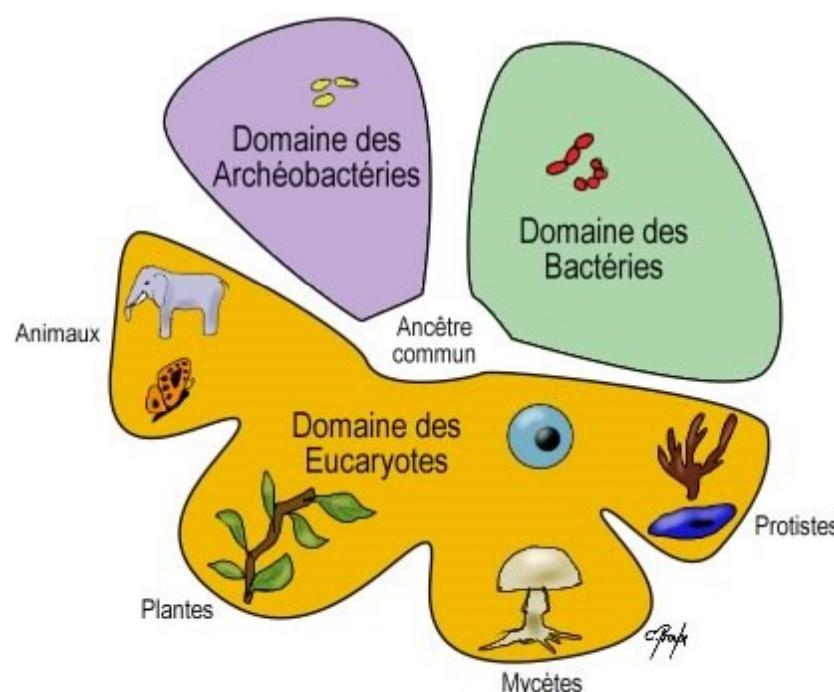


Les microorganismes sont classés en deux groupes: les procaryotes et les eucaryotes.



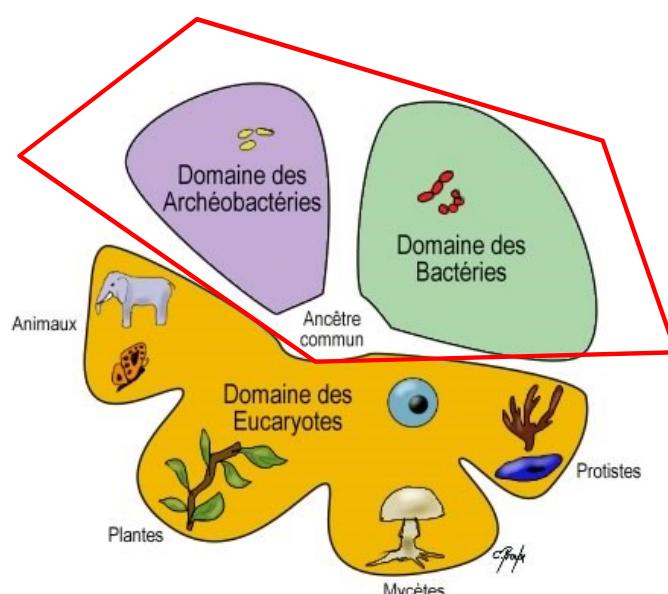
## Procaryotes

N'ont ni noyau ni autres organites

Sont identifiés aux bactéries

La plupart vivent comme des organismes monocellulaires

Sont divisées en deux types cellulaires



**Les archéobactéries** se trouvent souvent dans les habitats aquatiques et terrestres extrêmes (hypersalins, température élevée, environnements froids...) comme les méthanogènes, les cellules halophiles et les cellules thermoacidophiles.

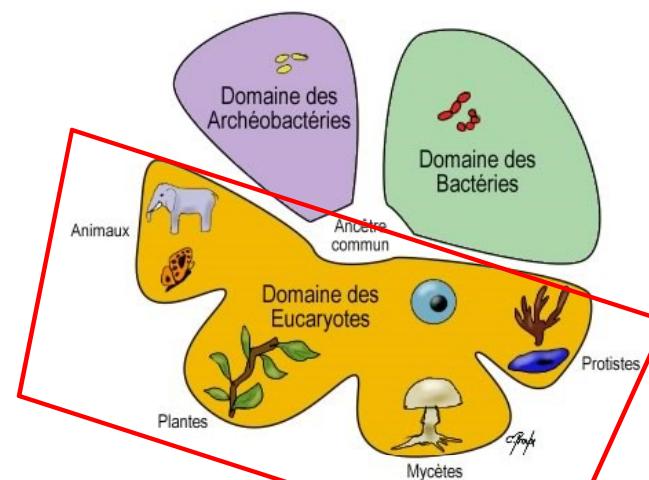
**Les eubactéries** (ou « vraie-bactérie ») sont les plus proches des bactéries actuelles. Elles prennent en compte les bactéries contemporaines, les mycoplasmes et les cyanobactéries

## Eucaryotes

Possèdent un vrai noyau contenant l'ADN.

Possèdent des biomembranes.

Quelques organismes sont unicellulaires et d'autres multicellulaires (animaux, plantes, champignons).



Les eucaryotes monocellulaires correspondent aux **protistes** qui sont de deux types :

**Les protophytes** sont des organismes eucaryotes unicellulaires, proches des végétaux étant donné que ce sont des organismes autotrophes

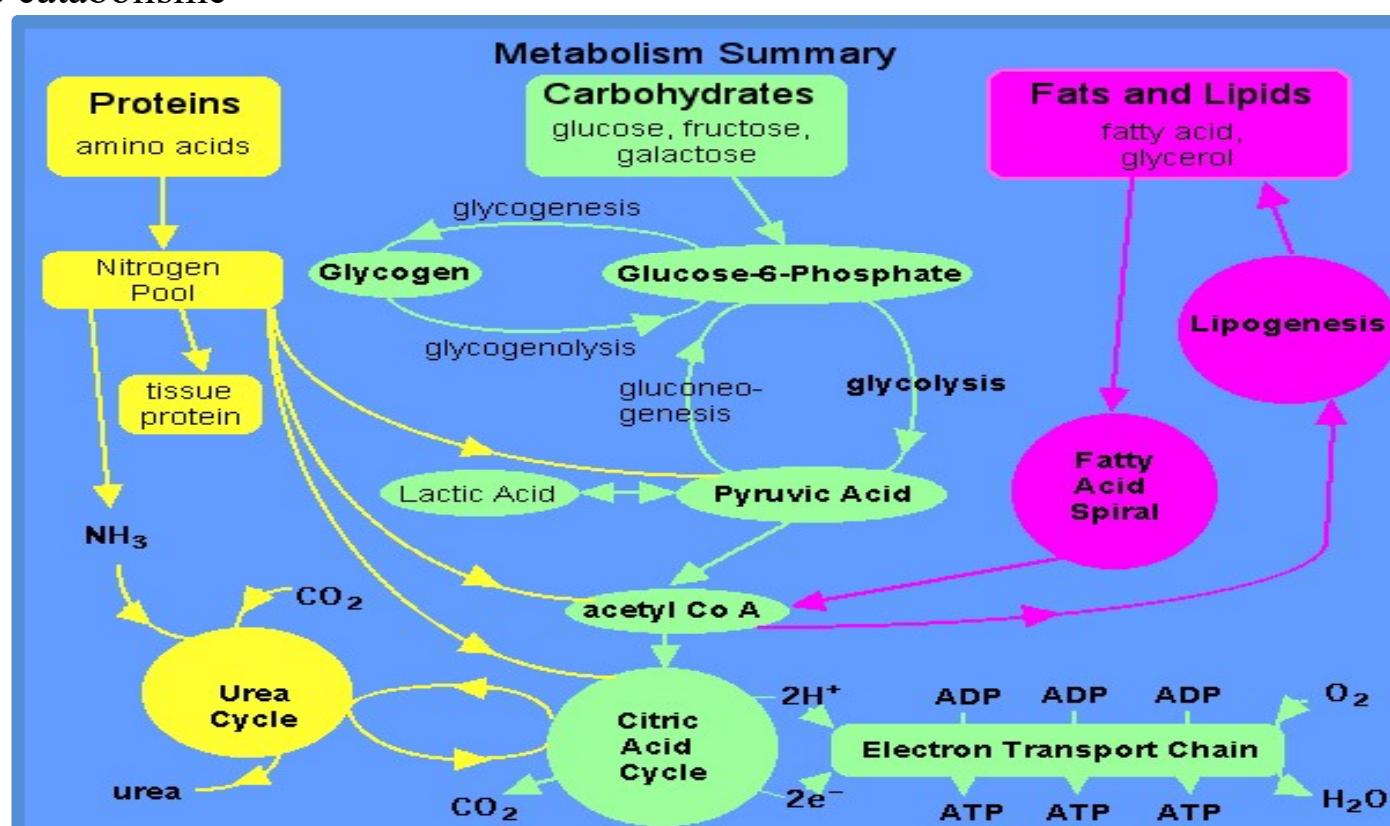
**Protozoaire** sont des protistes hétérotrophes mobiles qui ingèrent leur nourriture par phagocytose, contrairement aux protophytes.

## Métabolisme

C'est l'ensemble des réactions chimiques se produisant dans la cellule. Il est rendu possible par le flux d'énergie et les enzymes.

L'anabolisme

Le catabolisme



## Catabolisme

C'est l'ensemble des réactions biochimiques par lesquelles des molécules complexes sont fragmentées en molécules simples, tout en permettant:

- La production de métabolites de base (oses, acides aminés, acides gras, ...)
- La formation des métabolites secondaires (déchets du catabolisme) selon l'ampleur de la dégradation.
- La récupération d'énergie biologiquement utilisable sous forme d'ATP

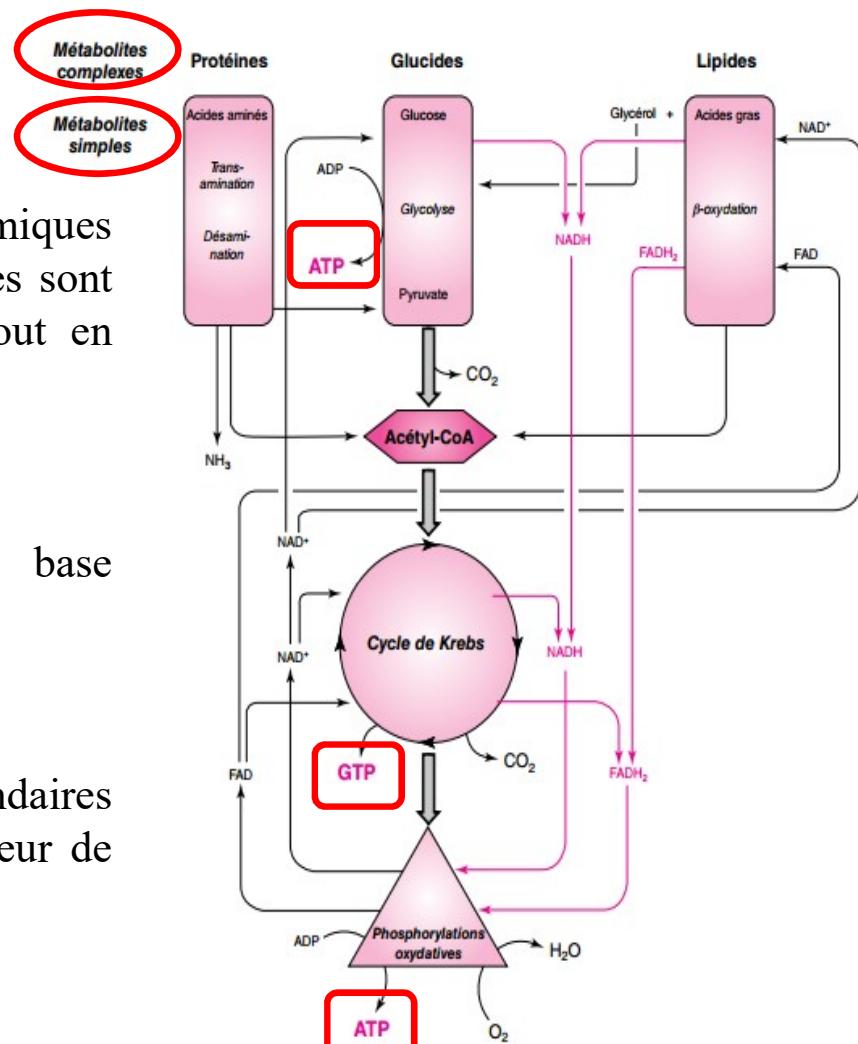


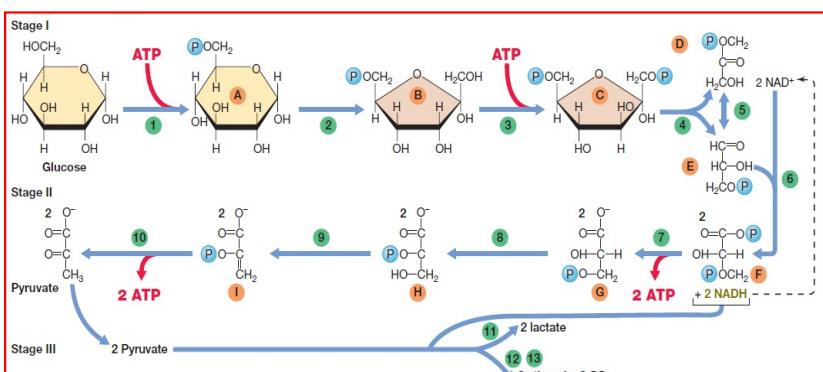
Schéma général des différentes voies du catabolisme.

Cet ATP est produite en deux étapes:

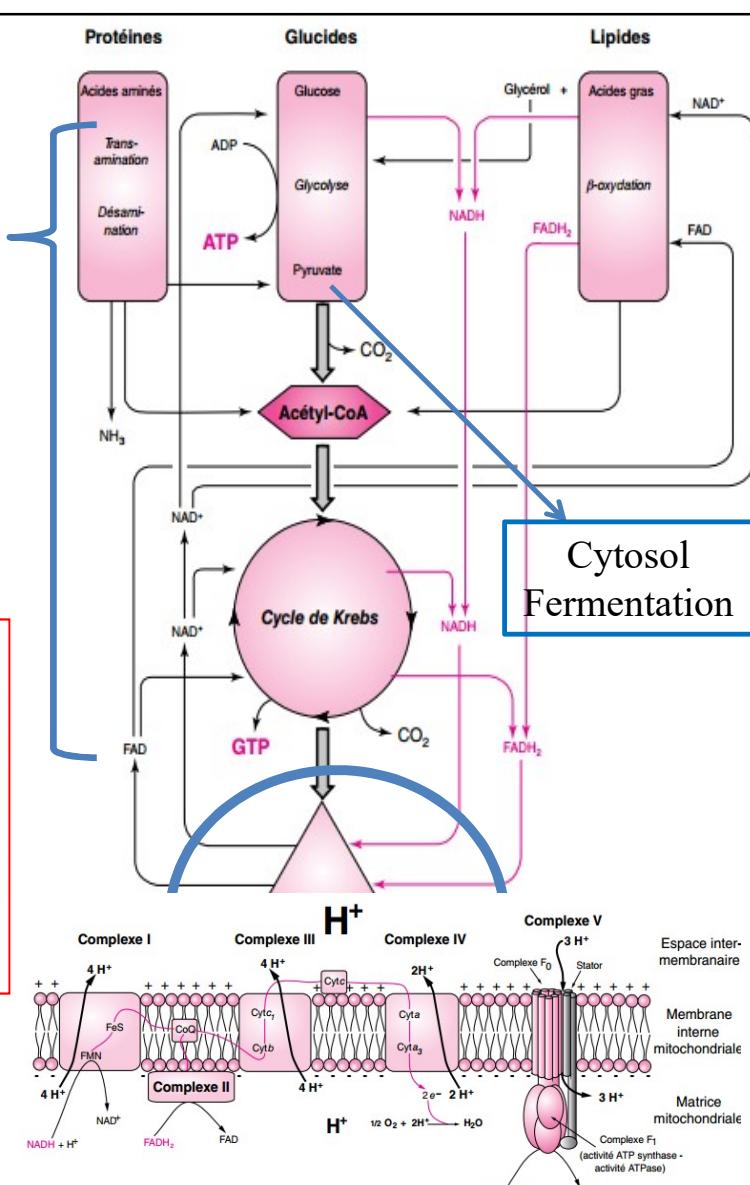
**1. Oxydation du substrat réduit** (lipides, glucides, protéines et) et génération des **coenzymes réduits** ( $\text{NAD}^+$ /  $\text{NADH}$ ,  $\text{H}^+$ ;  $\text{NADP}^+$  / $\text{NADPH}$ ,  $\text{H}^+$ ;  $\text{FAD}^+$ /  $\text{FADH}_2$ ;  $\text{FMN}/\text{FMNH}_2$ )

**2. Réoxydation des coenzymes réduits:** étape où il y a régénération des coenzymes et d'ATP

**2.2. Fermentation :** Les électrons libérés par les coenzymes réduits sont captés par une ou des molécule(s) issue(s) du réducteur.

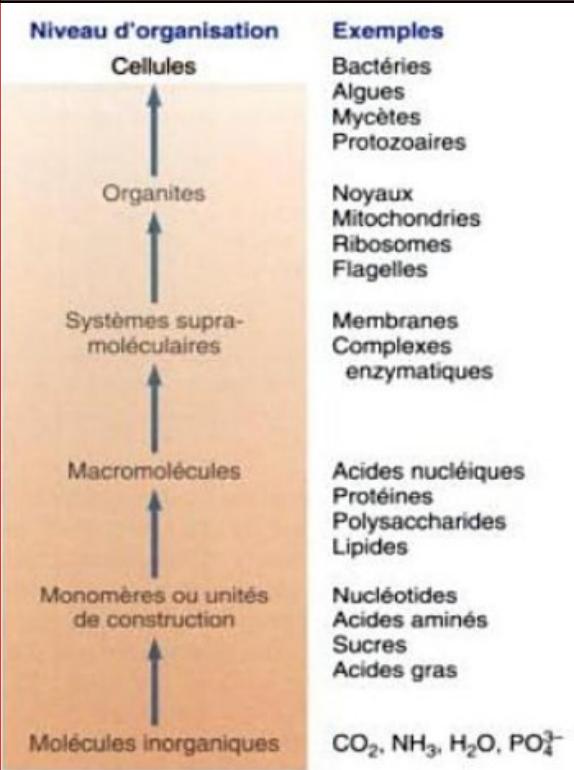
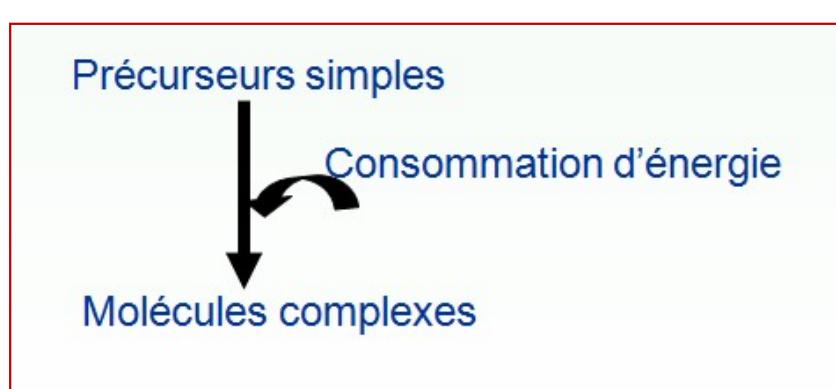


**2.1. Respiration:** les électrons libérés par les coenzymes réduits passent successivement sur une série de transporteur d'électrons jusqu'à un accepteur final stable



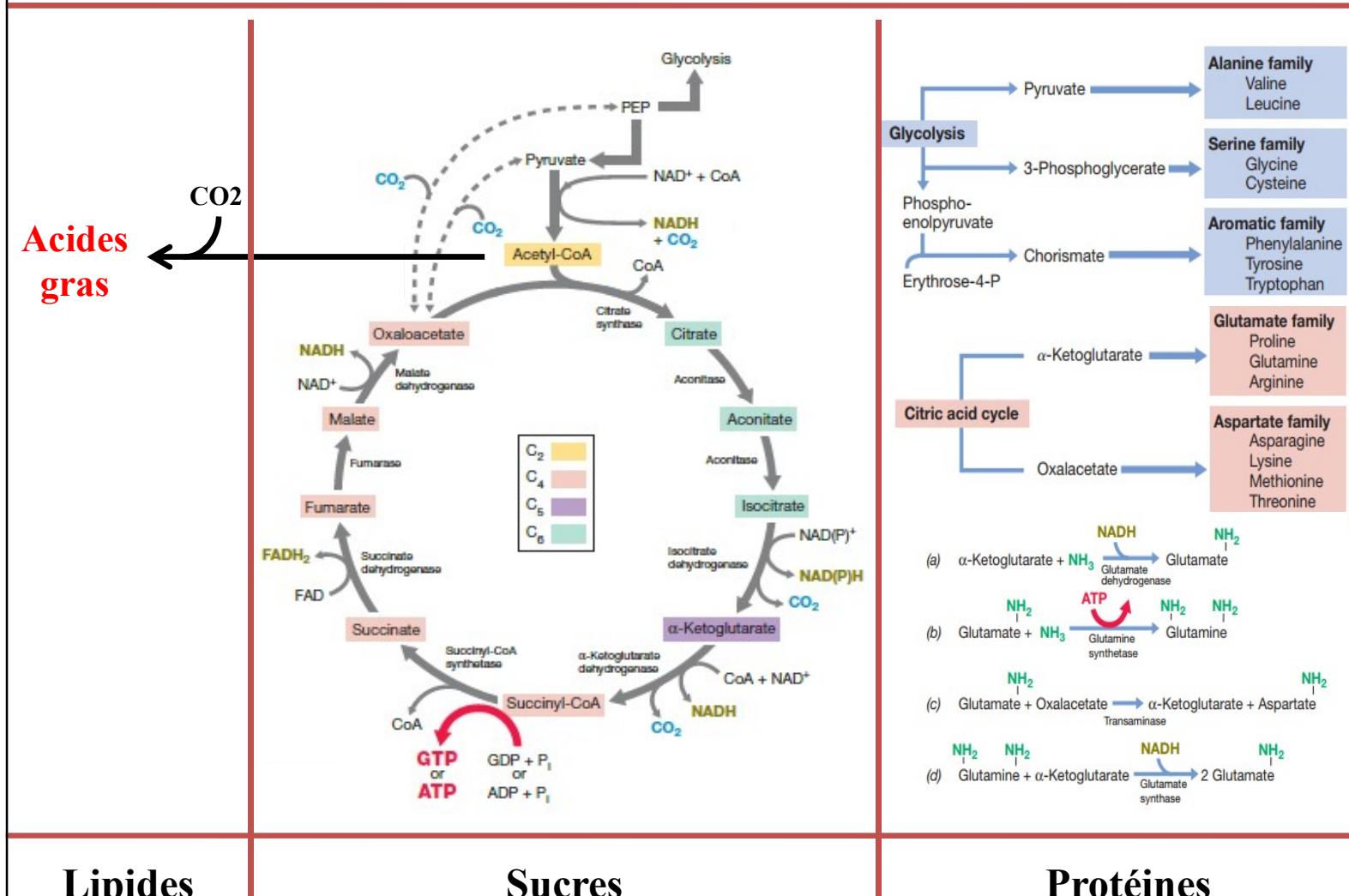
## Anabolisme

C'est l'ensemble de réaction de synthèse cellulaire à partir de métabolites de base issues du catabolisme et d'éléments du milieu avec consommation d'ATP.

