

## Chapitre 6

# Métabolisme : transferts d'électrons dans le vivant

Pr. Bertrand TOUSSAINT

# Plan du cours

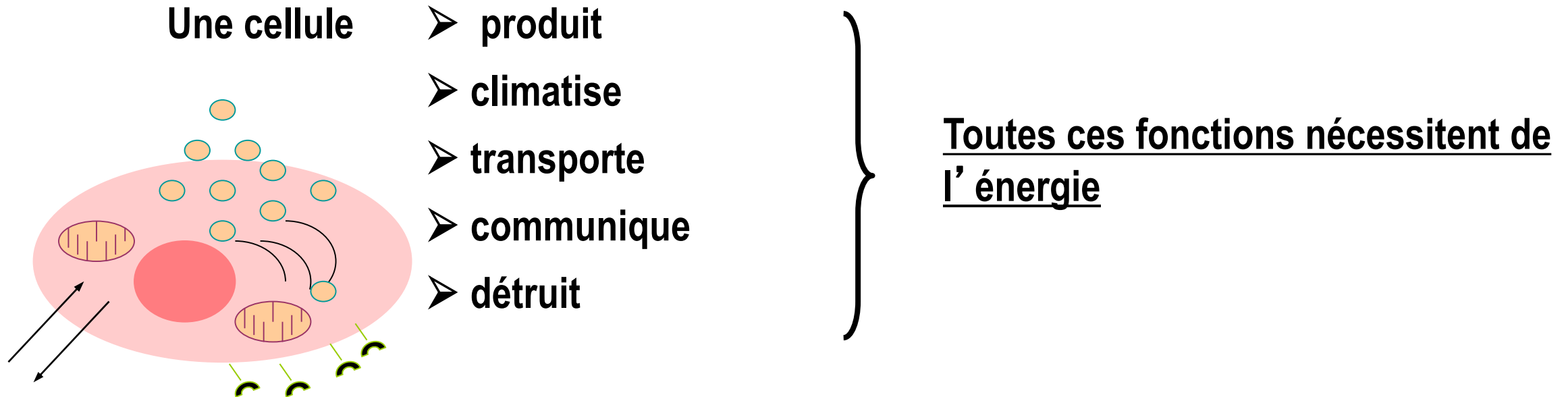
- Les molécules complexes de nutriments contiennent du carbone réduit
- Catabolisme/anabolisme et transport d'électrons
- Le couple redox  $\text{NAD}^+/\text{NADH}$
- Le couple redox  $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$
- La pile de la vie
- Notions sur la photosynthèse

# Objectifs pédagogiques du cours

- Comprendre le circuit électrique de la vie :
  - Electrons du carbone réduit des nutriments vers  $O_2$
  - Catabolisme et anabolisme
- Connaître un transporteur particulier d'électrons le couple  $NAD^+/NADH$
- Comprendre d'où provient le carbone réduit des molécules de nutriments : la photosynthèse

# Echange d'énergie

Comment l'énergie de leur environnement est-elle utilisée par les organismes vivants ?



La bioénergétique est la partie du métabolisme qui étudie l'approvisionnement, l'utilisation et les transferts d'énergie dans la cellule.

# Systèmes redox et Transfert d ' électrons

Étoile de la vie : L' énergie de la lumière du soleil maintient la vie sur terre.



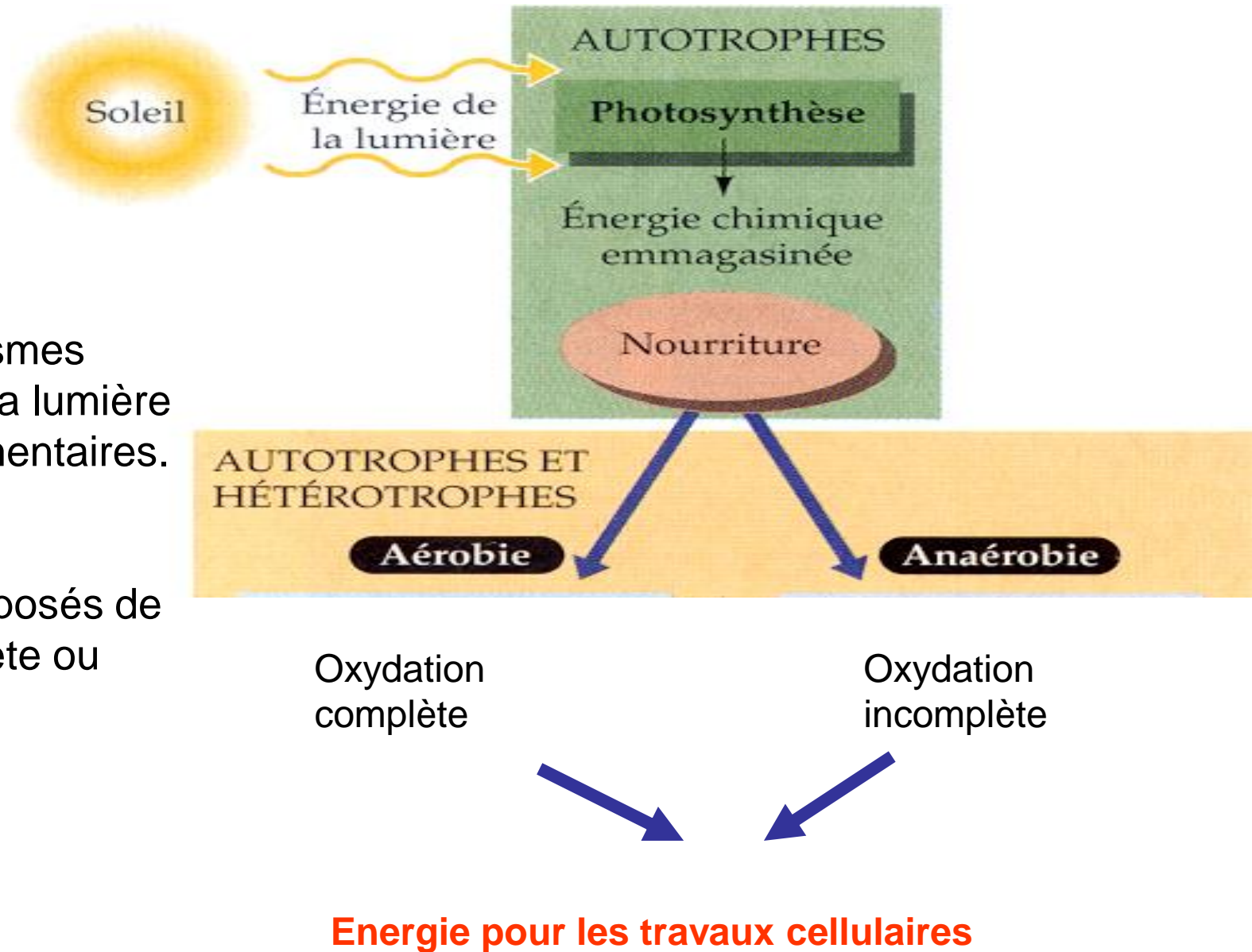
***« Ce qui entretient la vie est un  
petit courant électrique alimenté par le soleil »***

Svent Gyorgi (Biochimiste)

