
Chapitre 6. Notions de bioénergétique

I. Généralités

Pour survivre, croître et se reproduire les cellules de tout organisme vivant ont besoin d'énergie. Cette énergie peut être qualifiée de :

- **Chimique** : celle qui permet de réaliser une réaction chimique dans divers voies métaboliques.
- **Mécanique** : celle qui permet de réaliser un mouvement au cours de la contraction musculaire.
- **Calorifique** : lorsqu'il y a production de chaleur.
- **Osmotique** : celle qui permet de réaliser des transferts de molécules grâce à un gradient de concentration dans les divers compartiments cellulaires.
- **Electrique** : celle qui permet de réaliser des transferts de molécules grâce à un gradient ionique géré par des potentiels membranaires.

Les énergies sont interchangeableables, rien ne se crée et rien ne se perd.

Exemple : l'énergie chimique libérée par l'hydrolyse de l'ATP se transforme en énergie mécanique (contraction musculaire) : $ATP \longrightarrow ADP + Pi$

Chez l'homme, c'est l'énergie chimique des substances ingérées (glucides, lipides, acides aminés, bases puriques et pyrimidiques) qui sera utilisée pour être convertie en d'autres formes d'énergie.

La bioénergétique est la science qui étudie l'ensemble de ces réactions énergétiques au niveau des cellules de l'organisme vivant.

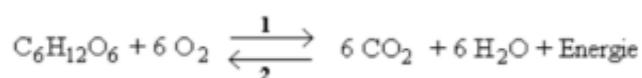
II. Types de réaction chimique

Les nutriments sont des molécules organiques ou minérales qui n'ont pas besoin d'être transformées pour être absorbées et utilisées par une cellule. Les nutriments organiques proviennent des aliments après action des enzymes digestives.

Les métabolites sont les molécules transformées par les réactions enzymatiques afin de produire de l'énergie ou d'autres composés chimiques.

Le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques de transformation de matière et d'énergie qui s'accomplissent dans toutes les cellules vivantes. Le métabolisme regroupe deux types de réactions (Figure 1) :

- Les réactions de dégradation de la matière (catabolisme) qui produisent de l'énergie : réactions exergoniques (réactions de dégradation des nutriments) ou exothermiques;



Exemple :

- Les réactions de synthèse de la matière (anabolisme) qui consomment de l'énergie : réactions endergoniques (biogénèse, contraction musculaire, influx nerveux, ...) ou endothermique.

Exemple : L'amidon et le glycogène sont des formes de mise en réserve du glucose dans les cellules vivantes végétales et animales respectivement.

D'une manière générale, les principaux métabolites utilisés par la cellule sont : le glucose, les acides gras, les triglycérides (lipides) et les acides aminés.

