

I. Introduction : Energie, catabolisme et anabolisme

Pour assurer sa croissance, sa survie ou son fonctionnement, une bactérie doit trouver dans son environnement de quoi satisfaire ses besoins nutritifs : sources d'énergie, de carbone, d'azote, des ions minéraux etc... Ces éléments doivent être apportés dans un milieu avec des conditions physicochimiques favorables (température, pH, pression osmotique, besoin en oxygène etc..).

Le métabolisme est l'ensemble des réactions biochimiques mises en jeu par un organisme pour permettre sa croissance (figure). Il comprend d'une part, des réactions de dégradation de substrats (catabolisme) et d'autre part, des réactions de biosynthèse de substrats (anabolisme). Ces deux types de réactions nécessitent toujours l'intervention de catalyseurs qui sont des enzymes.

Le métabolisme microbien se caractérise par certaines particularités :

- Tous les processus métaboliques se déroulent dans un organisme unicellulaire
- Il est non compartimenté
- Le métabolisme microbien est flexible (les bactéries s'adaptent rapidement aux conditions du milieu)
- Il se caractérise par l'intensité des processus métaboliques

Les produits libérés par le métabolisme au cours d'une phase de croissance (trophophase) sont appelés « métabolites primaires » quelle que soit leur origine, catabolisme ou anabolisme : il s'agit des produits non spécifiques et essentiels pour les fonctions métaboliques primaires ou pour la physiologie (acides aminés, nucléotides, vitamines, acides organiques, éthanol). « Les métabolites secondaires » sont des molécules généralement produites par des organismes après la phase active de croissance, lors de la phase appelée idiophase. Ils ne sont pas directement impliqués dans le développement ou la reproduction cellulaire (antibiotiques, polysaccharides, toxines, ect.). Leur absence n'entraîne pas une mort immédiate mais peut limiter la survie.

La connaissance du métabolisme a un double intérêt, industriel et taxonomique. L'intérêt industriel se résume en :

- la connaissance des molécules produites par le microorganisme et utiles à l'homme (antibiotiques, acides, éthanol ...).
- la fabrication d'aliments (fromages, vin, bière, pain...) et la conservation de certaines denrées alimentaires.

D'autre part l'intérêt taxonomique se résume en :

- la connaissance de la capacité à réaliser certaines réactions biochimiques précises qui sont des critères essentiels dans l'identification et la classification (ou Taxonomie) bactérienne.

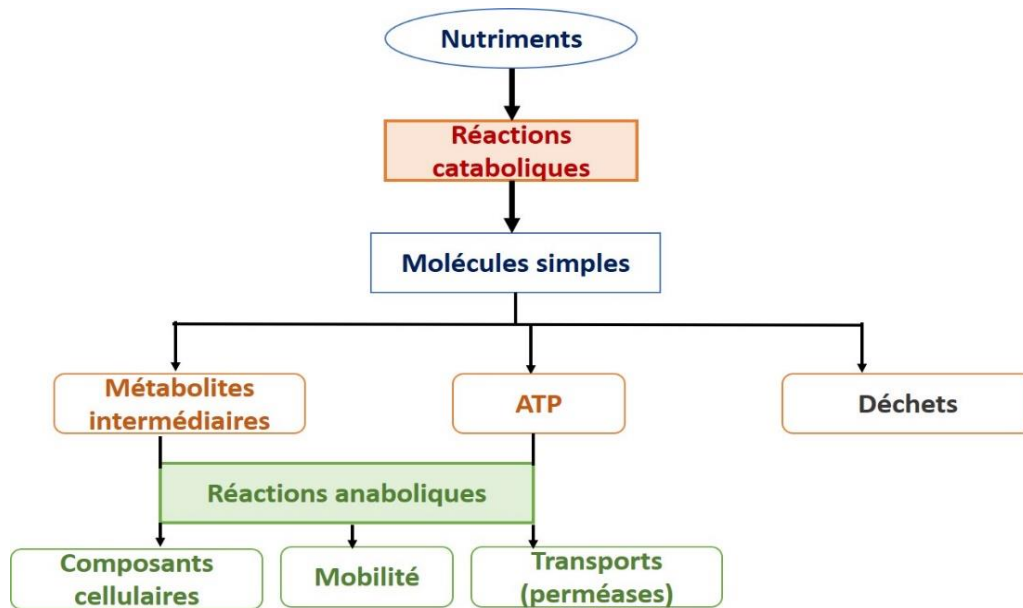


Figure : schéma simplifié montrant la relation entre l'anabolisme et le catabolisme.

