

# Métabolisme bactérien

## 1. Types trophiques

Les microorganismes se multiplient à partir des aliments ou nutriments présents dans les milieux de culture. Ils ont tous un certain nombre de besoins communs : nécessité d'eau, de source d'énergie, de source de carbone, de source d'azote et d'éléments minéraux. Ces besoins de bases sont des besoins élémentaires. Beaucoup d'entre eux, dans ces conditions, peuvent croître et se multiplier. Un ou plusieurs constituants essentiels nécessaires à la synthèse d'un composant indispensable à la vie cellulaire, leur font défaut. Ces constituants ou métabolites essentiels doivent leur être fournis pour assurer leur développement. Ces besoins spécifiques sont appelés facteurs de croissance. Selon la nature de ces besoins, on sera amené à définir des catégories de microorganismes que l'on appelle des types trophiques (du grec *trophus* : nourriture).

-Selon le type d'énergie utilisé, on peut reconnaître deux catégories de microorganisme :

- Les chimiotrophes ou chimiosynthétiques, qui utilisent l'énergie de l'oxydation de produits chimiques organiques ou minéraux.
- Les phototrophes ou photosynthétiques, qui puisent leur énergie dans le rayonnement lumineux

-Selon la source d'électrons. On parlera :

- Les lithotrophes, qui sont capables de se développer dans un milieu minéral comme les bactéries sulfureuses pourpres ou vertes.
- Les organotrophes, qui nécessitent des composés organiques comme sources d'électrons : telles sont les bactéries pourpres non sulfureuses.

-Selon la source de carbone conduit à deux grandes catégories de microorganismes :

- Les autotrophes, sont capables de se développer en milieu inorganique contenant le CO<sub>2</sub>, comme seule source de carbone.
- Les hétérotrophes, exigent au contraire des composés organiques pour se reproduire.

# Métabolisme bactérien

## 2. Métabolisme des glucides

Tous les glucides sont susceptibles d'être catabolisés. Le glucose est le plus utilisé, soit à partir milieu où il est présent soit après libération à partir des polysaccharides et les disaccharides. Alors que, chez les eucaryotes, la totalité du glucose est métabolisée par la voie de la glycolyse, les micro-organismes possèdent une variété d'autres voies qui fonctionnent souvent en parallèle.

### 2.1. Glycolyse (Voie d'Embden-Meyerhof)

Elle a été la première voie connue. C'est celle qui est suivie aussi bien chez les animaux (muscles) que chez les levures et chez un grand nombre de bactéries aérobies, anaérobies strictes ou facultatives. Tous ces organismes cependant ne forment pas les mêmes produits finaux. Il y a un tronc commun jusqu'au pyruvate (Figure 1) dans lequel se trouvent les réactions caractéristiques de cette voie, à savoir:

L'activation du glucose, le clivage de l'hexose par l'aldolase, la formation de deux trioses, la phosphorylation oxydative du triose phosphate, la formation d'ATP et la production finale de pyruvate.

Le bilan s'établit comme suit :



- Les intermédiaires de la glycolyse sont: **G-6-P**, glucose 6-phosphate; **F-6-P**, fructose 6-phosphate; **F-1,6-BP**, fructose 1, 6-bisphosphate; **G-3-P**, glyceraldehyde 3-phosphate; **DHAP**, dihydroxyacetone phosphate; **1,3-BPG**, 1,3-biphosphoglycérate; **3-PG**, 3- phosphoglycerate; **2-PG**, 2-phosphoglycérate; **PEP**, phosphoenolpyruvate.
- Les enzymes Glycolytiques: **GPI**, glucose phosphate isomérase; **TPI**, triose phosphate isomérase; **G3PDH**, glycéraldéhyde-3-phosphate déshydrogénase; **PGK**, phosphoglycérate kinase; **PGM**, phosphoglycérate mutase.

# Métabolisme bactérien

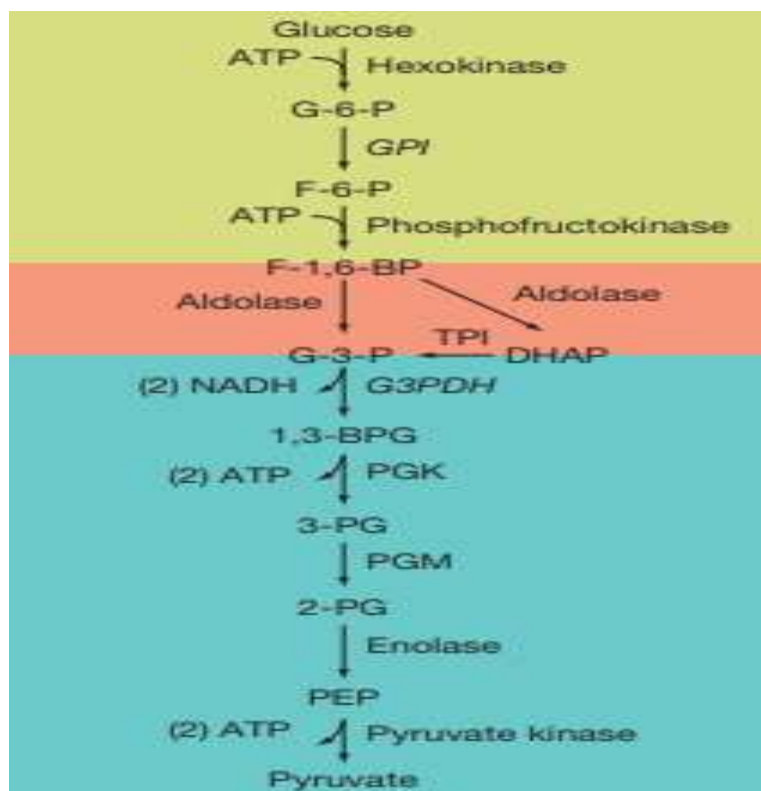


Figure 1 : Etapes de la glycolyse.

## 2.2. Voies alternatives de la glycolyse

### 2.2.1. Pentose phosphate

La voie PP est présente dans de très nombreuses bactéries, notamment *E. coli*, *Lactobacillus spp.*, *Bacillus spp.* et *Staphylococcus spp.* Le rôle majeur de la voie PP est dans la biosynthèse tel que la biosynthèse des acides gras (Figure 2).

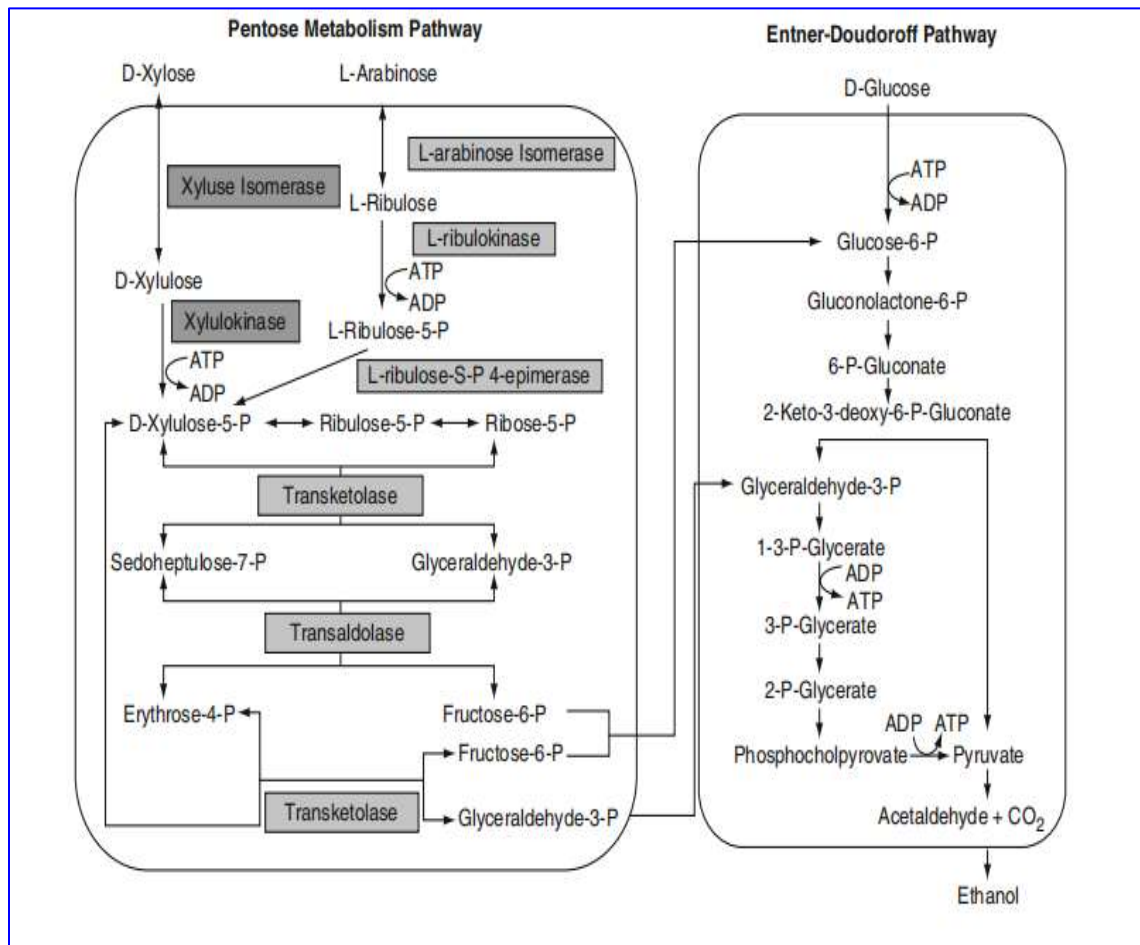
### 2.2.2. 2 Céto 3-Désoxy 6-Phosphogluconate

