

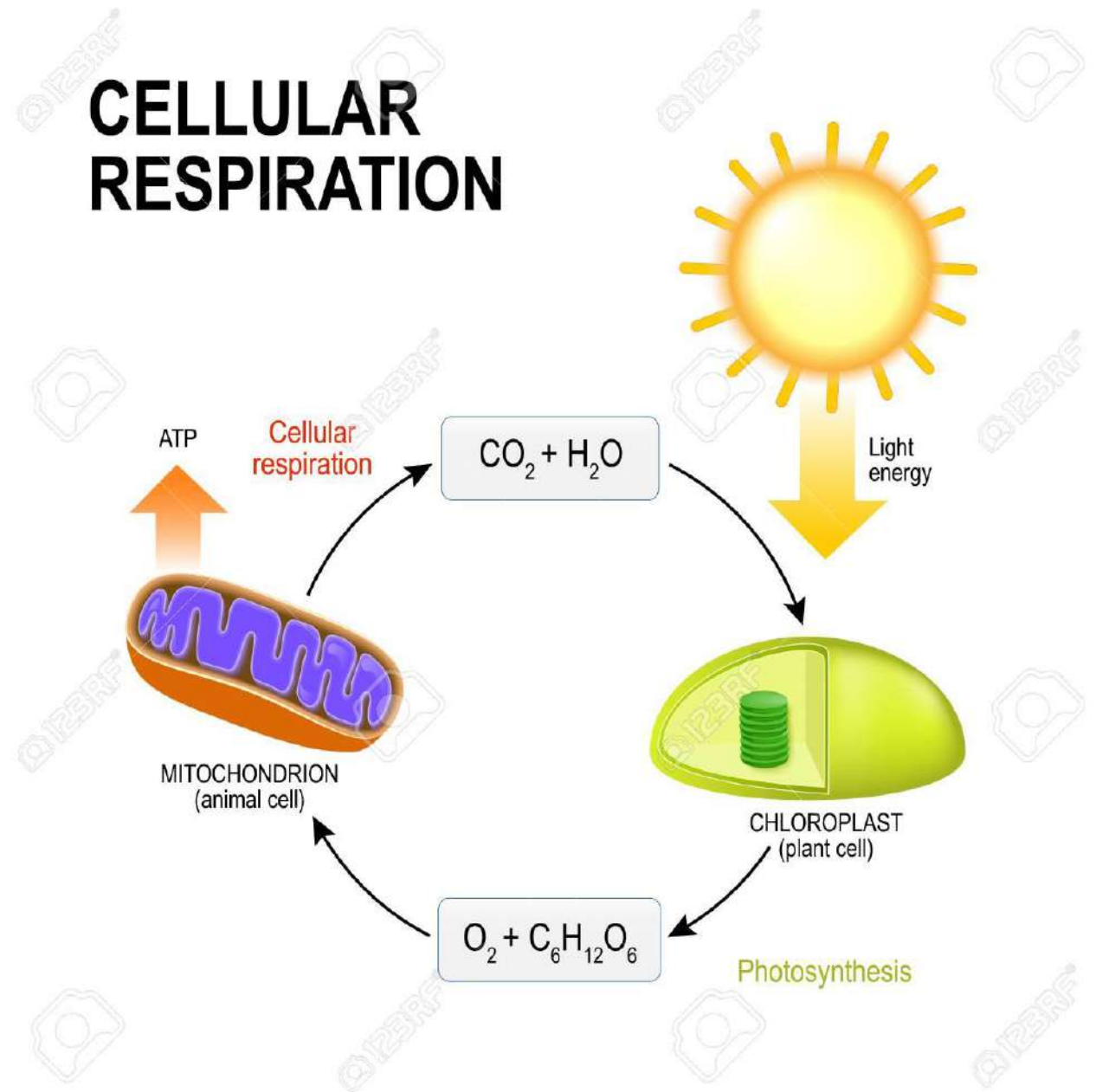
Suite Chap 3. Métabolisme de la plante (Nutrition carbonée)

B. Respiration cellulaire (Catabolisme énergétique)

Généralités

- Les besoins énergétiques pour la croissance et les fonctions de tous les êtres vivants sont satisfaits grâce à l'**ATP généré pendant la respiration**. Chez les végétaux, l'énergie lumineuse est conservée sous forme d'ATP et de NADPH.
- L'ATP et le NADPH sont utilisés pour l'assimilation du CO₂.
- Les glucides synthétisés par les plantes sont consommés par les animaux comme principale source d'énergie.
- Les **glucides** synthétisés par les plantes restent la principale source d'énergie. Les plantes stockent les glucides principalement sous **forme d'amidon**.

Toute accumulation de carbone dans les plantes est le résultat de la photosynthèse, qui reste la source d'énergie ainsi que pour la biosynthèse de diverses autres biomolécules.



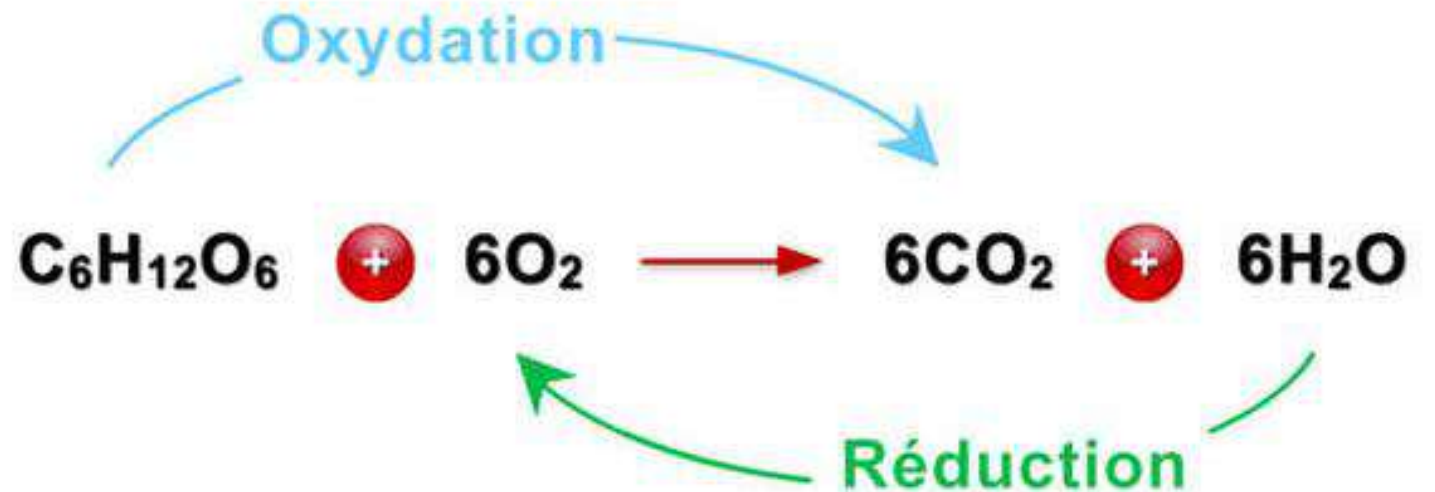
La réaction de la respiration est inverse de la photosynthèse qui est également une réaction chimique Redox. Dans la photosynthèse, l'oxydation de l' H_2O , entraînant la libération d' O_2 , s'accompagne d'une réduction du CO_2 en glucides. C'est une réaction endergonique pour laquelle de l'énergie lumineuse est utilisée. Le **glucose** étant principalement utilisé comme source d'énergie, l'**amidon** est converti en sucres simples dans les organes de stockage des plantes.

