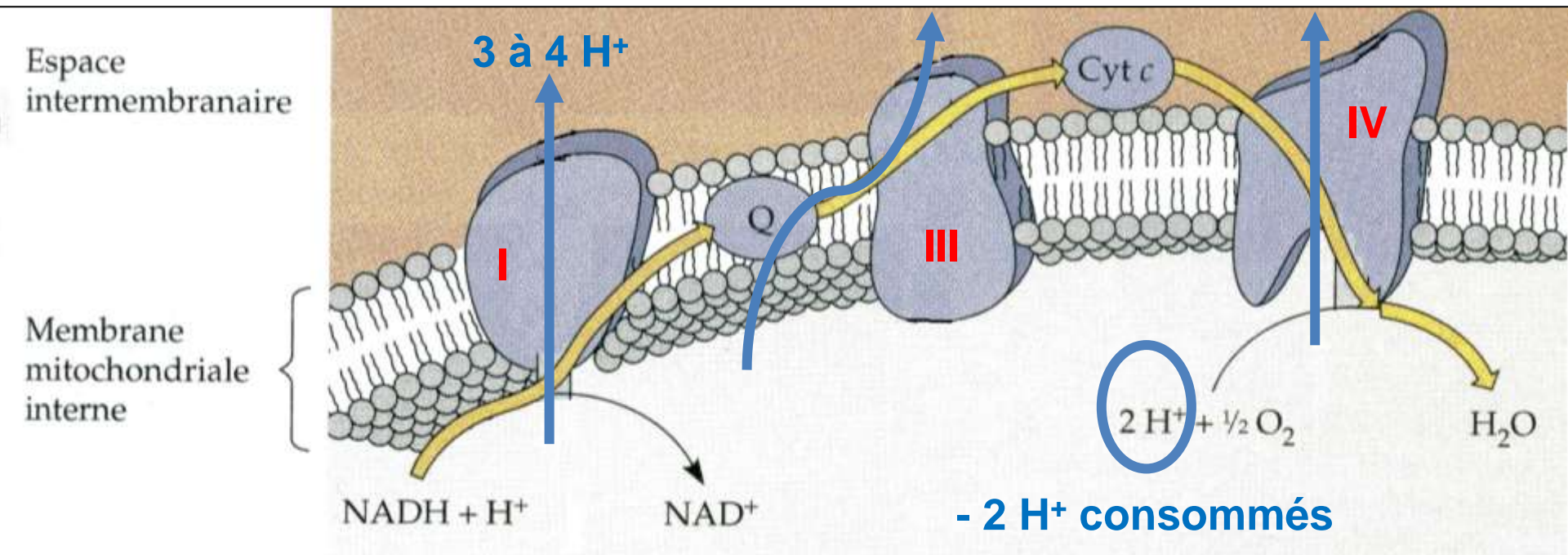


Translocation de protons au niveau du complexe b-c1  
(de la mitochondrie)



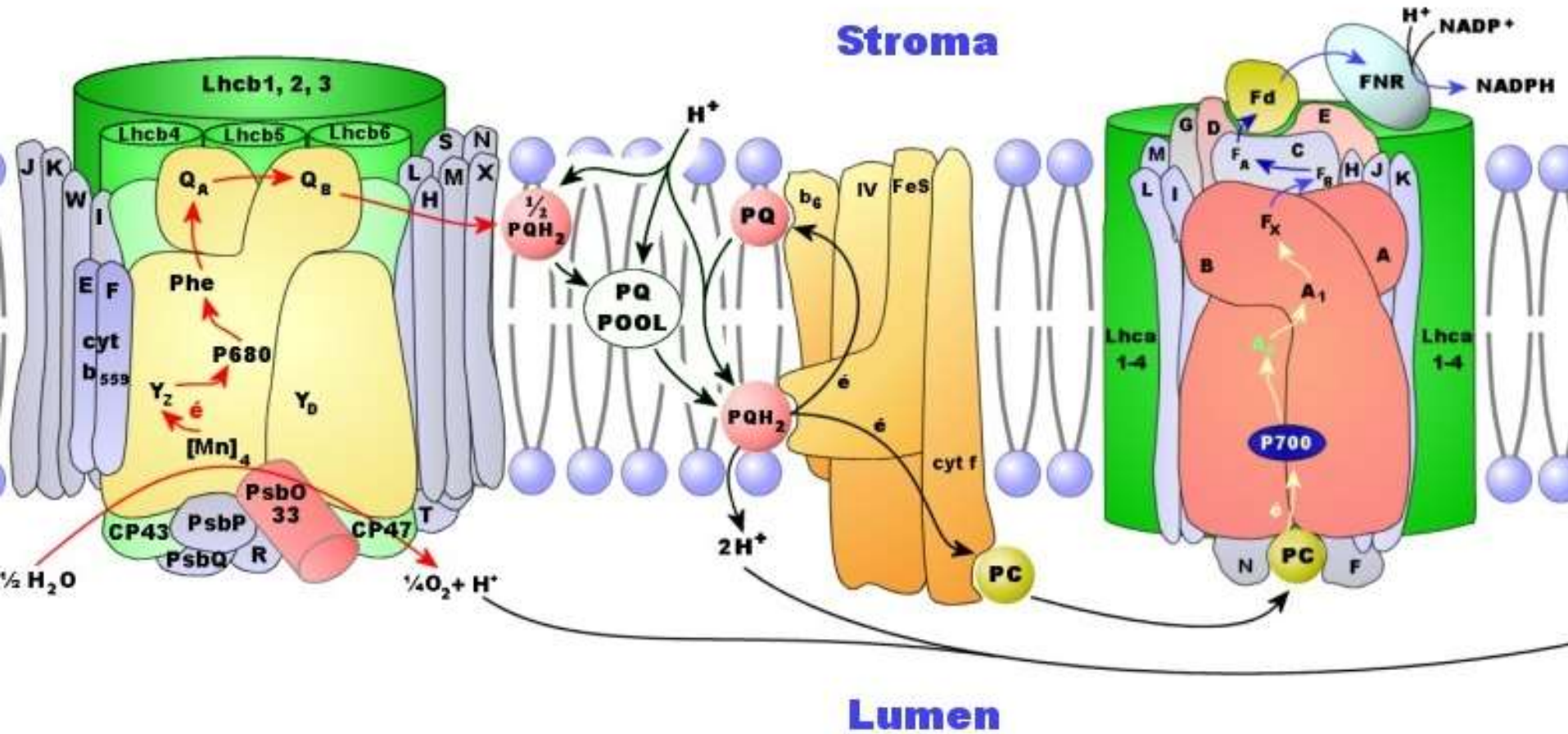
Translocation de protons au niveau du complexe b6-f  
(du chloroplaste)  
du thylacoïde





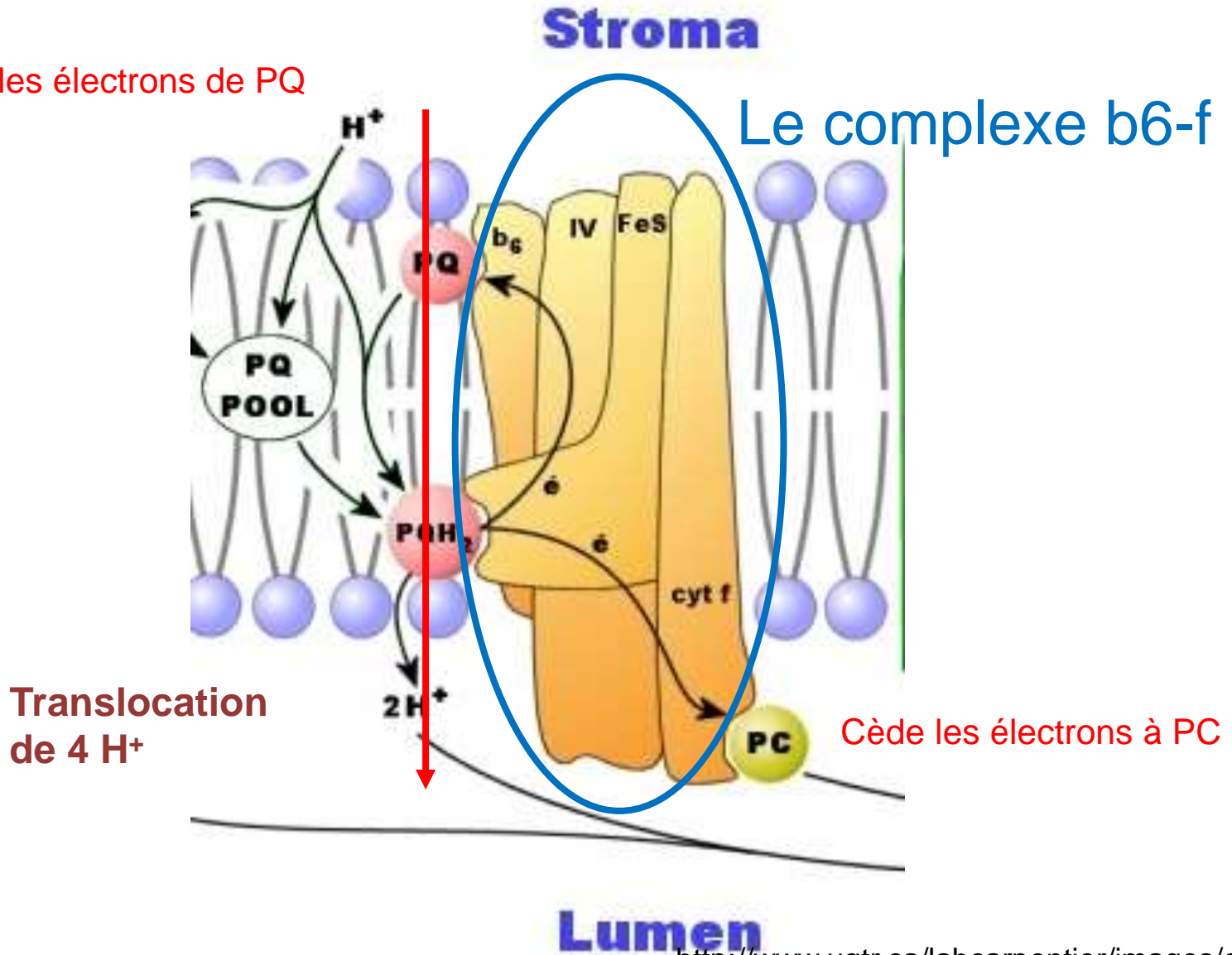
## Document 12. La chaîne de transport des électrons dans la membrane mitochondriale interne.

