

Nutrition et métabolisme bactérien

1° Besoins nutritifs des bactéries :

1.1. Notions essentielles concernant les besoins nutritifs :

Les bactéries ont besoins de composés nutritifs pour leur métabolisme, leur croissance et leur division. Ces composés nutritifs doivent être présents dans le milieu extérieur.

- **Nutriment :**

C'est un composé nutritif du milieu pouvant être transféré dans la bactérie et être incorporé lors de la synthèse de constituants bactériens. Le nutriment peut participer au métabolisme.

- **Type trophique :**

Chaque type trophique bactérien concerne un mode de nutrition et des conditions chimiques particulières.

- **Métabolite essentiel :**

C'est un composé organique important pour la physiologie de la bactérie. Il participe soit à la structure, soit au métabolisme, soit à la croissance.

Il y a :

- **Les substances élémentaires ou constitutives :**

Elles entrent dans la constitution des glucides, lipides, protides, acides nucléiques, etc.... et permettent d'élaborer les structures bactériennes.

Macroéléments	C, H, O, N, P, S
Microéléments	K, Na, Cl, Mg, Ca, Fe
Oligoéléments	Zn, Co, Cu, Va, Mo

- **Les substances énergétiques :**

Elles fournissent aux bactéries le moyen d'avoir une source d'énergie utilisée pour les biosynthèses.

Quelque soit leur mode de vie, les bactéries doivent trouver dans le milieu environnant :

- De l'eau.
- Une source d'énergie.
- Des composés à l'origine d'éléments constitutifs de la bactérie.
- Eventuellement, des facteurs de croissance.

1.2. Source d'énergie :

1.2.1. Nécessité vitale d'une source d'énergie :

Toute cellule consomme de l'énergie pour réaliser :

- Les biosynthèses endothermiques des constituants bactériens.
- Diverses activités (mouvements, transferts actifs de composés).

L'énergie biologique provient de l'hydrolyse de l'ATP (Adénosine-Tri-Phosphate). Une hydrolyse se traduit par la coupure d'une liaison avec l'intervention de l'eau et d'une ATPase.



L'ATP est présente, dans la cellule, en faible quantité.

Les mécanismes énergétiques permettent de reconstituer sans cesse les synthèses d'ATP :

- Photophosphorylation.
- Phosphorylation oxydative.
- Phosphorylation au niveau du substrat.

Pour les bactéries, l'énergie peut avoir deux origines :

- Energie provenant des radiations lumineuses (phototrophie).
- Energie provenant de l'oxydation de composés chimiques (chimiotrophie).

1.2.2. Phototrophie :

• Bactéries phototrophes ou photosynthétiques :

Elles utilisent l'énergie provenant d'une réaction photochimique grâce à des pigments photosensibles. Les bactéries utilisent certains radiants lumineux. C'est bactéries assimilent le CO₂ et synthèses des composés organiques. C'est réactions photochimiques s'accompagnent de synthèse d'ATP.

• Photosynthèse oxygénique :

Les organismes concernés sont les Cyanobactéries.

Les pigments photosynthétiques sont la chlorophylle a (qui absorbe la lumière) et le pigment accessoire (qui absorbe l'énergie lumineuse).

La photosynthèse oxygénique s'effectue en deux phases :

▪ **La phase photochimique :**

Elle correspond à l'utilisation de l'énergie lumineuse ou des photons. La lumière est absorbée par les pigments photosynthétiques chlorophylliens. L'apport énergétique permet la réalisation de réactions d'oxydoréduction au niveau des structures membranaires.

Elle s'accompagne de :

- ✓ L'oxydation de l'eau.
- ✓ La production de dioxygène.
- ✓ La réduction de coenzymes T.
- ✓ La formation de transporteurs réduits TH₂.
- ✓ La libération de H.
- ✓ La synthèse d'ATP.

▪ **La phase non photochimique :**

Elle assure l'incorporation de CO₂ avec des composés organiques.

La réduction du CO₂ est complexe, cyclique, localisé dans le stroma et à l'extérieur des structures membranaires.

• **Photosynthèse anoxygénique :**

Les organismes concernés sont des bactéries anaérobies strictes aquatiques des eaux profondes.

Les pigments photosynthétiques sont les bactériochlorophylles. Les bactéries photosynthétiques utilisent les radiations rouges et infrarouges.

Cette photosynthèse ne s'accompagne pas de l'introduction du dioxygène.

Pour incorporer le CO₂, les bactéries doivent synthétiser le NADH ou le NADPH par divers mécanismes.

La photosynthèse s'accompagne de synthèse d'ATP et d'ADP.

▪ **Photolithotrophie-autotrophie :**

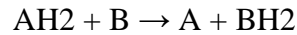
Les bactéries photolithotrophes utilisant l'énergie lumineuse demande l'apport de composé minéraux.

▪ **Photoorganotrophie-hétérotrophe :**

Les bactéries photoorganotrophes utilisent l'énergie est oxydé AH₂ donneur d'électrons et de protons. Il y a réduction du CO₂.

1.2.3. Chimiotrophie :

- **Les bactéries chimiotrophes ou chimiosynthétiques :**



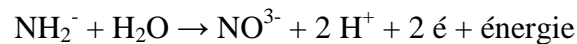
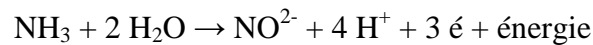
AH₂ peut être un composé minéral ou organique.