Un carburant : il s'agit du glucose, d'acides gras ou d'autres molécules organiques (acides aminés, corps cétoniques) ;

Un comburant, le dioxygène.

Cette réaction produit : du dioxyde de carbone ; de l'eau ; parfois de l'urée, si le carburant contient de l'azote (ex: acides aminés).

Formule générale de la respiration



Définition

La **respiration cellulaire** est une dégradation complète du glucose en présence d'oxygène, permettant une libération totale de son énergie.

Le glucose synthétisé au cours de la 2^{ème} étape de photosynthèse (phase sombre), est **brûlé** en présence d'**oxygène** dans les **cellules** des animaux et des végétaux.

2. Localisation

La respiration cellulaire se localise au niveau des organites appelés **mitochondries**. Ce sont le siège de la respiration cellulaire;

- Le mot **mitochondrie** vient du grec "**mitos**" veut dire "filament" et "**khondros**" veut dire "grain".

- L'ensemble des mitochondries dans une cellule (300 à 800 mitochondries/cellule) forme le **chondriome**.

Les mitochondries constituent des unités fonctionnelles de la cellule, ce sont des "**usines énergétiques**".

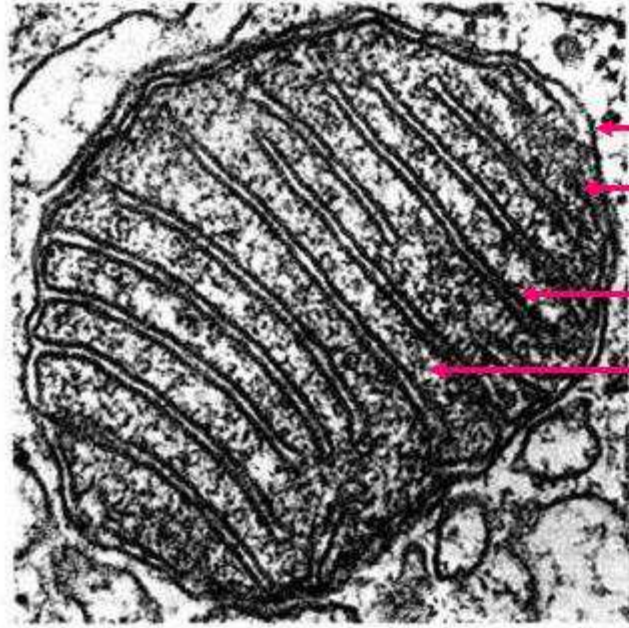
- Les **mitochondries** se trouvent dans toute les cellules végétales et animales. Les mitochondries sont visibles au microscope optique, après coloration spécifique. Le détail de la structure des mitochondries est visible au microscope électronique.
- La forme des mitochondries peut varier d'un type cellulaire à l'autre ou dans une même cellule en fonction de son activité: grains ou bâtonnets courts de 0,5 mm sur 1 mm ou plus, ou filament long et flexueux, parfois bifurqués.

3. Ultrastructure de la mitochondrie

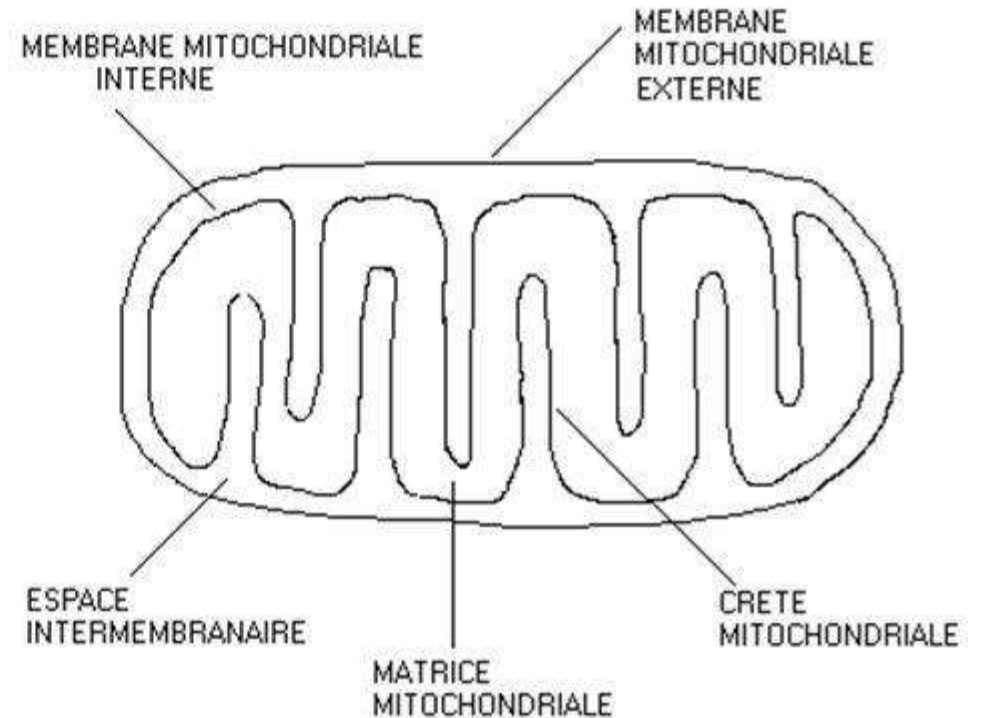
Au microscope électronique, la mitochondrie est vue composée d'un système de membranes qui ressemble au plasmalemme, séparant 2 espaces bien distincts :

- Un espace intermembranaire est situé entre les 2 membranes externe et interne de la mitochondrie, qui projette plusieurs replis vers le centre de l'organite;
- La matrice, fluide central de la mitochondrie, circonscrit par la membrane interne. Les replis de la membrane interne constituent autant de crêtes mitochondriales à la surface desquelles sont attachées de très nombreuses minuscules structures sphériques baignant dans la matrice.