La voie d'*Entner-Doudoroff* est découverte par ces chercheurs en 1952 chez les *Pseudomonas*. De nombreux bactéries oxydatives tel que les *Pseudomonads* aérobie, *Caulobacter* et groupe d'*Azotobacter*, *Agrobacterium*, *Rhizobium* et *Spirillum*, et les bactéries anaérobies facultatives sont capables de fermenter les sucres.

Le métabolisme des sucres se fait principalement via la voie de CDPG (2 Céto 3-Désoxy 6-Phosphogluconate). Le clivage par l'enzyme CDPG aldolase donne naissance à deux molécules, pyruvate et glyceraldéhyde 3-phosphate, ce dernier est

## Métabolisme bactérien

métabolisé ultérieurement par des enzymes de la glycolyse en formant une deuxième molécule du pyruvate. Le bilan de cette voie produit une mole d'ATP, de NADPH<sub>2</sub> et NADH<sub>2</sub> pour chaque mole du glucose métabolisé. Les produits de cette voie, comme ceux de la glycolyse, peuvent être utilisés dans diverses réactions ; cependant, le NADPH<sub>2</sub> formé est utilisé dans les réactions de synthèse (Figure 2).



**Figure 2** : les voies alternatives de la glycolyse (pentose phosphate et Entner Doudoroff).

Les étapes essentielles de cette voie sont :

- Activation du glucose par l'ATP.
- Oxydation du groupement aldéhyde du glucose-6P pour former le 6-phosphogluconate avec réduction parallèle du NADP<sup>+</sup>.
- Déshydratation du 6-phosphogluconate et formation du CDPG ou KDPG (2-céto-3-

## Métabolisme bactérien

désoxy6- phosphogluconate).

- Clivage par la CDPG-aldolase pour donner d'une part du glycéraldéhyde-3P et d'autre part du pyruvate.

- Transformation du glycéraldéhyde-3P en pyruvate au moyen de la glycolyse.

### 3. Cycle de l'acide tricarboxylique (TCA)

Bien qu'une certaine quantité d'énergie soit produite lors de la conversion du glucose en pyruvate par les voies précédemment décrites, il en a beaucoup plus de libérée lorsque le pyruvate est dégradé en  $\text{CO}_2$  en présence d' $\text{O}_2$  dans la troisième phase de catabolisme. Le système multienzymatique appelé le complexe de la pyruvate déshydrogénase oxyde d'abord le pyruvate pour former du  $\text{CO}_2$  et de l'acétyl Coenzyme CoA (Acétyl CoA). L'acétyl CoA provient du catabolisme de nombreux glucides, lipides et acides aminés. Elle peut ensuite être dégradée dans Le cycle de l'acide tricarboxylique.

Le cycle de l'acide tricarboxylique (TCA) est également appelé cycle de l'acide citrique ou cycle de Krebs (le nom du biochimiste qui l'a établi). Il s'agit de la dernière voie catabolique commune pour l'oxydation des hydrates de carbone. Deux carbones entrent dans ce cycle sous (acétyl CoA) et deux carbones partent sous forme de  $\text{CO}_2$ . Au cours du cycle, quatre réactions d'oxydo-réduction ont lieu pour produire un pouvoir réducteur sous forme de trois molécules de  $\text{NADH}_2$  et une molécule de  $\text{FADH}_2$ . Le cycle génère deux  $\text{CO}_2$  et une GTP pour chaque molécule d'acétyl- CoA oxydée.

Les enzymes du cycle sont largement répandues parmi les microorganismes. Chez les procaryotes, elles sont localisées dans le cytoplasme. Chez les eucaryotes, on les trouve dans la mitochondrie Les étapes essentielles de cette voie sont :

-La première étape de ce processus emploie un système multienzymatique, le complexe de la pyruvate déshydrogénase Celui-ci oxyde et clive le pyruvate pour former un  $\text{CO}_2$  et acétyl-CoA.

## Métabolisme bactérien

-L'acétyl-CoA est riche en énergie parce qu'un thiol (-SH) groupement sulfhydryle) de haute énergie lie l'acide acétique à la coenzyme A. L'acétyl-CoA entre alors dans cycle de Krebs. L'acétyl CoA sous l'action de l'enzyme citrate synthase, se condense avec l'oxaloacetate, pour former du citrate, une molécule à six carbones.

-Le citrate à son tour, sous l'action de l'enzyme Aconitase, est réarrangé pour donner l'isocitrate.

-L'isocitrate est par la suite oxydé et décarboxyle deux fois, par l'enzyme Isocitrate Déshydrogénase pour donner  $\alpha$ -cétoglutarate (cinq carbone),

-l' $\alpha$ -cétoglutarate est pris en charge par le complexe enzymatique  $\alpha$ -cétoglutarate déshydrogénase pour donner la succinyl-CoA (quatre Carbones), une molécule comportant une liaison riche en énergie.

-La conversion de la succinyl-CoA en succinate par l'enzyme Succinyl-CoA Ligase. Il y a rupture de la liaison riche en énergie de la succinyl-CoA et l'énergie libérée est sert à former une GTP par phosphorylation au niveau de substrat. La GTP est aussi une molécule riche en énergie, fonctionnellement équivalente à l'ATP.

-La déshydrogénation du succinate en fumarate par la succinate déshydrogénase à FAD. Cette catalyse génère une molécule de FADH<sub>2</sub>.

-l'hydratation du fumarate en malate par un fumarase.

La dernière étape d'oxydation régénère un oxaloacetate, et aussi longtemps qu'il est alimenté en acétyl CoA, le cycle se répète.

