

ⵜⴰⴷⵓⴷⴰ ⵜⴰⵎⴻⵔⵉⵜ
ⵜⴰⵎⴰⵏⴰ ⵜⴰⵏⴻⵔⵉⵜ ⵜⴰⵏⴻⵔⵉⵜ
ⵏ ⵜⴰⵎⴰⵏⴰ ⵜⴰⵏⴻⵔⵉⵜ ⵏ ⵜⴰⵎⴰⵏⴰ



المملكة المغربية
وزارة التربية الوطنية
والتعليم الأولي والرياضة

المركز الجهوي لمهن التربية والتكوين لجهة الدار البيضاء مكناس

Centre Régional des Métiers de l'Education et de la Formation de la Région Casablanca-Settat

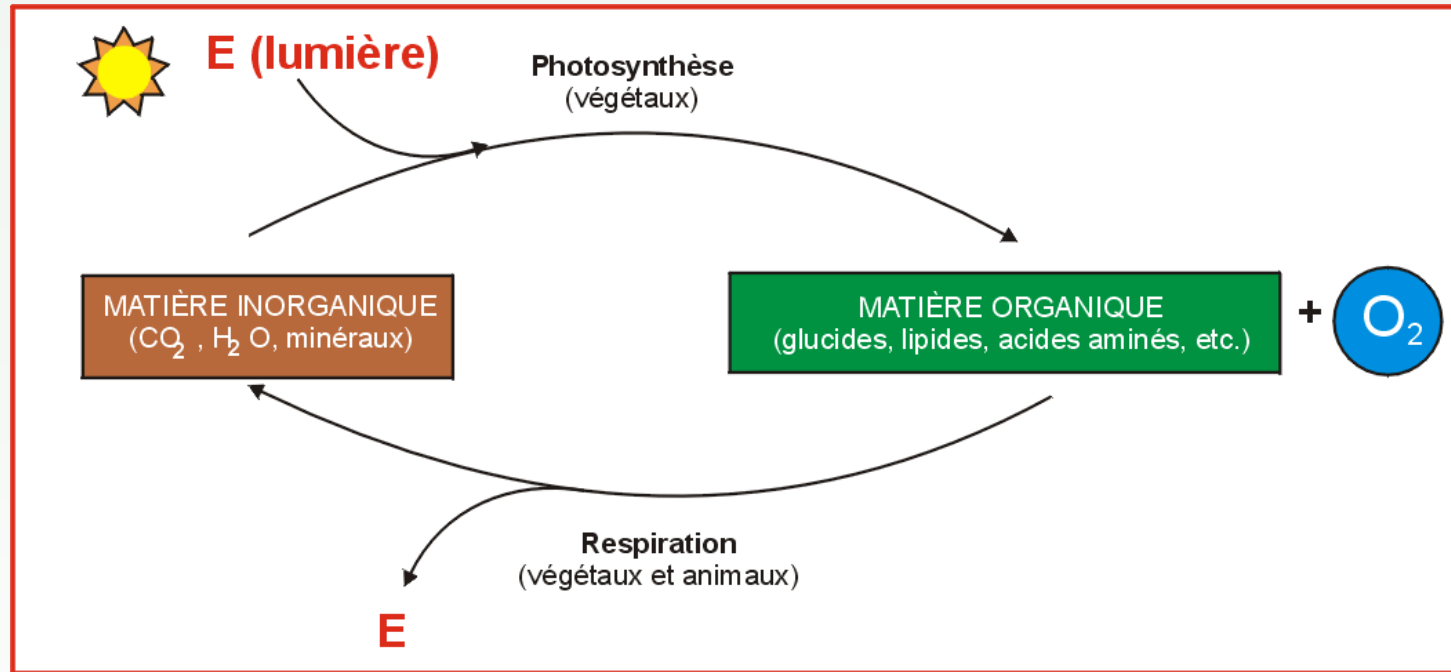
La respiration et la fermentation

Pr: Salaheddine SAAYOUN

2025/2026

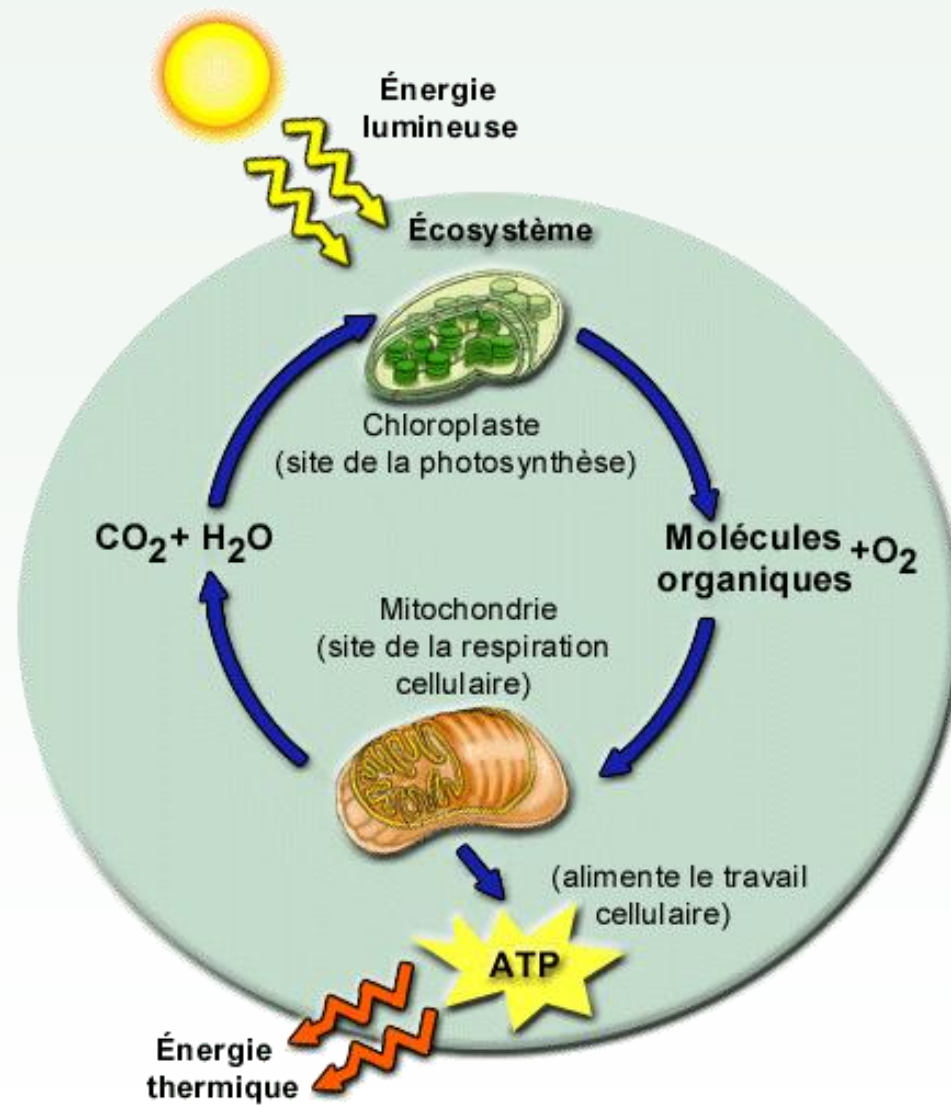


Photosynthèse et respiration



Autotrophes : Photosynthèse et respiration.
Fabriquent leur propre matière organique.

Hétérotrophes : Respiration ou fermentation.
Transforment la matière organique végétale en matière organique animale.



Respiration du glucose:

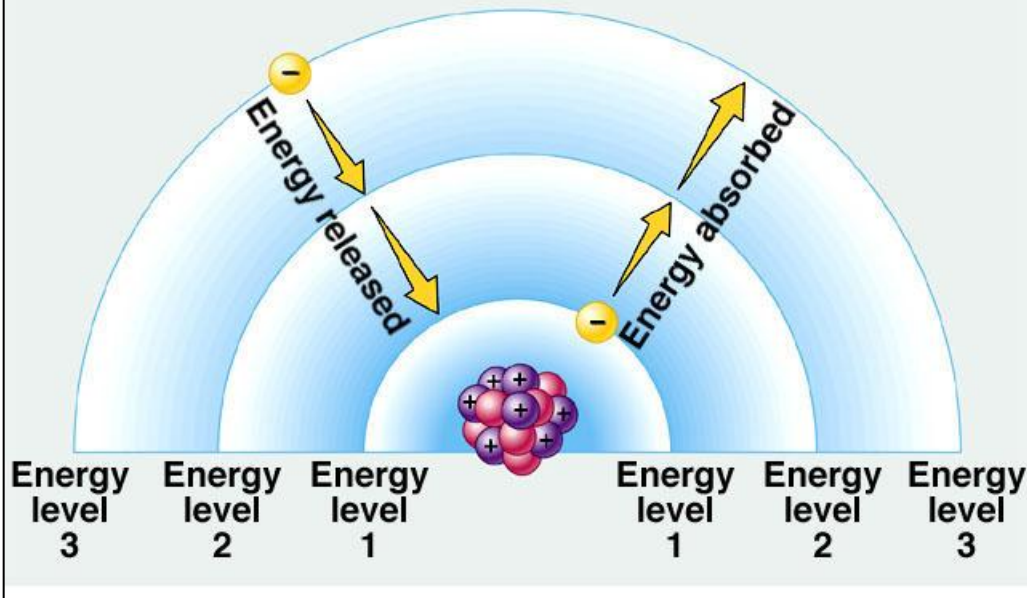


La respiration libère de l'énergie. D'où vient cette énergie?

Des électrons

© The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Atomic Energy Levels



Plus un électron est sur une orbitale élevée, plus il contient d'énergie.

Il faut fournir de l'énergie à un électron pour qu'il passe d'une orbitale basse à une orbitale élevée.

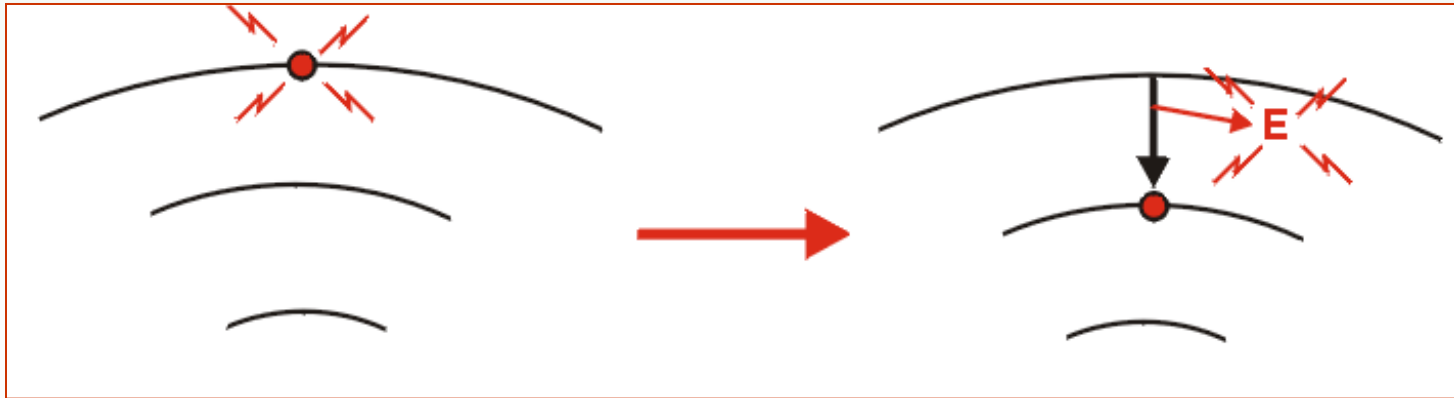
Inversement, un électron qui passe d'une orbitale élevée à une plus basse libère de l'énergie

Respiration du glucose:



La respiration libère de l'énergie. D'où vient cette énergie?

Des électrons



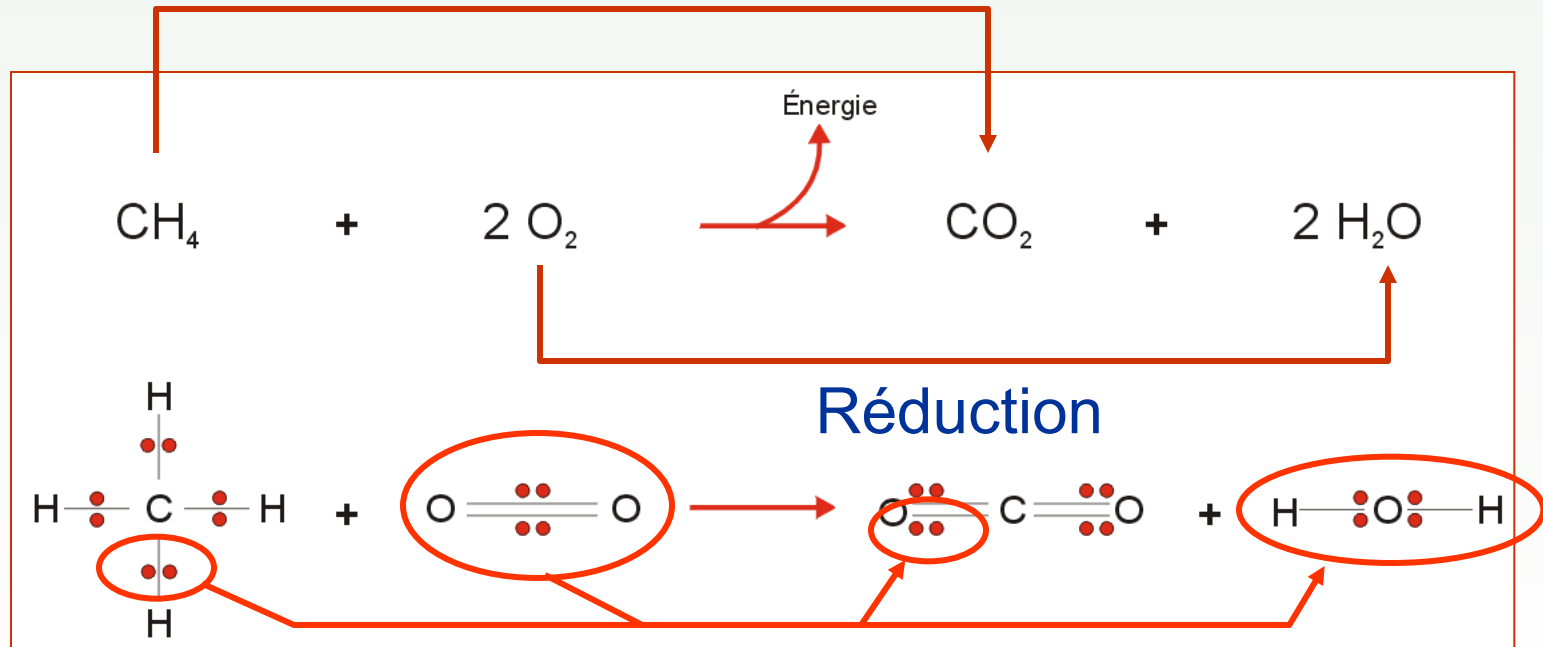
Lorsqu'un électron situé à un niveau élevé passe à un niveau plus bas, il perd de l'énergie.

Au cours de la respiration, les électrons du glucose perdent de l'énergie.

Ex. Combustion du méthane

Le méthane est oxydé : les électrons du CH_4 sont plus éloignés du carbone dans le CO_2 que dans le CH_4

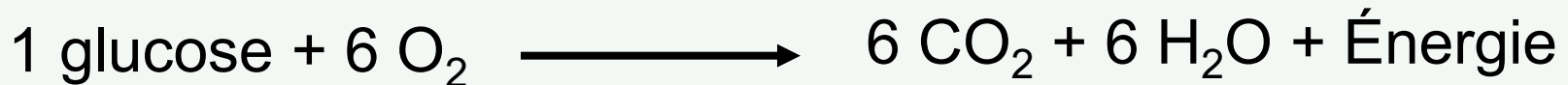
Oxydation



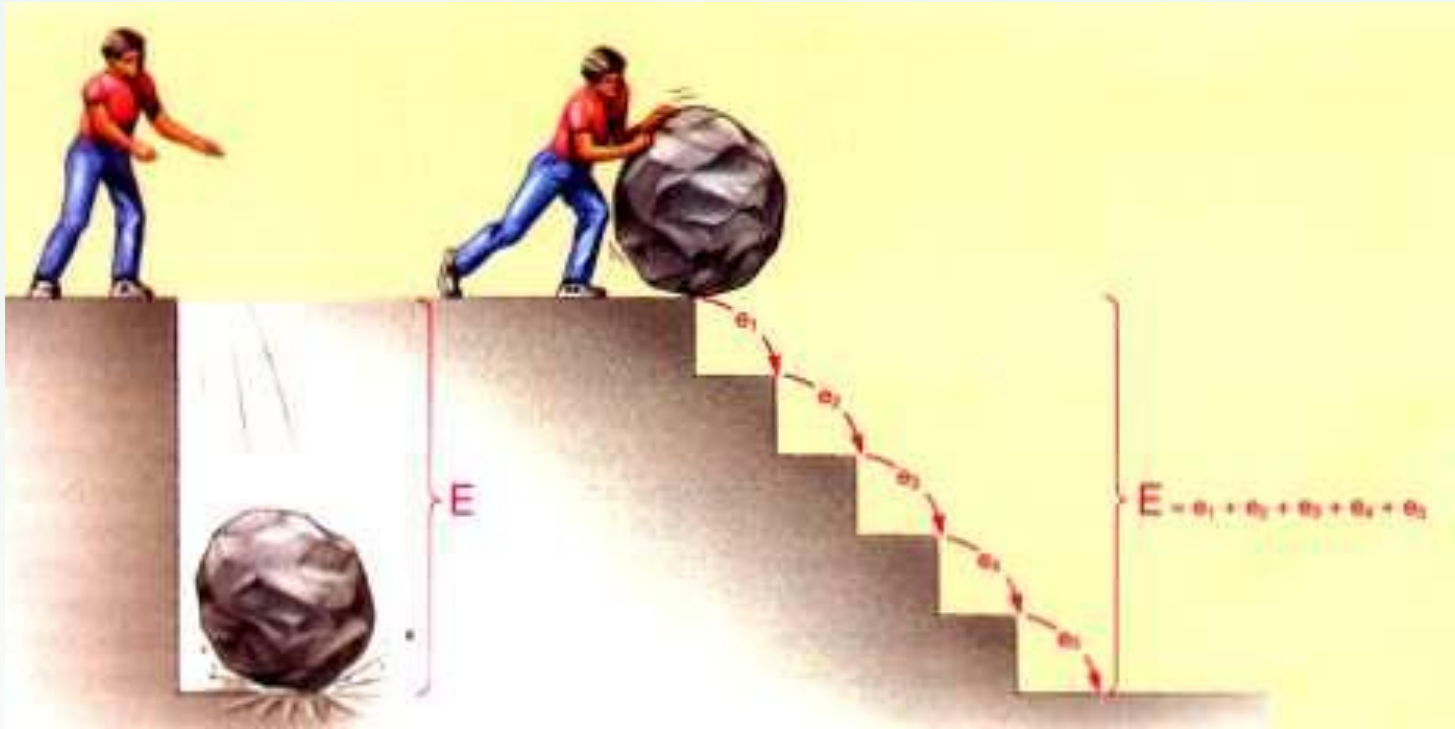
L'oxygène est réduit : les électrons se rapprochent des atomes d'oxygène ==> libération d'énergie

À la fin de la réaction, les électrons occupent un niveau plus bas

C'est le même principe pour la respiration du glucose



À la fin de la réaction, les électrons dans le CO_2 et l' H_2O occupent un niveau plus bas que dans le glucose et l' O_2 .



Dans la respiration, l'énergie est libérée par étapes (et non d'un seul coup).

Les électrons riches en énergie (niveau élevé) du glucose sont transférés à d'autres molécules: les transporteurs. À chaque transfert, l'électron perd de l'énergie.