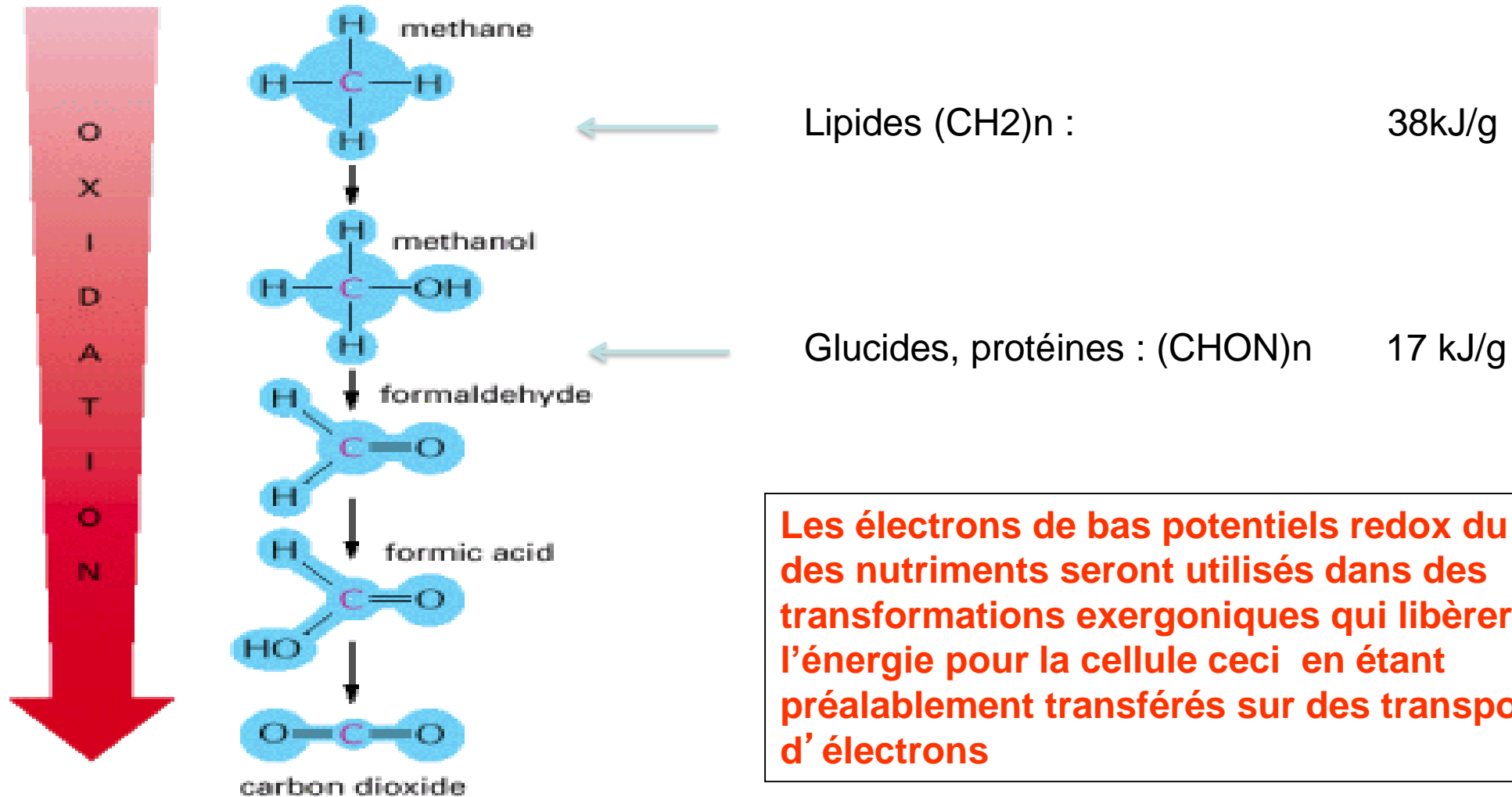
# De l'énergie solaire pour vivre

Dans la photosynthèse, les organismes **autotrophes** utilisent l'énergie de la lumière pour synthétiser les composés alimentaires.

Les organismes **hétérotrophes** et autotrophes métabolisent ces composés de l'alimentation par oxydation complète ou non, qui libère de l'énergie libre.

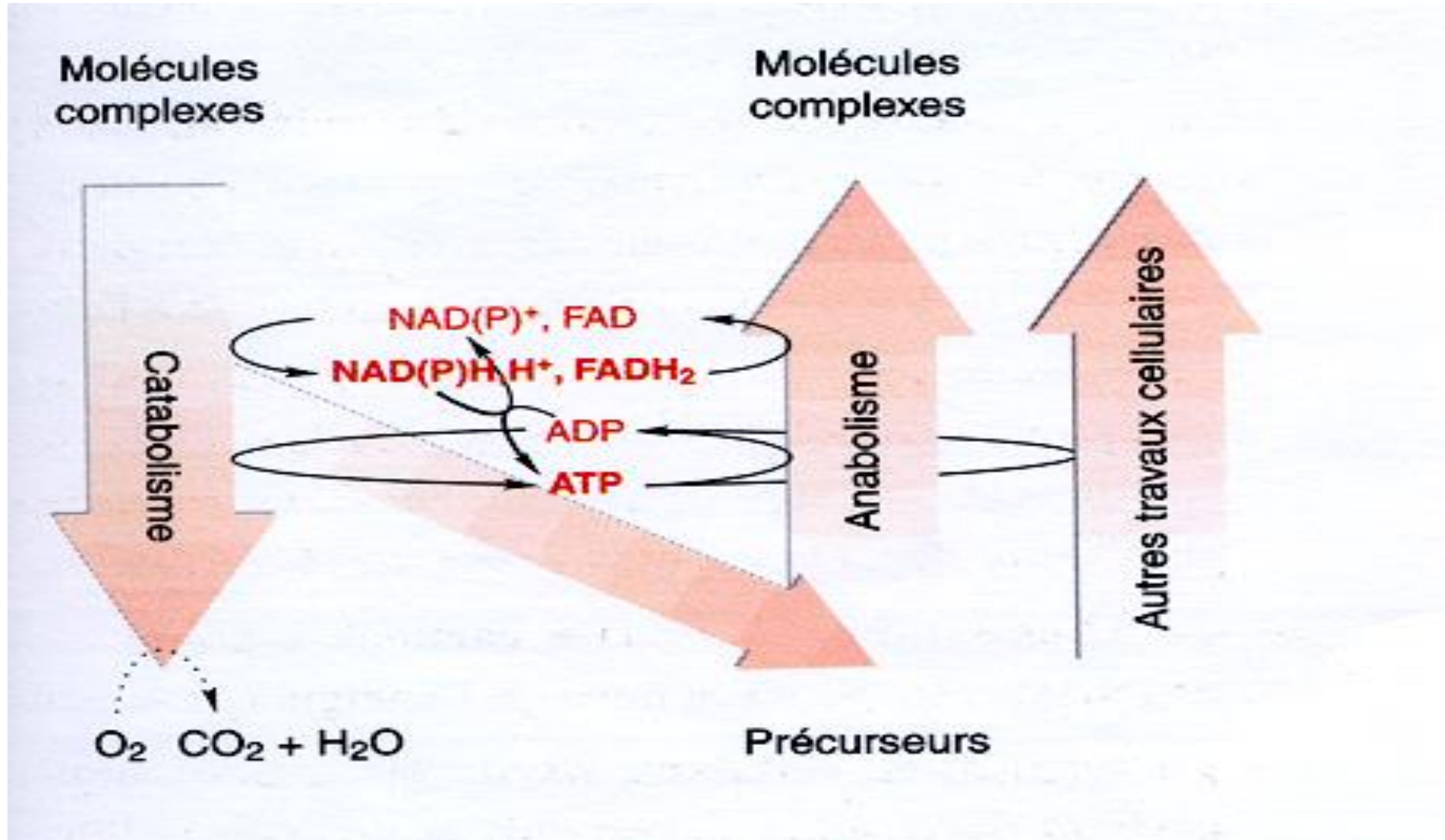


# Niveaux de réduction du carbone



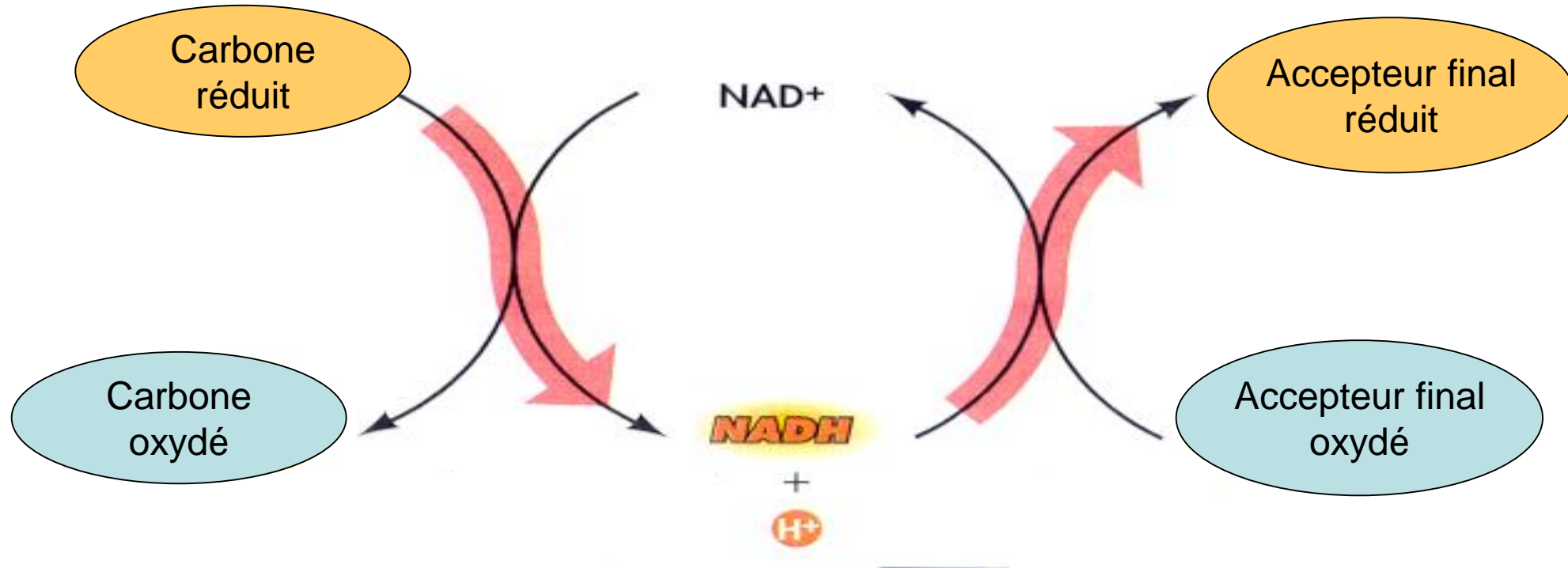
Les électrons de bas potentiels redox du carbone des nutriments seront utilisés dans des transformations exergoniques qui libèreront de l'énergie pour la cellule ceci en étant préalablement transférés sur des transporteurs d'électrons