# Trajet des électrons et translocation des protons dans la membrane des thylacoïdes

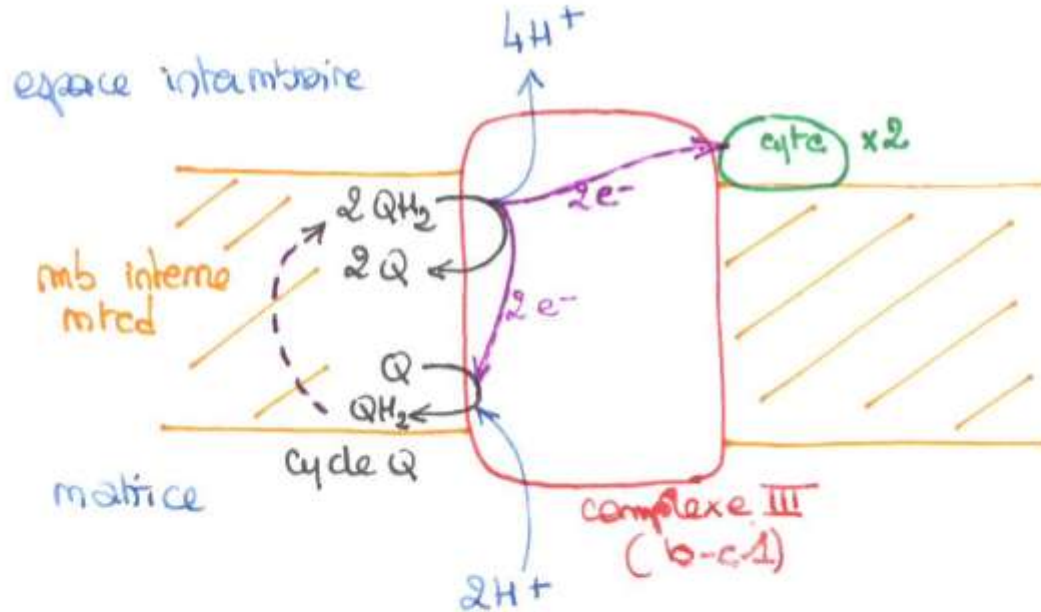


# Trajet des électrons dans la chaîne photosynthétique et translocation de protons : les acteurs du cycle PQ

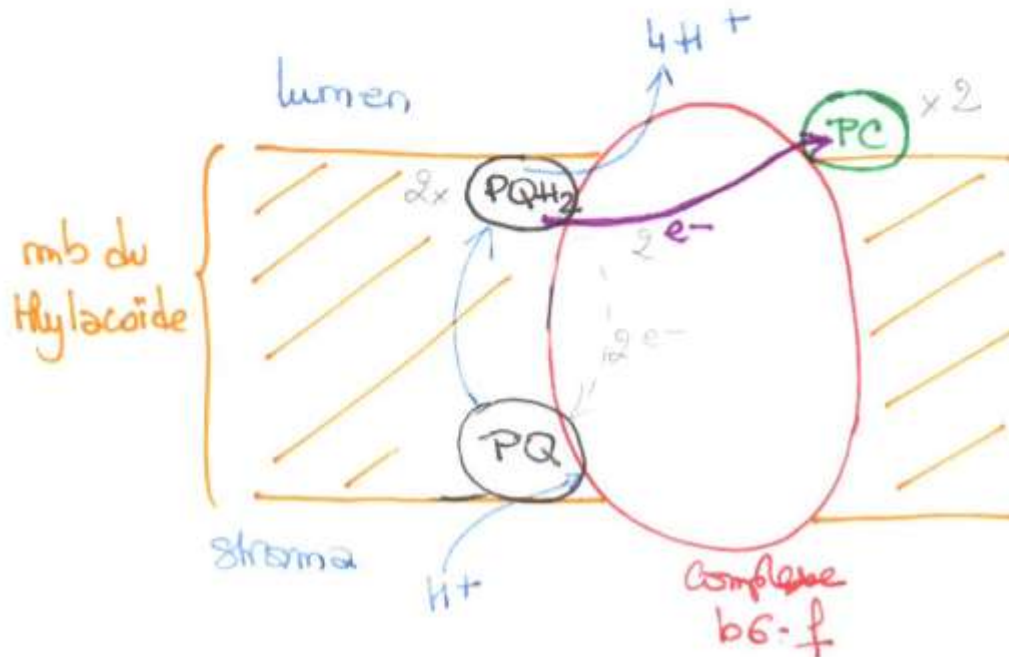
Reçoit les électrons de PQ



# Cycle Q (mitochondrie) et cycle PQ (chloroplaste)

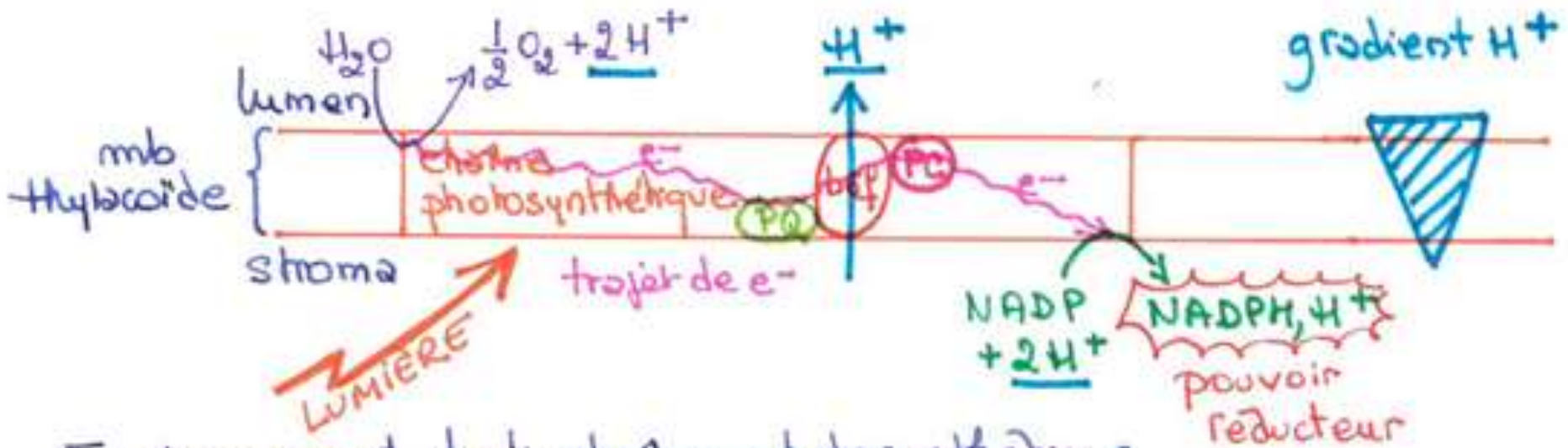


Translocation de protons au niveau du complexe b-c1 (de la mitochondrie)



Translocation de protons au niveau du complexe b6-f (du chloroplaste) du thylacoïde

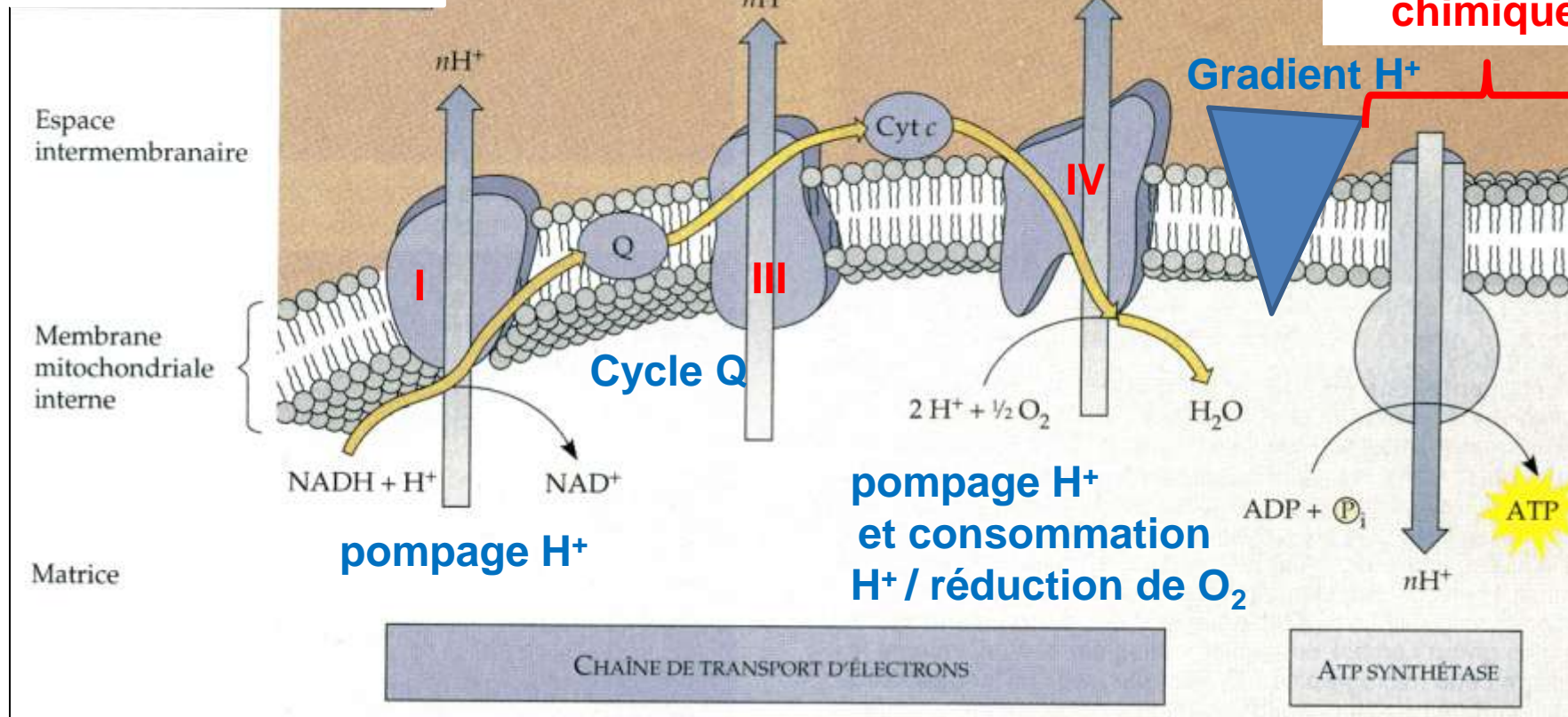




Fonctionnement de la chaîne photosynthétique et établissement d'un gradient protonique

## couplages chimio-osmotiques

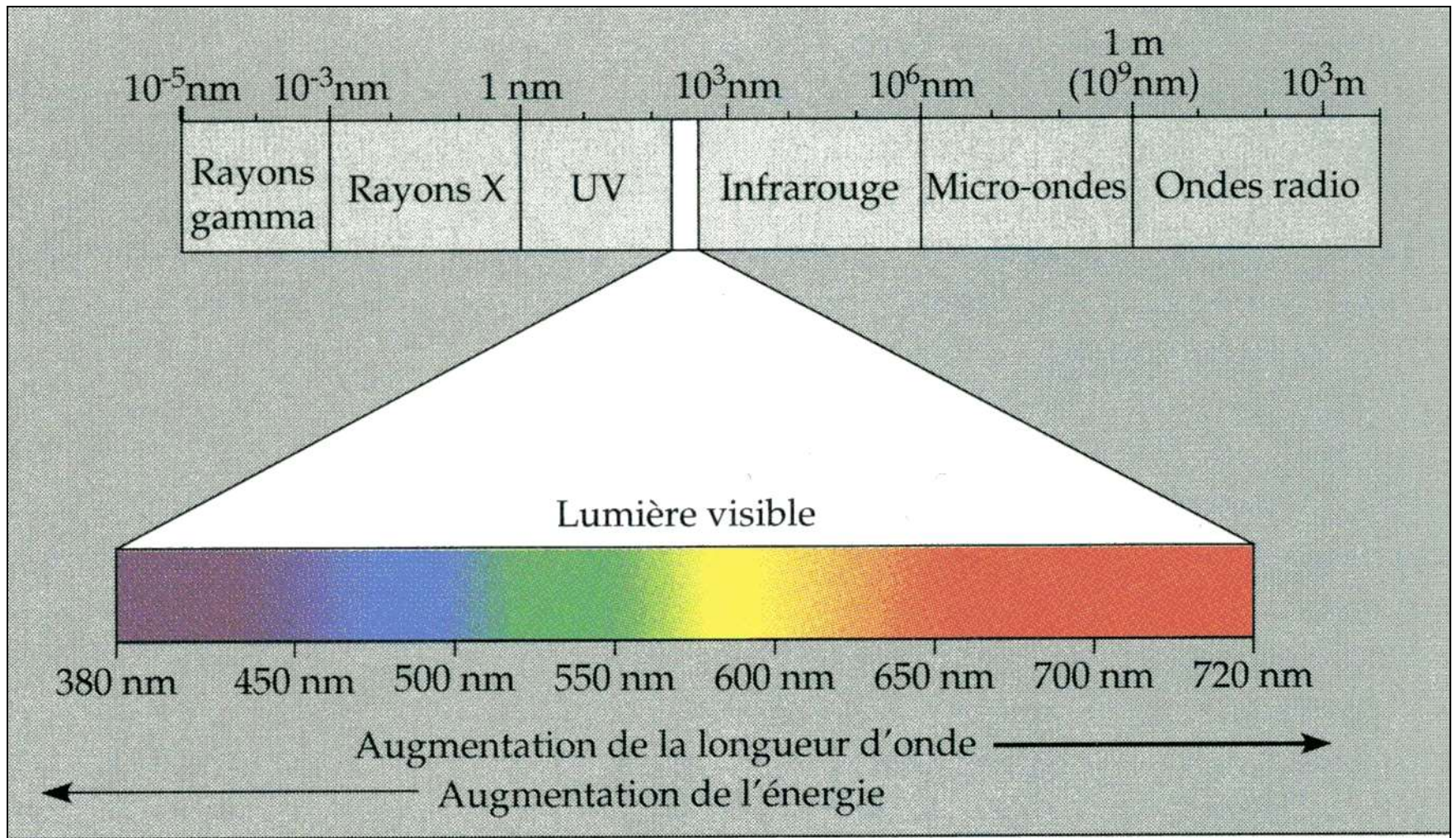
## couplage osmo-chimique



# Modèle de l'organisation fonctionnelle de la chaîne respiratoire mitochondriale.

(CAMPBELL N., " Biologie ", ERPI Ed., 1995).

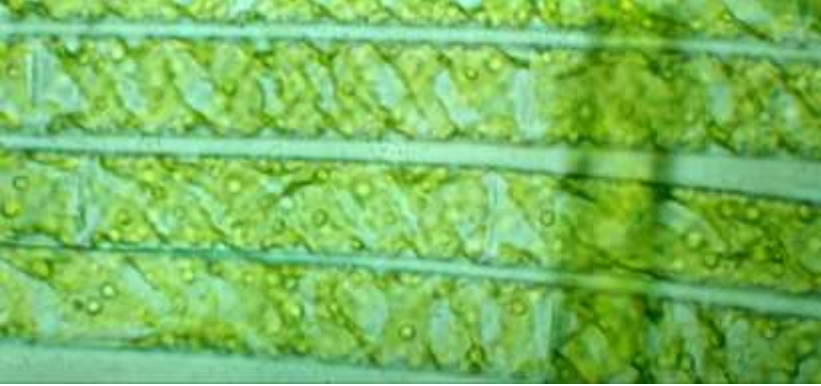




## **Document 15. Le spectre électromagnétique.**

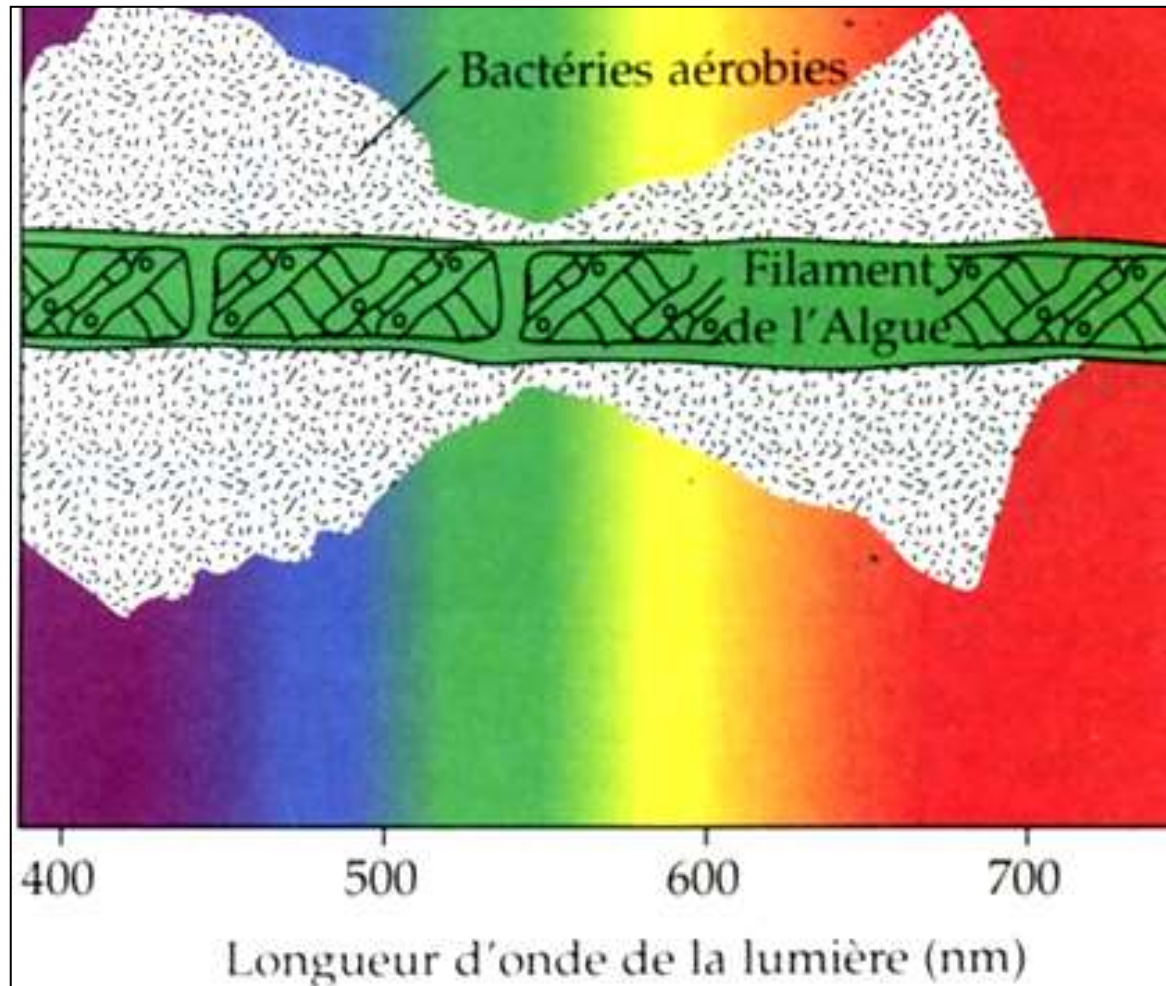
(CAMPBELL N., " Biologie ", ERPI Ed., 1995).