Hydrogène
"arraché" au
glucose

Électrons
"arrachés" à
l'hydrogène

2H

2H^+

$+ 2\text{e}^-$

$+ \frac{1}{2}\text{O}_2$

H_2O

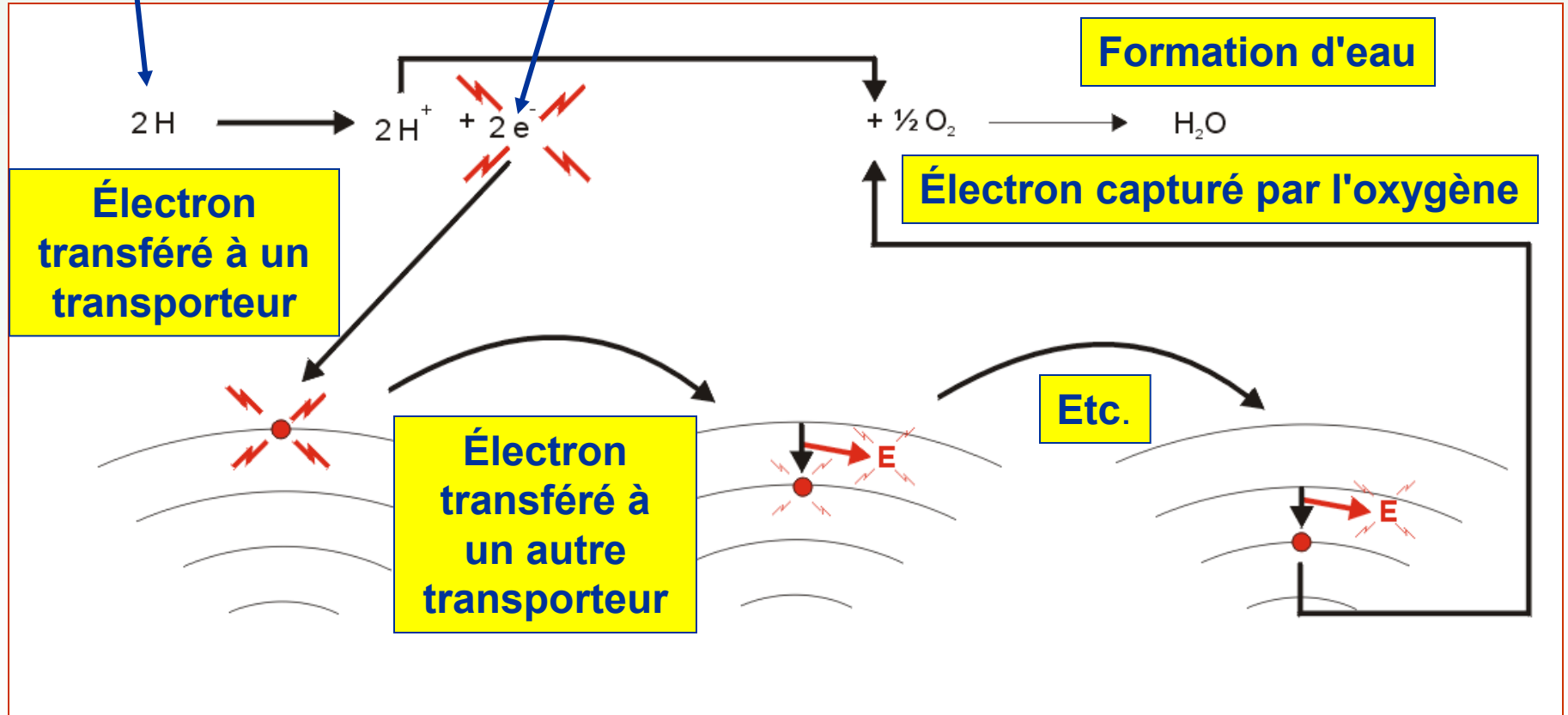
Formation d'eau

Électron
transféré à un
transporteur

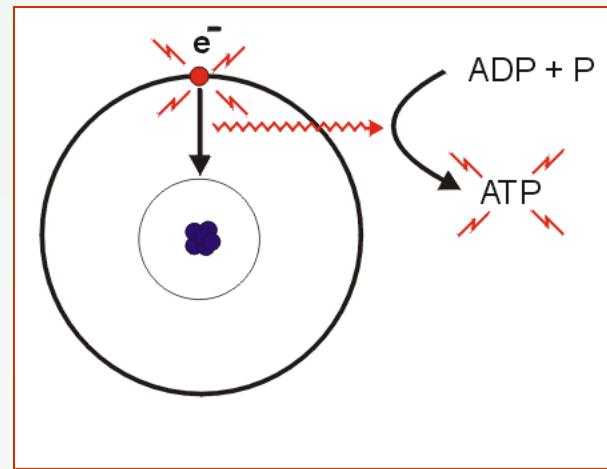
Électron capturé par l'oxygène

Électron
transféré à
un autre
transporteur

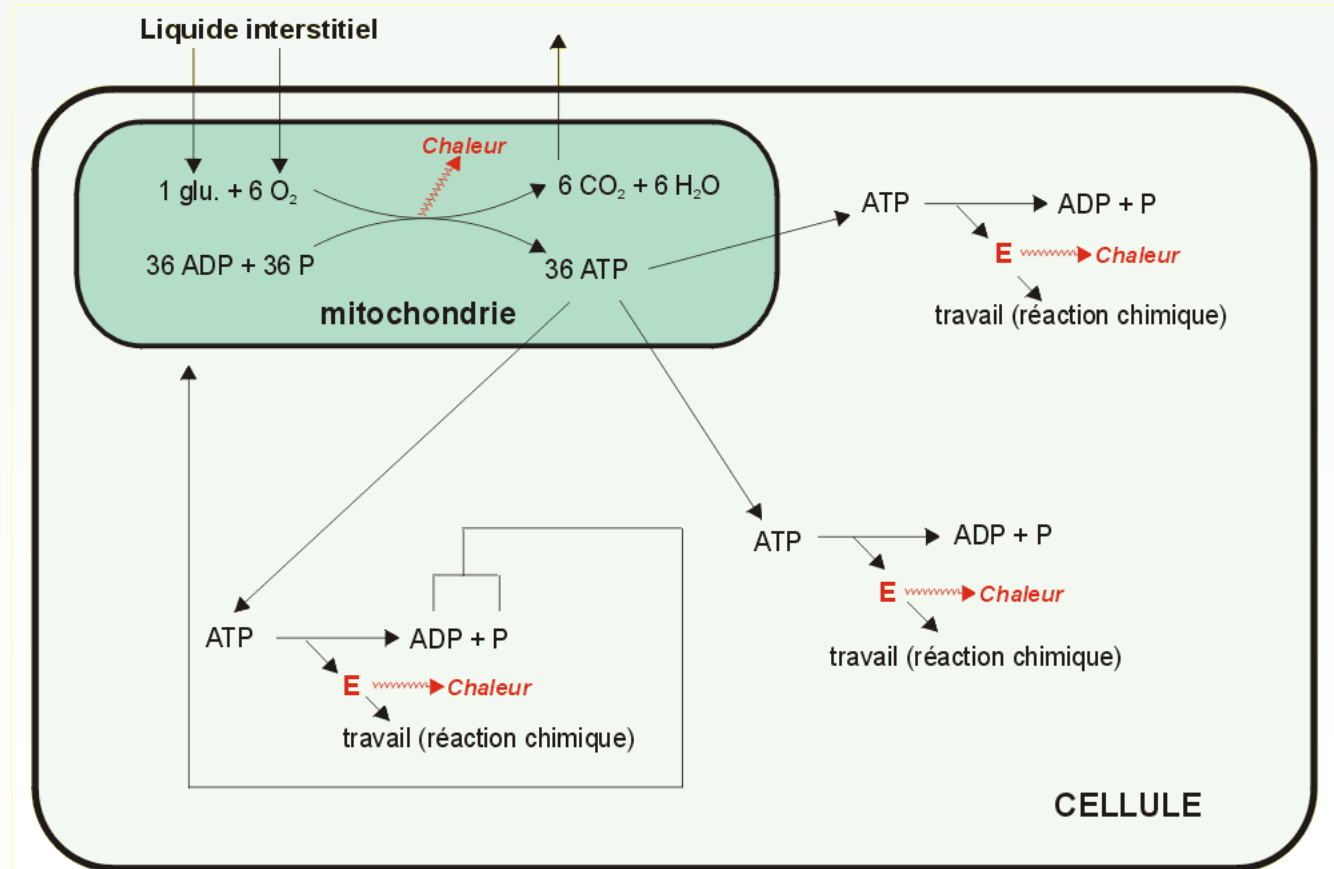
Etc.



L'énergie dégagée à chaque transfert est convertie en ATP



L'ATP formé est libéré dans la cellule



La respiration se divise en trois grandes phases:

1. La glycolyse
2. Le cycle de Krebs
3. La chaîne de transport d'électrons
(ou chaîne respiratoire)

Glycolyse et cycle de Krebs: "déshabillage" de la molécule de glucose et extraction des électrons riches en énergie.

Chaîne de transport des électrons: Utilisation de l'énergie des électrons pour former de l'ATP.

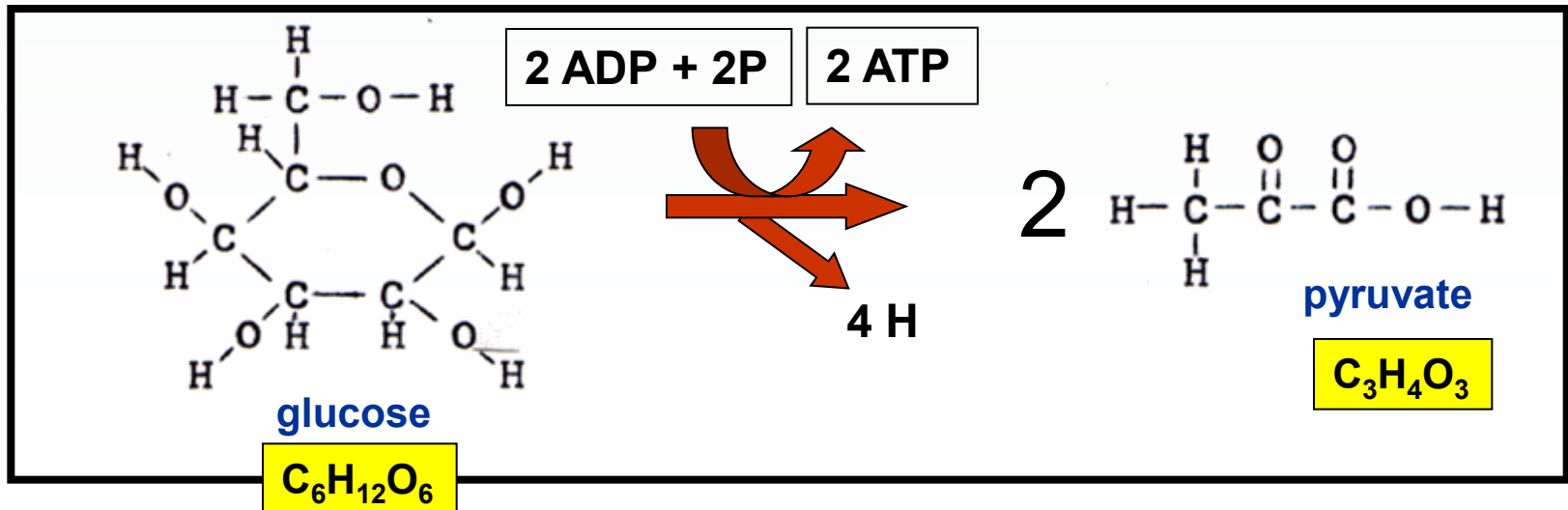
La glycolyse

Se produit dans le **cytosol**

1 glucose (**C₆**) $\longrightarrow$ 2 pyruvates (**C₃**)

2 ATP produits

4 H (et leurs électrons) "arrachés" au glucose



C₆ (glucose)

2 ADP + 2P

2 ATP

2 NAD⁺

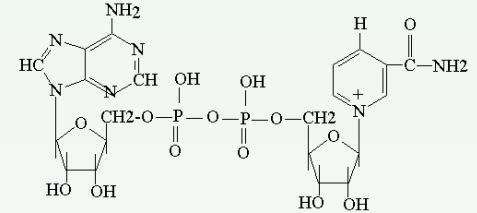
2 NADH + H⁺ → Mitochondrie

Chaque NAD⁺ capte 2 électrons

2 C₃ (pyruvate)

Substrat-H₂ + NAD⁺ → Substrat + NADH + H⁺

Le NAD⁺ est un transporteur d'électrons riches en énergie.

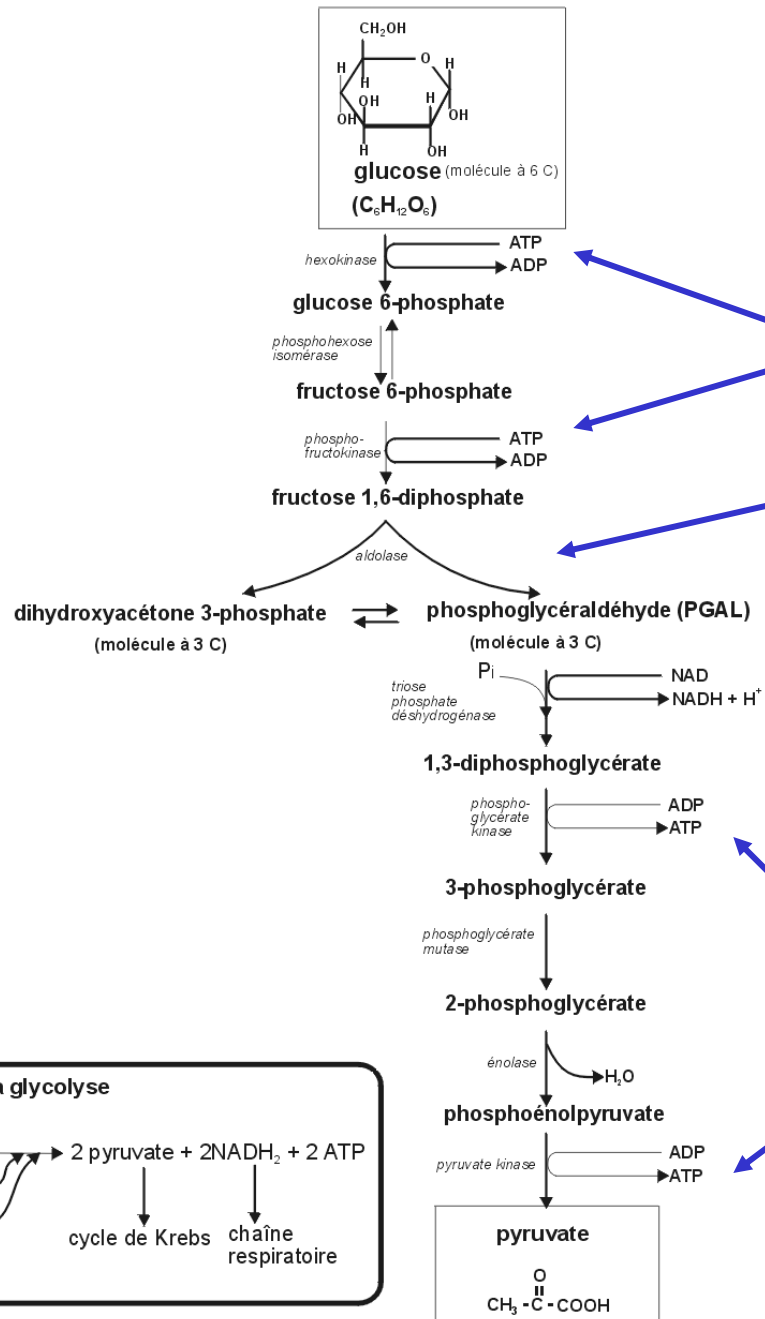


nicotinamide adenine dinucleotide (NAD⁺)

NAD⁺ = *nicotinamide adénine dinucléotide*

N.B. 2H = 1H + 1 H⁺ + 1 électron

La glycolyse



2 ATP consommés

Le glucose (C₆) est brisé en 2 molécules à 3C (PGAL)

2 H⁺ et 2 électrons arrachés

4 ATP produits (2 pour chacun des 2 PGAL produits)

Le PGAL est transformé en pyruvate (C₃)

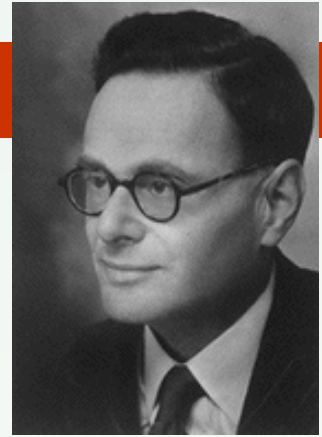
Bilan de la glycolyse

1 glucose → 2 pyruvate + 2NADH₂ + 2 ATP
 2 NAD → 2 ADP + 2 Pi
 cycle de Krebs → chaîne respiratoire

Le cycle de Kreb (ou cycle de l'acide citrique)

Sir Hans Krebs (1900-1981)

**Prix Nobel 1953 de physiologie
médecine pour la découverte dans
les années 30 du cycle qui porte son
nom.**



Le pyruvate contient encore de nombreux électrons riches en énergie. Ils sont extraits dans cette phase.

Le pyruvate entre dans les mitochondries. Le cycle de Kreb se déroule dans les **mitochondries**.

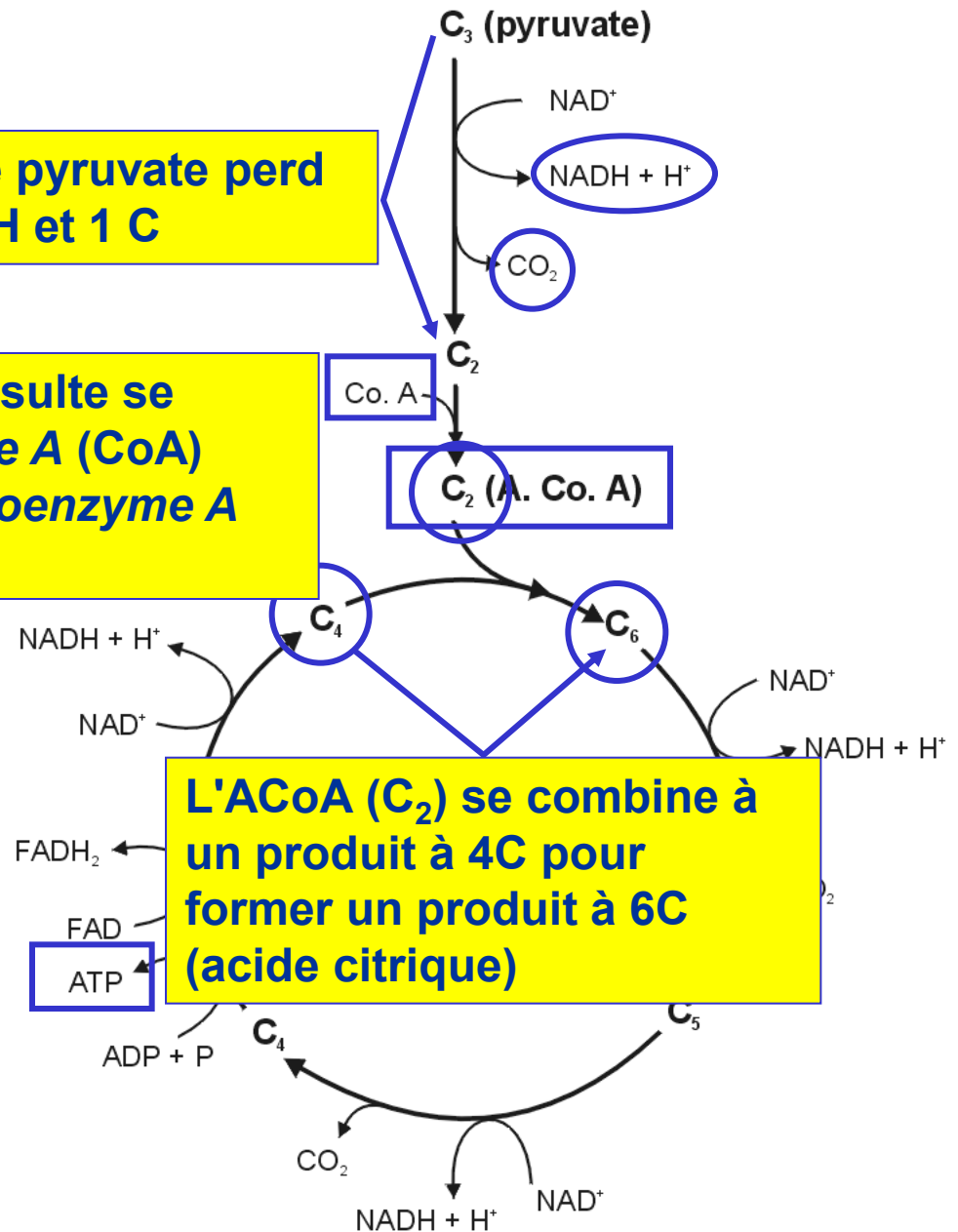


Le pyruvate perd
2 H et 1 C

Le produit à 2C qui en résulte se
combine à une *coenzyme A* (CoA)
pour former de l'*acétyl coenzyme A*
(ACoA)

Le produit à 6C formé
perd 2 C et des H pour
redonner le produit de
départ à 4C et le cycle
recommence.