La bactérie produit de l'énergie au cours du catabolisme par le biais de réactions exergoniques. Pour éviter toute perte sous forme de chaleur, ces réactions exergoniques (productrices d'énergie) sont couplées à des réactions dites endergoniques (absorbent l'énergie). L'énergie est ainsi emmagasinée dans des molécules d'ATP ou immédiatement consommée dans une réaction qui nécessite de l'ATP.

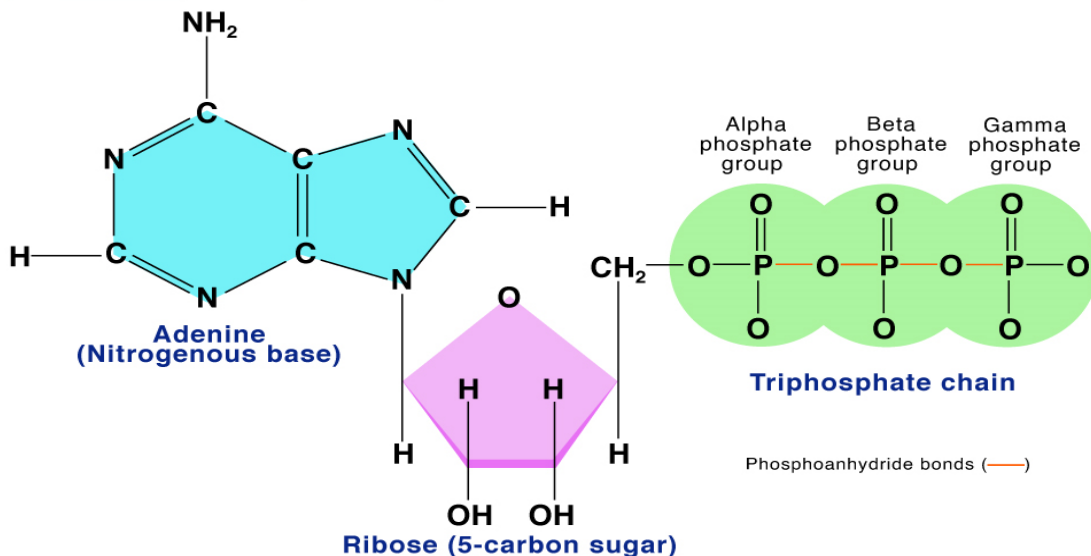
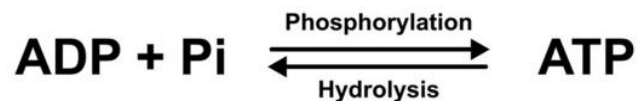
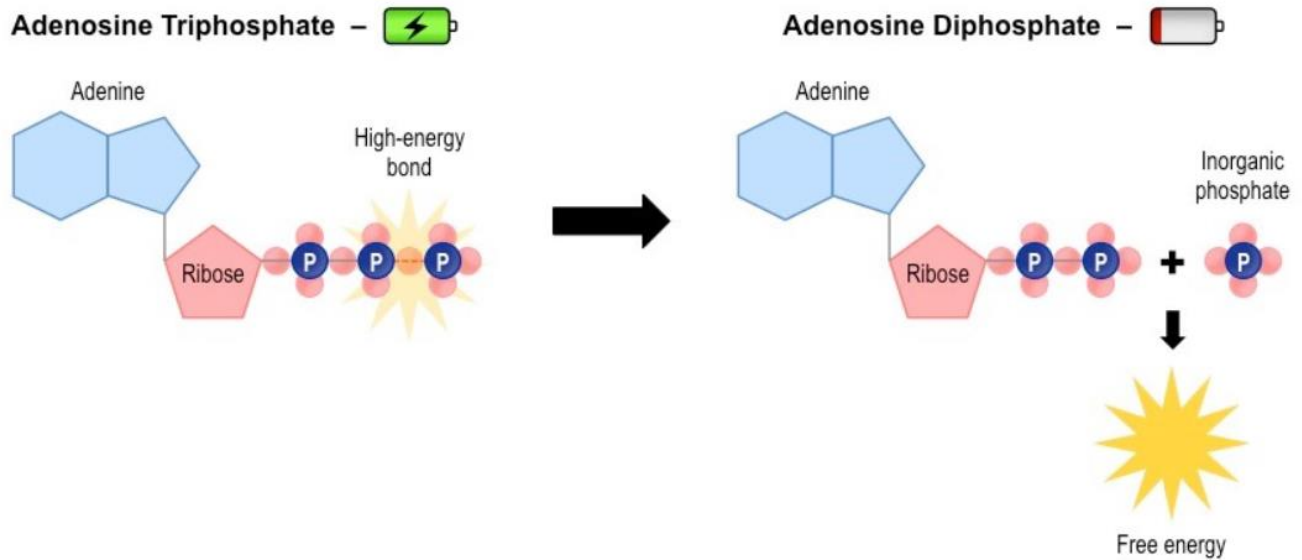


