

3.3.1. Fermentation alcoolique

Il s'agit d'une fermentation très répandue chez les levures (*Saccharomyces*, *Kluyveromyces*, *Brettanomyces*,...). Par contre, les bactéries capables de réaliser la fermentation alcoolique sont peu nombreuses (*Zymomonas mobilis*). Cette fermentation intervient dans la fabrication de nombreuses boissons.

La glycolyse constitue la première grande étape de la fermentation alcoolique des levures. Dans le cas de *Zymomonas mobilis*, la dégradation du glucose se fait par la voie d'Entner-Doudoroff. Les deux voies aboutissent à la formation d'acide pyruvique. Au cours de la fermentation alcoolique, l'acide pyruvique est décarboxylé en acétaldéhyde et en CO₂. La réduction de l'acétaldéhyde engendre la formation d'éthanol. D'autres substances peuvent être produites en faibles quantités (glycérol et acide acétique en particulier). La conversion d'une molécule de glucose en éthanol, par les levures, se traduit par la synthèse de 2 molécules d'ATP.

En anaérobiose, les levures ne transforment pas tout le glucose en éthanol et en gaz carbonique ; de petites quantités de pyruvate et de NADH₂ sont utilisées pour assurer la maintenance cellulaire. La réoxydation du NADH₂ est indispensable pour que la fermentation alcoolique s'accomplisse.

Théoriquement, la fermentation alcoolique devrait permettre d'obtenir une quantité d'éthanol équivalente à 51,1 % du glucose catabolisé. L'éthanol et le gaz carbonique n'étaient pas les seuls produits formés : outre le glycérol, on trouve aussi des acides organiques (acide succinique, acide acétique...), des alcools supérieurs, des aldéhydes, des cétones. L'ensemble de ces composés représente environ 2,7 % du sucre fermenté. Ainsi, la quantité d'éthanol produite n'est pas définitive qu'environ 47 à 48 % au maximum, du poids de sucre converti. On s'aperçoit donc que le taux de conversion du sucre en éthanol se situe entre 91 et 95 % du rendement attendu.

Au cours de la fermentation alcoolique, il se forme fréquemment des alcools supérieurs à partir d'acides issus de la désamination d'acides aminés contenus dans le milieu de fermentation (valine → isobutanol, leucine → 3-méthylbutanol, isoleucine → 2-méthylbutanol, phénylalanine → 2-phényléthanol...). Il y a aussi formation d'acides gras, d'esters, d'aldéhydes et de cétones. Tous ces produits concourent à la formation de l'arôme et de la saveur des produits fermentés.

Il faut noter que de nombreux sucres sont fermentescibles en éthanol par la levure :

- Les souches de brasserie et de distillerie (*Saccharomyces cerevisiae*, *S. carlbergensis*...) fermentent saccharose, fructose, glucose, maltose, maltotriose

- *Saccharomyces diastaticus* fermente les dextrines
- *Saccharomyces uvarum* fermente le mélibiose
- *Schwanniomyces* fermente le lactose et l'inuline
- *Candida wickerhamii* et *C. molischianum* fermentent le cellobiose et les cellodextrines.

Par ailleurs, certaines espèces de *Pachysolen*, *Pichia*, *Candida* fermentent le xylose.

3.3.2. Fermentations homolactiques

L'acide lactique est le produit essentiel de ce type de fermentation (> 90% des produits formés), contrairement à la fermentation hétérolactique (entre 25 et 90% d'acide lactique). Cependant, il y a souvent formation d'une petite quantité de glycérol. Par ailleurs, dans des conditions de pH basique, il y a formation de quantités croissantes de formate, acétate et éthanol. L'acide lactique provient de la réduction de l'acide pyruvique catalysée par la lactico-déshydrogénase. Il peut être de forme D (*Bacillus coagulans*, *Bacillus laevolacticus*...), L (*Lactobacillus delbrueckii*, *Phycomycètes*...) ou DL (*Bacillus racemilacticus*).

3.3.3. Fermentation hétérolactique

Parmi les moisissures, *Rhizopus oryzae* constitue un cas particulier. Cultivé en aérobiose il produit de l'acide lactique et du CO₂, alors que dans des conditions anaérobies, il produit un mélange d'acide lactique, d'éthanol et de CO₂. Ces produits sont identiques à ceux obtenus au cours de la fermentation hétérolactique des *Leuconostoc* mais le mécanisme de formation est différent: la dégradation du glucose s'effectue par la voie de glycolyse. En aérobiose, une partie du pyruvate est transformée en acide lactique, l'autre est oxydée. En anaérobiose, une partie du pyruvate est transformée en éthanol et CO₂, l'autre en acide lactique. L'acide lactique formé dans les deux cas est de forme D.

3.3.4. Fermentations acide mixte et butylène-glycolique

La fermentation "acide mixte" est réalisée par des Entérobactéries appartenant aux genres *Escherichia*, *Salmonella*, *Proteus*, *Shigella*, *Yersinia*. On la trouve aussi chez les *Vibrio*, certains *Aeromonas*... Elle est caractérisée par la production d'éthanol et de plusieurs acides organiques: acides lactique, acétique, succinique et formique. Certaines espèces (*Escherichia coli*, *Proteus*, certaines *Salmonella*) possèdent l'hydrogène lyase formique et décomposent immédiatement l'acide formique en H₂ et CO₂ à pH neutre ou acide: $\text{HCOOH} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$ La fermentation butylène-glycolique est réalisée par les membres des genres *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia* (Entérobactéries), mais aussi par certains *Aeromonas* et *Bacillus*. On retrouve la production des produits précédemment cités pour la fermentation acide mixte.