1 ATP a été formé



Pyruvate (C3)

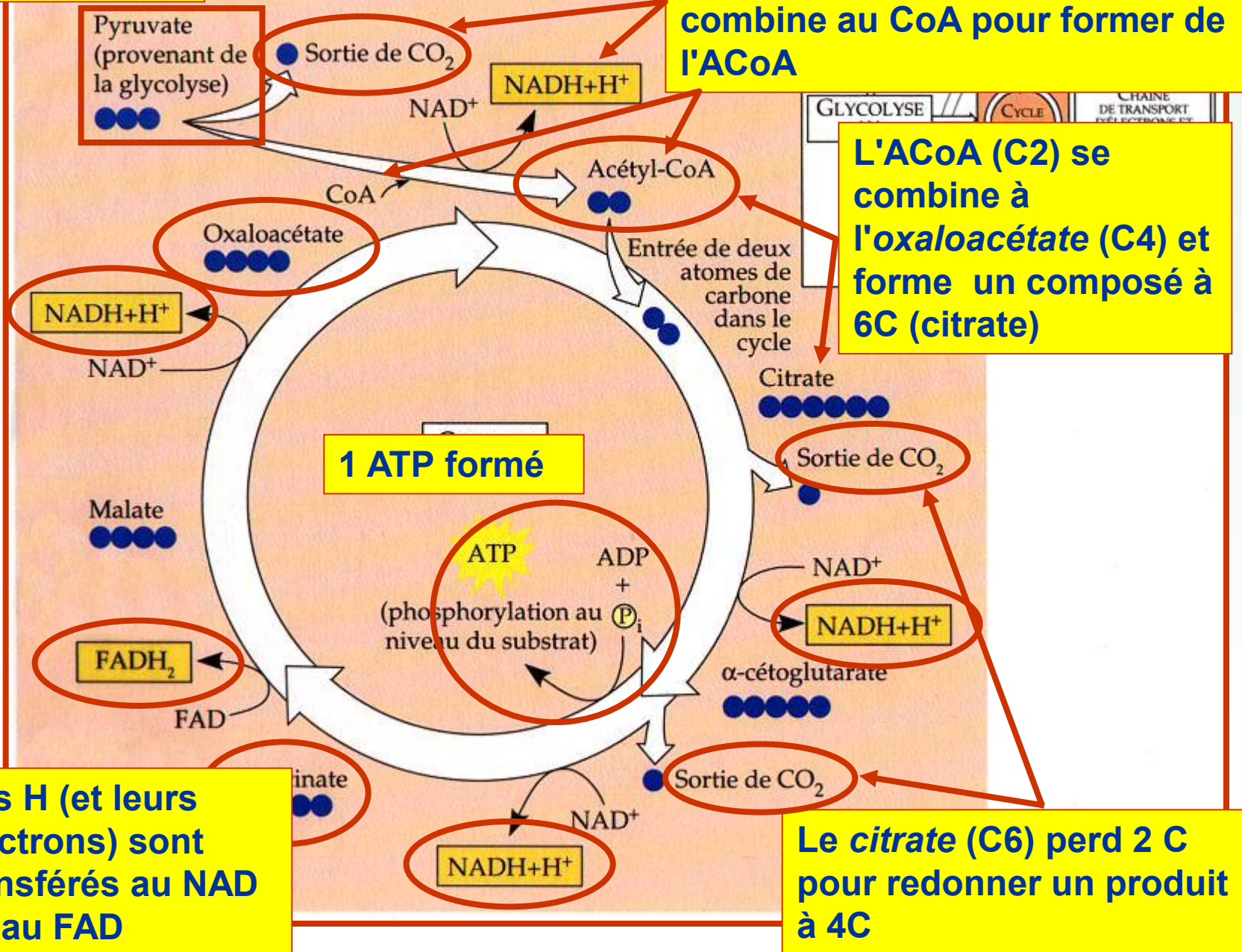
Le pyruvate perd 1 C et 2H et se combine au CoA pour former de l'ACoA

L'ACoA (C2) se combine à l'oxaloacétate (C4) et forme un composé à 6C (citrate)

1 ATP formé

Des H (et leurs électrons) sont transférés au NAD ou au FAD

Le citrate (C6) perd 2 C pour redonner un produit à 4C



Bilan à la fin du cycle de Kreb

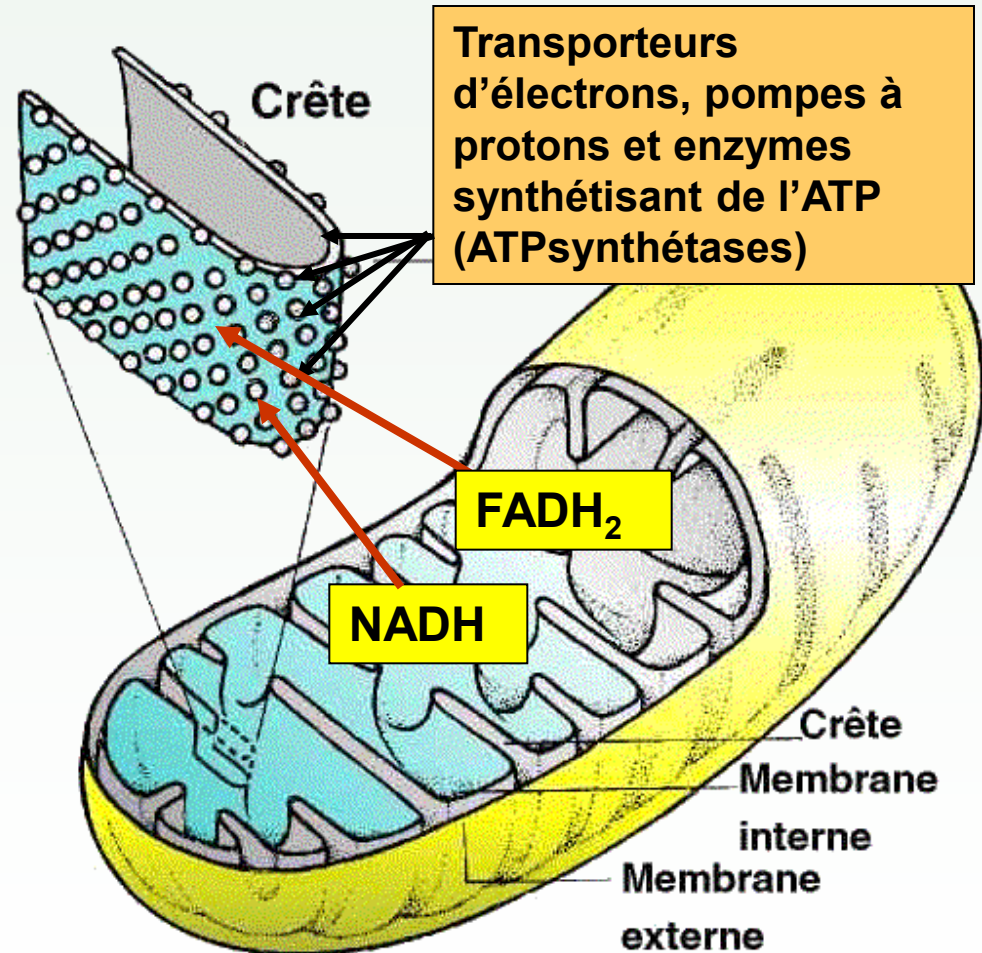
Le glucose a complètement été démoli en CO_2 et H^+
Seulement 4 ATP ont été produits pour chaque glucose
(2 dans la glycolyse et 2 dans le cycle de Kreb).

L'énergie du glucose est contenue dans les électrons des hydrogènes transportés par le NADH et le FADH; ces électrons sont encore à des niveaux énergétiques élevés.

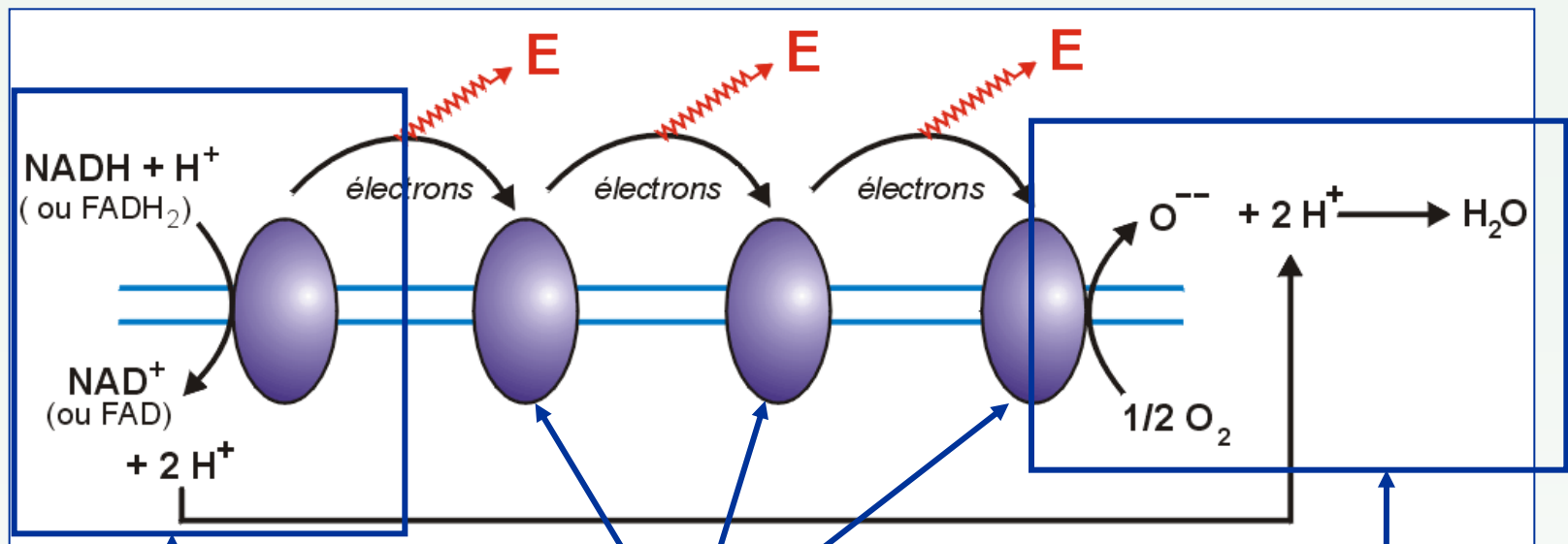
La chaîne de transport d'électrons

Se déroule sur la **membrane interne** des mitochondries.

Les électrons riches en énergie provenant du glucose (transportés par les NADH et FADH_2) sont transférés à des **transporteurs d'électrons**, des protéines situées sur la membrane interne.



Les plis de la membrane interne (crêtes) permettent d'en accroître la surface.



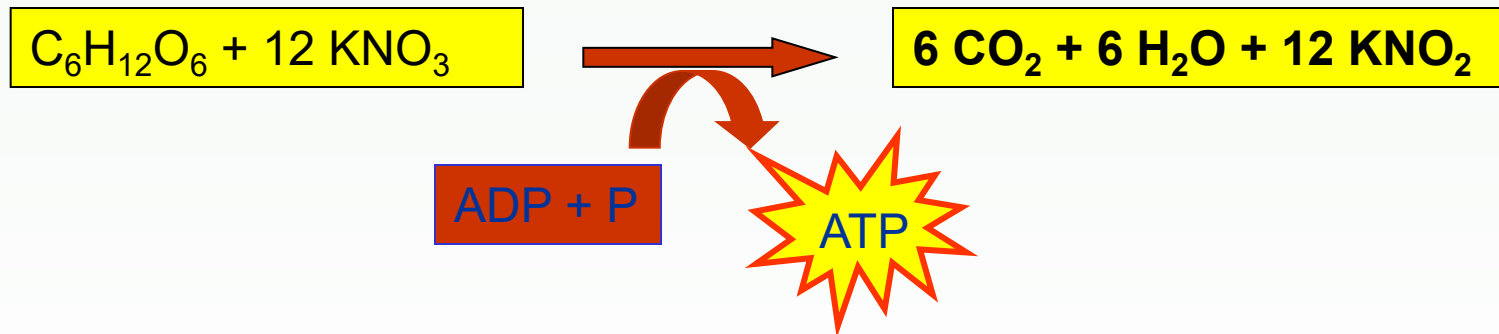
Le NADH (ou le FADH_2) cède ses électrons riches en énergie à un transporteur d'électrons de la membrane interne de la mitochondrie. Les transporteurs sont des protéines.

Les électrons passent d'un transporteur à l'autre. À chaque transfert, ils perdent de l'énergie.

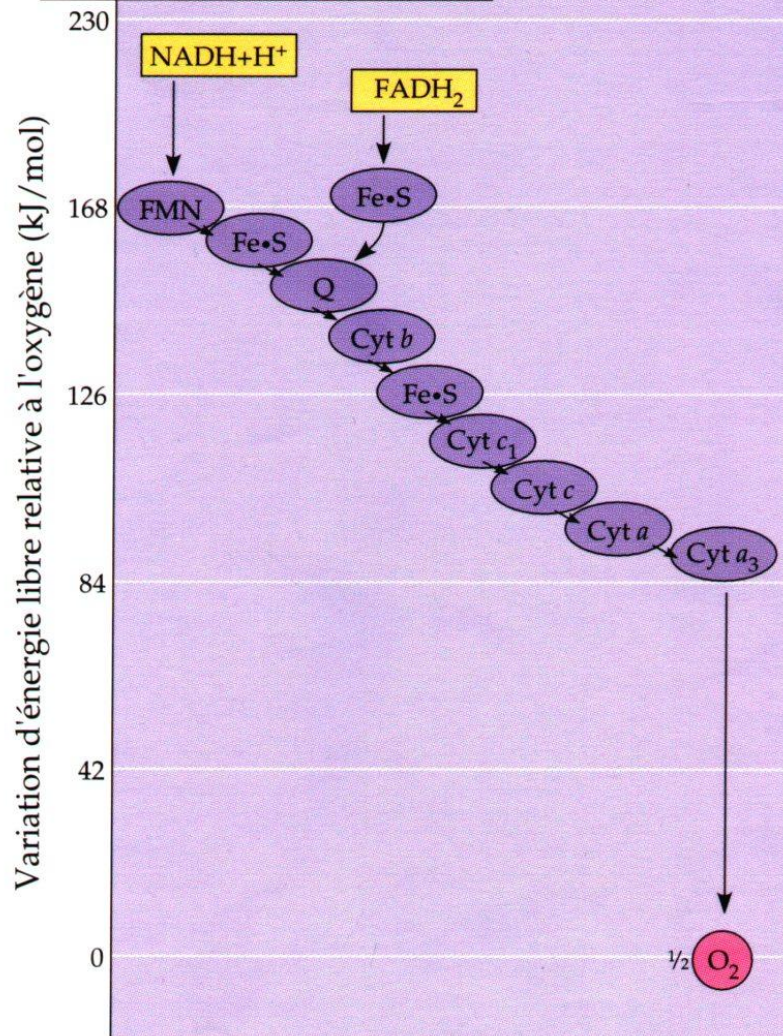
L'oxygène accepte les électrons à la fin de la chaîne et se combine aux 2H^+ pour former de l'eau.

Certaines bactéries vivant en milieu anaérobie (*sans air*) utilisent autre chose que de l'O₂ pour accepter les électrons (sulfate ou nitrate) = **respiration anaérobie**

Ex.

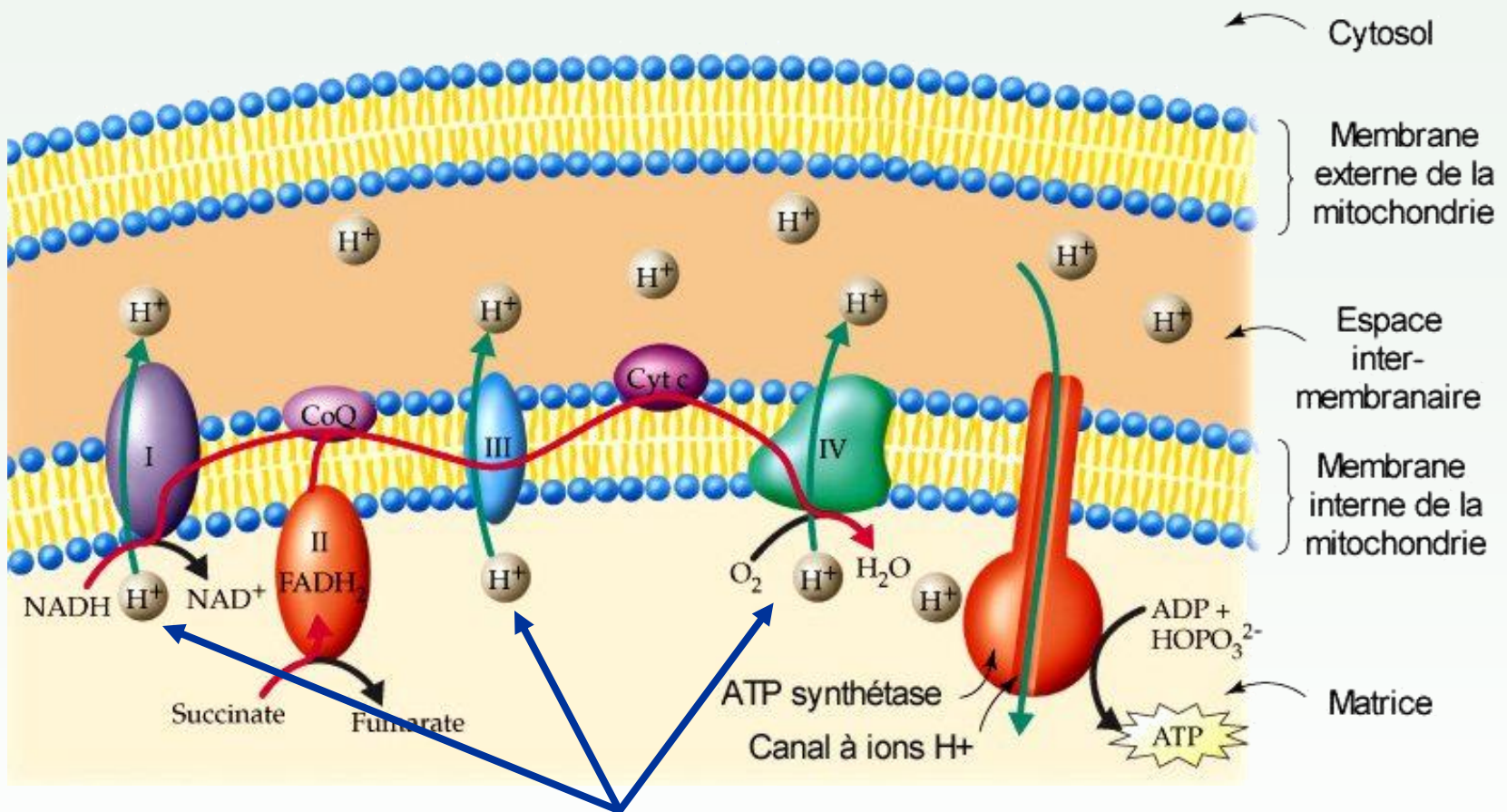


Chaîne de transport d'électrons dans la membrane interne de la mitochondrie



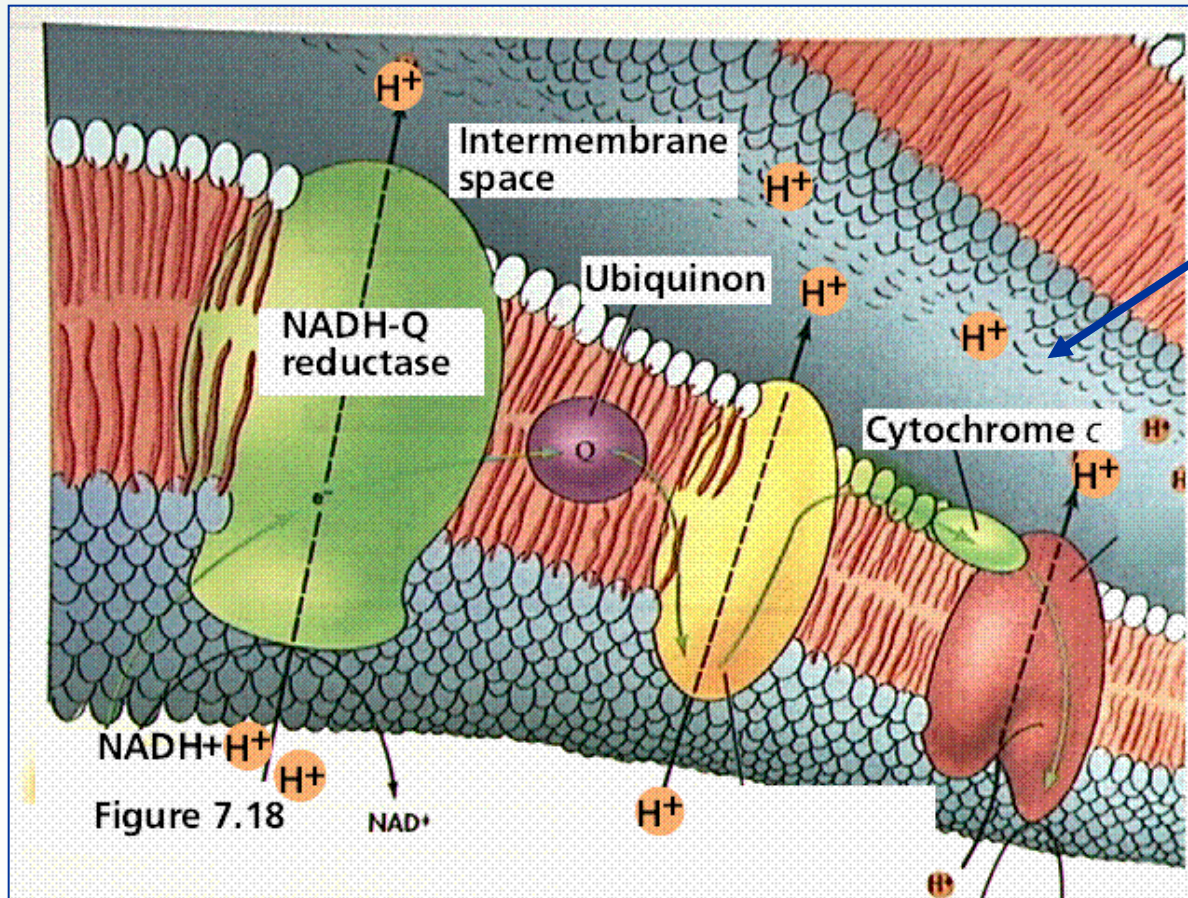
Les électrons riches en énergie sont transférés du NADH ou du FADH₂ à des transporteurs d'électrons de la membrane interne de la mitochondrie (ce sont des protéines). À chaque transfert, l'électron perd de l'énergie. À la fin de la chaîne, l'électron qui a perdu beaucoup d'énergie peut être accepté par l'oxygène.