Figure : Structure de la molécule d'ATP



L'énergie constitue la plaque tournante du métabolisme cellulaire. Le monde microbien présente une grande diversité dans les sources d'énergies utilisables. Certains micro-organismes aérobies ressemblent aux cellules animales et synthétisent leur ATP à partir de sucres dégradés via la glycolyse et le cycle de Krebs par une chaîne respiratoire membranaire très semblable à celle des mitochondries. D'autres, anaérobies, tirent leur énergie de la fermentation des sucres ou d'une chaîne de transport d'électrons qui utilise un composé autre que l'O₂ comme accepteur final d'électrons.

II. Le métabolisme énergétique

Pour pouvoir transformer des aliments et fabriquer leur matière vivante, les microorganismes doivent se procurer de l'énergie. Il s'agit bien entendu d'une énergie chimique qui est stockée dans les cellules essentiellement sous forme d'ATP. L'énergie peut provenir de deux modes de transformation : On définit alors deux types trophiques :

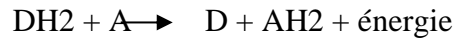
- Transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique (phototrophes ou photosynthétique).
- Ou d'énergie chimique (chimiotrophes) soit par : respiration ou fermentation.

II.1. Les types trophiques

Sur la base de la source d'énergie, on distingue les bactéries chimiotrophes et les bactéries phototrophes. Les bactéries chimiotrophes puisent leurs énergies des réactions chimiques d'oxydoréduction. Si les

composés (donneurs d'électrons) sont inorganiques comme H_2S , H_2 , Fe^{2+} ou NH_3 ..., les bactéries sont dites chimiolithotrophes. Si le donneur d'électron est organique, elles sont dites chimioorganotrophes. La réaction type peut se résumer comme suit :

D = donneur électrons ; A= accepteur d'électron



Les bactéries phototrophes puisent leur énergie de la lumière. Si la source d'électrons est minérale, les bactéries sont dites photolithotrophes, si la source d'électrons est organique, les bactéries sont dites photoorganotrophes.

Sur la base de la source de carbone, Si la source est le dioxyde de carbone (CO_2) les bactéries sont dites autotrophes, c'est le cas des bactéries phototrophes et la plupart des bactéries chimiolithotrophes. Si la source de carbone assimilable est un substrat organique, ces bactéries sont qualifiées d'hétérotrophes. Les bactéries hétérotrophes peuvent dégrader de nombreuses substances hydrocarbonées : alcools, acides organiques, sucres ou polyholosides. La liste des substrats carbonés utilisables par une souche bactérienne comme unique source de carbone et d'énergie constitue l'auxanogramme de la souche. Les photoautotrophes sont photosynthétiques. On peut citer les cyanobactéries, les bactéries vertes, les bactéries pourpres non sulfureuses.