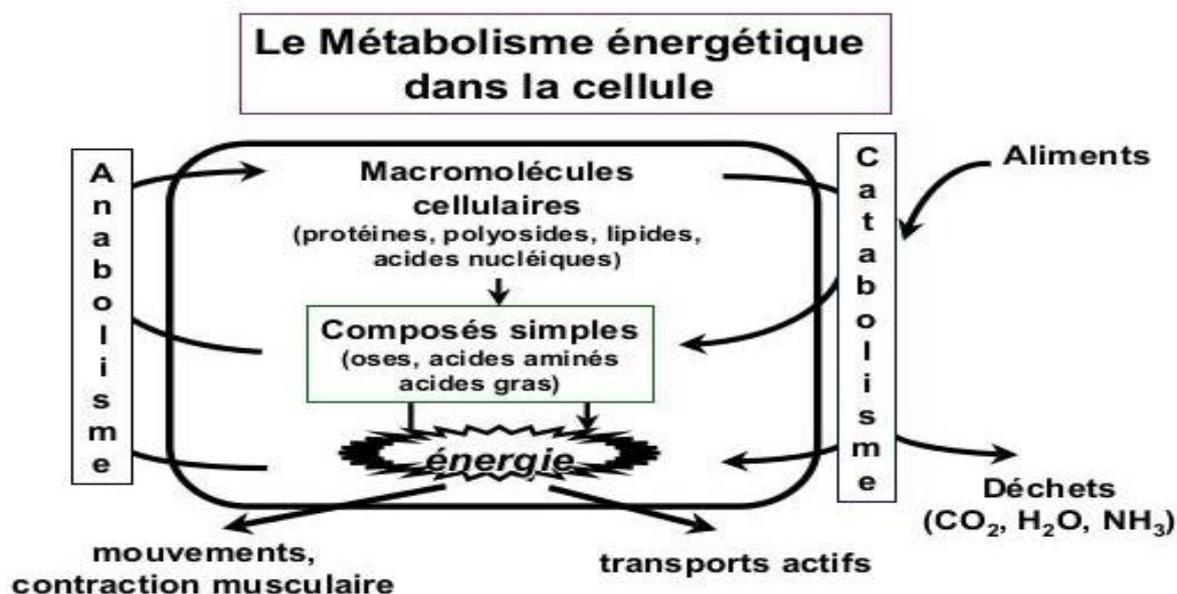


Figure 1. Renouvellement moléculaire [1].

Les processus biochimiques sont basés sur des échanges d'énergie. L'ATP (Figure 2) est une molécule universelle pour transférer de l'énergie libre soit par transfert de groupement phosphate soit par hydrolyse de liaisons anhydride d'acide très riches en énergie.

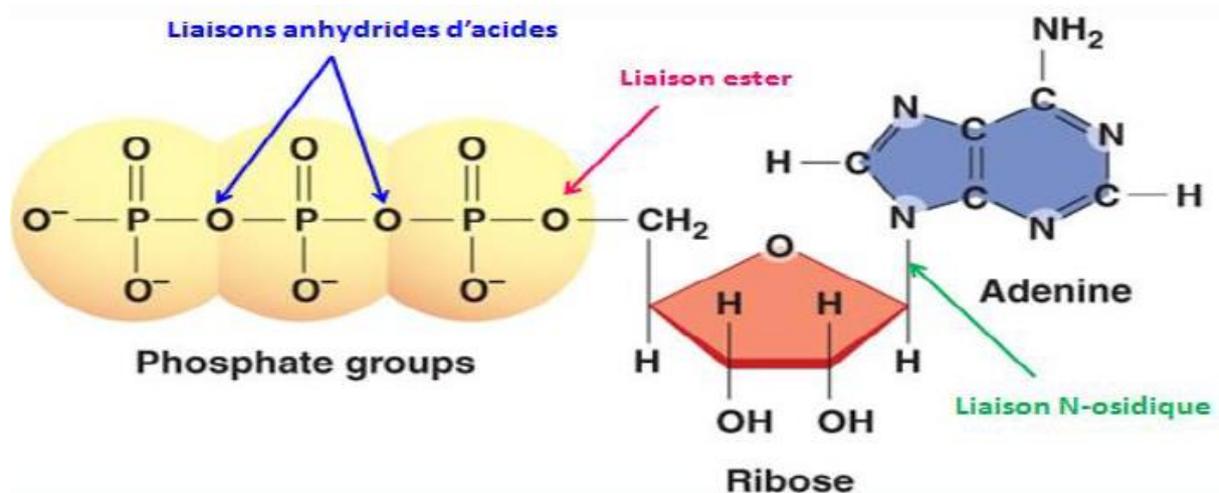


Figure 2. Structure de l'ATP [2].

L'ATP joue un rôle central dans la cellule :

- Apporte l'énergie nécessaire aux réactions endergoniques (synthèse des lipides, glycogène....)

- Donneur de groupement phosphate et l'énergie nécessaire à la phosphorylation (Figure 3).

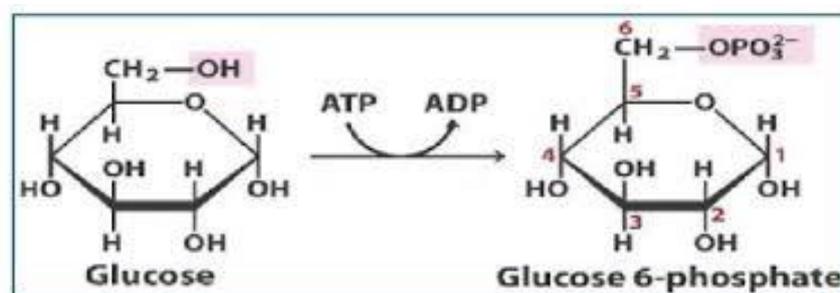


Figure 3. Phosphorylation de glucose par l'ATP [3].

