



Université de Batna 2

Faculté de Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Microbiologie et biochimie

Master : Microbiologie et contrôle de qualité

Matière : Métabolisme des procaryotes



Chapitre 1

Métabolisme énergétique

Enseignante : Dr. ZAATOUT Nawel

Année universitaire : 2024-2025

Introduction

Le métabolisme des procaryotes englobe l'ensemble des processus biochimiques permettant à ces micro-organismes de produire de l'énergie et des molécules nécessaires à leur croissance, leur reproduction et leur survie. Contrairement aux eucaryotes, les procaryotes, comprenant les bactéries et les archées, possèdent une grande diversité métabolique qui leur permet de coloniser des environnements variés, allant des sources hydrothermales aux environnements extrêmes en termes de température, de pH ou de salinité.

1. Sources d'énergie et types trophiques

L'énergie nécessaire aux micro-organismes est fournie par la lumière (organismes phototrophes) ou par l'oxydation de substances chimiques (organismes chimiotrophes). La formation d'ATP à partir de la source primaire d'énergie est plus ou moins complexe selon le type trophique ou métabolique (Tableau I).

La croissance (et donc l'anabolisme) d'une bactérie impose des besoins en sources de matière (nutriments) et d'énergie. Il existe à ces deux niveaux dans le monde bactérien une grande diversité que l'on gère habituellement à l'aide de trois critères :

- La source d'énergie utilisée ;
- Donneur d'électrons ;
- La source de carbone

Selon la source d'énergie, on a les micro-organismes chimiotrophes et les micro-organismes phototrophes.

Tableau I : Type trophique chez les microorganismes.

Classe du besoin	Nature du besoin	Type trophique
Source d'énergie	Lumière	phototrophe
	Oxydation de composés organiques ou inorganiques	chimiotrophe
Donneur d'électrons	Minéral	lithotrophe
	organique	Organotrophe
Source de carbone	Composé minéral	Autotrophe
	Composé organique	hétérotrophe
Facteurs de croissance	Non nécessaire	Prototrophe
	nécessaire	Auxotrophe

1.1. Microorganismes phototrophes

Les microorganismes phototrophes sont des organismes capables de convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique. Ils utilisent la lumière comme source d'énergie pour la synthèse des molécules organiques. Ils peuvent capter et utiliser l'énergie lumineuse au niveau de complexes multimoléculaires, appelés photosystèmes. Un photosystème est composé de plusieurs molécules qui transmet l'énergie lumineuse à une bactériochlorophylle (Les chlorophylles utilisées par certaines bactéries photosynthétiques, Elles absorbent la lumière à des longueurs d'onde plus grandes que celles captées par la chlorophylle a des plantes) et d'un "centre réactionnel" permettant la formation d'ATP.

A. Photosynthèse bactérienne :

La photosynthèse est le processus bioénergétique qui permet à des organismes de synthétiser de la matière organique en utilisant l'énergie lumineuse, l'eau et le dioxyde de carbone. Elle fournit aux organismes photosynthétiques l'ATP et le pouvoir réducteur

nécessaires (NADP) à la synthèse des matières organiques requises pour leur croissance (Tableau II).

Chez les bactéries photosynthétiques (cyanobactéries, bactéries vertes et pourpres sulfureuses), l'absorption de lumière visible est réalisée grâce aux bactériochlorophylles. Outre que la chlorophylle, la photosynthèse met en jeu d'autres pigments photosynthétiques : les caroténoïdes (500-700 nm) et les phycobilines qui sont présents exclusivement chez les algues et les cyanobactéries.

Les pigments (chloro, caroténoïdes, phycobilines) y sont organisés en sous unités appelées photosystèmes : ceux-ci sont composés d'une antenne collectrice des photons (composée de chlorophylle b, de caroténoïdes et de protéines), et d'un centre réactionnel (composé de deux molécules de chlorophylle a), qui a pour fonction de transférer des électrons à une chaîne d'accepteurs d'électrons. Deux photosystèmes distincts ont été identifiés : le photosystème I et le photosystème II.

Tableau II : Diversité des organismes phototrophes.

Organismes eucaryotes	Organismes procaryotes
Plantes supérieures	Cyanobactéries (algues bleues)
Algues multicellulaires rouges, brunes et vertes	Bactéries vertes sulfureuse ou non
Algues unicellulaires	Bactéries pourpres sulfureuses ou non

B. Les étapes de la photosynthèse :

La photosynthèse s'accomplit en deux phases : une phase claire (dite aussi « lumineuse ») durant laquelle la chlorophylle capte la lumière, et une phase sombre (dite aussi « obscure ») durant laquelle l'énergie emmagasinée pendant la phase précédente est utilisée pour le cycle de Calvin qui permet la synthèse de trioses.