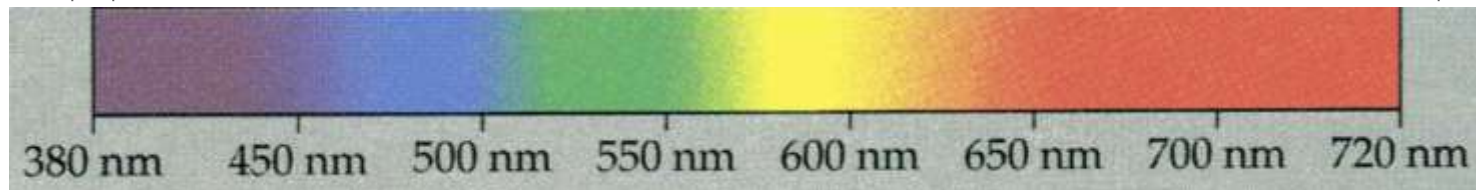
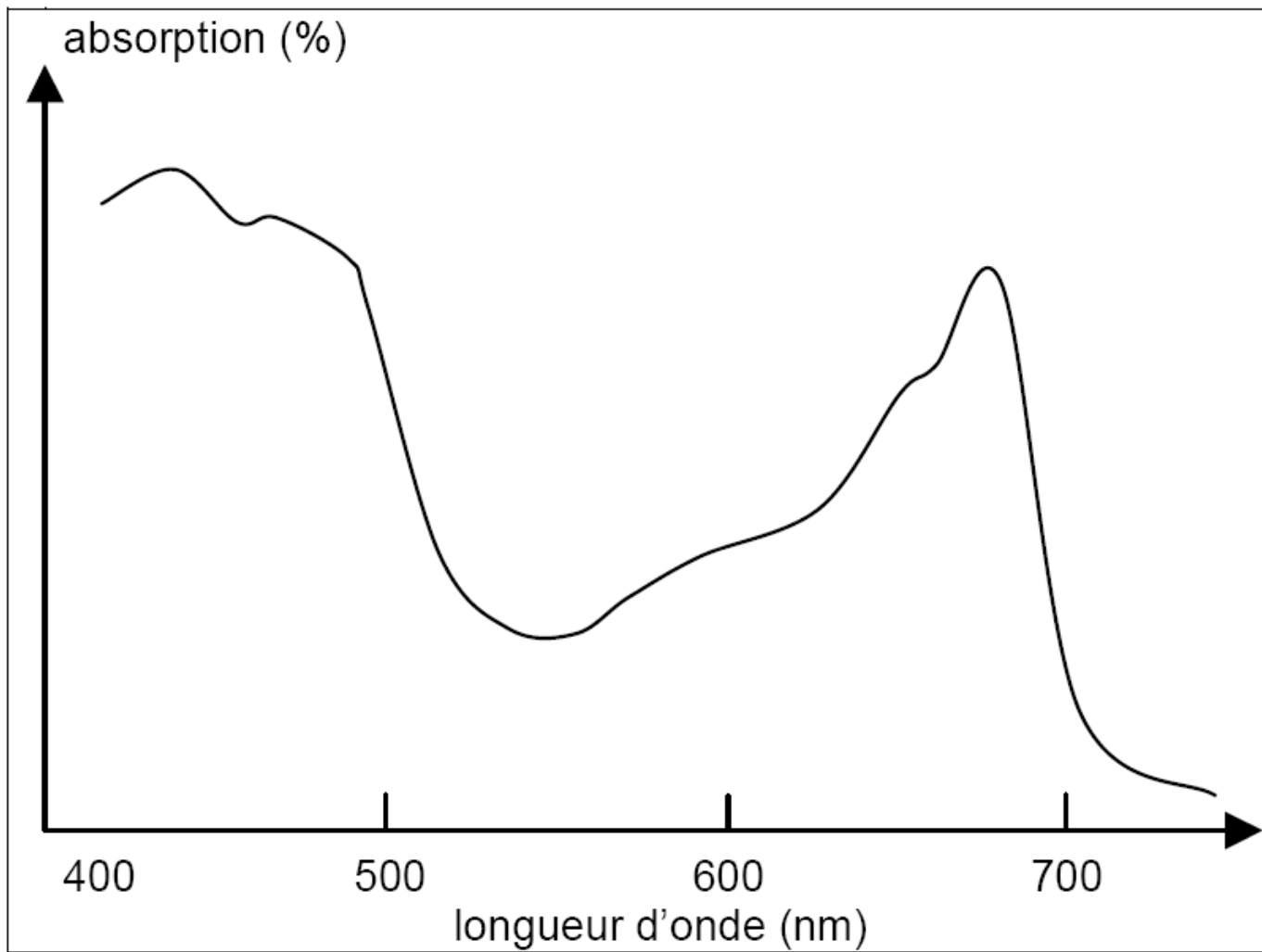


## Document 16. Résultats de l'expérience d'Engelmann (1885).

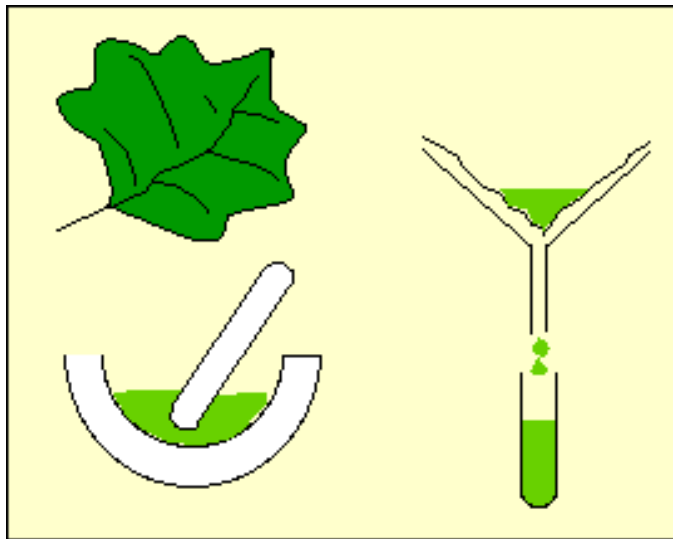
(CAMPBELL N., " Biologie ", ERPI Ed., 1995).







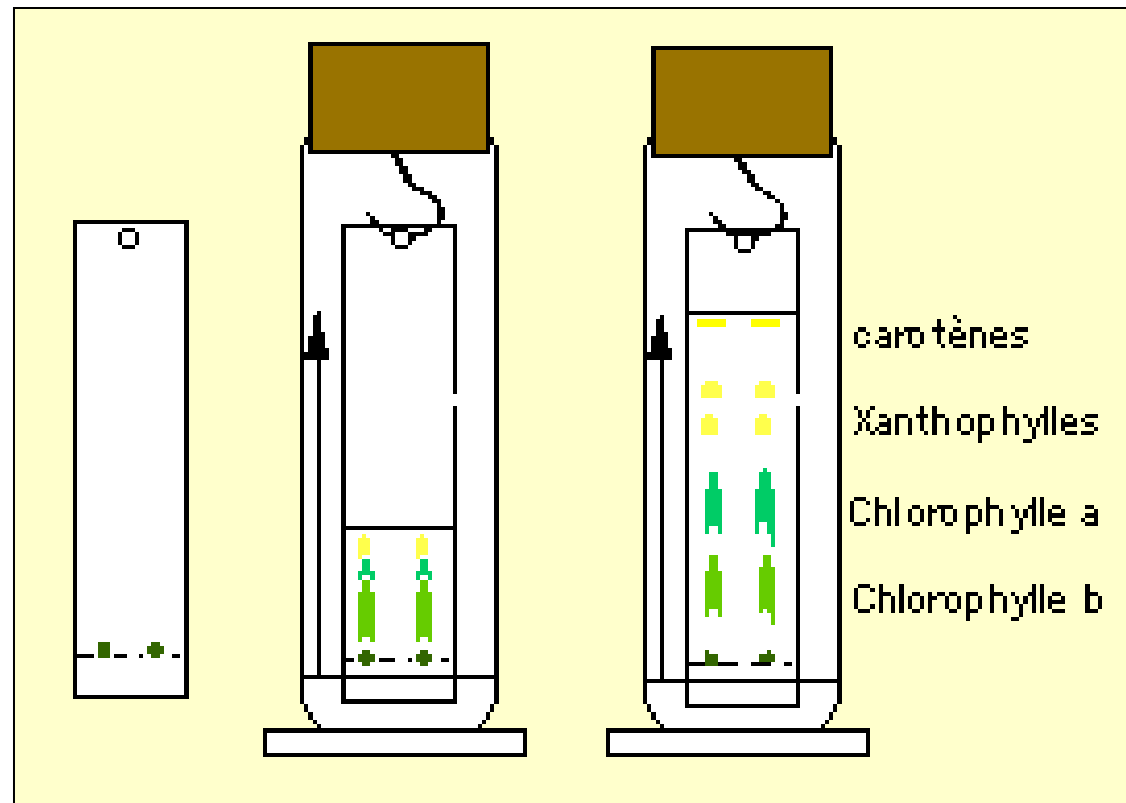
**Document 17 : Spectre d'absorption des pigments extraits d'une algue verte.** (D'après Blinks LR in : " La photosynthèse " H. JUPIN, A. LAMANT, DUNOD Ed. 1999).

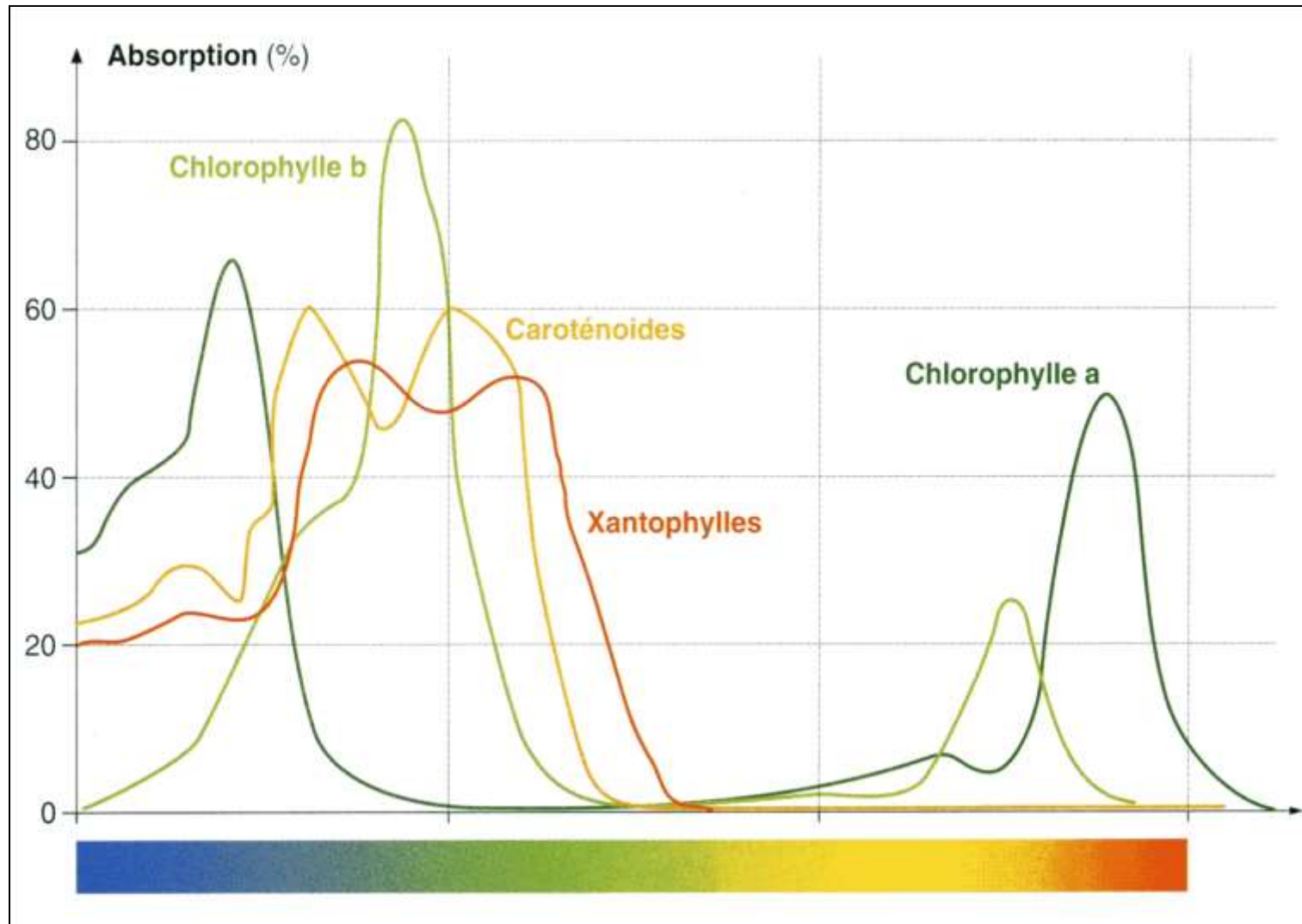


## Chromatographie de pigments bruts :

Mise en œuvre et résultats.

