

Chapitre IV Fermentations microbiennes

1- Fermentations liées au métabolisme anaérobie du pyruvate

1-1- Fermentation alcoolique

Il s'agit d'une fermentation très répandue chez les levures (*Saccharomyces cerevisiae*,...). Les bactéries capables de réaliser la fermentation alcoolique sont peu nombreuses. La glycolyse constitue la première grande étape de la fermentation alcoolique des levures. 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**.

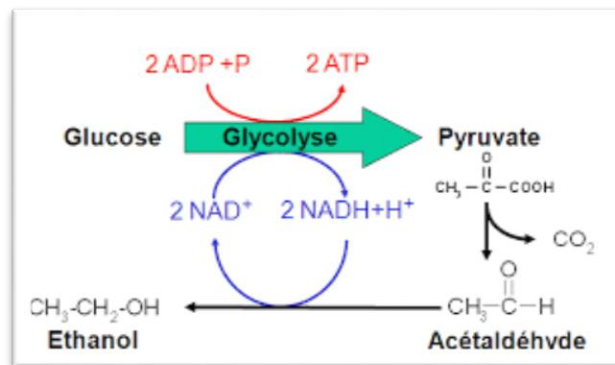


Figure 13 : Fermentation alcoolique

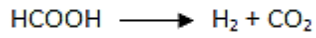
1-2- fermentations homolactiques

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). L'acide lactique provient de la réduction de l'acide pyruvique catalysée par la lactico-déshydrogénase. La fermentation homolactique est effectuée par beaucoup de *Lactobacillus*. L'acide lactique est utilisé comme additif alimentaire. Les fermentations homo- et hétérolactique interviennent également dans la fabrication de nombreux produits alimentaires (fromages, choucroute, salaisons, saumure de légumes...).

1-3- Fermentation acide mixte

La fermentation acide mixte est réalisée par des Entérobactéries appartenant aux genres *Escherichia*, *Salmonella*, *Proteus*, *Shigella*,... 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 :



1.4. Fermentation butylène-glycolique

La fermentation butylène glycolique est réalisée par les membres des genres *Enterobacter*, *Klebsiella*, (entérobactéries), mais aussi par certains *Bacillus*. Elle aboutit à la formation de **2,3-butanediol** (ou 2,3-butylène glycol) et **l'acétoïne**. Le 2,3-butanediol est formé par réduction d'acétoïne, produit issu du pyruvate par l'intermédiaire de l'acétolactate.