Les électrons perdent de l'énergie à chaque transfert.



L'énergie provenant des électrons transférés sert à "pomper" des ions H^+ dans l'espace intermembranaire de la mitochondrie (entre la membrane externe et l'interne)

Formation d'un gradient électrochimique



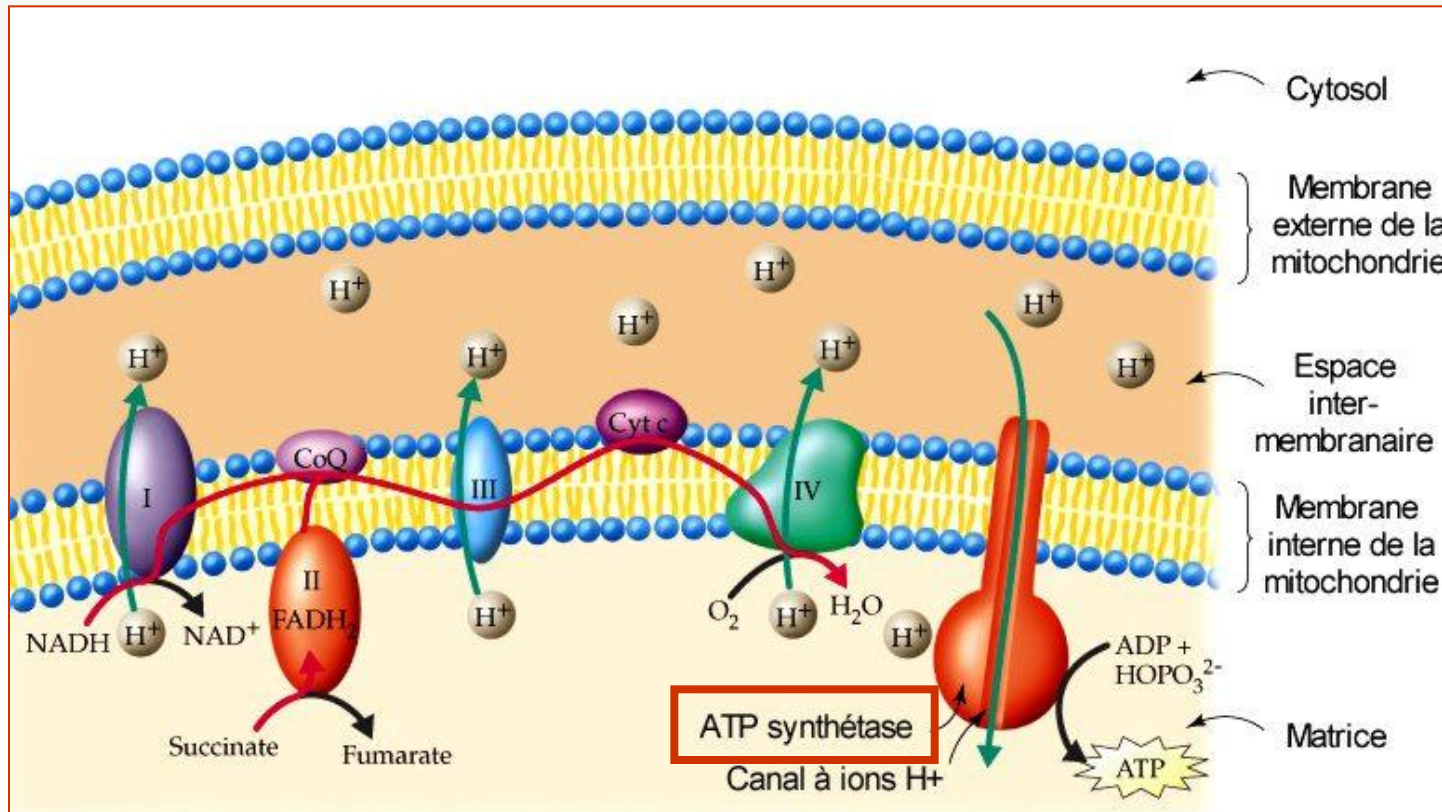
Accumulation d'ions H^+ dans l'espace intermembranaire

Gradient de concentration : l'espace intermembranaire devient plus concentré en ions H^+ (plus acide).

Gradient électrique : un côté de la membrane devient positif (accumulation d'ions $+$) et l'autre, négatif (déficit en ions $+$ par rapport aux ions $-$).

Gradient électrochimique ==> les ions H^+ ont tendance à diffuser vers la matrice (= force protomotrice).
Ils le font en passant par des **ATP synthétases**.

GRADIENT = ÉNERGIE POTENTIELLE

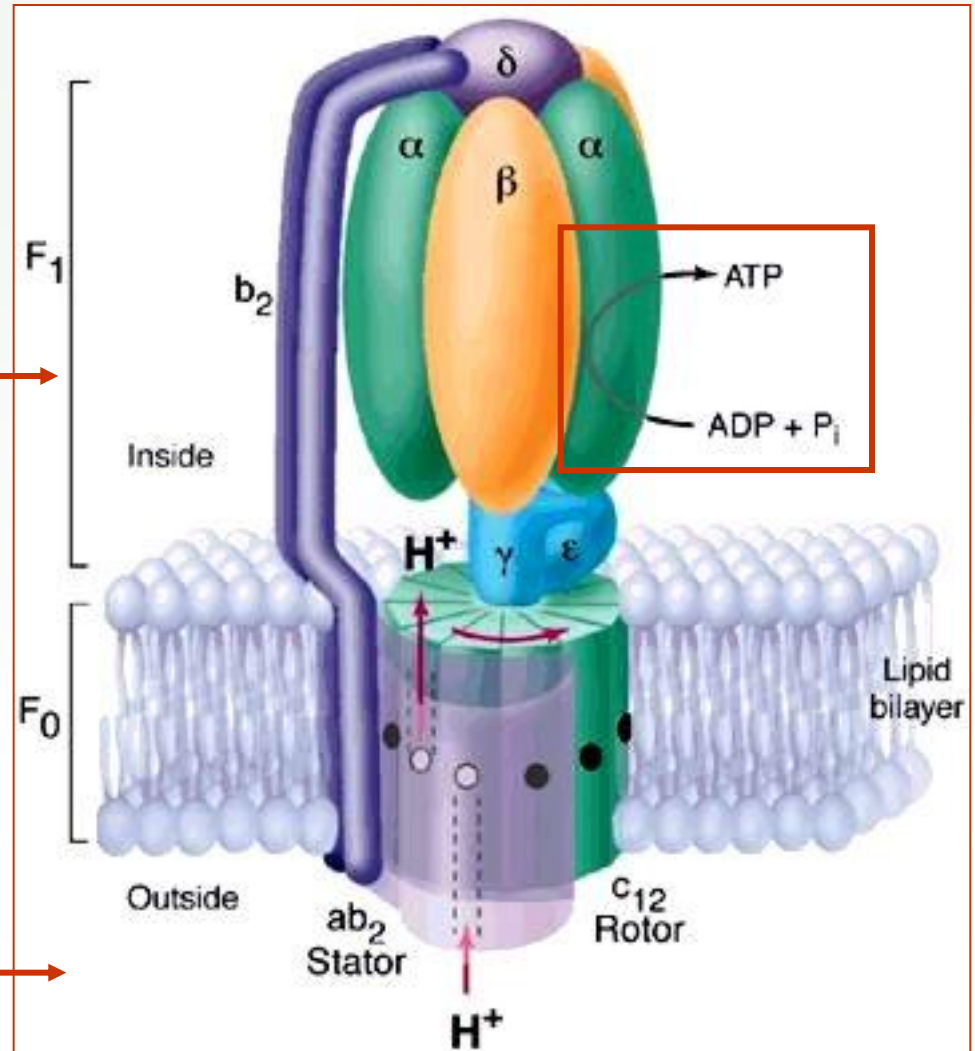


Chimiosmose

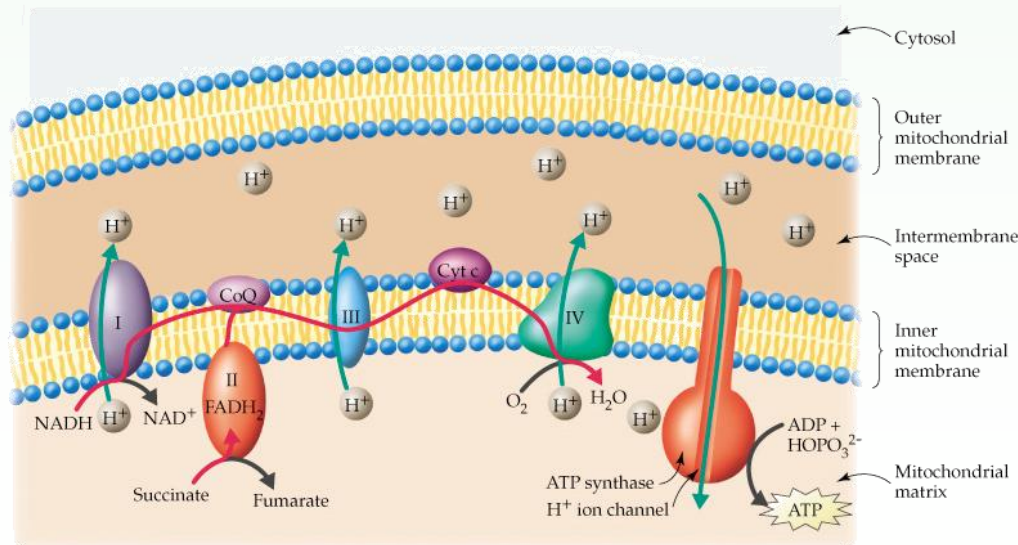
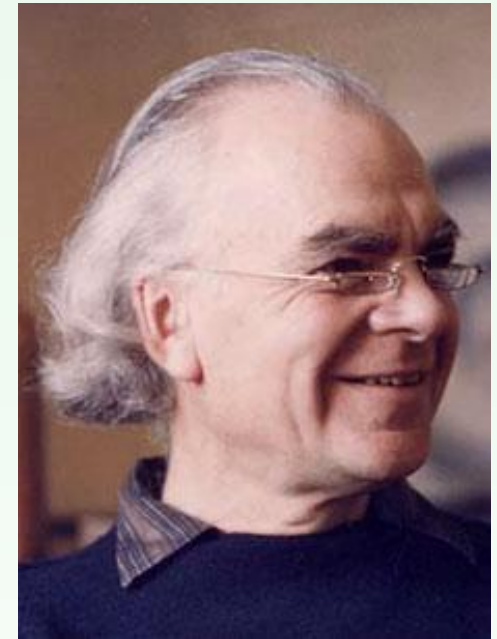
La force protonmotrice
(ions H^+ qui diffusent à
travers l'**ATP synthétase**
en suivant leur gradient)
permet la formation
d'ATP à partir d'ADP et P_i .

Matrice

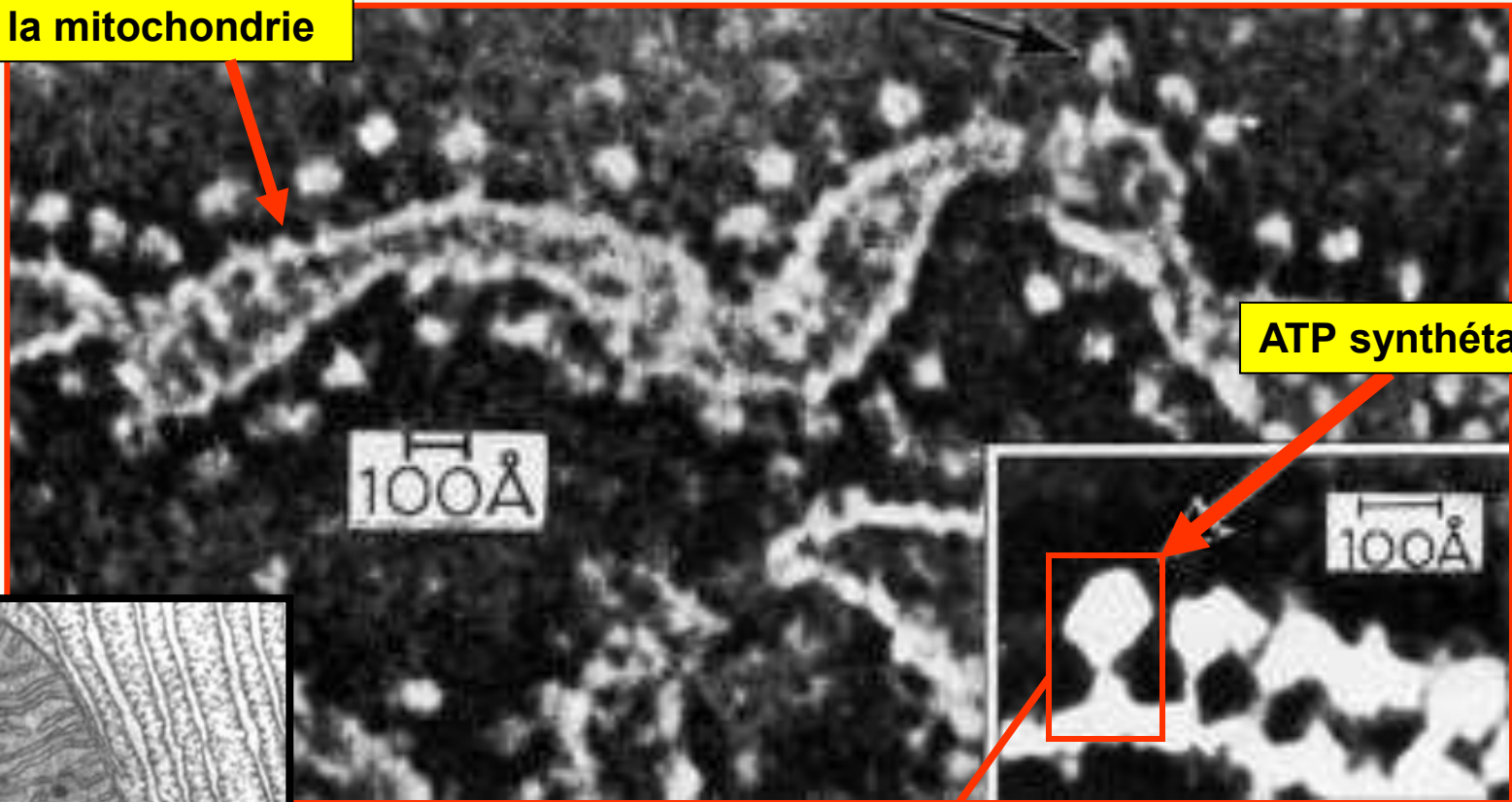
Espace intermembranaire



Peter Mitchell (1920-1992) a remporté le prix Nobel de chimie en 1978 pour sa théorie de la **chimiosmose** mitochondriale (le gradient de concentration de protons formé de part et d'autre de la membrane interne sert de **réservoir d'énergie libre** pour la synthèse d'ATP).



**Membrane interne
de la mitochondrie**



ATP synthétase

$100\text{ \AA}$

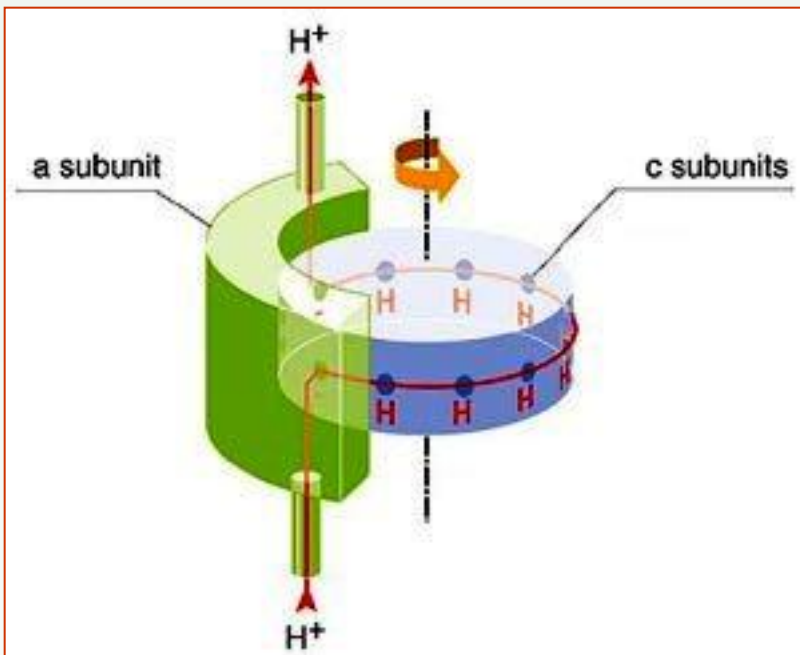
$100\text{ \AA}$



$100\text{ \AA} = 10\text{ nm}$



Une mitochondrie typique de
foie de mammifère contient
environ 15 000 ATP synthétase



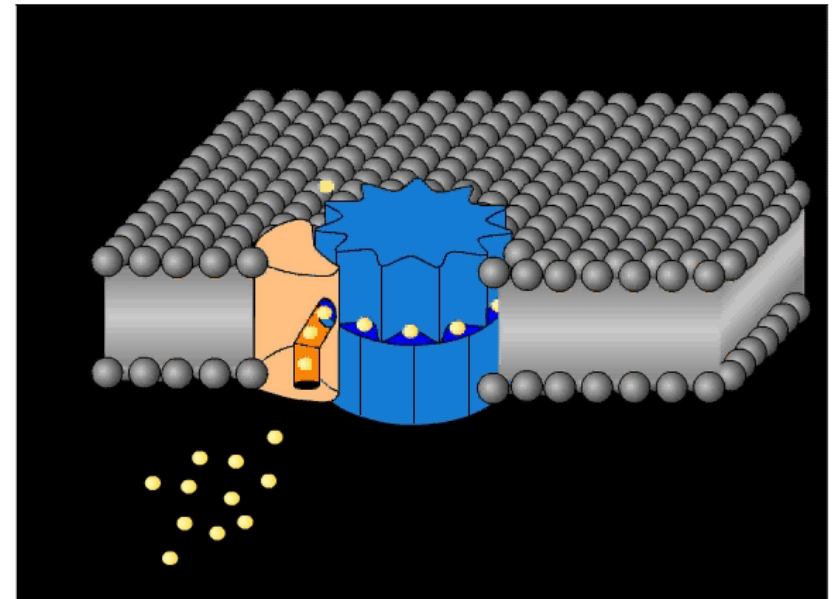
**Vitesse de rotation
= 50 à 100 tours / seconde**

Voir : [ATP synthase animation](#)

