

Les molécules de nutriments, comme toutes les molécules, possèdent de l'énergie associée aux électrons qui forment les liaisons entre leurs atomes. Quand cette énergie est répartie dans toute la molécule, il est difficile pour la cellule de l'utiliser. Toutefois, diverses réactions des voies métaboliques concentrent l'énergie du substrat par la formation de composés riches en énergie tels que l'adénosine diphosphate (ADP) et l'adénosine triphosphate (ATP) ou de composés contenant le lien thioester (Acétyl - SCoA) ou succinyl - SCoA.

Généralement, le métabolisme énergétique est réalisé au cours d'une série de réactions d'oxydoréductions couplées jusqu'à un accepteur final d'hydrogène.

1- Notion d'énergie

L'énergie est la capacité à fournir un travail ou des changements dans un système donné. Dans la cellule microbienne, le travail se différencie en trois types :

- **Le travail chimique** : comprend la biosynthèse des macromolécules cellulaires à partir de leurs monomères ou de leurs précurseurs de base ;
- **Le travail de transport** : permet à la cellule d'absorber des nutriments et d'excréter des métabolites, indépendamment de leurs concentrations intra et extracellulaires ;
- **Le travail mécanique** : confère aux microorganismes vivants la capacité de mouvement.

2- Source d'énergie et types trophiques

Les microorganismes produisent leur énergie à partir de trois sources différentes qui déterminent, par leur nature, trois types trophiques : les chimioorganotrophes dont la source d'énergie est basée sur l'oxydation des composés organiques, les chimiolithotrophes dont l'oxydation des composés minéraux représente leur principale source d'énergie, et les microorganismes photosynthétiques (ou phototrophes).

En général, chaque espèce ne peut utiliser qu'une seule source d'énergie. Cependant, il existe des espèces capables d'en utiliser plusieurs.

Les champignons, les protozoaires et la grande majorité des bactéries sont incapables de faire la photosynthèse et sont chimiotrophes.

2-1- Métabolisme phototrophe

La photosynthèse est un procédé qui vise à convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique biologiquement utilisable (ATP). Ce type de métabolisme existe chez les végétaux, les algues microscopiques, ainsi que chez certains groupes de bactéries et d'archéobactéries. Néanmoins, les composants mis en jeu dans la photosynthèse varient d'un groupe à un autre.

Les bactéries photosynthétiques appartiennent à deux groupes qui diffèrent de manière radicale sur le plan physiologique que taxonomique : les *Rhodospirillales* et les Cyanobactéries.

2-1-1- principe

La photosynthèse se déroule en deux phases :

La phase lumineuse :

Elle correspond à l'utilisation de l'énergie lumineuse ou des photons. La lumière est absorbée par les pigments photosynthétiques (localisés au niveau de la membrane cytoplasmique ou dans les thylacoïdes) puis dirigée vers les centres réactionnels ou photosystèmes cellulaires. Ces derniers sont constitués de complexes enzymatiques et de coenzymes transporteurs d'électrons (cytochromes principalement) générateurs d'un potentiel électrochimique de membrane. Le spectre d'absorption des pigments varie d'un groupe à un autre.

Au cours des réactions photochimiques, l'ADP et le Pi sont convertis en ATP, et le transporteur d'électrons NADP⁺ est réduit en NADPH + H⁺ qui est un composé riche en énergie.

La phase sombre :

Les électrons et l'ATP servent à réduire le CO₂ en sucres au cours des réactions du cycle de CALVIN-BENSON.



2-1-2- Photosynthèse oxygénique

Les organismes concernés sont les Cyanobactéries qui réalisent une photosynthèse similaire à celle des végétaux : aérobie et productrice d'O₂ (oxygénique) car basée sur la photolyse de l'eau (l'eau est utilisée comme donneur de protons avec comme conséquence la production d'O₂).