Exemples d'autres molécules riches en énergie :

Exemples de molécules riches en énergie	Energie libérée (ΔG) lors de l'hydrolyse en Kcal/mol
Phosphoénol pyruvate	-15
1,3 biphosphoglycérate	-12
Créatine phosphate	-10
ATP	-7
Fructose 6-phosphate	-4
Glucose 6-phosphate	-3
Glycérol phosphate	-2

III. Réaction d'oxydoréduction

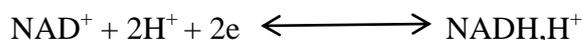
L'énergie chimique peut être conservée sous forme d'électrons à haut potentiel énergétique contenus dans les molécules énergétiques.

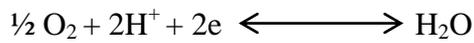
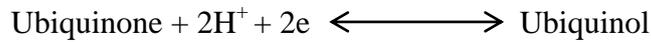
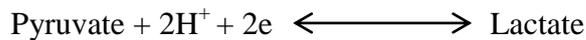
Une oxydation est une réaction chimique durant laquelle une molécule (un réducteur) perd un ou plusieurs électrons ou d'hydrogène(s). Une réduction est une réaction chimique durant laquelle une molécule (un oxydant) capte un ou plusieurs électrons ou d'hydrogène(s).

Les réactions d'oxydation et de réduction sont le plus souvent couplées en une réaction dite d'oxydo-réduction au cours de laquelle il y a transfert d'électrons. Les électrons perdus par la molécule oxydée sont captés par la molécule réduite.

Couple redox : on l'écrit (red/ox), signifiant un réducteur et son oxydant conjugué

Exemple de quelques couples redox :





L'oxydant le plus agressif pour les êtres vivants est aussi celui qui permet à la majorité d'entre eux de vivre : l'oxygène O₂

Les réactions d'oxydoréduction sont catalysées par les oxydoréductases comme :

- Les oxydases qui catalysent des réactions où l'oxygène est l'accepteur final d'électrons.
- Les déshydrogénases qui catalysent des réactions redox où l'accepteur final d'électrons n'est pas l'oxygène. Elles utilisent des coenzymes qui sont des transporteurs d'électrons.

Exemple : Réaction de la glycolyse :



IV. La chaîne respiratoire et la phosphorylation oxydative

Une grande partie de l'énergie produite dans les voies cataboliques des glucides, des lipides et des protéines se retrouve contenue dans le NADH et le FADH₂ (Figure 4) ; elle doit être convertie en ATP (énergie rapidement utilisable) qui est produit dans les mitochondries à partir de la chaîne respiratoire mitochondriale et la phosphorylation oxydative : les coenzymes réduits mitochondriaux (NADH et le FADH₂) cèdent (perdent) leurs deux électrons à un système de transporteurs qui, par une cascade de réactions d'oxydo-réduction, amène ces électrons jusqu'à l'accepteur final, l'oxygène moléculaire (Figure 4).

Cependant, au cours de ce transfert électronique, il y a formation d'un gradient de protons de part et d'autre de cette membrane, ce qui permet la synthèse d'ATP lors d'une réaction catalysée par l'ATP synthétase mitochondriale. La respiration et la phosphorylation de l'ADP sont donc couplées via ce gradient de protons.