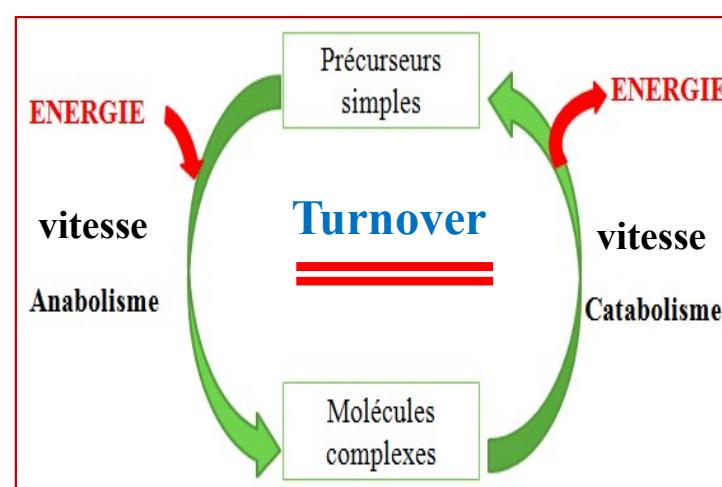
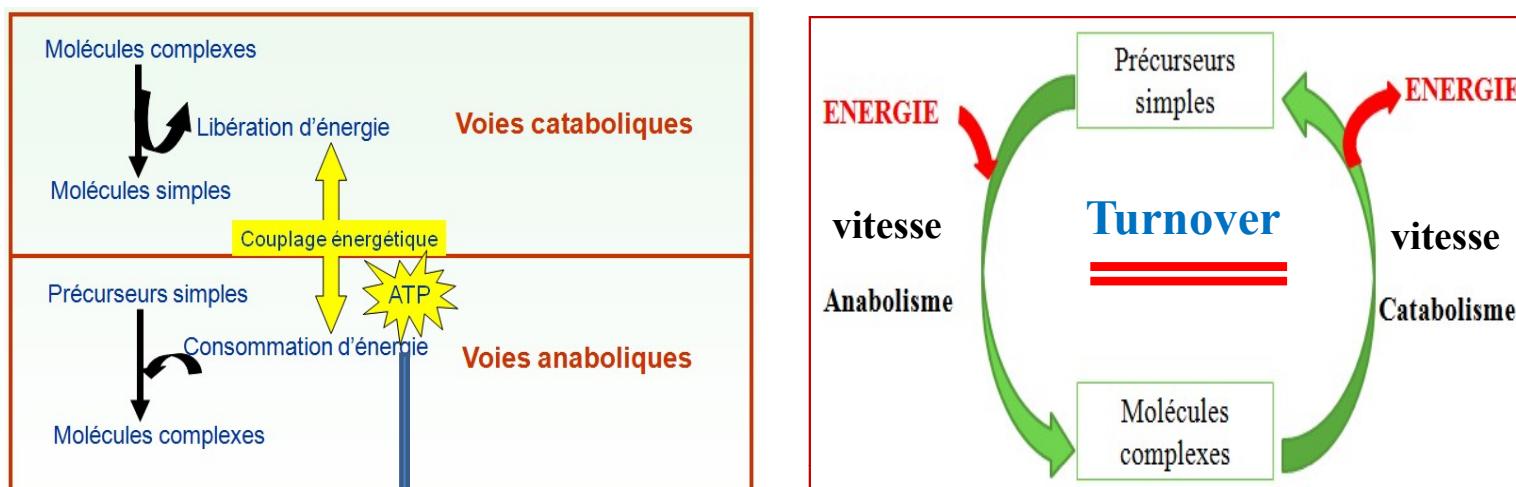


Constituant cellulaire	Nombre de molécules par cellule	Nombre de molécules synthétisées par seconde	Nombre de molécules d'ATP nécessaires par seconde pour la synthèse
ADN	1	0,00083	60.000
ARN	15.000	12,5	75.000
Polysaccharides	39.000	32,5	65.000
Lipide	15.000.000	12.500	87.000
Protéines	1.700.000	1400	2.120.000

## Exemples d'anabolisme



## Résumé



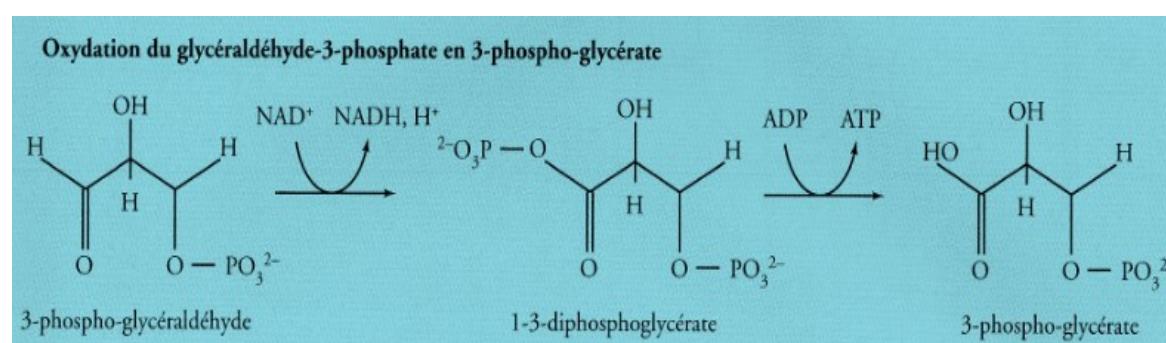
**Le travail chimique:** Synthèse de **macromolécules** comme la membrane, la paroi et l'appareil nucléaire à partir des précurseurs plus simples (**anabolisme**)

**Le travail du transport :** Absorber les nutriments, rejeter les déchets et maintenir les balances ionique contre leur gradient de concentration et/ou électrique

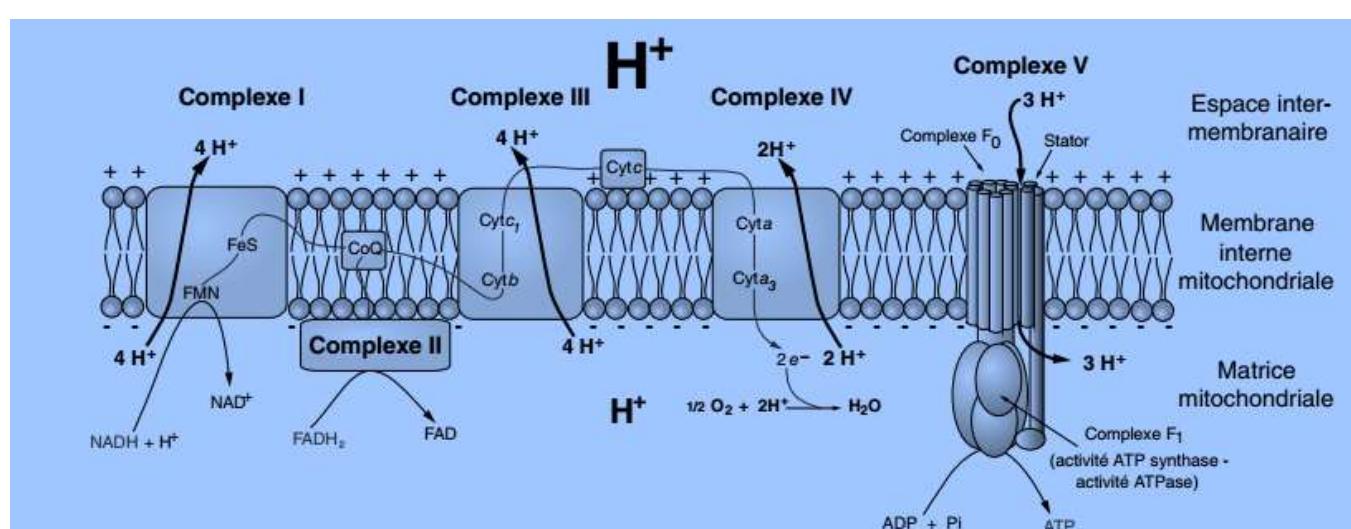
**Le travail mécanique :** Concerne le mouvement des organismes, des cellules et des structures intracellulaire

## Mécanismes de la production d'ATP

### 1. Phosphorylation liée au substrat (réaction biochimique)

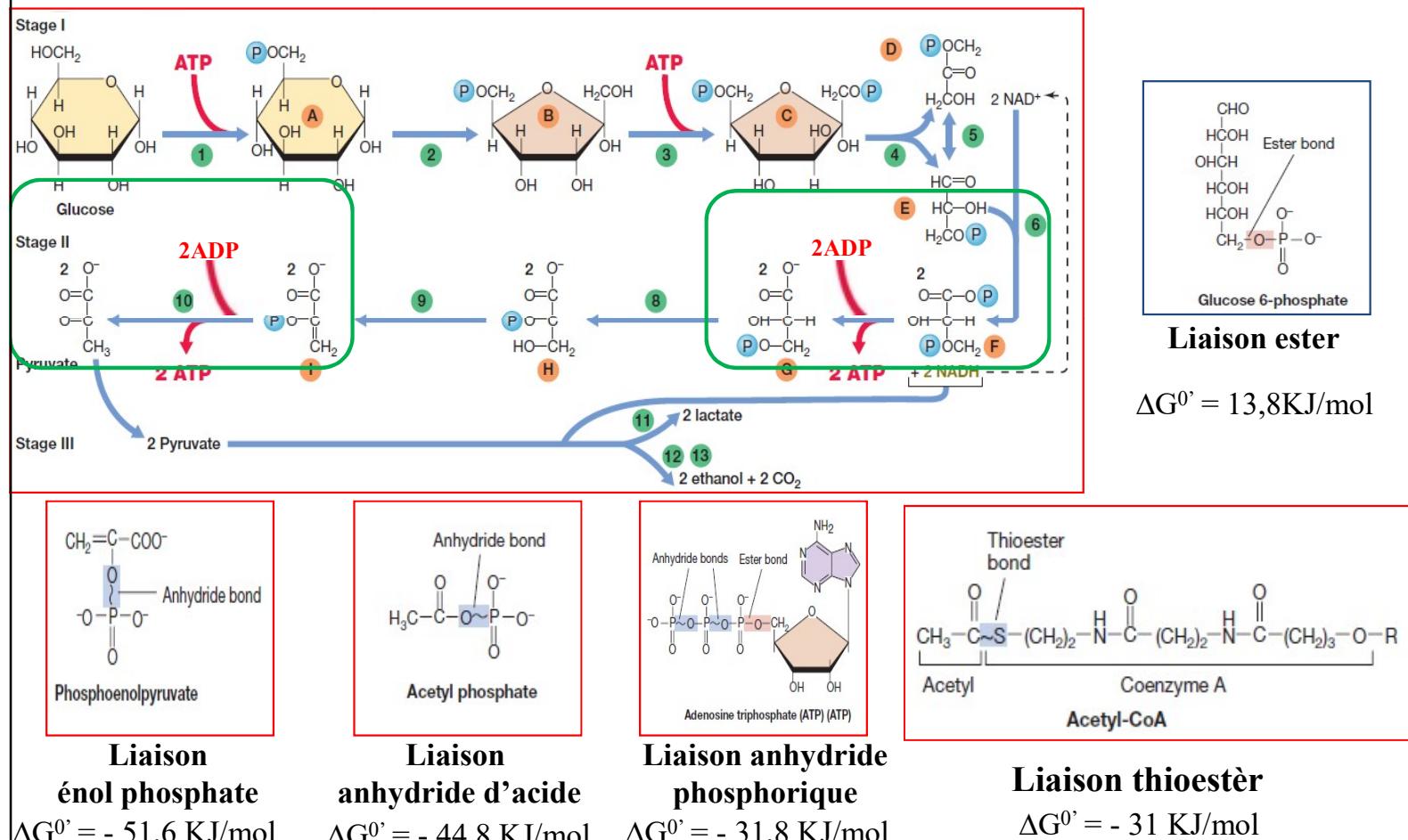


### 2. Réactions d'oxydoréductions (Phosphorylation oxydative)



## 1. Phosphorylation liée au substrat (réaction biochimique)

C'est une oxydation par déshydrogénération d'un composé riche en énergie suivie d'une déphosphorylation qui entraîne la formation d'une molécule d'ATP.



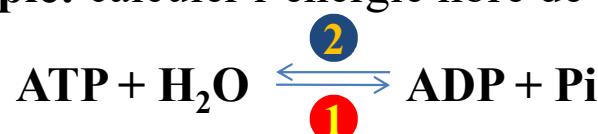
### Exemple de production et de calcul d'ATP par phosphorylation au substrat

Composés riches en énergie	Production d'ATP par phosphorylation au substrat
 Liaison anhydride d'acide $\Delta G^0 = -44,8 \text{ KJ/mol}$	<b>Oxydation du glycéraldéhyde-3-phosphate en 3-phospho-glycérate</b>
 Liaison énol phosphate $\Delta G^0 = -51,6 \text{ KJ/mol}$	<b>Transformation du phospho-énol-pyruvate en pyruvate</b>

On peut calculer l'énergie libre d'une réaction à partir des **énergies libres de formation** des molécules par cette formule

$$\Delta G^0 = \sum \Delta G_f^0(\text{products}) - \sum \Delta G_f^0(\text{reactants})$$

**Exemple:** calculer l'énergie libre de cette réaction



Composé	$\Delta_f G^\circ = \mu^\circ \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	Composé	$\Delta_f G^\circ = \mu^\circ \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Adénosine diphosphate (ADP)	- 1 424,70	Fructose	- 426,32
Adénosine monophosphate (AMP)	- 554,83	Fructose-6-phosphate (F6P)	- 1 315,74
Adénosine triphosphate (ATP)	- 2 292,50	Fructose-1,6-bisphosphate (F1,6BP)	- 2 206,78
Aspartate	- 452,09	Glucose	- 426,71
Diazote (gaz)	0	Glucose-1-phosphate (G1P)	- 1 311,89
Diazote (solution dans l'eau)	18,70	Glucose-6-phosphate (G6P)	- 1 318,92
1,3 bisphosphoglycérate (1,3 BPG)	- 2 207,30	Glycéraldéhyde-3-phosphate (GAP)	- 1 088,04
Carbone (C graphite)	0	Glycine	- 176,08
Cystéine	- 53,65	Lactate	- 313,70
Dihydroxyacétone phosphate (DAP)	- 1 095,70	Nicotinamide adénine dinucléotide (NAD <sup>+</sup> )	1 059,11
Dioxygène (gaz)	0	Nicotinamide adénine dinucléotide réduit (NADH)	1 120,09
Dioxygène (solution dans l'eau)	16,40	Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADP <sup>+</sup> )	176,68
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> gaz)	- 394,36	Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate réduit (NADPH)	237,77
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> solution dans l'eau)	- 547,10	Phosphoénolpyruvate (PEP)	- 1 189,73
Éthanol	62,96	Phosphate	- 1 059,49
Eau (H <sub>2</sub> O)	- 155,66	Pyruvate	- 350,78

1 = Réaction exergonique

2 = Réaction endergonique

$$\Delta G^\circ = \sum \Delta G_f^\circ (\text{products}) - \sum \Delta G_f^\circ (\text{reactants})$$

$$\Delta_r G^\circ = -(\Delta_f G^\circ_{\text{ATP}} + \Delta_f G^\circ_{\text{H}_2\text{O}}) + (\Delta_f G^\circ_{\text{ADP}} + \Delta_f G^\circ_{\text{Pi}})$$

$$\Delta_r G^\circ = -(-2 292,50 - 155,66) + (-1 424,70 - 1 059,49) = -36,03 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$\Delta r G' < 0$ , la réaction est **spontanée (exergonique)** ; elle évolue vers la formation des produits

$\Delta r G' > 0$ , la réaction écrite dans le sens direct est **non spontanée (endergonique)** et se déroulera dans le sens inverse

Ont une  $G_f^\circ$  négative, donc se forme spontanément à partir de leurs éléments

Cette molécule ne se forme pas spontanément mais se décompose d'elle-même en azote et oxygène

Compound	Free energy of formation ( $G_f^\circ$ ) <sup>a</sup>
Water (H <sub>2</sub> O)	-237.2
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	-394.4
Hydrogen gas (H <sub>2</sub> )	0
Oxygen gas (O <sub>2</sub> )	0
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	-79.4
Nitrous oxide (N <sub>2</sub> O)	+104.2
Acetate (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	-369.4
Glucose (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )	-917.3
Methane (CH <sub>4</sub> )	-50.8
Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	-175.4

## 2. Phosphorylation oxydative:

Se fait dans les membranes cytoplasmique des microorganismes et les membranes internes des mitochondries. Ces membranes sont composées par des transporteurs d'électrons arrangeés en suivant un ordre croissant de potentiels d'oxydo réduction.

### NADH déshydrogénases,

acceptent  $2e^- + 2H^+$  et les transporte ensuite à une flavoprotéine.

### Flavoprotéines,

*Les flavoprotéines (FMN) acceptent  $2e^- + 2H^+$  mais ne donnent que des électrons*

### Protéines fer-soufre ( $Fe_2S_2$ et $Fe_4S_4$ )

Transportent uniquement un électron comme les cytochromes

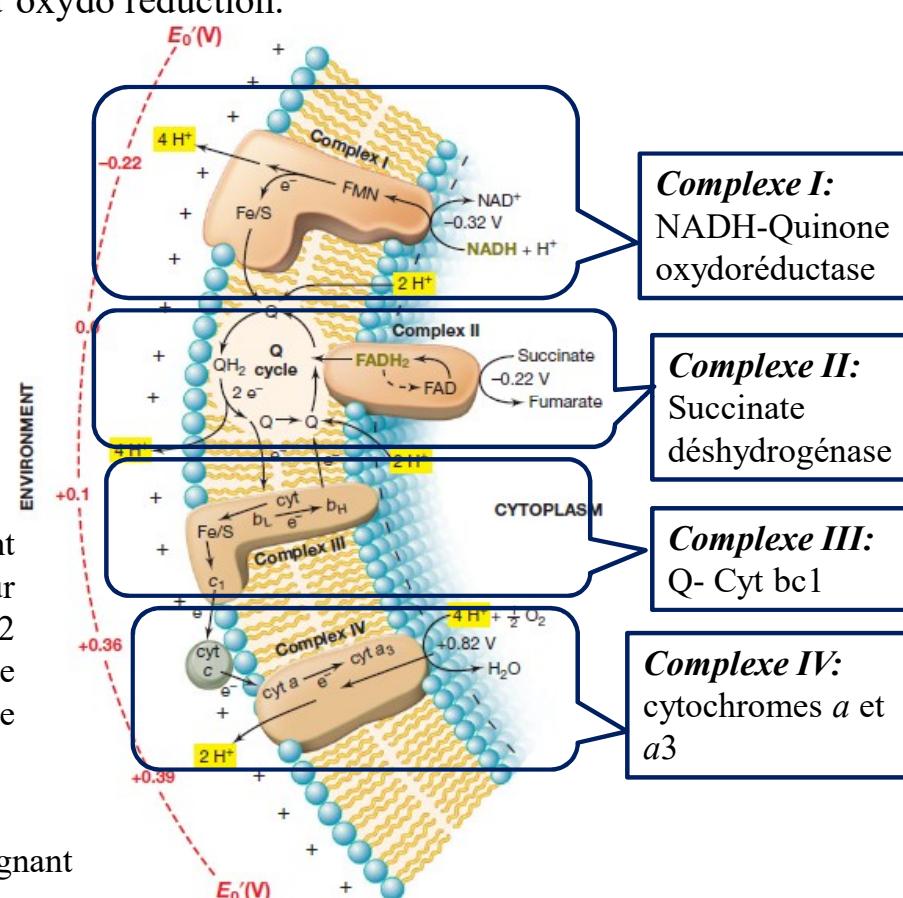
### Quinone

acceptent  $2e^-$  et  $2H^+$  mais transportent uniquement les 2 électrons au transporteur suivant comme les flavoprotéines, les 2 protons sont chassés vers l'espace extramembranaire pour la génération d'une force protomotrice

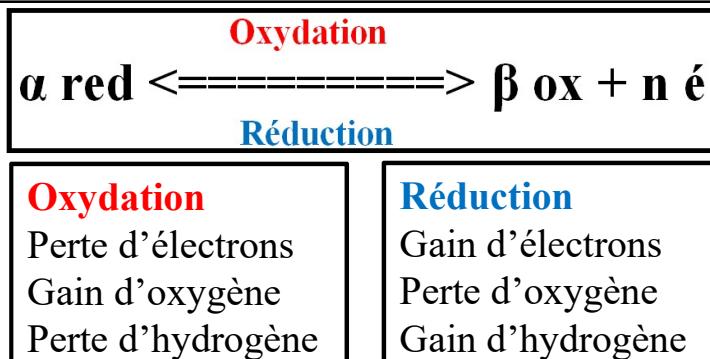
### Cytochromes

S'oxydent et se réduisent en perdant ou en gagnant un seul électron

Il y plusieurs type de cytochromes selon leurs potentiel de d'oxydoréduction cyt *a*, cyt *b*, cyt *c*, cyt *c<sub>1</sub>*



Au couple redox (red et ox) correspond un **potentiel oxydoréduction « E »** donné par la relation de Nernst (et ce en absence d'autre espèces ioniques)



$$E' = E'^\circ + \frac{RT}{nF} \log \frac{a_{\text{Ox}}}{a_{\text{Red}}} \quad \longrightarrow \quad E' = E'^\circ + \frac{0,059}{n} \log_{10} \frac{[\text{Ox}]}{[\text{Red}]}$$

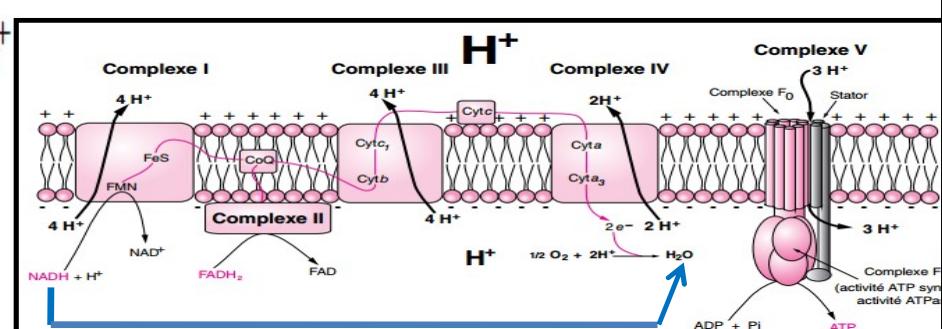
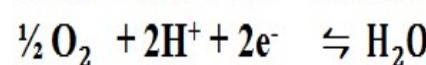
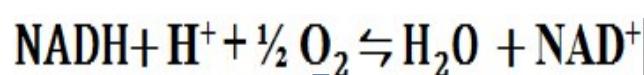
**E:** Potentiel redox en volts

**$E^\circ$ :** Potentiel standard redox (dans les conditions standard) en volts [red] = [ox] = 1 mol/L, 298K (25°C)

**R:** Constante des gaz parfaits = 8,32 J.mol.K

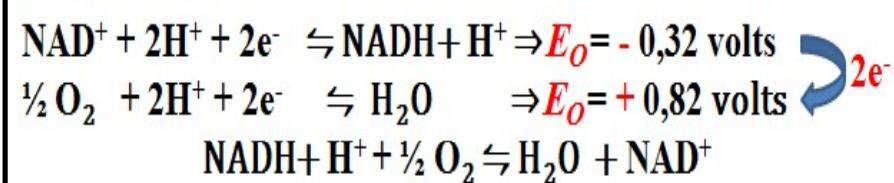
**F:** Constante de Faraday = 96500 J/V.mol

## Couplage de deux demi-réactions



Redox couple

	$E^\circ$ (V)
$\text{SO}_4^{2-}/\text{HSO}_3^-$ (-0.52)	2 e <sup>-</sup>
$\text{CO}_2/\text{glucose}$ (-0.43)	24 e <sup>-</sup>
$2\text{H}^+/\text{H}_2$ (-0.42)	2 e <sup>-</sup>
$\text{CO}_2/\text{methanol}$ (-0.38)	6 e <sup>-</sup>
$\text{NAD}^+/\text{NADH}$ (-0.32)	2 e <sup>-</sup>
$\text{CO}_2/\text{acetate}$ (-0.28)	8 e <sup>-</sup>
$\text{S}^0/\text{H}_2\text{S}$ (-0.28)	2 e <sup>-</sup>
$\text{CO}_2/\text{CH}_4$ (-0.24)	8 e <sup>-</sup>
$\text{FAD/FADH}$ (-0.22)	2 e <sup>-</sup>
$\text{Pyruvate/lactate}$ (-0.19)	2 e <sup>-</sup>
$\text{SO}_3^{2-}/\text{H}_2\text{S}$ (-0.17)	6 e <sup>-</sup>
$\text{S}_4\text{O}_6^{2-}/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ (+0.024)	2 e <sup>-</sup>
$\text{Fumarate/succinate}$ (+0.03)	2 e <sup>-</sup>
$\text{Cytochrome } b_{\text{ox/red}}$ (+0.035)	1 e <sup>-</sup>
$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (+0.2)	1 e <sup>-</sup> , (pH 7)
$\text{Ubiquinone}_{\text{ox/red}}$ (+0.11)	2 e <sup>-</sup>
$\text{Cytochrome } c_{\text{ox/red}}$ (+0.25)	1 e <sup>-</sup>
$\text{Cytochrome } a_{\text{ox/red}}$ (+0.39)	1 e <sup>-</sup>
$\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ (+0.42)	2 e <sup>-</sup>
$\text{NO}_3^-/\frac{1}{2} \text{N}_2$ (+0.74)	5 e <sup>-</sup>
$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (+0.76)	1 e <sup>-</sup> , (pH 2)
$\frac{1}{2} \text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (+0.82)	2 e <sup>-</sup>



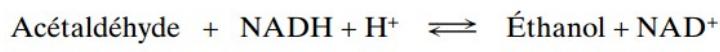
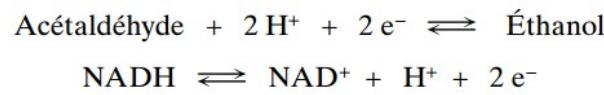
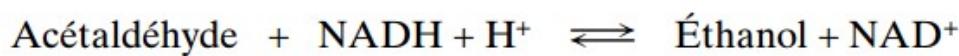
L'énergie libre de cette réaction =  $\Delta_r G^\circ = -nF \Delta E^\circ$

$$\Delta E^\circ = \{E^\circ \text{ le plus élevé (celui de l'oxydant)}\} - \{E^\circ \text{ le plus faible (celui du réducteur)}\}$$

$$\Delta_r G^\circ = -2 \times 96500 (0,82 - (-0,32)) = -220020 \text{ J/mol}$$

$$\Delta_r G^\circ = -220 \text{ KJ/mol}$$

Exercice: calculer l'énergie libre de cette réaction



$$\Delta E'^\circ = -0,197 - (-0,315) : + 0,118 \text{ V.}$$

$$\Delta_r G^\circ = -nF \Delta E^\circ$$

Pour la réduction de l'acétaldéhyde par le NADH :

$$\Delta_r G^\circ = -2 \times 96\,500 \times \{-0,197 - (-0,315)\} = -22,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Demi-réaction	$E^\circ$ (Volt)
$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	0,815
Cytochrome $a_3$ ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \rightarrow$ Cytochrome $a_3$ ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,385
$\text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0,300
Cytochrome a ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \rightarrow$ Cytochrome a ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,290
Cytochrome c ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \rightarrow$ Cytochrome c ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,235
Cytochrome $c_1$ ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \rightarrow$ Cytochrome $c_1$ ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,220
Ubiquinone + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ Ubiquinol	0,100
Cytochrome b ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \rightarrow$ Cytochrome b ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0,077
Acide déhydroascorbutique + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ Acide ascorbutique	0,058
Fumarate + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ Succinate	0,031
Oxaloacétate + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ Malate	-0,175
$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{FADH}_2$	-0,180 <sup>1</sup>
Pyruvate + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ Lactate	-0,190
Acétaldéhyde + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ Éthanol	-0,197
Cystine + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ 2 Cystéine	-0,220
Glutathion oxydé (GSSG) + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ 2 Glutathions réduits (2 GSH)	-0,230
1,3-bis-Phosphoglycérate + $2\text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ Glycéraldéhyde-3-phosphate + Pi	-0,290
$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADH}$	-0,315
$\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADPH}$	-0,320
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	-0,420
Ferrédoxine ( $\text{Fe}^{3+}$ ) → Ferrédoxine ( $\text{Fe}^{2+}$ )	-0,430
Acétate + $3\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ Acétaldéhyde + $\text{H}_2\text{O}$	-0,581

