**Chapitre III Diversité des métabolismes microbiens**

Le métabolisme cellulaire est composé de plusieurs voies métaboliques, on appelle cela « le métabolisme ». Il peut être soit de dégradation (dit catabolismes) ou de synthèse (dit anabolismes). Ces deux mécanismes essentiels pour la vie microbienne fonctionnent de manière complémentaire et en même temps dans la cellule. Chaque voie métabolique est composée de plusieurs réactions biochimiques consécutives qui transforment spécifiquement le substrat réactionnel initial en un produit final.

Compte tenu spécificités physiologiques et de structure des bactéries, les fonctions remplies par le métabolisme cellulaire, considéré dans son ensemble, sont réalisées en quatre phases majeures.

1- Les nutriments, présents dans le milieu sous forme de macromolécules et de polymères divers, sont hydrolysés à l’extérieur des cellules en fragments de dimères ou de monomères de taille compatible avec leur absorption par les bactéries. Cette absorption permet l’approvisionnement de la cellule en nutriments de base. Elle est essentiellement contrôlée dans la membrane cytoplasmique et se fait par différents systèmes de transports qui permettent le transfert des produits de l’hydrolyse des nutriments polymérisés, du milieu extra-cellulaire vers le milieu intra-cellulaire : c’est-à-dire là où se situent les différentes structures métaboliques utilisatrices de ces substrats.

2- Les molécules simples absorbées sont intégrées au métabolisme intermédiaire et converties en acides organiques et en esters phosphoryles, qui servent de précurseurs à la biosynthèse des molécules élémentaires de base : acides aminés, acides gras, bases azotées, oses et autres métabolites élémentaires. Ils servent aussi et en partie de substrats énergétiques.

3- la polymérisation des macromolécules : Cela s’effectue à partir des molécules élémentaires précédemment produites, Il y a production de lipides, de glucides, de protéines et d’acide nucléiques.

4- Dans la dernière phase, il y à réalisation de l’assemblage des macromolécules en structures supra-moléculaires comme les nucléotides, les ribosomes, les parois, les flagelles…etc, qui ne sont en réalité que les différentes structures des microorganismes.

**II -1 Intérêt de la diversité des métabolismes dans certains secteurs**

La diversité microbienne est d’une importance capitale dans la fonction des écosystèmes. Plusieurs secteurs peuvent en jouir c’est le cas par exemple l’agriculture, le secteur agroalimentaire, environnemental et industriel. Ces domaines peuvent être influencés positivement par les communautés microbiennes appelés aussi (microbiomes).

**-Dans le secteur de l’agriculture**, les microorganismes ont été longtemps utilisés dans la protection phytosanitaire, contrôlant naturellement ou par utilisation des bio-pesticides, les différents ravageurs des plantes. Les bactéries sont aussi utilisées comme PGPR pour favoriser la croissance et la résistance des plantes et réduire l’utilisation d’engrais et de pesticides. La transformation des produits agricoles par les fermentations (alcool, vinaigre, fromage, viandes…) est très utilisée et ce depuis très longtemps. La santé des animaux, est une orientation nouvelle pour l’augmentation du rendement en viande.

**-Dans le secteur de l’environnement**, la décomposition de la matière organique, les cycles des éléments nutritifs et la biodégradation des polluants toxique constituent des axes d’une importance fondamentale. Elles permettent de sauvegarder les sols les eaux aquifères et souterraines et les autres segments de l’environnement. Cela contribue à renforcer le développement durable. Les problèmes de la pollution métallique, les bio sorptions des métaux lourds par les microorganismes sont plus qu’avantageuses, dans les secteurs de la dépollution des segments de l’environnement.

**-Dans le secteur de l’agro-alimentaire**, le contrôle des microorganismes permet de gérer plusieurs fermentations et permet de contrôler les problèmes de contaminations et de conservations des denrées alimentaires et d’améliorer la qualité, la sécurité et la compétitivité des produits issus de l’agriculture.

**-Dans le secteur de la chimie**, Les différentes bioconversions sont très utiles dans la vie de l’homme. Ils permettent de réduire le prix de revient des différentes préparations chimiques, comparativement aux procédés chimiques, très onéreux. L’extraction minière par les microorganismes contribue pleinement à une richesse économique certaine.