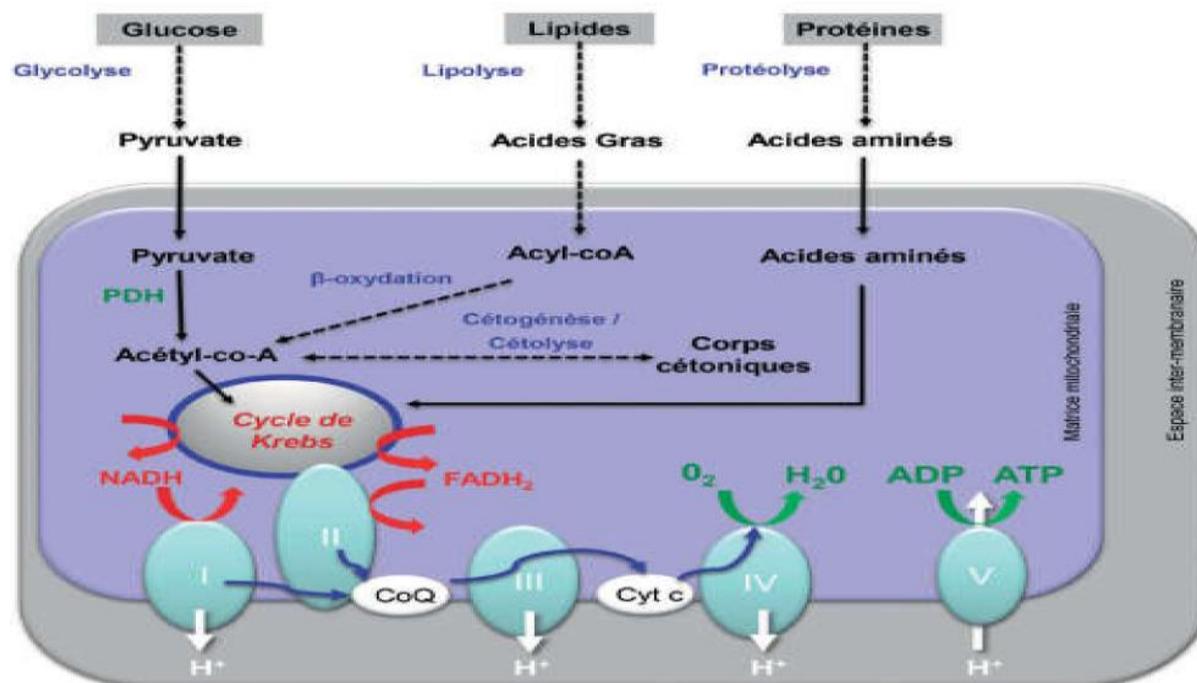


Figure 4. Le métabolisme énergétique mitochondrial [4].

La chaîne respiratoire est une chaîne de transport d'électrons réalisant l'oxydation (perd un ou plusieurs électrons ou d'hydrogène) des coenzymes réduites issues de la dégradation de composés organiques ou minéraux. Cette chaîne de transport d'électrons est constituée de quatre complexes protéiques.

1. Les transporteurs d'électrons

Tout au long de la chaîne respiratoire les électrons provenant du NADH et du FADH₂, vont perdre de l'énergie qui sera utilisée pour former le gradient électrochimique de proton entre l'espace inter-membranaire et la matrice mitochondriale. Les électrons riches en énergie ainsi récupérés seront transportés successivement via les différents complexes (Figure 5) :

- **Le complexe I** a une action NADH coenzyme Q réductase, récupérant les électrons du NADH et permet le transport de protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.
- **Le complexe II** a une action Succinate coenzyme Q réductase, récupérant les électrons du FADH₂ et permet le transport d'aucun proton.

- **Le complexe III** a une action Coenzyme Q cytochrome C réductase, et permet le transport de protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.
- **Le complexe IV** a une action Cytochrome C oxydase, et permet le transport de protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.

Le coenzyme Q (ou ubiquinone) et le cytochrome C sont des molécules transporteurs d'électrons de la chaîne respiratoire. Le coenzyme Q permet la transition entre le complexe I ou II et le complexe III. Il est intéressant de préciser que le coenzyme Q accepte également les électrons provenant du cytosol. Le cytochrome C permet la transition entre le complexe III et le complexe IV.