1. Phase photochimique ou phase claire (les réactions directement dépendantes de la

lumière) : Ces réactions se déroulent chez les bactéries (notamment les abondantes cyanobactéries, mais aussi les bactéries vertes et les bactéries pourpres) au sein du cytoplasme sur les invagination des membranes plasmiques ou des corpuscules (appelés *chlorosomes*), qui renferment des bactériochlorophylles, durant cette étape, il y a la production d'ATP, la plupart du temps couplée à la production de NADPH par oxydation de l'eau.

- Au cours de cette phase, le photosystème I (PS I) est frappé par les photons de la lumière solaire, les pigments captent les photons solaires au niveau de l'antenne collectrice formée de protéines, ils entrent dans un état excité. Cette excitation est transmise de pigment à pigment (chaîne de transporteurs d'électrons) pour arriver au centre réactionnel formé d'une paire de chlorophylle A.
- Cette paire a une fonction de transfert énergétique électronique en transférant 2 électrons à une succession de sites accepteurs et donneurs d'électrons. Les transferts d'électrons sont précisément organisés au sein de la membrane photosynthétique pour aboutir, d'une part, à la réduction chimique d'un composé, le nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADP⁺), par une enzyme, la NADP-réductase et, d'autre part, au stockage de protons H⁺ dans l'espace intérieur des thylakoïdes : $\text{NADP}^+ + 2\text{H}^+ + 2\text{e} \text{ ----> NADPH} + \text{H}^+$
- Des photons frappent aussi le photosystème II (PS II), qui libère également des électrons. Ceux-ci sont transférés à une chaîne de transfert d'électrons, puis à un complexe appelé cytochrome. Ce dernier transfert déclenche le passage d'ions H⁺ dans le cytoplasme ; les ions H⁺ ainsi concentrés dans l'espace

intrathylakoïdien (ou dans le périplasme) retournent dans le stroma en passant par une protéine membranaire l'ATP synthase produisant ainsi de l'ATP.

- Le photosystème II, absorbe 2 photons, perd 2 électrons qu'il donne à son accepteur primaire d'électrons, qui les cède à son tour à une chaîne de transport. Cette chaîne donne les électrons au centre réactionnel du photosystème I.

- Le photosystème I a, lui aussi, perdu 2 électrons au profit de son accepteur primaire. Celui-ci les cède à une autre chaîne de transport qui les conduira vers le NADP⁺ au niveau du stroma. Le NADP⁺ est le dernier accepteur d'électrons de cette deuxième chaîne, et se transforme en NADPH + H⁺. Les électrons perdus du photosystème I sont donc remplacés par ceux provenant du photosystème II. Mais le photosystème II n'a toujours pas remplacé ses électrons perdus. - C'est une enzyme qui prend les électrons de l'eau et les donne au PSII. Cette réaction libère de l'oxygène (la photolyse de l'eau) : $2\text{H}_2\text{O} (\text{eau}) \rightarrow \text{O}_2(\text{oxygène}) + 4\text{H}^+(\text{protons}) + 4 \text{e}^- (\text{électrons})$.
- Les électrons issus de la photolyse de l'eau sont transférés jusqu'au PSII, et de l'oxygène gazeux est libéré