- **Les bactéries chimiolithotrophes :**

Elles utilisent l'énergie provenant d'un composé minéral réduit exogène.

Elles ont un pouvoir de synthèse important et interviennent dans les cycles biogènes.

- **Bactéries nitrifiantes :**



- **Bactéries sulfoxydantes :**

L'oxydation biologique des composés exogènes du soufre et des sulfures s'accompagne d'une synthèse d'ATP.

- **Bactéries du fer :**

Ces bactéries utilisent l'énergie provenant de l'oxydation des ions de fer II ou ferreux.

- **Bactéries oxydant l'H₂ :**

Ces bactéries utilisent l'énergie provenant de l'oxydation du dihydrogène.

- **Les bactéries chimioorganotrophes :**

Provenant de l'oxydation et de la déshydrogénation d'une substance organique exogène.



1.3. Besoins en macroéléments :

1.3.1. Source de carbone :

- Généralités :

Le carbone participe à la constitution de toutes les molécules organiques. C'est un élément fondamental de la bactérie.

D'autre part, des composés carbonés interviennent dans le métabolisme intermédiaire et dans le métabolisme énergétique.

- Les bactéries autotrophes :

Elles sont capables de se développer en milieu minérale et peuvent assimiler en CO_2 de l'air comme seule source de carbone. Elle réalise des synthèses de composés organiques à partir du CO_2

- Les bactéries hétérotrophes :

Elles exigent la présence de composé organique donc, carbonés, pour leur nutrition carbonée.

En générale, le composé organique est en même temps source de carbone et source d'énergie.

Le CO_2 a un rôle important pour les bactéries hétérophiles.

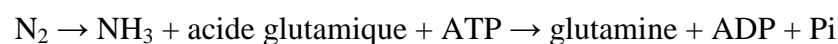
1.3.2. Source d'azote :

- Généralités :

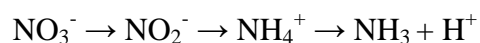
Il participe à la constitution des acides aminés, des peptides, des protéines, de bases azotées, des acides nucléiques, des coenzymes.

- Composés azotés utilisables :

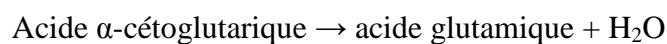
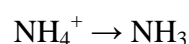
✓ N_2 :



✓ NO_3^- :

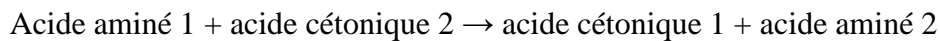


✓ NH_4^+ :



✓ Azote organique :

C'est la principale source d'azote pour les bactéries. C'est une réaction de transamination.



1.3.3. Source de phosphore :

C'est un constituant des acides nucléiques, des phospholipides, de certains coenzymes, des composés énergétiques.

L'ATP joue le rôle de « navette énergétique » entre les sites de synthèse et les sites d'utilisation d'ATP.

L'assimilation du phosphore se fait sous forme d' HPO_4^{2-} et d' H_2PO_4^- .

1.3.4. Source de soufre :

Le soufre est présent dans les groupements soufrés de certains acides aminés, dans certains composés et dans certains antibiotiques.

Le soufre intervient dans le métabolisme énergétique de certaines bactéries.

1.4. Besoins de microéléments :

- Ions Na^+ , K^+ , Cl^- :

Ils jouent un rôle dans le maintien de l'équilibre physicochimique de la bactérie. La présence de ces ions dans le milieu extracellulaire limite les échanges d'eau. Ils sont apportés sous forme de sels.

Le potassium est un cofacteur de certaines enzymes.

- Fe, Mg, Ca :

Ces éléments minéraux sont nécessaires à la constitution et au fonctionnement des enzymes et coenzymes.

1.5. Les oligoéléments :

Ils sont nécessaires en quantités infimes.

Ils sont :

- Des activateurs enzymatiques.
- Nécessaires pour la synthèse de composés spécifiques.

1.6. Facteur de départ :

C'est un composé biochimique qui doit être présent en faible quantité dans le milieu de culture ; Il favorise la croissance.

Il permet des synthèses enzymatiques, une adaptation rapide au nouveau milieu et donc, le démarrage immédiat de la culture.

1.7. Besoins spécifiques en facteurs de croissance :

1.7.1. Notions préliminaires :

- **Définitions :**

- **Milieu synthétique minimum :**

Pour une espèce bactérienne, un milieu synthétique minimum ne contient que des composés nutritifs indispensables à cette espèce. Sa composition est adaptée au type trophique de la bactérie.

Les composés nutritifs sont chimiquement définis et en quantités précises.

- **Métabolite essentiel :**

C'est un composé organique important pour la bactérie qui participe à la structure ou au métabolisme et à la croissance bactérienne.

- **Bactéries prototrophes et auxotrophes :**

- **Bactéries prototrophes :**

Les bactéries peuvent se développer en milieu synthétique minimum contenant un composé organique, une source minérale d'azote et des sels minéraux.

Elles peuvent réaliser tous leurs constituants organiques, les coenzymes et les métabolites essentiels à partir du glucose.

▪ Bactéries auxotrophes :

Elles sont incapables de faire la synthèse d'un composé métabolique essentiel. En l'absence de ce composé dans le milieu, il n'y a pas de culture. Vis-à-vis de X, elles exigent pour leur croissance l'apport obligatoire d'un composé spécifique en faible concentration dans le milieu de culture.