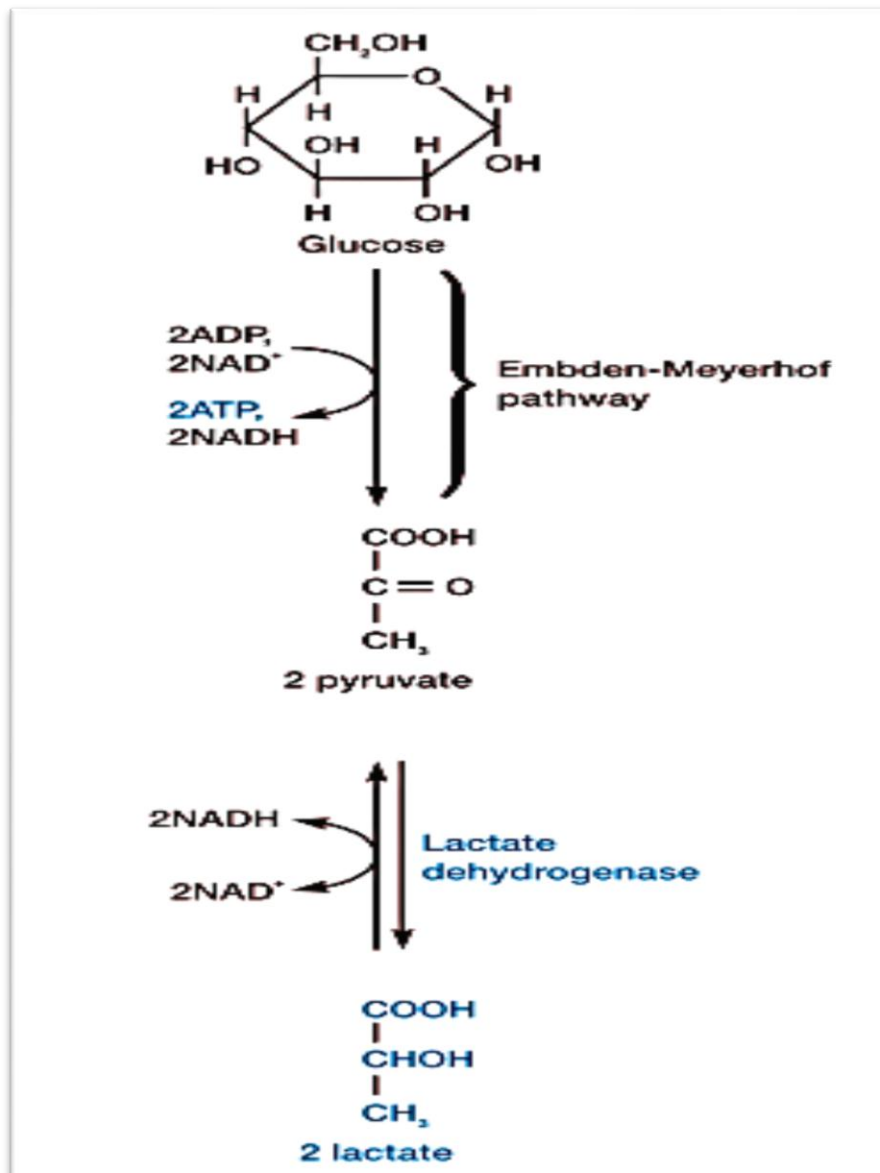


Figure 14 : Fermentation homolactique

1-5- Fermentations butyriques

Certains *Clostridium* (*C. butyricum*, ...), produisent de **l'acide butyrique**, ainsi que de **l'acide acétique** et du **CO₂**. L'acide butyrique est formé par condensation de deux molécules d'acétyl-CoA en acétoacétate, lequel est ensuite réduit en β -hydroxybutyrate puis en butyrate. Une partie de l'acétyl-CoA, formé à partir du pyruvate, conduit à la formation d'ATP et d'acide acétique.

1.6. Fermentation acétono-butyliques

Outre les produits de la fermentation butyrique (**butyrate, acétate, CO₂**), certains *Clostridium* (*C. acetobutylicum*) peuvent donner des **alcools** (butanol, éthanol, isopropanol) et de **l'acétone**.

1.7. Fermentations propioniques

Diverses bactéries (*Propionibacterium*, ...) produisent par **fermentation l'acide propionique, l'acide acétique, CO₂ et l'acide succinique**. L'acide propionique est formé par réduction du pyruvate (l'acide lactique étant l'intermédiaire), mais il peut l'être aussi produit par décarboxylation de l'acide succinique. Les *Propionibacterium* jouent un rôle important dans le tube digestif des ruminants. *Propionibacterium* intervient dans la fabrication des fromages à pâte cuite.

1.8. Fermentations acétique

Les bactéries (*Acetobacter*) produisent par **fermentation acide acétique, l'acide acétique**.