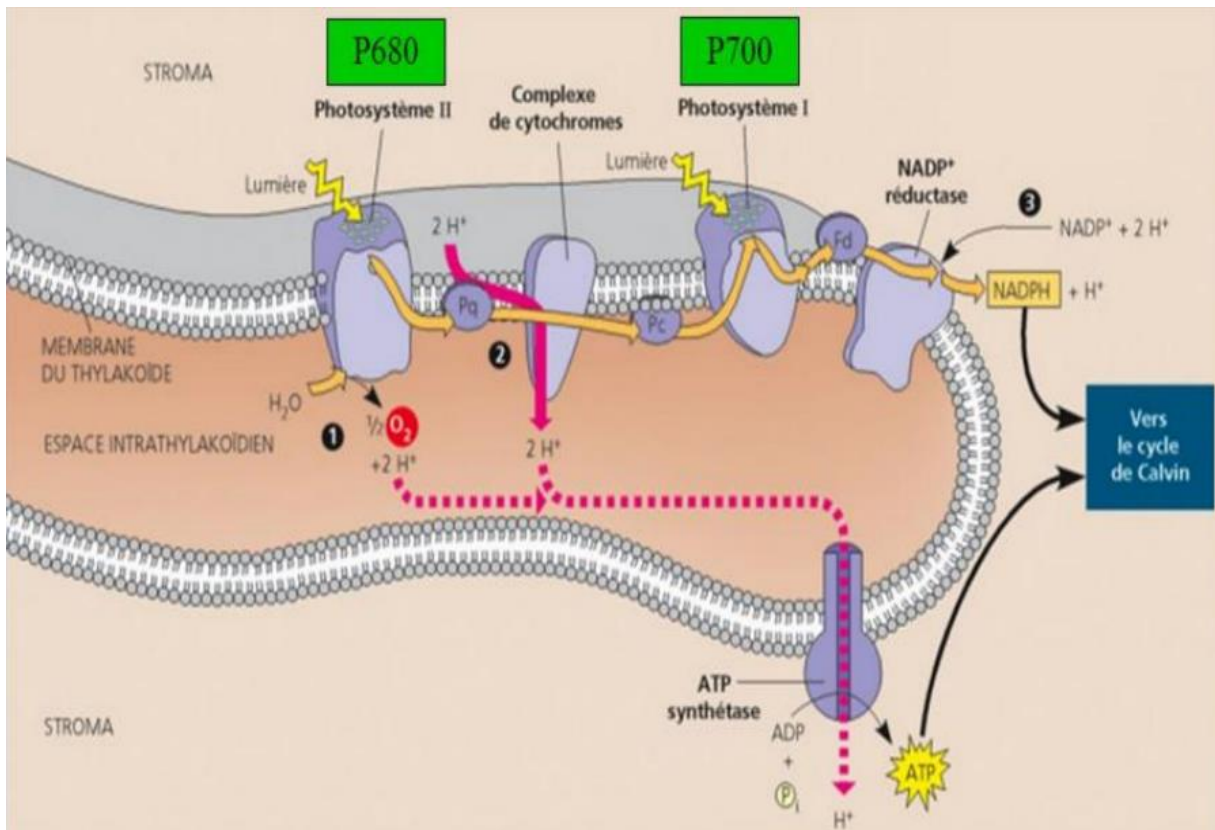
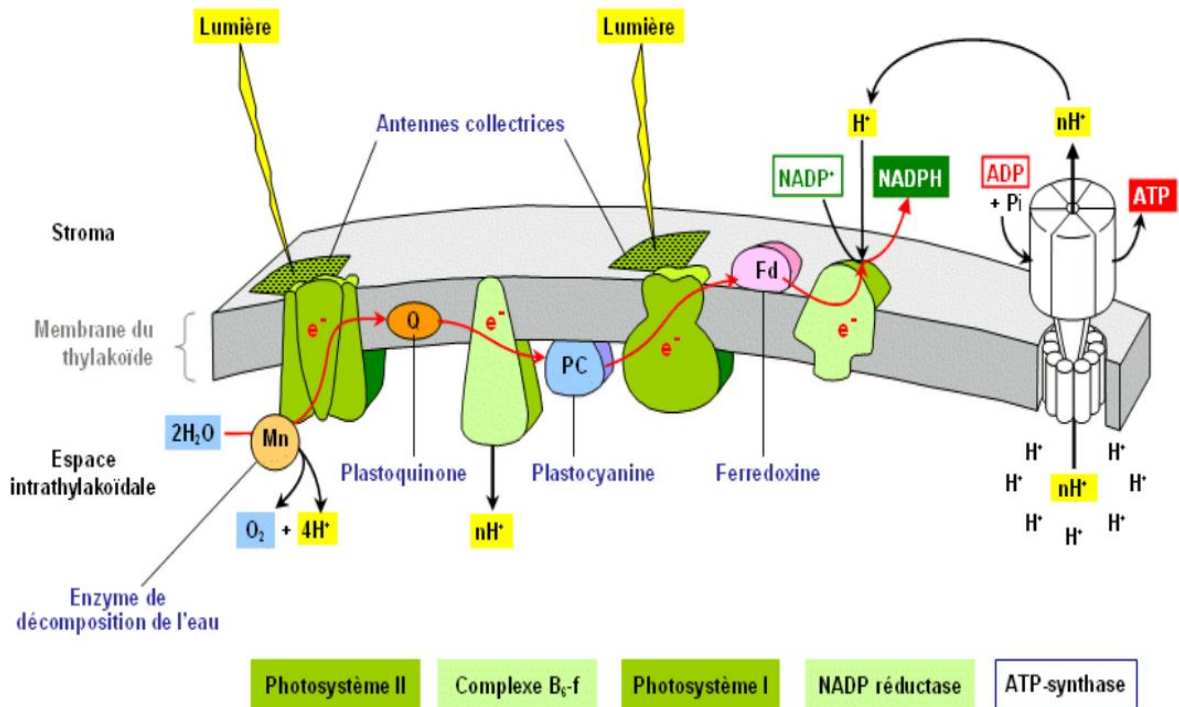
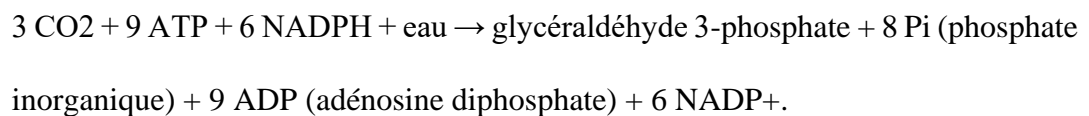