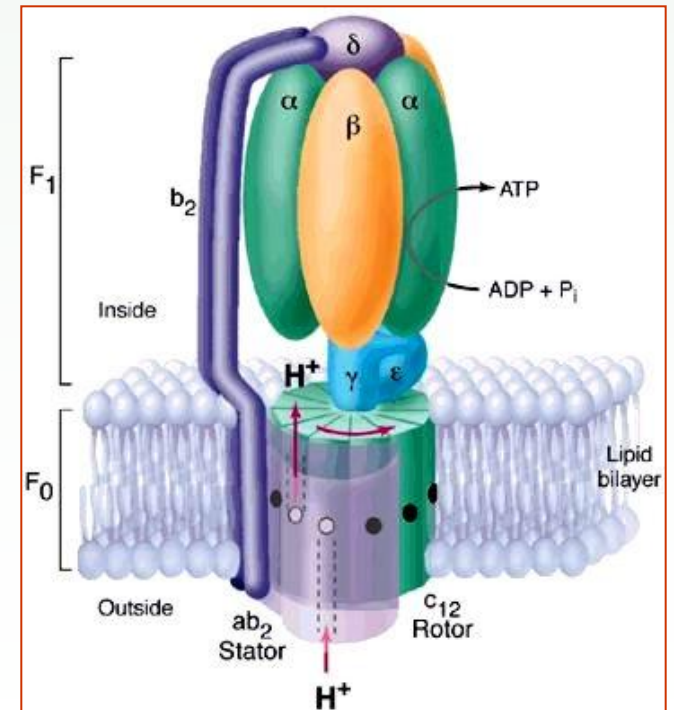
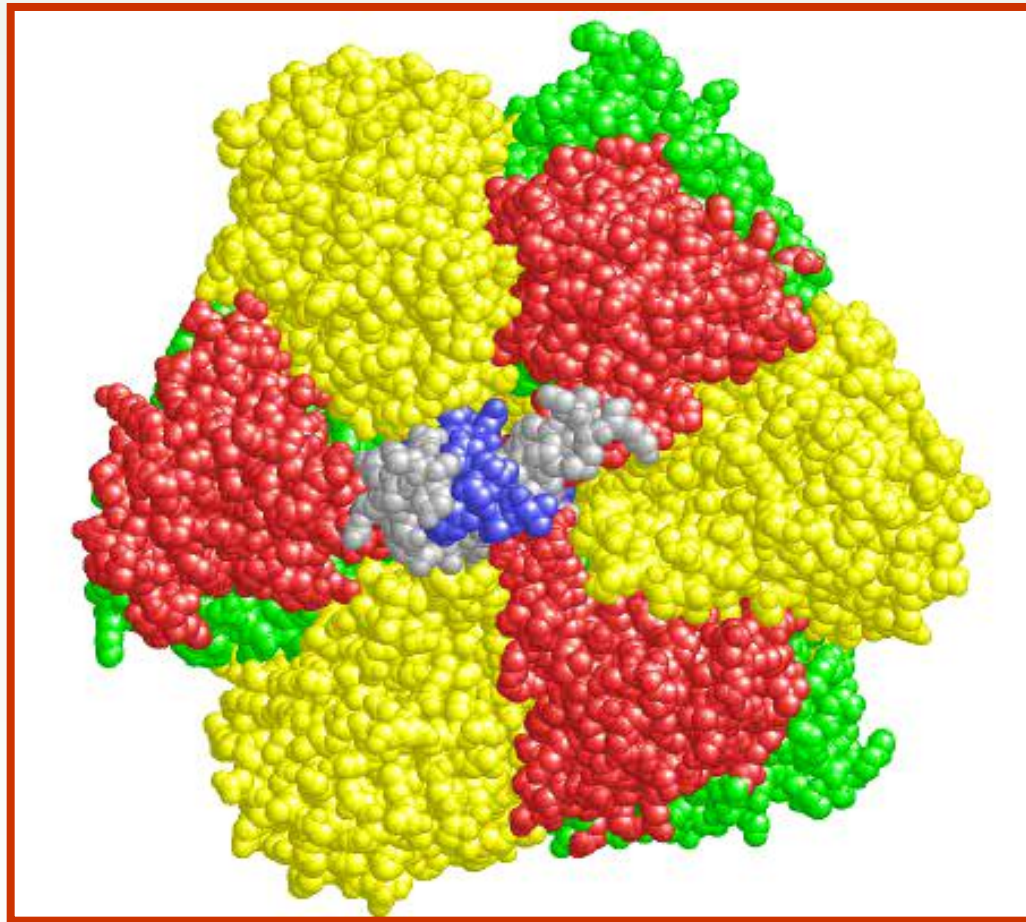
**Le passage des ions H^+ entraîne
la rotation de la sous-unité « c ».**

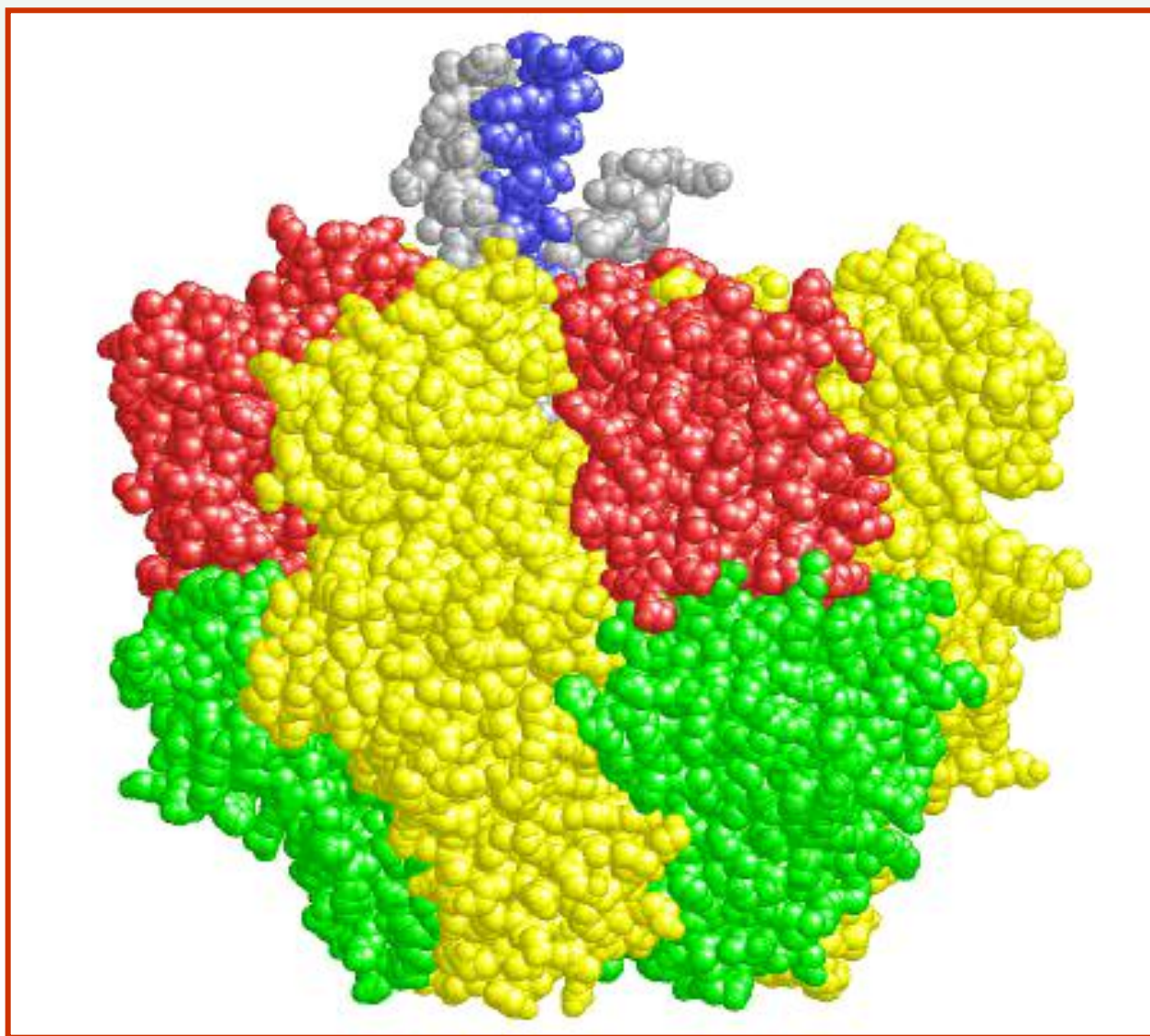
**C'est ce mouvement qui permet
la formation d'ATP à partir
d'ADP et P dans la partie qui
dépasse de la membrane.**

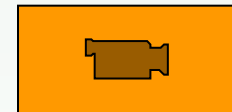
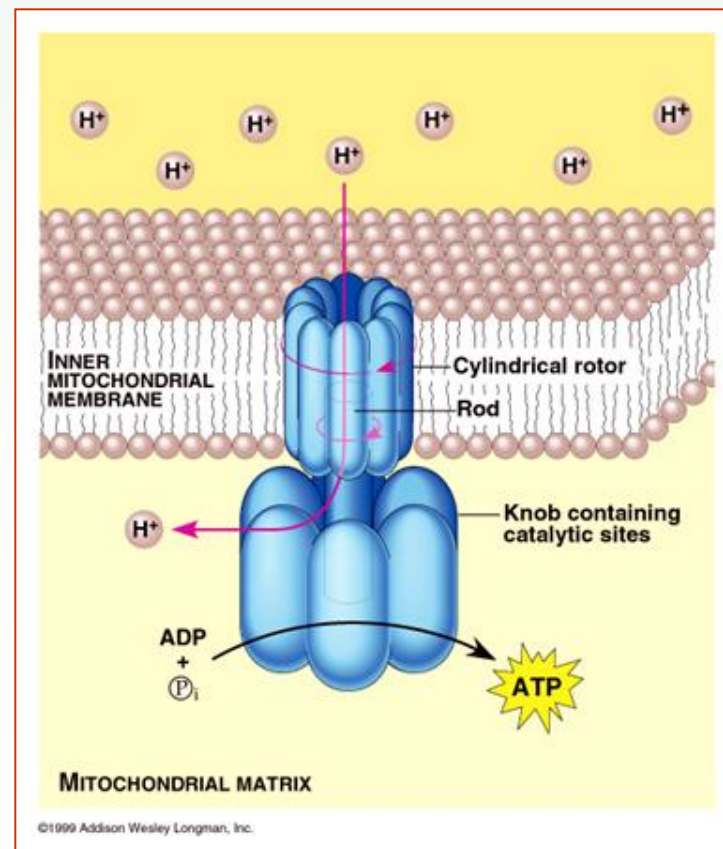
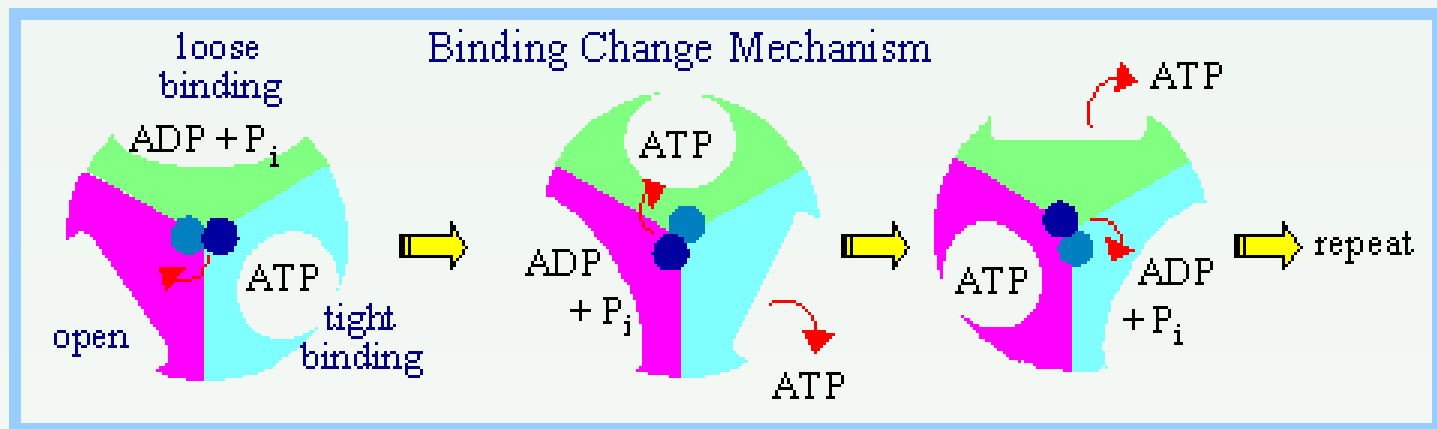
Voir: [L'ATP synthase](#)

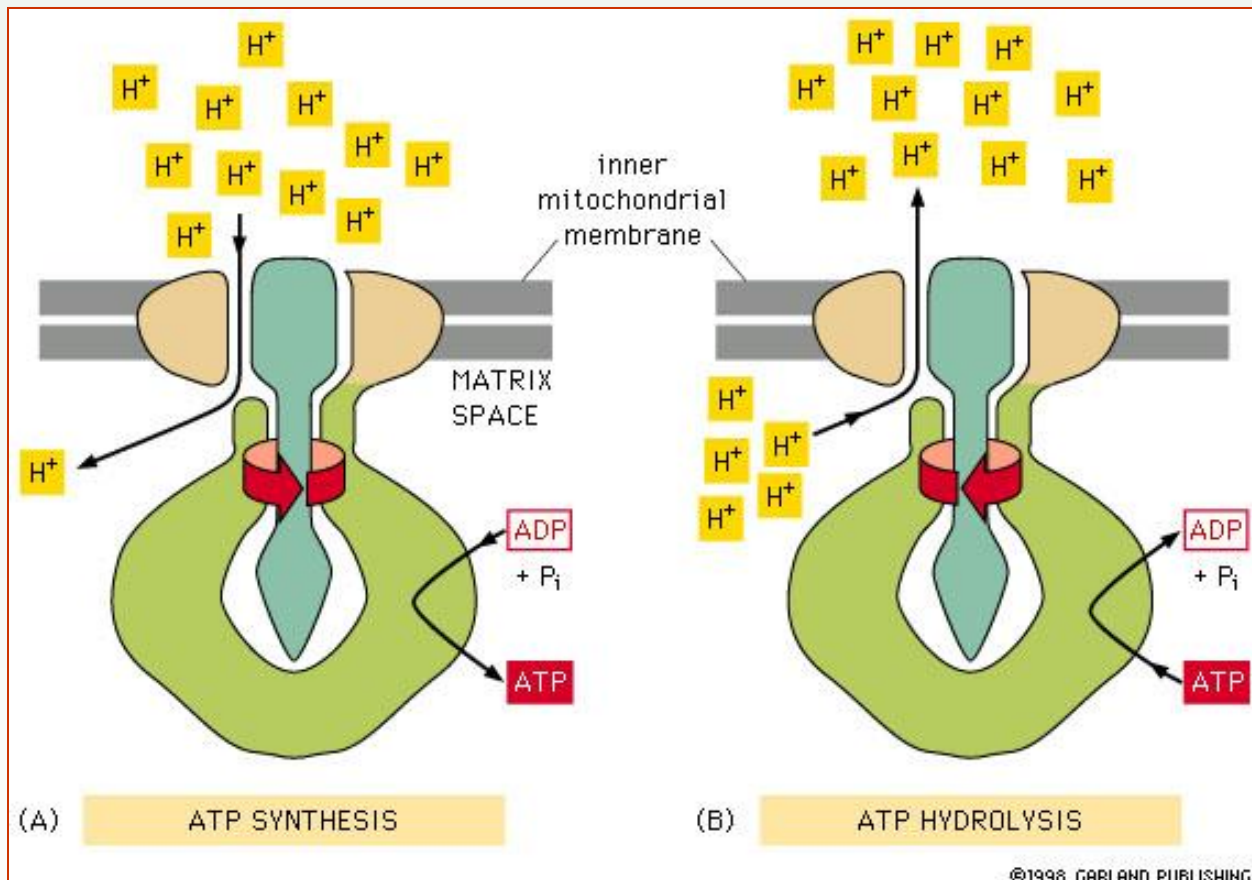


La « turbine à protons »





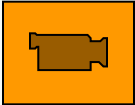




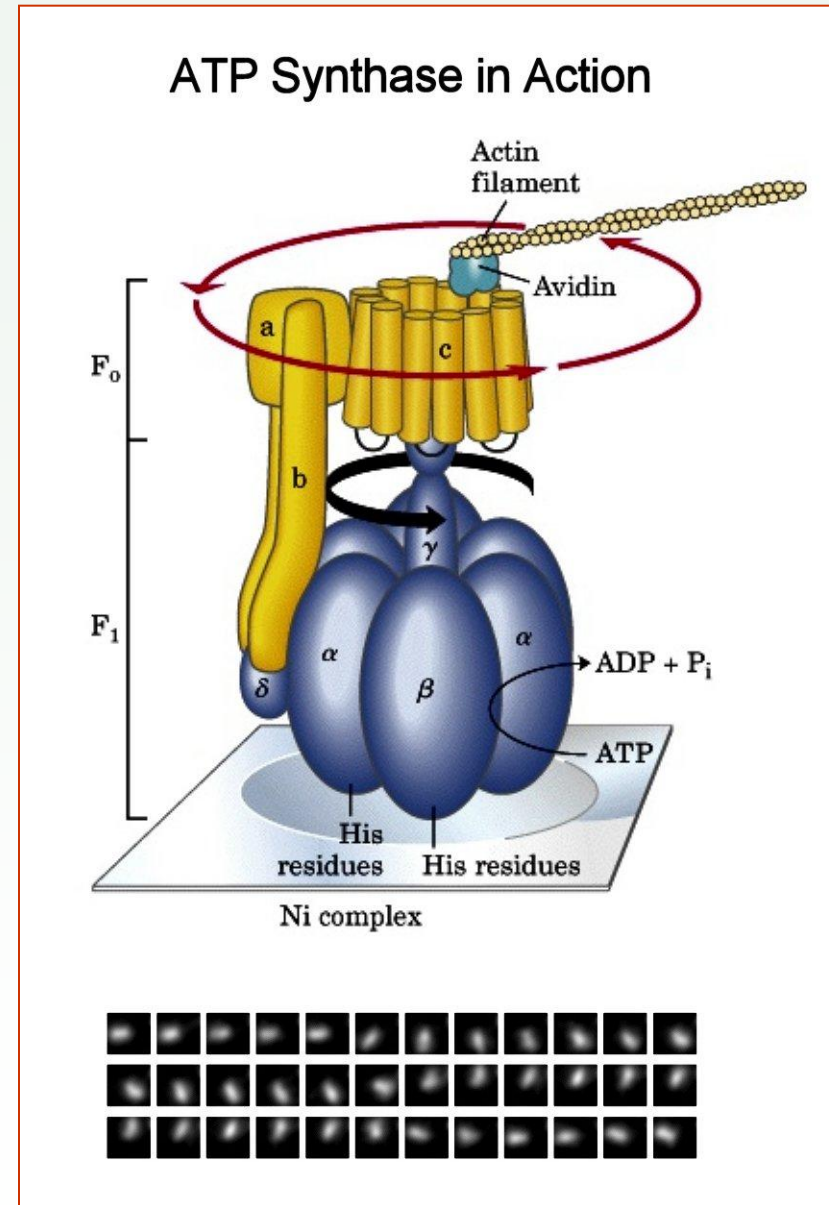
On peut inverser la rotation et le passage d'ions H^+ en transformant des ATP en ADP.

L'ATP synthétase peut donc être convertie en un nanomoteur.