Dans le cas d'une réaction  $v_A \text{A} + v_B \text{B} \rightleftharpoons v_C \text{C} + v_D \text{D}$

$$\Delta_r G' = \Delta_r G'^o + RT \log \left( \frac{[\text{C}]^{v_C} [\text{D}]^{v_D}}{[\text{A}]^{v_A} [\text{B}]^{v_B}} \right)$$

A l'équilibre:  $\Delta_r G'_\text{éq} = 0 \rightarrow \Delta_r G'^o + RT \log \left( \frac{[\text{C}]_\text{éq}^{v_C} [\text{D}]_\text{éq}^{v_D}}{[\text{A}]_\text{éq}^{v_A} [\text{B}]_\text{éq}^{v_B}} \right) = 0$

$$\Delta_r G'^o = -RT \log K'_\text{éq}$$

$$\Delta_r G' = -RT \log K'_\text{éq} + RT \log Q'$$

Si  $Q' < K'_\text{éq}$ ,  $\Delta r G' < 0$ , la réaction est **spontanée (exergonique)**; elle évolue vers la formation des produits

Si  $Q' > K'_\text{éq}$ ,  $\Delta r G' > 0$ , la réaction écrite dans le sens direct est **non spontanée (endergonique)** et se déroulera dans le sens inverse

$\Delta rG' < 0$ , la réaction est **spontanée (exergonique)** ; elle évolue vers la formation des produits

$\Delta rG' > 0$ , la réaction écrite dans le sens direct est **non spontanée (endergonique)** et se déroulera dans le sens inverse

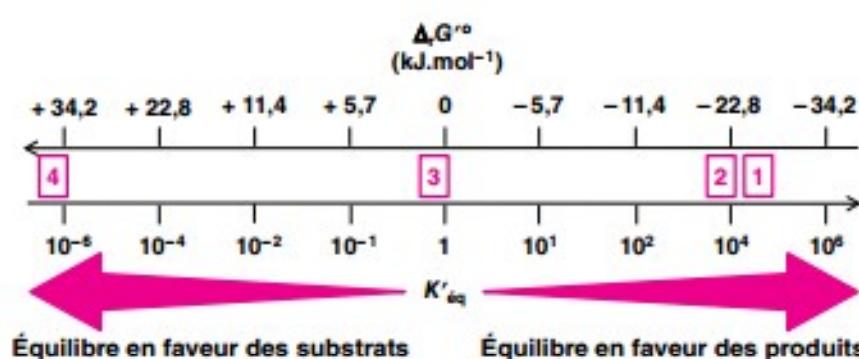
Ont une  $G_f^0$  négative, donc se forme spontanément à partir de leurs éléments

Cette molécule ne se forme pas spontanément mais se décompose d'elle-même en azote et oxygène

Compound	Free energy of formation ( $G_f^0$ ) <sup>a</sup>
Water ( $H_2O$ )	-237.2
Carbon dioxide ( $CO_2$ )	-394.4
Hydrogen gas ( $H_2$ )	0
Oxygen gas ( $O_2$ )	0
Ammonium ( $NH_4^+$ )	-79.4
Nitrous oxide ( $N_2O$ )	+104.2
Acetate ( $C_2H_3O_2^-$ )	-369.4
Glucose ( $C_6H_{12}O_6$ )	-917.3
Methane ( $CH_4$ )	-50.8
Methanol ( $CH_3OH$ )	-175.4

## Sens des réactions

Pour leur grande majorité, les réactions biochimiques sont caractérisées par des énergies libres standard de réaction comprises entre +40 et -40 kJ . mol<sup>-1</sup>



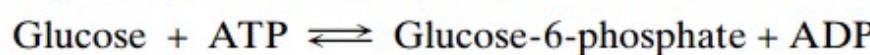
$$\Delta_rG' = -RT \log K'_{eq} + RT \log Q'$$

1. Réaction irréversible
2. Réaction réversible gouvernée par les concentrations des réactants
3. Réaction réversible spontanément
4. Réaction dépendante d'une autre réaction exergonique

## 1. Réaction irréversible

- **Réaction 1**

Phosphorylation du glucose, réaction catalysée par une hexokinase :



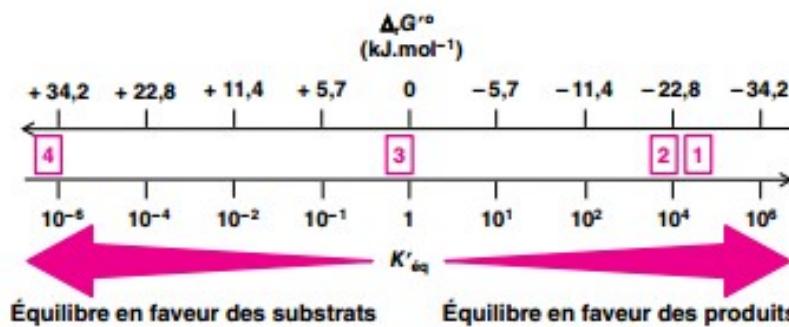
$$\Delta_r G'^o = -24,41 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$K'_{\text{éq}} = 1,91 \cdot 10^4$$

**Dans la cellule le rapport ATP/ADP est compris entre 100 et 300**

$$Q' = \frac{[\text{G6P}][\text{ADP}]}{[\text{Glucose}][\text{ATP}]} = \frac{(1,2 \cdot 10^{-4})(9,1 \cdot 10^{-5})}{(8,1 \cdot 10^{-4})(2,3 \cdot 10^{-2})} = 5,86 \cdot 10^{-4}$$

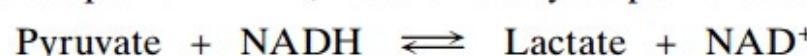
$$\Delta_r G' = -24,41 \cdot 10^3 + RT \log (5,86 \cdot 10^{-4}) = -42,84 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$



## 2. Réaction réversible gouvernée par les concentrations des réactants

- **Réaction 2**

Réduction du pyruvate par le NADH, réaction catalysée par la lactate déshydrogénase.



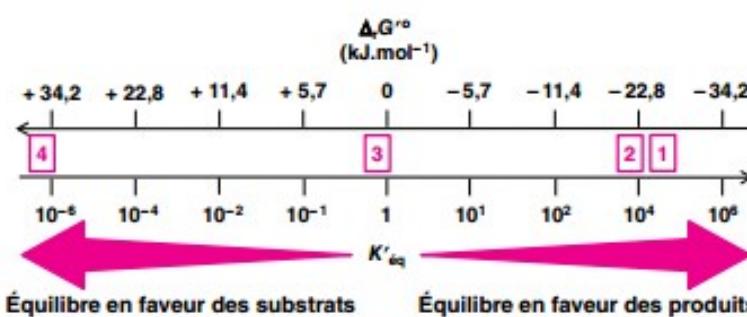
$$\Delta_r G'^o = -23,30 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$K'_{\text{éq}} = 1,22 \cdot 10^4$$

$$Q' = \frac{[\text{Lactate}][\text{NAD}^+]}{[\text{Pyruvate}][\text{NADH}]} = \frac{(1,4 \cdot 10^{-3})(1,1 \cdot 10^{-4})}{(6 \cdot 10^{-5})(3,1 \cdot 10^{-7})} = 8,27 \cdot 10^3$$

$$\Delta_r G' = -23,30 \cdot 10^3 + RT \log (8,27 \cdot 10^3) = -0,96 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

**Dans la cellule le rapport NAD+/NADH, est de 100**



### 3. Réaction réversible spontanément

- **Réaction 3**

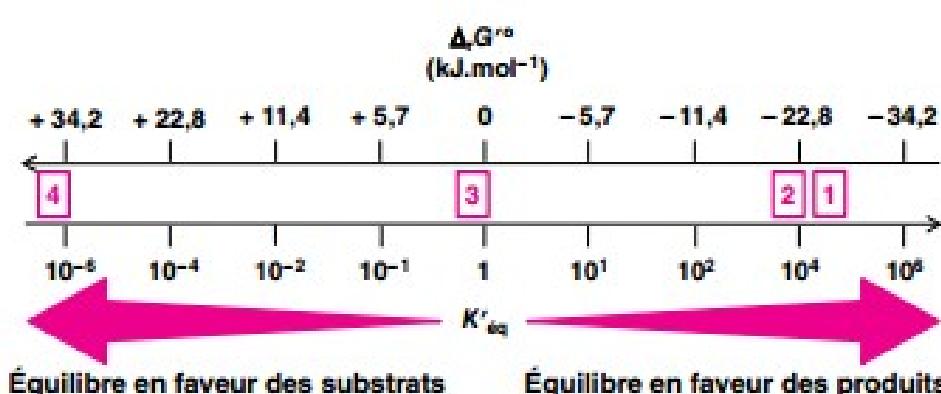
Transfert de groupement aminé entre le glutamate et l'oxaloacétate, catalysé par la glutamate oxaloacétate transaminase (GOT) :



$$\Delta_r G'^o = +1,47 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$K'_{\text{éq}} = 0,55$$

$$\Delta_r G' = -RT \log K'_{\text{éq}} + RT \log Q'$$



### Réaction dépendante d'une autre réaction exergonique

- **Réaction 4**

Formation de l'ATP :

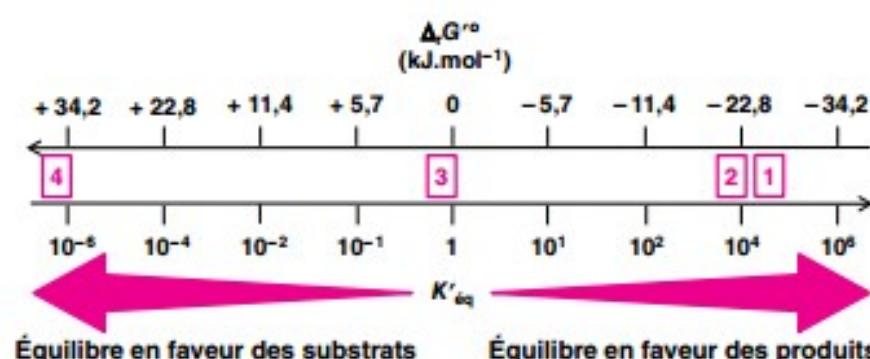


$$\Delta_r G'^o = + 36,03 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$K'_{\text{éq}} = 4,8 \cdot 10^{-7}$$

**Dans la cellule le rapport ATP/ADP est compris entre 100 et 300**

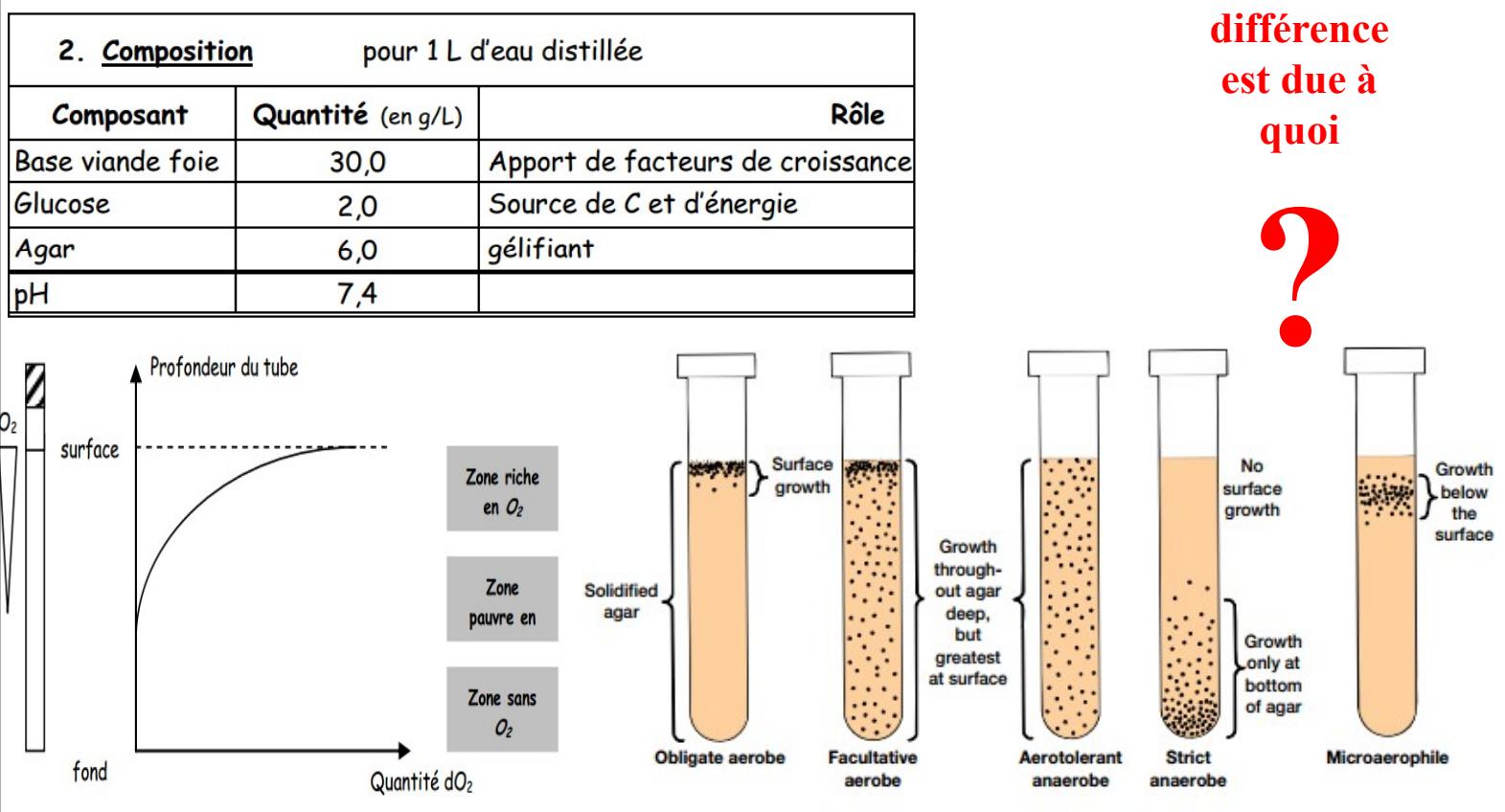
$$\Delta_r G' = -RT \log K'_{\text{éq}} + RT \log Q'$$



## Accepteur final des électrons et type respiratoires

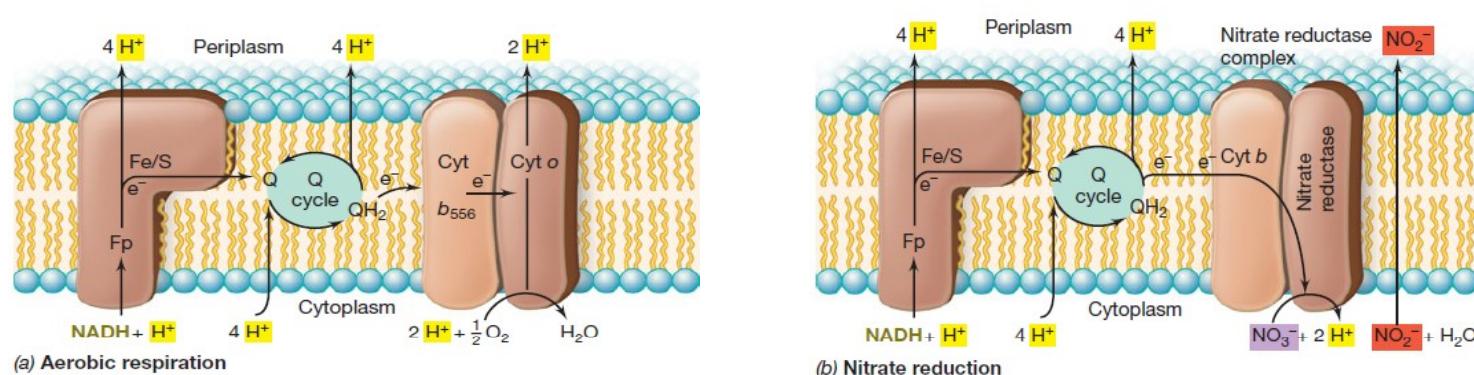
Après ensemencement par pique centrale et culture sur le milieu viande foie le type respiratoire (comportement vis-à-vis du dioxygène) d'un microorganismes peut être déterminé et ce Selon la présence ou l'absence d'une chaîne de transport des électrons et le type de l'accepteur final des électrons et des protons.

Cette  
différence  
est due à  
quoi

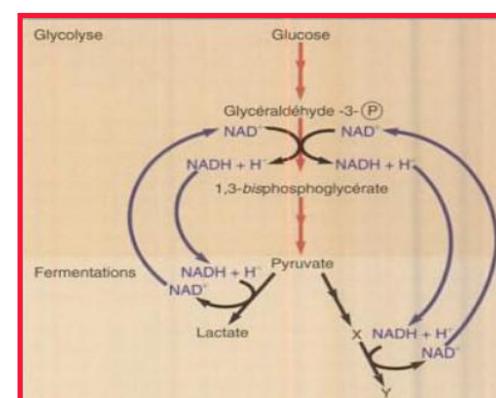
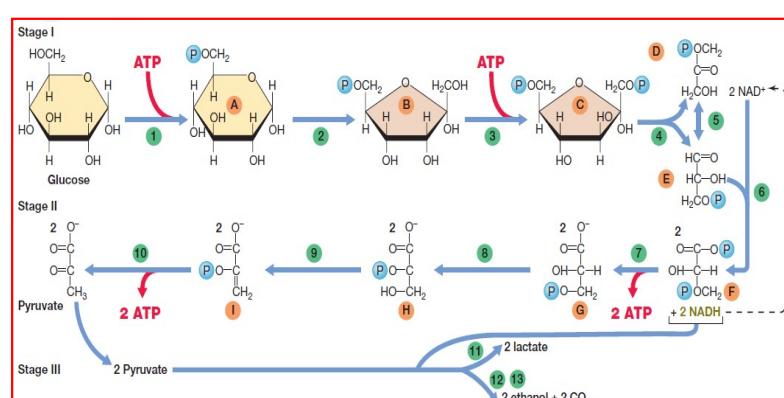


## Définitions

**La respiration**, ou métabolisme oxydatif, est un processus d'oxydation dans lequel l'accepteur final des électrons est une molécule minérale (O<sub>2</sub>, nitrate ...) ou un composé organique (fumarate...) exogènes.

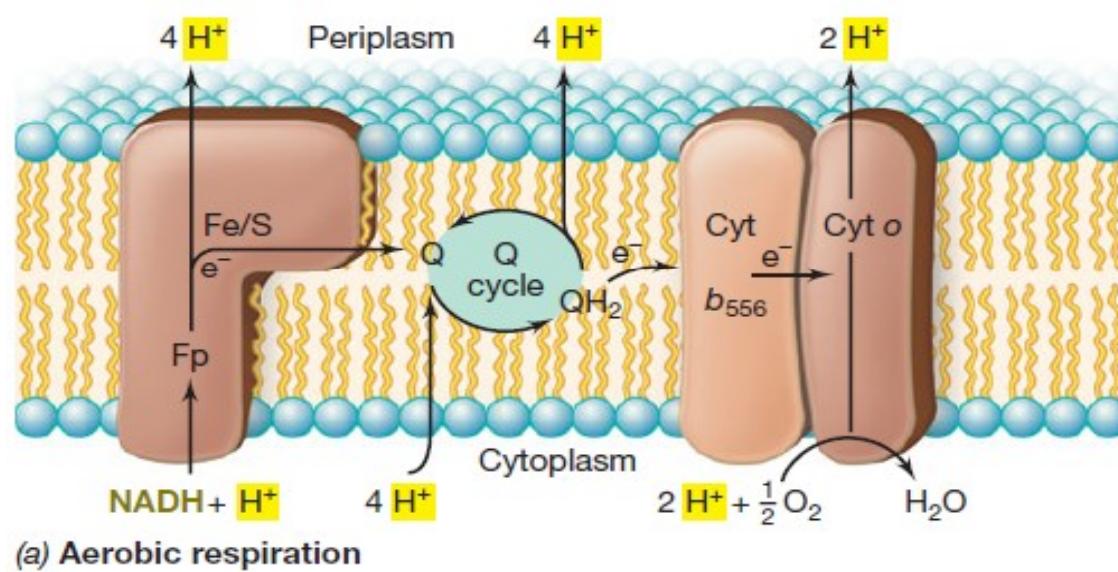


**La fermentation**, ou métabolisme fermentaire, est un processus d'oxydation dans lequel l'accepteur final est un composé organique, généralement endogène

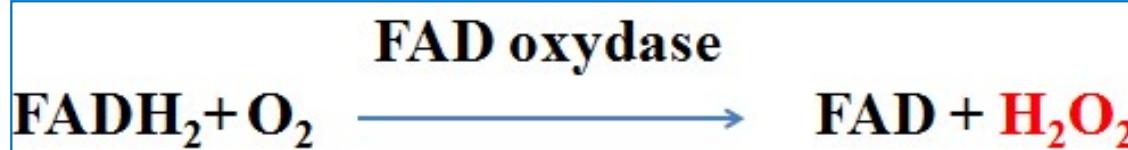


## Il existe deux types de respiration:

**Respiration aérobie:** Correspond à un transport électronique et protonique avec *l'oxygène moléculaire comme accepteur final*



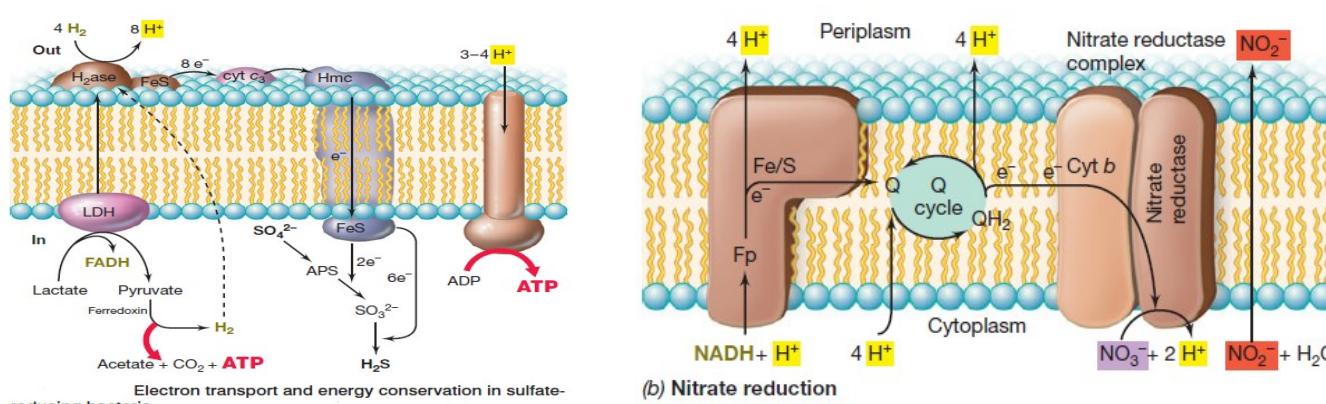
(a) Aerobic respiration



## La respiration anaérobie

Correspond à un transport membranaire des électrons et de protons jusqu'à un *accepteur final d'électrons autre que le O<sub>2</sub>* (minérale: nitrate, respiration nitrate; organique: fumarate, respiration fumarate)

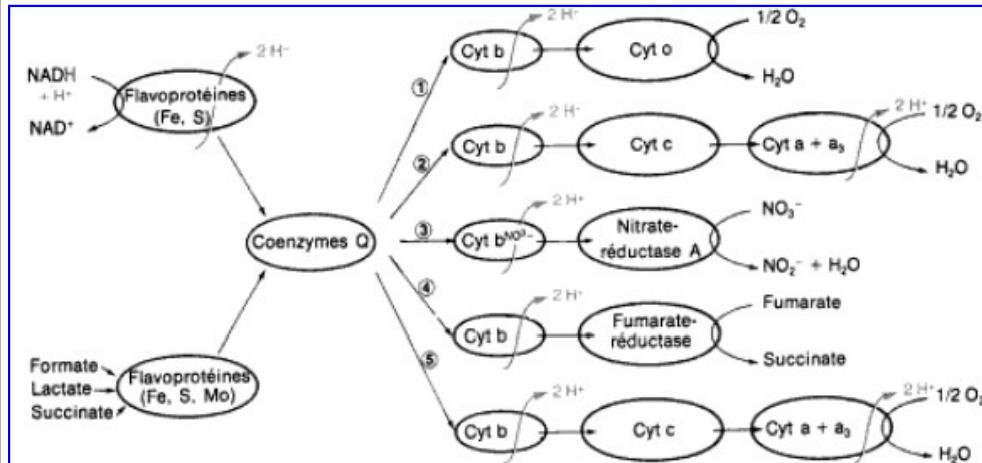
Accepteur d'électrons	Produit final réduit	Nom du processus	Exemples de microorganismes
O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Respiration aérobie	<i>Escherichia coli</i> , <i>Streptomyces</i>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>3</sub> or N <sub>2</sub>	Respiration anaérobie (dénitritification)	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	S or H <sub>2</sub> S	Respiration anaérobie (réduction des sulfates)	<i>Desulfovibrio</i>
fumarate	Succinate	Respiration anaérobie utilisant un accepteur d'e <sup>-</sup> organique	<i>Escherichia coli</i>
CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Méthanogenèse	<i>Methanococcus</i>



## Exemple de respiration aérobie et anaérobie

Les chaînes respiratoires se différencient par:

- La séquence et le nombre de cytochromes mis en jeu



NB

*En présence d' O<sub>2</sub> , la respiration aérobie est favorisé et lorsque le O<sub>2</sub> est épuisé dans l'environnement les accepteurs alternatifs sont réduits*

Respiration aérobie chez

- E.coli*
- Paracoccus denitrificans*
- Respiration aérobie chez de mitochondrie

Respiration anaérobie chez

- E. coli* (respiration Nitrate)
- E.coli* (respiration fumarate)

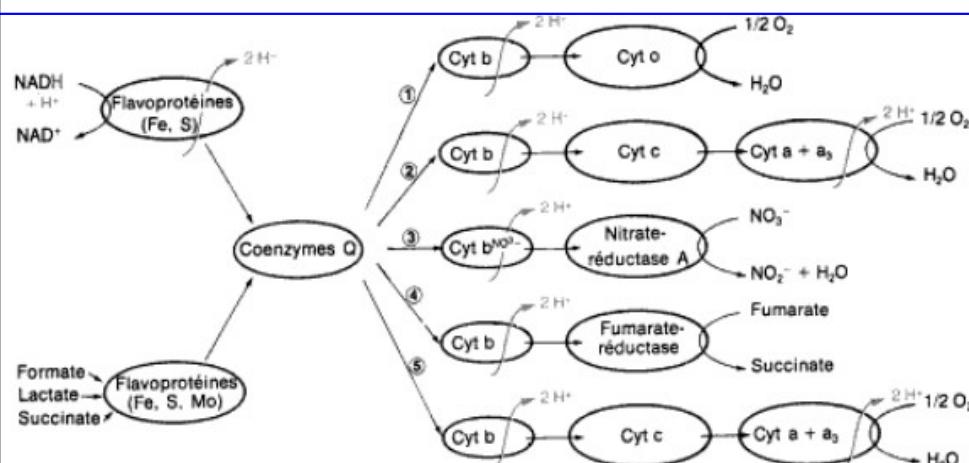
- Le nombre de sites où les paires de protons sont transférés:

- Les chaînes primitives n'ont généralement qu'un site
- Les chaînes respiratoires des bactéries ont 2 sites
- Les chaînes respiratoires des mitochondries ont 3 sites

- La nature des cytochromes terminale qui transfert les électrons à l'oxygène et la présence ou non des cytochromes Cyt a/a<sub>3</sub> et Cyt c

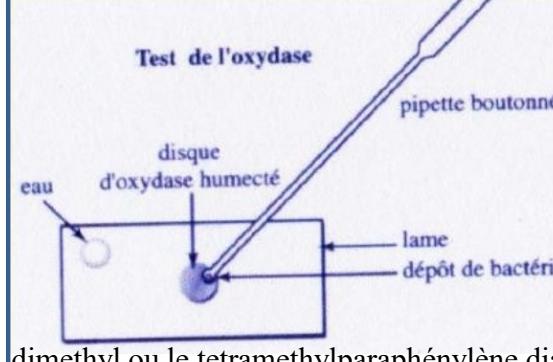
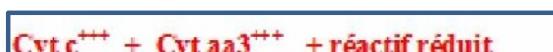
**Donc pour la même quantité de substrat le rendement énergétique peut varier d'un facteur de 3.**

## Le test de l'oxydase et de la réductase



La formation de H<sub>2</sub>O peut se faire sans intervention de la cytochrome oxydase ou être totalement cytochrome-indépendante et se fait au niveau du coenzyme Q.