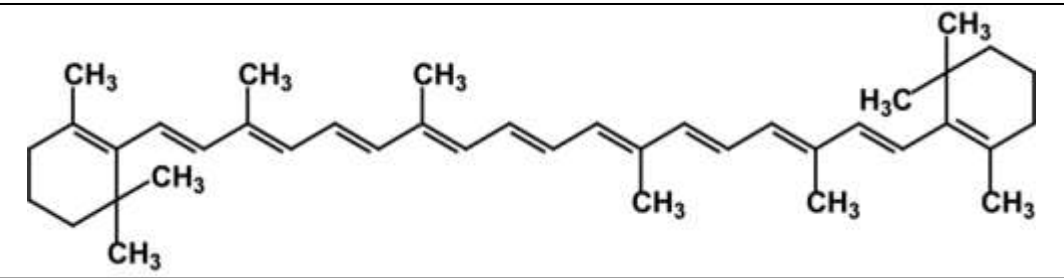
**Extraction des pigments bruts :**  
 la feuille est broyée dans de l'alcool absolu ou de l'acétone. Les pigments solubles dans les solvants organiques sont extraits. Après filtration pour éliminer les débris cellulaires, on obtient une solution brute de pigments.





## **Document 18 : Spectre d'absorption des différents pigments.**

(" SVT T°S spécialité ", Nathan Ed., 2002).

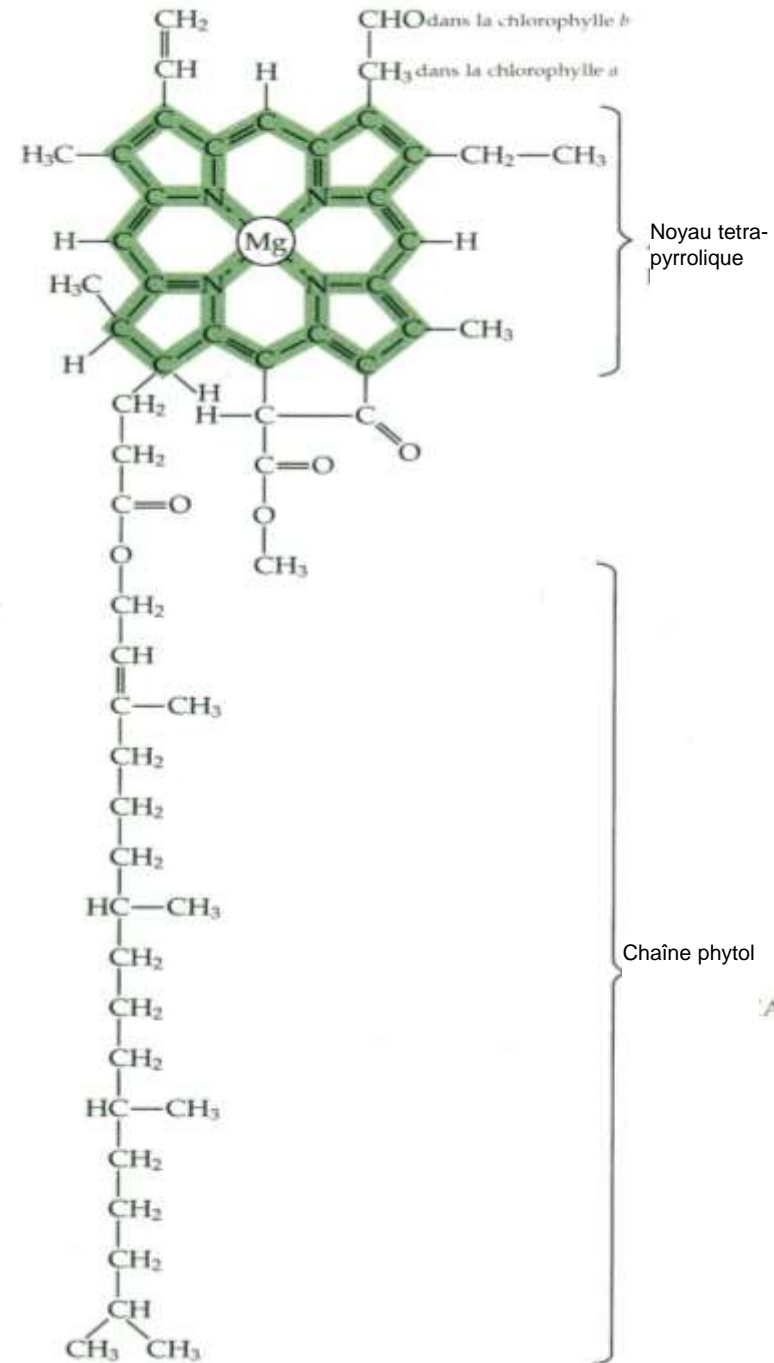


## Document 19. Structure de la chlorophylle et du $\beta$ -carotène.

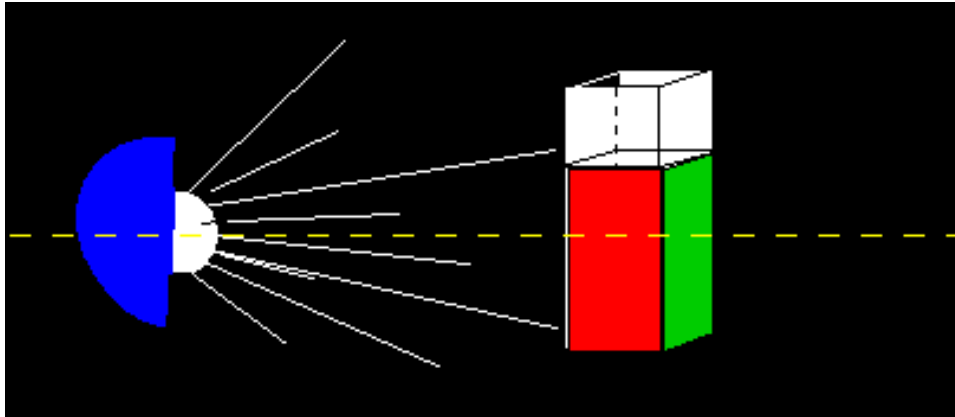
Ci-dessus :  $\beta$ -carotène

A droite : chlorophylle

(CAMPBELL N., " Biologie ", ERPI Ed., 1995).



# La fluorescence de la chlorophylle

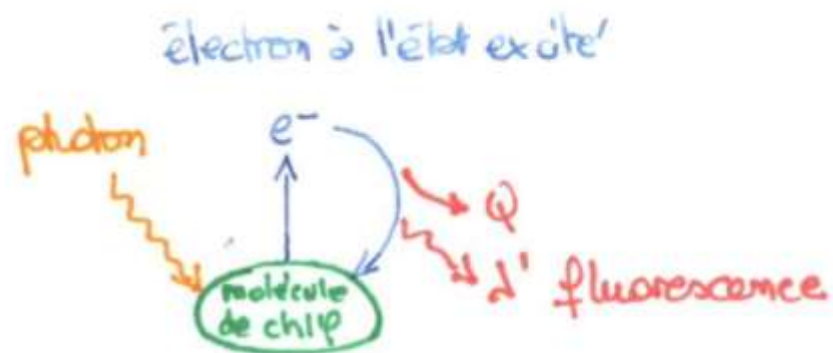


Une solution de chlorophylle éclairée apparaît verte par transparence et rouge sur le côté

Solution de chlorophylle brute dans un faisceau de lumière blanche.

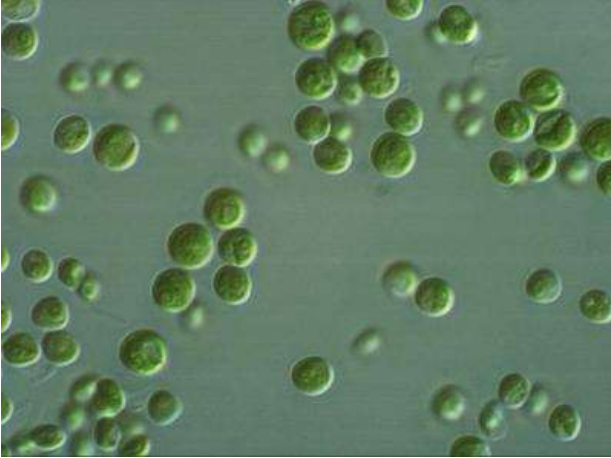




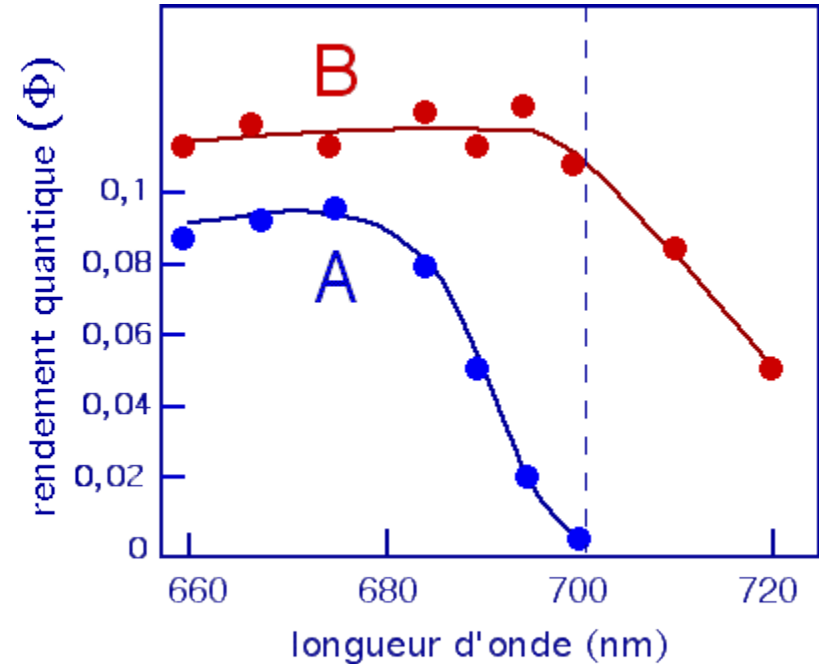
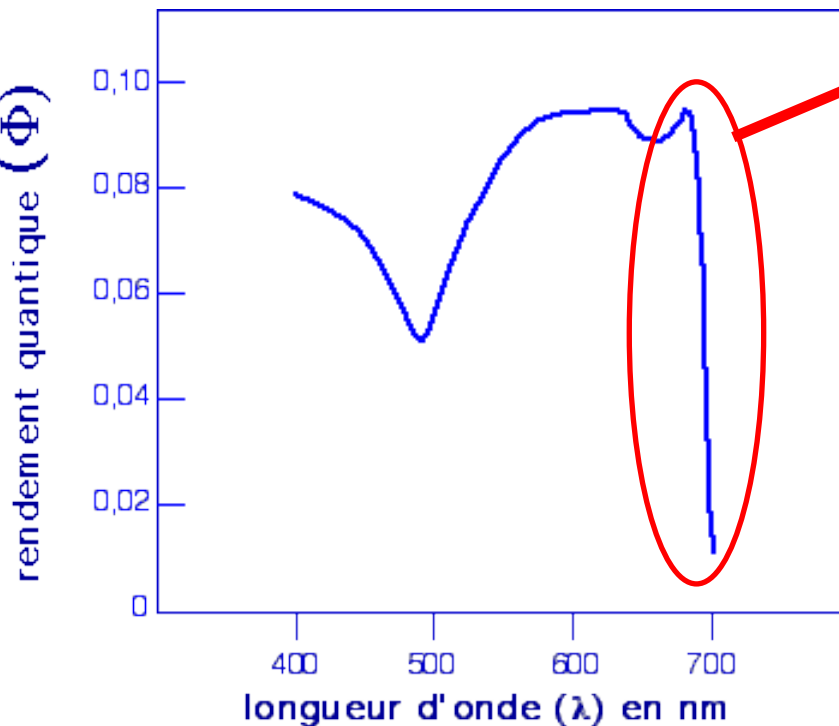


La chlorophylle, molécule excitable

# Document 20. Effet Emerson (red drop fall) ou « chute dans le rouge ».



Chlorelles



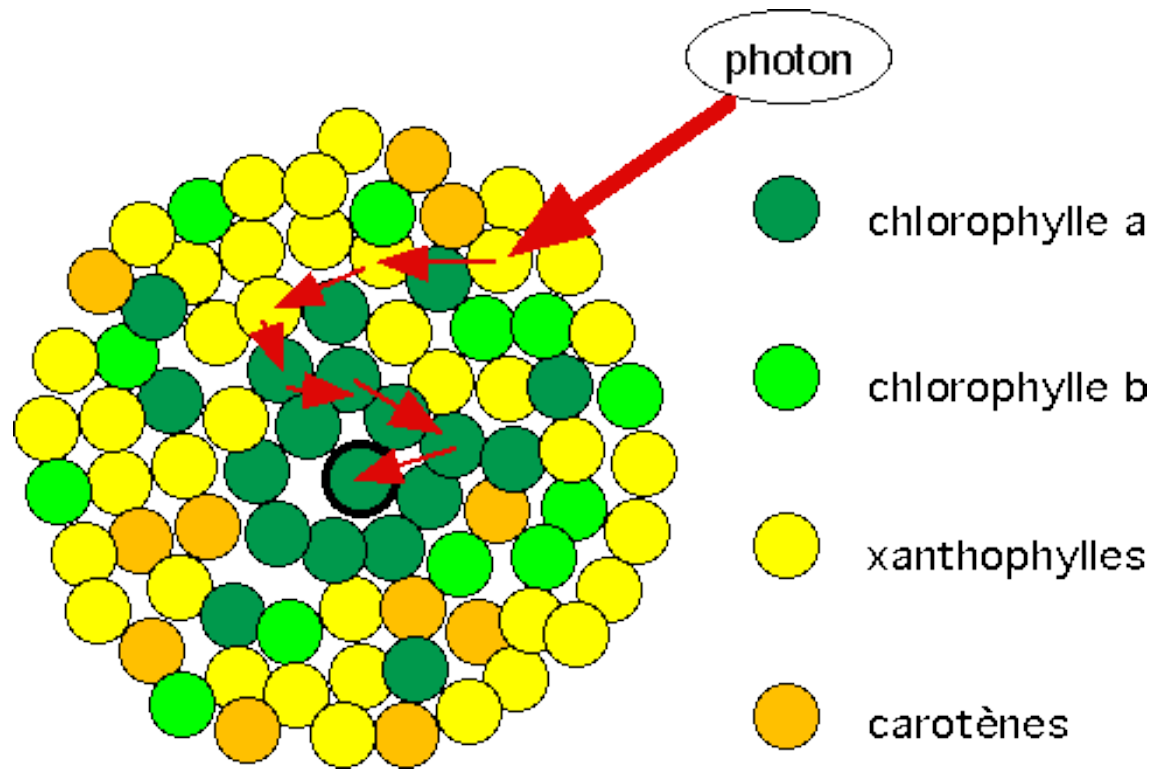
**A** : longueur d'onde variable (660 à 720 nm).