# Catabolisme et anabolisme





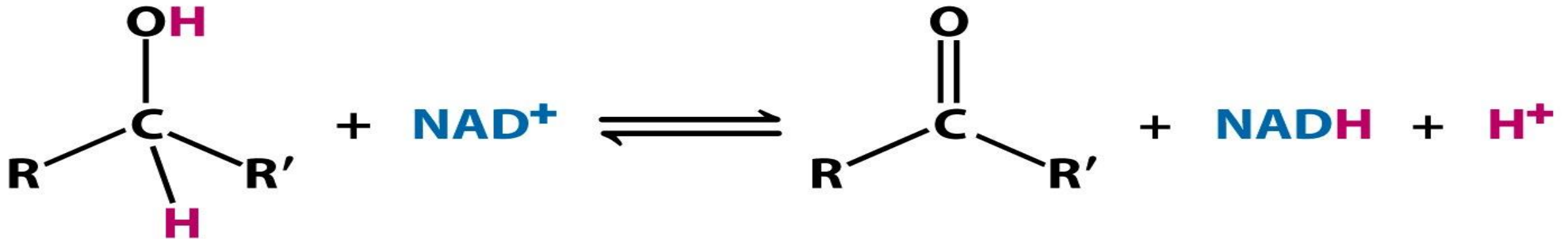
# NAD<sup>+</sup> / NADH : transporteur universel



Le couple redox NAD<sup>+</sup>/NADH est un intermédiaire **universel** et essentiel dans les cellules.  
Son potentiel redox est bas vers -0,32V

# NAD<sup>+</sup>/NADH et transfert d' électron

Nicotinamide Adenine Dinucléotide

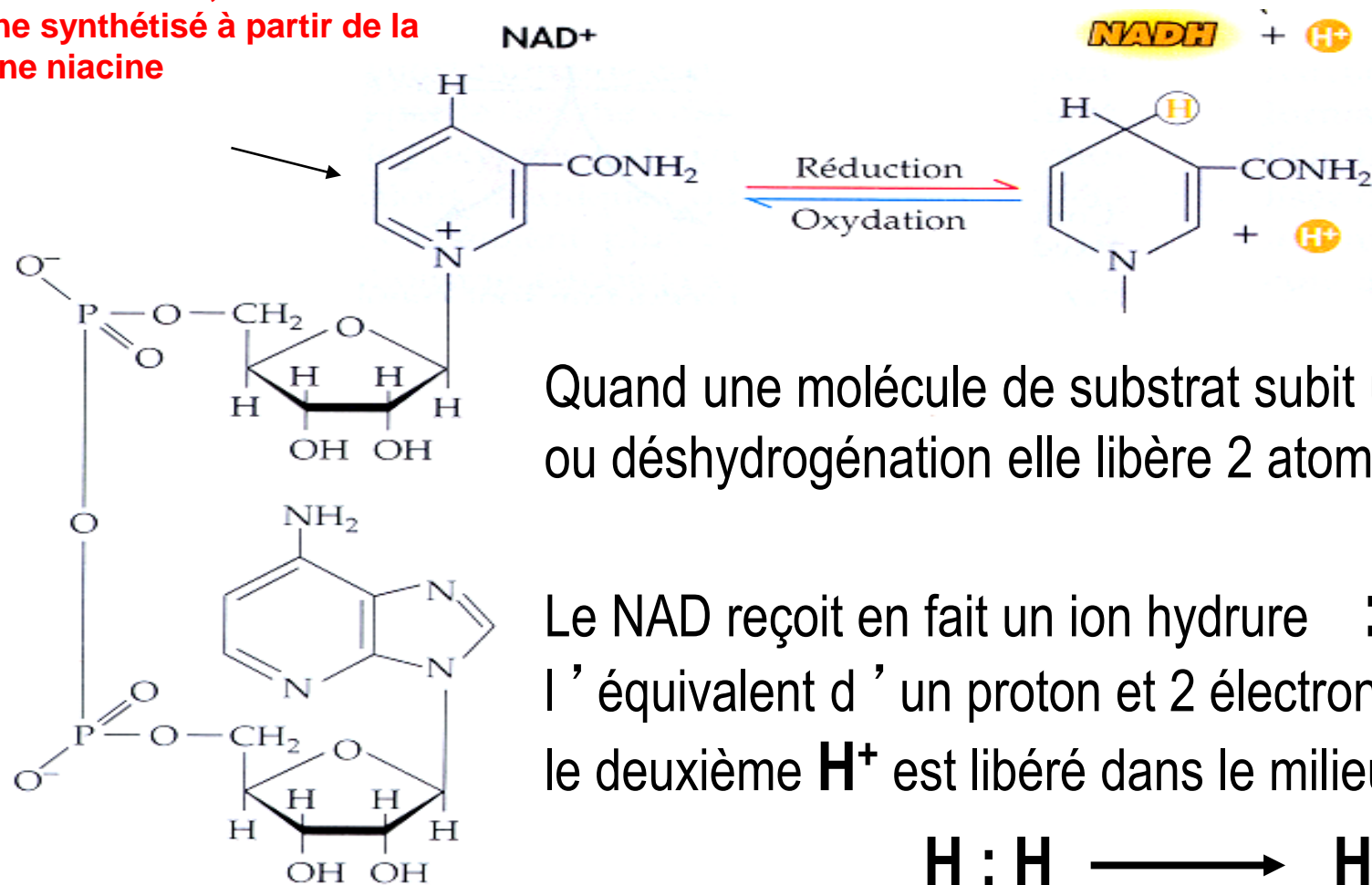


Unnumbered figure pg 420a  
*Biochemistry, Sixth Edition*  
© 2007 W. H. Freeman and Company

Déshydrogénation : un atome d'hydrogène du substrat est directement transféré au NAD<sup>+</sup>, l'autre apparaît dans le solvant sous forme d'un proton. Les 2 e<sup>-</sup> perdus par le substrat sont transférés au NAD<sup>+</sup>

# Transfert d'ion hydrure

Cycle nicotinamide, dérivé de la pyridine synthétisé à partir de la vitamine niacine



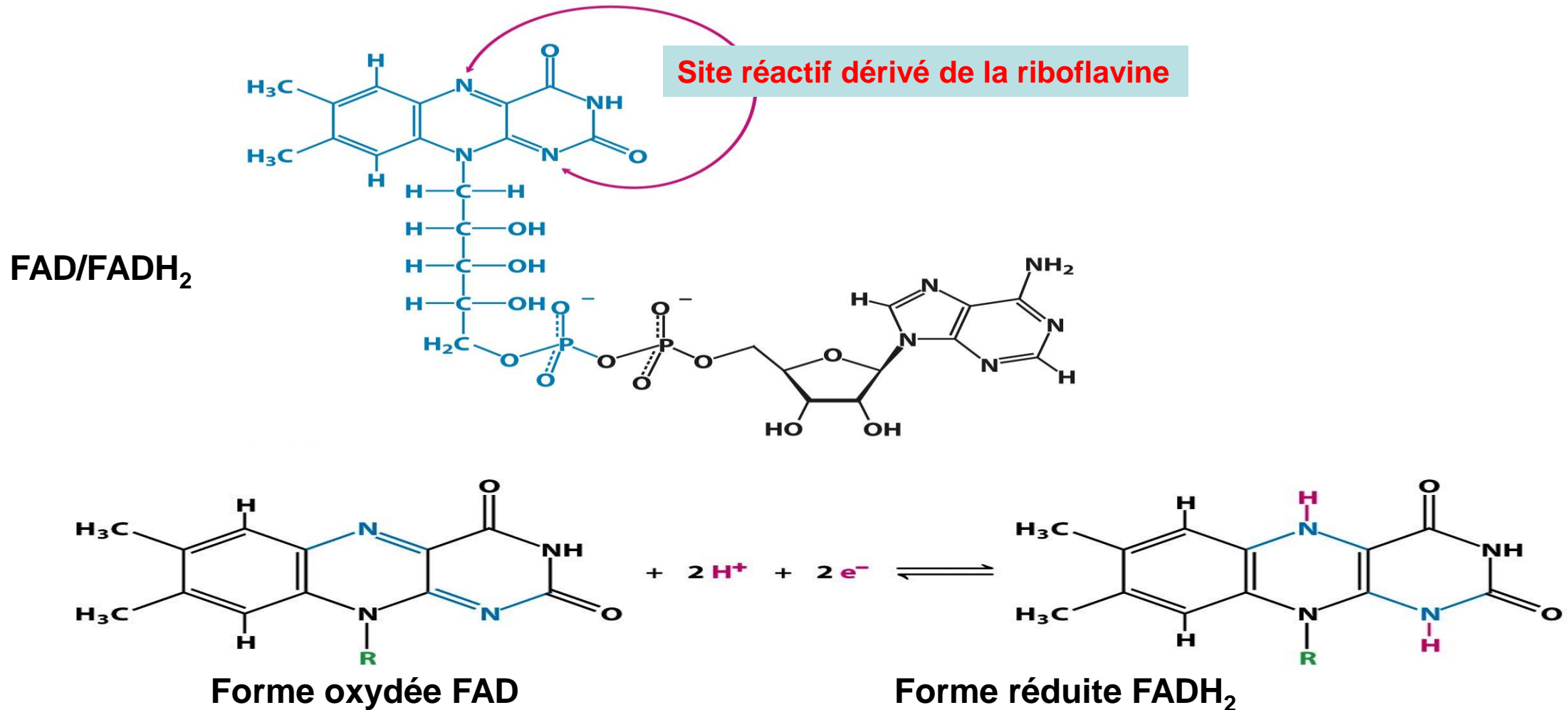
Quand une molécule de substrat subit une oxydation ou déshydrogénation elle libère 2 atomes d'hydrogène