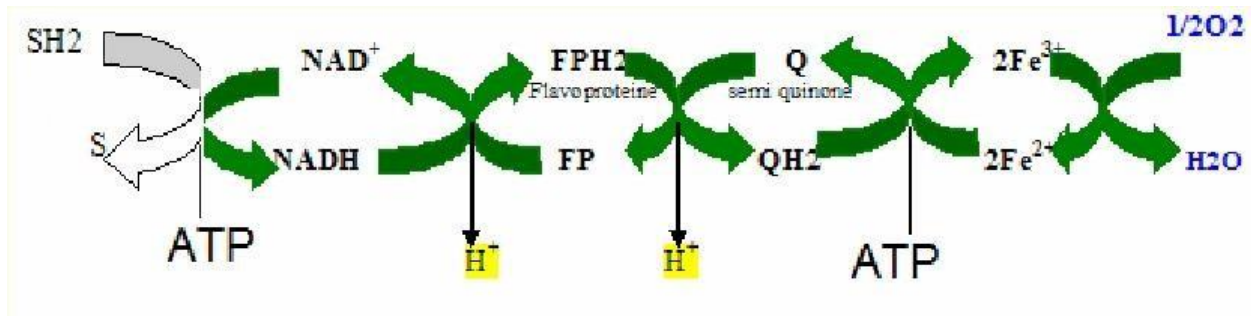
La photosynthèse bactérienne est différente de celle des végétaux supérieurs. Les pigments et les donneurs d'électrons sont également différents (hydrogène, soufre, jamais l'eau comme chez les plantes). Les photohétérotrophes sont photosynthétiques et puisent le carbone de composés organiques. Les chimioautotrophes, n'ont besoin ni de matière organique, ni de lumière du soleil. Ils puisent leur énergie de substance inorganique et transforme le CO_2 en matière organique. On peut citer les bactéries méthanogènes (Archeae) qui synthétisent le méthane (CH_4) à partir de CO_2 . Les chimiohétérotrophes puisent leur énergie et leur carbone des substances organiques. C'est le cas de la plupart des bactéries d'intérêt médical (pathogènes).

II.2. Les types respiratoires

II.2.1. La Respiration

La respiration est l'ensemble des voies métaboliques au cours desquelles l'oxygène moléculaire ou des composés oxygénés inorganiques ou ioniques jouent le rôle d'accepteur d'électrons et d' H_2 dans les réactions redox. Ces voies sont liées à la membrane cytoplasmique de la bactérie. L'énergie est produite

par phosphorylation dite oxydative et libérée par paliers via une chaîne de transfert d'électrons ; Le bilan énergétique est élevé.



Le pyruvate est le point d'aboutissement obligé de toutes les voies de dégradation du glucose et des voies d'oxydation de nombreux acides aminés. Il est transformé en Acetyl~CoA par décarboxylation oxydative.

➤ La chaîne respiratoire

C'est la chaîne cytochromique de transfert des électrons, à laquelle sont associés des phosphorylations oxydatives. Ses composants sont disposés de façon séquentielle en fonction de leur potentiel redox.

Le mouvement des électrons ou des protons le long de la chaîne s'effectue graduellement à partir des constituants les plus électronégatifs pour aller vers le constituant le plus électropositif (O_2). Ces composants sont des enzymes associés à des groupements prosthétiques et qui agissent comme transporteurs d'électrons.

Cytochromes : Systèmes redox qui transfèrent des électrons et ne sont pas capables de transporter de l'hydrogène. Ce sont des protéines dont le groupement prosthétique est une protoporphirine portant un atome de fer central qui participe au transport électronique.

Cette protoporphirine s'appelle Hème quand le fer est à l'état Fe^{2+} (ferreux) et Hémine lorsque le fer est à l'état Fe^{3+} (oxydé ou ferrique).

De nombreux cytochromes ont été décrits chez les bactéries : a , a₃, b, c , o. Le cytochrome terminal qui joue le rôle d'accepteur final d'électron est appelé Cytochrome Oxydase.