**B** : longueur d'onde variable (660 à 720 nm)  
+ radiation monochromatique fixe à 650 nm

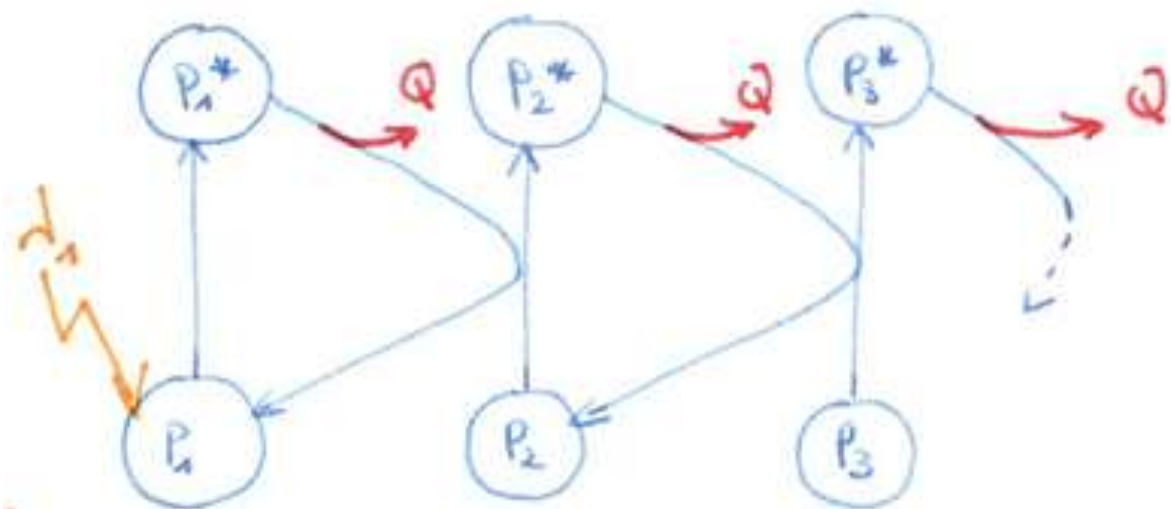
→ Le rendement quantique ( $q_{O_2}$  dégagé /  $q$  photons) chute brutalement dans le rouge.

→ La chute dans le rouge est supprimée en ajoutant une radiation de plus courte longueur d'onde.

## Document 21. Transmission par résonance au sein d'un photosystème.



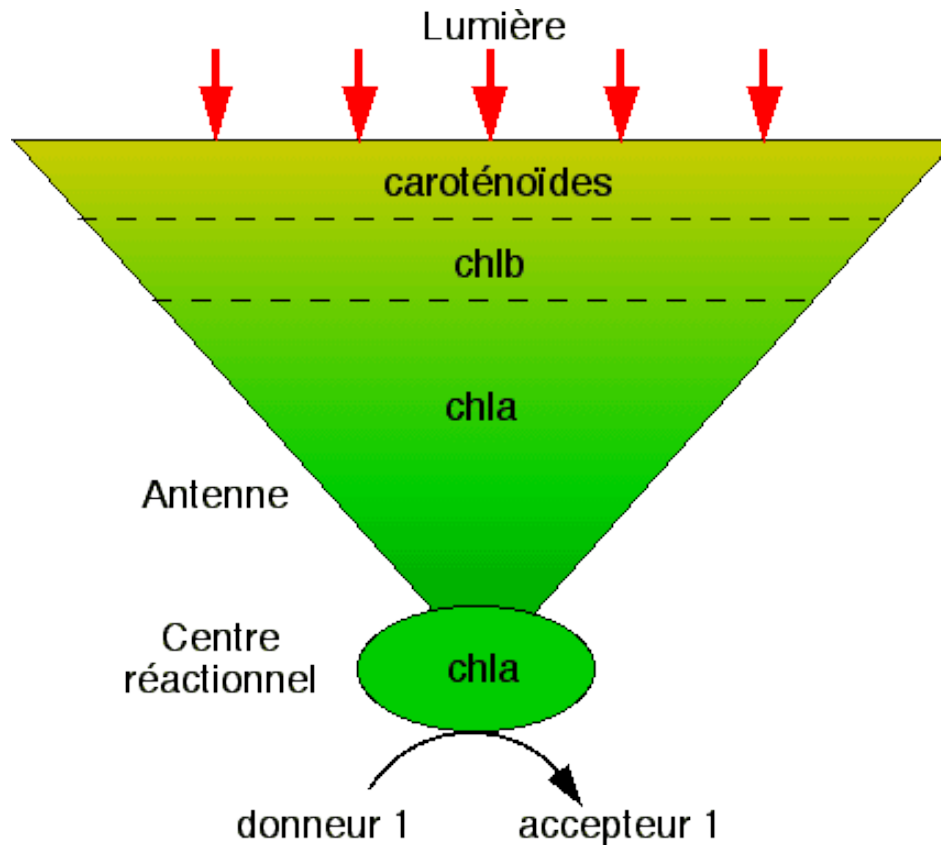
De très nombreuses molécules de pigments peuvent être excitées par les photons et elles peuvent transmettre l'énergie reçue, par résonance à la molécule de chlorophylle a du centre réactionnel.



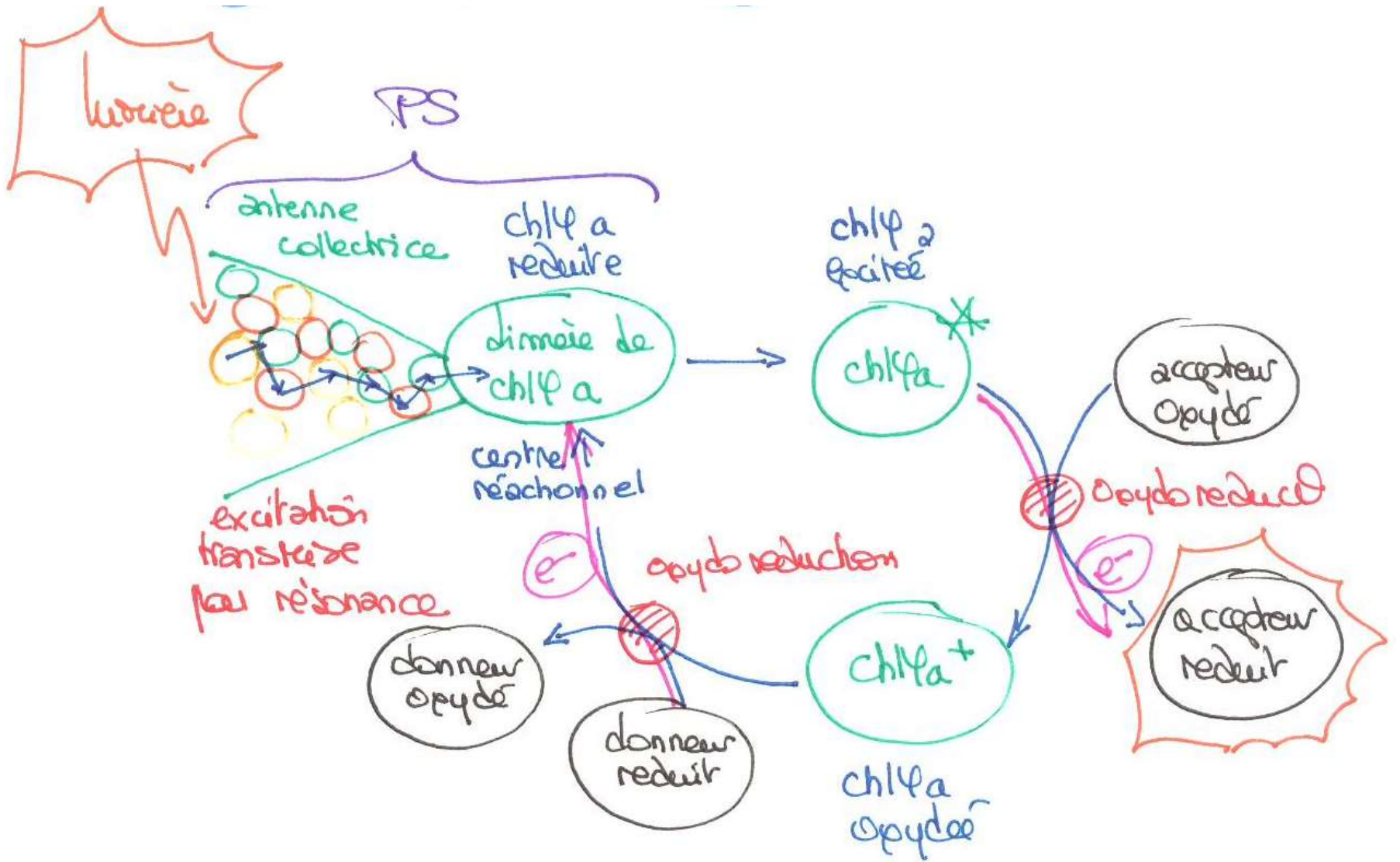
Transmission de  
l'excitation par  
résonance d'un  
primaire à d'autres



## Document 22. Transmission de l'énergie de l'antenne collectrice au centre réactionnel.



L'antenne est schématisée par un entonnoir qui draine l'énergie des photons reçus par de nombreuses molécules de pigments jusqu'à une molécule de chlorophylle a correspondant au centre réactionnel.



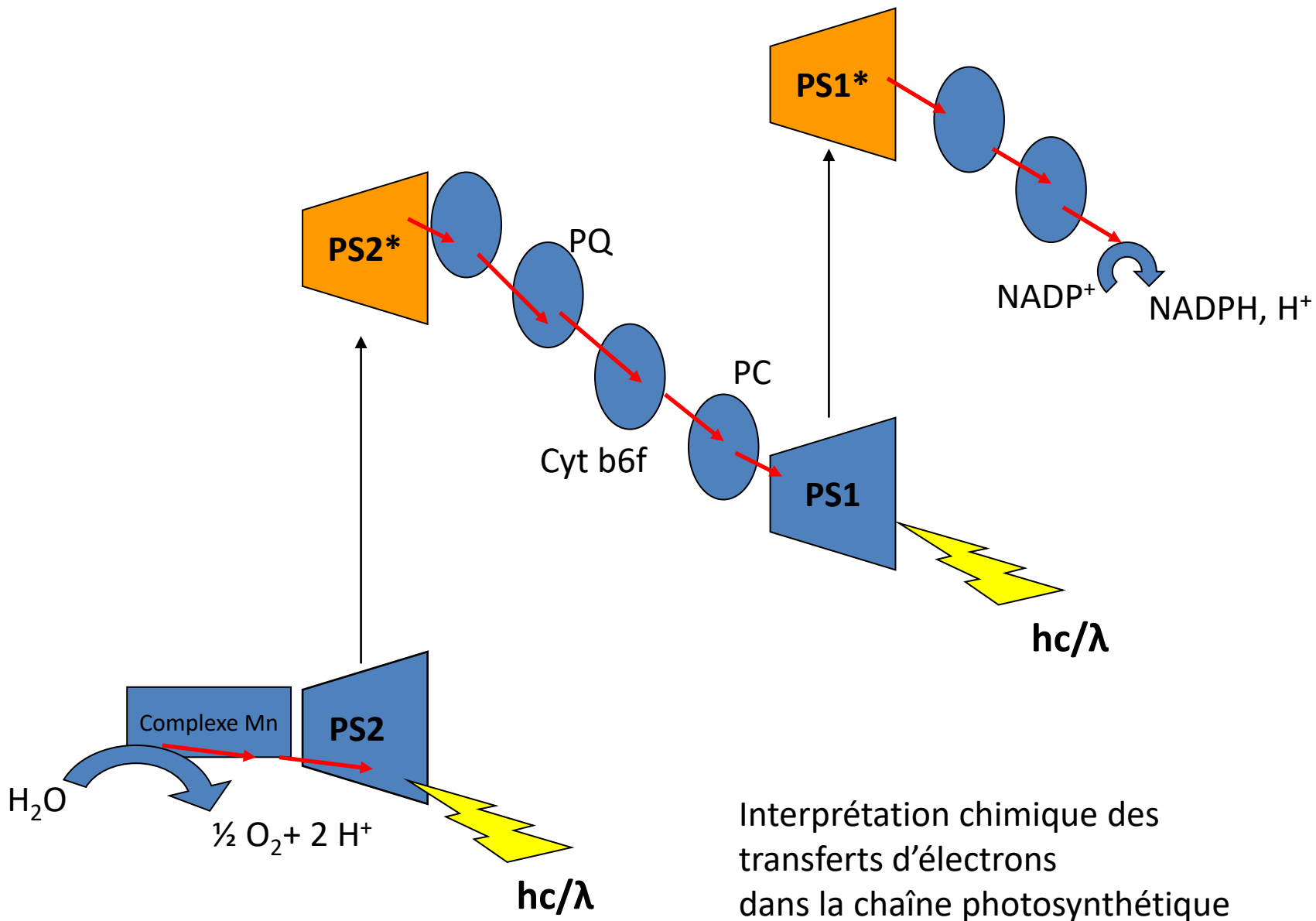
Photosynthèse et conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