Le NAD reçoit en fait un ion hydrure :H<sup>-</sup>  
l'équivalent d'un proton et 2 électrons  
le deuxième H<sup>+</sup> est libéré dans le milieu

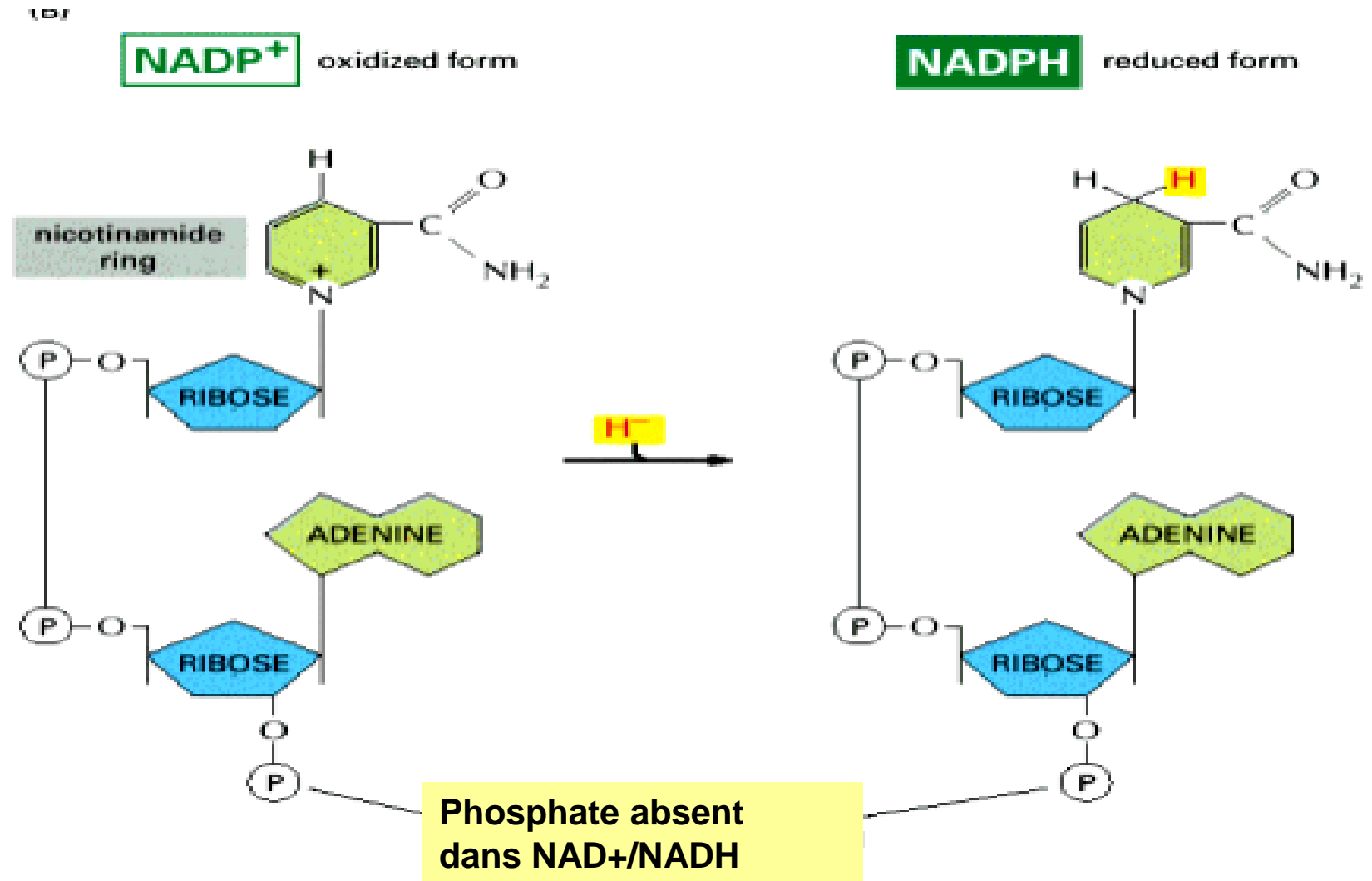


# Autre transporteur d' électrons : FAD/FADH<sub>2</sub>

Flavine Adenine Dinucléotide



# Autre transporteur d'électron : $\text{NADP}^+ / \text{NADPH}$



**Phosphate : Distinction  $\text{NADH} / \text{NADPH}$  par les enzymes des voies de biosynthèse ou des voies cataboliques**

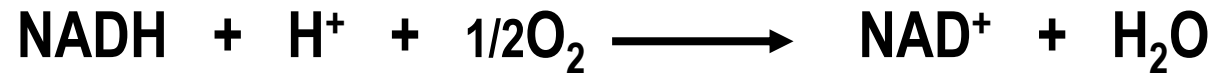
## Point d'étape

- Les nutriments sont riches en électrons de bas potentiels
- Catabolisme :
  - Transfert redox sur le  $\text{NAD}^+$  qui devient  $\text{NADH}$
  - Transfert redox sur le  $\text{FAD}$  qui devient  $\text{FADH}_2$
  - Transfert redox sur le  $\text{NADP}^+$  qui devient  $\text{NADPH}$
- Anabolisme :
  - Transfert redox à partir du  $\text{NADPH}$  pour des réactions réductrices de synthèse

# NAD<sup>+</sup>/ NADH et transfert d' énergie

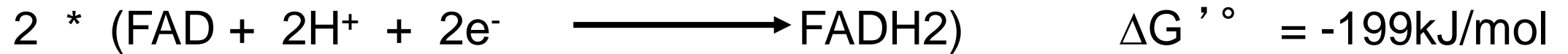
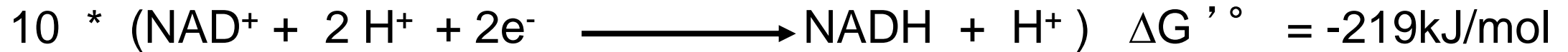
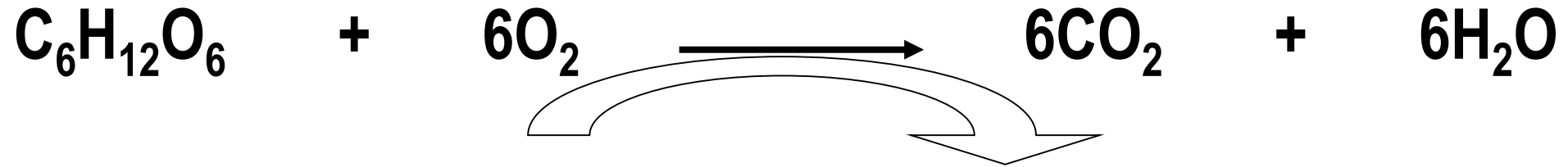
RESPIRATION : l'oxydation de NADH + H<sup>+</sup> par le dioxygène est très exergonique

(a lieu dans la chaine respiratoire mitochondriale)



$$\Delta G^{\circ'} = -nF \Delta E^{\circ'} = -nF (E^{\circ'}_2 - E^{\circ'}_1) = -219 \text{ kJ/mol}$$