Photo d'une mitochondrie au microscope électronique



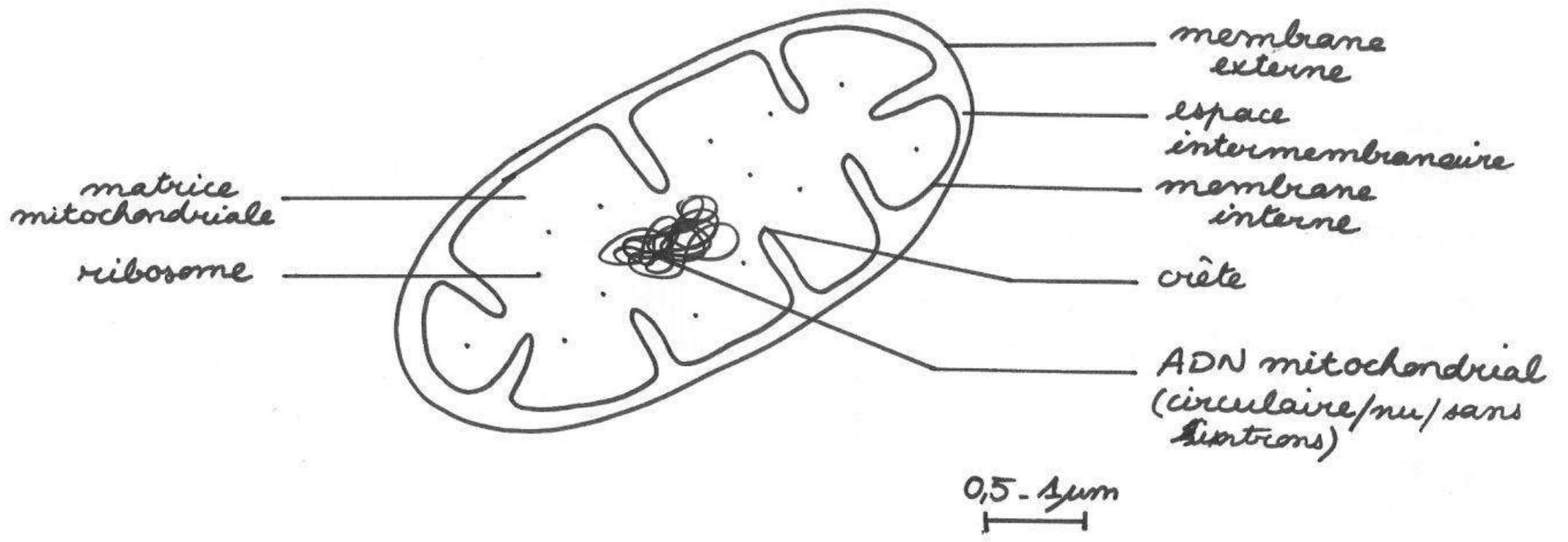
Membrane externe
Membrane interne
Crête
Matrice



http://www.bio.espci.fr/scolarité/c_BIO/energ/cata2.htm

<http://membres.lycos.fr/renejacquemet/sport/glucose/glucose.html>

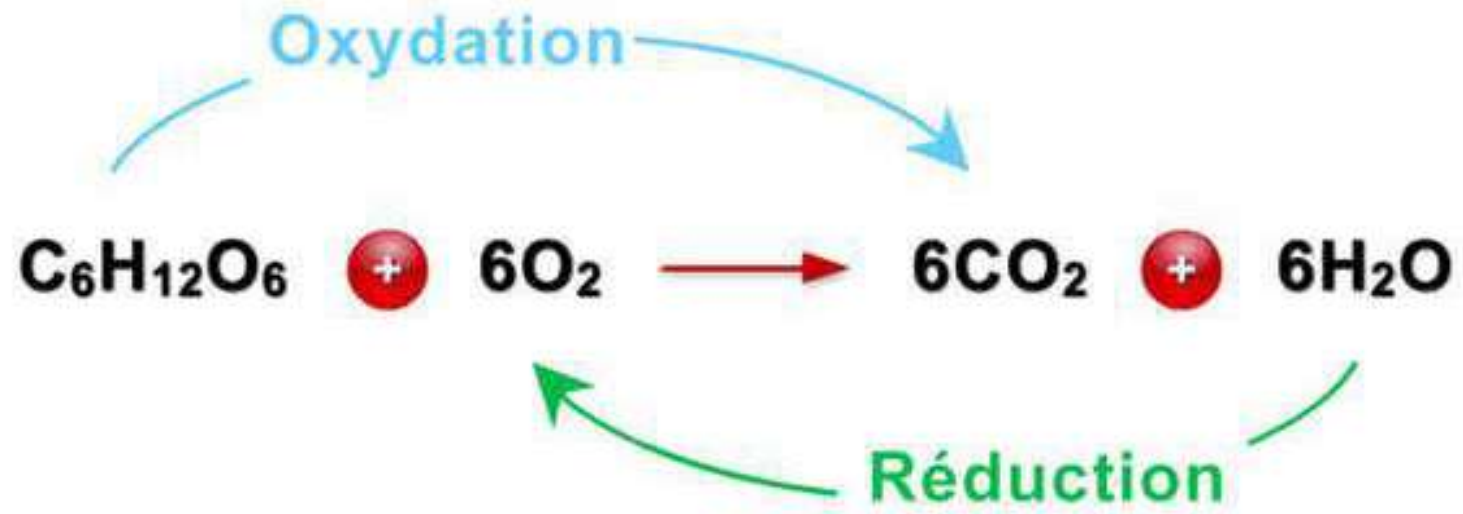
Schéma d'une mitochondrie



4. Formation d'ATP à partir des glucides

- Le principal rôle des **glucides** est de fournir l'énergie pour produire de l'ATP.
- Il existe **2 voies métaboliques** principales pour cette énergie :
 - a. La respiration cellulaire en milieu aérobique (présence de l'O₂ dans le milieu);
 - b. La fermentation (alcoolique, butyrique etc..) en milieu anaérobique (milieu dépourvu d'O₂).

Lors de la respiration cellulaire, la dégradation du glucose se fait grâce à des **transferts d'électrons** (Libération de l'énergie).



Réaction globale de la Respiration

- Le **glucose** est oxydé et l'O₂ est réduit.

L'**hydrogène** est transféré du glucose vers l'**oxygène**.