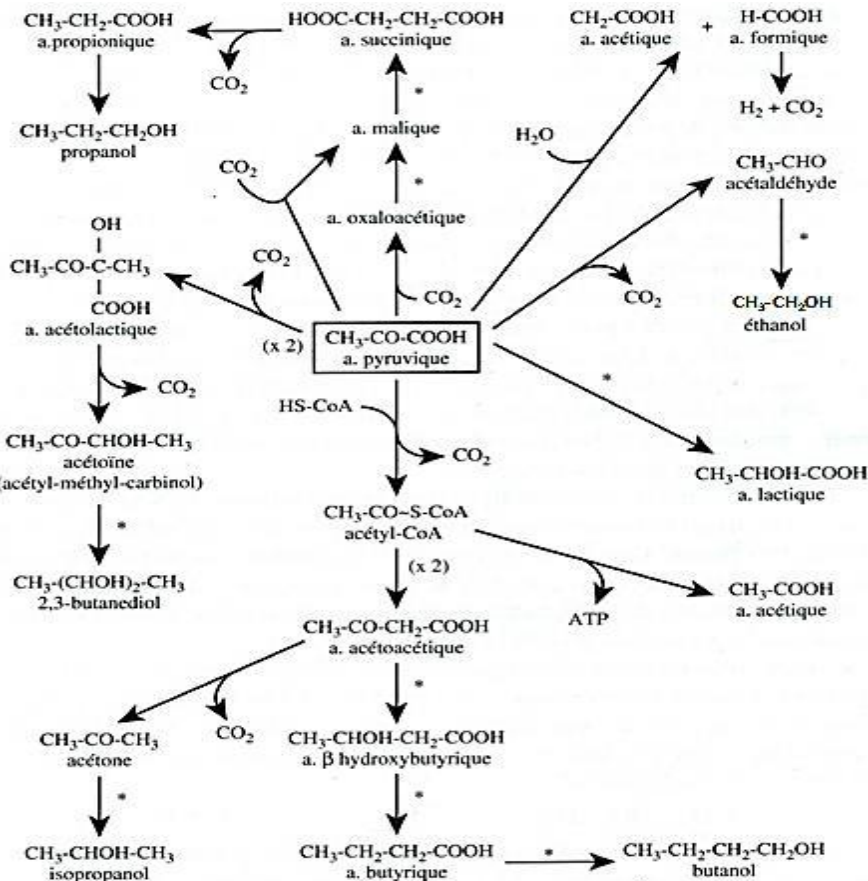


Figure 15 : Principales fermentations microbiennes

2. Fermentations dérivées de la voie de l'hexose monophosphate

2.1. Fermentation hétérolactique

Le métabolisme des bactéries hétérolactique en est un bon exemple « **voie des pentoses- phosphates** ». Elle aboutit, en dehors du lactate, à la formation d'éthanol, de CO₂ et d'acétate. Le plus courant est rencontré chez les *Leuconostoc* et les *Lactobacillus brevis*. La voie de Warburg-Christian conduit au xylose-5P, puis l'enzyme caractéristique, clive ce composé (C5) en acétyl-phosphate (C2) et triose-phosphate (C3).

Une fermentation de type différent se rencontre chez les *Bifidobacterium* (ex. *Lactobacillus bifidus*). Outre l'acide lactique, il se forme de l'acétate.

2.2. Fermentations gluconiques

Une grande variété de microorganismes aérobies stricts, comme les moisissures (*Aspergillus*, *Penicillium*), les *Pseudomonas* oxydent le glucose en gluconate. Le

glucose est transformé en gluconolactone grâce à une oxydation directe par l'oxygène, sous l'action d'un glucose oxydase. La gluconolactone est ensuite hydratée en acide gluconique. Cette fermentation nécessite une aération importante. L'acide gluconique peut être recueilli par précipitation sous forme de gluconate de calcium (utilisé en médecine dans les déficiences calciques). Le glucose oxydase est utilisé pour éliminer le glucose de nombreuses préparations alimentaires.

2.3. Fermentation kojique

Diverses espèces d'*Aspergillus* (groupe *flavus-oryzae*) peuvent produire des quantités importantes d'acide kojique à partir de glucose. Cette biosynthèse s'effectue en aérobiose. L'acide kojique peut être utilisé comme réactif d'identification chimique (fer ferrique), comme précurseur dans la synthèse d'insecticides et comme agent antimicrobien.