**II-2 Réponses physiologiques adaptatives des microorganismes**

Les microorganismes comme les bactéries sont constamment en contact avec des fluctuations incessantes des conditions physico-chimiques. Pour faire face à ces changements, les microbes font appel à des réponses physiologiques multiples d’adaptation. Les exemples sont très nombreux nous citons dans ce contexte la bactérie Listeria. Qui est un pathogène ubiquitaire largement représenté dans l’environnement. Il est capable de résister et survivre dans différents biotopes (écosystèmes naturels, denrées alimentaires et le tractus intestinal des animaux). Cette bactérie peut être confrontée à de nombreuses conditions de stress : déficit alimentaire, pH extrême, stress oxydatif, stress osmotique, stress thermique ... Afin de développer ce système adaptatif de cette bactérie, nous proposons de lire l’article suivant :

« Réponse adaptative de Listeria monocytogenes au stress osmotique et froid : Implication en sécurité des aliments N. ELMNASSER M. RITZ-BRICAUD , S. GUILLOU1 , F. LEROI , N. ORANGE , A. BAKHROUF et M. FEDERIGHI ».

**II-3 Enzymes**

Les enzymes sont les catalyseurs biologiques des réactions métaboliques. Elles sont soit dans le cytoplasme, liées à la membrane cytoplasmique ou excrétées dans le milieu. Elles ne sont pas consommées par les réactions auxquelles elles participent et elles sont demandées en faible quantité.

**II-3-1 Composition**

Toutes les enzymes sont des protéines thermolabiles, sensibles à la chaleur. Quelque fois dans des réactions spécifiques, l’enzyme peut s’associée à des molécules thermostables de faible poids moléculaire comme les coenzymes et les cofacteurs enzymatiques. Dans ces cas, l’enzyme est appelée apoenzyme (en association avec le coenzyme elle est dite holoenzyme). Ces coenzymes sont soit synthétisés par la bactérie elle-même ou pompés à partir du milieu externe.

**II-3-2 Fonction**

Les enzymes ont pour fonction la conversion de substances chimiques dans les conditions physiologiques. Elles accélèrent la vitesse de l’accomplissement des réactions métaboliques. Une réaction chimique d’une durée d’une seconde, catalysée par une enzyme, nécessiterait environs 300 ans à se réaliser sans enzyme.

L’activité spécifique des enzymes exige des températures pas trop importantes (cellulaires).

**II-3-3 Spécificité**

Une enzyme catalyse la conversion d’un seul composé organique et un substrat peut avoir plusieurs enzymes spécifiques, alors que l’enzyme n’a qu’un substrat spécifique.

La spécificité Enzyme-Substrat est une fonction fondamentale de l’action de l’enzyme qui reconnaît son substrat par sa conformation moléculaire spatiale et ionique. Dans l’enzyme existe un site de reconnaissance, qui permet d’attacher le substrat sur le site actif de l’enzyme. L’enzyme possède des propriétés stéréochimiques et ioniques caractéristiques qui justifient l’association spécifique de l’enzyme à son substrat.

Il existe cependant des enzymes qui peuvent travailler sur plusieurs substrats. Dans ce cas, les substrats sont chimiquement apparentés comme le cas des héxoses et des groupes d’acides aminés.

**II-3-4 Les ARN catalytiques**

Au début des années 1980, un pouvoir catalytique a été découvert chez des ARN, il a été baptisé « ribozymes ».

Ces ARN ont la capacité de catalyser des réactions de modifications de leur propre structure ou de celle des autres ARN. Comme c’est le cas par exemple de l’auto-épissage de l’ARN (exciser des introns) de l’ARN initialement transcrit de l’ADN. Ces ribozymes peuvent être utilisés en biologie moléculaire comme des ciseaux dans les manipulations au laboratoire en génie-génétique.

**II-4 DEGRADATION DES POLYMERES**

Les nutriments sont généralement retrouvés dans la nature sous la forme de polymères. A cause de leurs grandes tailles et poids moléculaire élevés, les microorganismes doivent les décomposer à l’extérieur en molécules plus petites pour pouvoir ensuite les absorber par les différents systèmes de transports. Ils utilisent pour cela des exo-enzymes essentiellement des hydrolases, qui les dégradent en molécules plus petites et très demandées par les microorganismes comme les acides aminés, acides organiques divers, oses). Ces exo-enzymes sont soit sécrétées dans le milieu ou restent liées à la paroi cellulaire des microorganismes. Pour les bactéries pathogènes et celles impliquées dans l’altération des aliments, ces exo-enzymes sont directement impliqués.