Les pigments photosynthétiques sont la chlorophylle a, des caroténoïdes et des phycobillines. Ces derniers sont spécifiques des cyanobactéries.



2-1-2- Photosynthèse anoxygénique

Les organismes concernés sont des bactéries anaérobies strictes des eaux profondes. Elles appartiennent à l'ordre des *Rhodospirillales* et comprennent les bactéries pourpres (les *Rhodospirillineae*) et les bactéries vertes (les *Chlorobineae*).

Leur photosynthèse n'est pas similaire à celle des végétaux : anaérobie et non productrice d'O₂ (anoxygénique) car elle n'est pas basée sur la photolyse de l'eau. Le donneur de protons est une autre source externe : H₂, le sulfure d'hydrogène H₂S, les thiosulfates... Certains sont capables d'utiliser des composés organiques : acides, alcools, glucides et même des composés aromatiques. Cependant, l'H₂S est le plus utilisé.

Les pigments photosynthétiques sont des bactériochlorophylles et des caroténoïdes qui absorbent les radiations infrarouges.



2-2- Métabolisme chimiolithotrophe

L'autotrophie est une forme unique du métabolisme qui se trouve uniquement chez les archéobactéries et une minorité de bactéries. Ce sont, généralement, des bactéries vivant dans les sols dont beaucoup d'entre elles jouent un rôle fondamental dans les cycles biogéochimiques des éléments de la matière organique : carbone, azote, soufre, phosphore...

Les composés inorganiques sont directement oxydés (sans utiliser la lumière du soleil) pour donner de l'énergie (par exemple : NH₄⁺, NO₂⁻, S₂, et Fe²⁺). Ce type métabolique a été également appelé : chimioautotrophie ou chimiolithotrophie.

2-2-1- principe

L'oxydation des composés minéraux génère de l'énergie et, parfois, l'énergie et le pouvoir réducteur (atomes d'hydrogènes) nécessaires à la biosynthèse.

Certaines bactéries sont chimiolithotrophes obligatoires, alors que d'autres peuvent oxyder, en plus de la substance minérale, la matière organique ; elles sont dites chimiolithotrophes facultatives.

En se basant sur la nature des composés minéraux oxydés, on distingue cinq groupes de bactéries chimiolithotrophes :

a- Bactéries oxydant l'hydrogène

Elles vivent dans les écosystèmes anaérobies en association symbiotique avec d'autres groupes bactériens producteurs d'H₂ à partir de la dégradation anaérobie des divers composés organiques. De nombreuses espèces sont chimiolithotrophes facultatives.

b- Bactéries oxydant le soufre (les sulfureuses)

Elles sont représentées par deux groupes distincts. D'une part les *Beggiatoa* et les *Thiothrix*, bactéries très proches des cyanobactéries, mais non photosynthétiques, d'autre part, les *Thiobacillus*, petits bacilles Gram négatifs, pouvant supporter des pH extrêmement acides, et dont la plupart des espèces sont chimiolithotrophes obligatoires. Toutes ces bactéries oxydent les différentes formes de soufre réduit (sulfures, hydrogène sulfuré, etc.) et produisent des sulfates. Ce sont de redoutables agents de corrosion.

Parmi les espèces du genre *Thiobacillus*, deux sont très intéressantes : *Thiobacillus ferrooxidans* qui tire son énergie en oxydant du soufre, du fer élémentaire ou de métaux ferreux, et *T. denitrificans* qui tire son énergie en oxydant en anaérobie S₂O₃ toute en utilisant NO₃⁻ comme accepteur final des électrons.

Parmi les archéobactéries, il existe des microorganismes sulfureux, comme *Sulfolobus* (archéobactéries thermophiles extrêmes), qui oxydent les composés soufrés.

c- Bactéries oxydant le fer (les ferrugineuses)

Ces bactéries oxydent le fer ferreux en fer ferrique. Elles appartiennent aux groupes des bactéries filamenteuses engainées (*Sphaerotilus*, *Leptothrix*), au genre *Gallionella* (bactéries pédonculées) et certains *Thiobacillus* dont *Thiobacillus ferrooxidans*.