➤ La respiration se fait en 2 étapes :

- 1) Le cycle tricarboxylique de Krebs, avec libération de CO_2 par oxydation couplée à la réduction de 3 NAD^+ et de 1 FAD^+ par tour de cycle.
- 2) La chaîne respiratoire avec coenzymes de déshydrogénases, Quinones et Cytochromes.

Selon l'accepteur final d'électrons et d' H_2 , on peut distinguer :

- 1) Dans la respiration aérobie, l'accepteur final est l' O_2 .
- 2) Dans la respiration anaérobie, l'accepteur final est un composé inorganique ou ionique (NO_3^- , fumarate).

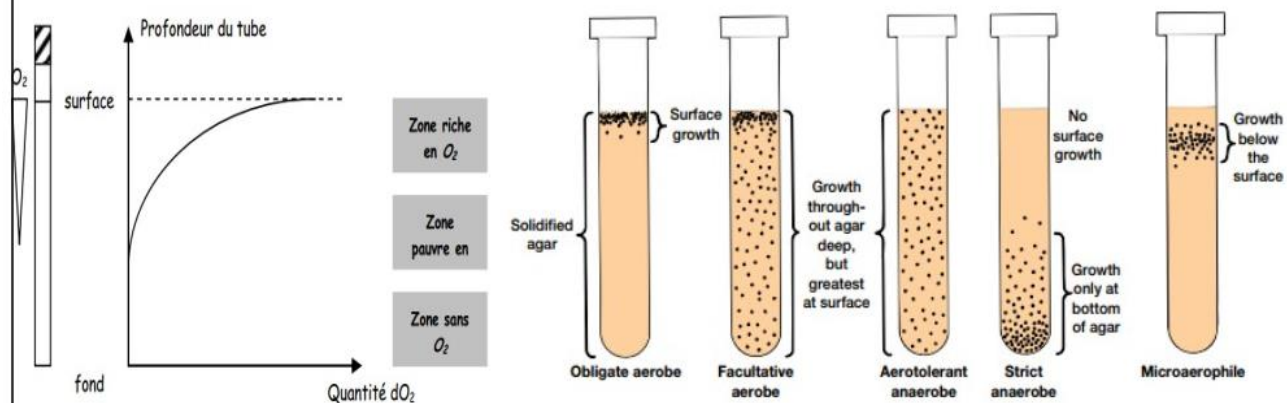
Tableau 2 : Différents accepteurs d'électrons utilisés lors de la respiration chez les bactéries

Accepteur d'électrons	Produit final réduit	Nom du processus	Exemples de microorganismes
O_2	H_2O	Respiration aérobie	<i>Escherichia coli</i> , <i>Streptomyces</i>
NO_3^-	NO_2^- , NH_3 or N_2	Respiration anaérobie (dénitrification)	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i>
SO_4^{2-}	S or H_2S	Respiration anaérobie (réduction des sulfates)	<i>Desulfovibrio</i>
fumarate	Succinate	Respiration anaérobie utilisant un accepteur d' e^- organique	<i>Escherichia coli</i>
CO_2	CH_4	Méthanogenèse	<i>Methanococcus</i>

Accepteur final des électrons et type respiratoires

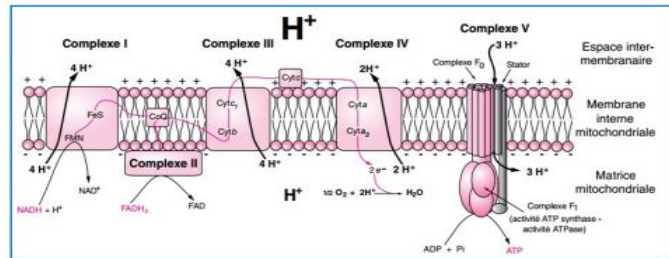
Après ensemencement par pique centrale et culture sur le milieu viande foie le type respiratoire (comportement vis-à-vis du dioxygène) d'un microorganismes peut être déterminé et ce Selon la présence ou l'absence d'une chaîne de transport des électrons et le type de l'accepteur final des électrons et des protons.