# Document 23. Valeurs du $E^0$ des principaux couples redox de la membrane des thylacoïdes.

Couple redox	$E^0$ (V)
$O_2 / H_2O$	+ 0,82
$P_{680} / P_{680}^+$	+ 0,9
$P_{680}^* / P_{680}$	- 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
$P_{700} / P_{700}^+$	+ 0,4
$P_{700}^* / P_{700}$	-1,3
Ao (red/ox )	-1,0
Fd (red/ox )	- 0,42
$NADP^+ / NADPH$	-0,32

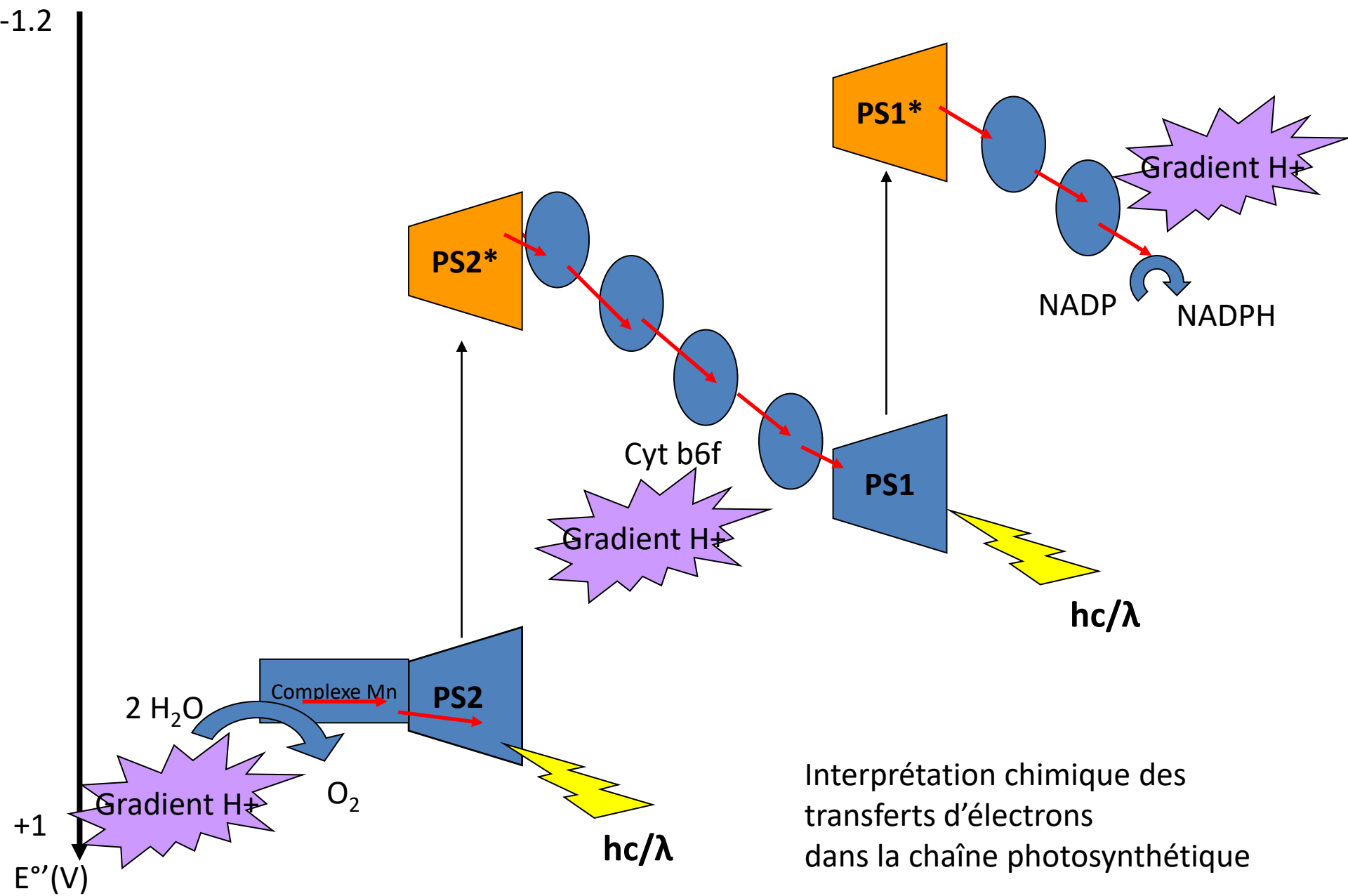
-1.2

+1  
 $E'(\text{V})$



Interprétation chimique des transferts d'électrons dans la chaîne photosynthétique



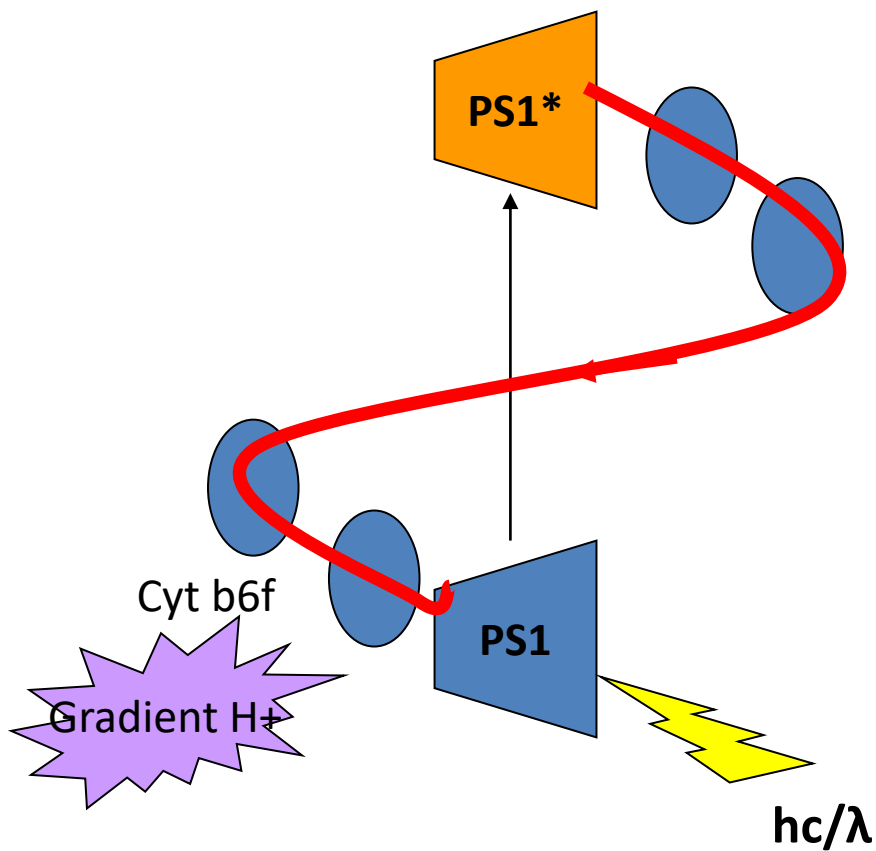


Interprétation chimique des transferts d'électrons dans la chaîne photosynthétique

-1.2

+1

$E'(\text{V})$

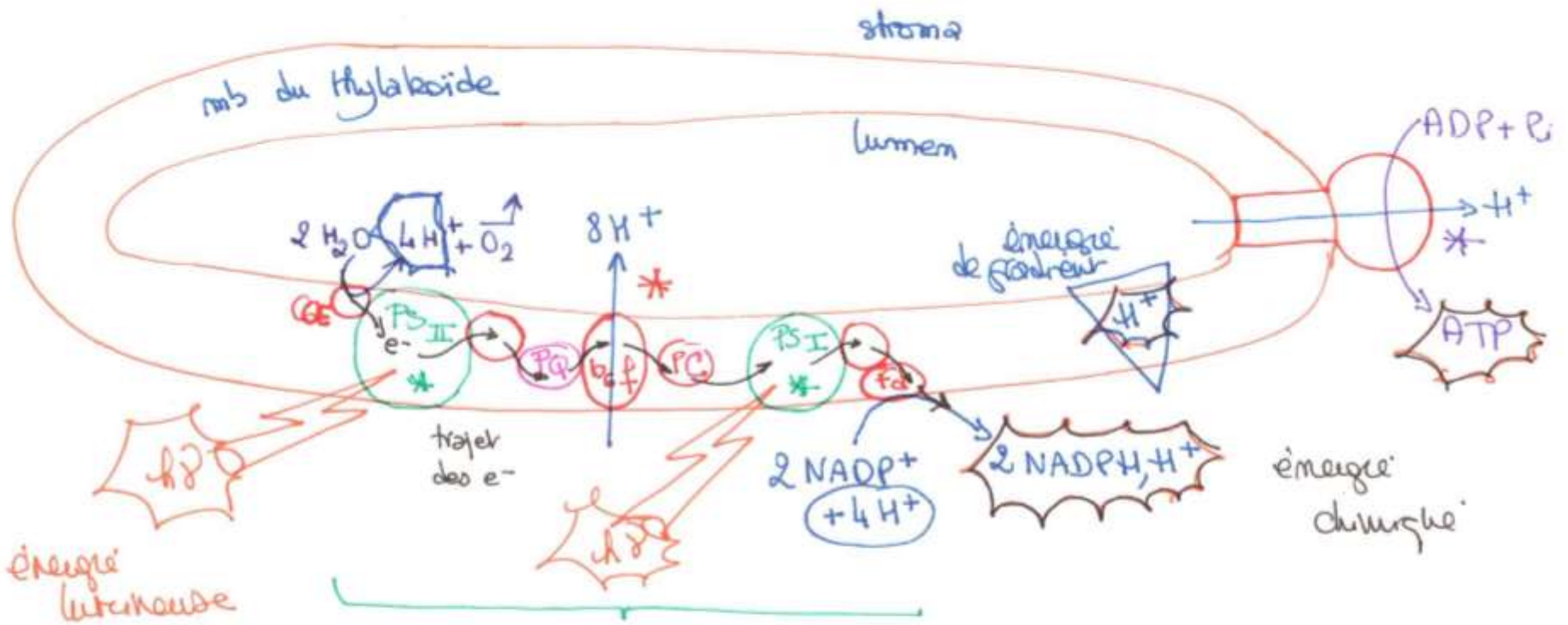


Transfert cyclique des électrons

\* couplages photo-chimiques

\* couplage chimio-osmotique

\* couplage osmo-chimique



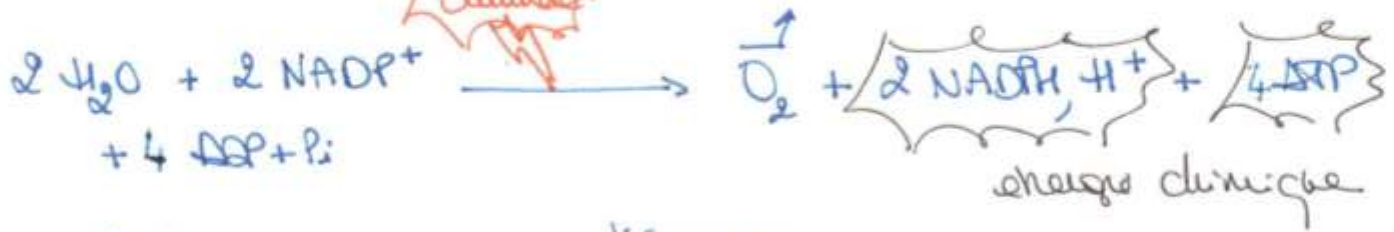
énergie lumineuse

trajet des e<sup>-</sup>

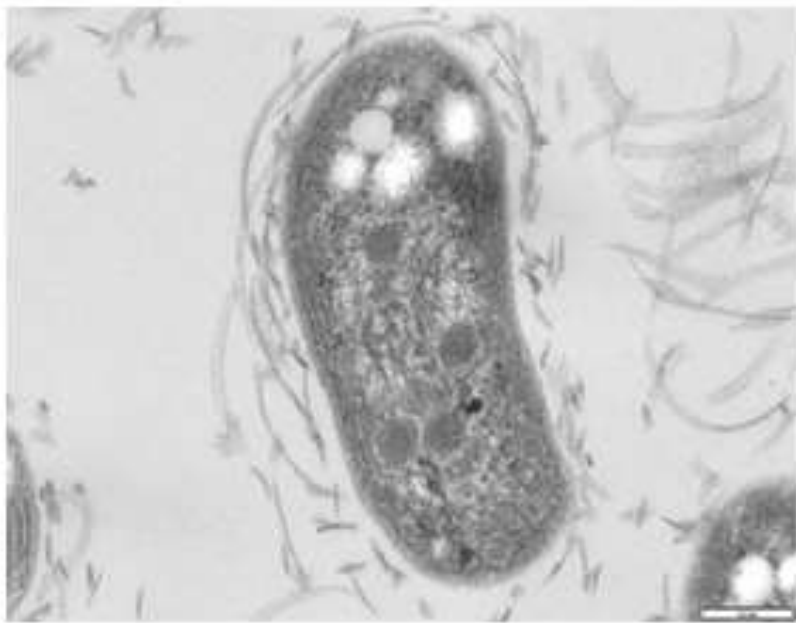
énergie de gradient

énergie chimique

chaîne photosynthétique



Couplages et conversions d'énergie  
dans la phase photochimique de la photosynthèse



## Nitrobacter (MET)

(W.J. Hickey, University of Wisconsin-Madison, 2006)

