

Origine de l'énergie (ATP) nécessaire à la contraction de la cellule musculaire

Introduction :

Le fonctionnement des cellules nécessite des réactions chimiques productrices d'énergie. Les cellules musculaires, par exemple, ont besoin d'énergie pour se contracter. Cette énergie indispensable leur est procurée par l'ATP (Adénosine triphosphate), un nucléotide. Cependant, cette molécule a une durée de vie courte et doit être renouvelée en continu.

D'où provient l'ATP utilisée par les cellules comme source principale d'énergie ?

Dans un premier temps, nous étudierons la respiration cellulaire, puis les fermentations, qui sont différents métabolismes permettant la synthèse d'ATP. Nous verrons ensuite différents moyens d'améliorer la production d'ATP, mais aussi les risques qu'ils recouvrent.

1 | La respiration cellulaire

a. La respiration, un moyen de former de l'ATP

Il est possible, pour certaines cellules, d'utiliser des molécules organiques ainsi que du dioxygène (O_2) pour former de l'ATP. Ce métabolisme s'appelle la **respiration**.



La plupart des **cellules eucaryotes** respirent lorsqu'elles se trouvent en présence de dioxygène. On parle de milieu aérobie (milieu riche en O_2).

Lors de la respiration, il y a **oxydation** d'un substrat organique grâce au dioxygène, couplé à la réduction du composé NAD^+ en composé

NADH, H^+ . Cet ensemble de réactions :

- dégage du dioxyde de carbone ;
- et produit de l'ATP.

Le substrat organique employé est le pyruvate, issu de la transformation du glucose par une série de réactions chimiques appelée glycolyse.



Définition

Pyruvate :

Le pyruvate est une molécule impliquée dans les métabolismes cellulaires. Il est le produit final de la glycolyse.

Le pyruvate est ensuite utilisable pour former de l'ATP lors de processus complexes regroupés sous le nom de cycle de Krebs.

Dans un même temps, en parallèle et en lien avec ce cycle, le dioxygène est utilisé dans une **chaîne respiratoire** qui va également permettre une importante synthèse d'ATP grâce à des réactions d'oxydo-réduction (réoxydation des composés **NADH** et **FADH₂** en **NAD⁺** et **FAD**).



À retenir

- Lors de la respiration, il y a oxydation d'un substrat organique grâce au dioxygène.
- Cet ensemble de réactions dégage du dioxyde de carbone et produit de l'ATP.

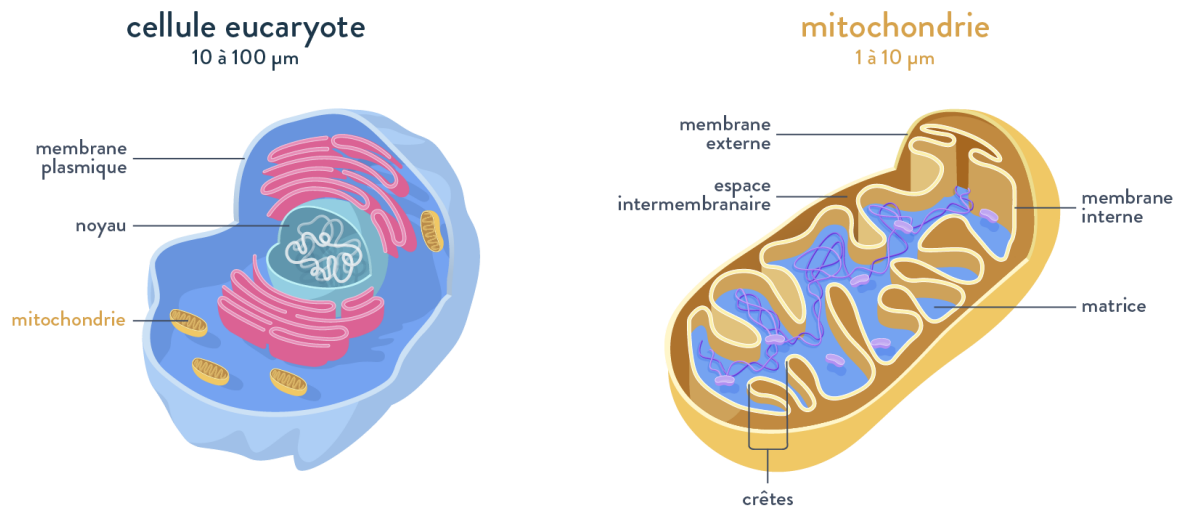


b. La mitochondrie, siège de la respiration

Parmi les différents organites présents dans une cellule, c'est la mitochondrie qui est le siège de la respiration.