# Apport en transporteurs réduits par oxydation du glucose



$$\Delta G'^{\circ} = -2600 \text{ kJ/mol}$$

- 1) Oxydation du glucose : grand nombre de réactions dans des voies métaboliques
- 2) Oxydation du NADH ou FADH<sub>2</sub> : grand nombre d'étapes rédox dans la chaîne respiratoire pour fabriquer de l'ATP

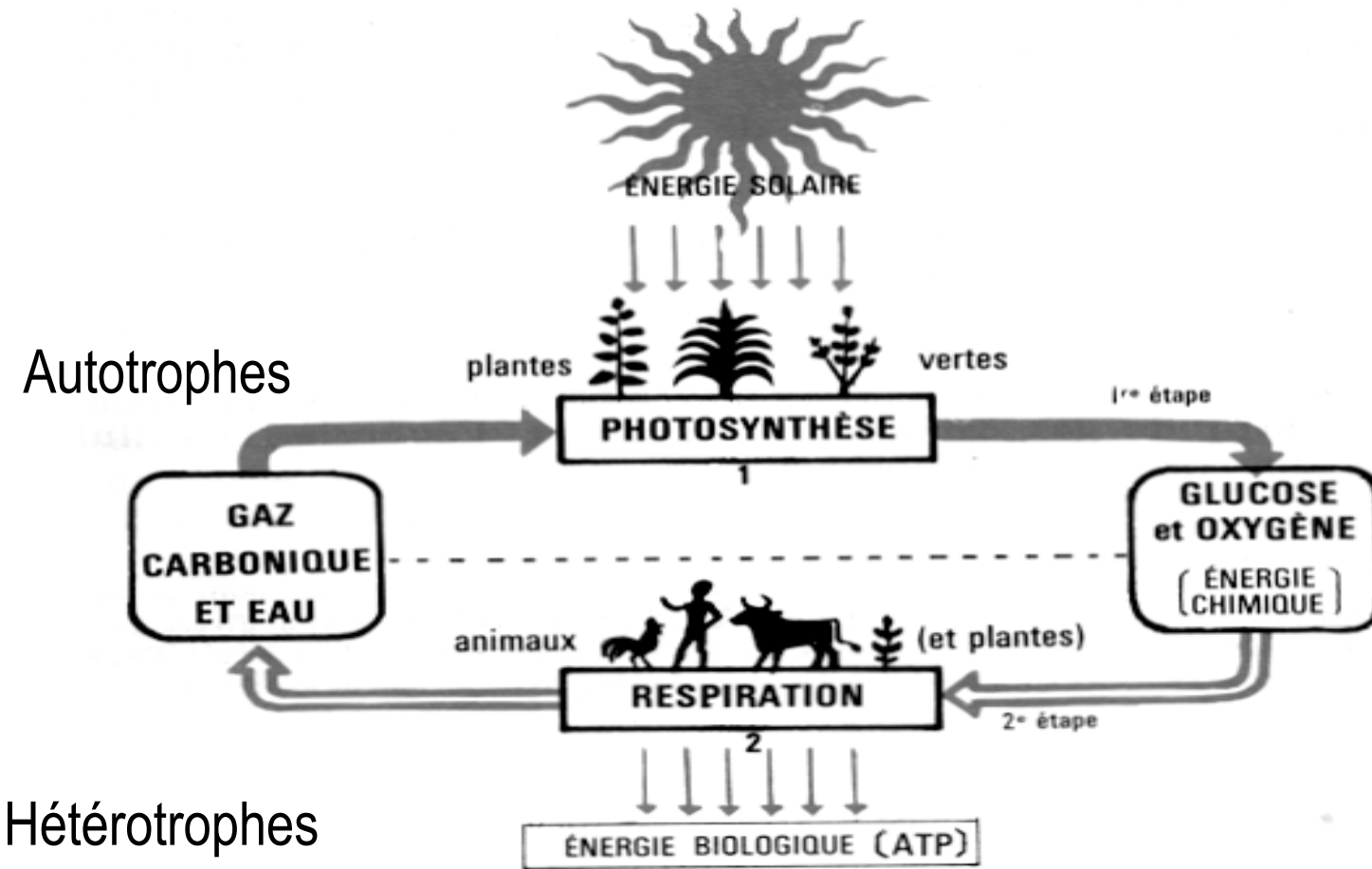


# Couple oxydant réducteur

potentiel redox (V)

→	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	0,816
	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	0,771
	$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	0,421
	Cytochrome <i>f</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>f</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,365
	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ (ferricyanure) + $\text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0,36
	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0,295
	Cytochrome <i>a</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>a</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,29
	Cytochrome <i>c</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>c</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,254
	Cytochrome <i>c</i> <sub>1</sub> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>c</i> <sub>1</sub> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,22
	Ubiquinone + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ ubiquinol + $\text{H}_2$	0,045
	Cytochrome <i>b</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>b</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,077
	$\text{Fumarate}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{succinate}^{2-}$	0,031
	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$ (aux conditions standard, pH 0)	0,000
	Crotonyl-CoA + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ butyryl-CoA	- 0,015
	$\text{Oxaloacétate}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{malate}^{2-}$	- 0,166
	$\text{Pyruvate}^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{lactate}^-$	- 0,185
	Acétaldéhyde + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ éthanol	- 0,197
→	$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{FADH}_2$	- 0,219
	Glutathion + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ 2 glutathion réduits	- 0,23
	$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{S}$	- 0,243
	Acide lipoiq̃ue + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ acide dihydrolipoiq̃ue	- 0,29
→	$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{NADH}$	- 0,320
	$\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{NADPH}$	- 0,324
→	Acétoacétate + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \beta$ -hydroxybutyrate	- 0,346
	$\alpha$ -cétooglutarate + $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ isocitrate	- 0,38
	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$ (à pH 7)	- 0,414
	Ferredoxine ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ ferredoxine ( $\text{Fe}^{2+}$ ) (épinards)	- 0,432

# D'où vient le carbone réduit ?



Éléments de la photosynthèse: Une plante terrestre typique utilise la lumière du soleil, pour réduire avec l'eau du sol le dioxyde de carbone de l'atmosphère pour former, des composés organiques.

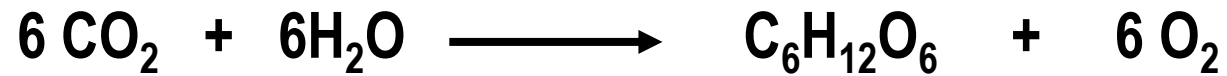
La catabolisme réalise le contraire, c'est-à-dire l'oxydation spontanée (au sens thermodynamique) du carbone réduit en  $\text{CO}_2$ .

# Photosynthèse : historique

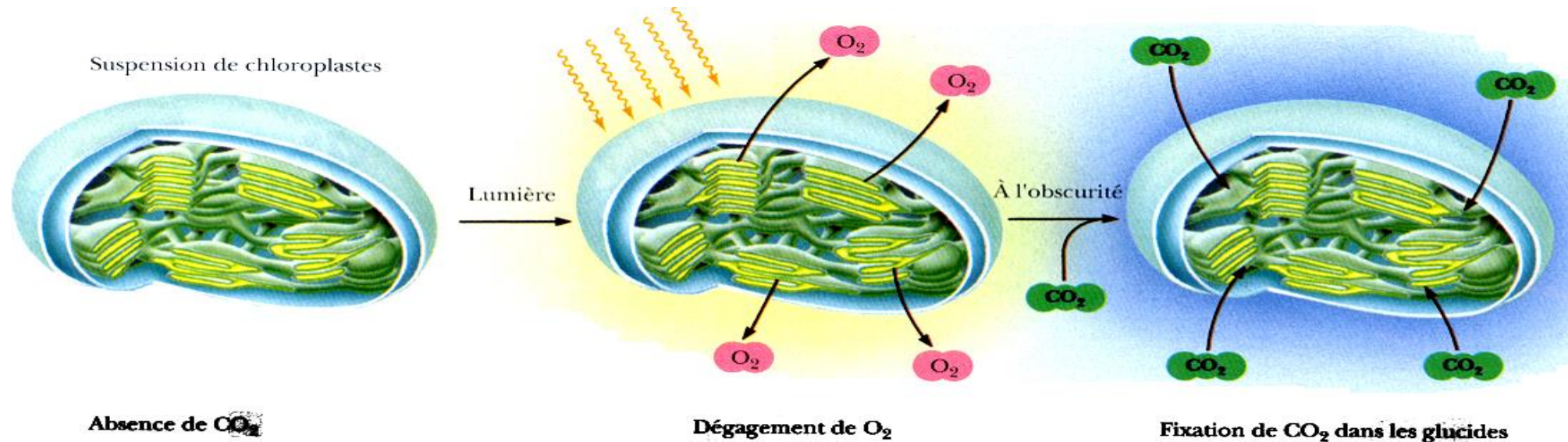
Dés 1804

Dioxyde de carbone + eau + lumière → sucre + oxygène

Fin XIXème



Début XXème : A lieu dans les chloroplastes chez les plantes







Les électrons sont activés par l'énergie lumineuse  
(« diminution de leur potentiel redox »)