Figure 1 : Les étapes de la photosynthèse.

- **Réactions indépendantes de la lumière dites « phase obscure », « phase sombre » ou « phase biochimique »**, Elle correspond à la synthèse de la matière organique ; elle consomme du CO₂ et libère de l'eau. L'ATP et le NADPH H⁺ produits par la phase photochimique servent à transformer le CO₂ en glucides, au cours d'une série de réactions biochimiques appelées cycle de Calvin.
- Le CO₂ atmosphérique réagit avec un sucre, le ribulose 1,5-diphosphate ou RuBP, et de l'eau pour donner deux molécules de 3-phosphoglycérate. Cette réaction de fixation du carbone est catalysée par une enzyme volumineuse, la ribulose diphosphate carboxylase ou Rubisco. Pour chaque molécule de CO₂ convertie en glucide, trois molécules d'ATP et deux de NADPH sont consommées. L'équation globale du cycle de Calvin est donc la suivante :



C. Les types de photosynthèse bactérienne

La photosynthèse peut être oxygénique ou anoxygénique.

A.1. Photosynthèse oxygénique

Lors du processus photosynthétique de ces organismes, les atomes d'hydrogène de l'eau servent à réduire le dioxyde de carbone et il y'a libération d'oxygène sous forme gazeuse. En raison de la production de dioxygène en utilisant l'eau comme donneur d'électrons, ce processus est parfois dit oxygénique. Exp : les cyanobactéries (*Nostoc*, *Oscillatoria*...).

A.2. Photosynthèse anoxygénique

Il existe d'autres familles de procaryotes photosynthétiques qui sont classifiées selon la méthode qu'elles utilisent pour réduire le CO₂. Ces bactéries ne peuvent pas utiliser l'eau pour réduire le CO₂ (H₂O n'est pas le donneur d'électrons mais un composé réduit du soufre tel que H₂S ou un composé organique) et sont incapables d'accomplir la photosynthèse en présence d'oxygène. Elles doivent donc se trouver dans un environnement anaérobie. En conséquence, leur processus photosynthétique est dit anoxygénique car il ne produit pas d'O₂. Ex : les bactéries vertes sulfureuses (ex : *Chlorobium*), les bactéries pourpres sulfureuses (ex : *Rhodospirillum*).

1.2. Microorganismes chimiotrophes

Les levures, les moisissures et la plupart des bactéries, sont incapables d'effectuer la photosynthèse car ils sont dépourvus de pigments chlorophylliens et sont par conséquent incapables de faire la photosynthèse. Elles doivent donc tirer leur énergie de l'oxydation des composés chimiques organique ou inorganiques (oxydoréduction).

A. Respiration et types respiratoires bactériens

La respiration (métabolisme oxydatif) est l'ensemble des réactions biochimiques d'oxydation procurant à l'organisme l'énergie nécessaire à ses biosynthèses essentiellement grâce à des phosphorylations oxydatives membranaires (chaîne de transfert des électrons). On distingue deux types de réactions en fonction de la nature chimique de l'accepteur final : La respiration aérobie et la respiration anaérobie.

