

Toute croissance nécessite la production d'énergie et les bactéries lactiques ne font pas exception à la règle. Parce qu'elles ne possèdent pas un système respiratoire fonctionnel, elles doivent obtenir leur énergie par phosphorylation au niveau du substrat.

Toutes les bactéries lactiques possèdent un métabolisme fermentaire, leur permettant en utilisant des sucres fermentescibles, de produire principalement de l'acide lactique mais aussi d'autres acides organiques (acide acétique, acide formique). Les sucres peuvent être des monosaccharides tels que les hexoses (glucose, galactose), des pentoses (xylose, ribose, arabinose), des sucres alcools (mannitol, sorbitol, xylitol) ou des disaccharides (lactose, saccharose, cellobiose, maltose, tréhalose).

Métabolisme des sucres :

La fermentation des sucres s'effectue essentiellement en trois étapes :

1/Le transport du sucre à travers la membrane cellulaire.

2/ Le catabolisme intracellulaire du sucre.

3/La formation et expulsion extracellulaire des métabolites terminaux.

Le catabolisme des sucres fournit l'énergie nécessaire à l'anabolisme sous forme d'ATP et génèrent des coenzymes réduits sous forme de NADH essentiellement. Deux systèmes de transport actifs des sucres sont présents chez les bactéries lactiques : le système phosphotransférase phosphoénolpyruvate dépendant (PTS), qui couple le transport et la phosphorylation du glucide et le système perméase énergie dépendant, qui fait pénétrer les glucides sous forme de sucres libres. Selon le genre ou l'espèce, les bactéries lactiques utilisent principalement l'une des deux voies majeures du métabolisme des sucres, il s'agit des voies homofermentaires Embden-MeyerhofParnas (EMP) et hétérofermentaire (voie des pentoses-phosphates).

Voie homofermentaire (EMP) ou la glycolyse :

Les bactéries lactiques homofermentaires comprennent les espèces de Lactocoques, Pédicoques, ainsi que certains Lactobacilles.

Les bactéries appartenant aux genres *Streptococcus* et certaines espèces de *Lactobacillus* comme *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus caucasicus*, *Lactobacillus lactis* et *Lactobacillus plantarum* et par *Thermobacterium yoghurti*.

Cette voie conduit dans des conditions optimales de croissance à la production de deux molécules de lactate et deux molécules d'ATP par molécules de glucose consommée.

Des sucres autres que le glucose peuvent également être fermentés via cette voie : monosaccharides, disaccharides, hexitols.

Ces microorganismes présentent un métabolisme de type homolactique lorsque le lactate représente plus de 90% des produits de fermentation. Dans certaines conditions de croissance (certains sucres, limitation carbone ...etc.), le métabolisme de ces bactéries se diversifie vers un métabolisme mixte avec production en plus du lactate, de formiate, de CO₂, d'acétate et d'éthanol.

Toutes les bactéries lactiques à l'exception des genres : *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Weissella* et certaines espèces du genre *Lactobacillus*, entravent la voie de la glycolyse pour dégrader les hexoses (ex : glucose). La fructose-1,6-biphosphate aldolase (FBA), est une enzyme clé présente chez toutes les espèces homofermentaires et indispensable au fonctionnement de la voie EMP.

Après son transfert vers la cellule, le glucose subit une phosphorylation pour se transformer en fructose qui est à son tour phosphorylé en fructose 1-6 biphosphate (FBP) puis clivé en dihydroxyacétone phosphate (DHAP) et 3-glycéraldéhyde phosphate (3GPA). Ces deux derniers sont convertis en pyruvate. Le pyruvate est dans une dernière étape réduit en acide lactique qui est le produit unique : c'est la fermentation homolactique.

Voie hétérofermentaire : Les bactéries lactiques qui fermentent le glucose en produisant, en plus de l'acide lactique (moins de 1.8 moles par mole de glucose), de l'acétate, de l'éthanol et du CO₂ sont dites hétérofermentaires.