## Réactions lumineuses

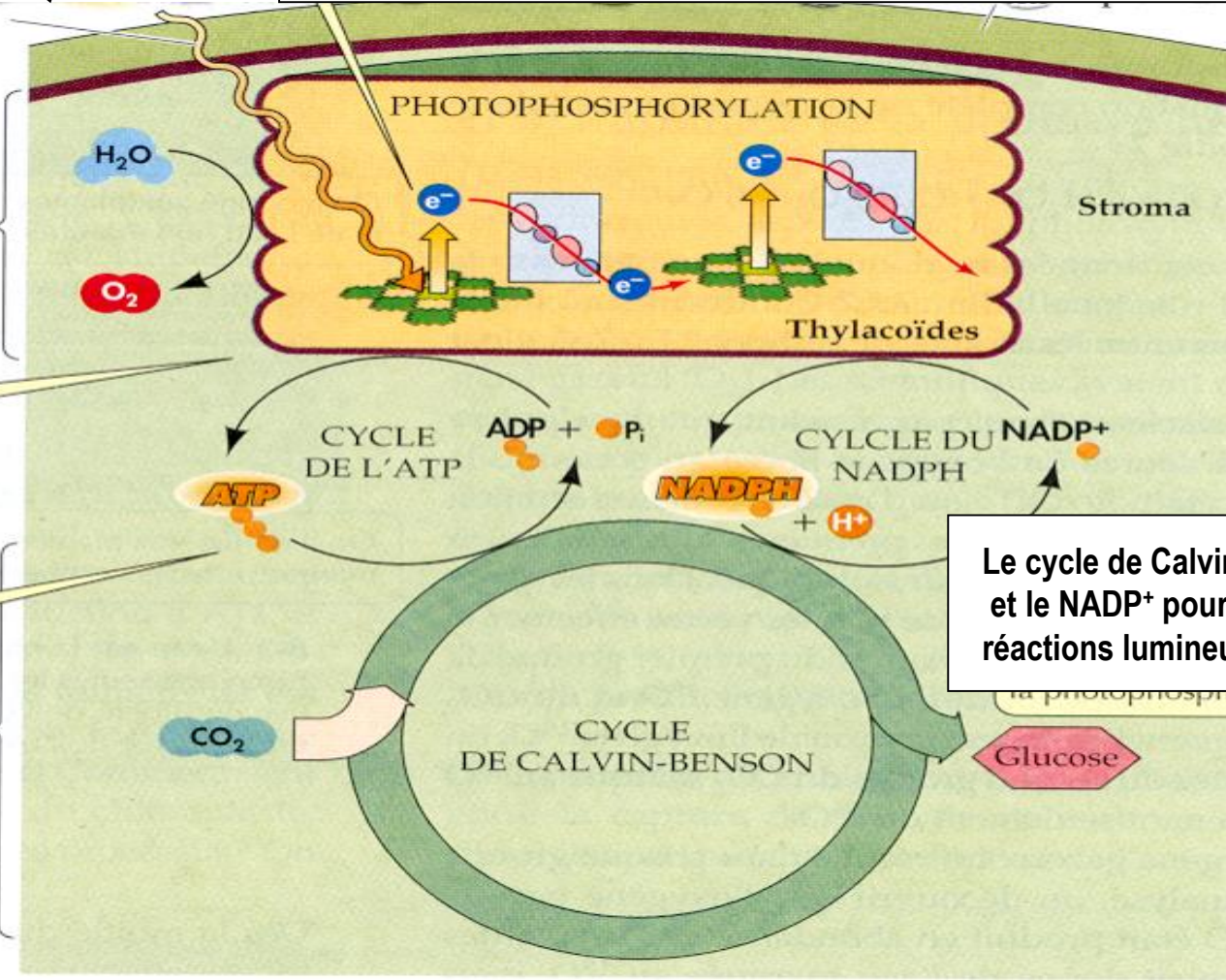
### « Photophosphorylation »

L'énergie lumineuse et l'eau sont utilisés pour produire l'ATP, le NADPH + H<sup>+</sup> et l'O<sub>2</sub>.

## Réactions sombres

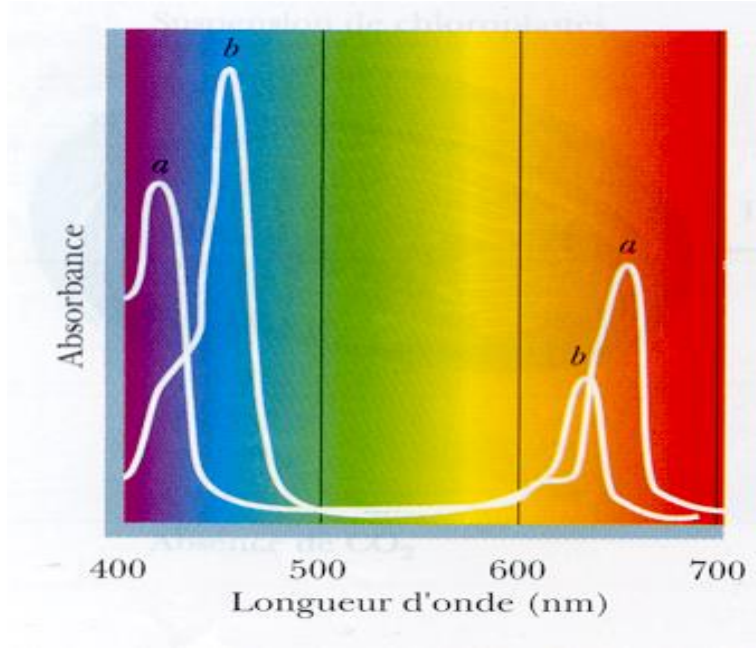
### « Glucogénèse »

Le CO<sub>2</sub>, l'ATP et le NADPH + H<sup>+</sup> sont utilisés dans le cycle de Calvin-Benson pour produire les sucres



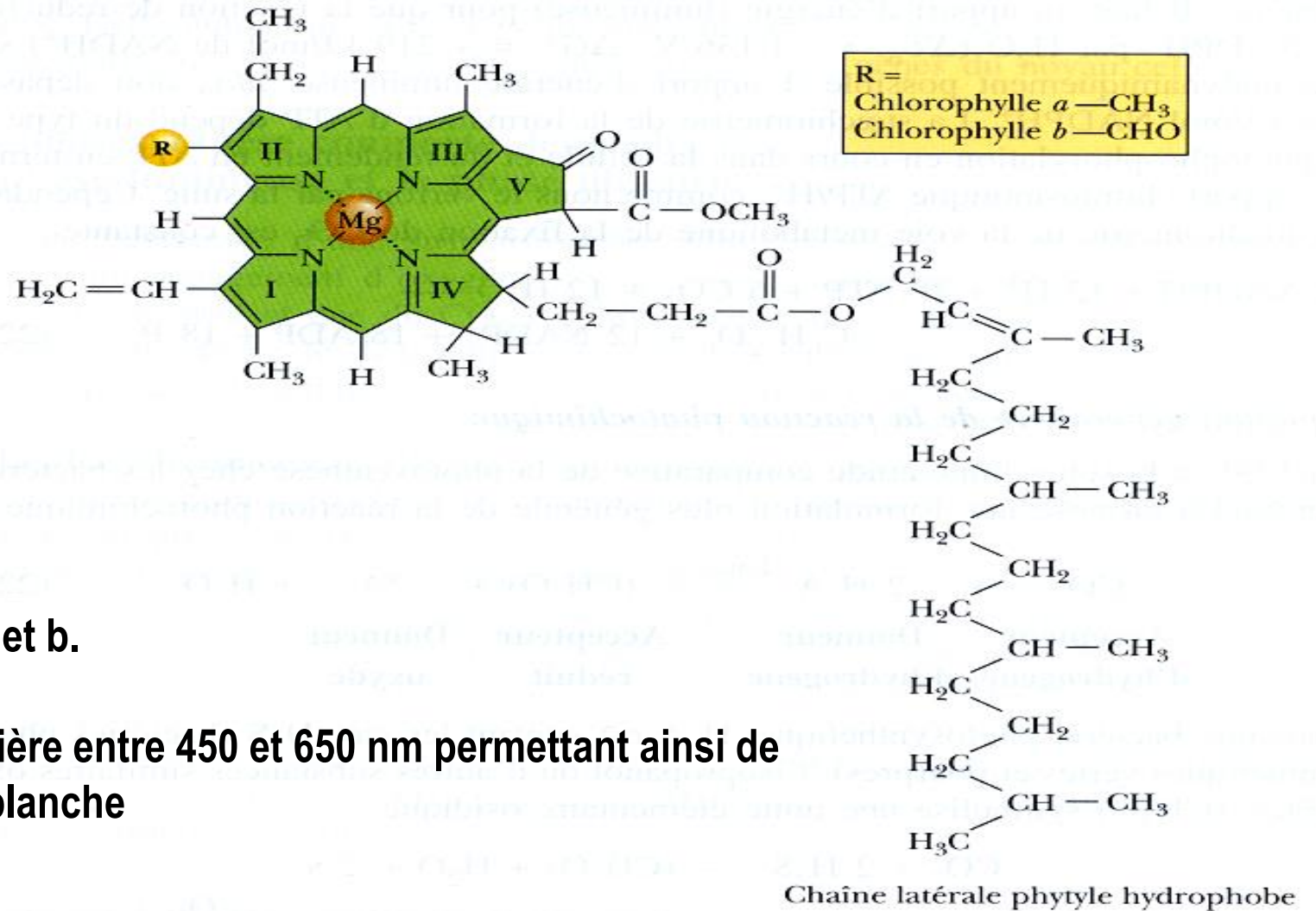
Le cycle de Calvin-Benson restitue l'ADP, le P<sub>i</sub> et le NADP<sup>+</sup> pour qu'ils soient utilisés dans les réactions lumineuses