Il y a en outre formation de 2,3-butanediol (ou 2,3-butylène glycol), qui est avec l'éthanol, la substance la plus abondante. A pH neutre ou alcalin, le pourcentage des produits acides augmente. Chez les *Bacillus*, il y a très peu d'acide formique formé et les protons utilisés par les autres espèces pour sa formation sont ici utilisés pour produire du glycérol aux dépens de l'éthanol dont la production est très faible.

3.3.5. Fermentations butyriques et acétono-butyliques

Certains microorganismes comme les *Clostridium*, les *Butyribacterium*, certaines *Neisseria* et *Zymosarcina* produisent de l'acide butyrique, de l'acide acétique, du CO₂ et de l'hydrogène. L'acide butyrique est formé à partir de l'acétyl-CoA via diverses réactions, tandis que chez les *Clostridium*, la décarboxylation du pyruvate suit une voie spécifique. En particulier, *Clostridium butyricum* peut produire de l'acide acétique, de l'acide butyrique, du CO₂ et de l'hydrogène à partir du glucose. Certains *Clostridium* peuvent également générer des alcools comme le butanol, l'éthanol et l'isopropanol, ainsi que de l'acétone.

3.3.6. Fermentations propioniques

Diverses bactéries anaérobies, comme *Propionobacterium*, certains *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Neisseria* et *Veillonella*, produisent de l'acide propionique, de l'acide acétique, du CO₂ et parfois de l'acide succinique par fermentation. L'acide propionique peut être formé par réduction du pyruvate ou par décarboxylation de l'acide succinique. Chez *Propionibacterium*, la fermentation du glucose produit de l'acide propionique, de l'acide acétique et du CO₂. Chez *Veillonella*, l'acide propionique se forme par hydratation de l' α -cétoglutarate. Les *Propionibacterium* ont un rôle crucial dans le tube digestif des ruminants et *Propionibacterium shermanii* est impliqué dans la fabrication de fromages à pâte cuite.

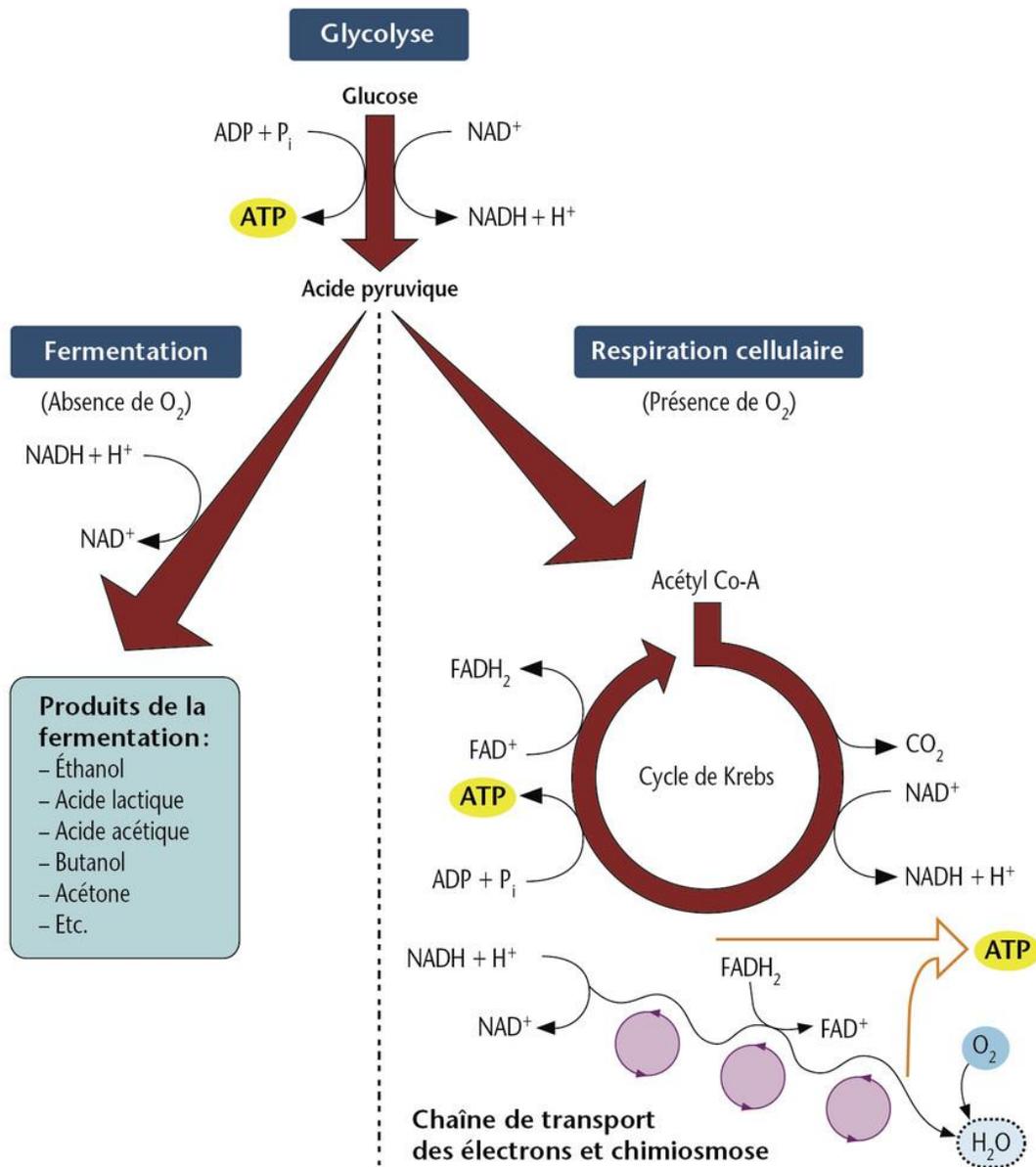


Figure : schéma générale du métabolisme du glucose.