Dans la respiration aérobie, l'oxygène moléculaire (O₂) sert d'accepteur final d'électrons, permettant ainsi une production efficace d'ATP (adénosine triphosphate) via la chaîne de transport d'électrons. Les microorganismes ne possédant qu'un système de ce type sont des « aérobies strictes » En revanche, lors de la respiration anaérobie, des composés autres que l'oxygène sont utilisés, l'accepteur peut être minéral (nitrates, sulfates, gaz carbonique) ou

organique non fermentescible (ex: fumarate). Bien que moins efficace en termes de production d'ATP, la respiration anaérobie permet à de nombreux microorganismes de survivre dans des environnements dépourvus d'oxygène.

B. Fermentation

La fermentation est l'ensemble des réactions biochimiques d'oxydation qui fournissent à l'organisme de l'énergie grâce à des phosphorylations non couplées aux processus membranaires, mais ayant lieu uniquement dans le cytoplasme, au niveau du substrat (l'accepteur final est organique).

L'énergie produite par fermentation est nettement inférieure à celle procurée par respiration. Exemple: l'oxydation complète du glucose en CO₂ et H₂O, par respiration aérobie, produit 674 kcal; alors que sa fermentation en acide lactique ne produit que 22,5kcal. Ceci explique le faible rendement de croissance obtenu en anaérobiose, comparé à celui obtenu au cours des processus respiratoires.

3. Chaînes respiratoires eucaryotes et procaryotes

Chaînes respiratoires eucaryotes :

La chaîne respiratoire est encore appelée système de transport des électrons située dans la membrane interne des mitochondries. C'est la voie finale de l'oxydation des oses, comportant une série de composés qui transportent les électrons d'un donneur (Coenzyme NADH, FADH₂) à un accepteur final.

Une grande partie de l'énergie produite dans les voies cataboliques se retrouve contenue dans le NADH et le FADH₂ ; elle sera convertie en ATP dans la mitochondrie : les coenzymes réduits mitochondriaux cèdent 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. La membrane interne est imperméable aux ions H^+ , 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 synthase mitochondriale. La respiration et la phosphorylation de l'ADP sont donc couplées *via* ce gradient de protons (Phosphorylation oxydative).

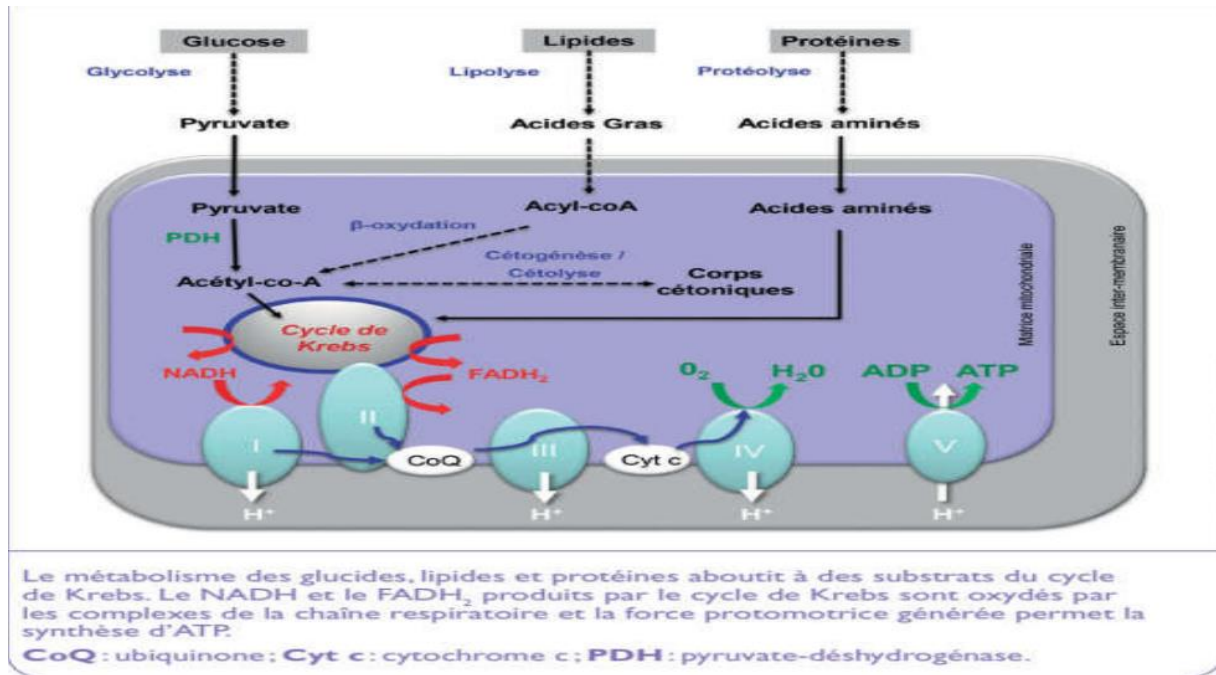


Figure 2 : Chaîne respiratoire mitochondriale.