# La chlorophylle

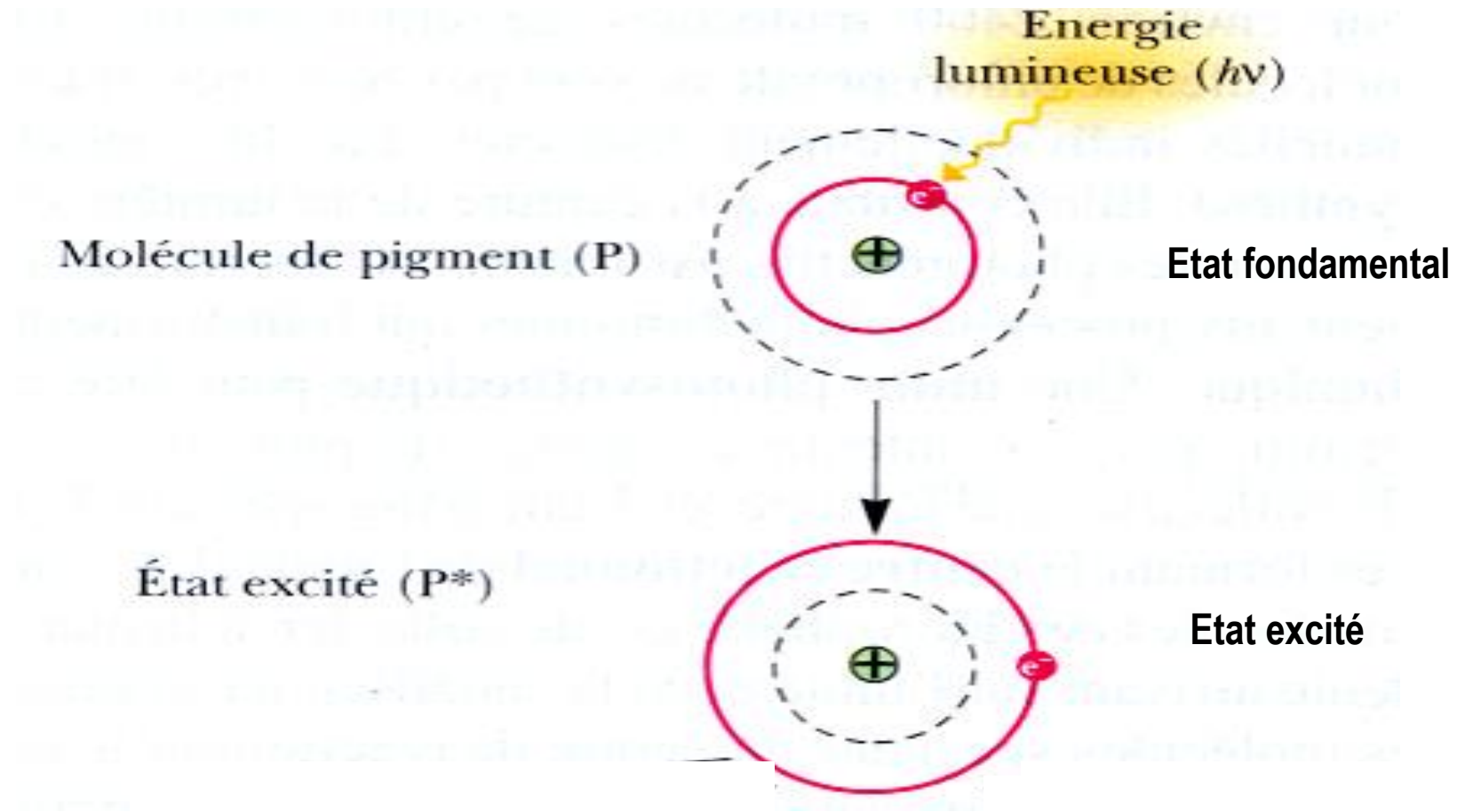


- Spectres d'absorption des chlorophylles a et b.

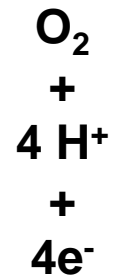
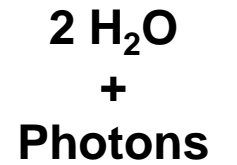
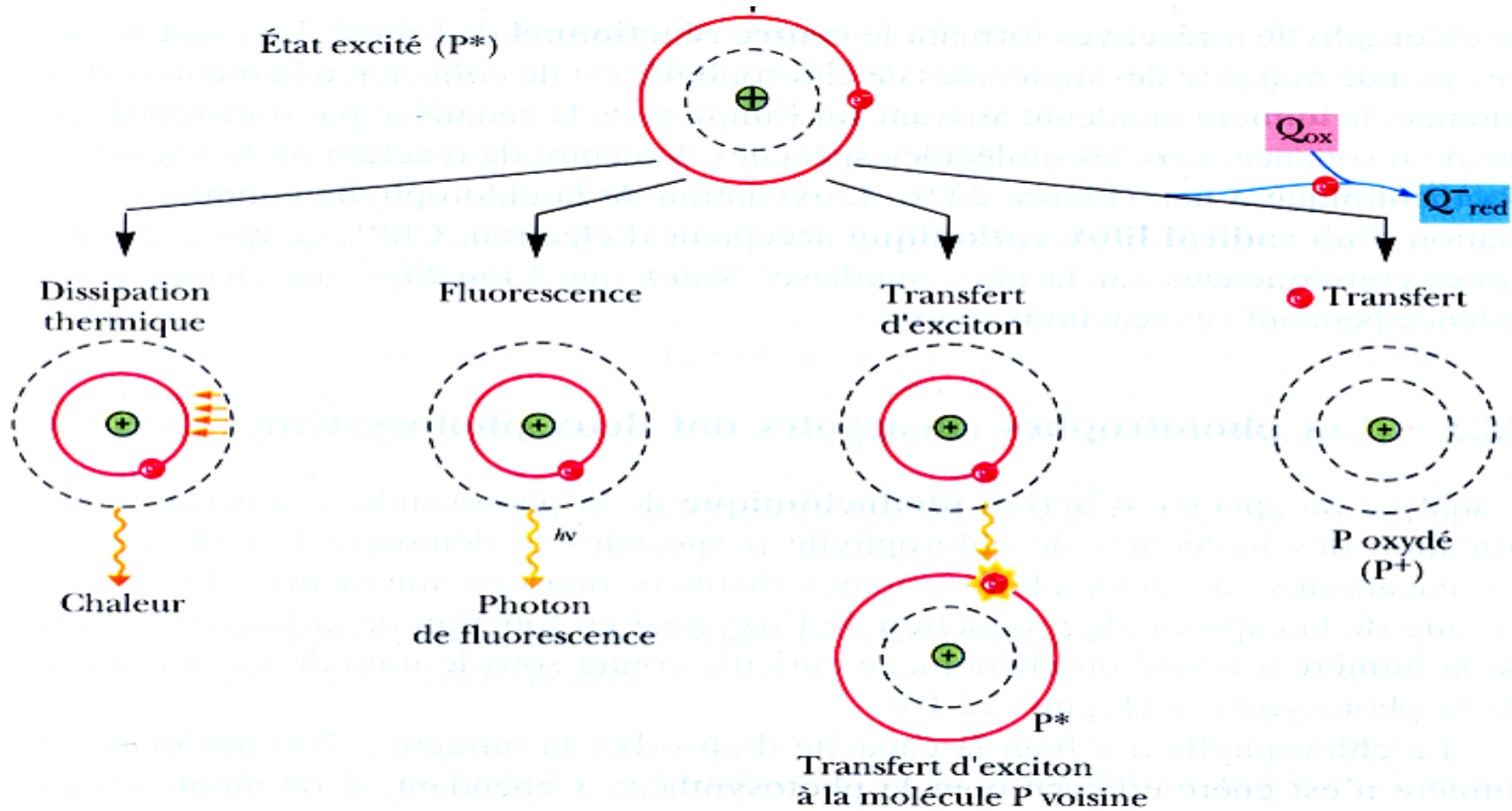
Des pigments accessoires absorbent la lumière entre 450 et 650 nm permettant ainsi de couvrir l'intégralité du spectre de lumière blanche