Les *Sphaerotilus* se rencontrent fréquemment dans les stations d'épuration où elles participent activement au traitement par boues activées. Il arrive, cependant, que leur prolifération gêne la sédimentation des boues et nuise au résultat final (*bulking*).

Les *Gallionella* sont des bactéries pédonculées que l'on peut rencontrer dans les canalisations d'eau potable où elles peuvent former des masses gélatineuses capables d'obstruer les canalisations.

d- Bactéries oxydant le monoxyde de carbone (les carboxytrophes)

Ces bactéries utilisent le monoxyde de carbone (CO) comme source de carbone et d'énergie. Elles sont chimiolithotrophes facultatives et appartiennent à différents genres : *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*...

e- Bactéries oxydant l'ammonium et les nitrites

Ces germes strictement aérobies vivent dans les couches superficielles des sols meubles (labourables) et dans les eaux, même polluées, où elles participent à l'épuration biologique.

Les *Nitrosomonas* et *Nitrospira* oxydent l'azote ammoniacal en nitrites. Les *Nitrobacter* et *Nitracoccus* oxydent les nitrites en nitrates.

Le cycle de l'azote

Le cycle de l'azote est un processus de recyclage par lequel les composés azotés organiques et inorganiques sont utilisés métaboliquement et recyclés chez les bactéries, les plantes et les animaux. Des processus importants, y compris l'ammonification, minéralisation, la nitrification, la dénitrification et la fixation d'azote atmosphérique sont menées principalement par des bactéries.

Le cycle de l'azote est une démonstration idéale de l'interdépendance écologique des bactéries, des plantes et des animaux : l'azote est recyclé lorsque les organismes utilisent une forme d'azote pour la croissance et excrètent un autre composé azoté comme un déchet. Ce déchet est, à son tour, utilisé par un autre type d'organisme.

L'ammonification est une étape essentielle dans le cycle de l'azote. Elle comprend la dégradation des protéines en acides aminés (protéolyse) puis en ammoniaque. Le NH_4^+ libéré à son tour, sert de source d'azote utilisable par de nombreuses autres bactéries.

Les autres processus biologiques importants dans le cycle de l'azote comprennent la nitrification (conversion du NH_4^+ en NO_3^-), la dénitrification (la conversion anaérobie du NO_3^- en gaz N_2) et la fixation d'azote (N_2 en NH_4^+ puis à des protéines cellulaires).

2-3- Métabolisme chimioorganotrophe

La plupart des bactéries sont chimioorganotrophes ; elles tirent l'énergie qui leur est nécessaire de l'oxydation des composés organiques présents dans leur environnement, tel que

les glucides, les lipides et les protéines. Ces composés seront dégradés à leurs monomères par des voies métaboliques spécifiques.

Le plus souvent le produit final de l'oxydation des composés organiques est le dioxyde de carbone. Toutefois, certaines bactéries sont incapables d'aller jusqu'à ce terme car elles ne disposent pas des enzymes nécessaires. Différents acides intermédiaires s'accumulent donc comme l'acide fumarique, l'acide citrique, l'acide oxalique et surtout l'acide acétique.

Certaines bactéries sont capables d'oxyder une très grande variété de composés organiques (*Pseudomonas*, plus de 80), d'autres seulement un seul composé organique comme *Diplococcus glycinophilus* ; capable d'utiliser seulement le glycolle.

Les bactéries acétiques sont utilisées pour la fabrication des vinaigres. Elles appartiennent aux genres *Acetomonas* et *Acetobacter*.

3- Types respiratoires

Après la dégradation du glucose en pyruvate, ce dernier peut être acheminé vers la phase suivante, c'est-à-dire soit vers la respiration cellulaire, soit vers la fermentation.