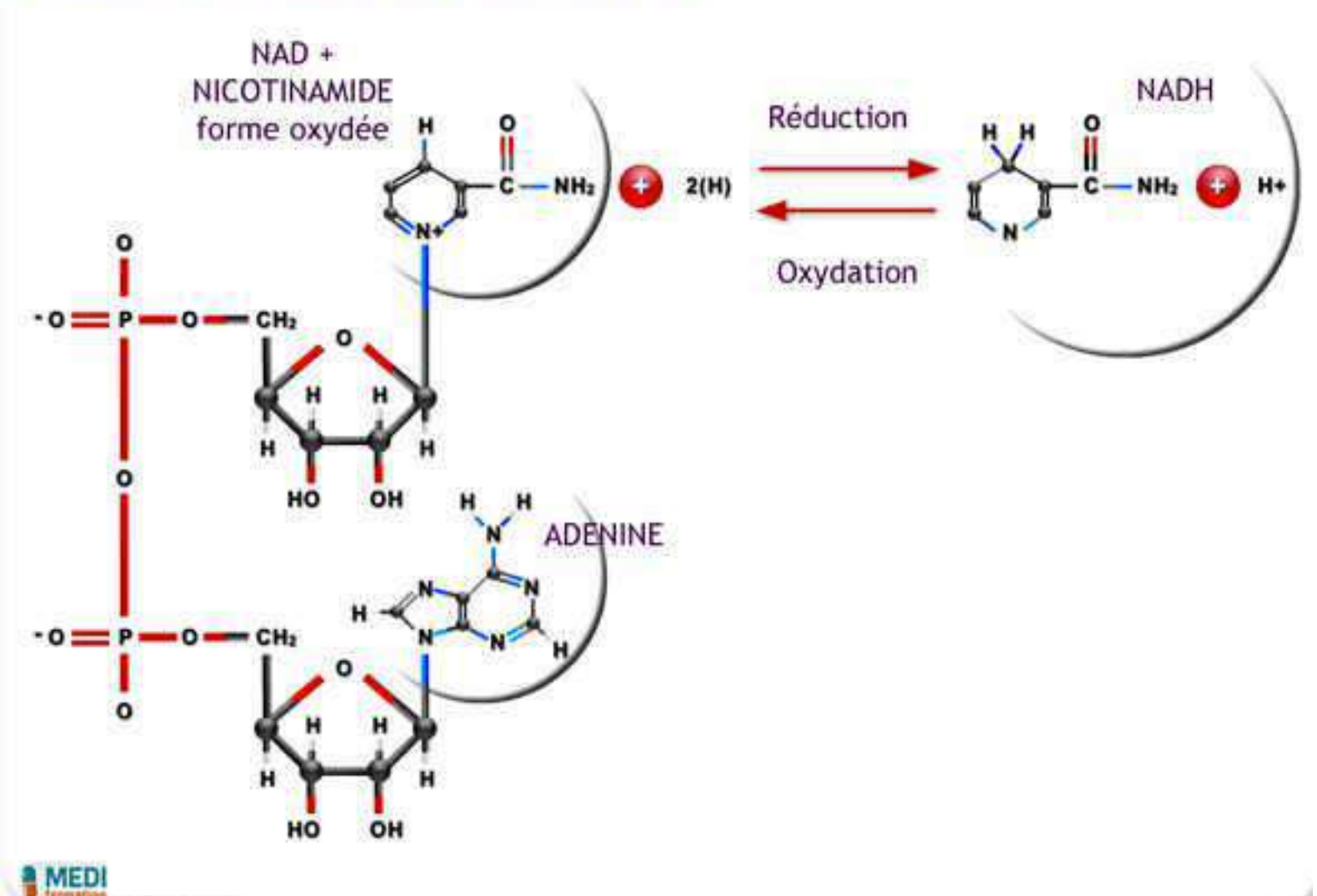
Le **glucose** se dégrade dans une série de réactions. Chacune des réactions est **catalysée par une enzyme**.

Des atomes d'H sont arrachés du glucose à certaines étapes, mais ils ne sont pas transférés immédiatement à l'O₂. Ils vont premièrement passer par un composé intermédiaire organique nommé **nicotinamide adénine dinucléotide** (ou **NAD⁺**) qui reçoit les électrons (Fig.).

Le NAD⁺ est une forme oxydée, il a une charge + puisqu'il a un électron de moins. Le NAD⁺ capte les électrons et l'hydrogène du glucose grâce à des enzymes qui s'appellent des déshydrogénases. Mais plutôt que de devenir le NAD en captant un seul électron, ces enzymes vont retirer une paire d'atomes d'hydrogène (2H) du glucose. Or un atome d'hydrogène contient 1 électron et 1 proton. Donc, 2H équivaut à 2 électrons et 2 protons.

La déshydrogénase amène **2 électrons et 1 proton (H⁺)** au NAD⁺, l'autre proton est libéré dans le milieu. Le NAD⁺ devient donc le NADH (forme réduite)

REACTION REDUCTION / OXYDATION



- Les électrons perd très peu d'énergie lors de leur transfert au NAD⁺, ce qui veut dire que les molécules de NADH sont des molécules qui **entreposent de l'énergie**. $\text{NAD}^+ + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NADH} + \text{H}^+$ (proton libéré dans le milieu). **Chaque NADH formé pendant la respiration cellulaire représente une petite réserve d'énergie.**

5. Déroulement de la Respiration cellulaire

Le **NADH** est seulement riche en énergie mais il ne la stocke pas. Il **donnera**, plus tard au cours de la respiration cellulaire, son énergie à l'ATP.

La **respiration cellulaire** se fait donc selon **3 étapes** :

- La **glycolyse**. C'est la 1^{ère} étape de la fermentation
- Le **cycle de Krebs**
- La **chaîne respiratoire**.

1. La glycolyse

Le glucose subit **une glycolyse** (réaction chimique) qui se déroule dans le **cytoplasme de la cellule**. Cette réaction s'effectue en **anaérobiose** (absence d'O₂). Cette voie métabolique est un ensemble de réactions d'oxydoréductions : Le **glucose est oxydé jusqu'à former du pyruvate** (1 molécule à 3 atomes de carbone).

Au cours de la glycolyse, le glucose est d'abord converti en **glucose 6-phosphate** grâce à l'hexokinase, qui est une kinase, enzyme catalysant les transferts d'un groupement phosphate d'une molécule à une autre.

Cette réaction s'effectue par couplage de l'hydrolyse de l'ATP en ADP + Pi, car cette réaction demande de l'énergie : c'est une synthèse.

Définition

Pyruvate est un composé chimique important en biochimie. C'est le résultat de la glycolyse. **Une molécule de glucose** se divise en 2 molécules de **pyruvate**, qui vont être utilisées pour fournir de l'énergie plus tard.

Le **glucose 6-P** est ensuite converti en **fructose 6-P** par une autre enzyme, la phosphohexose isomérase. Il s'agit d'une isomérisation (conversion de la molécule en l'un de ses isomères) réaction réversible catalysée par une isomérase.

Le **fructose 6-P** est ensuite converti en **fructose 1,6 diphosphate** par la phosphofructokinase. Cette réaction s'effectue aussi grâce à l'hydrolyse d'une molécule d'ATP.

Il y a formation de 2 molécules de **phosphoglycéraldéhyde**: cette réaction est catalysée par une aldolase (groupe des lyases : enzyme qui brise diverses liaisons chimiques par d'autres voies que l'hydrolyse et l'oxydation).