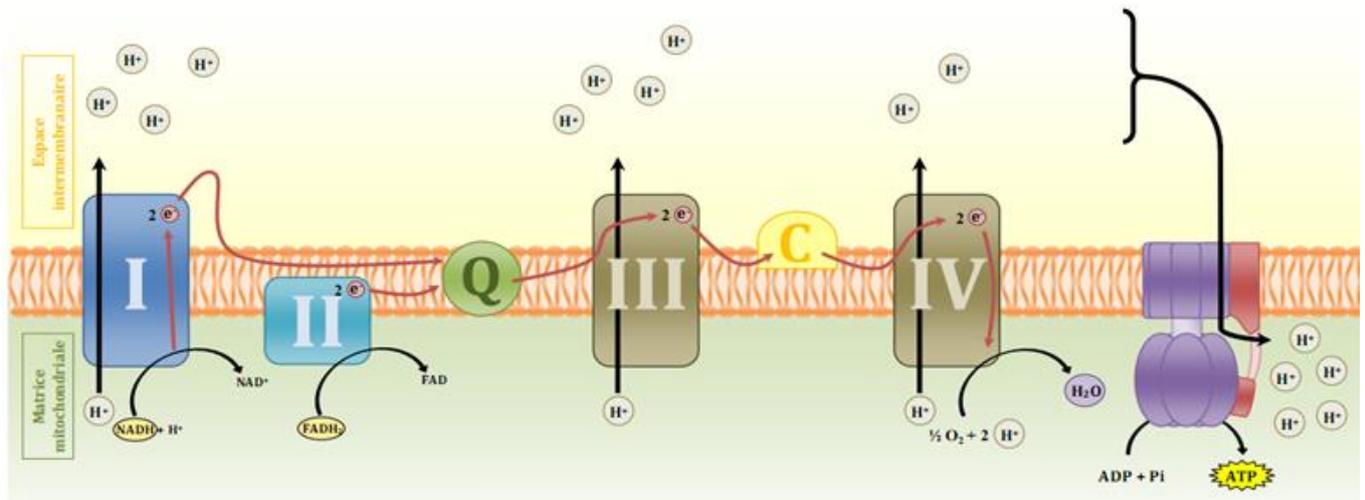


Figure 5. Schéma simplifié représentant les mécanismes de la chaîne respiratoire et de la synthèse d'ATP par phosphorylation oxydative. [5]

Les électrons de basses énergies libérés à la fin de la chaîne respiratoire réagiront ainsi avec les molécules d'oxygène et les protons présents dans la matrice mitochondriale afin de former des molécules d'eau.

2. L'ATP synthétase

L'accumulation de charge positive dans la surface externe de la membrane et charge négative dans la matrice (Figure 5) génère un gradient électrochimique. Ce gradient électrochimique est en soit un potentiel énergétique très important qui sera utilisé pour faire fonctionner la pompe ATP synthétase (Figure 6).

Le retour des protons dans la matrice se produit au niveau de passages spécifiques constitués par l'ATP synthétase (une pompe ionique constituée de complexes FoF1) : Fo est un canal transmembranaire qui laisse passer sélectivement les protons, F1 contient le site catalytique responsable de la synthèse de l'ATP à partir d'ADP et de Pi. Le gradient électrochimique de protons fournit ainsi l'énergie nécessaire à la synthèse d'ATP. (La synthèse d'ATP est couplée au transfert des électrons par le gradient de protons : **phosphorylation oxydative**).

Le passage des protons à travers cette pompe l'actionne pour former l'ATP à partir d'ADP + Pi.

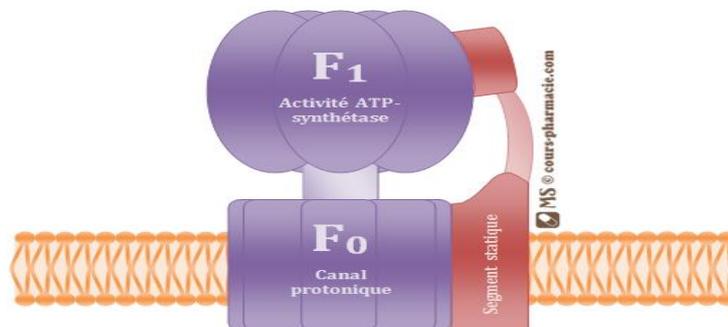


Figure 6. L'ATP synthétase [5].

Bilan de la chaîne respiratoire :