2. Composition pour 1 L d'eau distillée		
Composant	Quantité (en g/L)	Rôle
Base viande foie	30,0	Apport de facteurs de croissance
Glucose	2,0	Source de C et d'énergie
Agar	6,0	gélifiant
pH	7,4	

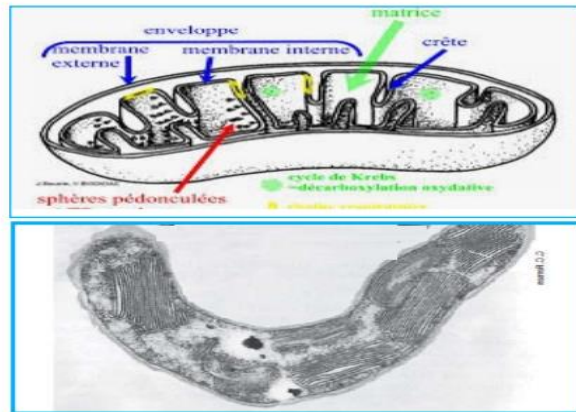


Il existe deux voies de respiration aérobie:

1. Voie des cytochromes indirecte



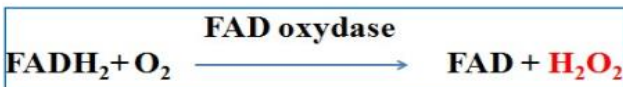
Chez les organismes eucaryotes elle se trouve dans la membrane interne des mitochondrie



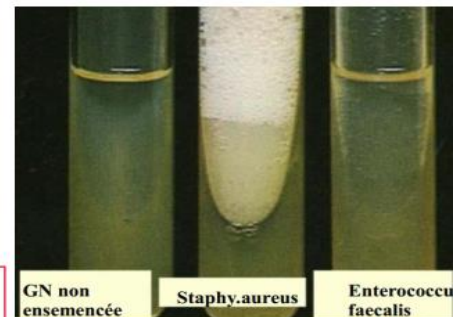
Chez les procaryotes elle se trouve dans des invagination de la membrane cytoplasmique

2. Voie oxydative directe:

Elle se fait dans le cytosol par des enzymes auto-oxydables qui transfèrent les électrons du substrat à l'oxygène avec formation d'eau oxygénée ou d'ion superoxydes

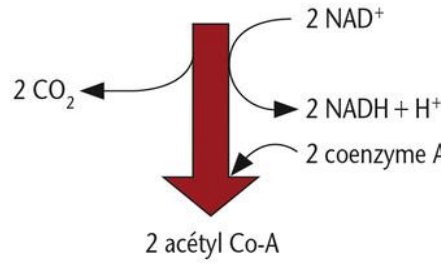
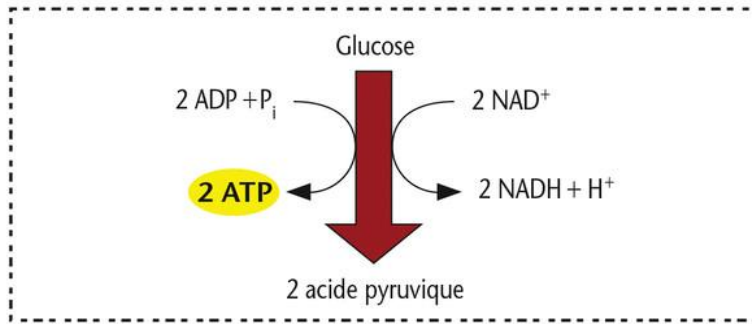


Ces produits sont toxiques et doivent être rapidement dégradés pour éviter la mort des bactéries soit par: la catalase, la peroxydase et la superoxyde dismutase