Puis, 2 molécules de **1,3-diphosphoglycérate** sont synthétisées : cette réaction d'oxydoréduction (échange d'électrons), réversible est catalysée par une triose phosphate déshydrogénase (oxydoréductase: enzymes catalysant les réactions d'oxydoréduction).

Il y a donc un agent oxydant et un réducteur :

Les NAD^+ sont réduits en NADH ; et le **phosphoglycéraldéhyde** est oxydé en **1,3-diphosphoglycérate**. Et ainsi de suite jusqu'à l'étape finale de la formation du pyruvate par l'enzyme pyruvatekinase.

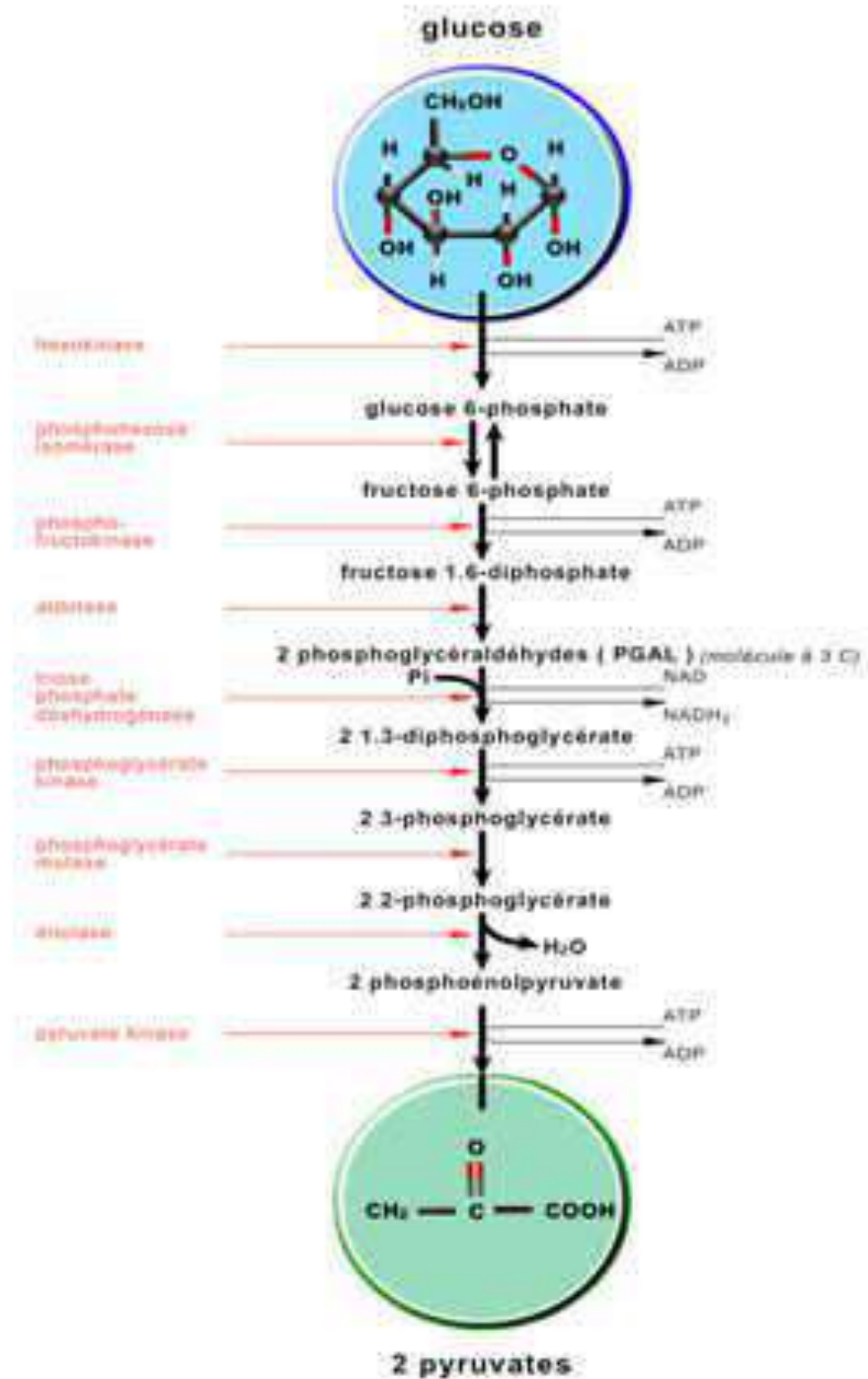
Chaque étape est catalysée par une enzyme spécifique. Si une seule de ces enzymes manquait, la réaction ne pourrait pas se poursuivre jusqu'à **la synthèse du pyruvate**.

A la fin de cette 1^{ère} étape, 2 molécules d'**ATP sont produites** pour 1 molécule de **glucose**.

Ce bilan est faible comparé aux autres étapes de la respiration cellulaire.

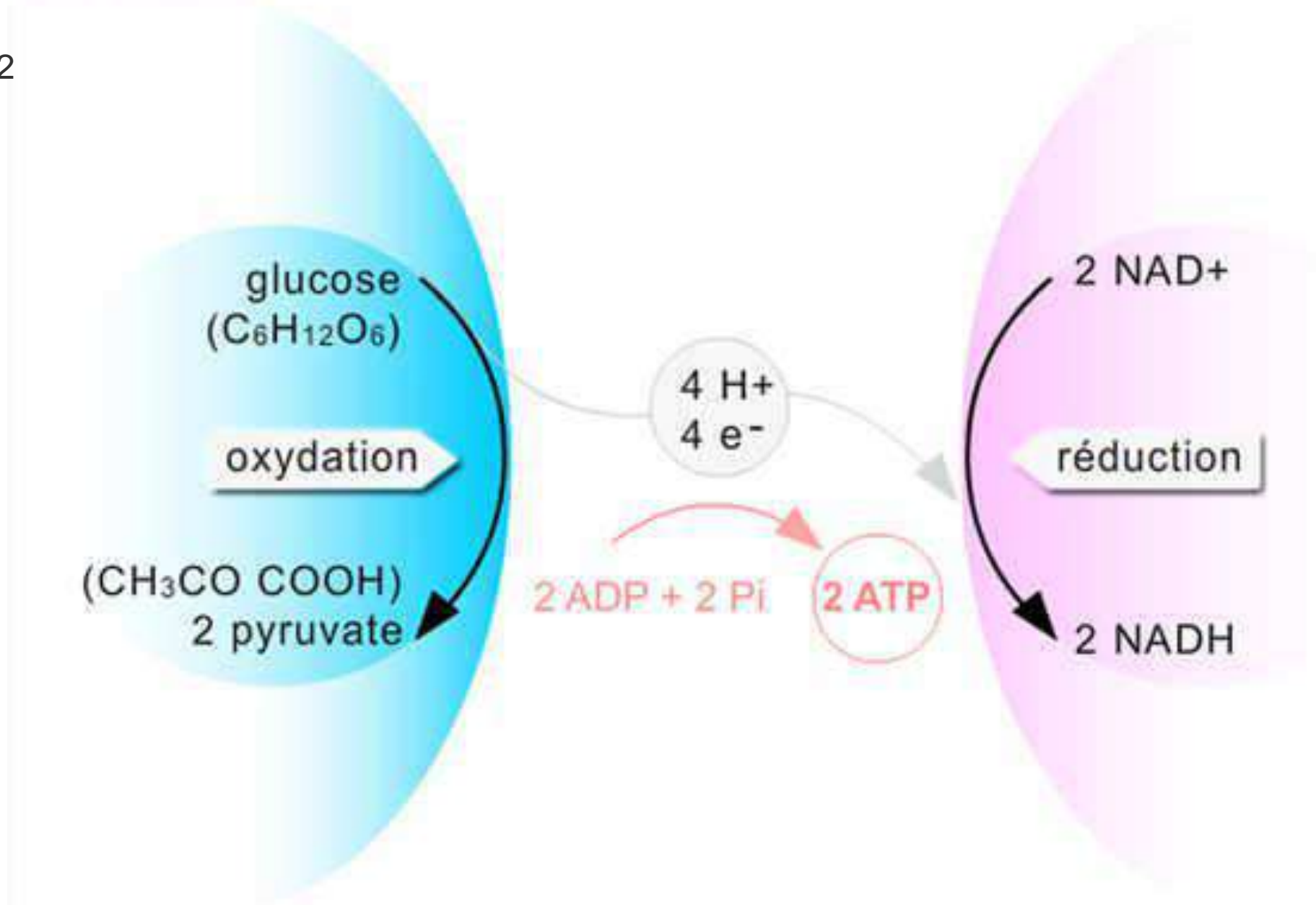
Bilan de cette 1^{ère} étape : Production du **pyruvate** qui sera consommé au cours du **cycle de Krebs** en aérobiose, dans la mitochondrie.