3-1- La respiration

La respiration est définie comme un processus de production d'ATP au cours duquel des molécules sont oxydées jusqu'au stade monocarboné et l'accepteur final des électrons est presque toujours une molécule inorganique. L'élément essentiel de la respiration est le fonctionnement de la chaîne de transport des électrons qui est localisée au niveau de la membrane cytoplasmique.

La respiration est caractérisée par l'accepteur final des électrons :

- Oxygène moléculaire (O₂) : Respiration aérobie;
- Substrat inorganique ou rarement organique : Respiration anaérobie.

3-1-1- la respiration aérobie

Le pyruvate qui est le produit de la glycolyse ne peut pas entrer directement dans le cycle de Krebs ; il doit passer par une étape préparatoire de décarboxylation (perte de CO₂) . L'énergie sera libérée de façon fractionnée afin d'obtenir un meilleur rendement: 38 moles d'ATP sont issues de l'oxydation de 1 mole de glucose.

3-1-2- la respiration anaérobie

Contrairement à la respiration aérobie, la respiration anaérobie se déroule en absence d'O₂. Malgré cela, le substrat est totalement oxydé en présence d'une chaîne de transport des électrons où l'accepteur final des électrons est une substance minérale et parfois un composé organique dissous dans le milieu. Selon l'accepteur final des électrons, on parle de :

- ✓ Respiration des nitrates : NO₃⁻ - réduit en NO₂⁻, en N₂O (dioxyde d'azote), ou en N₂.
- ✓ Respiration des sulfates : SO₄²⁻ - réduit en H₂S (sulfure d'hydrogène).
- ✓ Respiration des carbonates : CO₃²⁻ - (ion carbonate) réduit en CH₄.
- ✓ Respiration du fer ferrique : Fe³⁺ réduit en Fe²⁺.
- ✓ Respiration du fumarate : Le fumarate réduit en succinate.

3-2- La fermentation

La fermentation est un processus de production d'énergie relativement inefficace, car le glucose n'est jamais complètement oxydé néanmoins le rendement énergétique est suffisant pour la croissance microbienne : un ensemble de réactions biochimiques anaérobies d'oxydation et de réduction procurent à la bactérie l'énergie nécessaire à ses biosynthèses grâce à des phosphorylations au niveau du substrat ayant lieu uniquement dans le cytoplasme. Le glucose est le substrat le plus étudié. Sa dégradation conduit à la formation de produits qui servent de base à la biosynthèse (précurseurs), ainsi qu'à la formation de différents produits fermentaires terminaux (déchets ; généralement l'alcool ou des acides) caractéristiques du profil de la fermentation.

Il est important de noter que le substrat joue le rôle de donneur et d'accepteur des électrons et des protons (qui proviennent de l'oxydation du substrat), puisque le produit terminal de la fermentation n'est autre que le substrat initial partiellement oxydé.

❖ Effet Pasteur

Les bactéries aérobies anaérobies facultatives sont capables à la fois de respiration et de fermentation. Cependant, leur métabolisme fermentaire est réprimé en présence d'O₂ afin d'orienter le métabolisme oxydatif vers la voie métabolique la plus énergétique. Ce processus est connu sous le nom « d'effet Pasteur ».

3-3- Bilan énergétique

Le bilan énergétique des différents types respiratoires varie selon :

- Le niveau d'oxydation du substrat énergétique (totale ou partielle)
- La nature de l'accepteur final des électrons ou plus précisément le potentiel d'oxydoréduction de l'accepteur final des électrons.

La respiration aérobie a un bilan énergétique supérieur à celui de la respiration anaérobie parce que l'O₂ a un potentiel d'oxydoréduction plus élevé que celui de tous les accepteurs finaux des électrons utilisés dans la respiration anaérobie.

N.B : le potentiel d'oxydoréduction est la mesure quantitative de la capacité d'un composé à capter ou à perdre des électrons. Il est exprimé en volt.