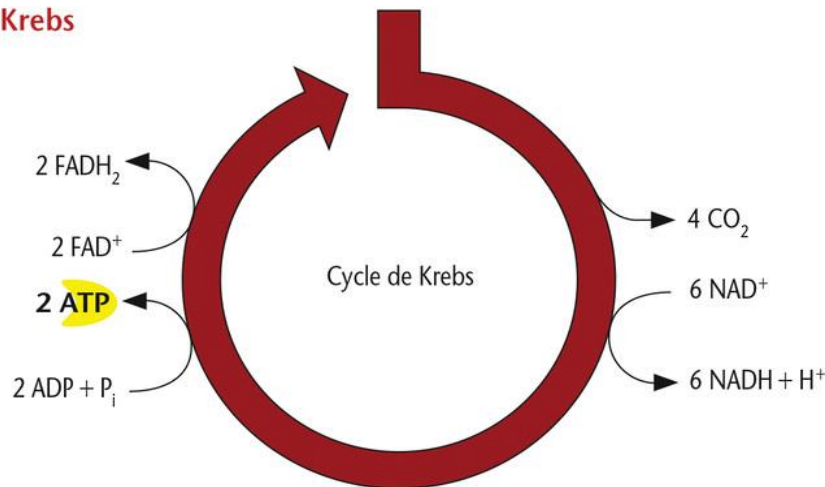


Test de catalase

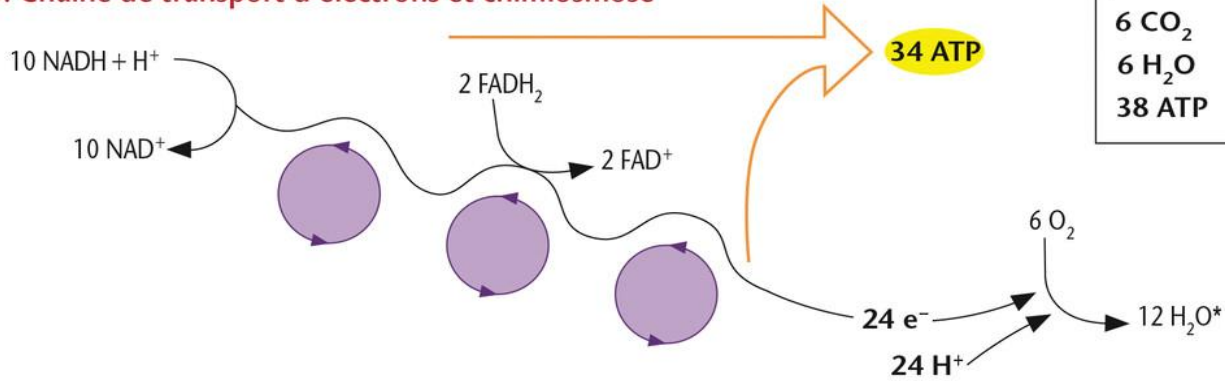
1. Glycolyse



2. Cycle de Krebs



3. Chaîne de transport d'électrons et chimiosmose



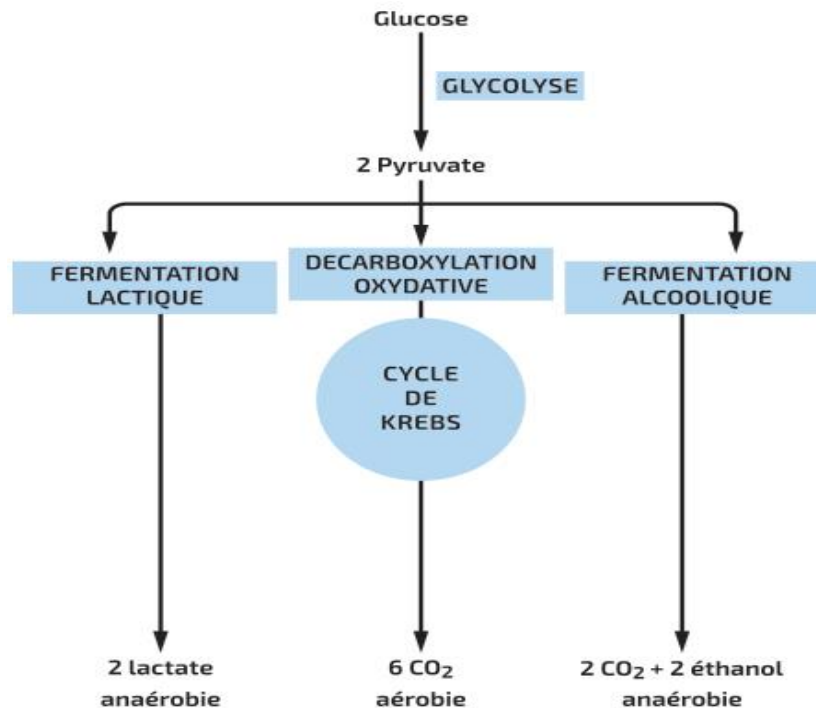
Bilan total	
6 CO ₂	
6 H ₂ O	
38 ATP	

Figure : Illustration des trois étapes de la respiration cellulaire chez les microorganismes aérobies (glycolyse, cycle de Krebs et chaîne de transport d'électrons).

II.2.2. La fermentation

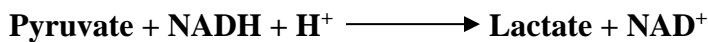
La fermentation est une oxydation biologique au cours de laquelle l'accepteur final d' H_2 et d' e^- est un composé organique. Les voies fermentaires se déroulent au sein du cytoplasme bactérien. L'énergie est produite par phosphorylation au niveau du substrat. Le bilan énergétique est réduit.

- La première étape comporte les différentes voies du métabolisme intermédiaire qui aboutissent au pyruvate.
- Puis viennent les réactions de réduction du pyruvate qui différencient les bactéries fermentaires car elles conduisent à des produits finals divers, soit uniques, soit plus souvent mélangées.



a) Fermentation lactique (ou « homolactique »)

C'est le cas le plus simple : le pyruvate sert d'accepteur d'électrons et d'hydrogène pour la réoxydation du NADH :

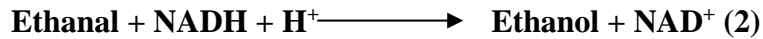


Il s'agit de la principale fermentation permettant la transformation du lait en yaourt ou en fromage frais. Elle est présente chez de nombreuses espèces de bactéries lactiques tels que les streptocoques et les *Lactobacillus*.