Un test est couramment utilisé pour démontrer la présence ou non de la cytochrome oxydase cyt a/a<sub>3</sub> et cytochrome c ; c'est le **test de l'oxydase**



### Nitrate Reduction

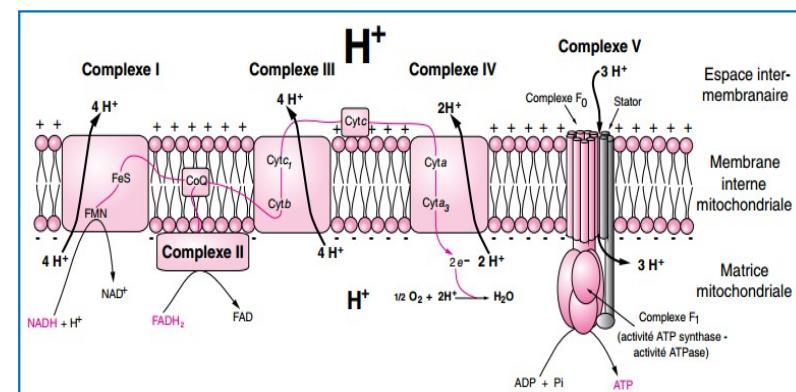
Many facultative bacteria are able to use the oxygen in nitrate as a hydrogen acceptor in anaerobic respiration, thus converting nitrate to nitrite. This enzymatic reaction is controlled by an inducible enzyme called nitratase.



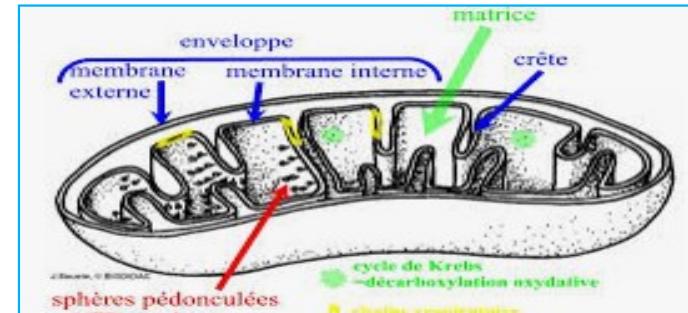
Figure 48.7 Nitrate Reduction Test Tube on left is positive (*E. coli*); tube on right is negative.

Il existe deux voies de respiration aérobie:

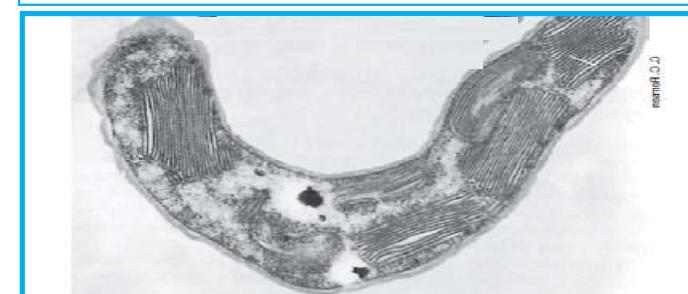
### 1. Voie des cytochromes indirecte



Chez les organismes eucaryotes elle se trouve dans la membrane interne des mitochondrie

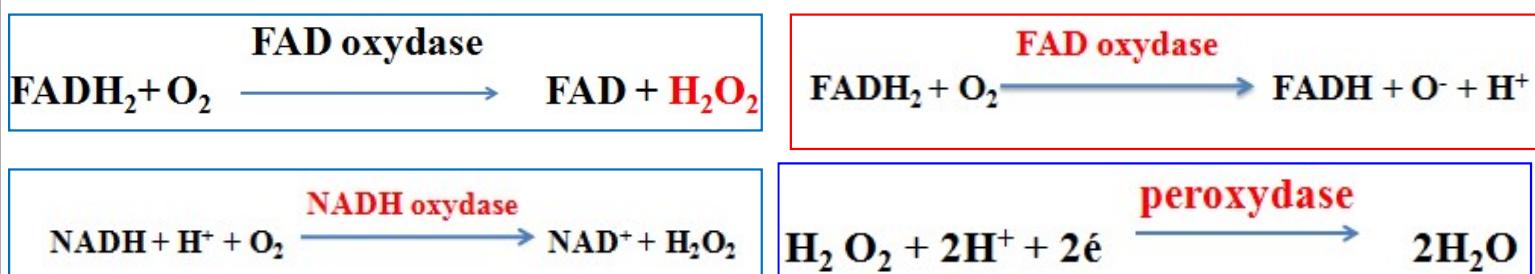


Chez les procaryotes elle se trouve dans des invagination de la membrane cytoplasmique

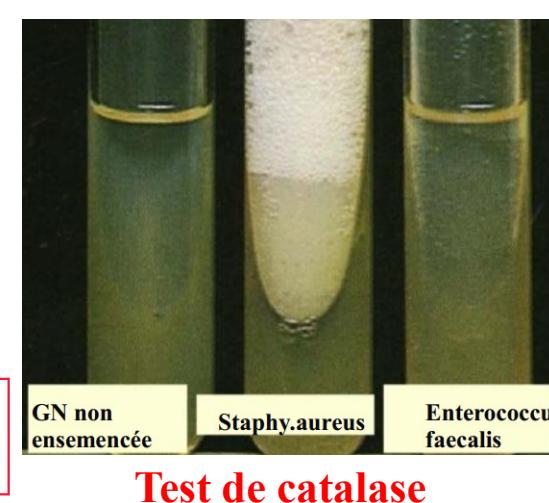
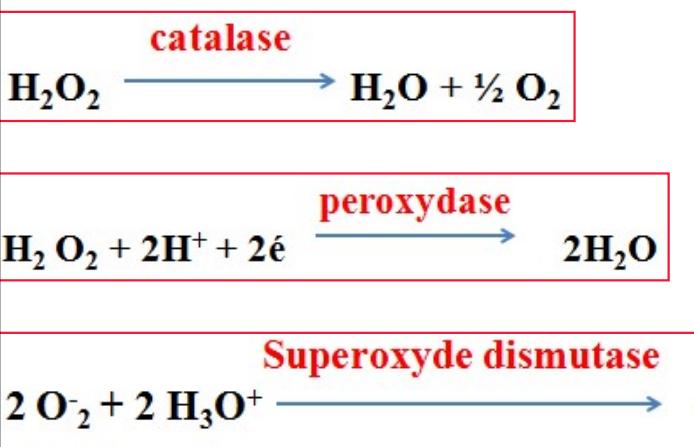


### 2. Voie oxydative directe:

Elle se fait dans le cytosol par des enzymes auto-oxydables qui transfèrent les électrons du substrat à l'oxygène avec formation d'eau oxygénée ou d'ion superoxydes



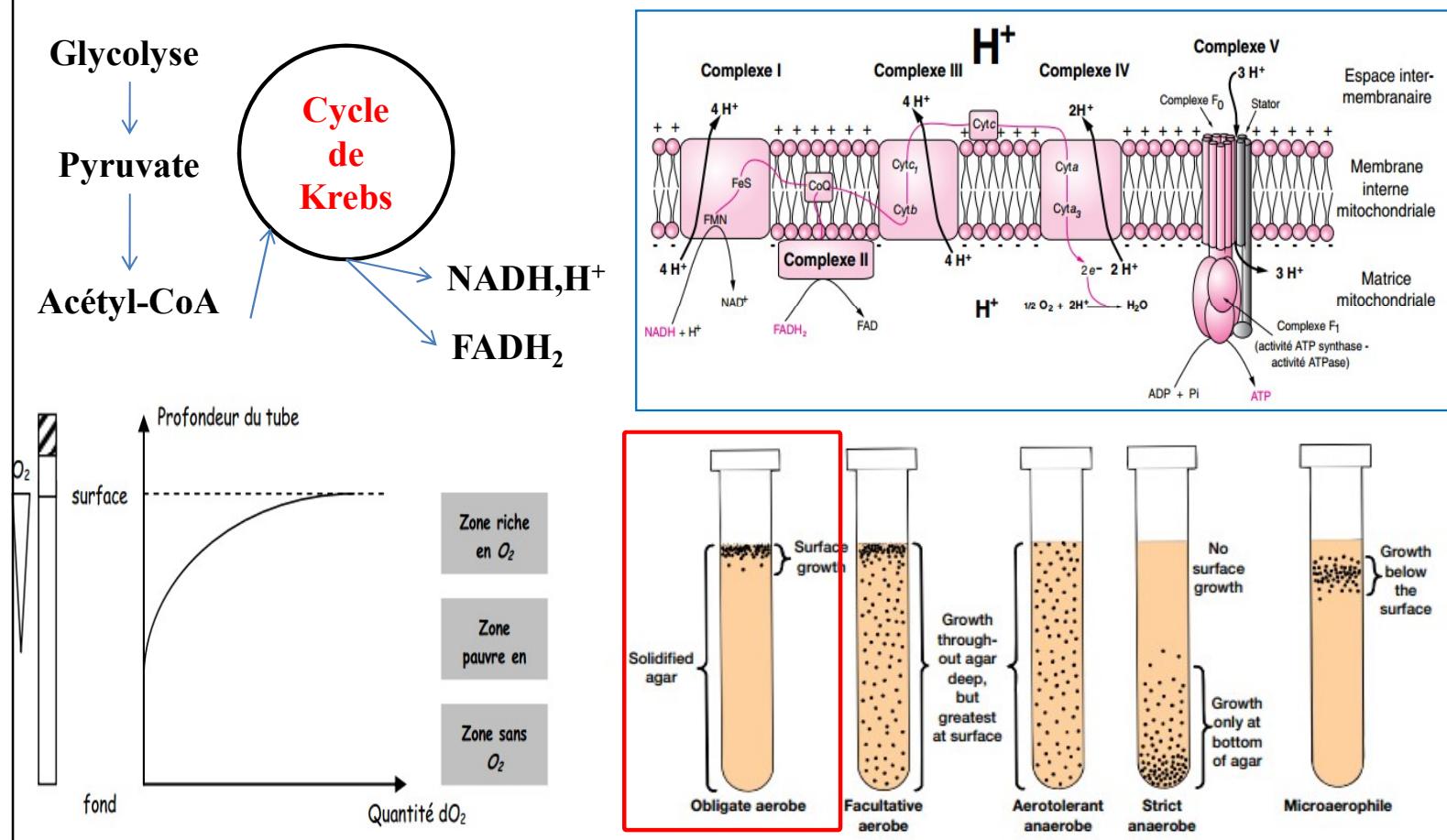
Ces produits sont toxiques et doivent être rapidement dégradés pour éviter la mort des bactéries soit par: la catalase, la peroxydase et la superoxyde dismutase



Test de catalase

## 1. Les microorganismes aérobies strictes

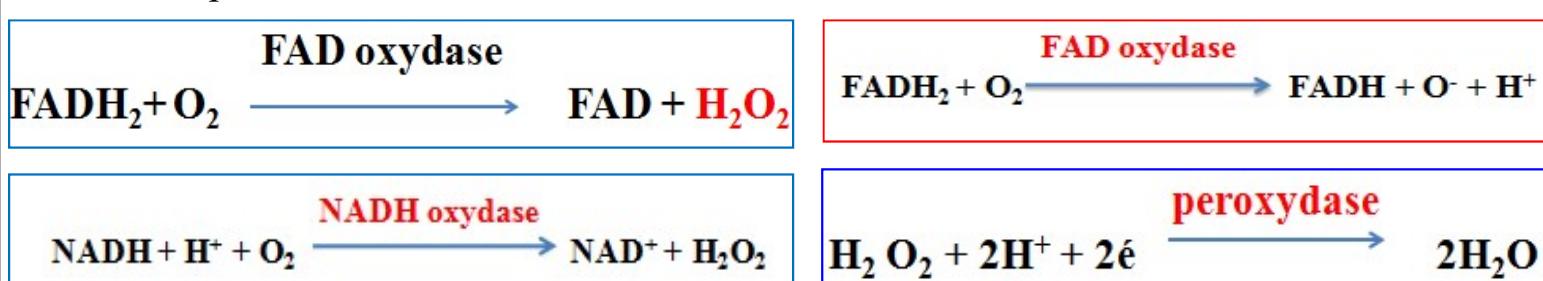
Il ne poussent qu'en présence de  $O_2$  et possédant uniquement la voie des cytochrome indirect pour générer l'énergie par respiration



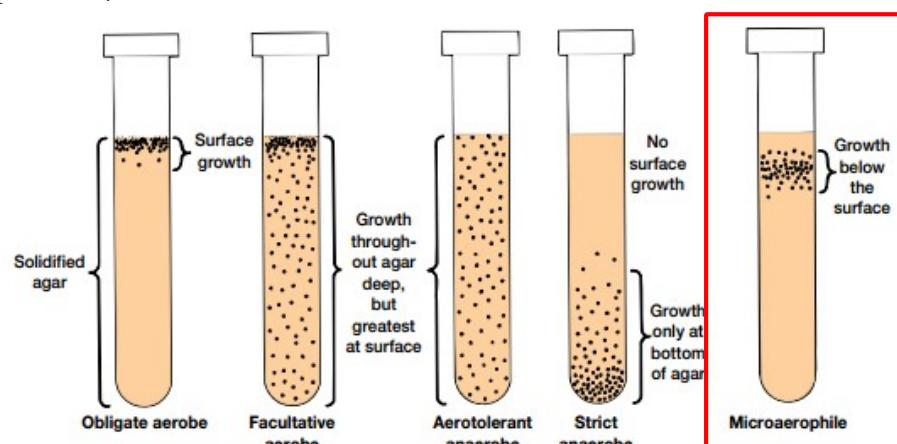
## 2. Microorganismes microaérophiles

Requièrent 10% de  $O_2$  pour un croissance normale mais une concentration d' $O_2$  à une tension atmosphérique normale est létale pour ces microorganismes.

Font une respiration aérobiose directe

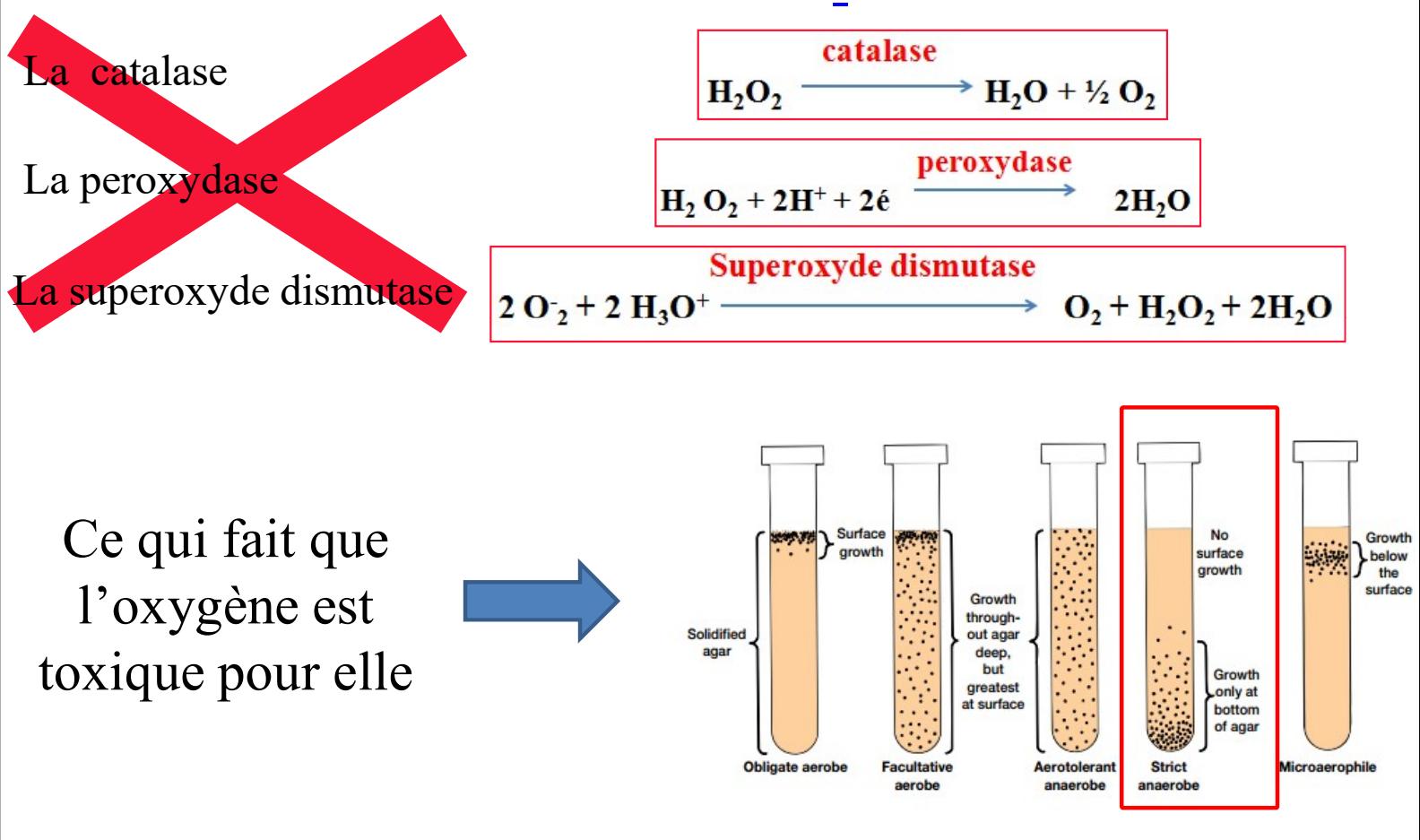


N'ont pas de catalase, mais possèdent des enzymes flaviniques (FAD ou NAD oxydase et FAD peroxydase) leur permettant de réaliser un équivalent de respiration cytoplasmique. Exemple *Streptococcus thermophilus*,



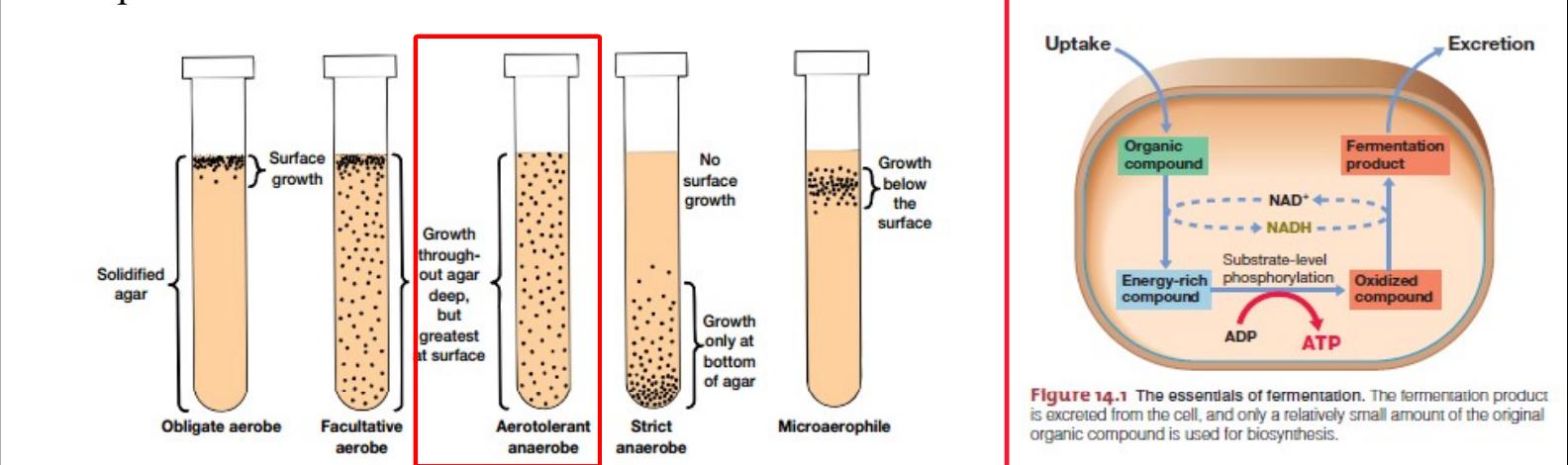
### 3. Microorganismes anaérobies strictes

C'est une bactérie qui possède la voie oxydative directe avec formation de  $\text{H}_2\text{O}_2$  ou d'ion superoxydes :  $\text{NADH} + \text{H}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{NAD}^+ + \text{H}_2\text{O}_2$  sans avoir

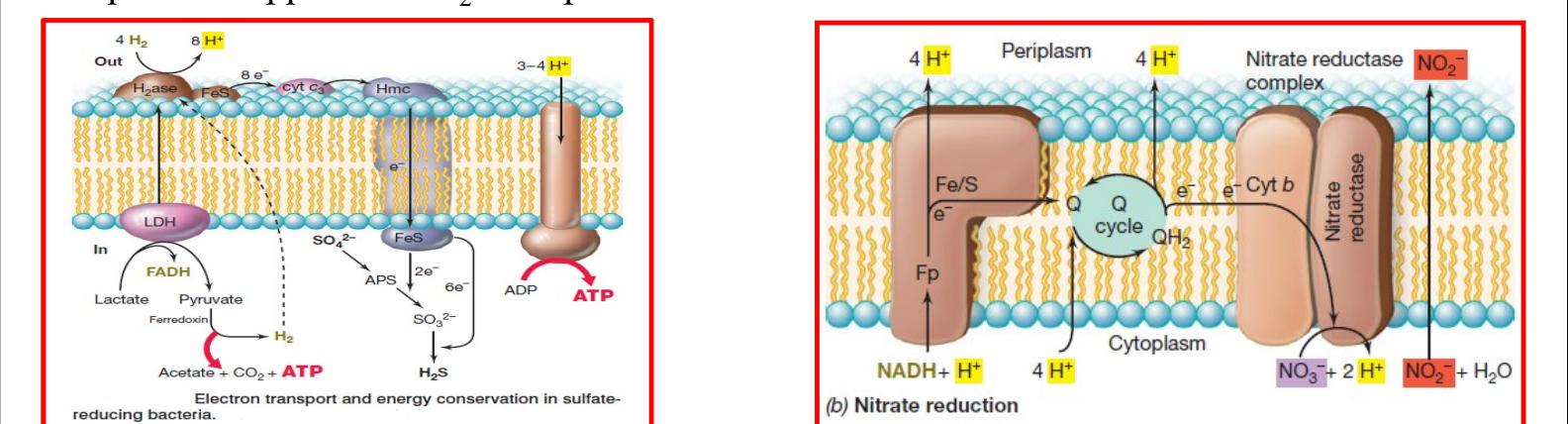


### Microorganismes anaérobies aérotolérants

Sont des microorganismes qui ne peuvent pas utiliser l' $\text{O}_2$  mais l' $\text{O}_2$  n'est pas aussi létale pour eux et poussent sur toute l'hauteur du tube

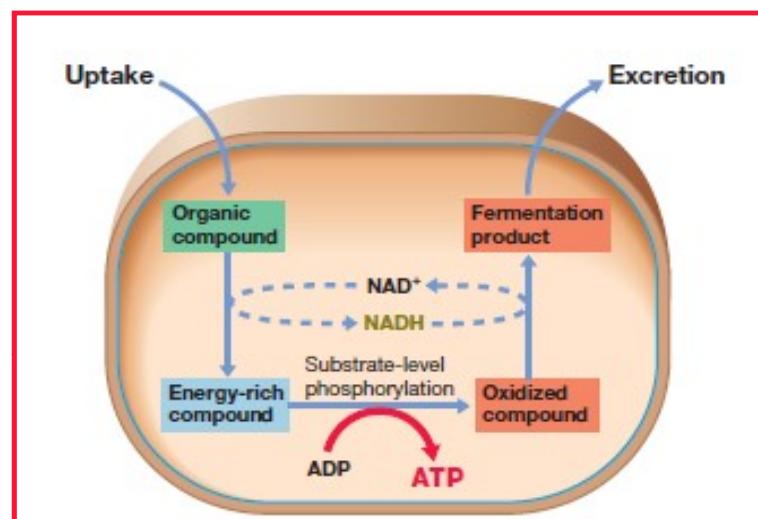


Bien qu'elles supportent l' $\text{O}_2$  elles préfèrent l'anaérobiose.