# L' énergie lumineuse est captée par la chlorophylle

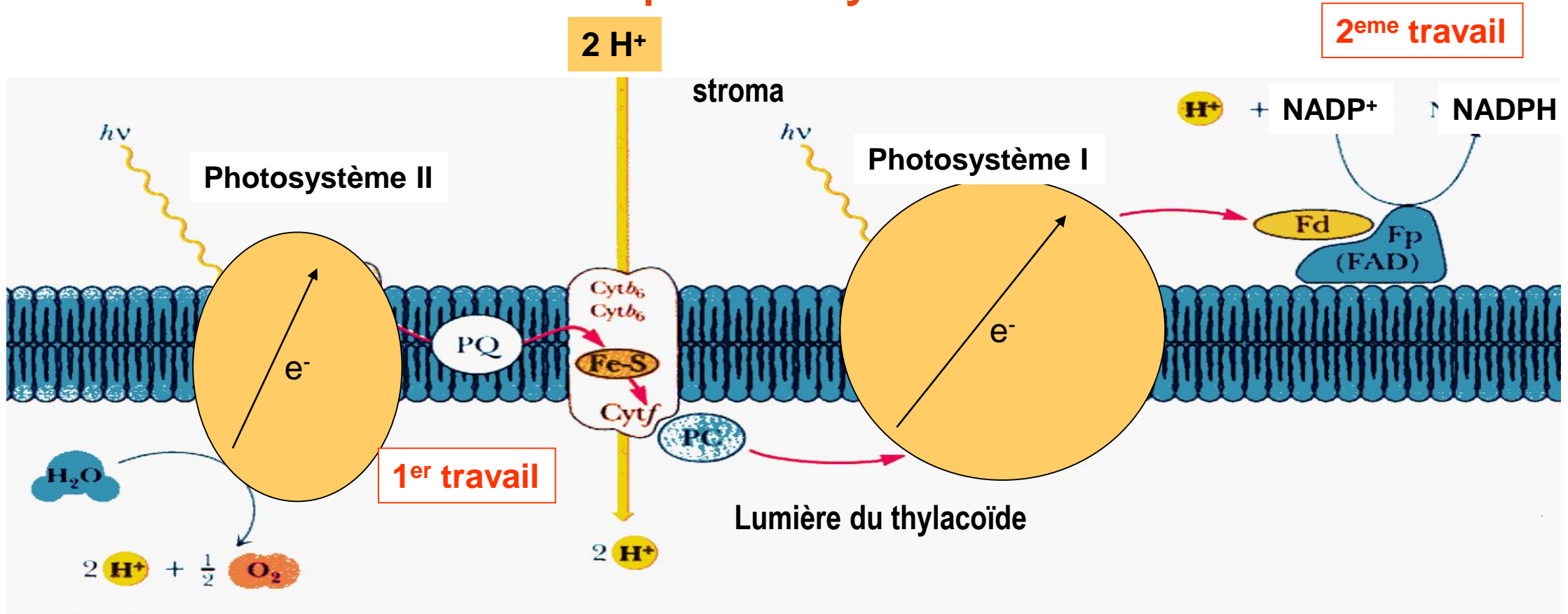


# Devenirs possibles des quanta d'énergie lumineuse absorbés par les pigments





# Résumé photosynthèse

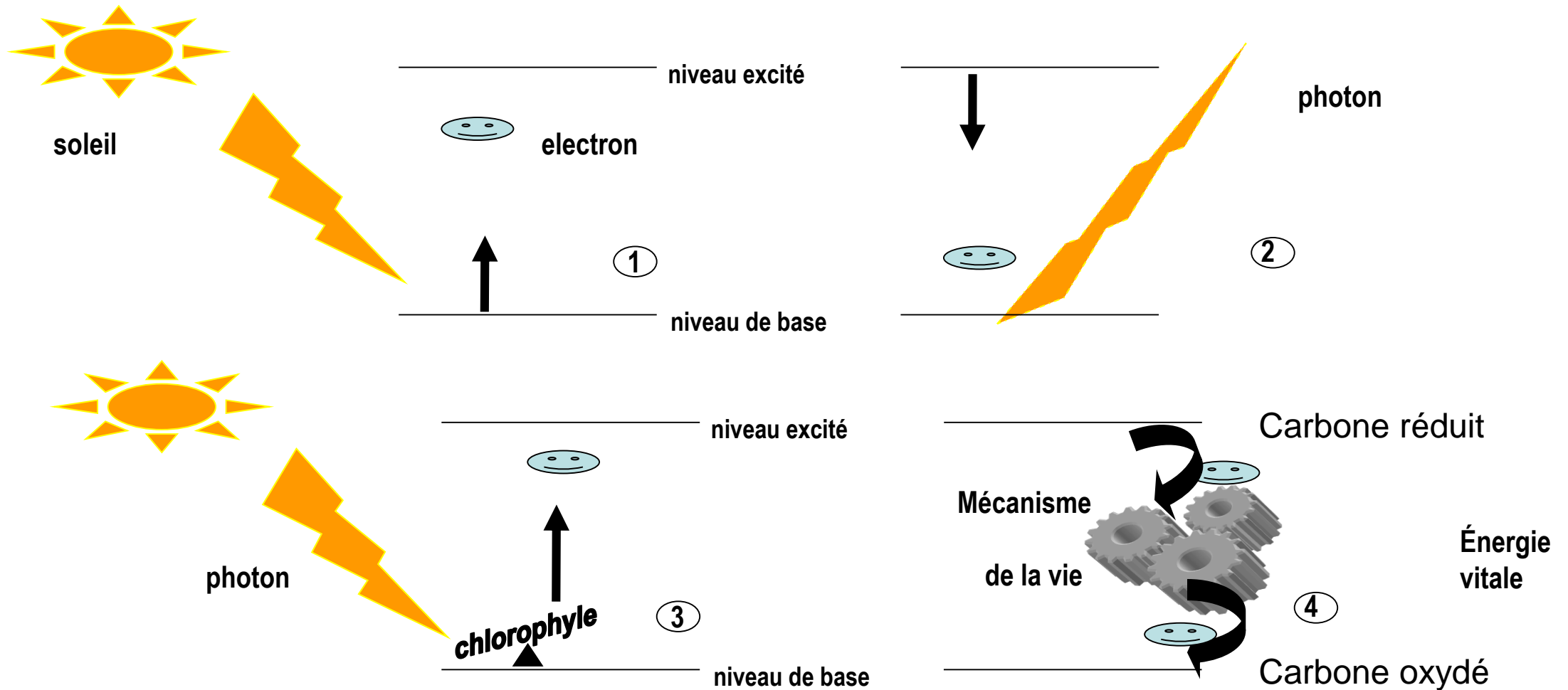


Objectif du PS2 : utiliser l'eau comme donneur de protons et aussi d'électrons énergisés pour permettre le fonctionnement du complexe  $cytb_6$ - $cyt f$  qui pompe les protons vers la lumière du thylacoïde : fournir **un gradient de protons pour synthèse ATP chimioosmotique**

Objectif du PS1 : réenergiser les électrons pour réduire le  $NADP^+$  en **NADPH** pour permettre la biosynthèse des glucides par réduction du  $CO_2$



# Lumière et vie



Le phénomène « vie » s' est intercalé entre 1 et 2 pour récupérer l' énergie de la lumière grâce à des structures biochimiques adéquates

# Messages essentiels du cours

- Le carbone réduit dans la nature provient des organismes photosynthétiques (autotrophes)
- Au cours du catabolisme les électrons du carbone des nutriments servent à réduire le  $\text{NAD}^+$  en  $\text{NADH}$
- La deuxième étape du métabolisme est le transfert des électrons sur un accepteur (souvent  $\text{O}_2$ ) ce qui permet la synthèse d'ATP
- Au cours de la photosynthèse les électrons de l'eau sont énergisés par les photons et peuvent ainsi réduire le  $\text{NADP}^+$  en  $\text{NADPH}$  et au final réduire le carbone du  $\text{CO}_2$

# Mentions légales

---

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'Université Grenoble Alpes (UGA).

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits à l'Université Grenoble Alpes (UGA), et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.