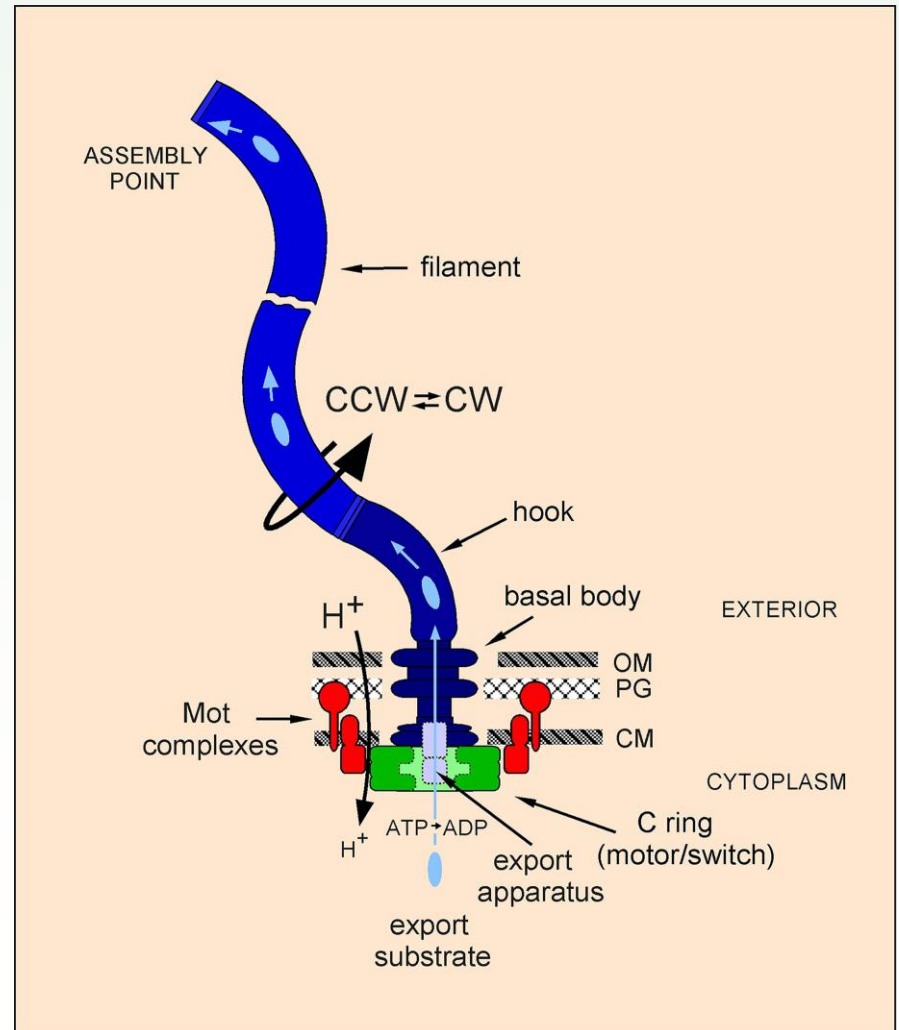
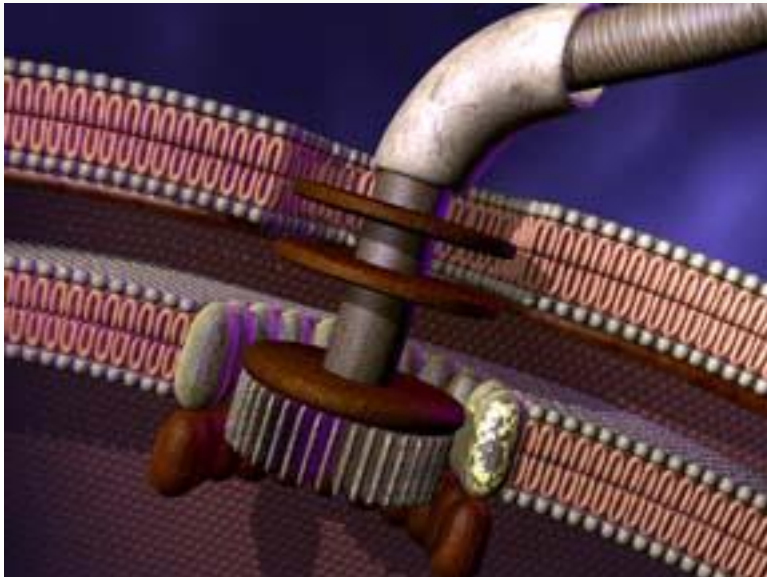
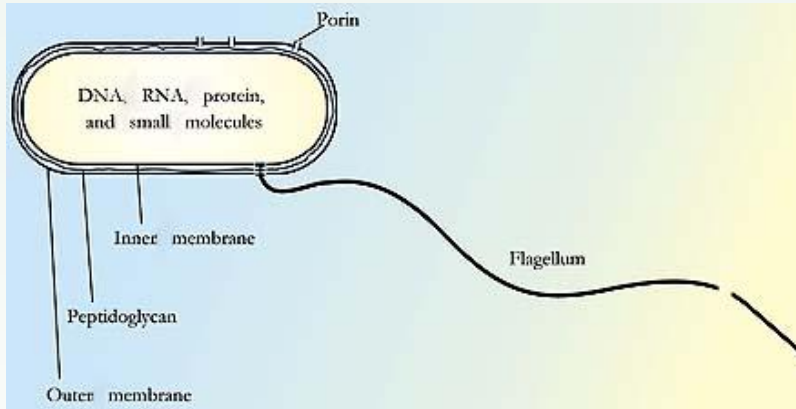
On a fixé un long filament d'actine (une protéine) sur la portion mobile de la protéine pour pouvoir observer le mouvement de rotation.

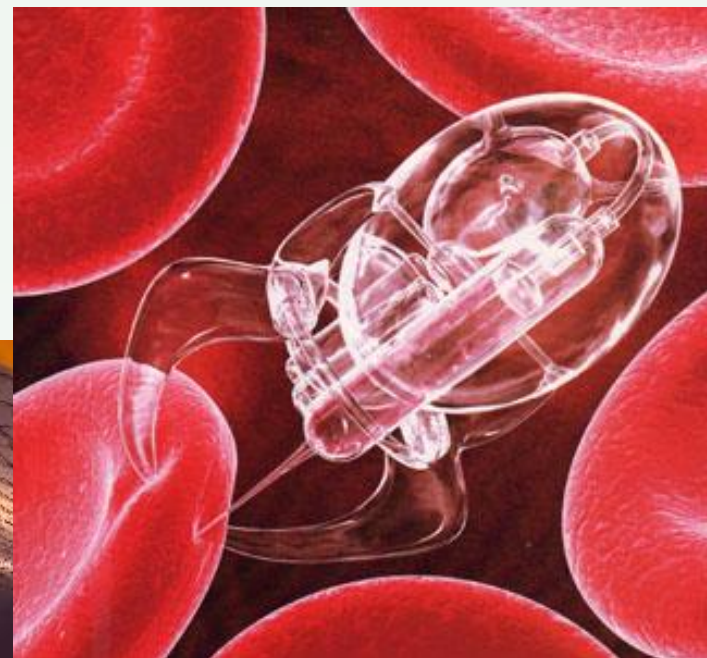
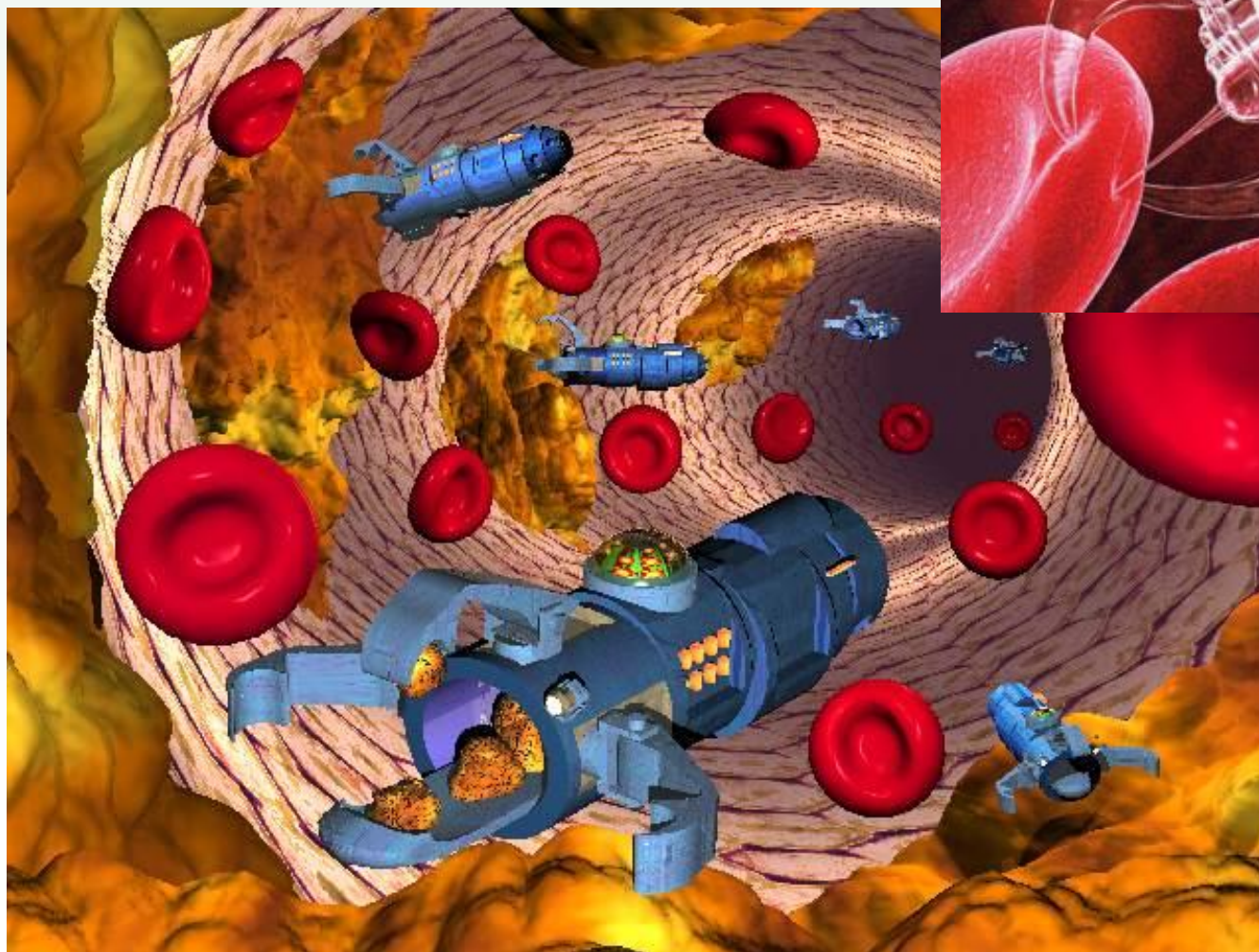


Vitesse de rotation
= 50 à 100 tours / seconde



Chez beaucoup de procaryotes, une structure semblable à l'ATP synthétase sert à faire tourner un long fouet appelé "flagelle" permettant à la cellule de se déplacer.





Paul D. Boyer (UCLA) et **John E. Walker** (Cambridge) ont remporté (avec Jens C. Skou) le Nobel de chimie 1997 pour leur découverte du fonctionnement de l'ATP synthétase.



Paul D. Boyer



John E. Walker

Voir : <http://nobelprize.org/chemistry/laureates/1997/index.html>

Bilan de la respiration :

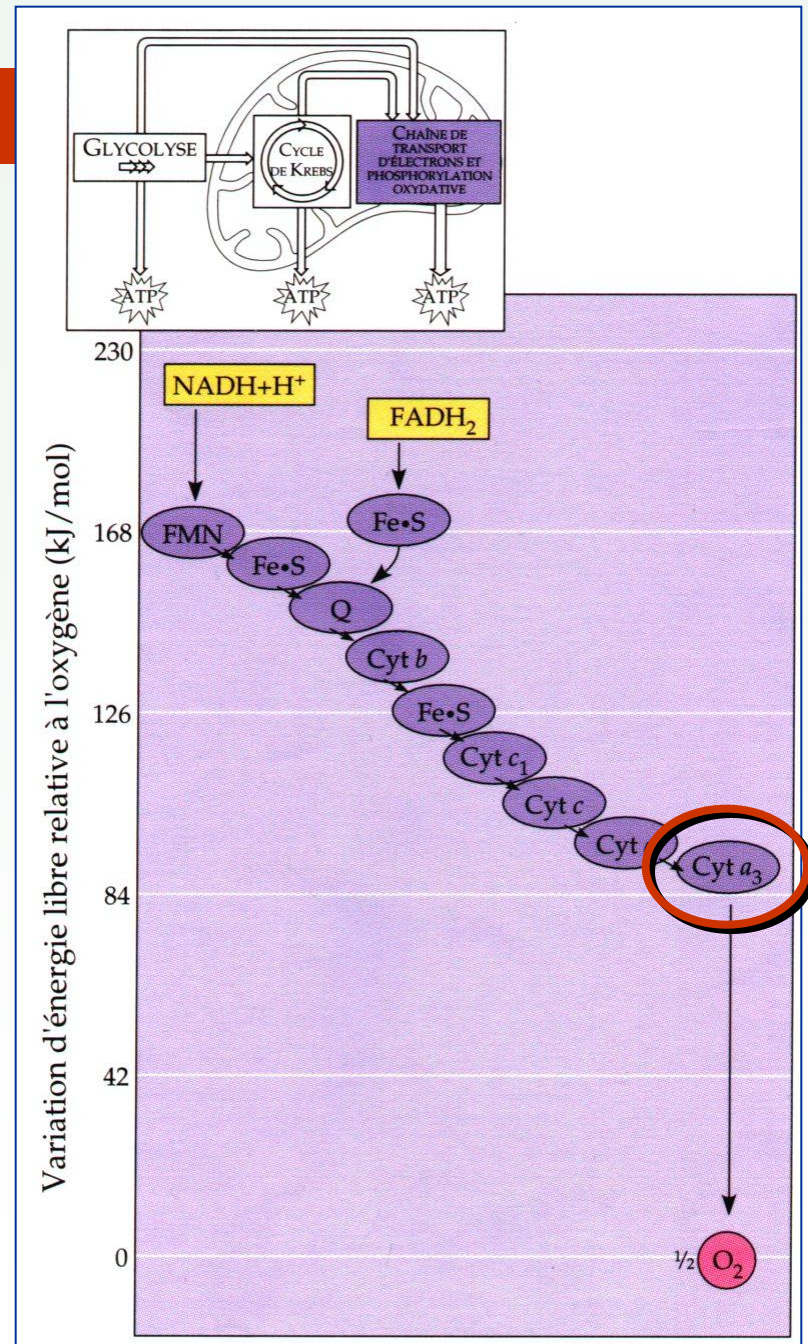
Théoriquement, chaque mole de glucose devrait pouvoir produire 38 moles d'ATP (2 dans la glycolyse, 2 dans le cycle de Kreb et 34 dans la chaîne respiratoire) = rendement d'environ 40% (40% de l'énergie du glucose convertie en ATP et 60% en chaleur)

En pratique, la cellule parvient à tirer environ une trentaine d'ATP par molécule de glucose.

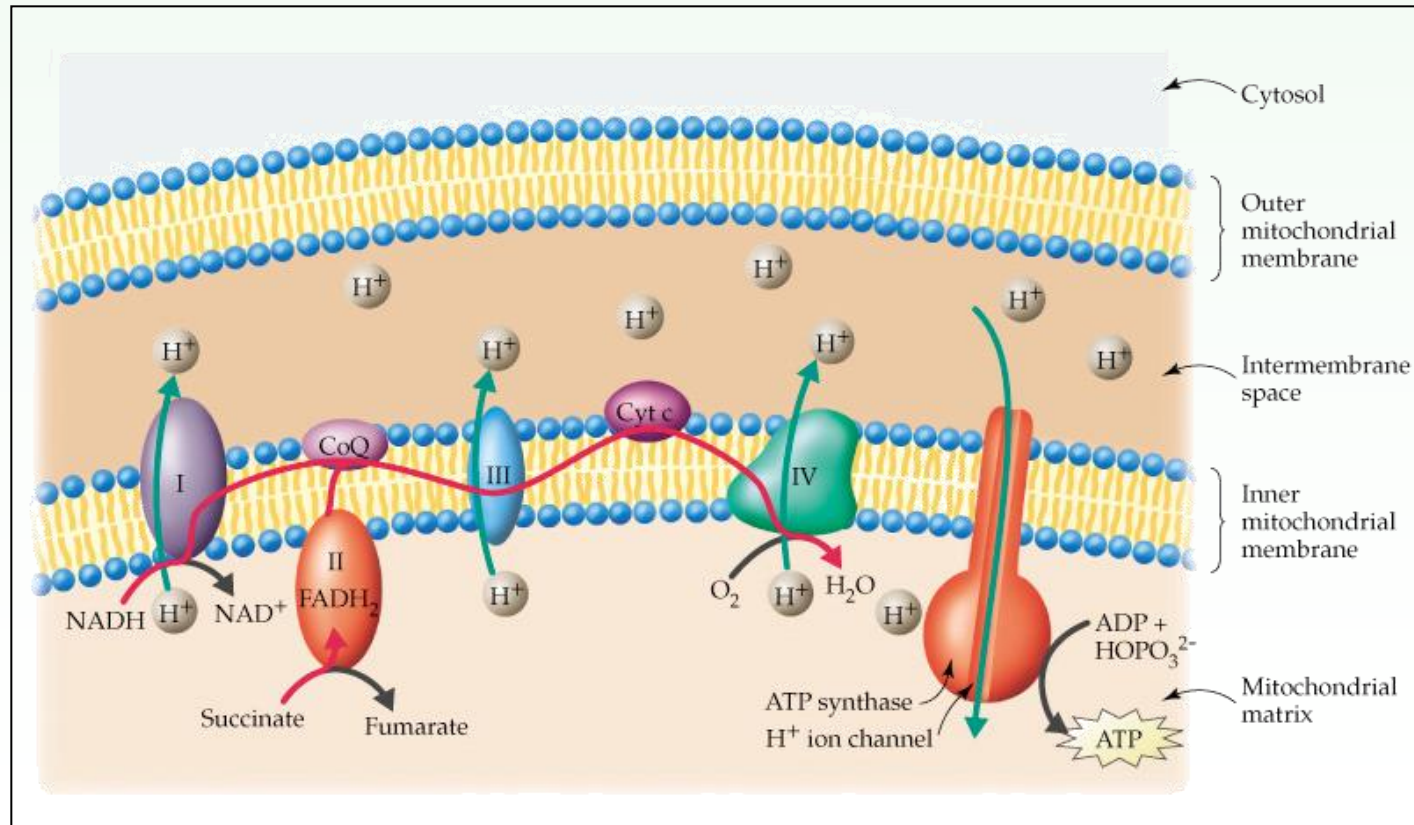
Effets de quelques poisons

Le **cyanure**: bloque le passage des électrons du cytochrome a_3 (un des transporteurs d'électrons de la membrane) à l'oxygène.

Si les électrons captés par le cytochrome a_3 ne sont pas transmis à l'oxygène, tout arrête...



Le **dicoumarol** ou le **2,4 dinitrophénol** : augmente la perméabilité de la membrane aux ions H^+ . Les ions H^+ diffusent à travers la membrane sans passer par les ATP synthétases. Leur énergie est convertie en chaleur (et non en ATP). <http://www.webspawner.com/users/dnp4sale/>

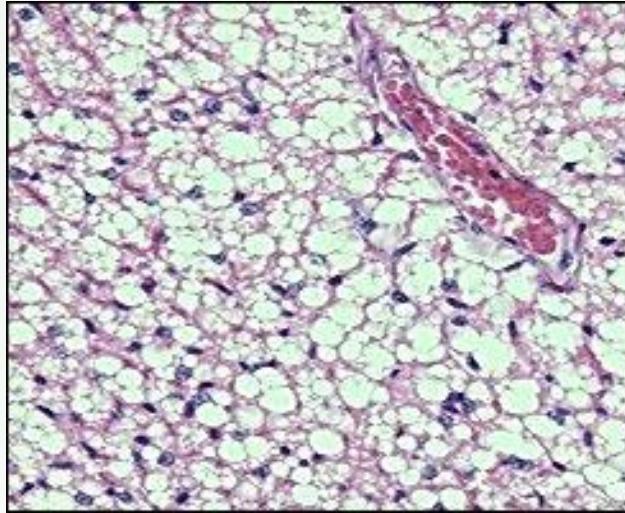


Le **dicoumarol** ou le **2,4 dinitrophénol** : augmente la **perméabilité de la membrane aux ions H^+** . Les ions H^+ diffusent à travers la membrane sans passer par les ATP synthétases. Leur énergie est convertie en chaleur (et non en ATP).

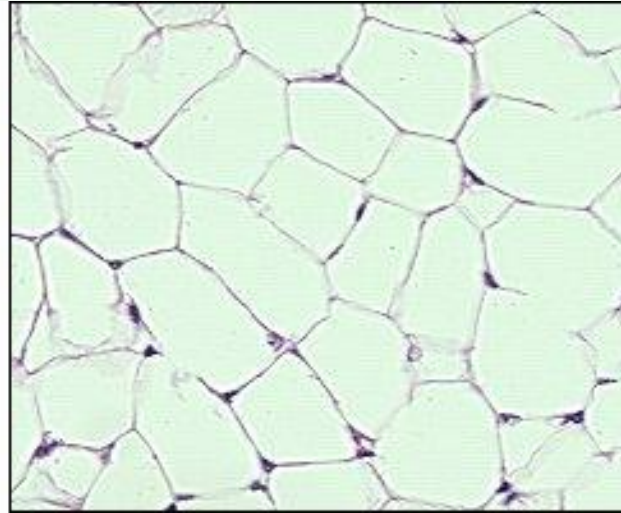
<http://www.webspawner.com/users/dnp4sale/>

Utilisé comme pesticide et pour protéger le bois de la dégradation.

Les graisses brunes



Graisse brune



Graisse blanche

- Cellules des graisses brunes riches en mitochondries.
- Les membranes des mitochondries possèdent des protéines de transport d'ions H^+ **non couplées à des ATP synthétase (*thermogénines*)**. L'énergie se dégage sous forme de chaleur.
- Abondant à la naissance chez l'humain (~5% du poids) et disparaît progressivement jusqu'à l'âge adulte.