La chaîne respiratoire mitochondriale est constituée d'un ensemble de 4 complexes enzymatiques. Ces complexes enzymatiques sont:

- **Complexe I** : NADH-coenzyme Q oxydoréductase. Ce complexe catalyse la réoxydation du NADH, H^+ et transfère les électrons à l'ubiquinone (coenzyme Q).
- **Complexe II** : succinate-coenzyme Q oxydoréductase. Ce complexe catalyse la réoxydation du $FADH_2$ et transfère les électrons à l'ubiquinone (coenzyme Q).
- **Complexe III** : coenzyme Q-cytochrome c oxydoréductase. Il permet le transfert des électrons du coenzyme Q au cytochrome c.

- **Complexe IV** : cytochrome c-oxydase. La cytochrome oxydase catalyse la réaction finale de la chaîne respiratoire : les électrons sont transférés du cytochrome c réduit au dioxygène. La réaction catalysée par la cytochrome oxydase est :



Le transfert de deux électrons du NADH à l'oxygène produisait environ 3 ATP, et que celui du FADH₂ générait environ 2 ATP.

Chaînes respiratoires procaryotes :

Contrairement aux eucaryotes, dont les chaînes de transport d'électrons sont très semblables, les bactéries possèdent une grande variété d'enzymes de transfert d'électrons, qui utilisent également une grande variété de substrats. Le transport d'électrons partage cependant avec les eucaryotes le fait d'utiliser l'énergie libérée au cours de l'oxydation des substrats pour pomper des ions à travers une membrane et produire un gradient électrochimique à travers cette membrane. Chez les procaryotes, la chaîne de transport d'électrons se trouve dans la membrane plasmique. Les procaryotes peuvent être chimioorganotrophes ou chimiolithotrophes :

- **Chimioorganotrophes** : Utilisent des molécules organiques comme donneurs d'électrons (ex : glucose).
- **Chimiolithotrophes** : Utilisent des composés inorganiques comme donneurs d'électrons (ex : H₂S, Fe²⁺). Ce processus est souvent utilisé par des bactéries anaérobies ou autotrophes.

Explication des termes :

- **Une réaction d'oxydoréduction** ou réaction rédox est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un transfert d'électrons.
- **L'oxydation** est un processus chimique fondamental dans lequel une substance perd des électrons qui conduit à une diminution du contenu énergétique de la molécule.
- **Une réduction** est un gain d'électrons
- **Un oxydant** est une espèce chimique susceptible de capter un ou plusieurs électrons.
- **Un réducteur** est une espèce chimique susceptible de céder un ou plusieurs électrons.
- **Les protons** : sont chargés positivement, **les neutrons** sont non chargés, tandis que **les électrons** sont chargés négativement.
- **Une chaîne de transport d'électrons** est une série d'enzymes et de coenzymes qui réalise globalement deux actions simultanément : elle transfère des électrons depuis des donneurs d'électrons vers des accepteurs d'électrons au cours de réactions d'oxydoréduction successives, et elle assure le pompage de protons ou d'autres cations à travers une membrane biologique.
- **Différence entre NADP⁺ et NAD⁺** : Le NADP⁺ il ne diffère chimiquement de NAD⁺ que par la présence d'un groupe phosphate.
- **L'adénosine triphosphate**, ou **ATP**, est un nucléotide formé à partir d'un nucléoside associé à un triphosphate. L'ATP fournit l'énergie nécessaire aux réactions chimiques du métabolisme, afin de libérer cette énergie, la molécule

d'ATP est clivée, par hydrolyse, en adénosine diphosphate (ADP) et en phosphate inorganique

- **Une isomérisation** convertit une molécule en une autre molécule avec les atomes identiques. Les formes isomérisées ont la même composition chimique mais avec une structure ou une configuration différente et, par conséquent, généralement avec des propriétés physiques et chimiques différentes.