1.7.2. Facteur de croissance :

• Définition :

C'est une substance non synthétisée et indispensable.

• Nature chimique et rôles physiologiques des facteurs de croissance :

Facteurs de croissance	Rôle physiologique
Bases azotées	Constituants des acides nucléiques
Acides aminés	Constituants des protéines
Thiamine (vit. B1)	Métabolisme glucidique des bêta-décarboxylation
Riboflavine (vit. B2)	Constituant des flavines Transporteur d'électrons
Pyridoxine (vit. B6)	Dégradation des acides aminés
Cyanocobalamine	Réactions diverses du métabolisme
Nicotinamide	Constituant des coenzymes Réactions de déshydrogénations
Acide paraaminobenzoïque	Synthèse de l'acide folique
Hématine	Synthèse des hémoprotéines Métabolisme respiratoire

• Mode d'action des facteurs de croissance :

Le facteur de croissance est en générale une petite molécule organique de structure parfois complexe pouvant intervenir à tous les stades du métabolisme.

1.7.3. Propriétés des facteurs de croissance :

• Le besoin en facteurs de croissance dépend des caractères génétiques :

L'auxotrophie d'une espèce bactérienne, à l'égard d'un facteur de croissance X, dépend de cette espèce.

Une mutation subie par une souche sauvage prototrophe peut la rendre auxotrophe vis-à-vis d'un facteur de croissance.

- **Action quantitative sur la croissance d'une bactérie auxotrophe :**

Les facteurs de croissance sont indispensables à des concentrations très faibles.

Ils ne sont pas une source de carbone.

- **Spécificité d'action :**

Un facteur de croissance est lié à leur structure spatiale, à la nature et à la position de leur groupement chimique.

Un antimétabolite est un analogue de structure d'un facteur de croissance X. Il diffère de X par la nature d'un groupement. X' est donc inefficace et il empêche l'efficacité de X, en sa présence.

1.7.4. Synthrophie et symbiose :

- **Coopération nutritive naturelle entre bactéries :**

Certaines espèces bactériennes exigeantes, à l'état isolé, sont naturellement associées. Les bactéries ont des besoins nutritifs et des activités de biosynthèse complémentaire. Elles réalisent des échanges réciproques de facteurs de croissance.

- **Relation de coopération mutuelle entre espèces d'Haemophilus :**

Deux espèces bactériennes A et B auxotrophes pour X et Y, introduite ensemble dans un milieu dépourvu de X et Y, peuvent être cultivées. Elles échangent les composés X et Y.

Les deux espèces coopèrent pour leur besoin nutritif.

- **Transfert orienté de facteur de croissance (phénomène de satellitisme) :**

Une espèce bactérienne A élabore un métabolite essentiel X. Celui-ci est utilisé par une autre espèce bactérienne B, auxotrophe à l'égard de X.

2° Mécanismes énergétiques bactériens :

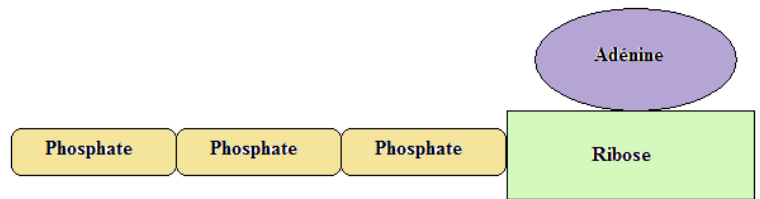
Les bactéries ont besoin d'énergie pour réaliser des biosynthèses endergoniques ou pour diverses activités.

Pour les bactéries chimioorganotrophes, l'énergie provient de réactions d'oxydation ou de déshydrogénation de composés organiques énergétiques réduits AH₂.

2.1. L'ATP au centre du métabolisme :

- **Structure :**

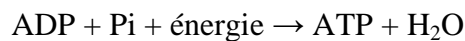
C'est une molécule universelle présente chez tous les êtres vivants.



- **Synthèse et hydrolyse :**

- **Synthèse :**

L'ATP est constamment synthétisée. Elle s'effectue par l'ATP synthétase.



- **Hydrolyse :**

L'ATP est constamment hydrolysée. Elle s'effectue grâce à l'ATPase.



- **Importance dans le métabolisme cellulaire :**

L'ATP assure le couplage entre les réactions exergoniques du catabolisme et les réactions endergoniques d'anabolisme. Ainsi, les molécules d'ATP jouent le rôle de « navette énergétique » entre les lieux de synthèse et les lieux d'utilisation de l'ATP.

2.2. Généralités concernant les mécanismes énergétiques :

2.2.1. Les oxydations cellulaires ou déshydrogénations :

- **Oxydoréduction en chimie :**

L'oxydation d'un composé énergétique s'accompagne d'une perte d'électrons.

La réduction d'un composé est un gain d'électrons pour ce composé.

- **Oxydoréduction en biochimie :**

L'oxydation ou déshydrogénation d'un composé organique réduit s'accompagne d'une perte d'électrons, d'une perte de protons et d'une libération d'énergie.