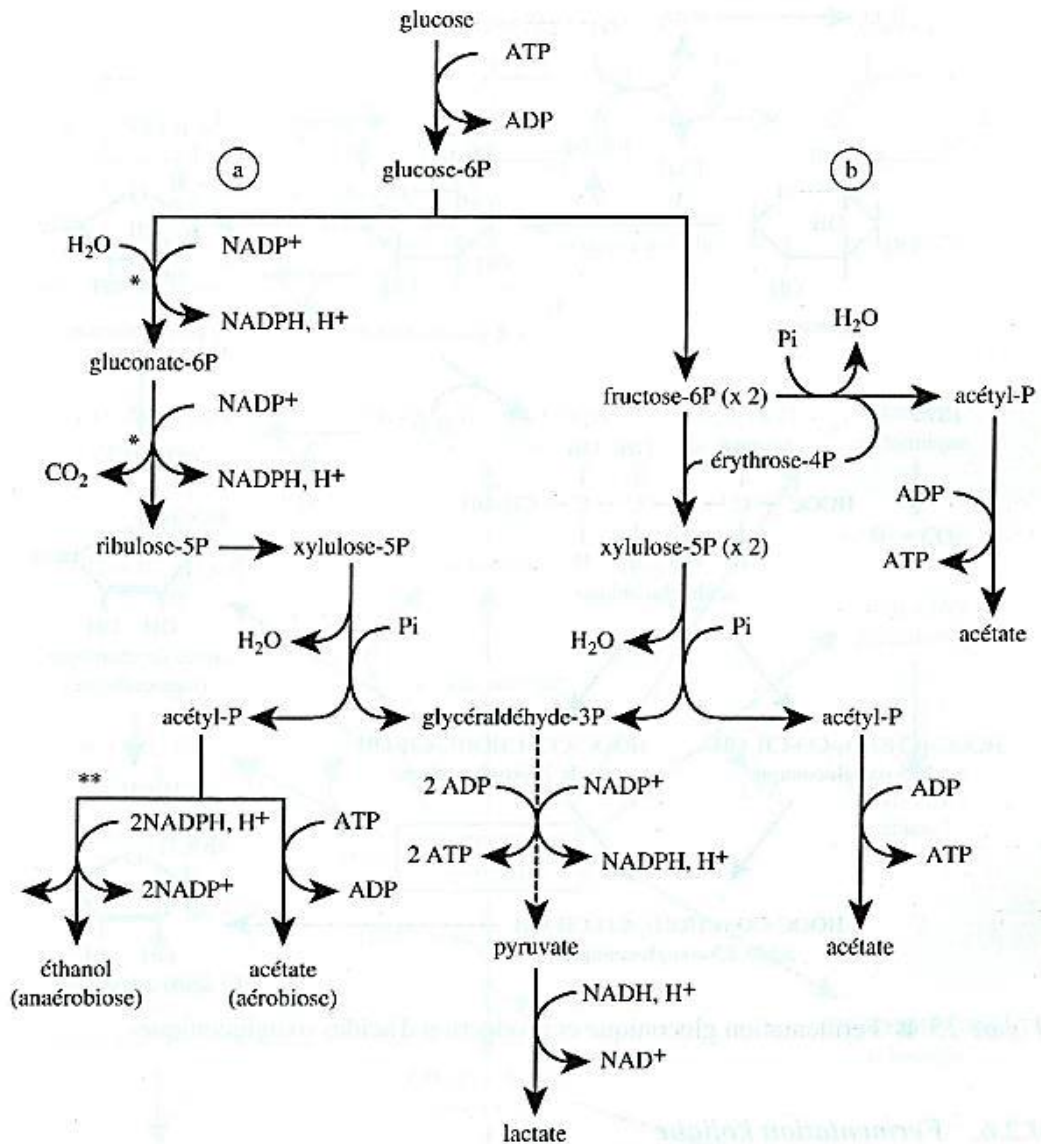


Figure 8 ■ Métabolisme du glucose par fermentation hétérolactique bactérienne
 a) Voie des *Leuconostoc* et lactobacilles hétérofermentaires
 b) Voie des *Bifidobacterium*
 * parfois $\text{NAD}^+/\text{NADH}, \text{H}^+$; ** plusieurs étapes ($\text{acétyl-P} \rightarrow \text{acétyl-CoA} \rightarrow \text{acétaldéhyde} \rightarrow \text{éthanol}$)