GLYCOLYSE 1



GLYCOLYSE 2

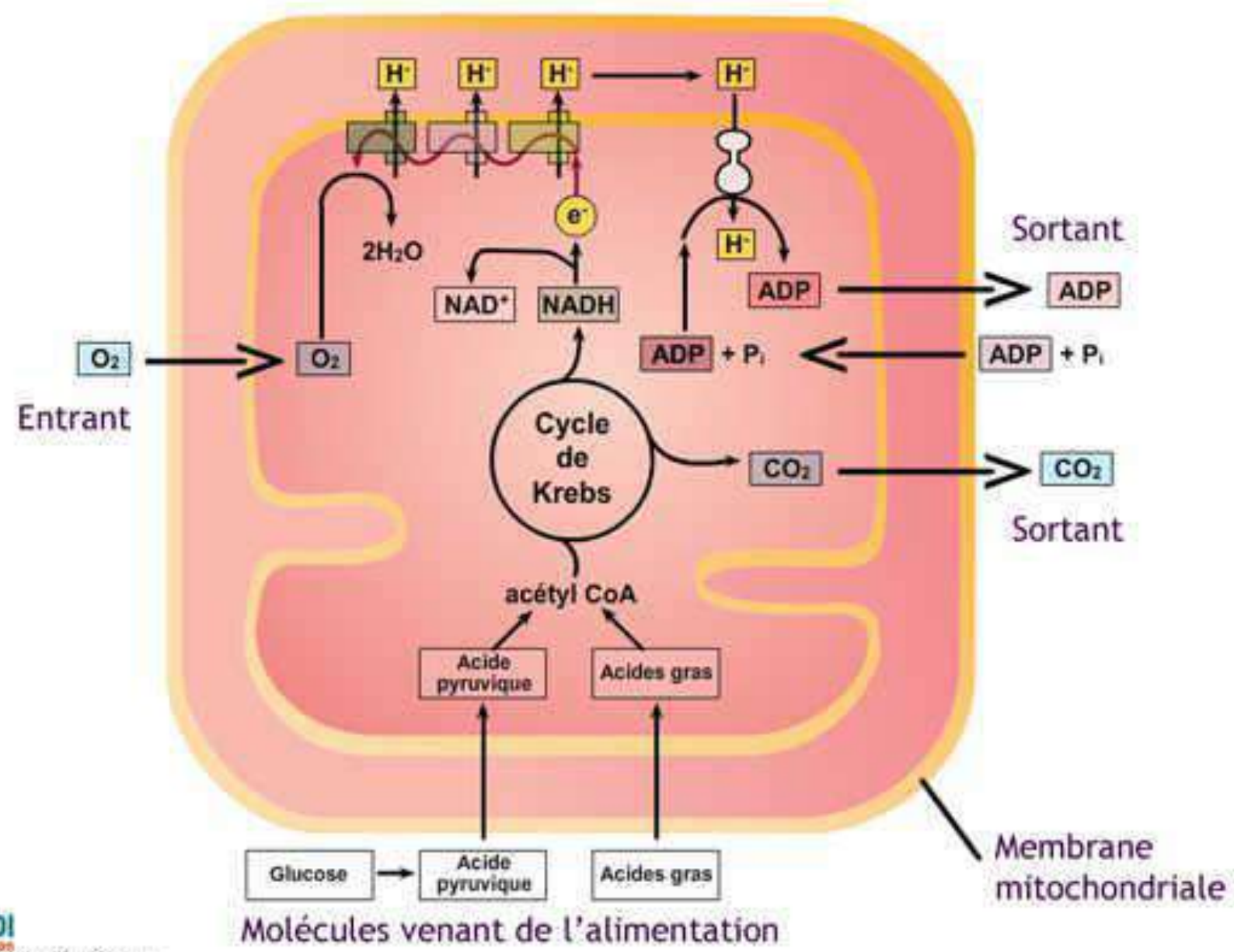
Schéma de la glycolyse 1 et 2



2. Le cycle de Krebs

ou cycle de l'acide citrique (citrate) est au centre du métabolisme cellulaire. Le **cycle de Krebs** se déroule dans la **matrice de la mitochondrie** en aérobiose. Il se produit une oxydation du pyruvate qui permet la formation de 10 composés réduits **NADH**. Le **pyruvate** subit aussi une décarboxylation (retrait des atomes de carbone) totale qui conduit à la libération de CO_2 , déchet de la respiration. Une fois dégradé par la glycolyse, le glucose en pyruvate est transformé en **acétylcoenzyme A (acétylCoA)** et **oxaloacétate**. Ces 2 composés sont le point de départ du cycle de Krebs.

CYCLE DE KREBS



- Les étapes du cycle de Krebs

Synthèse du citrate. Cette réaction est catalysée par la citrate synthétase permettant la synthèse du **citrate**.

Déshydratation du citrate. Cette réaction de déshydratation réversible est catalysée par une lyase (enzyme : cis-aconitase), produit du **cis-aconitate**.