- **Déshydrogénations biologiques énergétiques.**

2.2.2. Les transporteurs d'électrons T :

- **Leur fonction :**

Les électrons et les protons libérés par le composé énergétique AH₂ ne sont pas transmis immédiatement à l'accepteur final B d'électrons. Le transfert des électrons et des protons, à partir du composé énergétique réduit AH₂, s'effectue par une succession d'étapes catalysées par des déshydrogénases. Au cours de ces étapes biochimiques interviennent des transporteurs biochimiques d'électrons.

- **Exemples :**

- Les coenzymes pyridiniques.
- Les coenzymes flaviniques.
- Les coenzymes quinoniques.
- Les cytochromes.

- **Fonction des transporteurs d'électrons :**

Les transporteurs d'électrons interviennent dans l'ordre des potentiels d'oxydoréduction croissants.

Le potentiel d'oxydoréduction d'un couple réducteur-oxydant traduit l'aptitude à céder ou capter des électrons.

2.2.3. Libération d'énergie :

L'énergie formée au cours des réactions de déshydrogénation est libérée par petites étapes. L'oxydation des coenzymes réduits s'accompagne d'une synthèse d'ATP par phosphorylation de l'ADP.

2.2.4. Accepteur final d'électrons :

Selon la nature de l'accepteur final d'électrons B, on distingue divers types de mécanismes énergétiques respiratoires.

Tous ces mécanismes permettent la réoxydation des transporteurs réduits apparus au cours du catabolisme.

2.3. Respiration aérobie par voie oxydative directe :

2.3.1. Caractéristiques :

Dans cette voie réalisée en aérobiose, le dioxygène est bien sur l'accepteur final d'électrons.

Les réactions d'oxydoréduction font intervenir des enzymes et coenzymes localisés.

Ainsi les électrons et les protons sont fixés directement sur le dioxygène, accepteur final d'électrons. Il se forme H_2O_2 . Or, l' H_2O_2 est un composé toxique à effet bactéricide. Les bactéries réalisant cette respiration doivent être pourvues d'enzyme assurant l'élimination rapide d' H_2O_2 .

2.3.2. Réactions d'élimination du H_2O_2 :

- **Catalase :**

- **Nature :**

C'est une enzyme porphyrinique ferrique non inductible présente de façon constante chez les bactéries qui consomment du dioxygène.

- **Fonction physiologique :**

La catalase permet d'éliminer rapidement l' H_2O_2 formé par la voie oxydative directe.

- **Formation chez les bactéries cultivant en aérobiose :**

La catalase est produite par les bactéries anaérobies strictes ou aéro-anaérobie facultatives ou microaérophiles. Ces bactéries oxybiontiques réalisent un métabolisme respiratoire.

- **Intérêt de sa recherche pour l'identification bactérienne :**

Pour les bactéries gram +, coques ou bacilles. Les bactéries gram + se développant en aérobiose ont une catalase sauf Enterococcus, Streptococcus, Lactobacillus.

- **Peroxydase :**

- **Fonction :**

Les peroxydases permettent d'éliminer H_2O_2 en catalysant la déshydrogénation d'un composé réduit.

- **Formation :**

Les peroxydases sont présentes chez de nombreuses bactéries aérobies et chez les bactéries anaérobies facultatives.

Les bactéries anaérobies facultatives peuvent ainsi éliminer H_2O_2 et sont ainsi aérotolescentes.

2.3.3. Production d'énergie :

Ces réactions respiratoires cytoplasmiques ont un but énergétique. Elles permettent la synthèse d'ATP au niveau du substrat.

Au cours de l'oxydation d'un composé AH₂, un des produits de dégradation A'H₂ est phosphorylé. Il engendre un composé portant une liaison « riche en énergie ». Transférer à un ADP, il permet la synthèse d'ATP.

2.4. Respiration aérobie :

2.4.1. Notions essentielles :

Une respiration aérobie est une oxydation complète biologique du composé énergétique noté AH₂. Elle est caractérisée par une consommation d'O₂ et une production de CO₂. Les protons, les électrons sont transférés à une chaîne respiratoire aérobie. L'accepteur final d'électron est l'O₂. Le produit final est H₂O. Elle est associée à une production d'ATP.

Cette respiration aérobie par voie cytochromique est le processus énergétique le plus courant utilisé par les bactéries oxybiontiques.

2.4.2. Caractéristiques importantes de ce mécanisme énergétique :

Les bactéries oxybiontiques réalisent l'oxydation complète du composé énergétique réduit AH₂. Ces réactions de déshydrogénation d'AH₂ produisent des coenzymes réduits.

En aérobiose, la réoxydation des coenzymes réduits fait intervenir la chaîne respiratoire aérobie de la membrane plasmique.

La chaîne respiratoire aérobie est constituée par des transporteurs membranaires. Ils interviennent successivement dans l'ordre de leur potentiel d'oxydoréduction croissant.

La chaîne respiratoire membranaire aérobie assure le transfert des électrons et des protons depuis AH₂, composé énergétique réduit jusqu'au dioxygène.

L'oxydation complète du composé AH₂ est très exergonique. L'énergie accompagnant cette oxydation est libérée par fractions successives. Ainsi les réactions d'oxydation exergoniques sont associées à des phosphorylations de l'ADP et permettent ainsi des synthèses d'ATP.

2.4.3. Notions sur la structure et le fonctionnement de la chaîne respiratoire aérobie membranaire :

- **Cas général :**

- **Localisation :**

Elle est localisée dans la membrane plasmique bactérienne.