La voie hétérofermentaire, communément appelée voie des pentoses phosphate (transcétolases) se produit chez les espèces appartenant à *Lactobacillus*, telles que *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus fermenti* et chez *Leuconostoc*, telles que *Leuconostoc mesenteroides* et *Leuconostoc pentosaceus*. Ces bactéries dégradent les hexoses avec formation quasi stœchiométrique d'une molécule d'acide lactique, d'une molécule de CO₂ et d'une molécule d'éthanol. Les sucres à cinq atomes de carbone ou pentoses, peuvent parfois être fermentés et donnent alors une molécule d'éthanol et une molécule d'acide lactique. Outre ces produits, qui représentent plus de 80% des métabolites obtenus, on obtient également de l'acide acétique et du glycérol.

La voie bifide

Il existe aussi une voie de fermentation particulière au genre *Bifidobacterium* appelée voie bifide. Le bilan net de cette voie bifide est 1,0 mole de lactate, 1,5 mole d'acétate et 2,5 moles d'ATP par mole d'hexose, ce qui est légèrement supérieur au rendement de la glycolyse en terme énergétique.

Métabolisme du citrate :

L'acide lactique est utilisé par nombreuses espèces des genres *Streptococcus* (*Streptococcus thermophilus*), *Lactococcus* (*Lc. Lactis*), *Enterococcus* (*Ec. faecium*), *Pediococcus*, *Leuconostoc* (*Ln. Lactis*, *Ln. cremoris*) et *Lactobacillus* (*Lb. plantarum*, *Lb. casei*). Cependant il ne peut être dégradé qu'en présence d'un substrat fermentescible et d'une source d'azote.

Le citrate est transporté à l'intérieur de la cellule grâce à un citrate perméase, puis scindé en acétate et oxaloacétate grâce à une citrate lyase. L'oxaloacétate est décarboxylé par la suite en pyruvate. Le flux du pyruvate provenant du métabolisme est principalement transformé en lactate via la lactate déshydrogénase afin de réoxyder le NADH + H⁺ produit lors du catabolisme du glucose. (voir planche).

Co-métabolisme citrate-sucre :

Les alcools sont toxiques et ne sont pas appréciés dans les produits alimentaires, ils sont détournés pour la production d'autres molécules. (voir planche).

Les bactériocines :

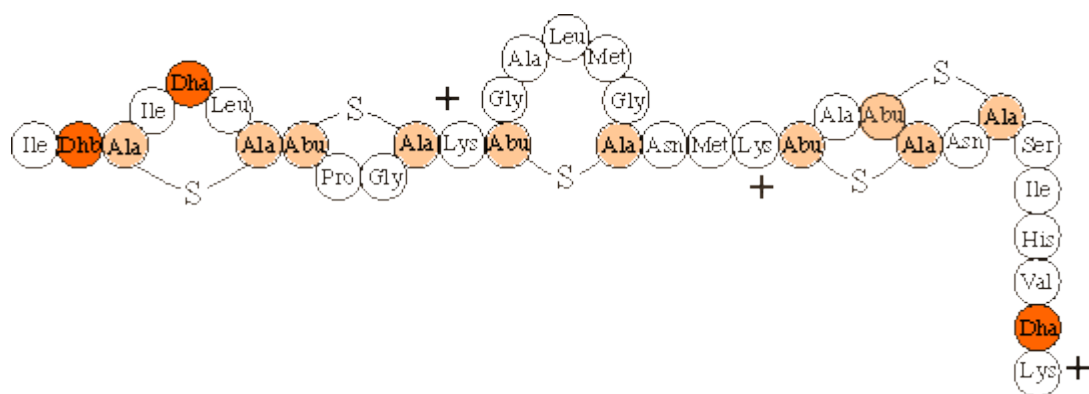
Les bactériocines sont des molécules de nature protéique synthétisées par voie ribosomique, elles peuvent subir ou non des modifications post-traductionnelles avant d'être excrétées dans le milieu extracellulaire. Elles sont douées d'une activité antimicrobienne envers des espèces microbiennes phylogénétiquement proches de l'espèce productrice.