# Métabolisme bactérien

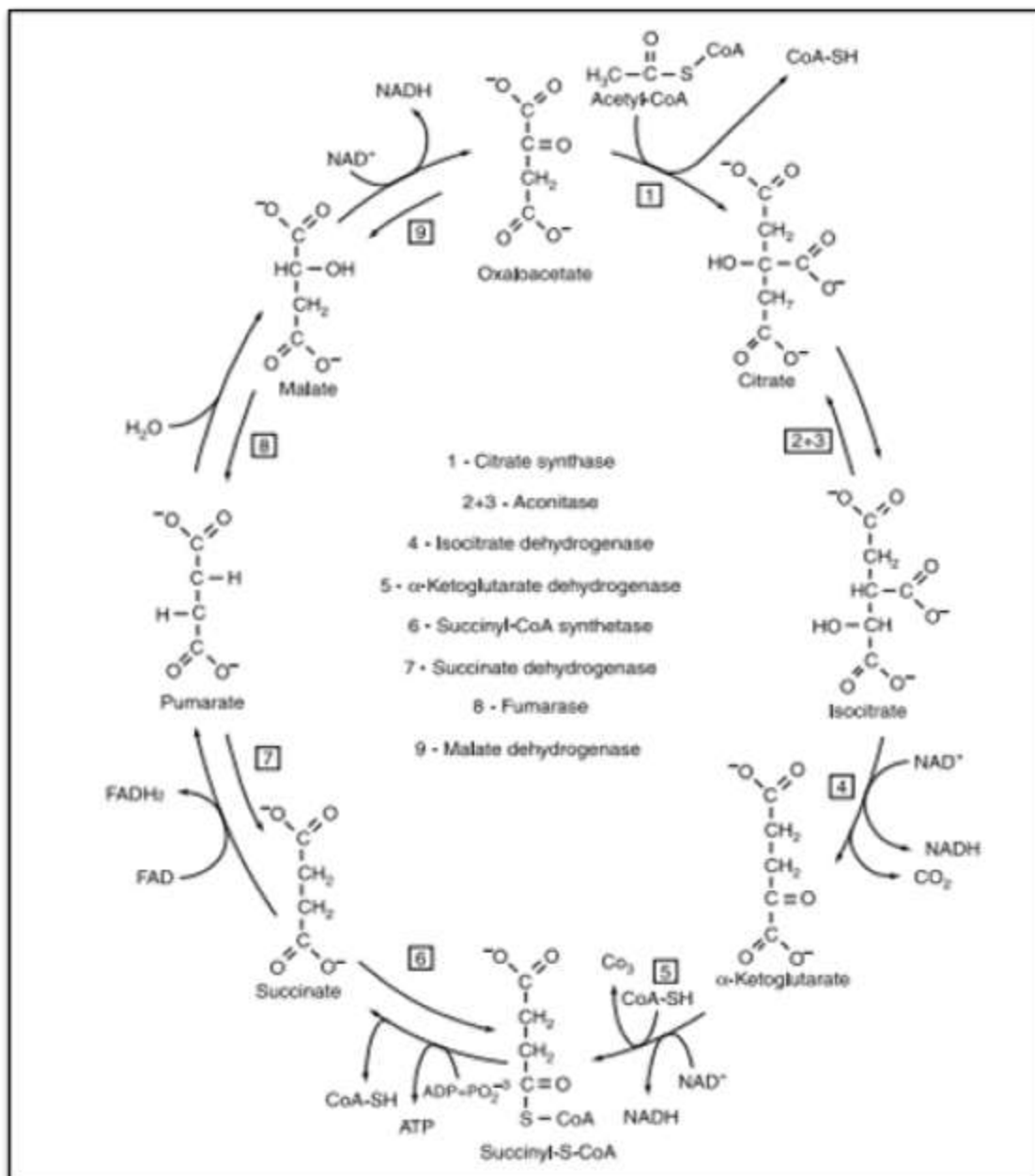


Figure 3 : cycle du Krebs

## 4. Shunt glyoxylate

Le shunt glyoxylate est essentiel pour la croissance sur des sources de carbone telles que l'acétate ou acides gras car cette voie permet la conversion de l'acétyl CoA en intermédiaires métaboliques, les cellules décarboxylent ensuite l'oxaloacetate pour fournir du phosphoénolpyruvate, point de départ de la biosynthèse des hexoses et pentoses. Ces organismes ont toutes les enzymes du cycle de Krebs mais ont en plus

## Métabolisme bactérien

deux enzymes :

- l'isocitrate qui coupe l'isocitrate en succinate et glyoxylate
- la malate synthétase qui condense le glyoxylate avec l'acétyl CoA pour former le malate

Un certain nombre de microorganismes sont capables de se développer à partir de l'acétate comme seule source de carbone et d'énergie. Le shunt glyoxylique ne fournit aucune énergie biologiquement utilisable. Il ne fonctionne que lorsque le microorganisme est cultivé sur acétate car le glucose réprime les enzymes précédemment citées.

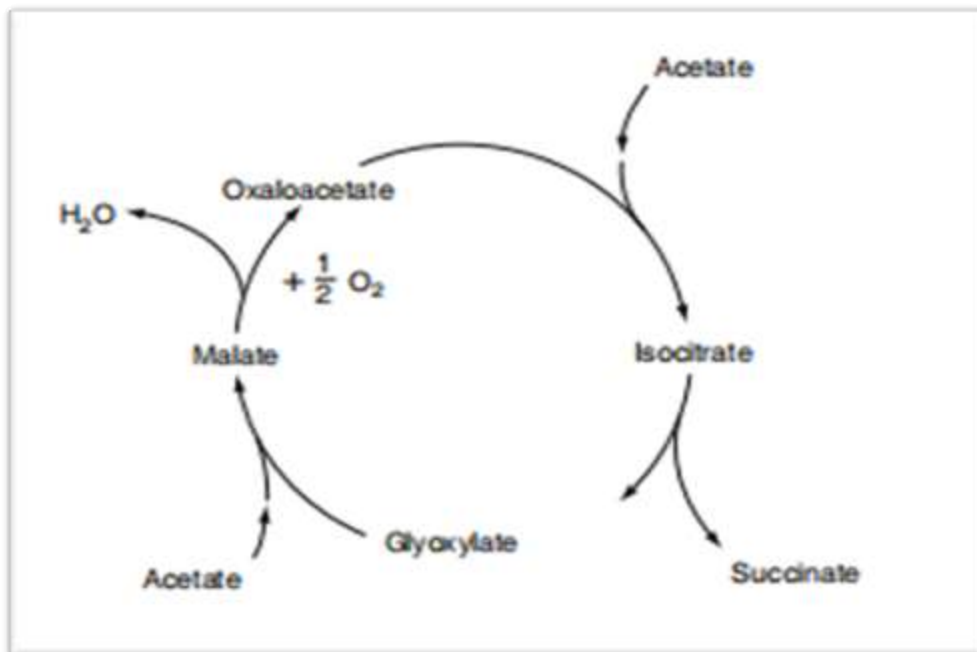


Figure 4 : Shunt glyoxylique.

### 5. Fermentations Microbiennes

La fermentation est un processus qui aide à décomposer les grosses molécules organiques via l'action de micro-organismes en molécules plus simples. Par exemple, les enzymes de levure convertissent les sucres et les amidons en alcool, tandis que les protéines sont converties en peptides ou acides aminés.



## Métabolisme bactérien

La fermentation est un processus générateur d'ATP (Tableau I) dans lequel des composés organiques servent à la fois de donneurs d'électrons (devenant oxydés) et d'accepteurs d'électrons (devenant réduite). Les glucides sont les principaux substrats de la fermentation. Certains composés appartenant à d'autres classes chimiques peuvent également être fermentés ; acides organiques, acides aminés, purines et pyrimidines.

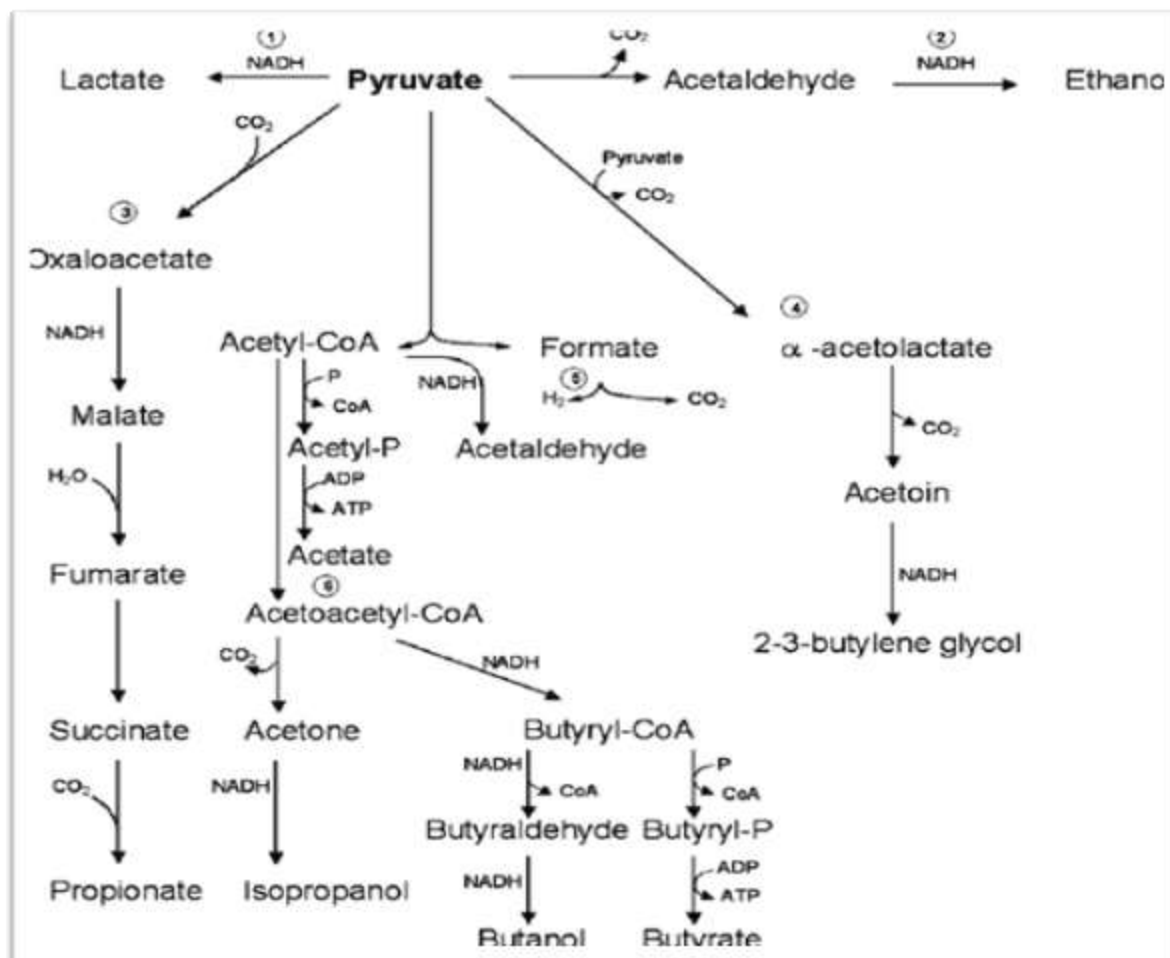
**Tableau I :** Le rendement énergétique de certaines fermentations microbiennes