- **Structure :**

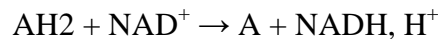
La chaîne respiratoire aérobie de la membrane plasmique est aussi nommée chaîne cytochromique aérobie.

Les protéines de la chaîne respiratoire interviennent comme enzymes.

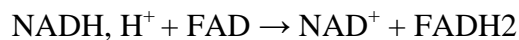
Les protéines et coenzymes sont souvent organisés en « unités fonctionnelles » ou complexes (ceux-ci augmentent l'efficacité du transfert d'électrons).

- **Composition de la chaîne respiratoire :**

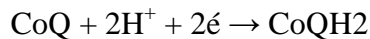
- ✓ **Intervention d'une déshydrogénase à NAD⁺ :**



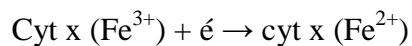
- ✓ **Intervention d'une flavoprotéine membranaire à FAD ou FMN :**



- ✓ **Intervention de coenzymes quinoniques CoQ :**

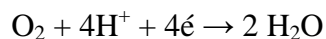


- ✓ **Intervention des cytochromes :**



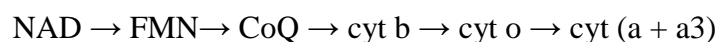
- **Le cytochrome terminal-cytochrome oxydase :**

C'est la seule protéine capable de transférer ses électrons au dioxygène.



- **Chaîne respiratoire des bactéries oxydase + :**

La chaîne des transporteurs d'électrons est plus complexe :



- **Couplage du transfert d'électrons à la formation d'ATP :**

La déshydrogénation de composé énergétique AH₂ constitue une « cascade de réactions » d'oxydoréduction avec transfert d'électrons vers des couples redox de potentiel redox croissant. Ces réactions sont exergoniques.

L'expulsion de protons en dehors de la membrane crée un gradient électrochimique de protons de part et d'autre de la membrane.

Le gradient de concentration de protons est à l'origine d'une force proton motrice. Ceci engendre un flux de protons vers le cytoplasme.

L'entrée de protons dans le cytoplasme est associée à la synthèse d'ATP au niveau de l'ATP synthase. C'est une protéine membranaire qui catalyse la formation d'adénosine triphosphate à partir d'ADP et de phosphate.

2.5. Respiration anaérobie :

La déshydrogénation biochimique du composé énergétique AH₂ se déroule en anaérobiose.

Les électrons cédés par le composé énergétique réduit AH₂ sont transmis à une chaîne respiratoire anaérobie avec des transporteurs d'électrons et des cytochromes.

2.5.1. Respiration minérale anaérobie des nitrates :

- **Fonction de la respiration nitrate :**

Au cours de ce mécanisme énergétique, le composé énergétique réduit AH₂ est déshydrogéné. Les protons et les électrons libérés sont transférés à des transporteurs membranaires d'électrons T. Finalement, les nitrates exogènes peuvent être utilisés comme accepteur final d'électrons et de protons en anaérobiose.

La respiration nitrate est réalisée dans la membrane plasmique. Elle fait intervenir une chaîne respiratoire membranaire anaérobie avec des transporteurs T et une enzyme membranaire particulière, la nitrate réductase de type A.

Ainsi, en anaérobiose, les ions NO₃⁻ permettent la réoxydation des transporteurs réduits TH₂. Ils servent d'accepteurs finaux d'électrons et de protons. Ces ions jouent le même rôle que le dioxygène dans la respiration aérobie par voie cytochromique.

La respiration nitrate permet des synthèses d'ATP. La nitrate réductase A catalyse la réduction des nitrates en nitrites. Cette respiration possède une fonction respiratoire et énergétique.

- **Schéma général du mécanisme :**

La respiration vraie des nitrates permet la réoxydation des coenzymes réduits TH₂. La respiration nitrate permet la synthèse d'énergie biologique.

La synthèse de la nitrate réductase A est induite en anaérobiose par les nitrates exogènes, présents dans le milieu.

Cette synthèse est réprimée par le dioxygène.

- **Respiration nitrate sans dénitrification :**

Pour cela, il faut :

- La présence d'une nitrate réductase A.
- Qu'on soit en anaérobiose.
- La présence de nitrate exogène.
- La présence d'un composé non fermentescible.

La respiration nitrate est d'abord une réduction des ions nitrates sous l'action de la nitrate réductase A. Pour *Escherichia coli*, cette réduction s'arrête au stade nitre. Les nitrites s'accumulent dans le milieu. Ils ne représentent pas une source nutritive d'azote assimilable pour les bactéries.

La nitrate réductase de type A exerce une fonction respiratoire et énergétique non assimilatrice de l'azote.

- **Respiration nitrate avec dénitrification :**

Dans ce cas, la respiration des nitrates est aussi une réduction des nitrates mais, elle est plus poussée que le stade nitrites.

Elle fait intervenir successivement plusieurs enzymes dont la nitrate réductase A, la nitrite réductase A.

Elle forme de l'oxyde d'azote et surtout du diazote.

C'est un mécanisme énergétique permettant la réoxydation des coenzymes réduits.

- **Production d'énergie biologique ATP :**

La respiration des nitrates avec ou sans dénitrification s'accompagne d'une production d'énergie biologique. En effet, une phosphorylation de l'ADP est associée au transfert d'électrons faisant intervenir cette chaîne respiratoire anaérobie.