## Fermentation

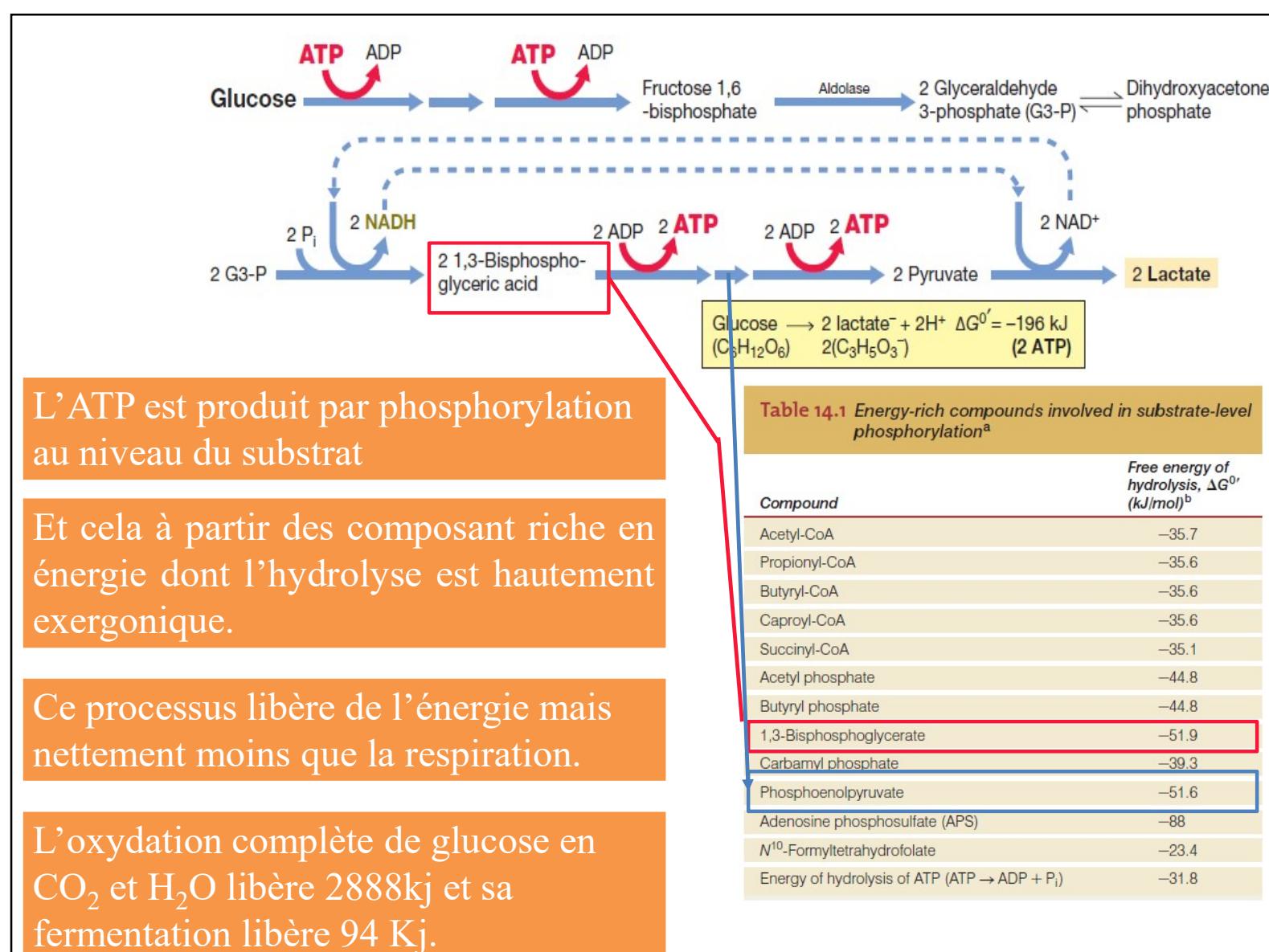
C'est un processus d'oxydoréduction où la matière organique joue le rôle du donneur et d'accepteur final d'électrons et non pas des molécules minérales



**Figure 14.1** The essentials of fermentation. The fermentation product is excreted from the cell, and only a relatively small amount of the original organic compound is used for biosynthesis.

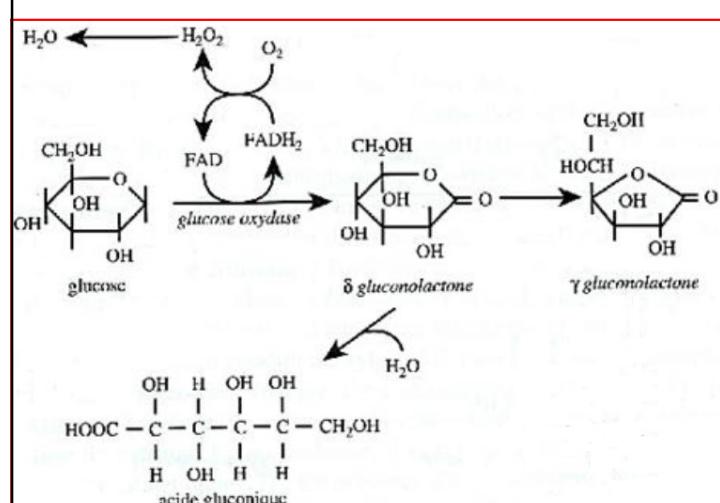
Les électrons libérés par le donneur d'électrons sont acceptés par le produit de fermentation qui est lui-même excréte dans le milieu extracellulaire.

Le NAD<sup>+</sup> et le NADP<sup>+</sup> sont pratiquement les seul transporteurs d'électron

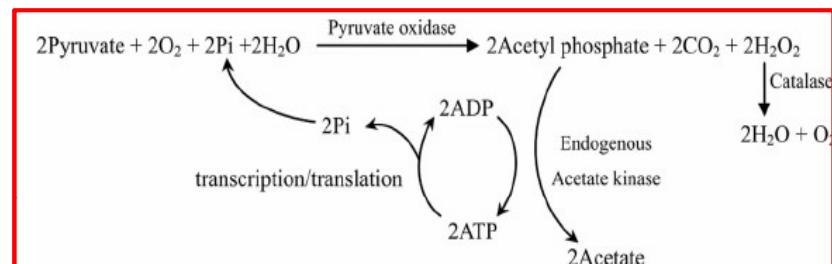


## Fermentation oxydative

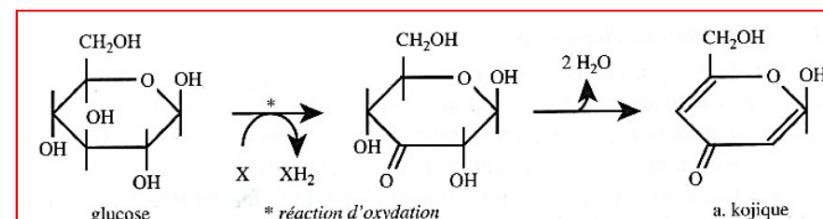
En microbiologie, toute dégradation incomplète du substrat, donnant des métabolites carbonés, est appelée fermentation, même s'il s'agit d'un métabolisme oxydatif (il est préférable dans ce cas de parler d'une fermentation oxydative).



**Fermentations gluconiques (*Aspergillus*, *Penicillium*), les *Pseudomonas* et les *Acetobacter*)**



**Fermentation du pyruvate (*Lactococcus lactis*)**



**Fermentation kojique (*Aspergillus flavus-oryzae*)**

## Sources d'énergie et types trophiques



Selon la nature de la source primaire d'énergie, deux types de microorganismes existent:

### Organismes phototrophes :

Tirent leur énergie de la lumière durant la photosynthèse, puis convertie en énergie chimique

### Organismes chimiotrophes:

L'énergie est récupérée lors de l'oxydation ou la dégradation des substances chimiques (composés organique et inorganique)

#### Chimiolithotrophes:

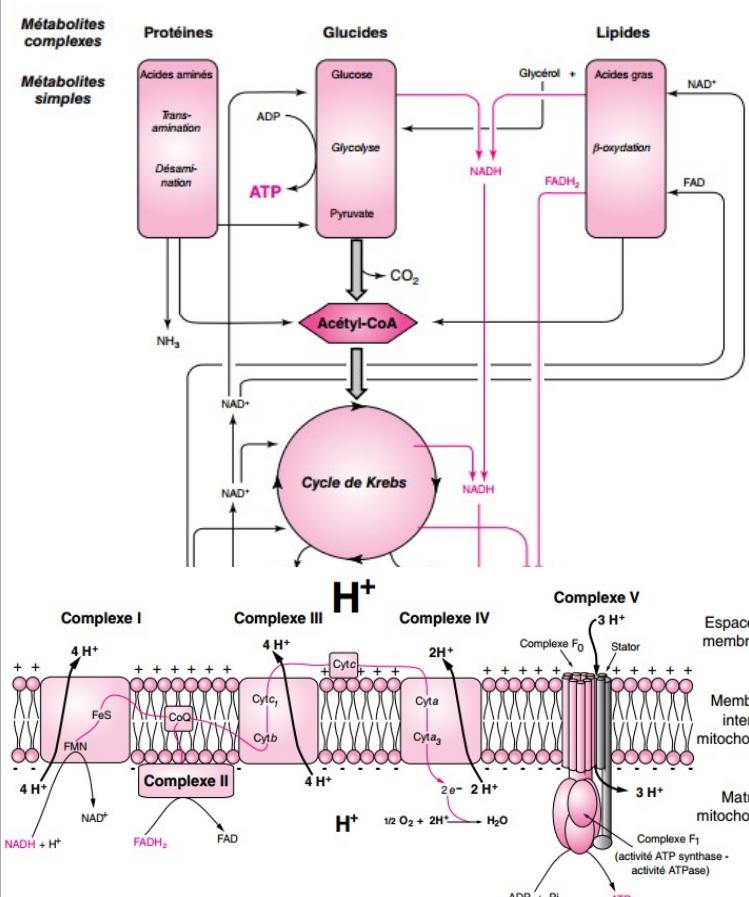
oxydation de composés inorganiques.

#### Chimioorganotrophes:

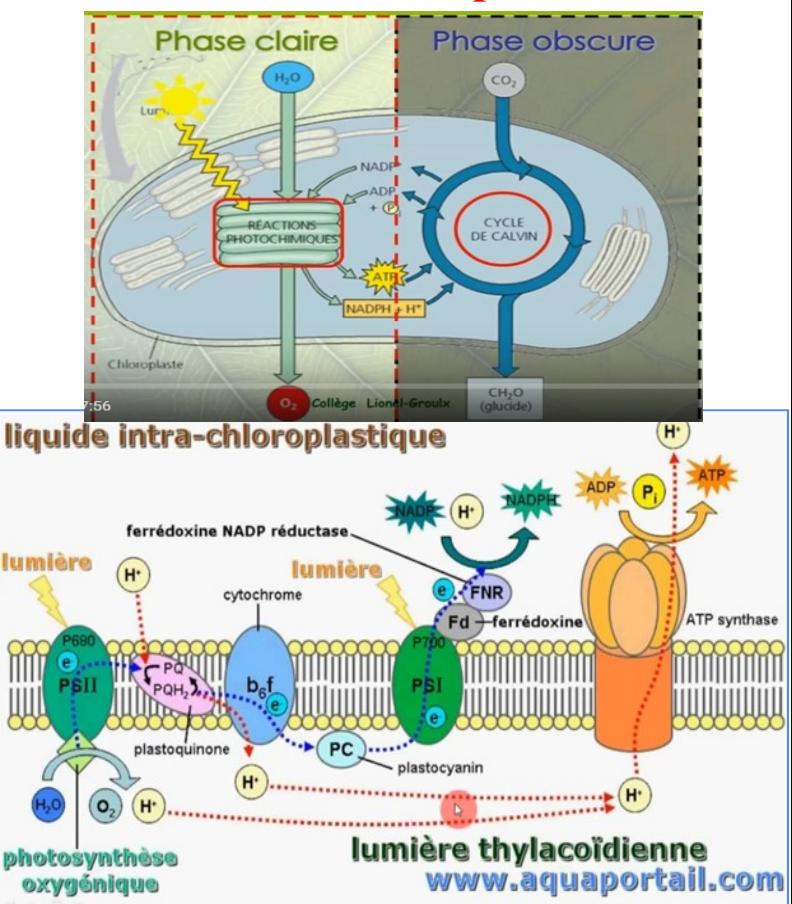
oxydation des molécules organiques

Dans les deux cas, phototrophie et chimiotrophie, la récupération de l'énergie est liée à un transfert d'électrons par des chaînes de transport électronique transmembranaire.

## 2. Chimiotrophie



## 1. Phototrophie



## Organismes chimiotrophes

Représentés par les levures, les moisissures et la plupart des bactéries.

Incapable d'effectuer la photosynthèse pour récupérer l'énergie, ils utilisent l'énergie libérée au cours des réactions d'oxydation des molécules organiques (**Chimioorganothrotrophes**) et inorganiques (**Chimiolithotrophes**)

## Chimiotrophes

Use CO<sub>2</sub>

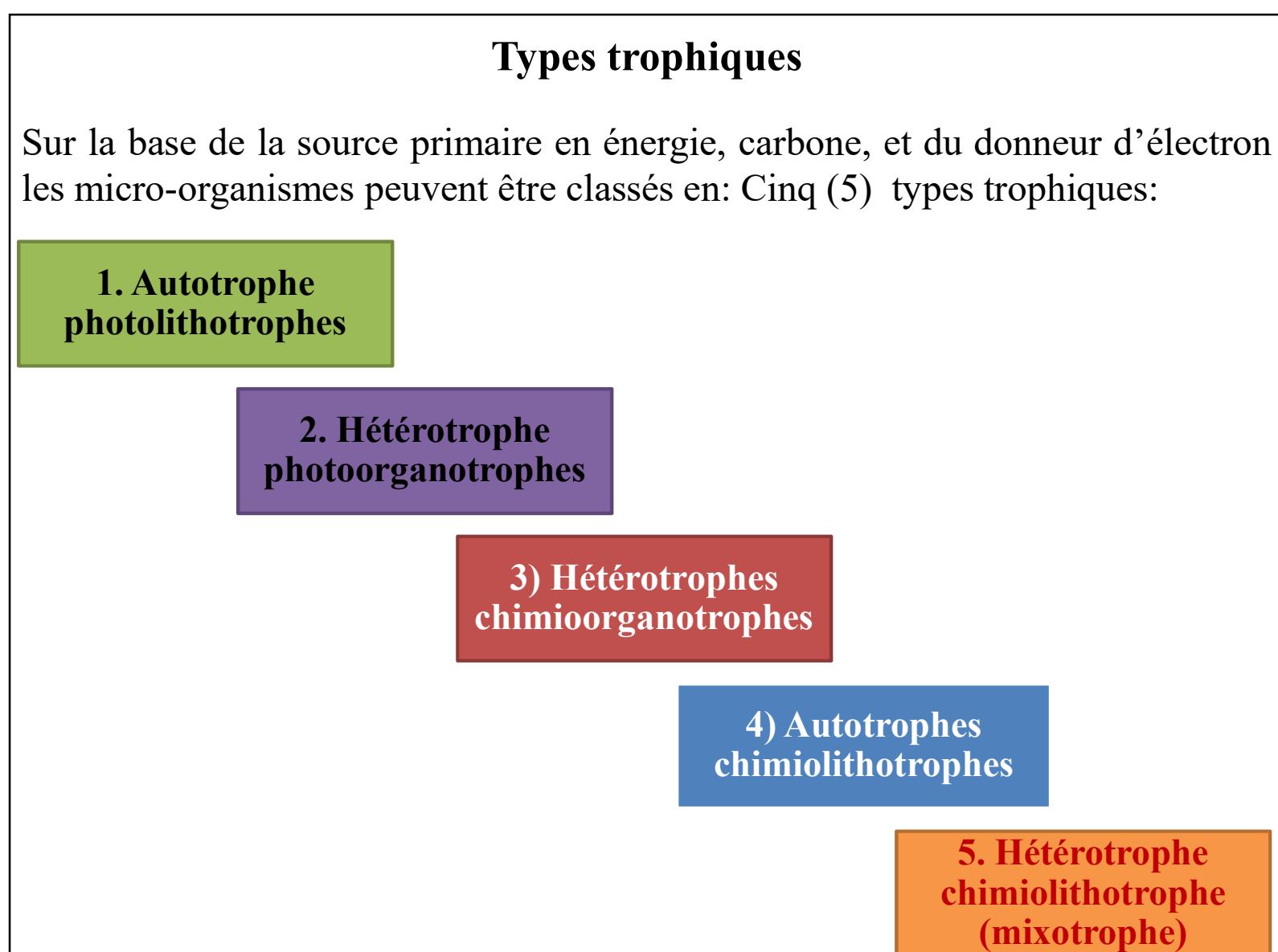
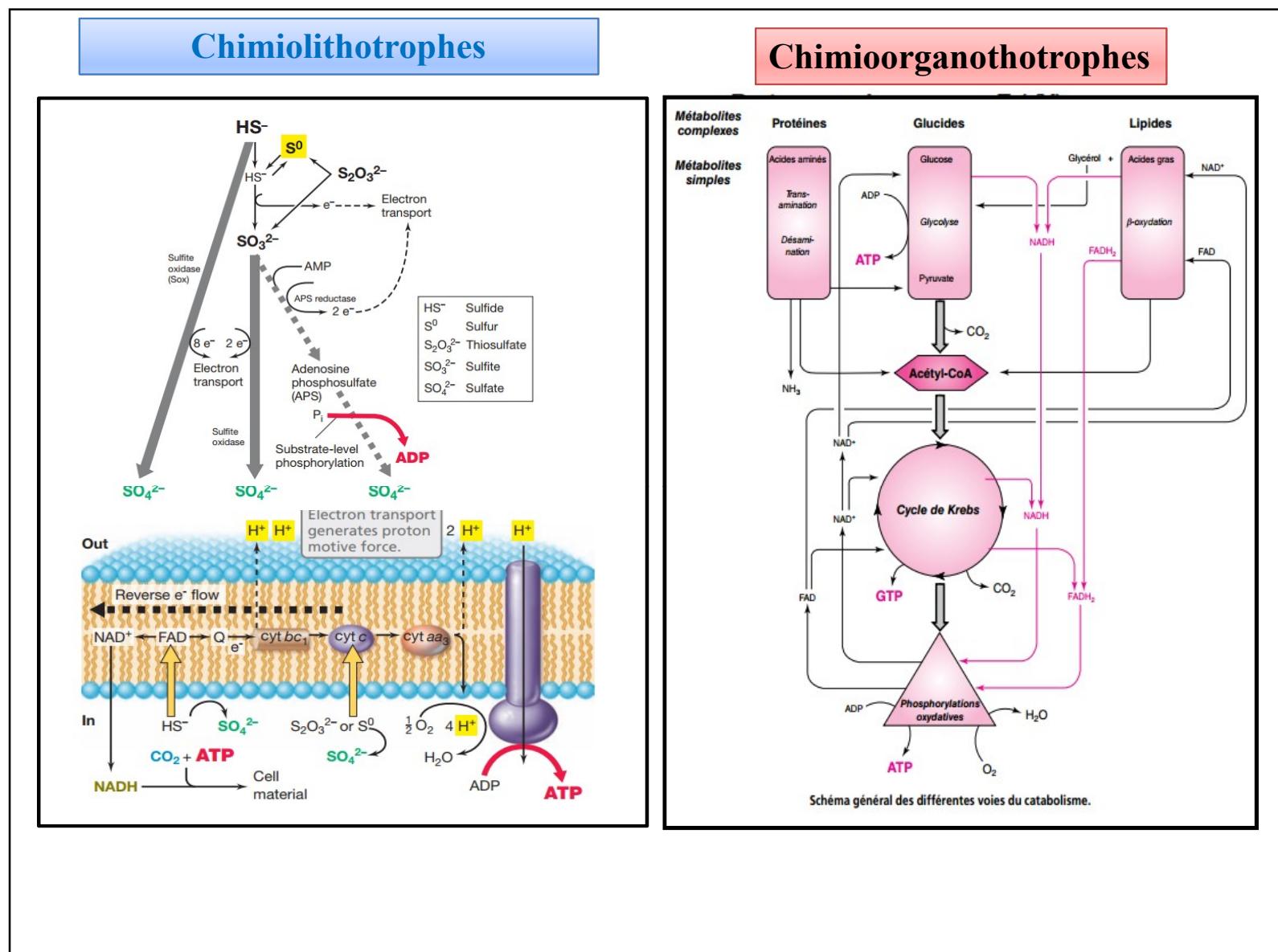
**Chimiolithotrophes**

Use organic carbon

**Chimioorganothrotrophes**

Tirent leur énergie de l'oxydation des substances minérales et synthétisent leurs matière organique via la fixation de CO<sub>2</sub> par le cycle de Calvin

Tirent leur énergie de l'oxydation des substances organiques.