Fermentation	Energie
Fermentation alcoolique	2 mol ATP/mol glucose
Fermentation propionique (glucose)	4 mol ATP/mol glucose
Fermentation propionique(lactate)	0.3 mol ATP/ mol lactate
Fermentation des acides aminés	0.3 mol ATP /mol acides aminés
Fermentation homolactique	2 mol ATP/ mol glucose
Fermentation hétérolactique	1 mol ATP/ mol glucose
Fermentation hétérolactque des <i>Bifidobacterium</i>	2.5 mol ATP/mol glucose
Fermentation acides mixtes	2.5 mol ATP/mol glucose
Fermentation Butanediolique	2.5 mol ATP/mol glucose
Fermentation butyrique	3 mol ATP/mol glucose

La fermentation est un moyen naturel d'améliorer les vitamines, les acides aminés essentiels, les anti nutriments, les protéines, l'apparence des aliments, leurs saveurs et leur arôme amélioré. Les actions microbiennes sur les ingrédients alimentaires ont tendance à fermenter les aliments, entraînant des changements biochimiques souhaitables responsables d'une modification significative de l'aliment.

## Métabolisme bactérien

Selon l'équipement enzymatique des espèces bactériennes, on obtiendra différents produits de fermentation à partir du pyruvate (Figure 5); il peut aussi être complètement oxydé. De nombreuses fermentations ont un intérêt industriel ou diagnostique.



**Figure 5 :** Fermentations microbiennes liées au pyruvate. (1) : Bactéries lactiques (*Bacillus*, *Streptococcus*, *Lactobacillus*). (2) : levures, *Zymomonas mobilis*. (3) : *Propionibacterium*. (4) : *Enterobacter*, *Serratia*. (5) : Entérobactéries (*Escherichia*, *Salmonella*, *Proteus*).

### 5.2. Fermentation lactique

Dans le métabolisme des bactéries lactiques, la fermentation lactique peut synthétiser un variété d'acides organiques dont l'acide lactique. Cette fermentation est

## Métabolisme bactérien

divisée en fermentation homolactique et hétérolactique. *Lactobacillus* effectuent une fermentation homolactique, tandis que *Leuconostoc et bifidobacterium* effectuent la fermentation hétérolactique. Les voies de fermentation homolactique et hétérolactique des sucres sont mentionnées dans la Figure. L'acide lactique est un acide organique essentiel en tant que matière première industrielle avec plusieurs applications dans l'agriculture, l'alimentation, la pharmacie, la médecine, les industries chimiques, la protection de l'environnement et les cosmétiques (Figure 6).

### 5.2.1. Fermentation homolactique

La première partie de la fermentation homolactique du glucose en lactate est la voie oxydative en utilisant le glucose comme source de carbone pour produire le pyruvate et les équivalents réducteurs par la glycolyse. Les équivalents réducteurs s'accumulent sous forme de  $\text{NADH}_2$ . Dans la deuxième partie de cette fermentation, les équivalents réducteurs sont réoxydés et le pyruvate agit comme accepteur d'électrons et est réduit en lactate sous l'action de lactate déshydrogénase. Cette deuxième réaction utilise  $\text{NADH}_2$ . Qui régénère le NAD.

### 5.2.2. Fermentation hétérolactique

Les bactéries lactiques de la famille hétérolactique, le glucose peut être décomposé en lactate, éthanol, acetate et  $\text{CO}_2$ . Cette dénomination fermentation hétérolactique s'explique par la présence d'autres composés à côté de l'acide lactique.

### 5.3. Fermentation acides mixtes

La fermentation des sucres s'effectue via la voie de la glycolyse, ce qui donne une grande diversité de produits de fermentation, de l'acide lactique, de l'acide acétique, de l'acide succinique, de l'acide formique et de l'éthanol (Figure 7).

## Métabolisme bactérien

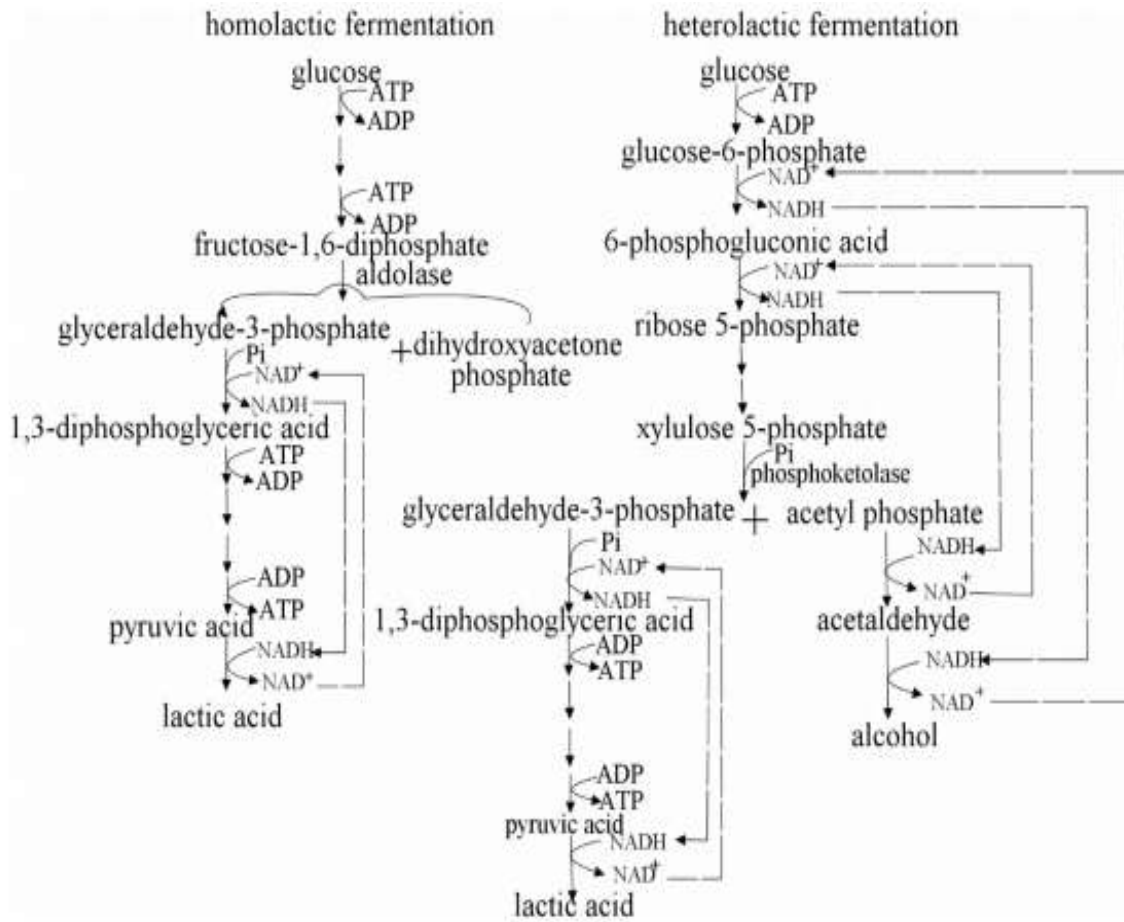
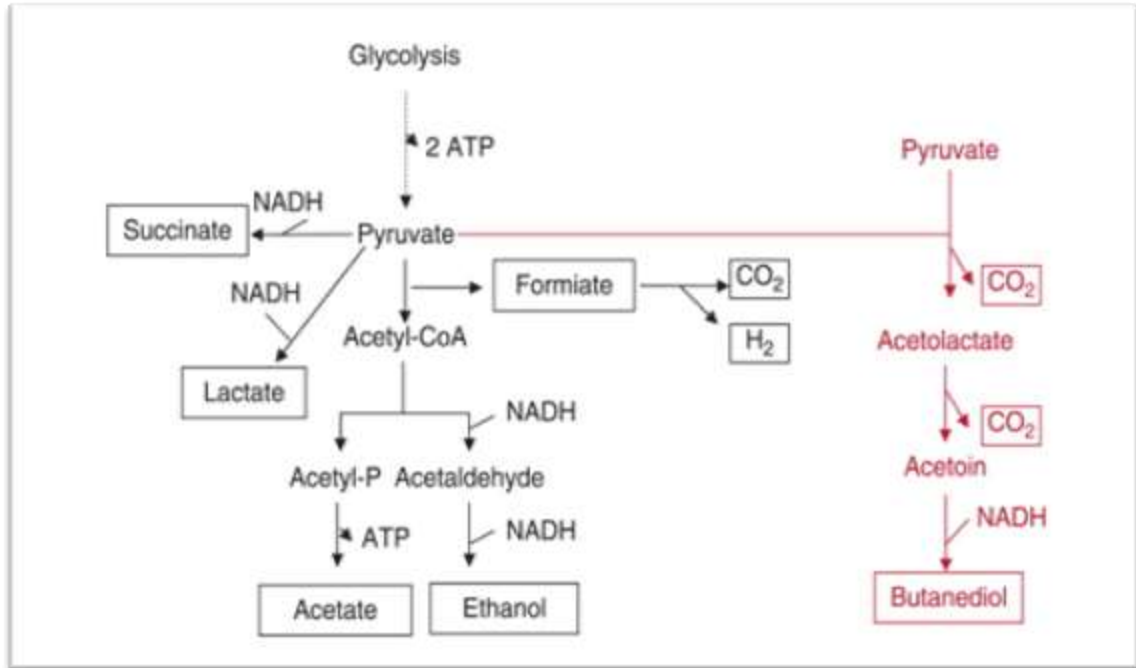