La réoxydation du NADH, H⁺ utilisant la respiration vraie des nitrates s'accompagne de l'expulsion de protons hors du cytoplasme. Un gradient de protons est ainsi réalisé de part et d'autre de la membrane plasmique.

L'ATP synthase utilise la force proton motrice pour synthétiser l'ATP.

2.5.2. Respiration minérale anaérobie sulfate :

Certaines bactéries peuvent déshydrogéner les substances organiques énergétiques AH₂ en anaérobiose, en utilisant les sulfates exogènes. Pour ces bactéries, les sulfates exogènes servent d'accepteurs finaux d'électrons.

Ce mécanisme est membranaire. Le transfert des électrons fait intervenir des cytochromes membranaires.

Cette réduction des sulfates a une fonction respiratoire.

Cette réduction des sulfates est réalisée sous l'action d'enzymes spécifiques (sulfate réductase, sulfite réductase).



2.5.3. Respiration du fumarate :

Dans certaines respirations anaérobies, l'accepteur final d'électrons et de protons est un composé organique B, le fumarate.

Les composés organiques réduits AH₂ sont :

- NADH, H⁺.
- Acide méthanoïque.
- Acide lactique.
- Glycérol.

Ces composés énergétiques AH₂ sont déshydrogénés sous l'action de déshydrogénases spécifiques des composés.

Le transfert des électrons se fait grâce à une chaîne respiratoire anaérobie de la membrane plasmique. Les électrons cédés par le composé AH₂ sont transférés à des enzymes et à des transporteurs membranaires T.

L'accepteur final d'électrons et de protons est le fumarate.

3° Catabolisme glucidique :

Les bactéries peuvent cataboliser certains glucides dans un but énergétique ou dans un but de synthèse des constituants bactériens.

Le glucose est en général dégradé par de nombreuses bactéries. Il peut être dégradé selon plusieurs voies fonctionnant en parallèle.

Pour les bactéries chimioorganotrophes hétérotrophes, le composé glucidique exerce deux rôles :

- Le glucide peut être déshydrogéné ou oxydé et il est accompagné de synthèse d'ATP.
- Le glucide peut servir de source de carbone et il permet des biosynthèses de composés organiques.

3.1. Notions élémentaires concernant la glycolyse :

• Généralités :

C'est la première séquence étudiée de réactions biochimiques concernant le métabolisme intermédiaire.

C'est une voie très répandue dans le monde vivant de dégradation du glucose.

La glycolyse est une série de « conversions biochimiques » successives réalisées à partir du glucose et catalysées par des enzymes. Elle conduit à la formation de l'acide pyruvique.

• Réactions :

▪ Etapes 1, 2 et 3 :

Phosphorylation du glucose avec utilisation d'ATP. Elles permettent la formation de fructose-1,6-bi-phosphate.

▪ Etapes 4 et 5 :

Coupure du fructose-1,6-bi-phosphate conduisant à la formation de trioses phosphates (dihydroxyacétone phosphate et glycéraldéhyde-3-phosphate).

▪ Etapes 6 à 10 :

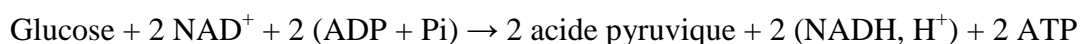
Déshydrogénation en anaérobiose du glycéraldéhyde-3-phosphate. Elles conduisent à la production de coenzymes réduits, à la formation d'ATP et aboutissant au pyruvate.

Il y a formation de deux ATP par molécule de glycéraldéhyde-3-phosphate ainsi déshydrogéné.

• Caractéristiques :

Les réactions ne nécessitent pas la présence d'oxygène. Elles peuvent se dérouler en anaérobiose ou aérobie. Elle se déroule dans le cytoplasme. Les enzymes de la glycolyse sont des enzymes solubles du cytoplasme.

• Bilan :



- **Conséquences :**

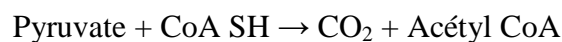
Le NADH, H⁺ doit être régénéré sous forme oxydé, NAD⁺, pour permettre la continuité de ce mécanisme.

3.2. Devenir du pyruvate en aérobiose (cycle de Krebs) :

Le catabolisme du pyruvate est oxydatif.

- **Décarboxylation oxydative :**

Elle est réalisée dans la membrane des bactéries et fait intervenir la pyruvate déshydrogénase.



- **Cycle de Krebs ou cycle des acides tricarboxyliques :**

L'acétyl CoA est finalement oxydé par el cycle de Krebs.

Elle se combine à une molécule d'oxaloacétate pour donner une molécule de citrate.

Le cycle de Krebs est l'ensemble des réactions biochimiques que subit le citrate.

Au cours de ce cycle, il y a formation de deux molécules de CO₂ par molécule de pyruvate dégradé.

- **Coenzymes :**

L'oxydation complète d'une molécule d'acétylCoA permet la formation de :

- 3 molécules de NADH, H⁺.
- 1 molécule de FADH₂.
- 1 molécule de GTP.

Les coenzymes réduits NADH, H⁺ et FADH₂ sont réoxydés par l'intermédiaire de la chaîne respiratoire aérobie membranaire.