# Phototrophes

Use  $\text{CO}_2$

Use organic carbon

## 1. Autotrophe photolithotrophes

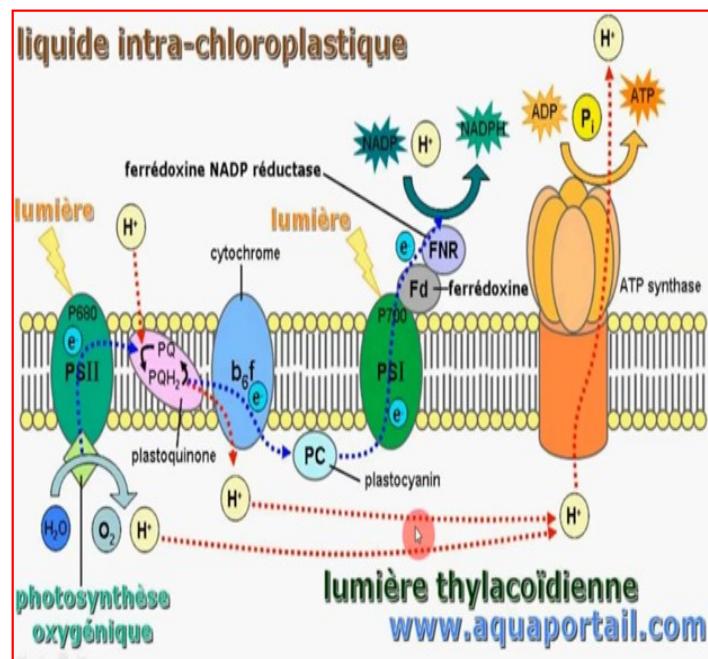
## 2. Hétérotrophe photoorganotrophes

## Organismes phototrophes

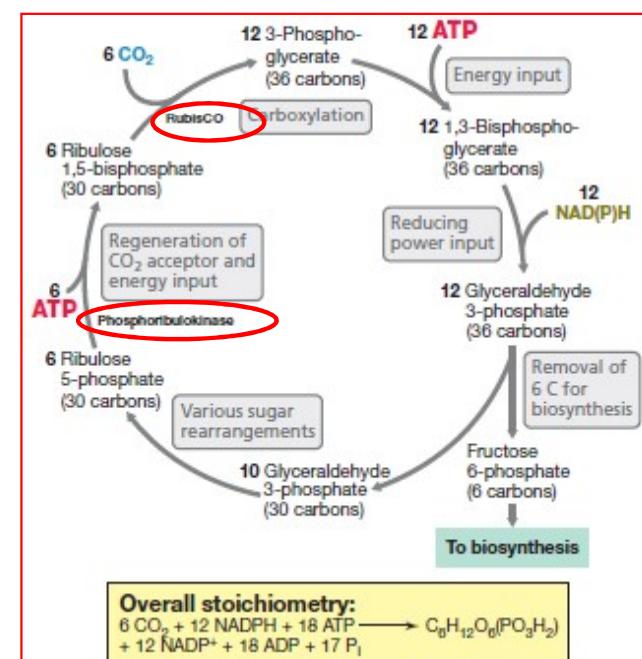
Comme les bactéries pourpres, la plupart des bactéries chimiolithotrophes, les cyanobactéries, les algues, les plantes et même certaines *Archaea*

Le processus de la photosynthèse comprend deux phases

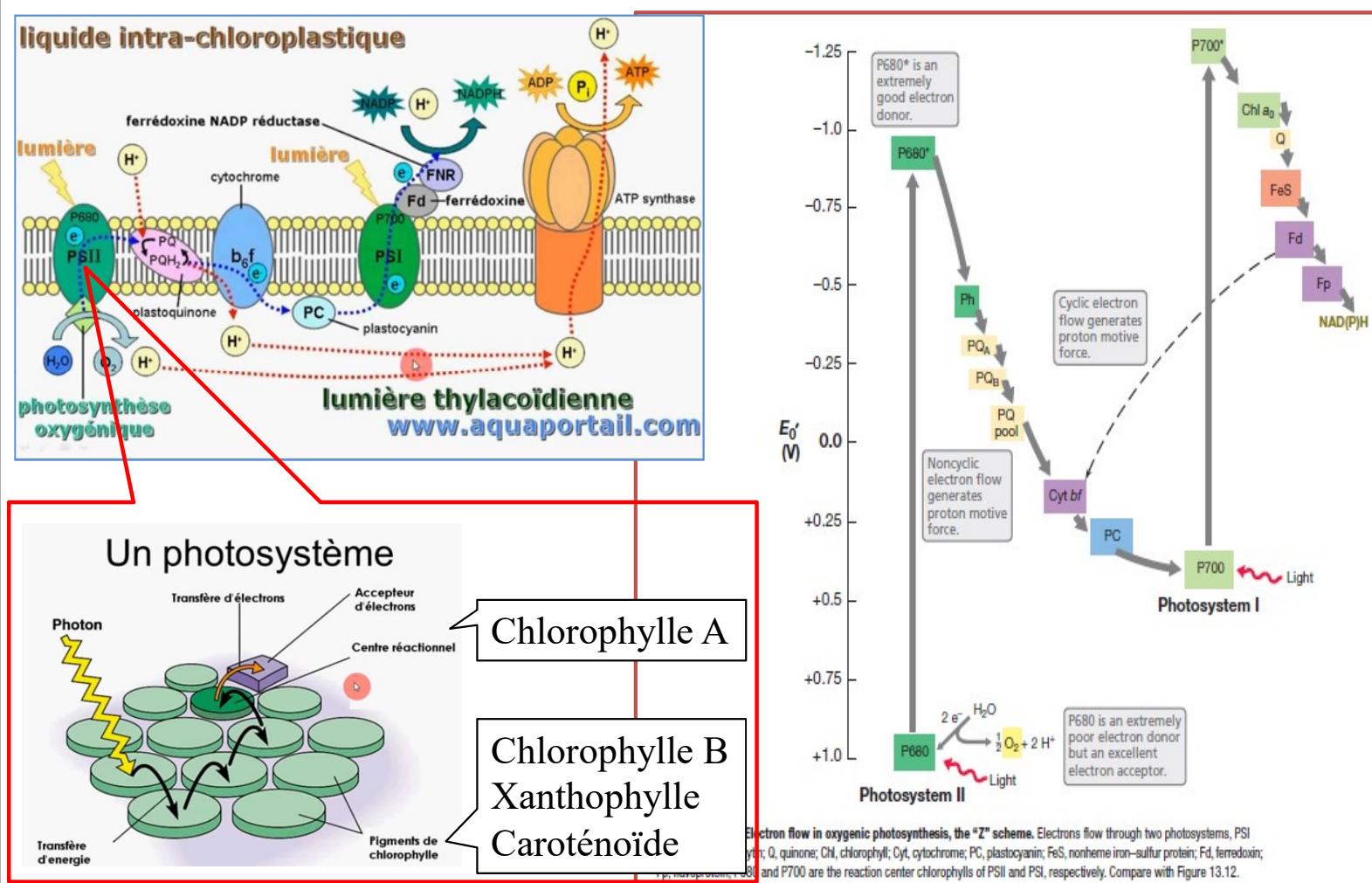
### 1. Phase lumineuse



### 2. Phase obscure



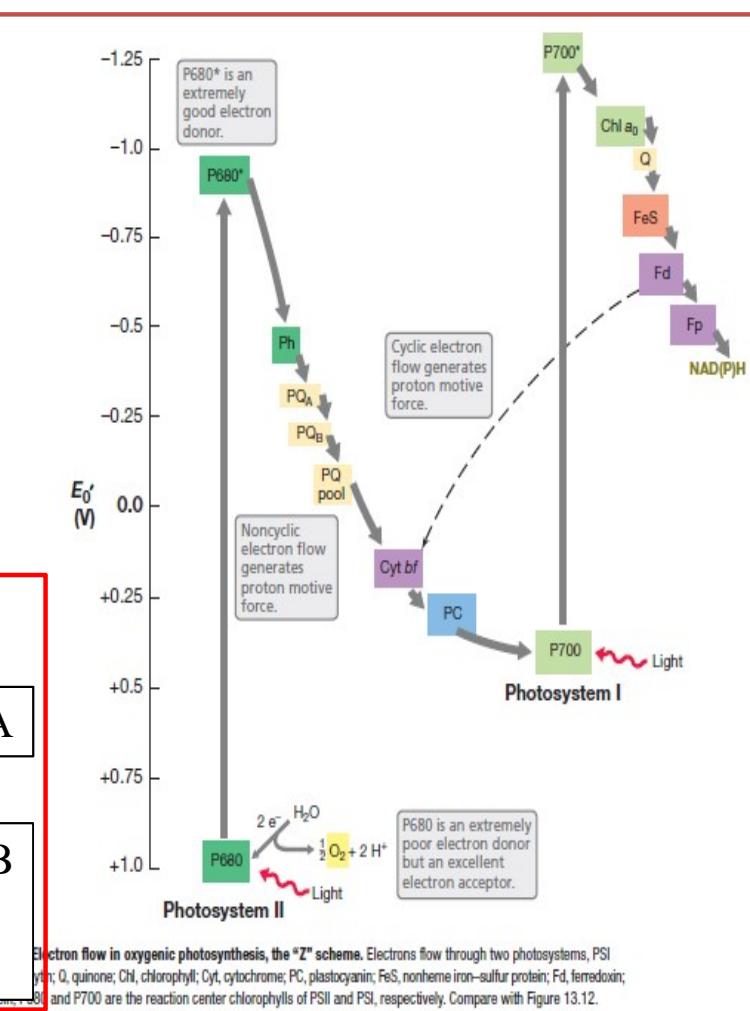
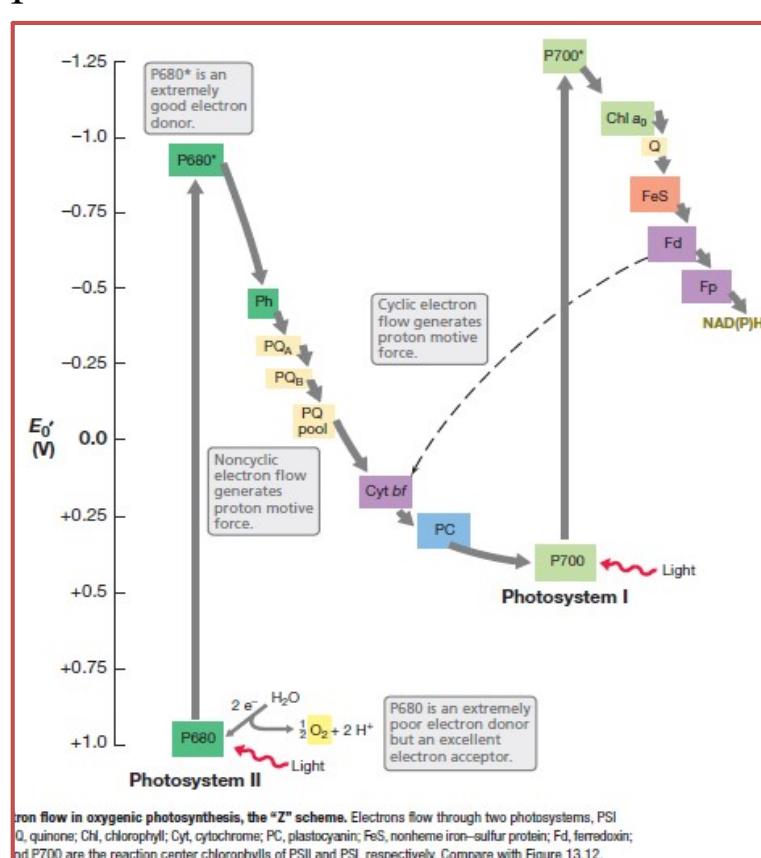
## Que se passe t-il dans la phases lumineuse ou de phosphorylation ?



## Il existe deux types de phosphorylation:

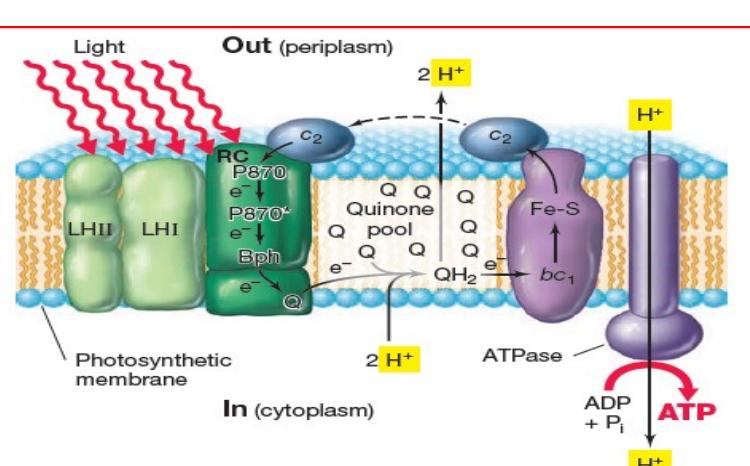
### Phosphorylation non cyclique:

produit à la fois de l'ATP et du « pouvoir réducteur » NADPH



### Photophosphorylation cyclique:

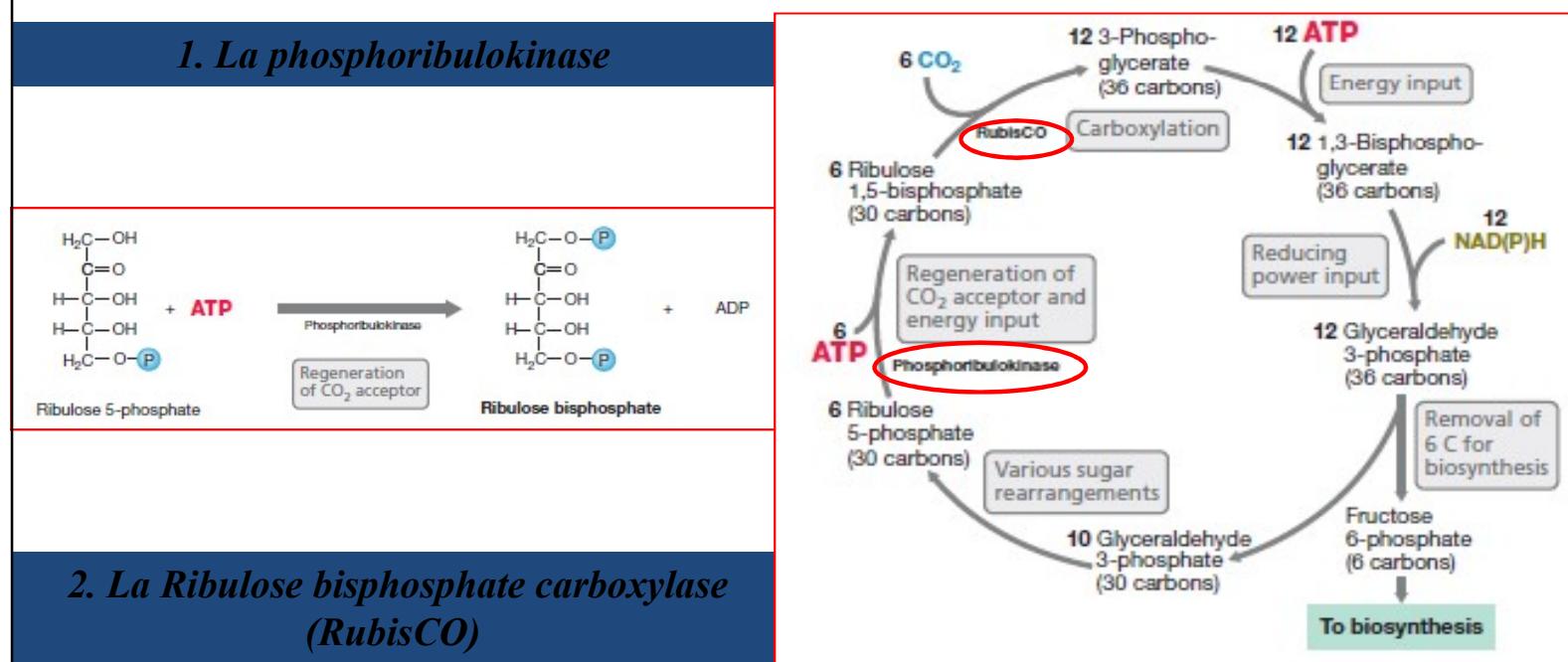
Produit uniquement de l'ATP



## La phase obscure

Correspond à une phase de synthèse de composés organiques de nature glucidique en fixant le  $\text{CO}_2$  atmosphérique et en utilisant l'ATP et le pouvoir réducteur produit lors de la phase lumineuse

Cette synthèse se fait dans **des cycles**: (Calvin et acide citrique inversé) ou **suite à des voies** (la voie de l'hydroxypropionate et la voie de l'acétyl-CoA)

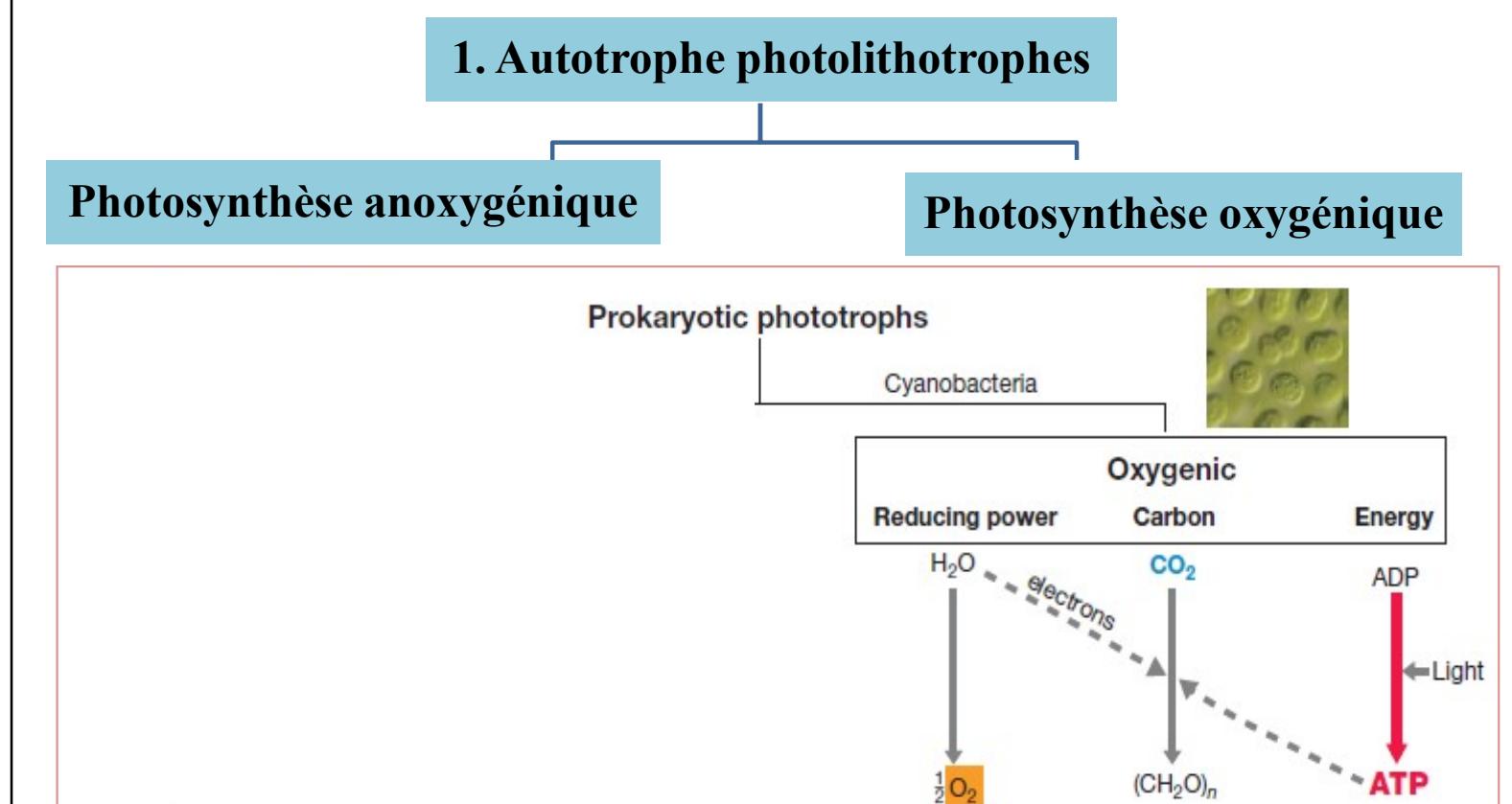


## 1) Autotrophe photolithotrophes

La source de carbone est le  $\text{CO}_2$

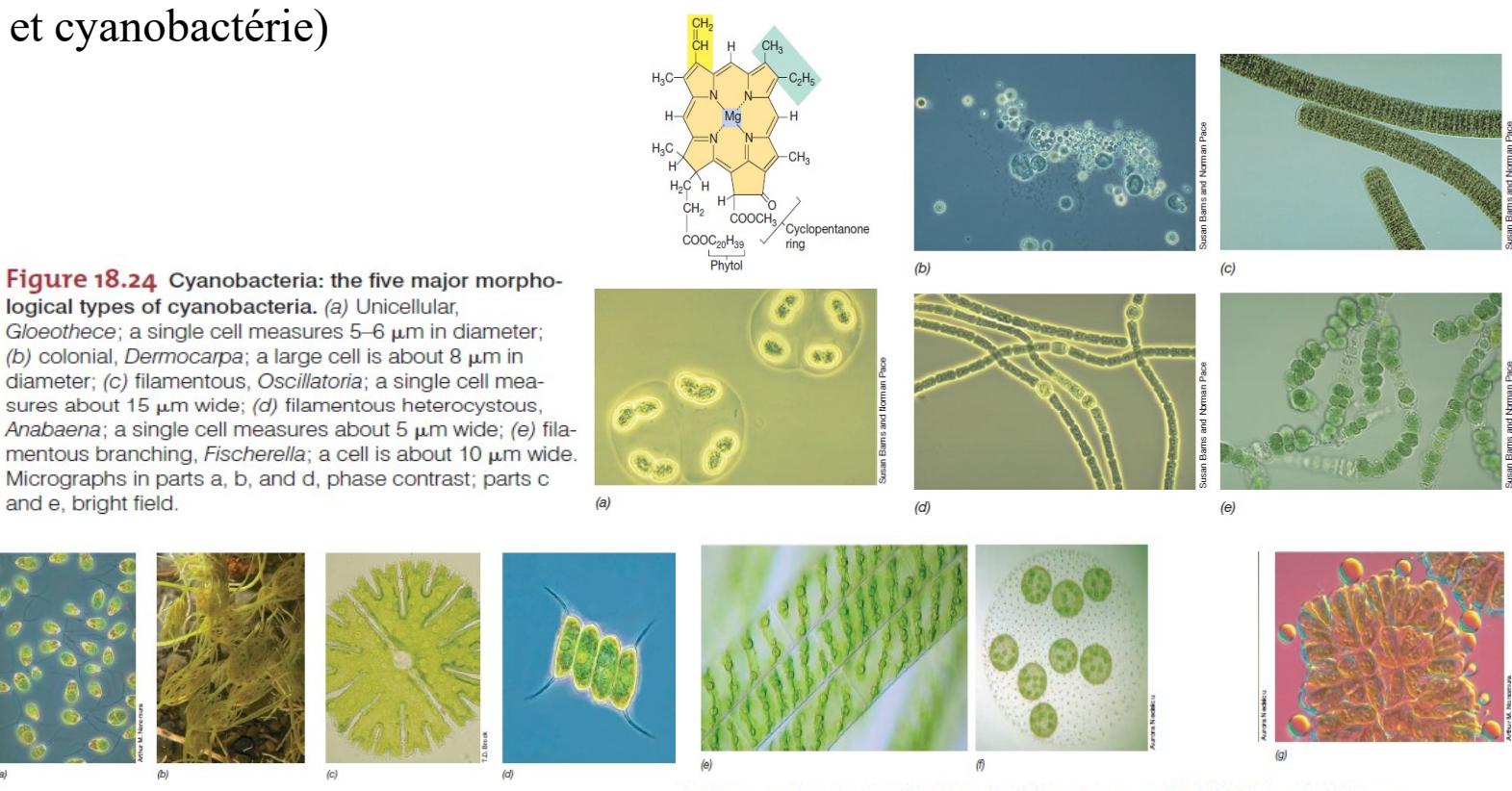
La source d'énergie est la *lumière*

La source d'électrons est une *matière inorganique* ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ...)



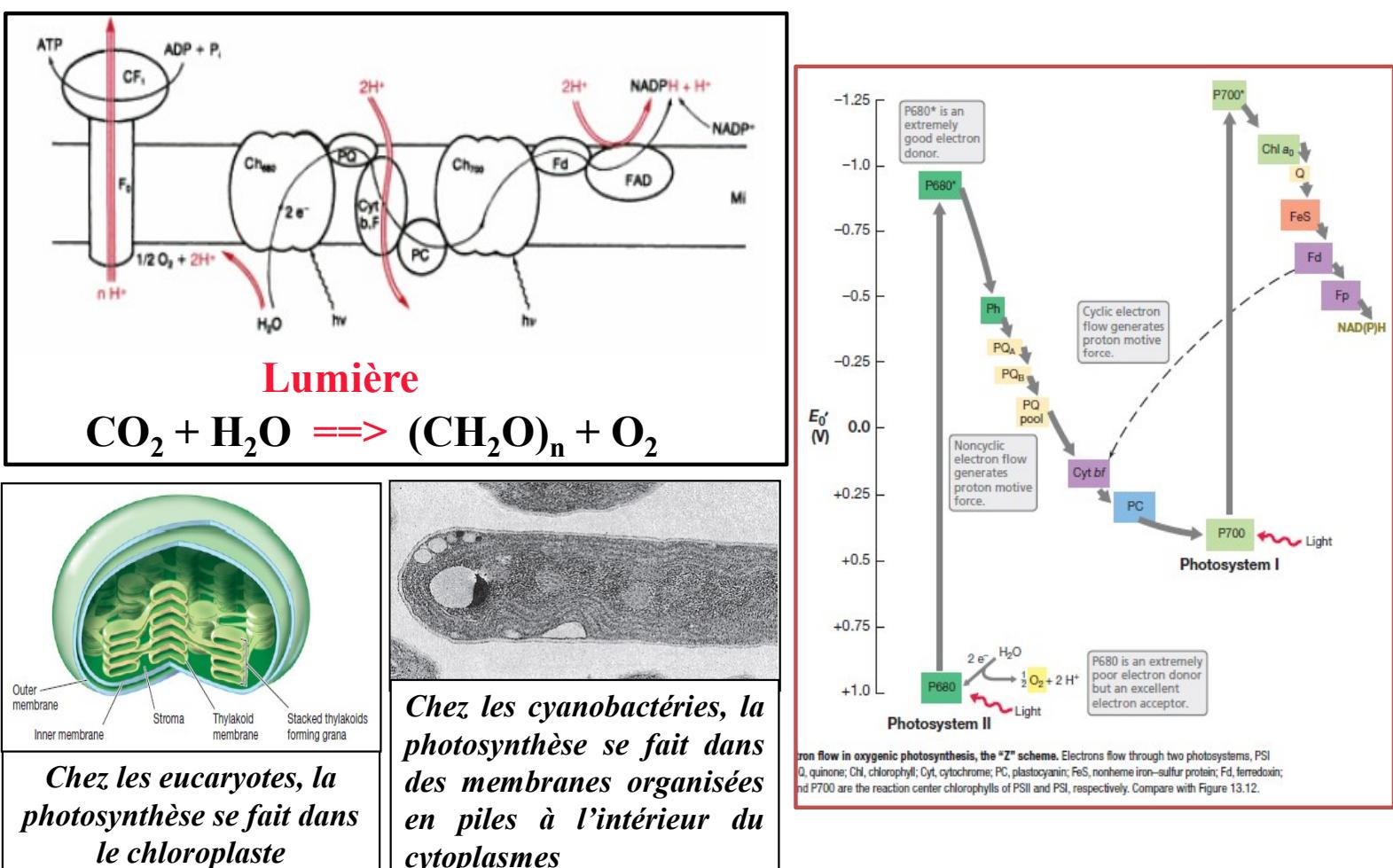
## Photosynthèse oxygénique:

Faite par les  $\mu$ -organismes ayant de la chlorophylle (plantes supérieurs, algues et cyanobactéries)



**Figure 17.33** Green algae. (a) A single-celled, flagellated green alga, *Dunaliella*. A cell is about 5  $\mu\text{m}$  wide. (b) The plantlike green alga *Chara*. (c) *Micrasterias*. This single multilobed cell is about 100  $\mu\text{m}$  wide. (d) *Scenedesmus*, showing packets of four cells each. (e) *Spirogyra*, a filamentous alga with cells about 20  $\mu\text{m}$  wide. Note the green spiral-shaped chloroplasts. (f) *Volvox* colony with eight daughter colonies. (g) The petroleum-producing green alga, *Botryococcus braunii*. Note the excreted oil droplets surrounding the cell.