Figure 16 : Fermentation hétérolactique

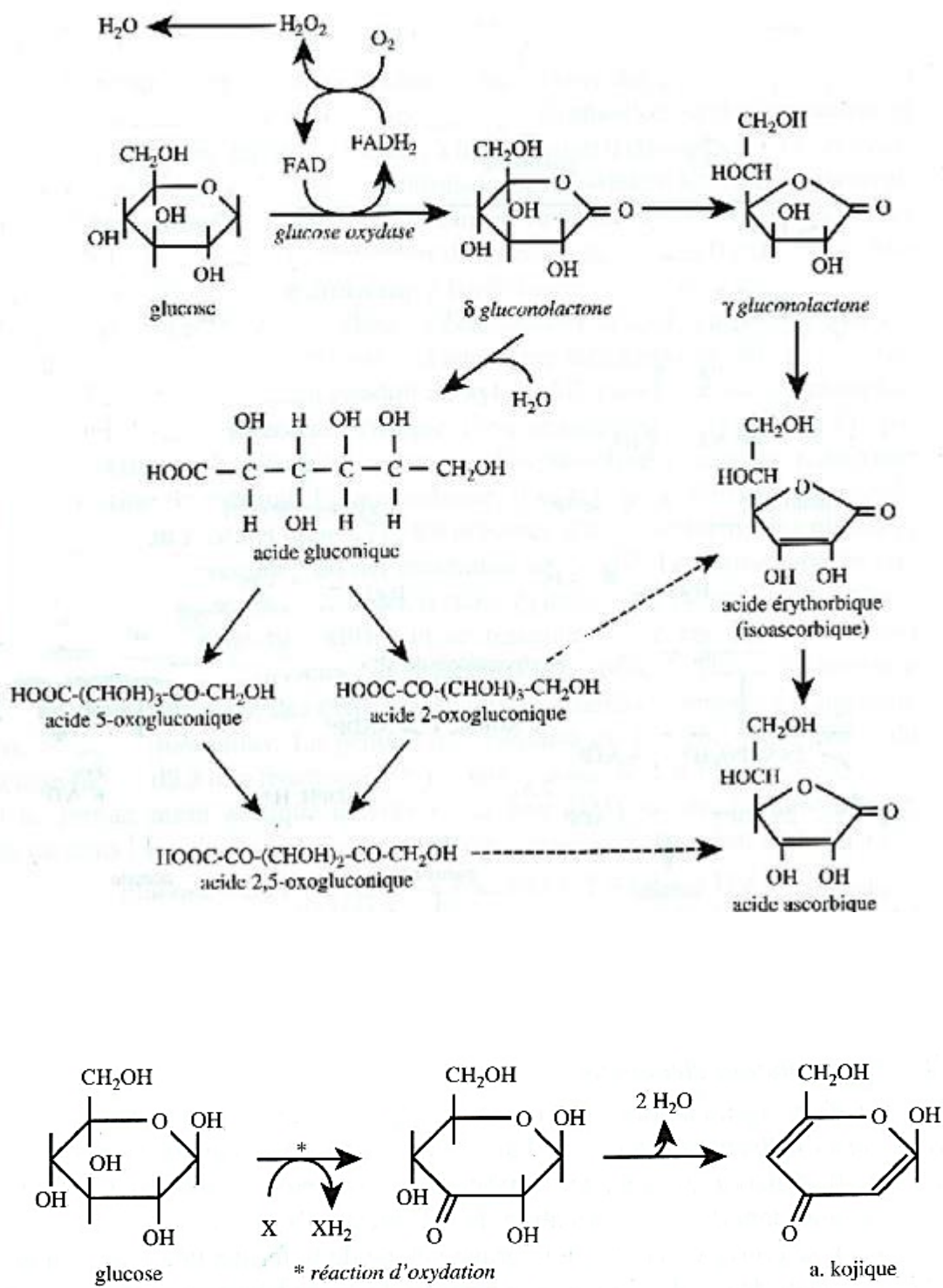


Figure 10 ■ Biosynthèse de l'acide kojique

Figure 17 : Fermentation gluconique et kojique

3. Fermentations dérivées du cycle de Krebs et du shunt glyoxylique

Ce sont des fermentations aérobies essentiellement réalisées par des moisissures. Elles aboutissent à la formation de divers acides organiques (métabolites directement issus du cycle de Krebs ou du shunt glyoxylate ou des produits de leur transformation). Ces acides sont accumulés lorsque le fonctionnement du cycle est interrompu. Cette interruption peut être obtenue par variation des conditions du milieu : pH, présence d'inhibiteurs des enzymes transformant normalement le produit formé. Elle peut être également obtenue par une mutation portant sur les gènes contrôlant ces enzymes.

Les acides organiques obtenus par ces fermentations sont très variés (acide citrique, acide itaconique, acide fumarique, acide oxalique, acide malique, acide succinique,..)