***Symplocarpus foetidus* (Symplocarpe fétide)**

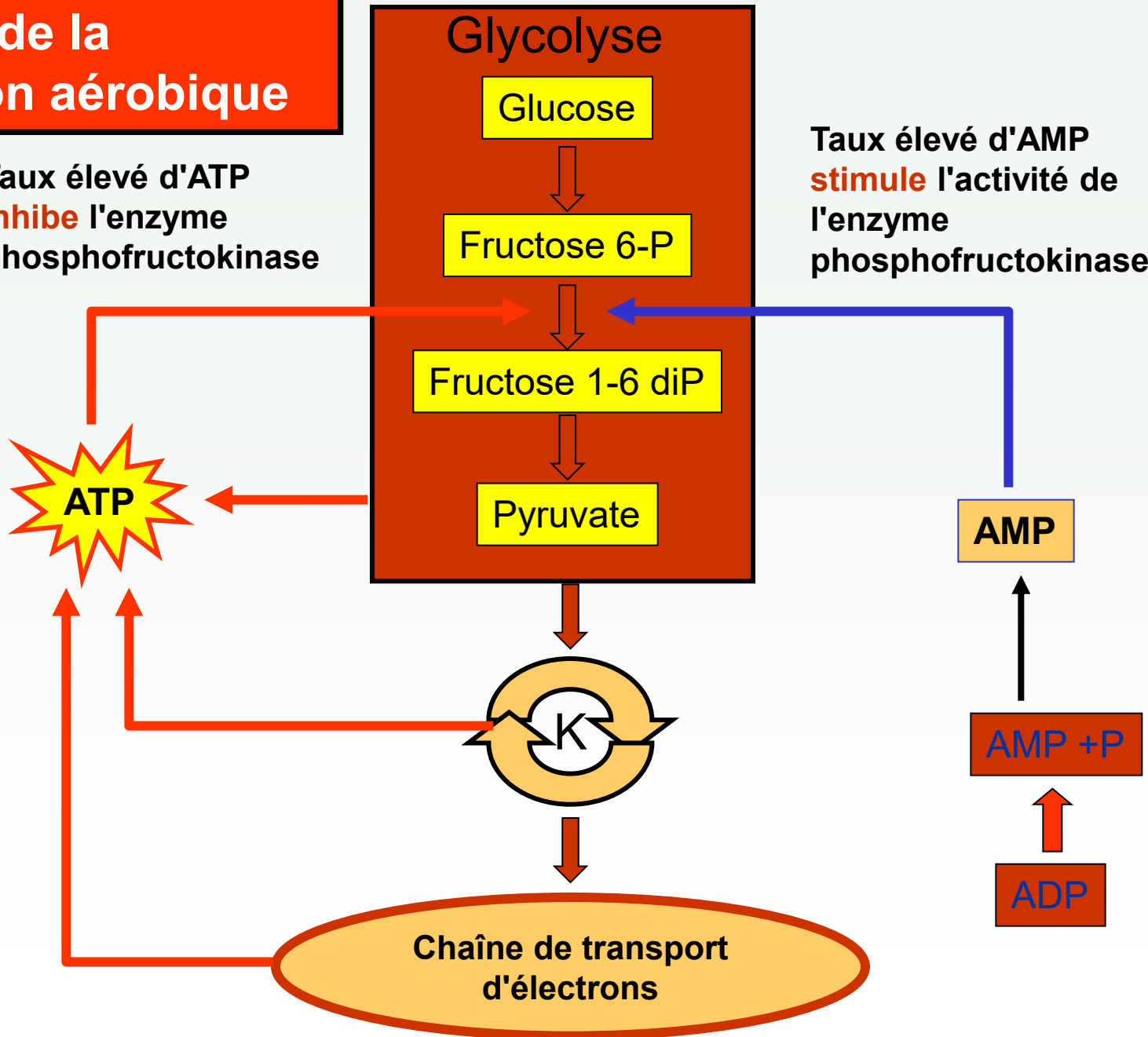
(Tabac du diable, Chou puant, Skunk cabbage)



Contrôle de la respiration aérobie

Taux élevé d'ATP
inhibe l'enzyme
phosphofructokinase

Taux élevé d'AMP
stimule l'activité de
l'enzyme
phosphofructokinase



Fermentation

- Production d'énergie sans utilisation d'oxygène
- Produit beaucoup moins d'énergie : 2 ATP par molécule de glucose contre 36 pour la respiration
- Plusieurs types : fermentation alcoolique, fermentation lactique, etc.

C_6 (glucose)

$2 \text{ ADP} + 2 \text{ P}$

2 ATP

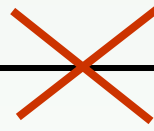
2 NAD^+

$2 \text{ NADH} + \text{H}^+$

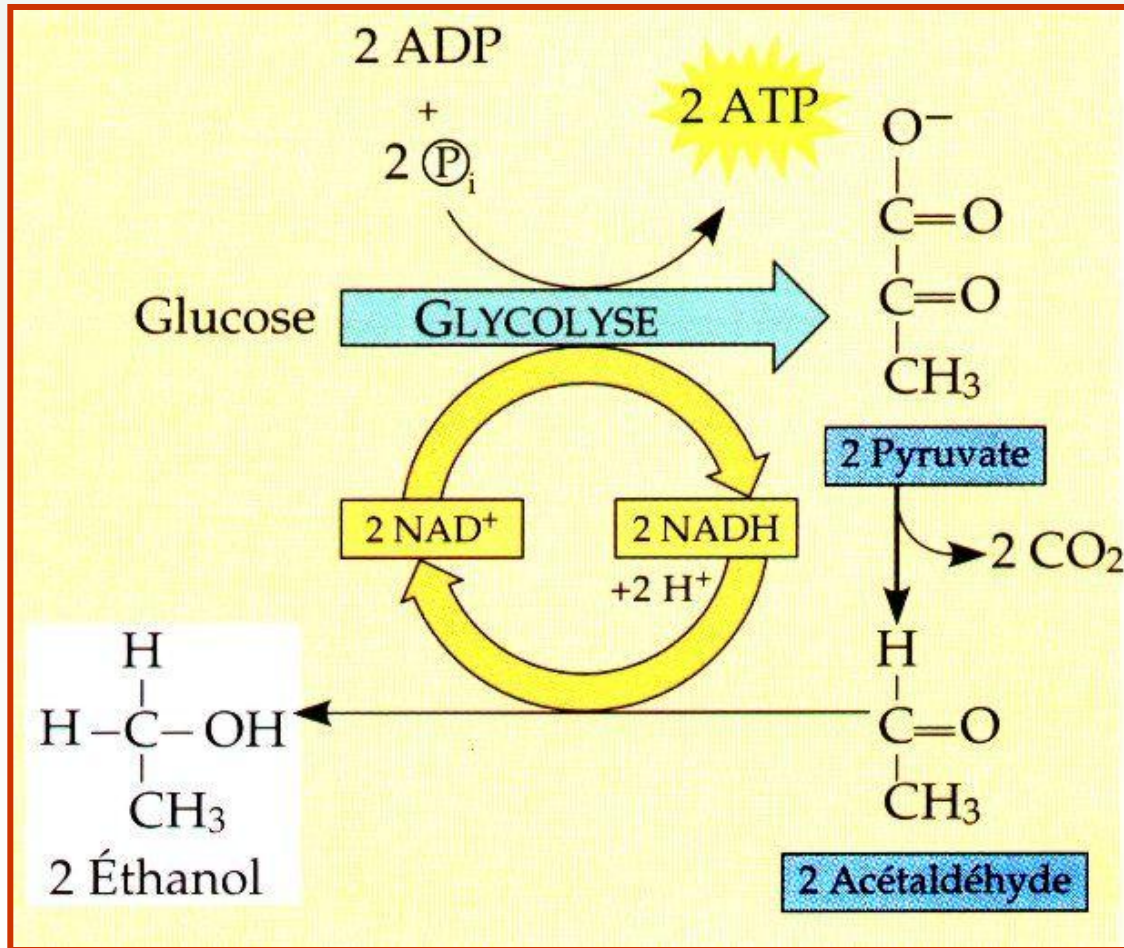
Mitochondrie

$2 C_3$ (pyruvate)

Un organisme pourrait-il
fonctionner en ne faisant que
de la glycolyse?

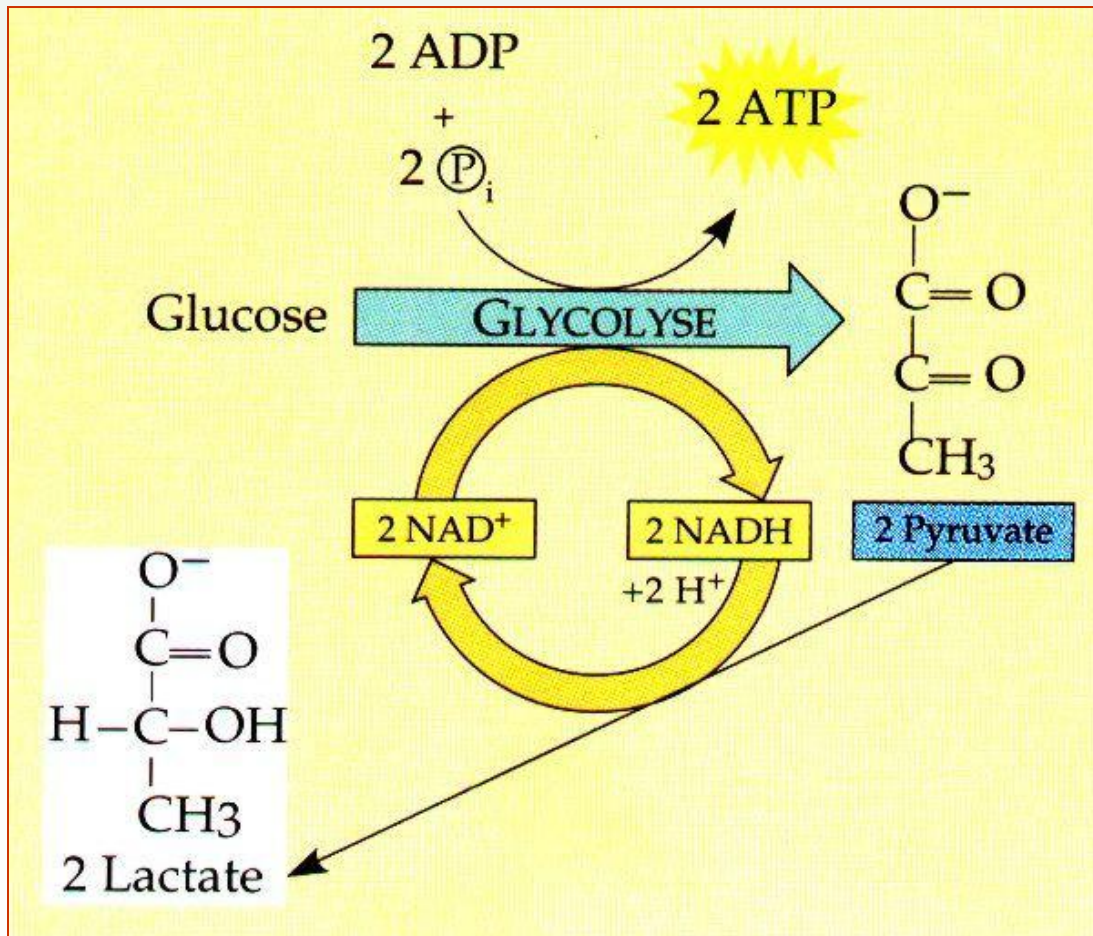


Fermentation alcoolique



La transformation du pyruvate en acétaldéhyde puis en alcool permet de redonner du NAD⁺ à partir du NADH

Fermentation lactique

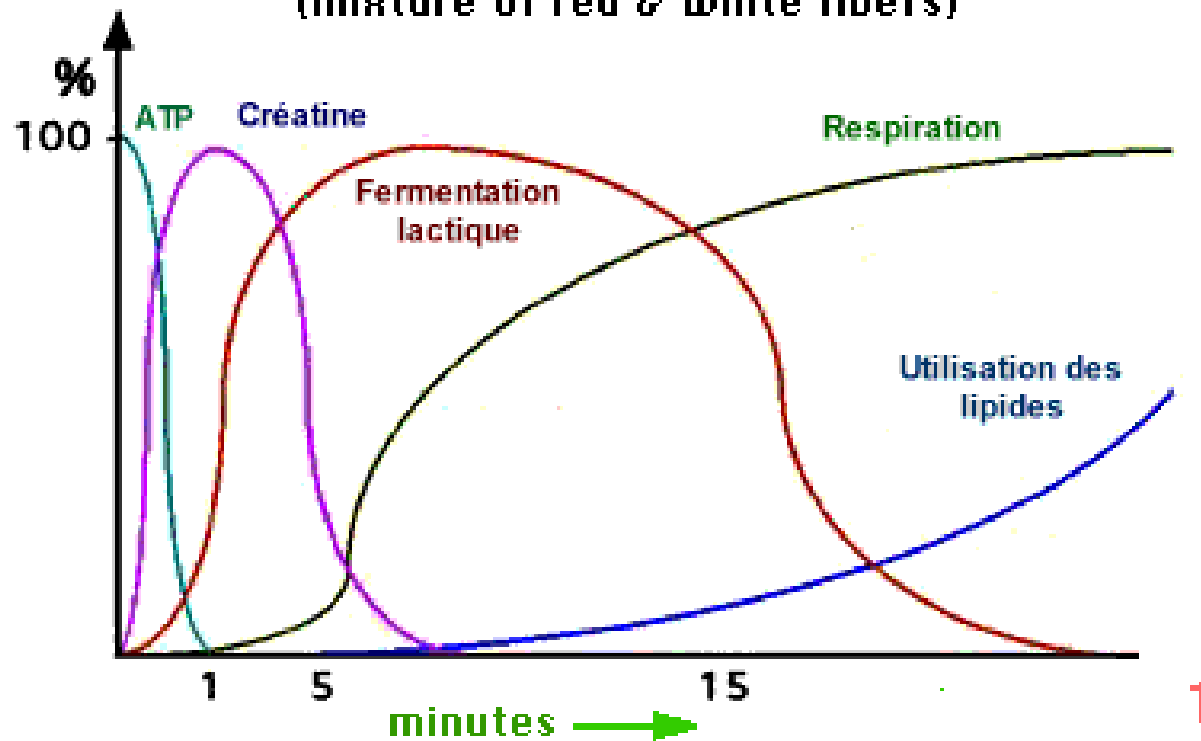


Les muscles font de la fermentation lactique s'il n'y a pas assez d'oxygène.

Le lactate produit peut être converti dans le foie en pyruvate qui peut ensuite être respiré.

Le NAD^+ est recyclé par la transformation du pyruvate en lactate (acide lactique)

Energy Sources of Skeletal Muscle Change during Work (mixture of red & white fibers)



Aérobie et anaérobie

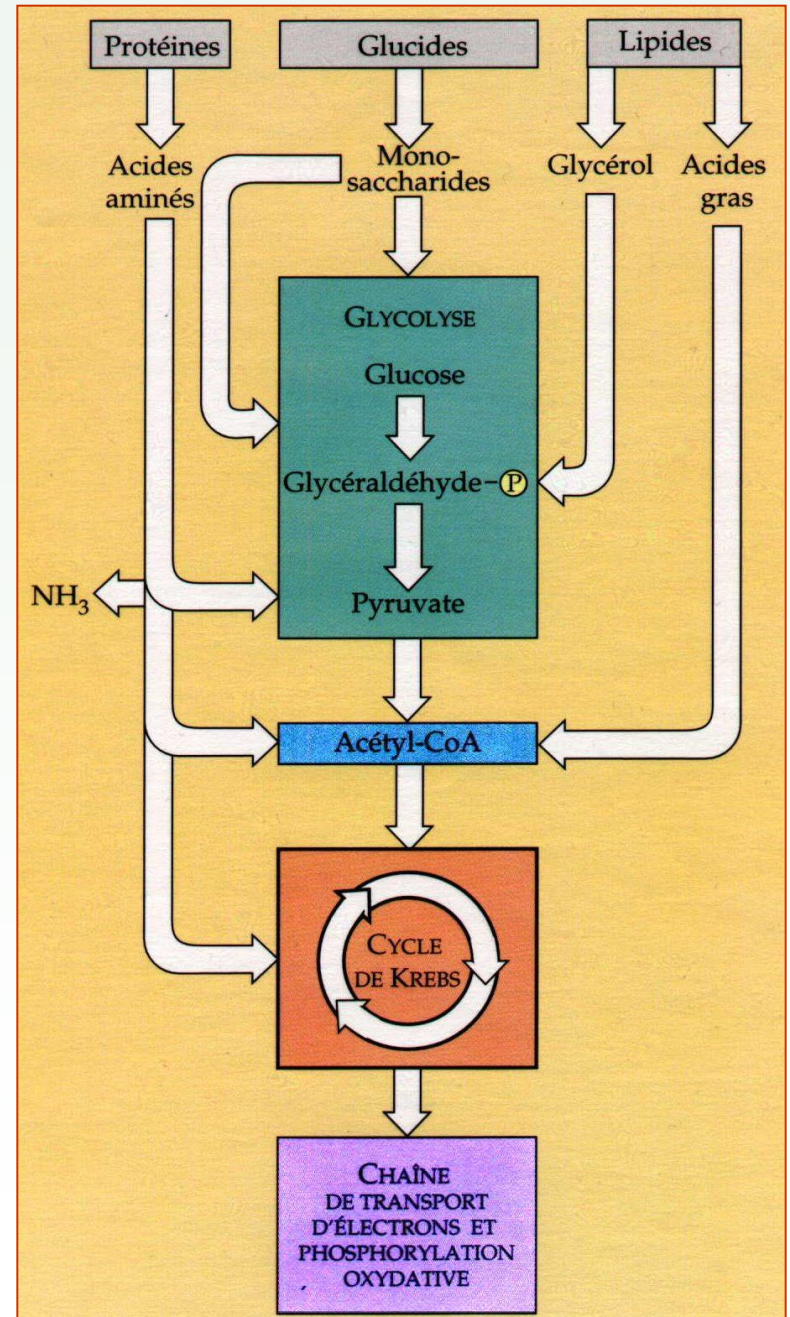
- Aérobie stricte
- Anaérobie stricte
- Aérobie facultative

Catabolisme des divers nutriments

Catabolisme = réactions au cours desquelles de grosses molécules sont réduites en molécules plus petites.

Par opposition à :

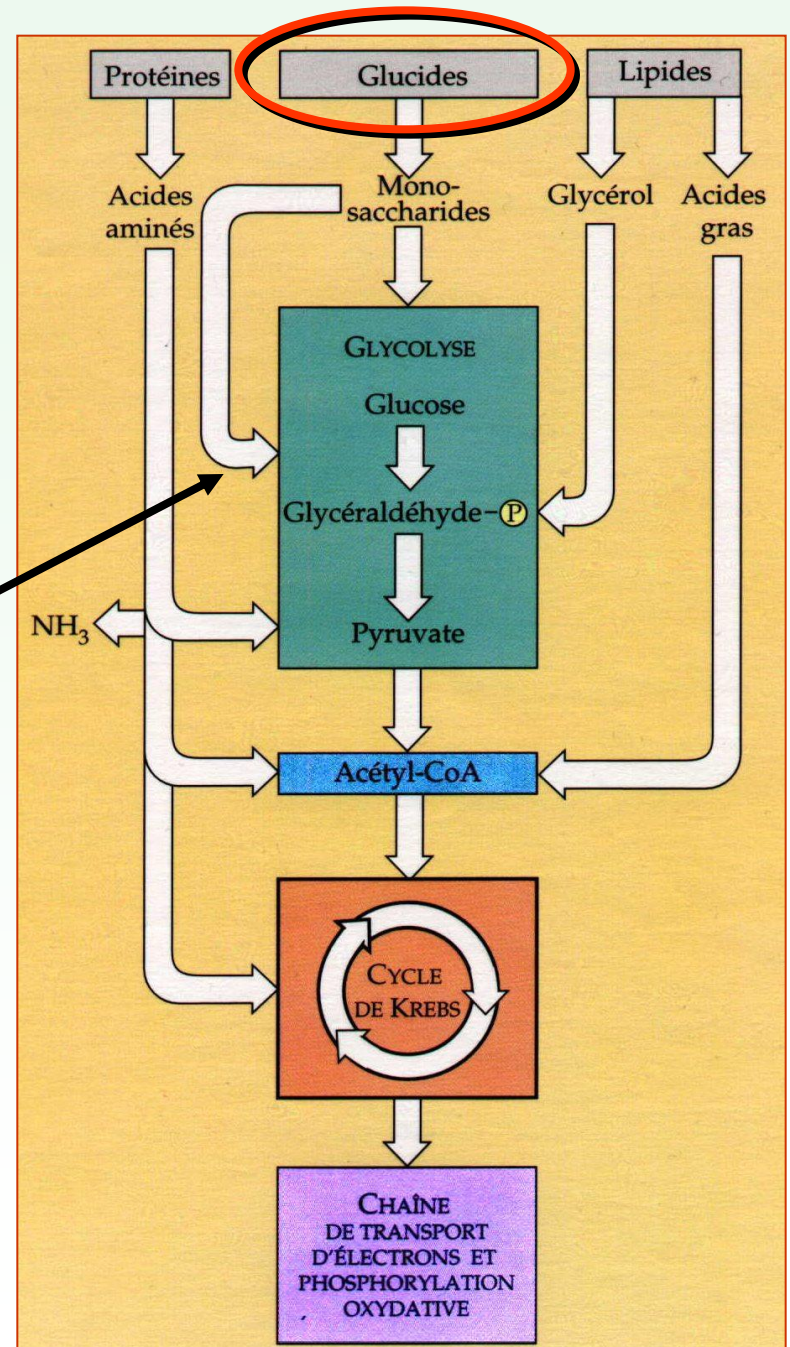
Anabolisme = réactions au cours desquelles de petites molécules sont assemblées pour en former de plus grosses.



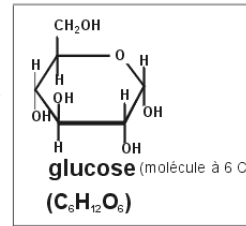
Catabolisme des glucides

Les glucides peuvent être utilisés dans le métabolisme énergétique s'ils sont réduits en **glucose** ou **fructose**.