- **Nécessité de dioxygène :**

Cette voie se déroule en aérobiose. Le dioxygène est l'accepteur final d'électrons et de protons. Il y a formation d'eau.

3.3. Devenir du pyruvate en anaérobiose :

Le catabolisme du pyruvate est fermentatif.

Dans le cas d'une fermentation, l'accepteur final B d'électrons et de protons est le pyruvate ou un dérivé du pyruvate.

4° Fermentations :

4.1. Définition :

Dégradation incomplète énergétique d'un composé fermentescible. C'est un ensemble de réaction d'oxydoréduction destinée à produire un peu d'énergie et à permettre la réoxydation des coenzymes réduits.

L'accepteur final d'électron et de protons est un composé organique endogène élaboré par la bactérie.

4.2. Fermentation homolactique :

4.2.1. Caractéristiques de la fermentation lactique :

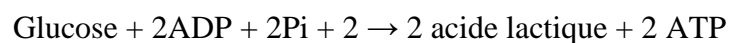
Les bactéries lactiques sont les Lactobacilles et les Streptocoques lactiques.

En l'absence de dioxygène, le pyruvate provenant de la glycolyse anaérobie. Le pyruvate est l'accepteur final d'électrons et de protons.

La LDH (lactate déshydrogénase) fonctionne avec le coenzyme NADH, H.

L'acide lactique est le produit final prépondérant de cette fermentation homolactique.

4.2.2. Bilan de la dégradation du glucose avec la fermentation homolactique :



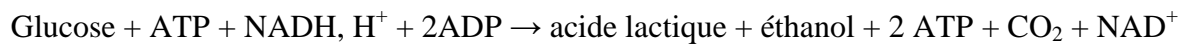
La fermentation lactique permet la synthèse d'ATP par phosphorylation au niveau du substrat.

4.3. Fermentation hétérolactique :

4.3.1. Caractéristiques de la fermentation hétérolactique :

Les bactéries concernées sont les Leuconostoc et les Lactobacillus hétérofermentaires.

4.3.2. Bilan de la dégradation du glucose avec la fermentation hétérolactique :



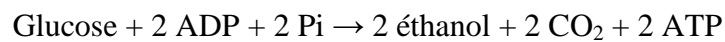
4.4. Fermentation alcoolique :

4.4.1. Caractéristiques de la fermentation alcoolique :

La fermentation alcoolique intervient dans la fermentation du vin, de la bière, du pain.

Elle est due à des levures.

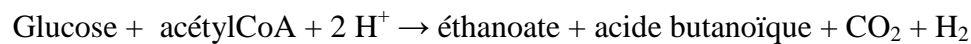
4.4.2. Bilan de la dégradation du glucose avec la fermentation alcoolique :



4.5. Fermentations des bactéries anaérobies strictes:

4.5.1. Fermentation butyrique (butanoïque) :

Les germes concernés sont les Clostridium.



4.5.2. Fermentation acétonobutylique :

Elle est réalisée par certains Clostridium.

Deux produits finaux sont essentiels :

- Le butanol.
- L'acétone.

4.5.3. Fermentation propionique :

Elle est réalisée par les Propionibacterium et Clostridium propionicum.

Les produits formés sont :

- Ethanoate.
- Propionate.
- CO₂.

4.5. Fermentation acide mixte et butane diolique :

4.5.1. Fermentation acide mixte :

- **Germes concernés :**

Ce sont les Entérobactéries et les Aeromonas.

- **Caractéristiques :**

La fermentation acide mixte comprend diverses réactions :

- La réduction directe de l'acide pyruvique (production d'acide lactique).
- La phosphorylation de l'acide pyruvique puis carboxylation (production d'acide succinique).
- Scission de l'acide pyruvique en présence de CoA-SH (formation d'acide méthanoïque et d'acétylCoA).
- L'acétylCoA est transformé en Acétyl-P puis, en acide éthanoïque ou éthanol.

- **Produits terminaux de la fermentation acide mixte :**

- Acide lactique.
- Acide méthanoïque.
- H₂.
- CO₂.
- Acide éthanoïque.
- Ethanol.
- Acide succinique.

4.5.2. Fermentation butane diolique :

- **Germes concernés :**

Ce sont les Klebsiella, Enterobacter, Serratia, Hafnia, Aeromonas hydrophila, certains Vibrio et Bacillus.

- **Caractéristiques :**

Cette voie dépend étroitement du pH.

- **Produits terminaux de la fermentation butane diolique :**

- Acide lactique (faible quantité).
- Acide succinique.
- Acide méthanoïque.
- Butane diol.

5° Catabolisme :

5.1. Catabolisme lipidique :

Les lipides sont des esters d'acides gras à longue chaîne carbonée et d'alcools.

Les lipides sont hydrolysés sous l'action d'enzymes lipidiques. Les enzymes intervenant dans le catabolisme lipidique sont des lipases « vraies », des estérases, des lécithinases.

Ce sont des enzymes constitutives.

Certains produits formés sont réintégrés dans le métabolisme intermédiaire :

- Les acides gras fournissent des fragments carbonés sous la forme d'acétylCoA.
- L'acétylCoA est intégré dans le cycle de Krebs.
- Le glycérol rejoint les voies du métabolisme glucidique.

Les différentes recherches sont :

- **La recherche des lipases « vraies » :**

Voir fiche technique.

- **La recherche d'estérases :**

Voir fiche technique.