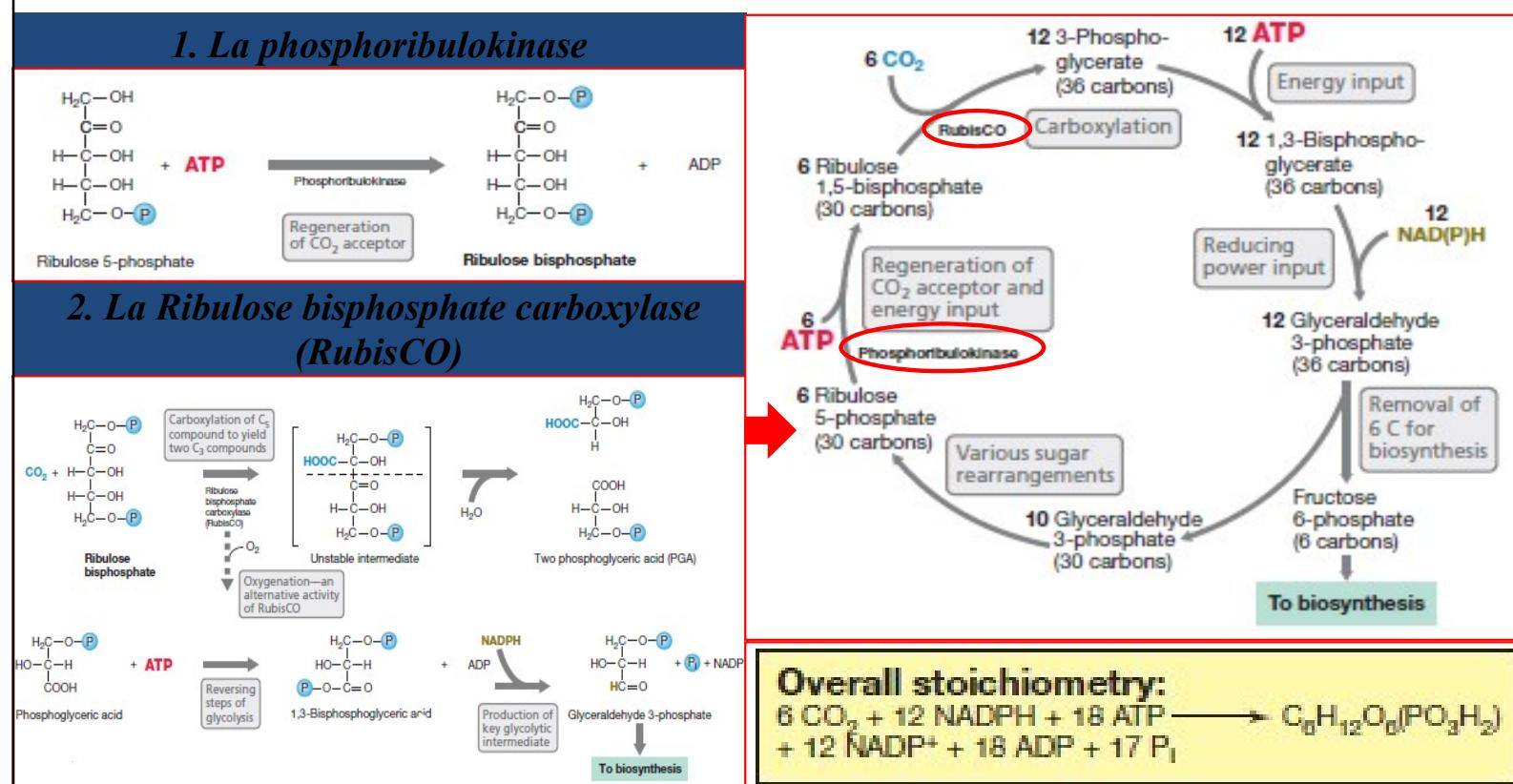
Le donneur des électrons dans la photosynthèse oxygénique est l'  $\text{H}_2\text{O}$  dans la phase lumineuse ils y a production à la fois de l'ATP et du pouvoir réducteur «  $\text{NADPH}, \text{H}^+$  »



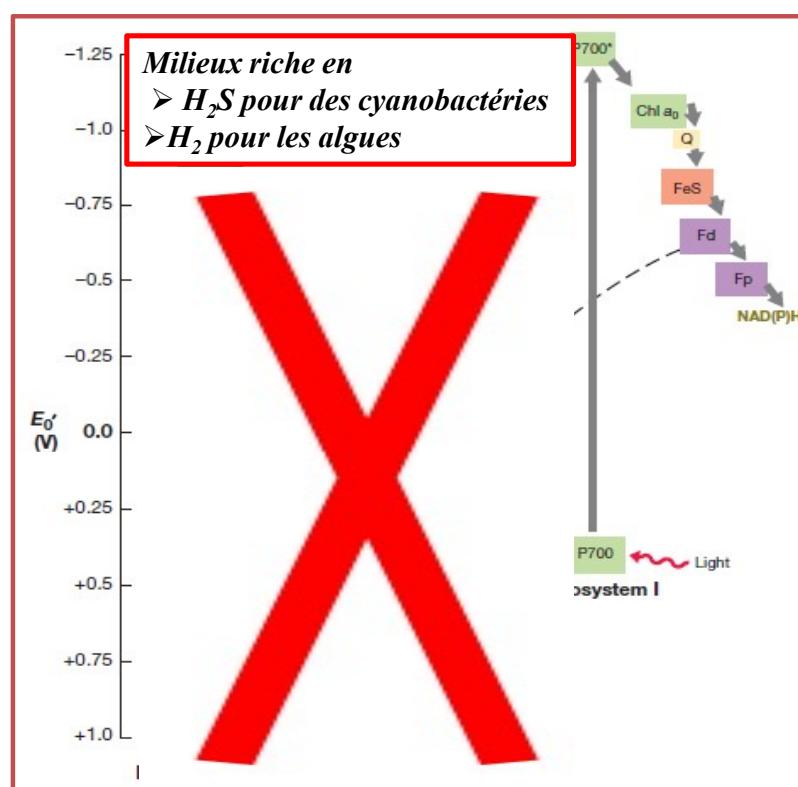
## **Fixation du CO<sub>2</sub>**

Se fait par cycle de Melvin Kelvin

Ce cycle nécessite de NADPH et de L'ATP ainsi que deux enzymes:



**Remarque 1:** Chez les phototrophe oxygénique quant il y a suffisamment de NADPH, de l'ATP est produit en impliquant seulement le photosystème I



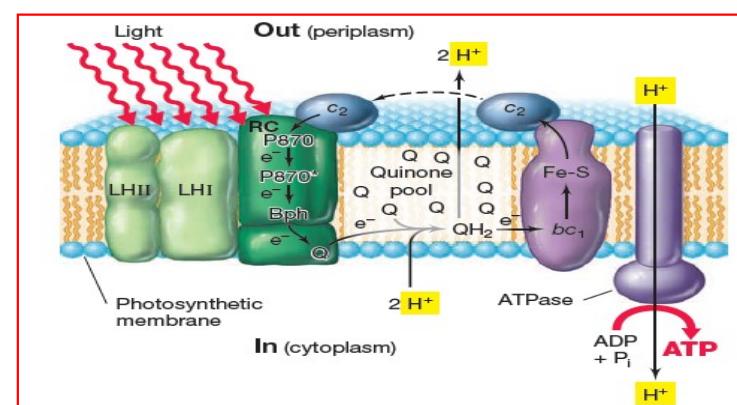
**Remarque 2:** Chez certaines cyanobactéries (*Oscillatoria limnetica*) et algues vertes dans un milieu riche en  $\text{H}_2\text{S}$  et H, le **photosystème II est inhibé** et font la photosynthèse anoxygénique pour générer le pouvoir réducteur dans le but de la fixation du CO<sub>2</sub>, et la synthèse de la matière organique.

## Photosynthèse anoxygénique

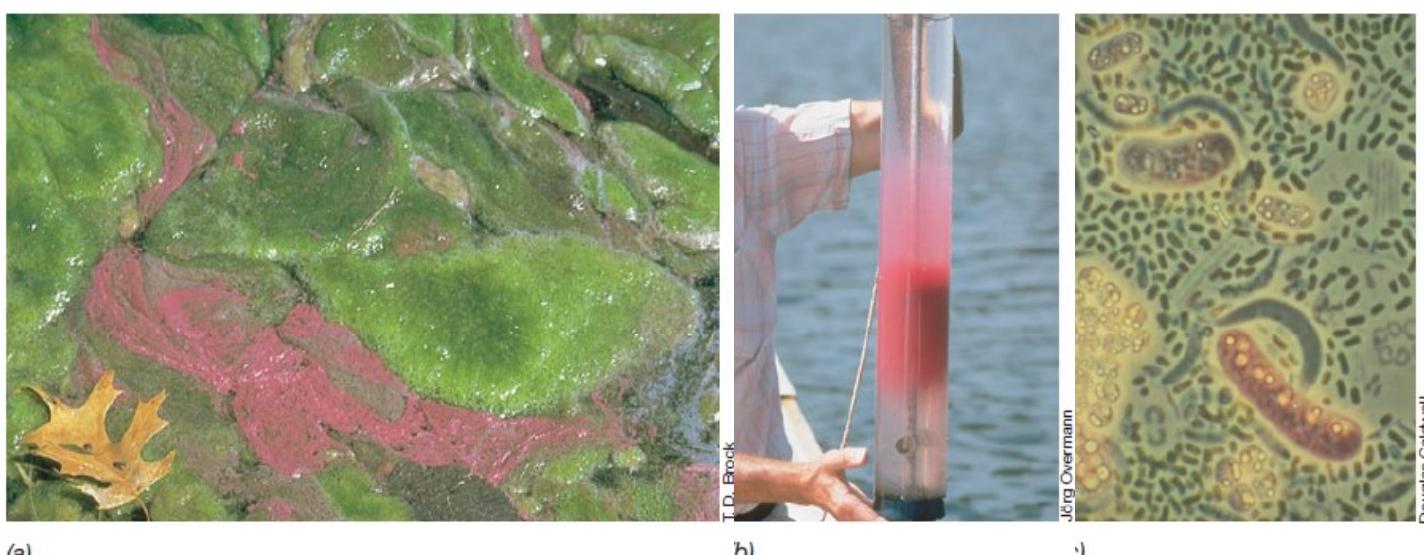
Faite par des microorganismes appartenant à 5 phyla

- Les proteobacteria (bactéries pourpres, *Thiorodaceae*);
- Les bactéries vertes sulfureuses (*Chlorobacteriaceae*);
- Les bactéries vertes non sulfureuses
- Les heliobacteria
- Les acidobactéria.

Ils ne peuvent pas oxyder l'eau mais ils extraient les électrons de donneurs inorganiques comme l'hydrogène, le sulfure d'hydrogène et le soufre comme suite :



Les  $\mu$ -organismes qui font la **photosynthèse anoxygénique** n'ont pas de chlorophylle mais la bactériochlorophylle comme les bactéries pourpre sulfureuses et des Pigment accessoires (caroténoïdes et les phycobilines)



**Figure 17.6** Blooms of purple sulfur bacteria. (a) *Lamprocystis roseopersicina*, in a sulfide spring. The bacteria grow near the bottom of the spring pool and float to the top (by virtue of their gas vesicles) when disturbed. The green color is from cells of the eukaryotic alga *Spirogyra* (Figure 20.41d). (b) Sample of water from a depth of 7 m in Lake Mahoney, British Columbia. The major organism is *Amoeobobacter purpureus*. (c) Phase-contrast photomicrograph of layers of purple sulfur bacteria from a small, stratified lake in Michigan. The purple sulfur bacteria include *Chromatium* species (large rods) and *Thiocystis* (small cocci).

## Exemples de bactériochlorophylle et les microorganismes les possédant

Pigment/Absorption maxima ( <i>in vivo</i> )	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>7</sub>	
Bchl <i>a</i> (purple bacteria)/ 805, 830–890 nm						P/Gg <sup>b</sup> -H		
Bchl <i>b</i> (purple bacteria)/ 835–850, 1020–1040 nm						P	-H	
Bchl <i>c</i> (green sulfur bacteria)/745–755 nm			  			F		
Bchl <i>c<sub>s</sub></i> (green nonsulfur bacteria)/740 nm						S		
Bchl <i>d</i> (green sulfur bacteria)/705–740 nm			  	 		F		<sup>a</sup> No double bond between C <sub>3</sub> and C <sub>4</sub> ; additional H atoms are in positions C <sub>3</sub> and C <sub>4</sub> .
Bchl <i>e</i> (green sulfur bacteria)/719–726 nm			  	 		F		<sup>b</sup> P, Phytol ester (C <sub>20</sub> H <sub>39</sub> O—); F, farnesyl ester (C <sub>15</sub> H <sub>25</sub> O—); G <sub>g</sub> , geranylgeraniol ester (C <sub>10</sub> H <sub>17</sub> O—); S, stearyl alcohol (C <sub>18</sub> H <sub>37</sub> O—).
Bchl <i>g</i> (heliobacteria)/ 670, 788 nm						F		<sup>c</sup> No double bond between C <sub>3</sub> and C <sub>4</sub> ; an additional H atom is in position C <sub>3</sub> . <sup>d</sup> Bacteriochlorophylls <i>c</i> , <i>d</i> , and <i>e</i> consist of isomeric mixtures with the different substituents on R <sub>3</sub> as shown.

## Pigment accessoires (caroténoïdes et les phycobilines)

### Caroténoïdes

Les plus répandus

Ont un rôle de photoprotection en absorbant une grande partie de la lumière nocive (pas de génération de formes toxiques de l'oxygène)

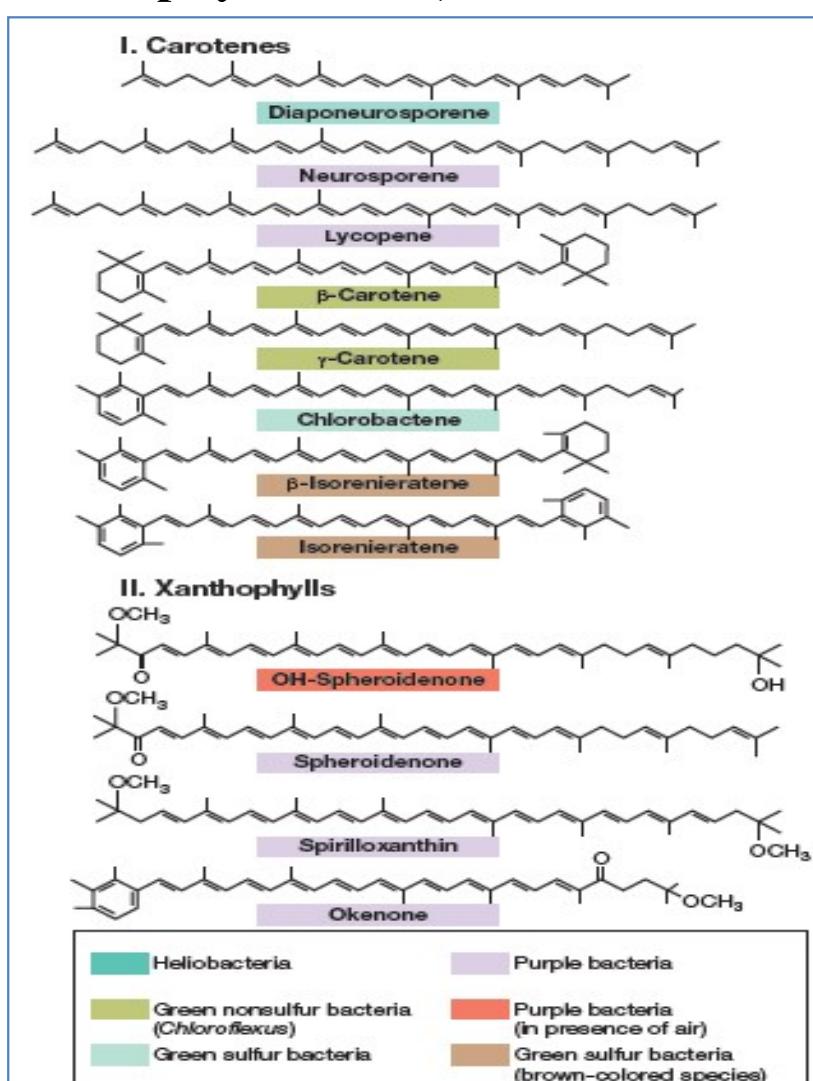
Hydrophobe, encrés dans la membrane

Ont une longue chaîne hydrocarbonée avec alternance des liaisons C-C et C=C.

De couleur jaune, rouge brun et vert

Sont étroitement liés à la chlorophylle

Transférant l'énergie lumineuse vers le centre réactionnel pour ensuite fabriquer de l'ATP.



## Phycobilines

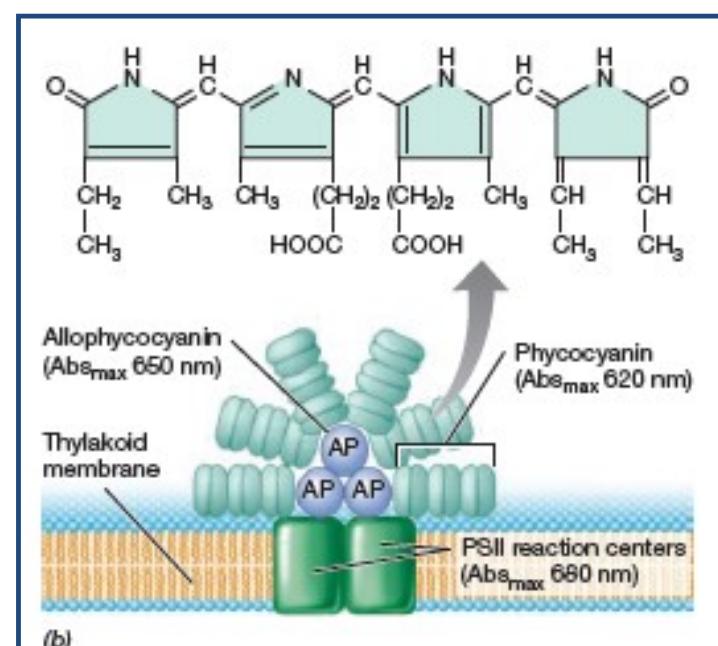
Sont des pigments rouges ou bleu en forme de tétrapyrroles en chaines ouverte couplés à des protéines: les phycobiliprotéines

Présent chez les cyanobactéries et les chloroplastes des algues rouge

- Bleus: phycocyanine (620 nm)
- Rouges: phycoérythrines, 550 nm
- Allophycocyanine (650 nm)

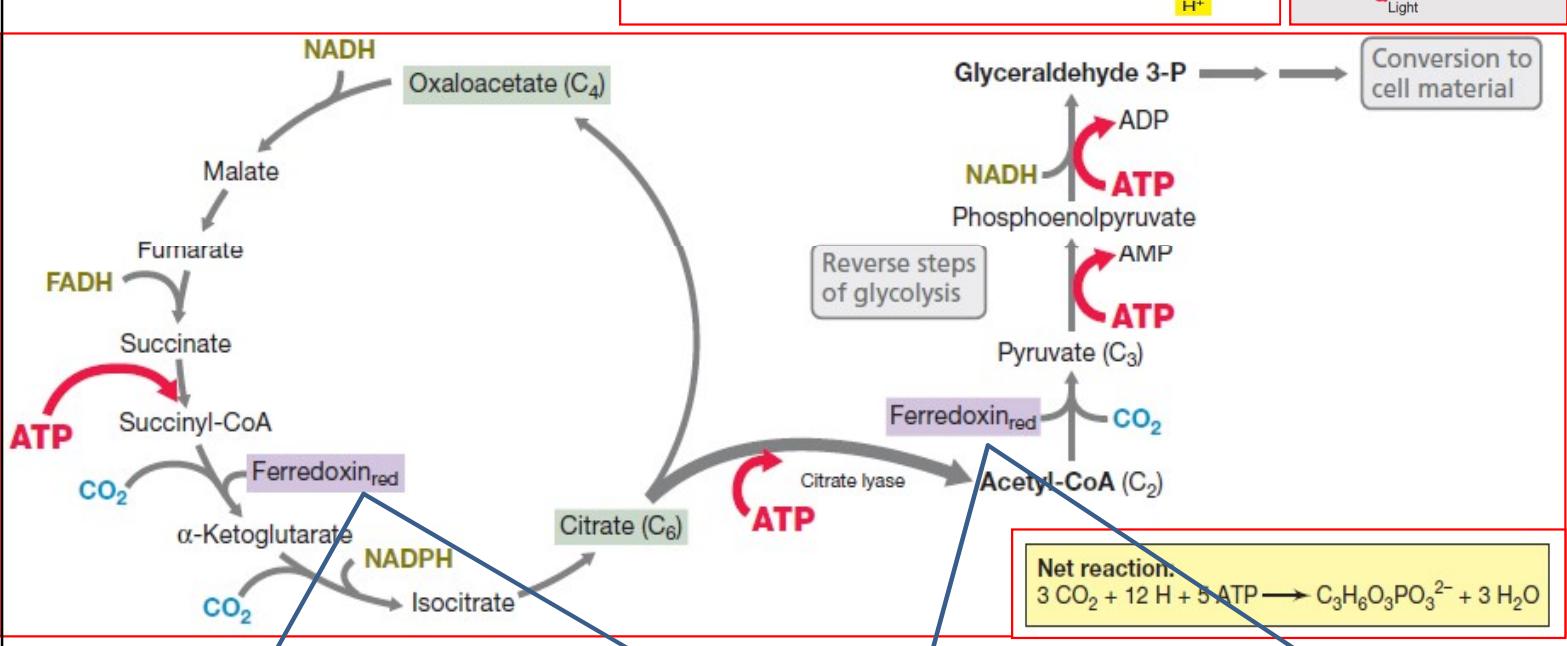
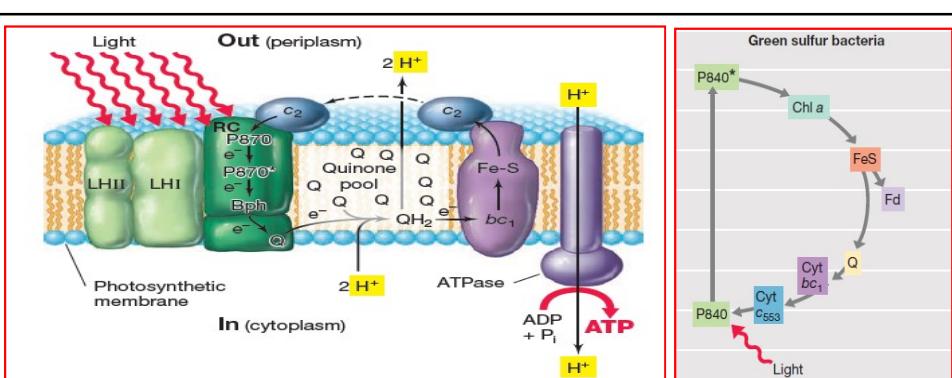
Les phycobiliprotéines forment des agrégats de haut poids moléculaires appelés phycobilisomes qui sont reliés à la membrane photosynthétique.

*Ces pigments (antenne) permettent aux organismes la capture de la plus grande fraction de la lumière disponible*



(b) Structure of phycocyanin (top) and a phycobilisome. Phycocyanin absorbs at higher energies (shorter wavelengths) than allophycocyanin. Chlorophyll  $a$  absorbs at longer wavelengths (lower energies) than allophycocyanin. Energy flow is thus phycocyanin  $\rightarrow$  allophycocyanin  $\rightarrow$  chlorophyll  $a$  of PSII. (c) Electron micrograph of a thin section of the cyanobacterium *Synechocystis*. Note the darkly staining ball-like phycobilisomes (arrows) attached to the lamellar membranes.

La fixation du  $\text{CO}_2$  chez les bactéries vertes sulfureuses (*chlorobium*), *Thermoproteus* (archaea) et *Aquifex* (bacteria) se fait par le *cycle de l'acide citrique inversé*



*Ce cycle contient deux enzymes ferrédoxines liées qui catalysent la réduction du  $\text{CO}_2$*

## 2. Hétérotrophe photoorganotrophe

*La source de carbone est la matière organique et la fixation du CO<sub>2</sub>*

Utiliser une large gamme des sources de carbone comme donneur d'électrons pour la photosynthèse: acides organiques, acides aminés , alcools, sucres et même les composés aromatiques comme le benzoate ou toluène.