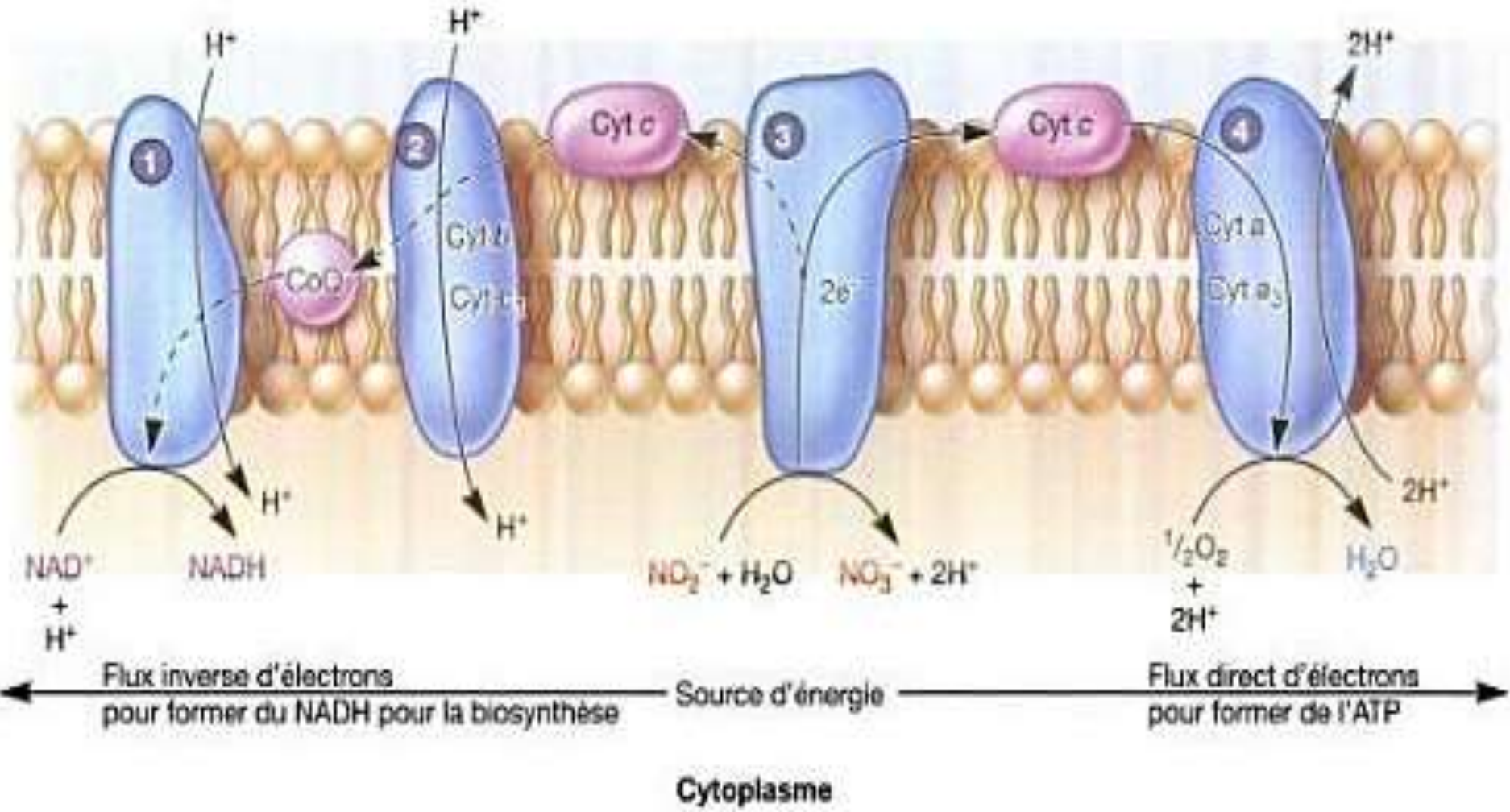


Réaction de nitratisation



# Document 25.

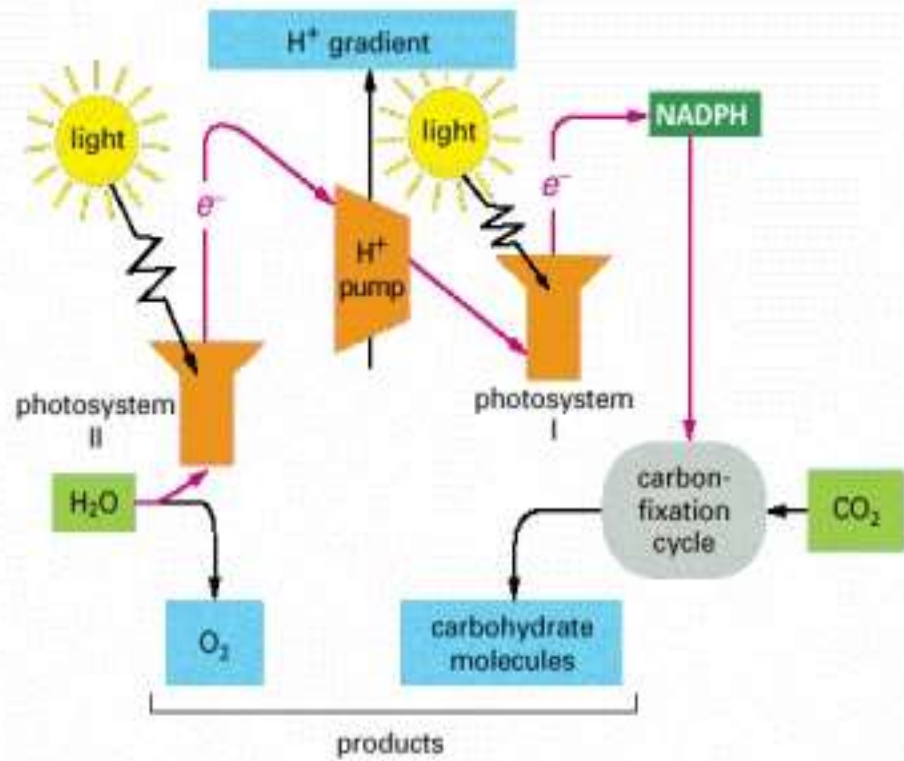
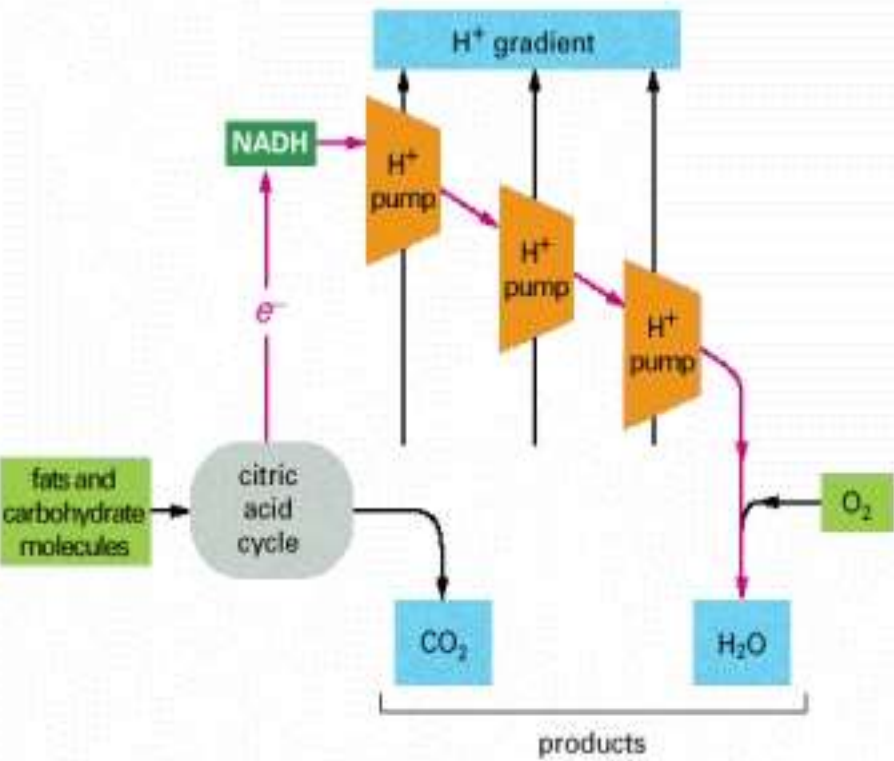
Périplasma



**Figure 9.25** Le flux d'électrons dans la chaîne de transfert chez *Nitrobacter*. *Nitrobacter* oxyde le nitrite et effectue un transfert normal d'électrons pour générer une force proton-motrice et synthétiser de l'ATP. C'est la branche droite du schéma. Une partie de la force proton-motrice sert aussi pour forcer les électrons à remonter le gradient de potentiel de réduction, du nitrite au NAD<sup>+</sup> (branche gauche). Le cytochrome c et quatre complexes interviennent : la NAD-ubiquinone oxydoréductase (1), l'ubiquinol-cytochrome c oxydoréductase (2), la nitrite oxydase (3) et la cytochrome aa<sub>3</sub> oxydase (4).

(A) MITOCHONDRION

(B) CHLOROPLAST



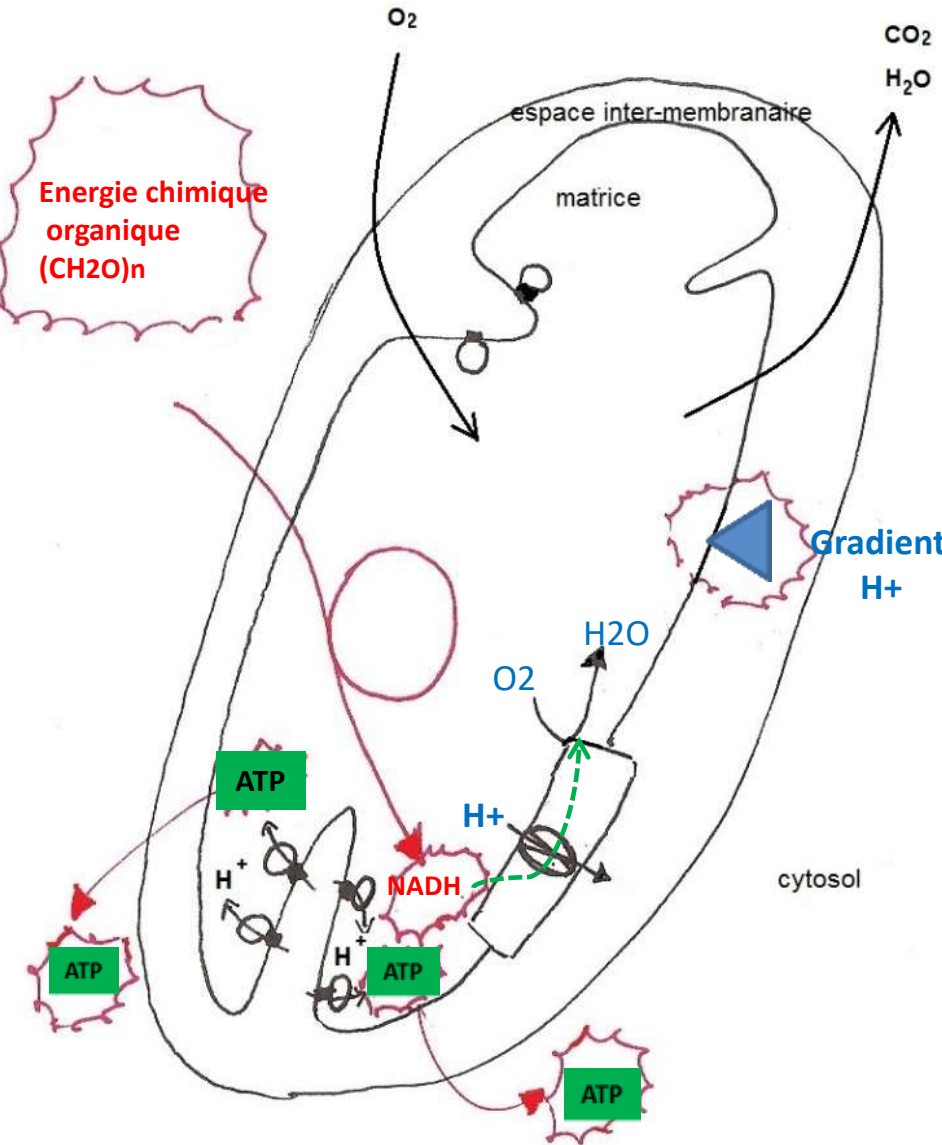
## Document 26. Comparaison des conversions énergétiques dans la mitochondrie et le chloroplaste.

En vert clair, les entrées de matière. En bleu, les produits. Le trajet des électrons est représenté par les flèches rouges. Chaque complexe protéique (en orange) est inclus dans une membrane, asymétrique.

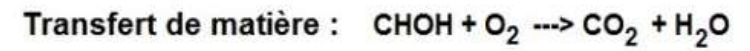
(ALBERTS B. et coll., « Biologie moléculaire de la cellule », Flammarion Médecine – Sciences Ed.).