Il existe de nombreux enzymes extra-cellulaires. On cite les polysaccharides, les mucopolysaccharidases (chitinase, hyaluronidase, neuraminidase, lysozyme), les nucléases, les lipases, les phospholipases et les protéases.

**II-4-1 Dégradation de la cellulose**

La cellulose est le composé organique le plus abondant dans les différents environnements. Elle constitue une source très importante dans le fournissement de la matière organique. C’est un polymère formé de 10.000 à 25.000 molécules de glucose, liées en β(1-4). La cellulose est hydrolysée par de nombreux genres de bactéries (*Bacillus, Clostridium, Celluvibrio, Cellulomonas, Cytophage, Streptomyces*…) et de champignons (*Asperillus, Penicillium, Fusarium, Trichoderma…*).

Les microorganismes cellulolytiques secrètent un complexe enzymatique appelé cellulase, formé de deux enzymes ; l’endo β(1-4) glucanase et d’exo β(1-4) glucanase. L’action de ces deux enzymes permet l’hydrolyse de la cellulose en cellobiose. L’endo-glucanase hydrolyse au hasard les liaisons glucose-glucose à l’intérieur des chaînes de cellulose. Alors que l’exo-glucanase libère des dimères de cellobiose à partir d’une extrémité de chaîne.

Le cellobiose est un dimère glucose-glucose qui est à son tour hydrolysé par les β(1-4) glucosidases (cellobiases) en deux monomères de glucose.

**Cellulose**

(Polymère)

[endo - β(1-4) glucanase]

[exo - β(1-4) glucanase]

**Cellobiose**

(Dimère)

[β(1-4) glucosidase]

**Glucose**

(Monomère)

**II-4-2 Dégradation de l’amidon**

L’amidon est un autre polymère très abondant retrouvé dans de nombreux écosystèmes. Il est constitué de chaîne latérale et branchées de glucose, rattachés par des liaisons de types α(1-4) et α(1-6).

L’amidon est décomposé par de nombreux microorganismes amylolytiques : bactéries (*Bacillus* et *Clostridium*), levures (*Candida* et *Rhizopus*). Le mode d’action est comme suit: les α-amylases rompent les liaisons α(1-4) quelles que soient leurs positions, les β–amylases agissent de la même manière mais seulement à partir des extrémités non réductrices de la molécule, les y-amylases qui réagissent aussi avec les extrémités non réductrices de l’amidon mais avec ses deux types de liaisons. Les y-amylases sont des enzymes spécifiquement bactériennes, contrairement aux autres qui peuvent être produites par d’autres organismes vivants.

**II-5 Métabolisme énergétique microbien**

Toutes les activités cellulaires vitales comme la mobilité, le transport et les mécanismes de biosynthèses, nécessitent de l’énergie métabolique, sous forme d’ATP, produite par des bactéries d’une manière identique aux autres êtres vivants ou d’autres mécanismes spéciaux.

**II-5-1 Sources d’énergie**

Les bactéries produisent leur énergie à partir de trois sources différentes qui déterminent le type trophique spécifique des bactéries et qui aide à l’identification de ces bactéries. Les sources de l’énergie bactérienne sont les suivantes :

1) Oxydation de composés chimiques organique, pour la grande majorité ;

2) Oxydation de composés chimiques inorganiques ;

3) Photosynthèse.

Les champignons, les protozoaires et la grande majorité des bactéries sont incapables de faire la photosynthèse. Ils tirent leur énergie de l’oxydation de composés chimiques.

**II-6 Métabolisme phototrophe**

La photosynthèse est réalisée essentiellement par deux groupes de bactéries phototrophes (dites aussi photosynthétiques): les *Rhodospirillales* et les *Cyanobactéries*. Elles captent les radiations lumineuses pour les transformer en énergie chimique, selon le même principe général des végétaux avec cependant des substances et des mécanismes différents.

Dans la photosynthèse l’énergie lumineuse est capté sous forme de photons par les pigments photosynthétiques qui engendrent un transport d’électrons. Ce flux d’électrons est converti en un potentiel électronique de membrane qui sera à son tour transformé en force proton motrice, puis en ATP et en composés réducteurs (NADH + H+ et NADPH+H+) riche en énergie. Ces derniers aident à réduire le CO2 absorbé à partir du milieu et le converti en composés organiques (glucides) par le cycle de CALVIN.