Les bactéries lactiques sont capables de synthétiser des bactériocines actives non seulement contre d'autres bactéries lactiques, mais également contre d'autres bactéries Gram positif, et selon certains, contre certaines bactéries Gram négatif, parmi lesquelles on rencontre des entérobactéries et des germes pathogènes.

Classification des bactériocines :

Les bactériocines produites par les bactéries lactiques sont classées en quatre classes qui se distinguent les unes des autres par leur structure chimique, par leur poids moléculaire, leurs propriétés biochimiques (dont la stabilité thermique) et leur spectre et mode d'action.

Classe	Caractéristiques
Classe I Les Lantibiotiques	<ul style="list-style-type: none"> -De nature peptidique, constituée de plusieurs acides aminés dont certains sont inhabituels : Dha : Déshydroalanine, Dhb: Déshydrobutyryne , Abu: 2-amino-butyrate. -Molécules de petit poids moléculaires inférieur à 5kDa, thermostable -Site d'action : la membrane cytoplasmique ou la paroi. -il existe 2 sous classes : Ia et Ib Exemple : la nizine est constituée de 34 acides aminés, peptide non linéaire contenant 5 boucles (cycles thioesters).
Classe II	<ul style="list-style-type: none"> -petits peptides de taille inférieure à 10 kDa, thermostable. -Site d'action : la membrane cytoplasmique en formant des pores. -Il existe 4 sous classes : Ila ,Ilb ,Ilc,Ild. -Exemple : Leucocine A, Lactacine f, Lactocine A
Classe III	<ul style="list-style-type: none"> -Molécules protéiquesun peu plus grandes, de poids moléculaire supérieur à 30 kDa. -Thermosensibles. -Site d'action : le peptidoglycane ;Ex :Enterolysine A .
Classe IV	<ul style="list-style-type: none"> -De nature protéique, contenant une partie carbohydratee ou lipidique leurs permettant d'avoir une activité bactérienne élevée. -Ces bactériocines sont en cours d'étude.(n'étant pas encore élucidées).



Séquence protéique et structure d'un Lantibiotique sous classe Ia : la nizine

A ce jour, l'application des bactériocines dans le secteur agroalimentaire pour la conservation des aliments :

- les bactériocines peuvent être ajoutées directement à l'aliment.
- les bactéries productrices peuvent être ajoutées à l'aliment où elles produiront la bactériocine (cultures starter ou protectrices).
- la bactériocine peut être incorporée dans l'emballage alimentaire pour, par la suite, une libération de la molécule au contact de l'aliment.

Les bactériocines peuvent être utilisées sous différentes formes : forme purifiée, semi-purifiée ou sous forme d'un concentré obtenu après fermentation d'un produit alimentaire. Les bactériocines purifiées ou semi-purifiées après production en fermenteur sont considérées comme des additifs alimentaires. Malgré le nombre important de bactériocines identifiées à ce jour, la nisine est actuellement la seule ayant reçu l'autorisation de nombreux pays pour son utilisation comme additif alimentaire (E234). Commercialisée depuis 1953, elle est utilisée depuis plusieurs décennies pour préserver la qualité sanitaire de divers types d'aliments.

Ce antibiotique possède un large spectre d'action contre divers microorganismes pathogènes à Gram positif tels que *Listeria sp.*, *Clostridia sp.*, *Staphylococcus sp.*, ... En effet, les bactériocines ne peuvent être intégrées dans la composition d'un aliment que si elles possèdent l'approbation des autorités sanitaires.

D'autres utilisations :

- En clinique : contre le *S. aureus* (MRSA), les Streptocoques pyogènes et *L. monocytogenes*.
- Aussi en cosmétique (crèmes et solutions) et en vétérinaire.

NB : certaines bactériocines en plus de leur activité antibactérienne, présentent des activités antivirales, antiparasitaires et antifongiques, anti-inflammatoires et anti-tumoraux.