Figure 6 : Fermentation homolactique et hétérolactique

### 5.4. Fermentation butylene glycolique

La fermentation butylène glycolique s'accompagne de la production de l'acétoïne et 2,3 butanediol. Une caractéristique métabolique fermentative unique d'*Enterobacter* et de *Serratia* et de certaines espèces d'*Erwinia* est la formation d'un produit final neutre (butanediol). Les propriétés métaboliques des membres de la famille des Enterobacteriaceae sont utiles pour les caractériser et les distinguer. L'acétoïne qui, par oxydation à l'air, donne du diacétyl (responsable du goût du beurre et produit lors de la maturation de la crème). Le butanediol qui peut être transformé en butadiène et servir pour la synthèse du caoutchouc synthétique (Figure 7).

## Métabolisme bactérien



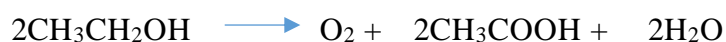
**Figure 7 :** Fermentation acides mixtes et butylène glycolique

### 5.5. Fermentation acétique

L'acide acétique de qualité alimentaire peut être produite par le processus du vinaigre en deux étapes. La première étape est la production d'éthanol à partir d'une source de glucides telle que le glucose. Ceci est réalisé à 30-32 C en utilisant la levure anaérobie *Saccharomyces cerevisiae* :



La deuxième étape est l'oxydation de l'éthanol en acide acétique. Bien que diverses bactéries puissent produire de l'acide acétique, seuls les membres d'*Acetobacter* sont utilisés commercialement tel que la bactérie *Acetobacter aceti*. Cette fermentation est une oxydation incomplète car les équivalents réducteurs générés sont transférés en oxygène et non au dioxyde de carbone :



### 5.6. Fermentation propionique

L' fermentation propionique est effectuée par plusieurs bactéries appartenant au genre *Propionibacterium* et à l'espèce *Clostridium propionicum*. Pendant la

## Métabolisme bactérien

fermentation de l'acide propionique, le sucre et le lactate peuvent être utilisés comme substrat initial. Lorsque le sucre est disponible, ces bactéries utilisent la voie de la glycolyse pour produire du pyruvate. Le pyruvate est carboxylé en oxaloacétate, puis réduit en propionate via le malate, le fumarate et le succinate. Les autres produits finaux de la fermentation propionique sont l'acide acétique et le CO<sub>2</sub> en proportions variables. Elle correspond à la fermentation secondaire de certains fromages à pâte cuite (gryuère et emmenthal), l'acide propionique est un acide carboxylique naturel intervenant dans la saveur et le CO<sub>2</sub> étant à l'origine des trous. L'acide propionique est largement utilisé comme conservateur et stabilisant alimentaire dans l'industrie alimentaire.

### 5.7. Fermentation butyrique

Fermentation butanoïque (anciennement butyrique). Réalisée par *Clostridium butyricum*, *Clostridium perfringens*, et d'autres, elle donne lieu aux sous-produits suivants (butyrate). C'est la fermentation type des boîtes de conserve avariées, caractérisée par une mauvaise odeur, de la production de gaz, de l'acidité. *Clostridium butyricum*, que l'on trouve souvent en grande quantité dans l'ensilage, peut se retrouver dans le lait et provoquer dans les meules et gryuère ou d'emmenthal une fermentation de l'acide lactique en acide butyrique et hydrogène provoquant leur éclatement.

La majeure partie de l'acide butyrique est consommée dans la fabrication de plastiques. Une certaine quantité d'acide butyrique est utilisée pour fabriquer des herbicides. Il est également utilisé comme intermédiaire pour les produits pharmaceutiques, les émulsifiants et les désinfectants, comme agent de tannage du cuir et comme agent édulcorant dans l'essence. Il est utilisé dans la synthèse des parfums d'esters de butyrate et dans la fabrication d'esters dont certains servent de base aux ingrédients aromatisants artificiels de certaines liqueurs, sirops d'eau gazeuse, bonbons. Une autre utilisation est comme additif alimentaire dans les arômes de beurre, de fromage, de caramel au beurre, de caramel, de fruits et de noix. L'acide butyrique est

## Métabolisme bactérien

également utilisé dans la conservation des grains de blé très humides afin de prévenir la détérioration fongique.