Types trophiques :

# Chimiohétérotrophie

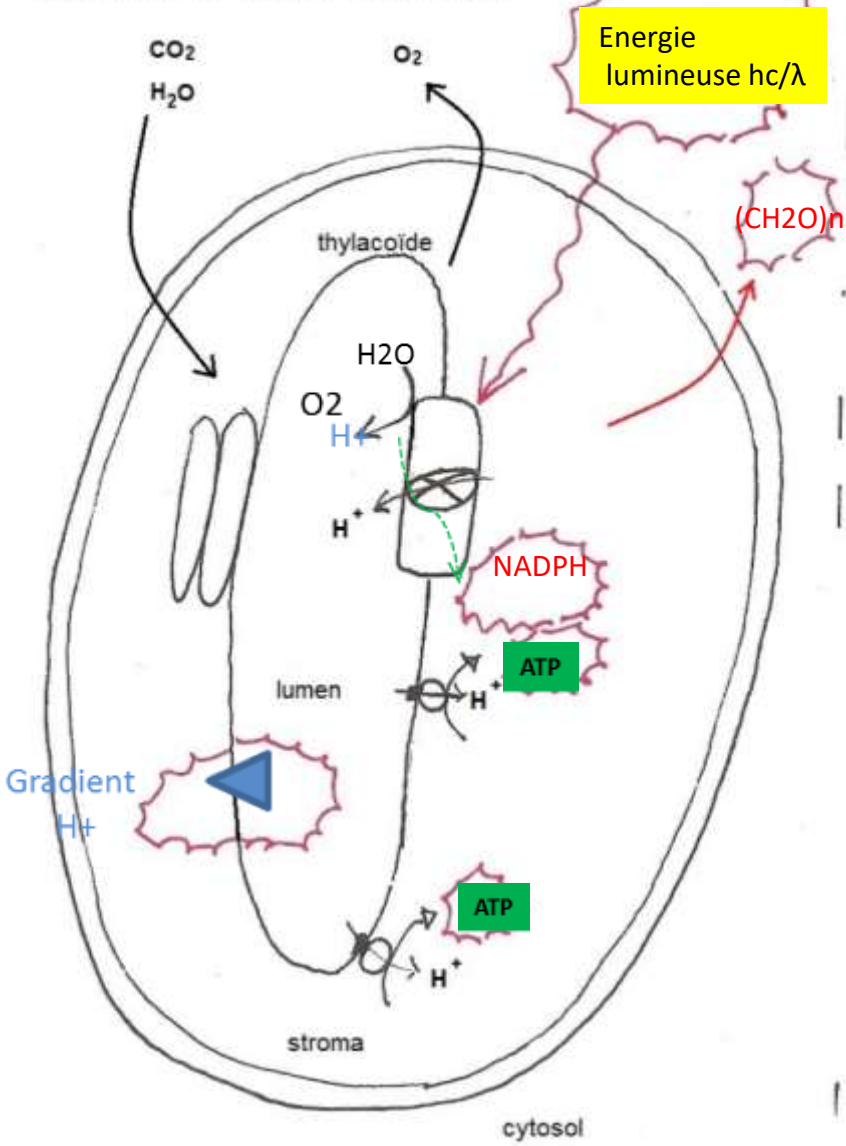





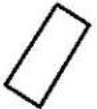
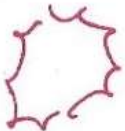
- translocation de protons par : **Cytochrome bc1**
- ATP synthase**
- trajet des électrons
- Chaine respiratoire**
- forme d'énergie**

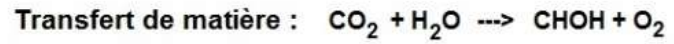


Cellules eucaryotes animales et végétales

# Photolithotrophie



-  translocation de protons par : ...Cytochrome b6f
-  ATP synthase
-  trajet des électrons
-  Chaîne photosynthétique
-  forme d'énergie

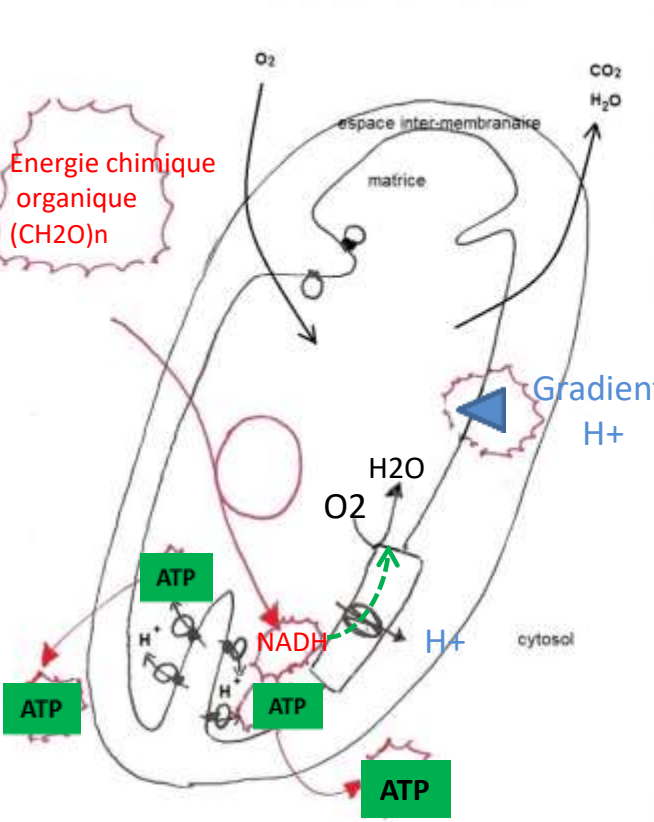


Cellules végétales chlorophylliennes



Types trophiques :

Chimiohétérotrophie

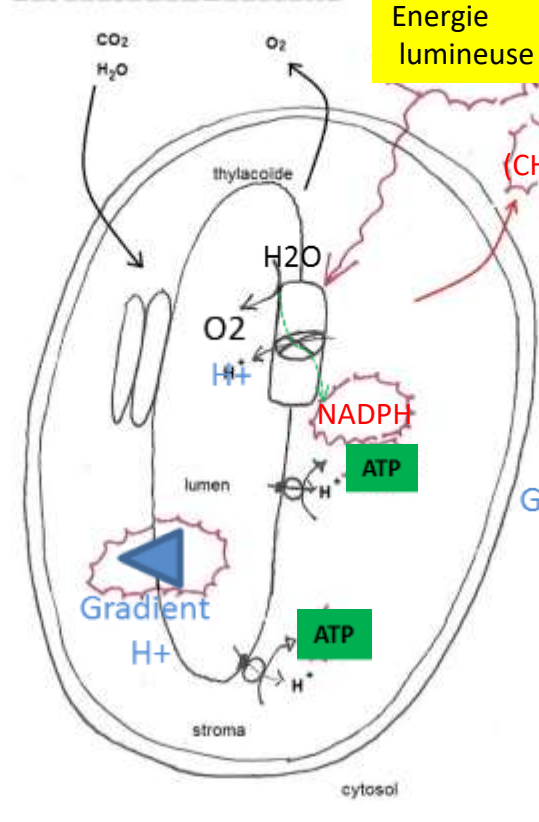


Cellules eucaryotes animales et végétales

- translocation de protons par : ...Cytochrome bc1
- ATP synthase
- trajet des électrons
- Chaîne respiratoire
- forme d'énergie

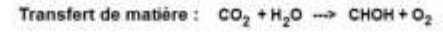


Photolithotrophie

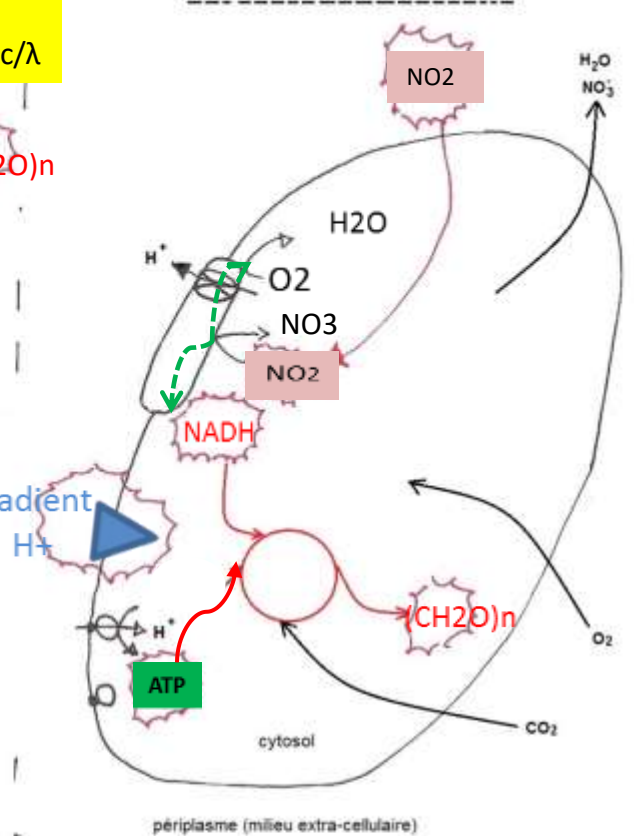


Cellules végétales chlorophylliennes

- translocation de protons par : ...Cytochrome b6f
- ATP synthase
- trajet des électrons
- Chaîne photosynthétique
- forme d'énergie

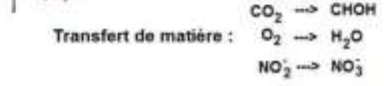


Chimiolithotrophie



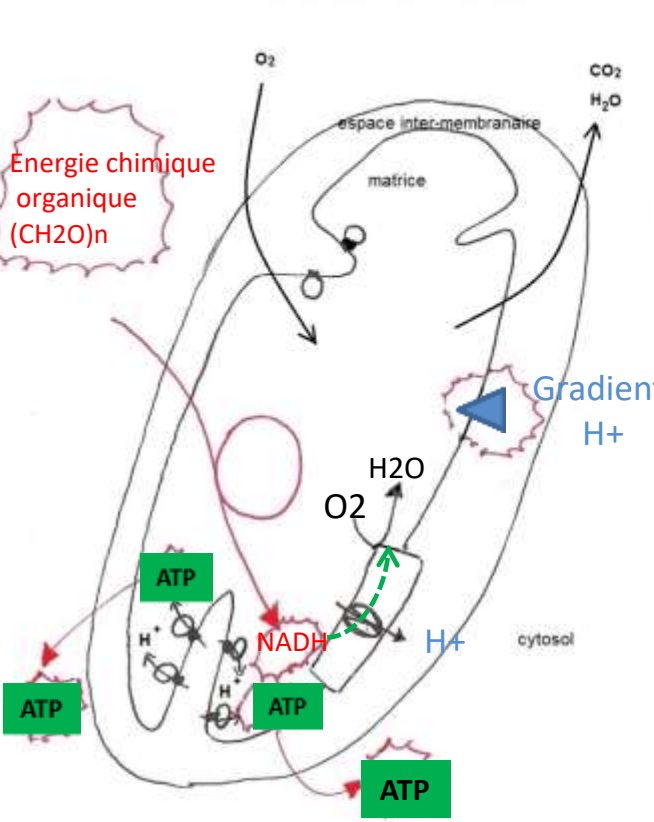
Eubactéries nitrifiantes Ex : Nitrobacter

- translocation de protons par : ..... Cytochrome oxydase
- ATP synthase
- trajet des électrons
- Chaîne de transfert d'électrons du plasmalemme
- forme d'énergie



Types trophiques :

Chimiohétérotrophie

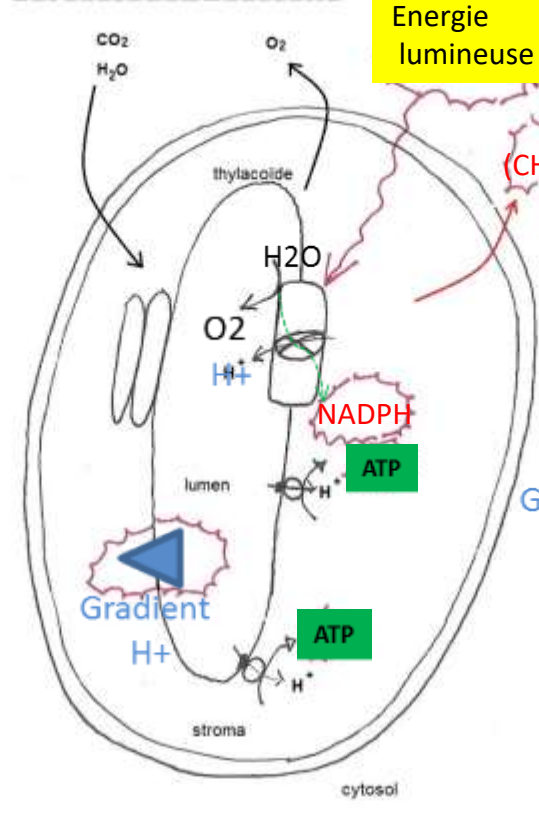


Cellules eucaryotes animales et végétales

- translocation de protons par : ...Cytochrome bc1
- ATP synthase
- trajet des électrons
- Chaîne respiratoire
- forme d'énergie

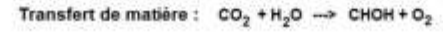


Photolithotrophie

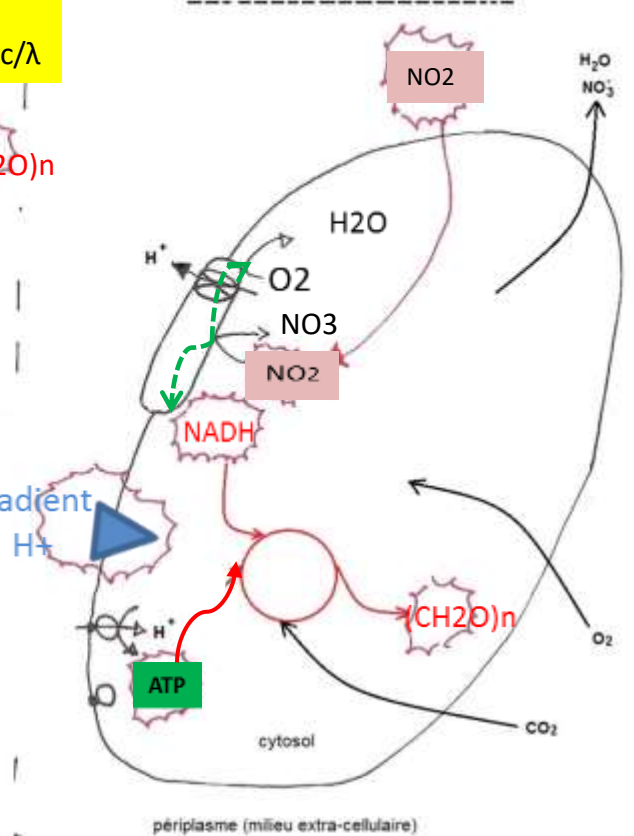


Cellules végétales chlorophylliennes

- translocation de protons par : ...Cytochrome b6f
- ATP synthase
- trajet des électrons
- Chaîne photosynthétique
- forme d'énergie

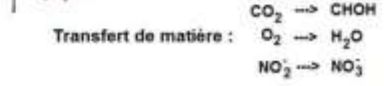


Chimiolithotrophie



Eubactéries nitrifiantes Ex : Nitrobacter

- translocation de protons par : ..... Cytochrome oxydase
- ATP synthase
- trajet des électrons
- Chaîne de transfert d'électrons du plasmalemme
- forme d'énergie



		Source d'électrons	
		minérale	organique
Source d'énergie	lumineuse	<b>Photolithotrophe</b> bactéries photosynthétiques, algues, plantes	
	chimique	<b>Chimiolithotrophe</b> bactéries nitrifiantes, archées	<b>Chimioorganotrophe</b> animaux, champignons (= mycètes), certaines bactéries

**Document 27. Différents types trophiques selon les sources d'énergie et d'électrons utilisées.**