- **La recherche de la lécithinase :**

Voir fiche technique.

- **La recherche des lipoprotéases :**

Voir fiche technique.

5.2. Catabolisme des protéines :

5.2.1. Protéolyse ou hydrolyse enzymatique des protéines :

- **Nature et rôles des protéinases :**

- **Endoenzymes :**

Toutes les bactéries possèdent des protéinases endocellulaires. Elles hydrolysent les protéines intracellulaires.

Elles permettent le renouvellement des protéines bactériennes et elles sont responsables de l'autolyse des bactéries.

- **Exoenzymes :**

Ces exoenzymes sont produites par les germes protéolytiques qui sont souvent des agents de putréfaction.

Ces protéinases engendrent la lyse des protéines des cadavres animaux et végétaux. Elles peuvent être responsables de lésion tissulaire lors de l'expression de pouvoir pathogène.

- **Equations catalysées par les protéinases et les peptidases :**

- **Protéinases :**



- **Peptidases :**



5.2.2. Mise en évidence des protéases exocellulaires :

Peu de bactéries possèdent des protéases exocellulaires, aussi les milieux de cultures contiennent rarement des protéines mais contiennent des peptones hydrolysables par les bactéries.

Les protéases caractérisent certains genres bactériens. Leur recherche constitue parfois un caractère d'identification.

- **Mise en évidence d'une gélatinase :**

Voir fiche technique.

- **Mise en évidence d'une caséinase :**

Voir fiche technique :

- **Protéolyse du sérum de bœuf coagulé :**

Voir fiche technique.

5.2.3. Catabolisme des acides aminés :

Des perméases, protéines membranaires des acides aminés, permettent le passage rapide et efficace des acides aminés dans le cytoplasme.

Puis, la dégradation des acides aminés fait intervenir des réactions de :

- Décarboxylations.
- Désaminations.
- Transaminations.

Les réactions de dégradation des acides aminés ne produisent pas d'ATP mais, elles engendrent des composés carbonés qui peuvent être à l'origine d'une production d'énergie.

- **Recherche des décarboxylases :**

Voir fiche technique.

- **Recherche des désaminases :**

Voir fiche technique.

- **Production d'indole :**

Voir fiche technique.

5.3. Catabolisme du lactose :

5.3.1. Notions sur l'utilisation bactérienne du lactose :

- **Lactose perméase :**

La protéine membranaire permet le transport rapide et efficace du lactose et des β -galactoside dans la bactérie.

Le transport du lactose est un transport actif secondaire.

Elle peut être induite, chez certaines bactéries, en présence de lactose.

- **Lactase :**

Elle hydrolyse le lactose en galactose et glucose.

- **Enzymes intervenants dans le catabolisme du galactose et du glucose :**

Une bactérie Glucose + et lactose + possède donc nécessairement la lactose perméase et la lactase. De plus, elle possède les enzymes du catabolisme du glucose et du galactose.

5.3.2. Caractéristiques de ces enzymes :

- **Induction enzymatique :**

Les enzymes adaptatives ne sont synthétisées qu'en présence de composé inducteur. Leur présence importante dans la bactérie dépend de la présence d'inducteur.

- **Répression enzymatique :**

Si un milieu contient du glucose et du lactose, les bactéries dégradent d'abord le glucose. La présence de glucose empêche la synthèse de lactase. Le glucose doit être entièrement dégradé pour permettre la synthèse de lactase.

5.3.3. Recherche de l'ONPG hydrolase :

Voir fiche technique.

5.3.4. Recherche de la PNPG hydrolase :

Voir fiche technique.

5.3.5. Catabolisme des produits d'hydrolyse du lactose :

Le glucose va engendrer du glucose-6-phosphate qui va suivre la voie de la glycolyse.

Le galactose est converti en glucose-6-phosphate qui va suivre la voie de la glycolyse.

5.4. Catabolisme d'autres diholosides :

5.4.1. Transfert dans la bactérie :

Les diholosides entrent dans la bactérie grâce à des perméases localisées dans la membrane.

Les perméases, de nature protéique, correspondent à l'expression d'un gène de l'ADN. Leur synthèse est empêchée par le chloramphénicol.

Les perméases sont spécifiques du glucide transporté.

Elles sont susceptibles d'inhibition compétitive par des analogues de structure.

Elles sont inductibles.

5.4.2. Hydrolyse enzymatique sous l'action d'osidases :

Les osidases sont des hydrolases qui catalysent l'hydrolyse des osides donc elles coupent la liaison osidique avec intervention d'eau.

Elles sont spécifiques de la liaison osidique impliquée entre les deux oses.

5.4.3. Catabolisme des oses :

Les oses subissent des conversions biochimiques. Ils donnent des oses phosphorylés. Ces oses phosphorylés suivent la voie de la glycolyse.

5.5. Catabolisme des hétérosides :

- **Hydrolyse de l'esculine :**

Voir fiche technique.

- **La salicine :**

Hétéroside présent dans le milieu Hektoen.

- **L'amygdaline :**

Hétéroside.

5.6. Catabolisme des polyosides :

- **L'amidon :**

Les amylases sont des hydrolases qui coupent les liaisons osidiques. Ces enzymes exocellulaires sont excrétées par la bactérie. Elles permettent d'obtenir des molécules de taille réduite.

- **La cellulose :**

La cellulose est hydrolysée par des cellulases.