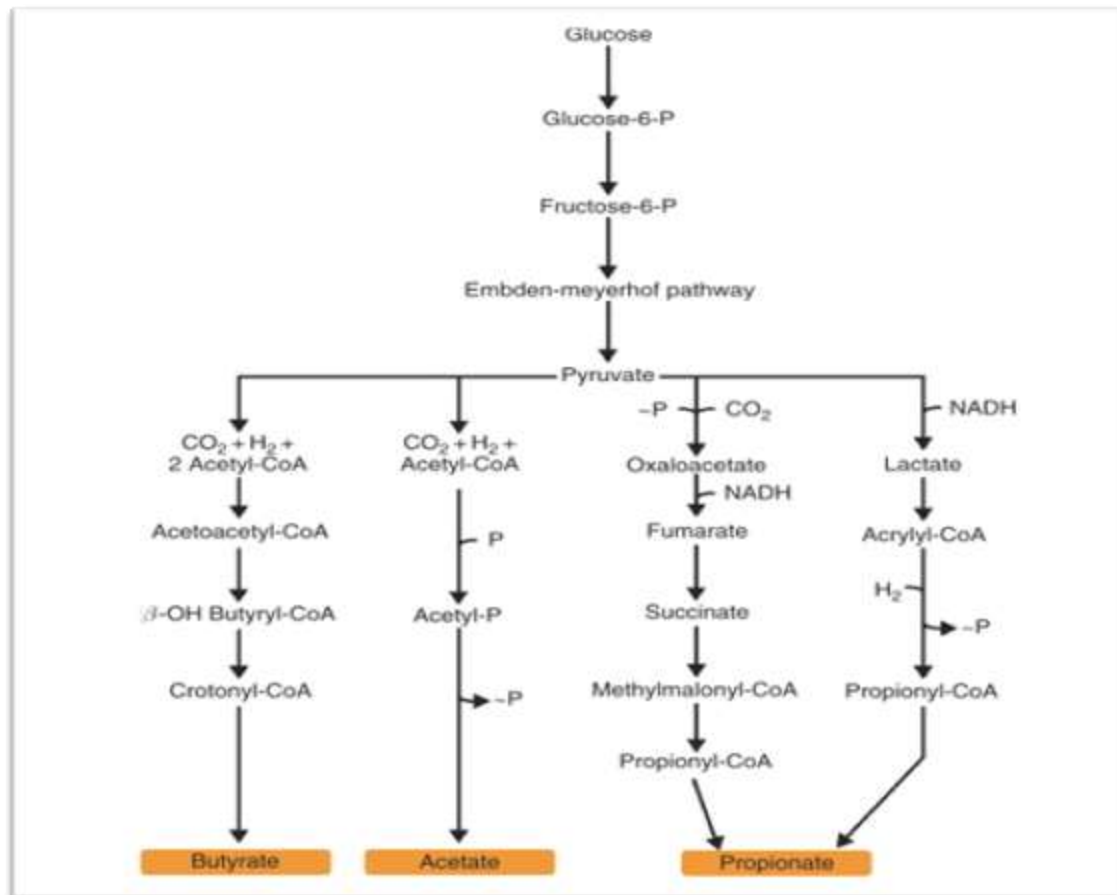


Figure 8 : Fermentation propionique et butyrique

### 5.8. Fermentation acétono-butylique

la fermentation acétono-butylique est basée sur la culture de diverses souches de *Clostridia* dans des milieux riches en glucides. Dans des conditions anaérobies pour produire du butanol et de l'acétone. *Clostridium acetobutylicum* est l'organisme de choix dans la production de ces solvants organiques. Ces fermentations n'étaient pas à la mode jusqu'à très récemment en raison de la disponibilité d'acétone et de butanol issus de l'industrie pétrolière. Ces fermentations suscitent aujourd'hui un intérêt considérable. Cependant, la concentration de produits finaux dans ces fermentations est

# Métabolisme bactérien

assez faible et les fermentations sont un type de fermentation mixte donnant un mélange de composés tels que comme l'acide butyrique, le butanol, l'acétone.

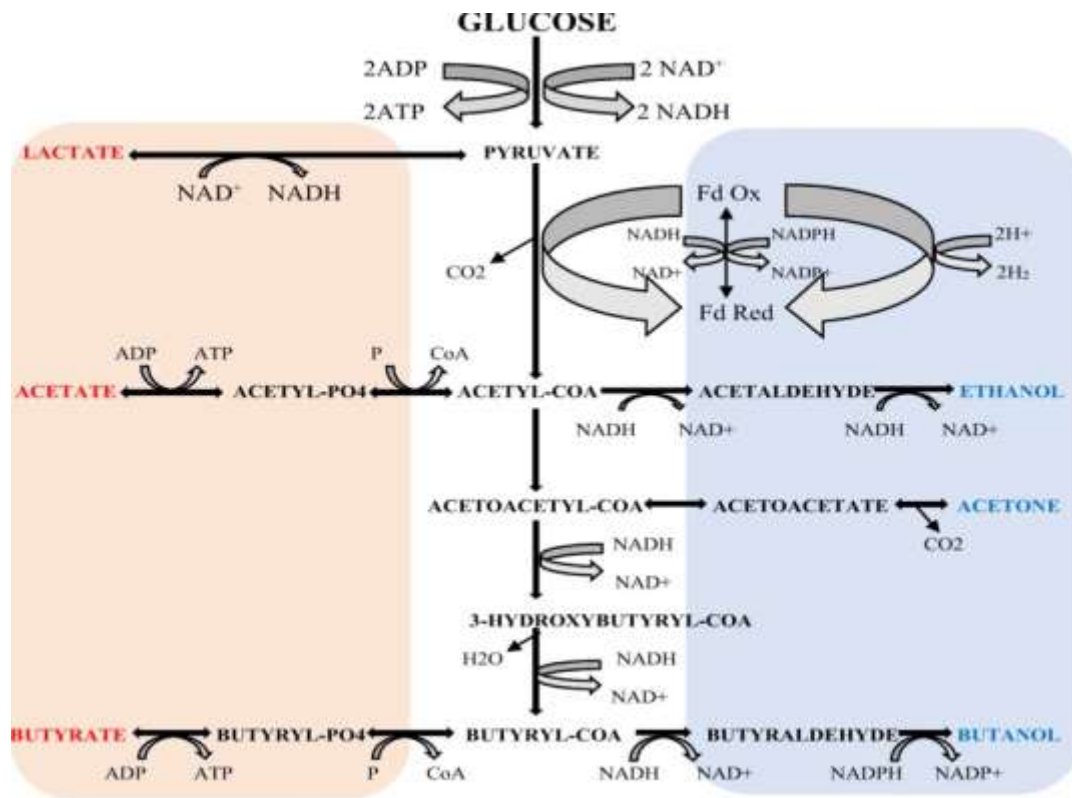


Figure 9: Fermentation acétonobutylique

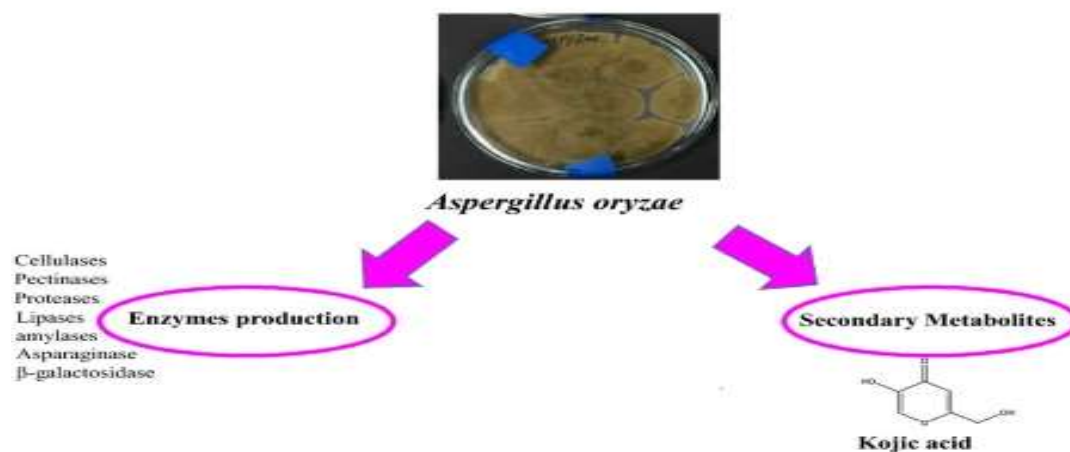
## 5.9. Fermentation kojique

L'acide kojique est un produit métabolique fongique produit par quelques espèces d'*Aspergillus*, en particulier par *A. oryzae*, qui porte le nom commun japonais koji. L'acide kojique a été isolé pour la première fois en 1907 par Saito à partir de mycéliums d'*A. oryzae* cultivés sur du riz cuit à la vapeur. En 1912, Yabuta lui donna le nom d'acide kojique et ce n'est qu'en 1924 qu'il déchiffra la structure correcte de la molécule de cet acide.



## Métabolisme bactérien

L'acide kojique est un inhibiteur de la croissance des bactéries, des champignons et de la multiplication des virus. En raison de ses propriétés antibactériennes, antioxydantes et protectrices de la couleur, l'acide kojique est utilisé dans l'industrie cosmétique et dans l'industrie alimentaire comme précurseur d'exhausteurs de goût (maltol et éthylmaltol), sur les fruits coupés pour éviter le brunissement oxydatif, anti-rassissement des fruits et légumes, ainsi que dans les fruits de mer et les viandes pour préserver les couleurs roses et rouges. L'acide kojique est largement consommé dans l'alimentation japonaise avec la conviction qu'il est bénéfique pour la santé.



**Figure 10** : Certains intérêts d'*Aspergillus oryzae* dans la biotechnologie.

### 5.10. Fermentation gluconique

L'acide gluconique (acide pentahydroxycaproïque,  $C_6H_{12}O_7$ ) est le produit d'oxydation du glucose, présent naturellement dans les plantes, les fruits et autres sources naturelles. La forme physiologique D de l'acide gluconique est généralement formée par l'oxydation microbienne du glucose (Figure 11). L'acide gluconique est produit commercialement à partir d'acides organiques fongiques, à partir de glucose ou saccharose utilisant des souches sélectionnées d'*Aspergillus neiger*. L'acide gluconique est un produit qui présente un grand intérêt pour beaucoup applications, dans divers secteurs industriels ; comme détergent et produits pharmaceutiques (carence en fer et en calcium).