*La source d'électron est organique*

*La source d'énergie est lumineuse*

Représenté par des:

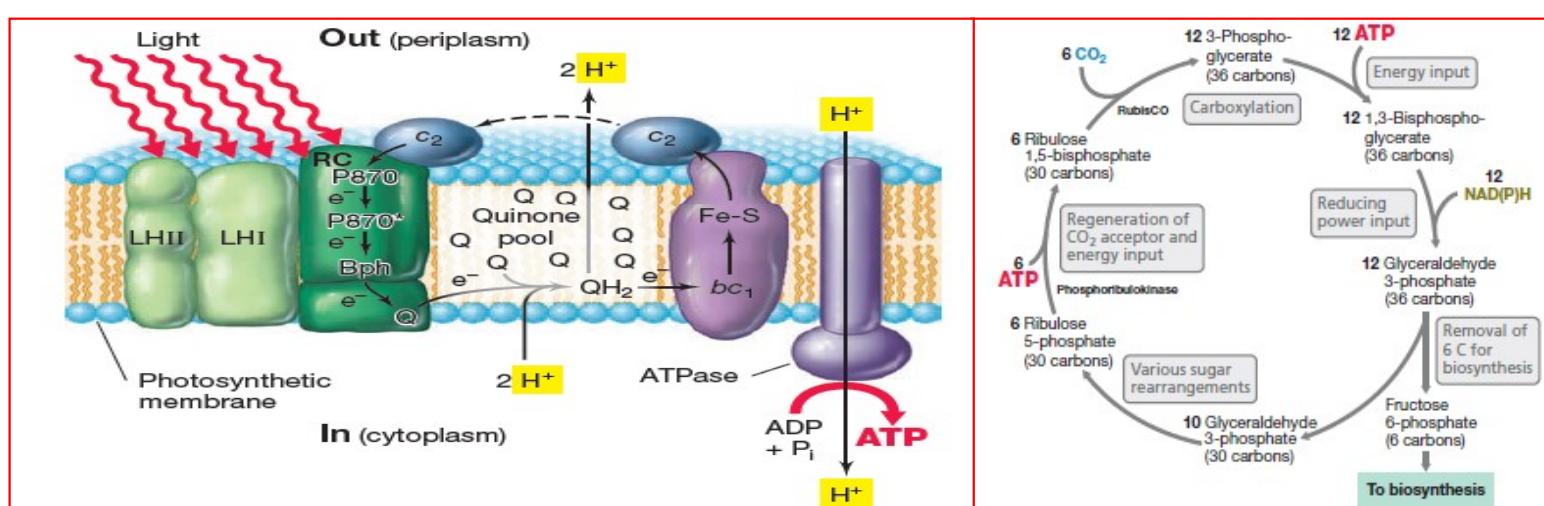
Bactéries vertes non sulfureuses (*Chloroflexus, Heliothrix, Roseiflexus*)

Bactéries pourpres non sulfureuses (*Rhodospirillum, Rhodobacter, Rubrivivax, Rhodoferax*),

Heliobacteria (*Helio bacterium, Heliophilum, Helio restis, Heliomonas, and Heliobacillus*)

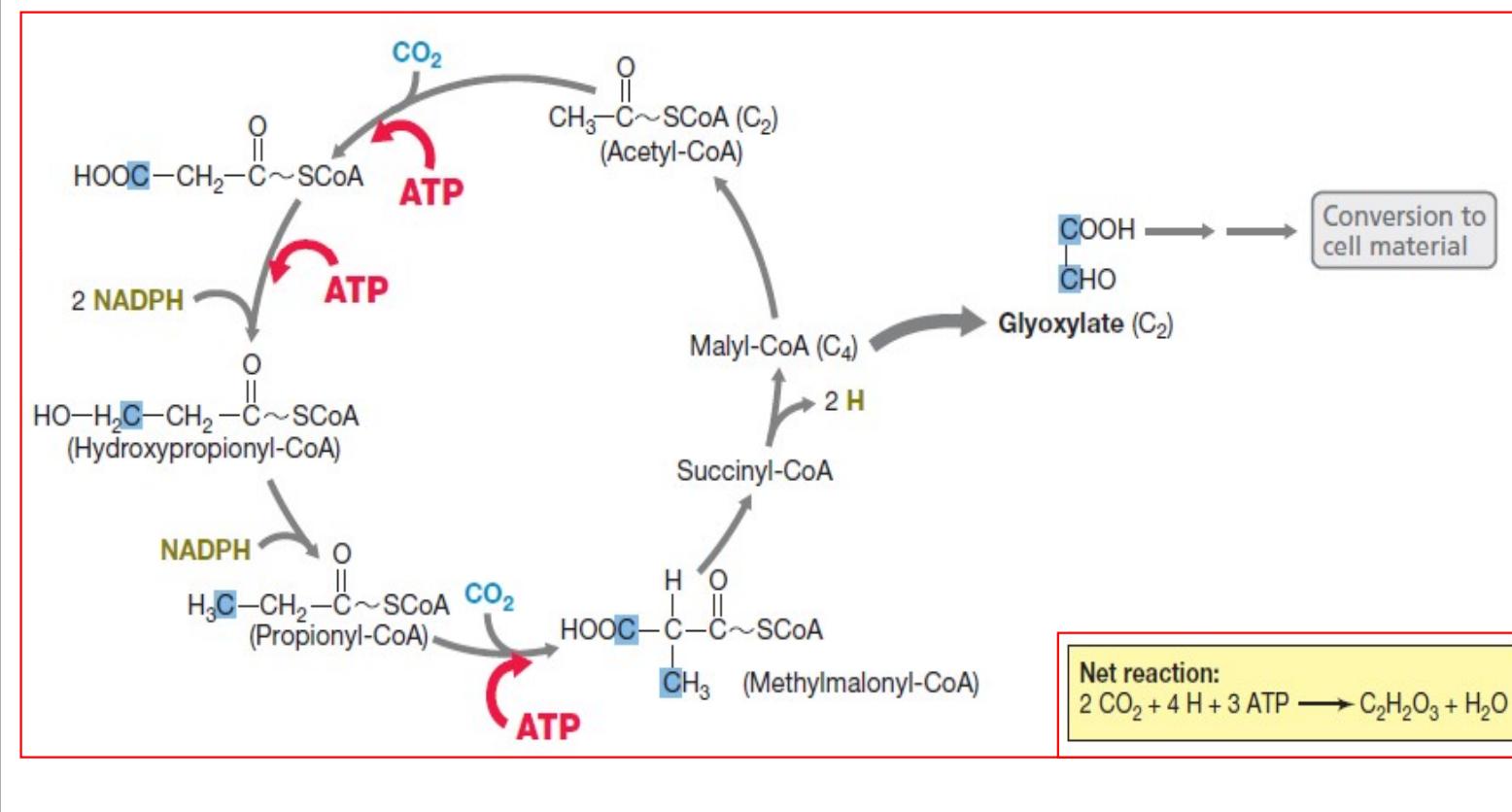
*Acidobacteria (Chloracidobacterium thermophilum)*

**NB:** Les bactéries pourpres non sulfureuses sont capables de produire l'ATP à partir H<sub>2</sub>, une faible concentration de H<sub>2</sub>S et le fer ferrique (Fe<sup>2+</sup>) comme donneurs d'électrons dans la photosynthèses pour la fixation de CO<sub>2</sub> dans le cycle de Calvin.



Dans la phase nocturne il produisent l'ATP par la respiration aérobie, anaérobie ou fermentation. Cette photosynthèse est inhibée en présence d'O<sub>2</sub>.

Les bactéries vertes non sulfureuses, *Chloroflexus*, *Heliothrix*, *Roseiflexus* poussent bien comme phothétrotrophe; cependant ils peuvent pousser en photoautotrophie en utilisant le H<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S comme donneur d'électrons en utilisant la voie de l'hydroxypropionate

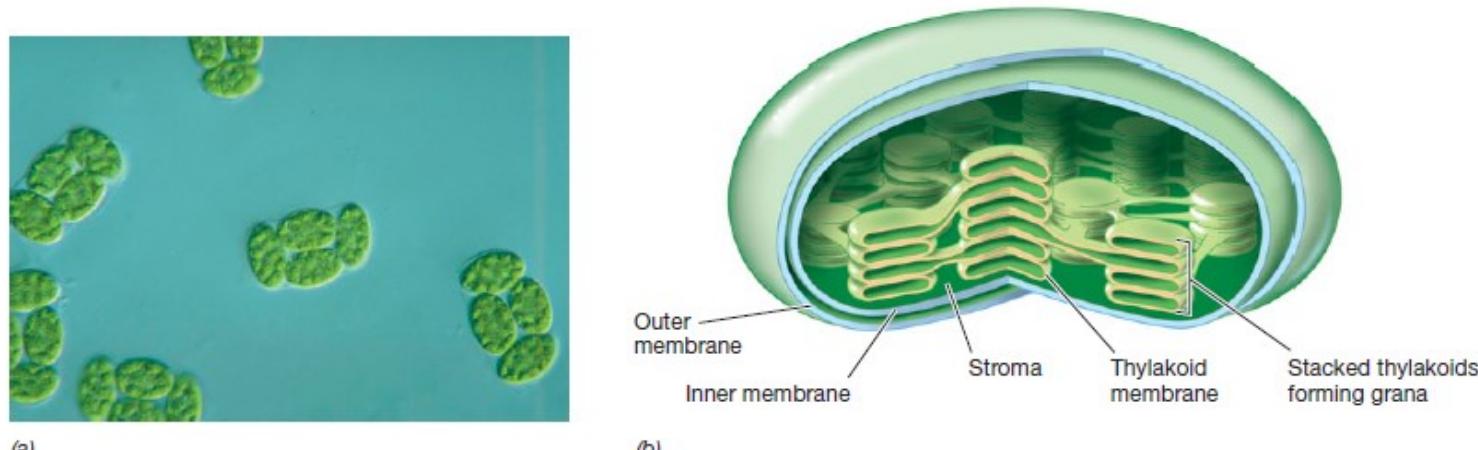


## Localisation des pigments photosynthétiques

Sont localisés dans des systèmes membranaires spéciaux appelés membranes photosynthétiques

La localisation des membranes photosynthétiques n'est pas la même chez les eucaryotes et les procaryotes

**Chez les eucaryotes :** ces membranes photosynthétiques sont localisées dans les chloroplastes, exactement dans les thylacoïdes



**Figure 13.5** The chloroplast. (a) Photomicrograph of cells of the green alga *Makinoella*. Each of the four cells in a cluster contains several chloroplasts. (b) Details of chloroplast structure, showing how the convolutions of the thylakoid membranes define an inner space called the stroma and form membrane stacks called grana.

## Chez les procaryotes

Les chloroplastes sont absentes

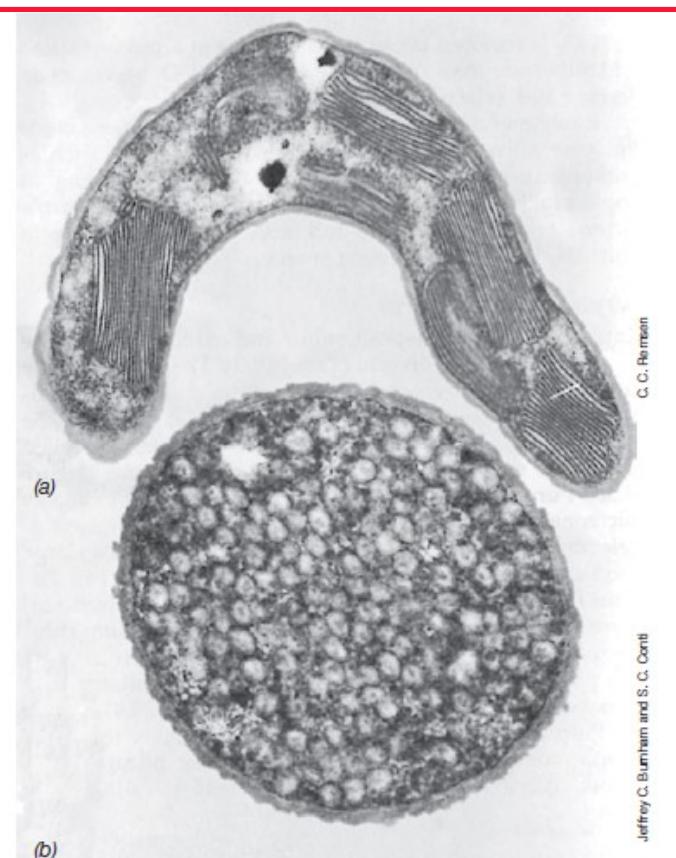
Les pigment photosynthétiques sont intégrés dans des systèmes membranaires internes

Ces systèmes proviennent de:

1. Invagination de la membrane cytoplasmique pour former soit :

- Des membranes laminaire ou
- Des poches membranaires sous forme de vésicules

2. La membrane cytoplasmique elle-même (Exemple héliobactéries)



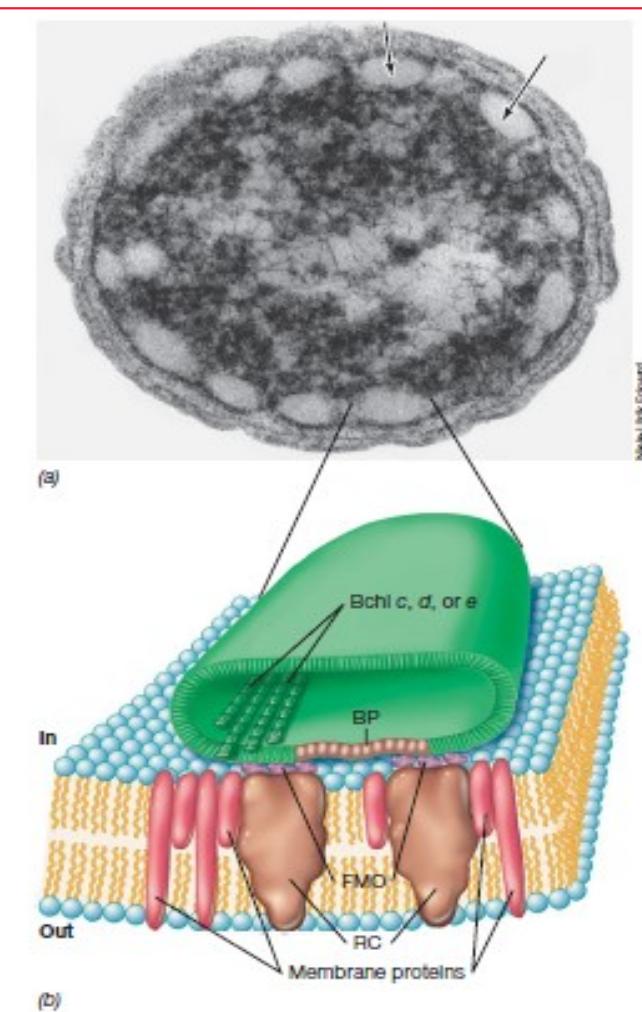
**Figure 17.4** Membrane systems of phototrophic purple bacteria as revealed by the electron microscope. (a) *Ectothiorhodospira mobilis*, showing the photosynthetic membranes in flat sheets (lamellae). (b) *Allochromatium vinosum*, showing the membranes as individual, spherical vesicles.

3. De la membrane cytoplasmique et de structures spécialisées incluses dans la membrane appelés **chlorosomes** (bactéries verte sulfureuses et non sulfureuse)

4. Membrane thylacoïdale des cyanobactéries



**Figure 14.4** Thylakoids in cyanobacteria. Electron micrograph of a thin section of the cyanobacterium *Synechococcus lividus*. A cell is about 5 µm in diameter. Note thylakoid membranes running parallel to the cell wall.



**Figure 13.7** The chlorosome of green sulfur and green nonsulfur bacteria. (a) Transmission electron micrograph of a cross-section of a cell of the green sulfur bacterium *Chlorobaculum tepidum*. Note the chlorosomes (arrows).

### 3) Hétérotrophes chimioorganotrophes

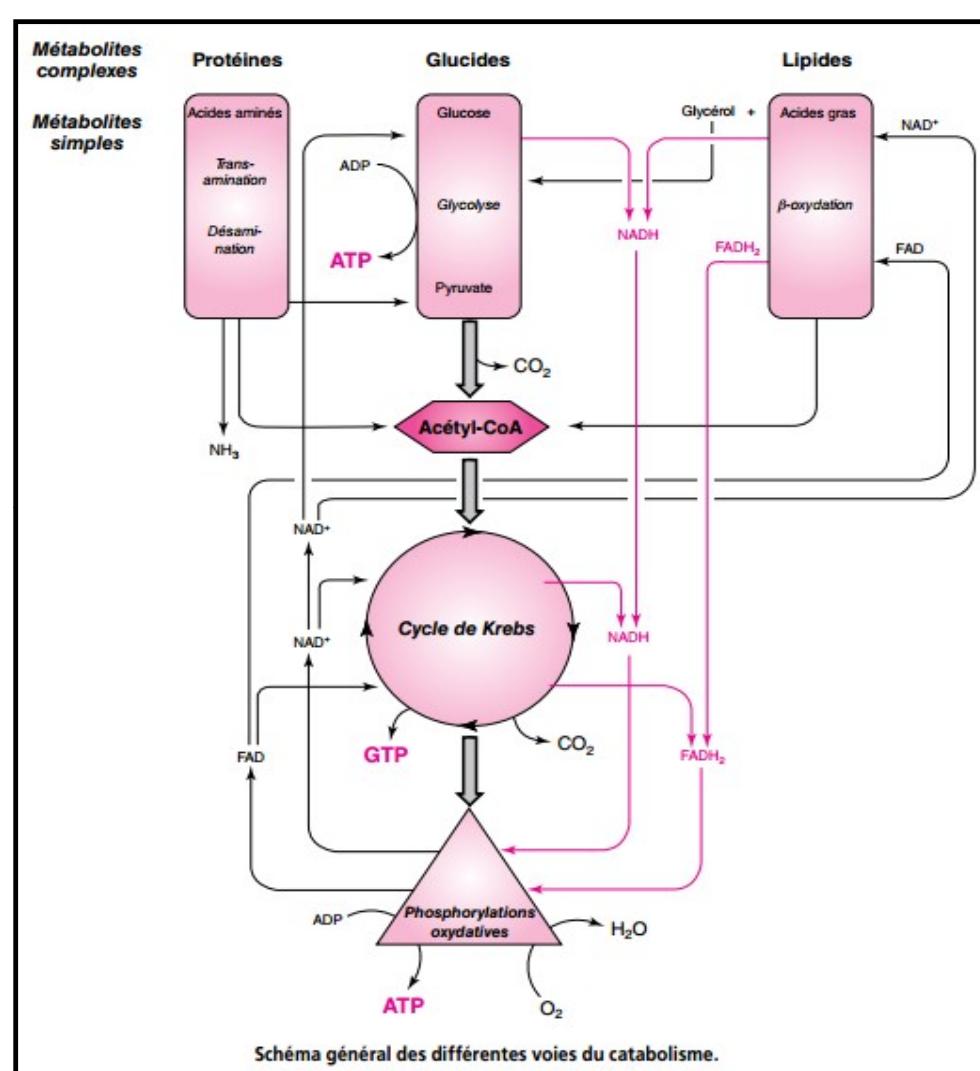
Source de carbone c'est des composés organiques

Source d'électron c'est des composés organiques

Source d'énergie c'est l'oxydation de la matière organique

Souvent la même source nutritive organique satisfait tous ces besoins.

**Tout les  $\mu$ -organismes pathogènes sont chimiohétérotrophes**



### 4) Autotrophes chimiolithotrophes

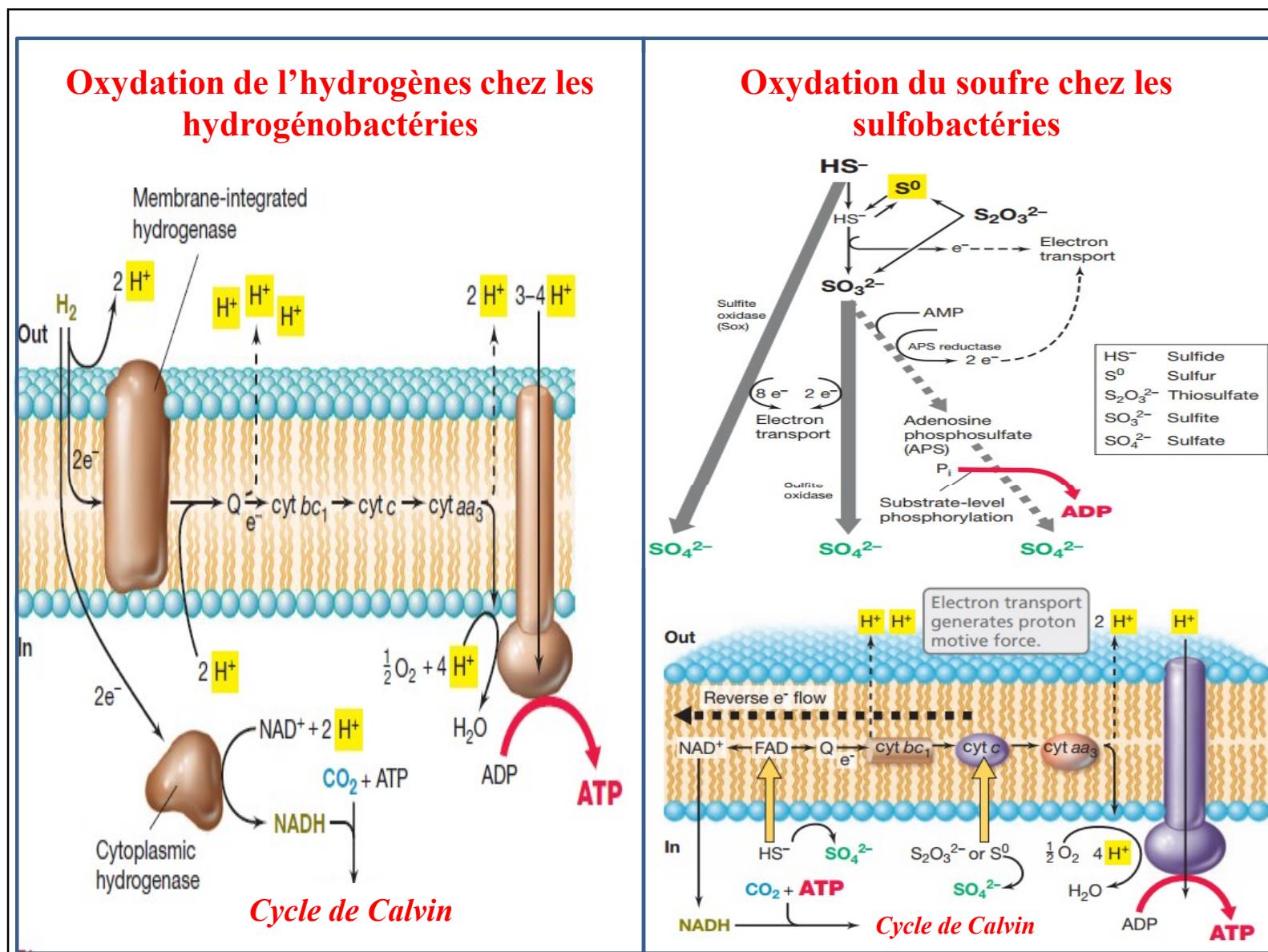
Source de carbone est le  $\text{CO}_2$

Source d'électron c'est les composés inorganiques

Source d'énergie oxydation des composés inorganiques tels que le fer, l'azote ou le soufre

**Table 13.1** Energy yields from the oxidation of various inorganic electron donors<sup>a</sup>

Electron donor	Chemolithotrophic reaction	Group of chemolithotrophs	$E_0'$ of couple (V)	$\Delta G^{0'}$ (kJ/reaction)	Number of electrons/reaction	$\Delta G^{0'}$ (kJ/2e <sup>-</sup> )
Phosphite <sup>b</sup>	$4 \text{HPO}_3^{2-} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow 4 \text{HPO}_4^{2-} + \text{HS}^-$	Phosphite bacteria	-0.69	-91	2	-91
Hydrogen <sup>b</sup>	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	Hydrogen bacteria	-0.42	-237.2	2	-237.2
Sulfide <sup>b</sup>	$\text{HS}^- + \text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{S}^0 + \text{H}_2\text{O}$	Sulfur bacteria	-0.27	-209.4	2	-209.4
Sulfur <sup>b</sup>	$\text{S}^0 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$	Sulfur bacteria	-0.20	-587.1	6	-195.7
Ammonium <sup>c</sup>	$\text{NH}_4^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2 \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$	Nitrifying bacteria	+0.34	-274.7	6	-91.6
Nitrite <sup>b</sup>	$\text{NO}_2^- + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$	Nitrifying bacteria	+0.43	-74.1	2	-74.1
Ferrous iron <sup>b</sup>	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}^+ + \frac{1}{4} \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	Iron bacteria	+0.77	-32.9	1	-65.8



## 5. Hétérotrophe chimiolithotrophe (mixotrophe)

Bien qu'ils obtiennent l'énergie de l'oxydation des composés inorganiques, ils requièrent un composé organique comme source de carbone.

C'est des chimioorganotrophes facultatif (peuvent être des chimiolithoautotrophes et chimoheterotrophes).

Certaines espèces de *Beggiatoa* obtiennent l'énergie de l'oxydation de soufre inorganique mais ils n'ont pas les enzymes nécessaire pour fixer le CO<sub>2</sub> dans le cycle de Calvin et requièrent du carbone organique comme source de carbone.

Sur la base de la source primaire en énergie, carbone, et électron et les micro-organismes peuvent être classés en: Cinq (5) types trophiques

Type nutritionnel	Source de carbone	Source d'énergie	Source d'électrons	Micro-organismes représentatifs
Photolithoautotrophie (Autotrophie photolithotrophe)	CO <sub>2</sub>	Énergie lumineuse	Donneur inorganique	Bactéries sulfureuses pourpres et vertes, cyanobactéries
Photoorganohétérotrophie (Hétérotrophie Photoorganotrope)	Carbone organique mais le CO <sub>2</sub> peut aussi être utilisé	Énergie lumineuse	Donneur organique	Bactéries non sulfureuses pourpres, bactéries non sulfureuses vertes
Chimiolithoautotrophie (Autotrophie chimiolithotrope)	CO <sub>2</sub>	Produits chimiques inorganiques	Donneur inorganique	Bactéries oxydant le soufre, bactéries oxydant l'H <sub>2</sub> , bactéries nitrifiantes, bactéries oxydant le fer, méthanogènes
Chimiolithohétérotrophie ou mixotrophie (Hétérotrophie chimiolithotrope)	Carbone organique mais le CO <sub>2</sub> peut aussi être utilisé	Produits chimiques inorganiques	Donneur inorganique	Certaines bactéries oxydantes du soufre (p.ex: <i>Beggiatoa</i> )
Chimioorganohétérotrophes (Hétérotrophie chimio-organotrope)	Carbone organique	Produits chimiques organiques souvent les mêmes que la source de carbone	Donneur organique souvent le même que la source de carbone	La plupart des micro-organismes non photosynthétiques y compris la plupart des agents pathogènes, les champignons, de nombreux protistes et de nombreuses archées
$H_2 \rightarrow H^+$ <i>Hydrogenomonas</i> $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ <i>Ferrobacillus, Thiobacillus, Galionella</i> . $CH_4 \rightarrow CO_2$ <i>Methanomonas</i> $CO \rightarrow CO_2$ <i>Hydrogenomonas</i>				

## Résumé