b) Fermentation éthanolique (ou « alcoolique »)

Le pyruvate est décarboxylé en éthanal (1), qui est ensuite réduit en éthanol (2) :





Cette fermentation, pratiquée par de nombreuses levures (dont *Saccharomyces cerevisiae*), permet la fabrication du pain et de boissons alcoolisées telles que le vin ou la bière.

c) Fermentation acétique

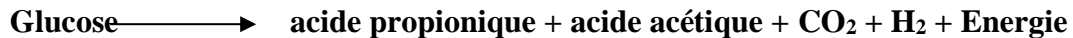
Il se forme de l'acide acétique (acide éthanoïque) à partir de l'éthanol en présence d'oxygène.



La bactérie responsable de l'acétification est du genre *Acetobacter*. Les bactéries acétiques forment une couche à la surface appelée la mère du vinaigre (biofilm composé d'amas cellulaire).

d) Fermentation propionique

De l'acide propionique (acide propanoïque), de l'acide éthanoïque ainsi que du CO₂ et du dihydrogène se forment. Les substrats peuvent être : des sucres, du glycérol, de l'acide lactique, de l'acide malique.



L'acide propionique et l'acide éthanoïque sont responsables de la saveur des fromages à pâte cuite et le gaz carbonique responsable de l'ouverture de ces fromages (Comté, Gruyère et Emmental). Les bactéries responsables ce type de fermentation sont les bactéries propioniques (genre *Propionibacterium*).

e) Fermentation butyrique

Il se forme de l'acide butanoïque (butyrique), du CO₂ et du dihydrogène à partir de l'acide lactique déjà formé par fermentation lactique :



L'acide butyrique est responsable de l'odeur putride et du goût piquant de certains fromages à pâte cuite. Cette fermentation a lieu sous l'effet des bactéries *Clostridium butyricum*.