- La production de l'Acide citrique

L'acide citrique est utilisé abondamment dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique comme acidifiant, antioxydant, additif alimentaire, qui permet de diminuer très rapidement le pH à des valeurs empêchant un développement microbien. En pharmacie, il est combiné sous forme citrate de fer ou de calcium, qui est utilisé comme agent conservateur ou anticoagulant du sang. Il est produit par des souches *d'Aspergillus niger* ou *d'Aspergillus wentii*. L'accumulation de citrate est obtenue à l'aide de **mutants** ou par des **modifications de milieu** (carence en phosphate, équilibre en sels minéraux). Le **fer** est inhibiteur alors que le **Cuivre** active la production. Pendant la fermentation, l'**aconitase** disparaît alors que l'**isocitrate lyase** et l'**isocitrate déshydrogénase** sont **inhibées**

- La production de l'acide oxalique

L'acide oxalique est utilisé comme agent de blanchiment des textiles, du cuir, du bois et papier, fabrication des encres et colorants, produit détartrant Il est produit par divers souches fongiques, particulièrement des souches *d'Aspergillus niger*.

- La production de l'Acide fumarique

Cet acide, utilisé dans l'industrie alimentaire comme additif alimentaire et surtout dans l'industrie des résines, est produit par de nombreuses souches d'*Aspergillus* et de *Rhizopus* . .

- Production de l'acide itaconique

Cet acide peut être produit par des souches d'aspergillus (*A.itaconucus*, *A. terreus*). Il provient de la décarboxylation de l'acide cis-aconitique. Cette réaction est catalysée par la **cis aconitate décarboxylase**. L'acide itaconique est utilisé dans l'industrie des peintures et des matières plastiques.

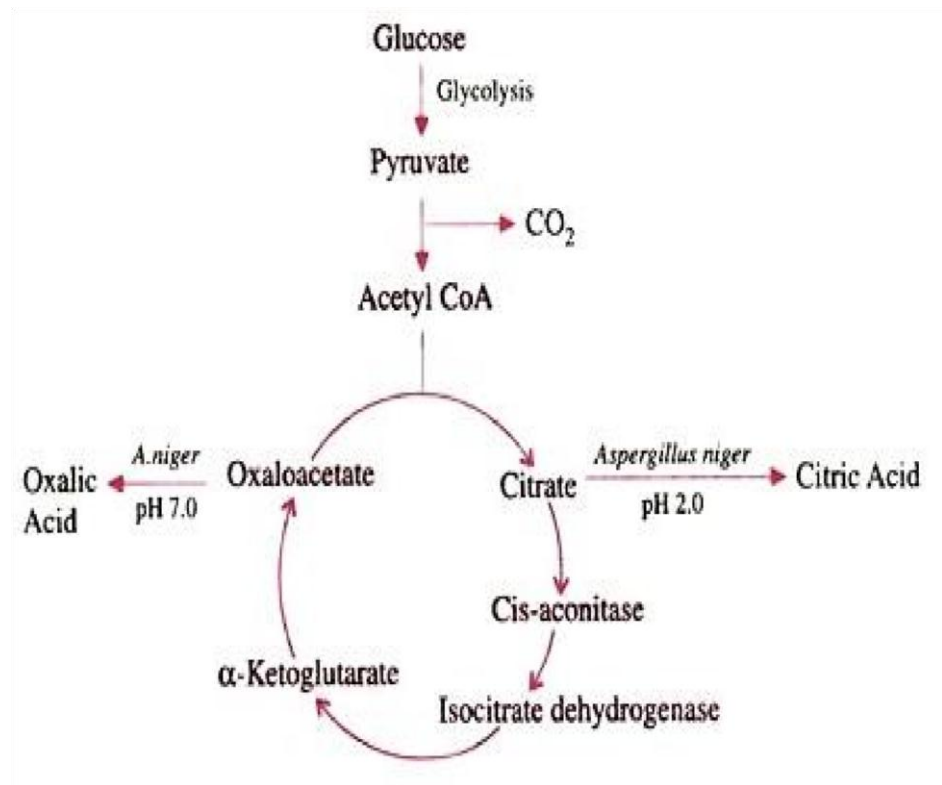


Figure 18 : la voie biochimique de l'acide oxalique et l'acide citrique