Hydratation du cis-aconitate. Cette réaction est réversible et catalysée par la même enzyme (lyase). L'addition d'H₂O sur la double liaison a lieu dans une position différente : il y a synthèse **d'iso-citrate**.

Oxydation de l'iso-citrate. Cette réaction réversible est catalysée par une oxydoréductase : l'isocitrate déshydrogénase. C'est donc une réaction d'oxydoréduction avec échange d'électrons : les NAD^+ sont réduits en NADH, H^+ (avec le proton libéré dans le milieu).

Décarboxylation de l'oxalosuccinate. Il y a libération du CO_2 lors de cette réaction irréversible.

Décarboxylation oxydative de l' α -cétoglutarate. Cette réaction d'oxydoréduction est la même que celle permettant le passage du pyruvate à l'acétylCoA. Le complexe enzymatique fait intervenir de nombreuses enzymes dans cette réaction. Il y a, de plus, libération de CO_2 et réduction des NAD^+ .

Formation du succinate. Cette réaction réversible est catalysée par une transférase, la succinate thiokinase. Cette réaction est couplée à la synthèse d'ATP.

Oxydation du succinate. Cette réaction est catalysée par une enzyme la succinate déshydrogénase.

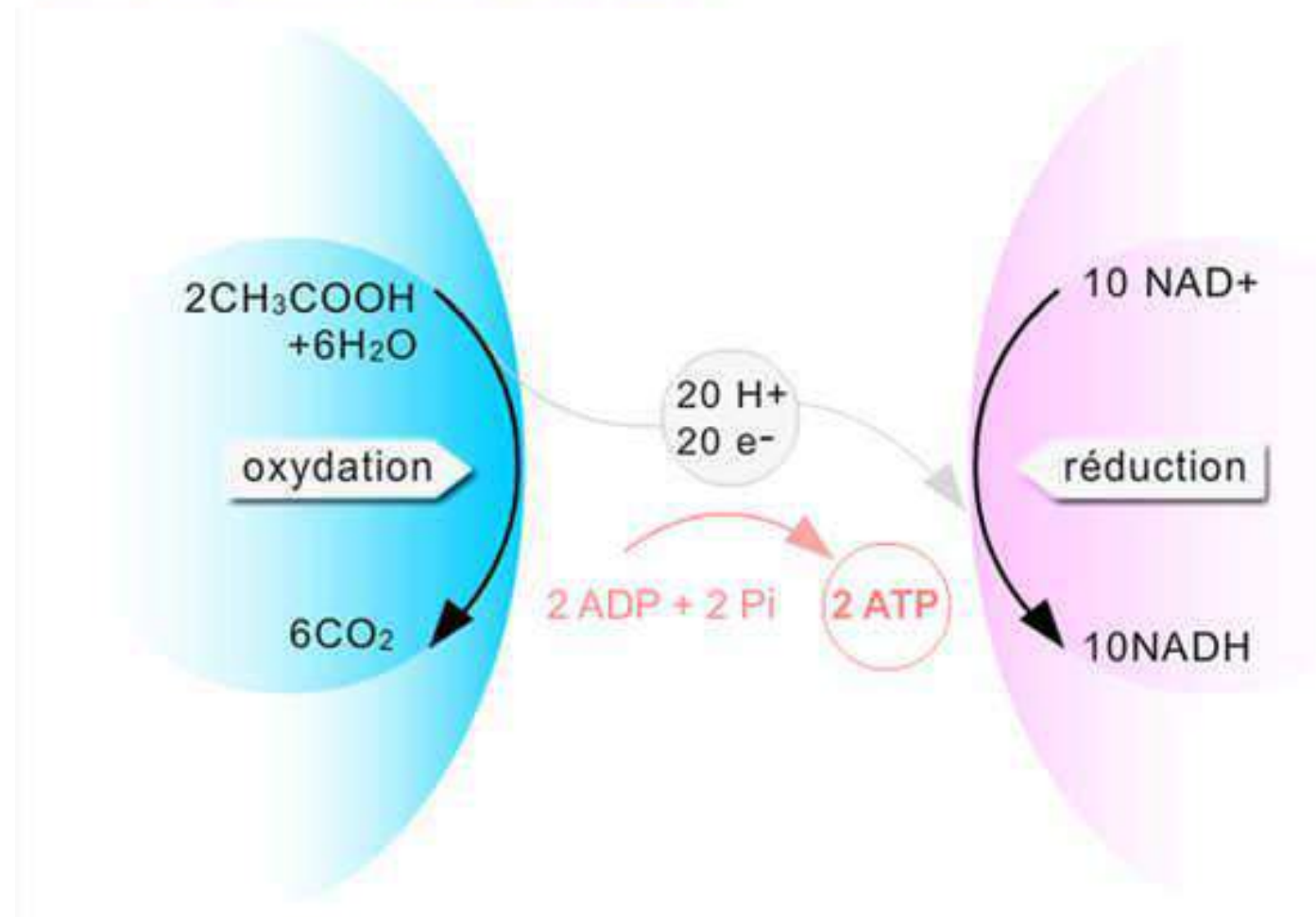
Hydratation du fumarate. Cette réaction d'addition d'une molécule d'H₂O est catalysée par une lyase, la fumarase.

Oxydation du malate. Il y a formation d'oxaloacétate, réaction d'oxydoréduction catalysée par le malate déshydrogénase (oxydoréductase). Les composés oxydés sont réduits en NADH.

Cycle de Krebs Dans la matrice mitochondriale, le pyruvate est ainsi entièrement dégradé selon la réaction suivante :



CYCLE DE KREBS, DEUXIEME ETAPE



- **Réoxydation des composés réduits** : Les NADH à ce stade, la molécule de glucose est totalement dégradée : tous ses carbones sont éliminés sous forme de CO₂. Pour le moment, il y a production seulement de 4 ATP car la majeure partie de l'énergie reste entreposée dans les NADH.