Le siège de cette photosynthèse bactérienne est la membrane cytoplasmique et aussi dans les tubules où se trouvent les différents pigments photosyntétiques surtout les chlorophylles, la caroténoïde. Ils sont responsables de capter les radiations lumineuses et les conduisent vers les photosystèmes (où se localise plusieurs complexes enzymatiques, et coenzymes transporteurs d’électrons (cytochromes) responsable de la production du potentiel électrochimique de membrane. Ce potentiel transforme l’énergie lumineuse en ATP. Ce système ressemble à celui de la photosynthèse végétale, avec quelques différences pour les deux groupes de bactéries photosynthétiques.

**II-6-1 Rhodospirillales**

Elles se composent des bactéries pourpres : les *Rhodospirillineae* et des bactéries vertes : des *Chlorobineae*. Leur habitat principal est l’écosystème aquatique. D’après des auteurs se sont les premiers organismes phototrophes apparus sur terre. Leur photosynthèse se fait dans les conditions d’anaérobiose (anoxygénique) non productrice d’oxygène, contrairement à la photosynthèse végétale. Car ces bactéries vertes et pourpres à utiliser l’eau comme donneur de protons.

Dans leurs conditions anaérobies, les *Rhodospirillales* dépendent d’une source externe de protons. Elles utilisent généralement l’hydrogène moléculaire (H2), le sulfure d’hydrogène (H2S), les thiosulfates ($S\_{4}^{2-}$). Pour certaines espèces, les donneurs de protons sont des composés organiques : acides organiques, alcools, glucides et même des composés aromatiques.

Les pigments photosynthètiques des *Rholospirillales* sont des bactériochlorophylles et des caroténoïdes.

**II-6-2 Cyanobactéries**

Autrefois appelées algues bleu-vert, les Cyanobactéries ont pour habitat des écosystèmes telluriques ou aquatiques, dont les océans où elles se développent en surface, dans les couches les plus oxygénées. Elles sont caractérisées par un mécanisme de photosynthèse différent de celui des autres bactéries phototrophes et identique à celui des végétaux. Il est aérobie (oxygénique) et producteur d’oxygène car basé sur la photolyse de l’eau, utilisée comme donneur de protons.

Les pigments des cyanobactéries sont la chlorophylle, les caroténoïdes et les phycobillines.

**II-7 Métabolisme chimiolithotrophe**

Parmi les bactéries chimiotrophes, seule une petite minorité est capable d’obtenir son énergie de l’oxydation de composés chimiques inorganiques, ce sont les bactéries chimiolithotrophes. Ce métabolisme énergétique est particulier, car aucun autre organisme vivant, microbien ou autre, ne peut utiliser comme source d’énergie des composés minéraux. Ces composés sont de diverses natures : ions, molécules et même le soufre élémentaire, ils sont métabolisés par plusieurs groupes de bactéries.

L’oxydation de ces substrats génère de l’énergie et parfois l’énergie plus le pouvoir réducteur (atomes d’hydrogène) nécessaire à la biosynthèse des constituants organiques cellulaires. Certains de ces bactéries sont chimiolithotrophes obligatoires et ne peuvent obtenir leur énergie que par l’oxydation de substrats minéraux énergiques spécifiques. D’autres peuvent occasionnellement réaliser l’oxydation aérobie de divers composés organiques : glucides, acides organiques, acides aminés. Ce sont alors des bactéries chimiolithotrophes facultatives.

Les bactéries chimiolithotrophes sont présentes dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. Ils jouent un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques des éléments de la matière organique : carbone, azote, soufre, phosphore. On peut citer cinq groupes principaux de bactéries chimiolithotrophes.

**II-7-1 Bactéries oxydant l’hydrogène**

Elles sont retrouvées dans les sédiments des milieux aquatiques et les zones anaérobies des sols. Elles vivent en association avec des groupes de bactéries productrices d’hydrogène à partir de la dégradation anaérobie de substances organiques. De nombreuses bactéries oxydant l’hydrogène sont chimiolithotrophes facultatives.

Elles métabolisent l’hydrogène moléculaire selon l’équation générale suivante :

$H\_{2}^{}+1/20\_{2}\rightarrow H\_{2}O+Energie$

$∆G\_{o}=-57 Kcal)$

**II-7-2 Bactéries oxydant le Fer**

Les bactéries ferrugineuses, dont principalement *Thiobacillus ferroxydans*, réduisent le fer ferrique (Fe3-) en fer ferreux (Fe2-) mais elles peuvent également oxyder les composants soufrés.