Le fructose peut entrer dans la voie métabolique de la glycolyse au niveau du fructose 6-P



Glucose



hexokinase
ATP → ADP
glucose 6-phosphate

phosphohexose isomérase
glucose 6-phosphate ↔ fructose 6-phosphate

phospho-fructokinase
ATP → ADP
fructose 6-phosphate → fructose 1,6-diphosphate

aldolase
fructose 1,6-diphosphate → dihydroxyacétone 3-phosphate (molécule à 3 C) ↔ phosphoglyceraldéhyde (PGAL) (molécule à 3 C)

triose phosphate déshydrogénase
 P_i → NAD → NADH + H^+
1,3-diphosphoglycérate

phospho-glycérate kinase
ADP → ATP
1,3-diphosphoglycérate → 3-phosphoglycérate

3-phosphoglycérate

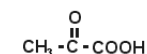
phosphoglycérate mutase
3-phosphoglycérate → 2-phosphoglycérate

2-phosphoglycérate

énolase
 H_2O
2-phosphoglycérate → phosphoénolpyruvate

pyruvate kinase
ADP → ATP
phosphoénolpyruvate → pyruvate

pyruvate



Fructose

ATP

ADP

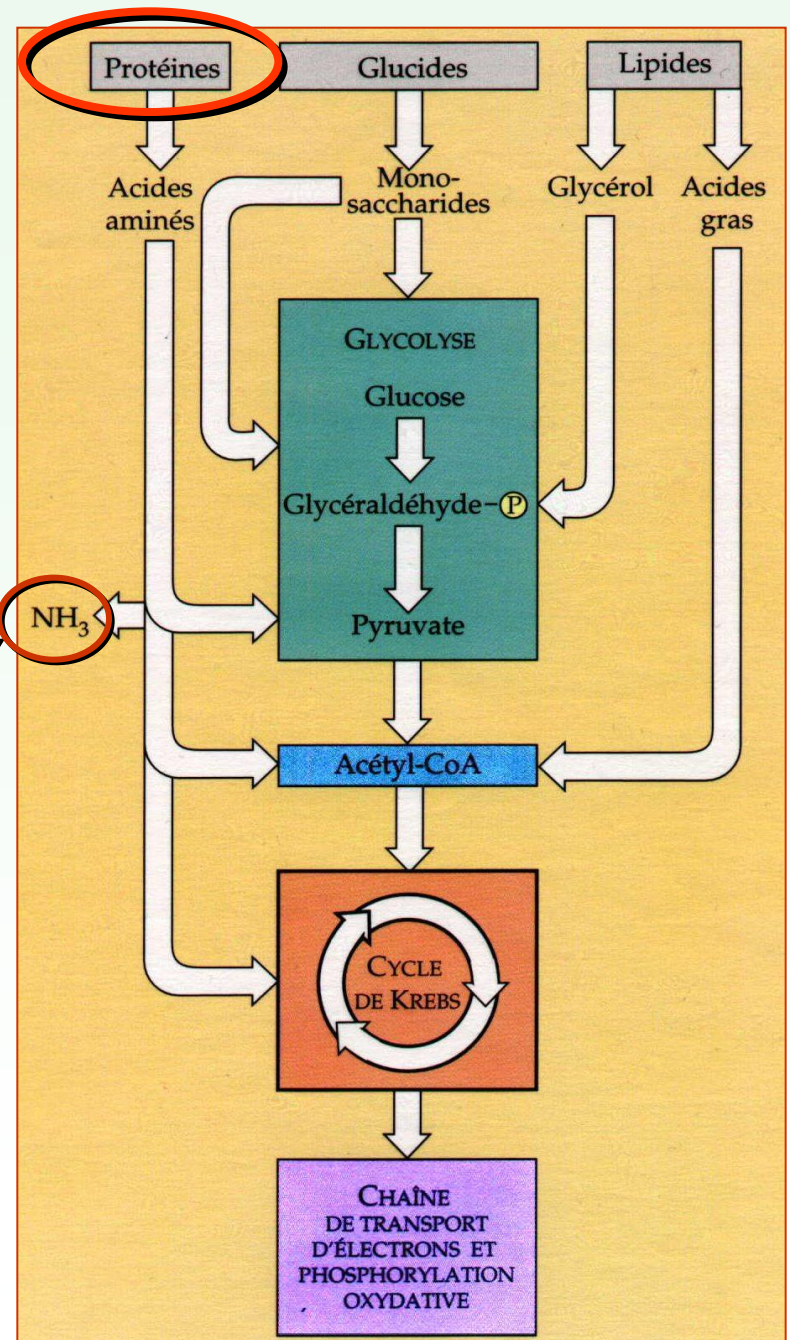
Bilan de la glycolyse

1 glucose → 2 pyruvate + 2NADH₂ + 2 ATP
2 NAD → 2 ADP + 2 P_i
↓ cycle de Krebs ↓ chaîne respiratoire

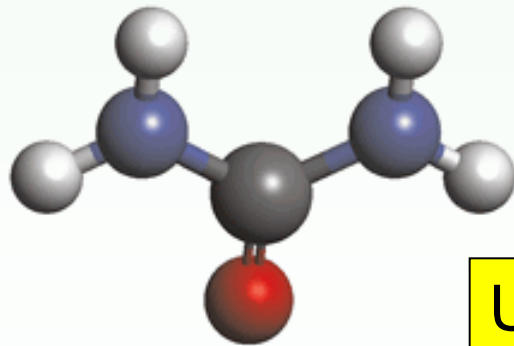
Catabolisme des protéines

Les acides aminés peuvent être utilisés comme source d'énergie en étant transformés en pyruvate ou en acétyl CoA ou en un des produits du cycle de Kreb.

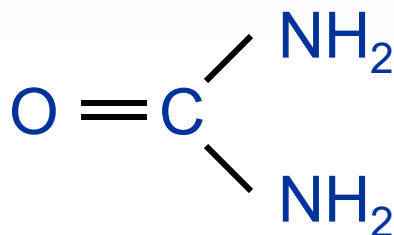
Cette transformation en produits utilisables comme source d'énergie nécessite d'enlever le groupement NH_2 des acides aminés. Ce groupement enlevé devient de l'ammoniac (NH_3) qui sera éliminé sous forme d'urée.



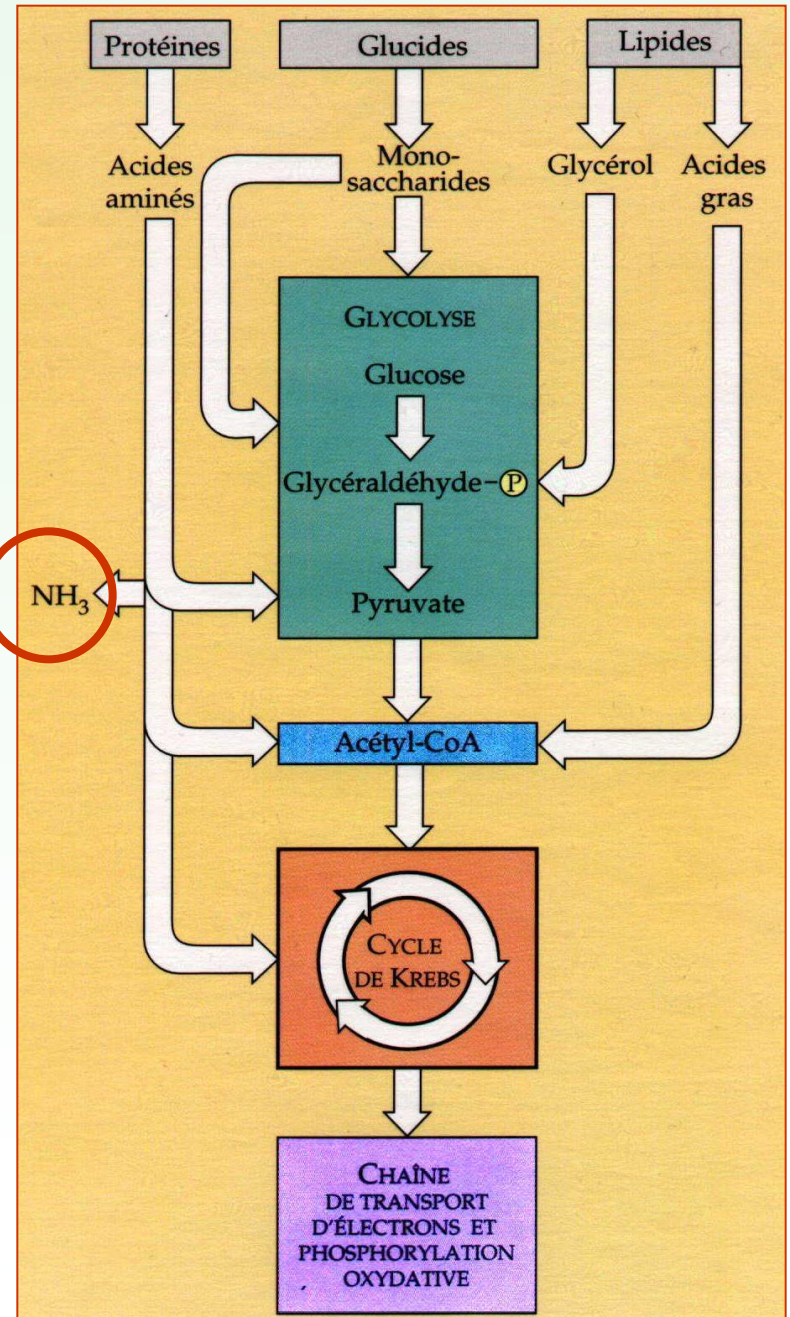
Cette transformation en produits utilisables comme source d'énergie nécessite d'enlever le groupement NH_2 des acides aminés. Ce groupement enlevé devient de l'ammoniac (NH_3) qui sera éliminé par les reins sous forme d'urée.



Urée



Urine ← Urée

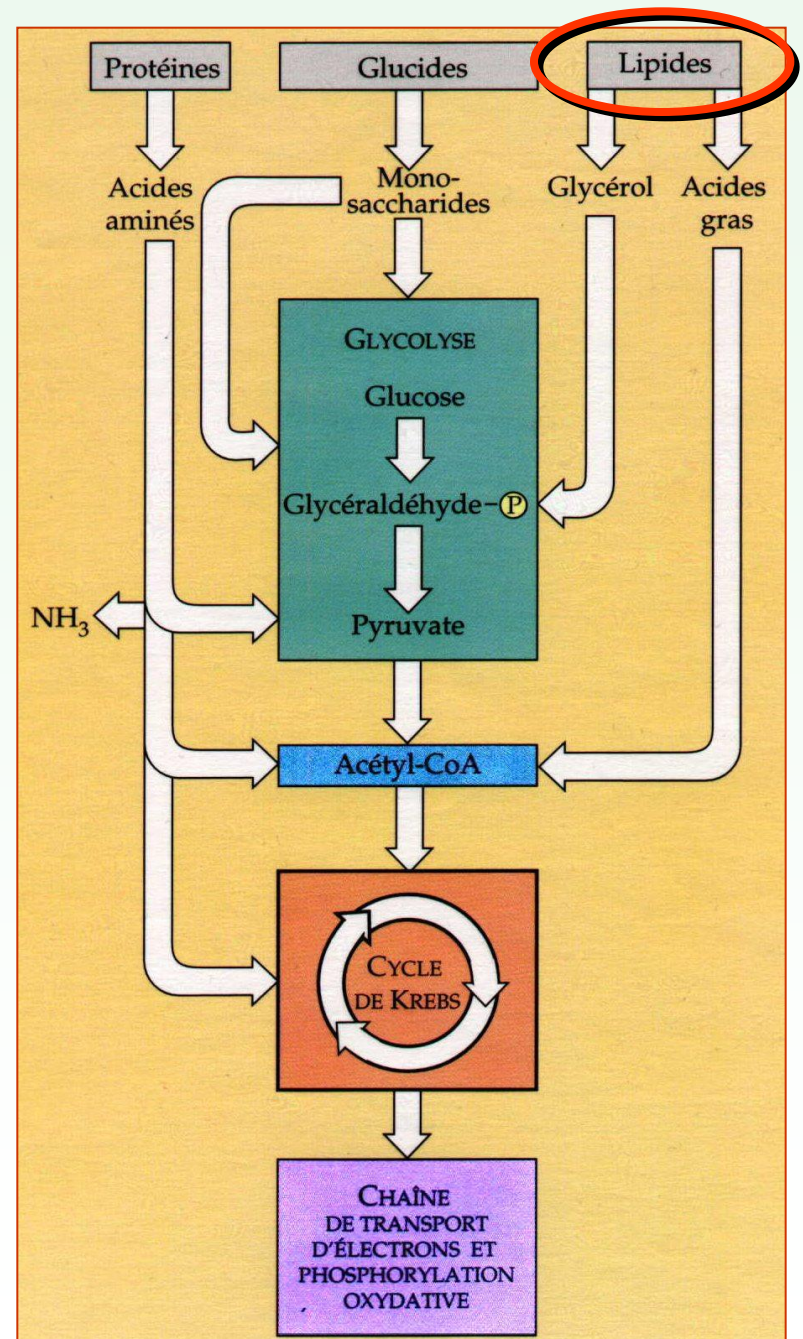


Catabolisme des lipides

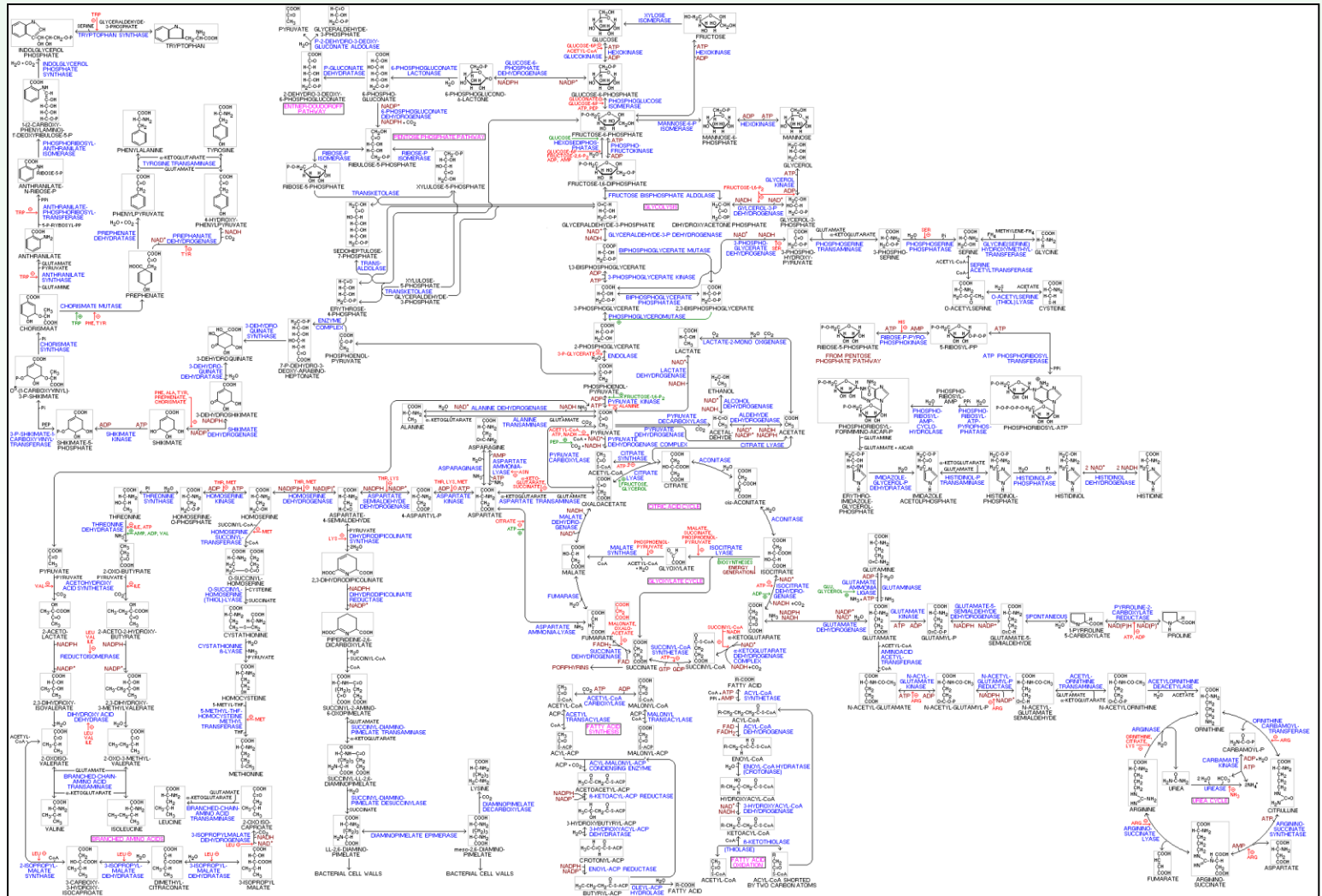
Les triglycérides sont d'abord transformés en glycérol et acides gras.

Le glycérol peut être transformé en glycéraldéhyde-P (un produit de la glycolyse).

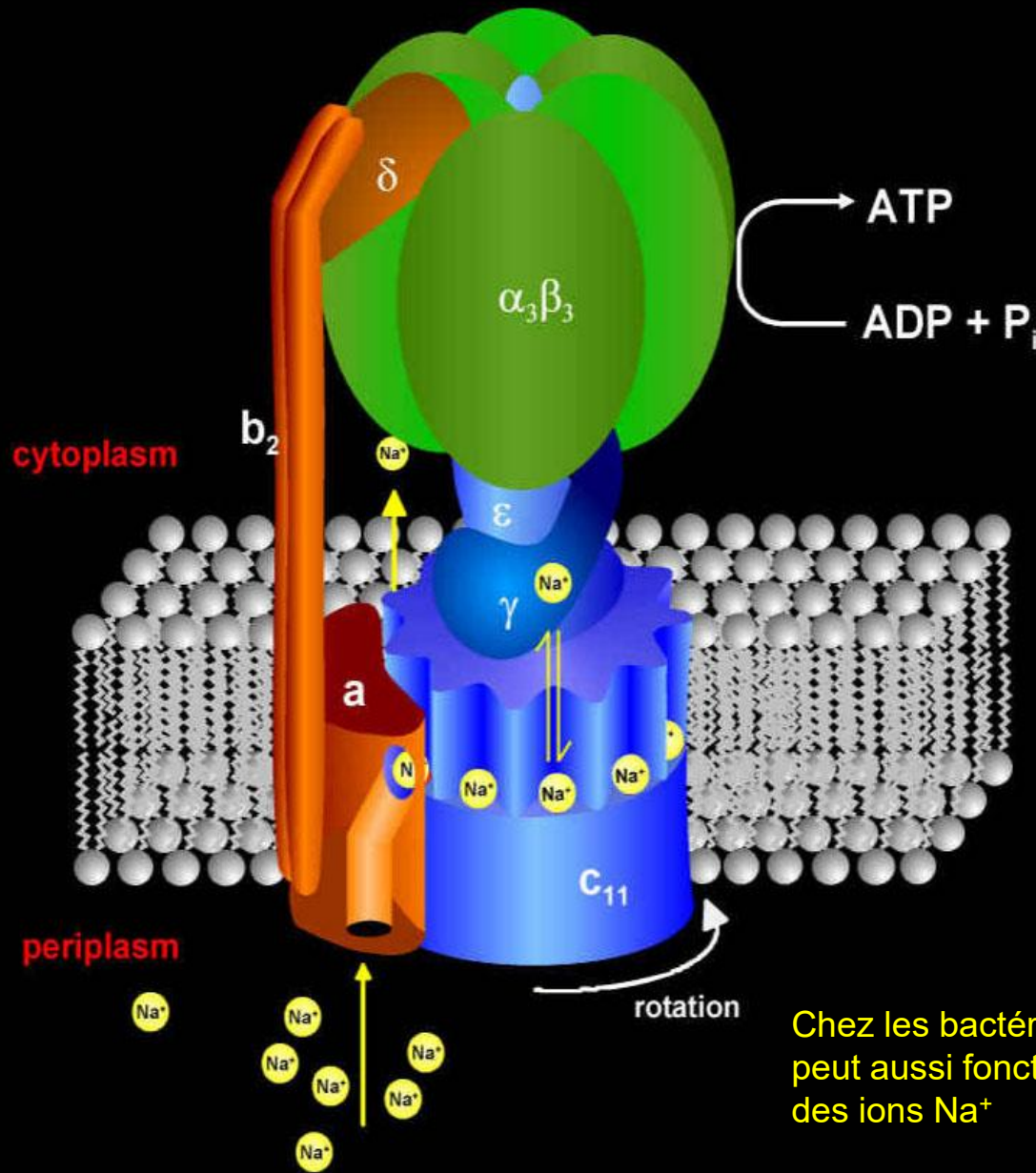
Les acides gras sont fragmentés en molécules à 2 carbones (C2) qui formeront de l'acétyl CoA.



Pouvez-vous retrouver ces réactions du métabolisme sur cette illustration (cliquez sur l'image) ?



F I N



Chez les bactéries, l'ATP synthétase peut aussi fonctionner par la diffusion des ions Na⁺