Le processus biochimique n'est pas terminé : il est nécessaire de régénérer les accepteurs NAD⁺ qui ont été réduits en composés **NADH**. Cela signifie qu'il faut oxyder à nouveau les NADH. **Cette opération se réalise au niveau des crêtes des mitochondries (replis de la membrane interne) en aérobiose et permet une production remarquable d'ATP : c'est la chaîne respiratoire.**

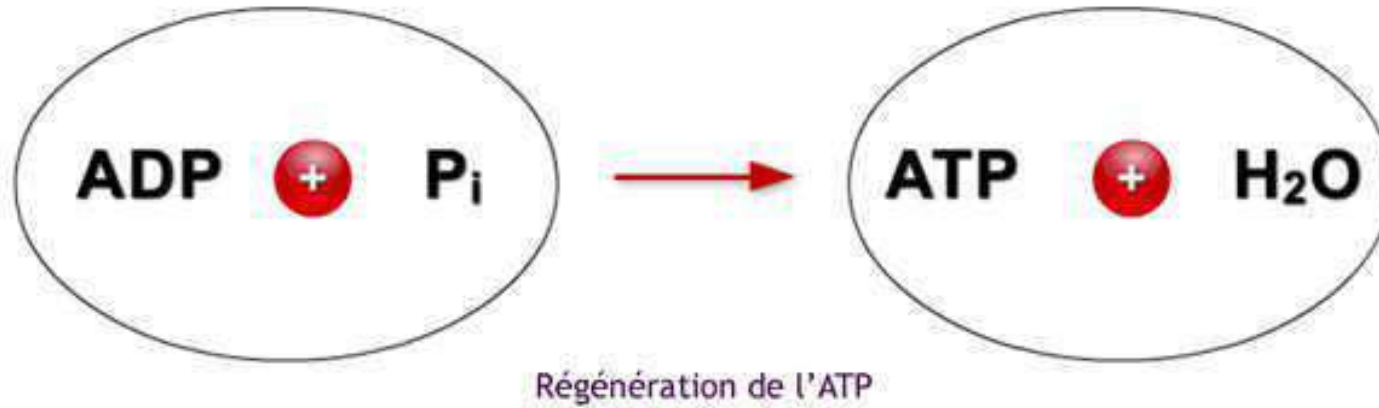
3. La chaîne respiratoire

Pour réoxyder les NADH, il faut passer par une chaîne de transport d'électrons : c'est une série de protéines insérées dans la membrane interne de la mitochondrie ([voir Fig suivantes](#)). Ces dernières sont alignées en ordre énergétique, la 1^{ère} molécule a plus d'énergie que la dernière.

- La 1^{ère} de la chaîne capte ($2e^-$) à chaque NADH (un proton H^+ est aussi cédé dans le milieu afin que les NADH se régénèrent en NAD^+) et les transfère à la molécule adjacente.

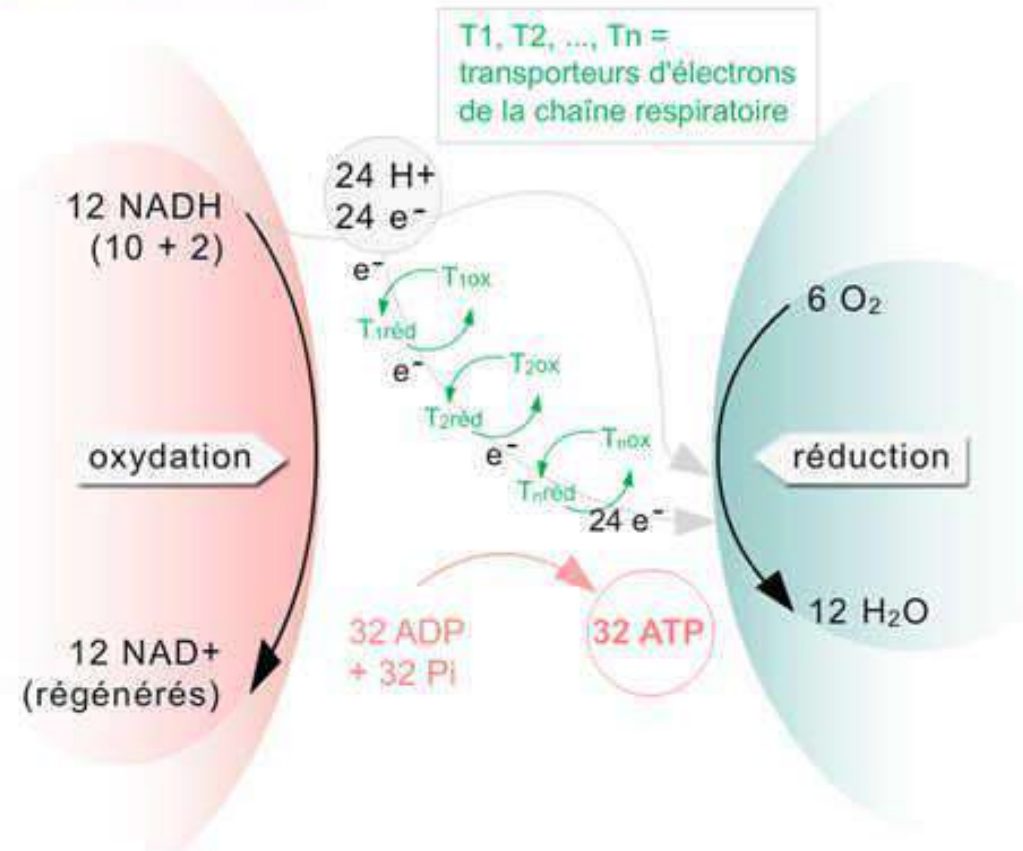
- Il existe 5 ensembles de complexes impliqués dans la chaîne respiratoire. Les 4 premiers (I, II, III et IV) interviennent dans le transport des électrons et le cinquième (V) intervient dans la synthèse d'ATP.
- Au fur et à mesure de ce transport, les électrons " perdent " leur énergie. Finalement, en bout de chaîne, ils sont acceptés par le dioxygène (O₂) qui se combine à des protons du milieu pour former de l'eau ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$). L'énergie " perdue " par les électrons et la présence des protons H⁺ permettent d'activer une enzyme, l'ATP synthase, localisée elle aussi dans la membrane interne. Cette enzyme catalyse la production d'ATP en grande quantité. Il y a 12 NADH : 10 provenant du cycle de Krebs et 2 de la glycolyse.

TROISIEME ETAPE : CHAINE RESPIRATOIRE



Formation de l'ATP (Phosphorylation de l'ADP)

CHAINE RESPIRATOIRE



- **Transport des molécules d'ATP formées** Les molécules d'ATP ainsi formées se retrouvent dans la matrice mitochondriale. Pour passer dans le cytoplasme, elles empruntent un anti-port, une protéine permettant de faire passer de l'ATP dans le sens matrice mitochondriale puis dans l'espace intermembranaire puis dans le cytoplasme et de l'ADP dans le sens inverse.

- Bilan de la respiration cellulaire

A partir d'une molécule de glucose, la glycolyse a permis de synthétiser 4 ATP, le cycle de Krebs 2 et la chaîne respiratoire 32.

Il y a un total de 38 ATP moins les 2 ATP utilisés par la glycolyse soit 36 ATP



ou (si nous enlevons l'eau dans les réactifs)



Les **NAD+** ou **NADH** ne figurent pas dans l'équation car au final leur quantité produite s'annule.

En effet lors de la glycolyse 2 NAD⁺ sont réduits en 2 NADH, durant le cycle de Krebs 10 NAD⁺ sont réduits en 10 NADH et enfin pendant la chaîne respiratoire 12 NADH sont oxydés en 12 NAD⁺. Il ne reste donc plus rien !