# Métabolisme bactérien

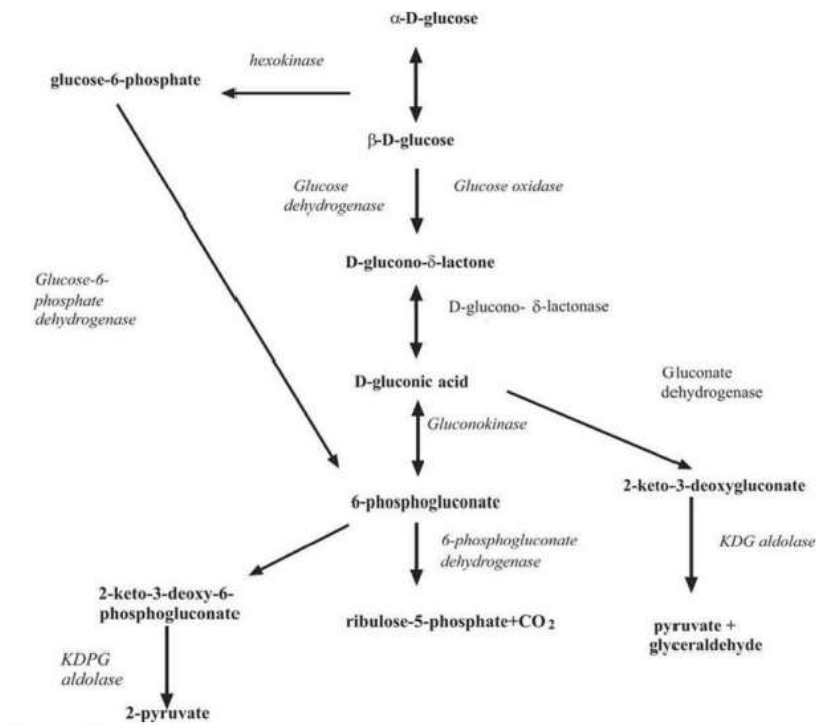


Figure 11: Fermentation gluconique.

## 5.11. Fermentation citrique

L'acide citrique (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) est un constituant des agrumes, tels que l'orange et le citron, qui étaient à une certaine époque la seule source industrielle de cet acide. Cependant, il y a plus d'un siècle, on a découvert que l'acide citrique était un produit du métabolisme de moisissures, et plus particulièrement d'*Aspergillus niger* (le meilleur champignon producteur). En effet, la production d'acide citrique par *Aspergillus niger* est largement utilisée dans l'alimentation, comme additif alimentaire, mais aussi dans la composition des détergents et des cosmétiques

## 5.12. Fermentation oxalique

L'acide oxalique et ses sels sont utilisés comme réactifs dans analyses, comme dans la synthèse de nombreux composés organiques. En raison de son pouvoir réducteur élevé, il est utilisé comme agent de blanchiment. *Aspergillus niger* est capable de produire une quantité assez élevée en acide oxalique utilisant le saccharose comme source de carbone et d'énergie.

# Métabolisme bactérien

## 5.13. Fermentation itonique

La voie métabolique pour la production d'acide itaconique a été étudiée chez *Aspergillus terreus*. L'acide itaconique est produit à partir de l'acide cis-aconitique, un intermédiaire du cycle de l'acide citrique. Le glucose de l'environnement extracellulaire est converti en pyruvate via glycolyse, suivi par décarboxylation oxydative pour générer de l'acétyl-CoA. Dans le mitochondrion, l'acétyl-CoA et oxaloacétate forment l'acide citrique via le citrate synthase. L'acide citrique est déshydraté en acide cis-aconitique, qui est transporté vers le cytosol par un transporteur et converti en acide itaconique par l'acide cis-aconitique décarboxylase (Figure 12). Il est largement utilisé pour la production de polymères. L'acide itaconique présente également une certaine activité antimicrobienne.

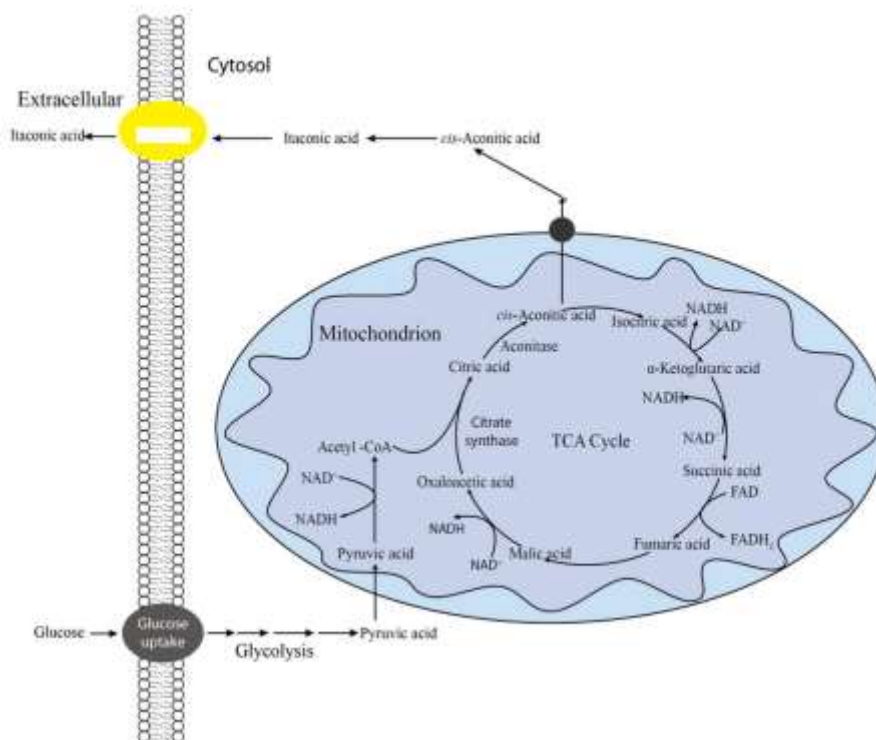


Figure 12: Fermentation itaconique.

## 6. Respiration

### 6.1. Respiration aérobie

### 6.2. Respiration anaérobie

# Métabolisme bactérien

## 7. Photosynthèse

## 8. Métabolisme des acides gras

### 8.1. Biosynthèse des acides gras

Les acides gras sont les précurseurs d'une variété d'éléments constitutifs importants tels que les phospholipides, les sphingolipides, les stérols, en tant que métabolites secondaires et molécules de signalisation, ou ils sont attachés aux protéines.

Étant donné que la dégradation des acides gras produit une grande quantité d'ATP et d'équivalents réducteurs, ils représentent également un composé de stockage approprié pour l'énergie et le carbone. Les acides gras sont stockés sous forme de Triacylglycérol (TAG) ou d'esters de cire, tandis que le stockage des acides gras hydroxylés sous forme de **polyhydroxyalcanoates** est limité aux espèces bactériennes.

Dans un premier temps, le malonyl-CoA est formé par carboxylation de l'acétyl-CoA, aux présences de l'ATP. La coenzyme A est ensuite échangée par la protéine porteuse d'acyle (ACP), ce qui donne du malonyl-ACP. L'ACP empêche la dégradation de la chaîne d'acides gras en croissance et son utilisation pour des réactions anabolisantes. Avec le malonyl-ACP, le premier tour du cycle de biosynthèse des acides gras commence par une condensation initiale du malonyl-ACP avec l'acétyl-CoA, produisant de l'acétoacétyl-ACP et de la coenzyme A libre. Ce dernier est ensuite réduit en 3-hydroxybutyryl-ACP, déshydraté en 2-buténoyl-ACP et encore réduit en butyryl-ACP. Le butyryl-ACP entre à nouveau dans le tour suivant du cycle par condensation avec le malonyl-ACP.