Ces bactéries se rencontrent dans les canalisations métalliques d’eau, à base de fer, et dans les écosystèmes riches en oxydes de fer, comme les gisements miniers où elles jouent un rôle important dans le recouvrement du minerai de fer et d’autres métaux lourds. En effet, ces bactéries sont également capables d’oxyder l’antimoine (Sb3+) et le manganèse (Mn2-), selon des mécanismes encore mal connus.

La réaction générale d’oxydation de l’ion ferreux est la suivante :

$F\_{e^{2+}}+1/40\_{2}+H^{+} \rightarrow F\_{e^{3+}}+1/2H\_{2}O+Energie$

$∆G\_{o}= -10,6 Kcal$

**II-7-3 Bactéries oxydant de soufre**

Certaines bactéries obtiennent leur énergie de l’oxydation exclusive de composés soufrés : sulfures, thiosulfates, sulfites, soufre élémentaire. Leur principal groupe appartient au genre *Thiobacillus* dont les différentes espèces sont communes des écosystèmes aquatiques et terrestres. D’autres bactéries sulfureuses, comme *Sulfolobus* (archaébactérie thermophile extrême), oxydent les composés soufrés.

La plupart des *Thiobacillus* sont chimiolithotrophes obligatoires et ont la capacité d’oxyder plusieurs composés soufrés différents dont le soufre élémentaire.

Les sulfates sont leur produit d’oxydation terminale.

$s^{2-}+20\_{2}\rightarrow SO\_{4}^{2-}+ Energie$

$∆G\_{o}= -140 Kcal$

**II-7-4 Bactéries oxydant le Monoxyde de Carbone**

Les bactéries oxydant le monoxyde de carbone (CO) sont appelées carboxytrophes. Elles sont aérobies, chimiolithotrophes facultatives et utilisent le monoxyde de carbone comme seule source de carbone et d’énergie. Elles peuvent également utiliser l’hydrogène moléculaire. Elles appartiennent à différents genres dont : *Pseudomonas, Alcaligenes, Bacillus, Acinetobacter*.

Elles oxydent CO selon l’équation suivante :

$CO+1/20\_{2}\rightarrow CO\_{2}+Energie$

$∆G\_{o}= -61,5 Kcal$

**II-7-5 Bactéries oxydant l’Ammonium et les Nitrites**

La présence d’ammonium (ion$NH\_{4}^{+}$) dans les sols résulte de la dégradation microbienne de la matière organique azotée. Sa conversion en nitrite ($NO\_{2}$) est réalisé par des bactéries appartenant aux genres : *Nitrosomonas, Nitrospira, Nitrosococcus, Nitrosolobus*. L’ion nitrite est à son tour oxydé en ion nitrate ($NO\_{3}$), principalement par les *Nitrobacter* et les *Nitrococcus*.

L’oxydation de l’ammonium est appelée nitrification et les bactéries impliquées dans ce phénomène bactéries nitrifiantes.

 $NH\_{4}^{+}+3/20\_{2}\rightarrow NO\_{2}^{-}+2H^{+}+H\_{2}O+Energie$

$∆G\_{o}= -65 Kcal$

$NO\_{2}^{-}+1/20\_{2}\rightarrow NO\_{3}^{-}+Energie$

$∆G\_{o}= -18,5 Kcal$

**II-8 Métabolisme chimioorganotrophe**

Les chimioorganotrophes sont les plus majoritaires parmi les bactéries. Elles tirent leur énergie de l’oxydation de substances organiques très diverses, présentes dans leurs milieux sous forme dissoute. Une espèce bactérienne est capable d’utiliser un ou plusieurs substrats organiques soit comme sources d’énergie ou la plus part du temps, comme source d’énergie et de carbone en même temps. Pa exemple le cas d’*E.coli* cultivée dans un milieu qui contient uniquement du glucose. Cette bactérie utilise environ 50% du substrat pour produire de l’énergie, et le reste comme source de carbone pour produire les différents composés organiques et même son matériel cellulaire (paroi, membrane, ...).

Les principaux substrats énergiques organiques sont par ordre d’importance : les glucides, les acides organiques et, dans une moindre mesure, les acides aminés. Mais certaines bactéries sont capables d’oxyder des composés plus complexes, comme par exemple les cycles aromatiques et participent ainsi à la dépollution des sites contaminés par les hydrocarbures ou par les pesticides. Ces polluants peuvent servir de source de carbone, d’azote et d’énergie.