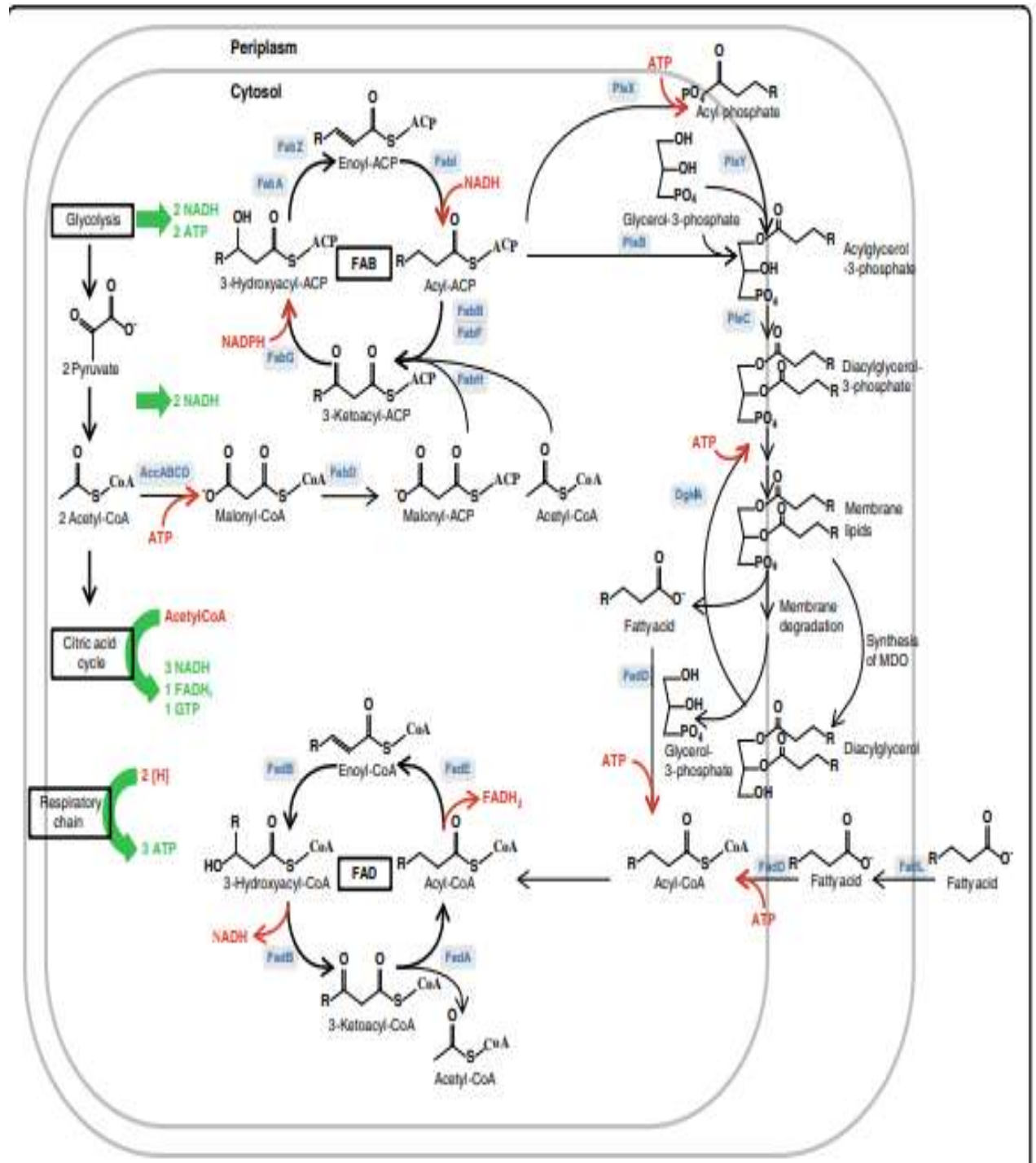
La synthèse des acides gras s'arrête lorsqu'une certaine longueur de chaîne est atteinte et l'acyl-ACP est utilisé pour la synthèse membranaire. Les deux étapes de réduction nécessitent deux équivalents de réduction, dérivés du nicotinamide adénine dinucléotide (NADPH).

### 8.2. Dégradation des acides gras

Pour métaboliser les acides gras, ils doivent être activés en esters d'acylCoA.

## Métabolisme bactérien

l'acyl-CoA formé est consommé via la  $\beta$ -oxydation. La dégradation des composés acyl-CoA se déroule un cycle qui inverse les étapes de la biosynthèse des acides gras, entraînant la libération d'une unité d'acétyl-CoA dans chaque cycle. La  $\beta$ -cétotliase catalyse la dernière étape du cycle dans laquelle de l'acétyl-CoA et un acyl-CoA (réduit de deux atomes de carbone) se forment.



## Métabolisme bactérien

**Figure 19** : La dégradation et le métabolisme des acides gras.

### 9. Biosynthèse des phospholipides

*E. coli* ne possède que trois espèces majeures de phospholipides dans ses membranes, ce qui en fait c'est l'un des organismes les plus simples à étudier en ce qui concerne la biosynthèse des phospholipides. La phosphatidyléthanolamine constitue la majeure partie des phospholipides (75 %), avec le phosphatidylglycérol et la cardiolipine formant le reste (15-20 % et 5 à 10 %, respectivement). Le schéma de synthèse des phospholipides membranaires suit la voie Kennedy classique (Figure). The three major phospholipid species in *E. coli* are synthesized by a total of six different enzymatic activities: (1) phosphatidate cytidyltransferase (Cds); (2) phosphatidylserine synthase (Pss); (3) phosphatidylserine décarboxylase (Psd); (4) phosphatidylglycerolphosphate synthase (PgsA); (5) phosphatidylglycerolphosphate phosphatase (PgpA or PgpB); et (6) cardiolipin synthase (Cls).

La biosynthèse des phospholipides est liée à la glycolyse grâce à l'utilisation du phosphate de dihydroxyacétone (DHAP), formé à partir du glycérol-3-phosphate via sa réduction par le NADH, catalysée par le glycérophosphate déshydrogénase.

## Métabolisme bactérien

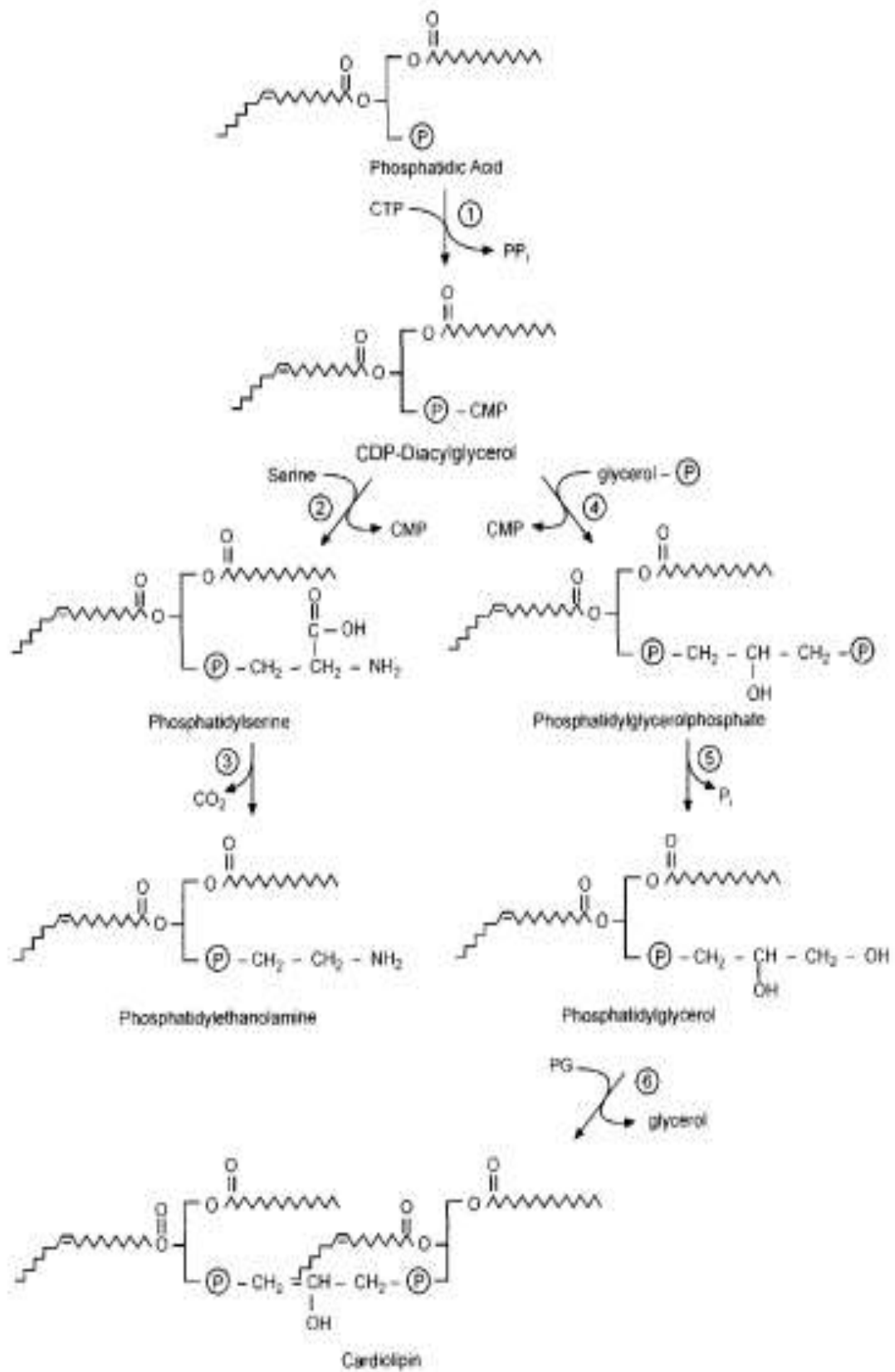


Figure 20. La Synthèse des phospholipides polaires

# **Métabolisme bactérien**

## **10. Métabolisme des protéines**