La **mitochondrie** est un organite présentant deux membranes (membrane interne et membrane externe) entre lesquelles se trouve l'espace intermembranaire. La membrane interne est formée de nombreuses

crêtes et contient la matrice. Les invaginations de la membrane interne permettent d'augmenter la surface d'échange.



 À retenir

- La mitochondrie est le siège de la respiration.
- La chaîne respiratoire a lieu au niveau de la membrane interne de la mitochondrie.
- Le cycle de Krebs a lieu dans la matrice de la mitochondrie.

c. La glycolyse et le cycle de Krebs

Nous allons à présent présenter la transformation du glucose en pyruvate, la glycolyse ; puis le cycle de Krebs. Il s'agit des deux premières étapes de la respiration, produisant toutes deux de l'énergie sous forme d'ATP.

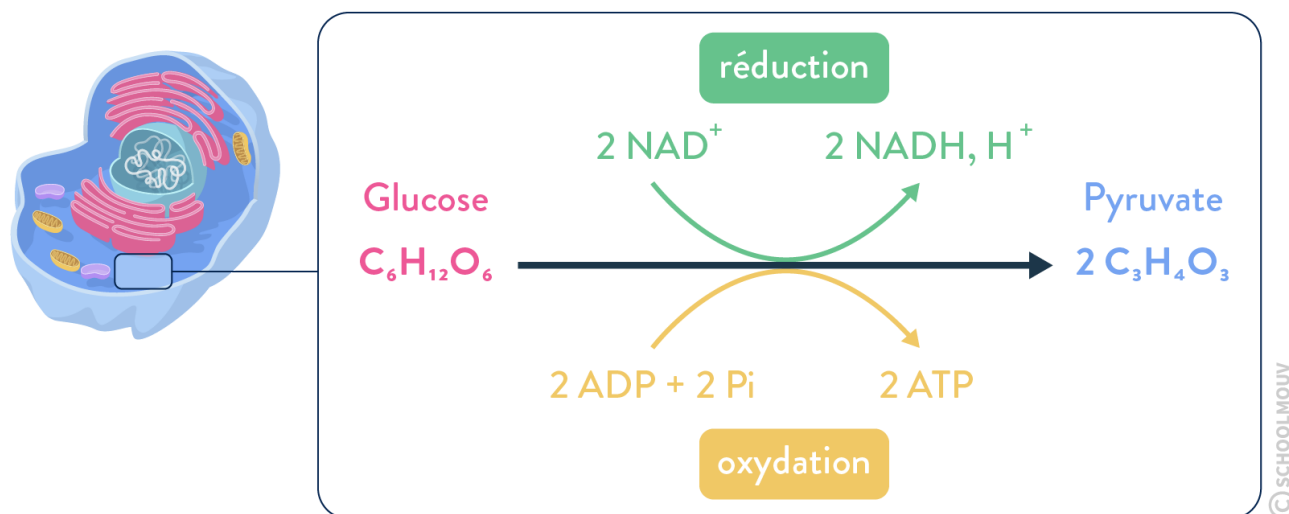
La glycolyse

Le substrat organique utilisé pour le cycle de Krebs n'est pas le glucose mais le pyruvate. Dans un premier temps, le glucose va donc être oxydé en pyruvate dans le cytosol (ou hyaloplasme) de la cellule.

→ On parle de **glycolyse**.

Cette réaction est couplée à celle de la réduction des composés NAD^+ en composés NADH , H^+ qui seront ensuite réemployés dans la chaîne respiratoire.

Deux molécules d'ATP et deux molécules de pyruvate sont alors produites à partir d'une molécule de glucose et de deux molécules d'ADP + Pi (phosphate inorganique).



 À retenir

- La glycolyse se déroule dans le cytosol (partie liquide du cytoplasme) de la cellule.
- Deux molécules d'ATP et deux molécules de pyruvate sont produites à partir d'une molécule de glucose et de deux molécules d'ADP + Pi.
- L'oxydation du glucose en pyruvate a nécessité la réduction de composés chimiques NAD^+ en NADH , H^+ .

Le cycle de Krebs

Différentes **réactions exothermiques** vont ensuite avoir lieu dans la matrice mitochondriale pour convertir du pyruvate et du dioxygène en dioxyde de carbone et ATP.

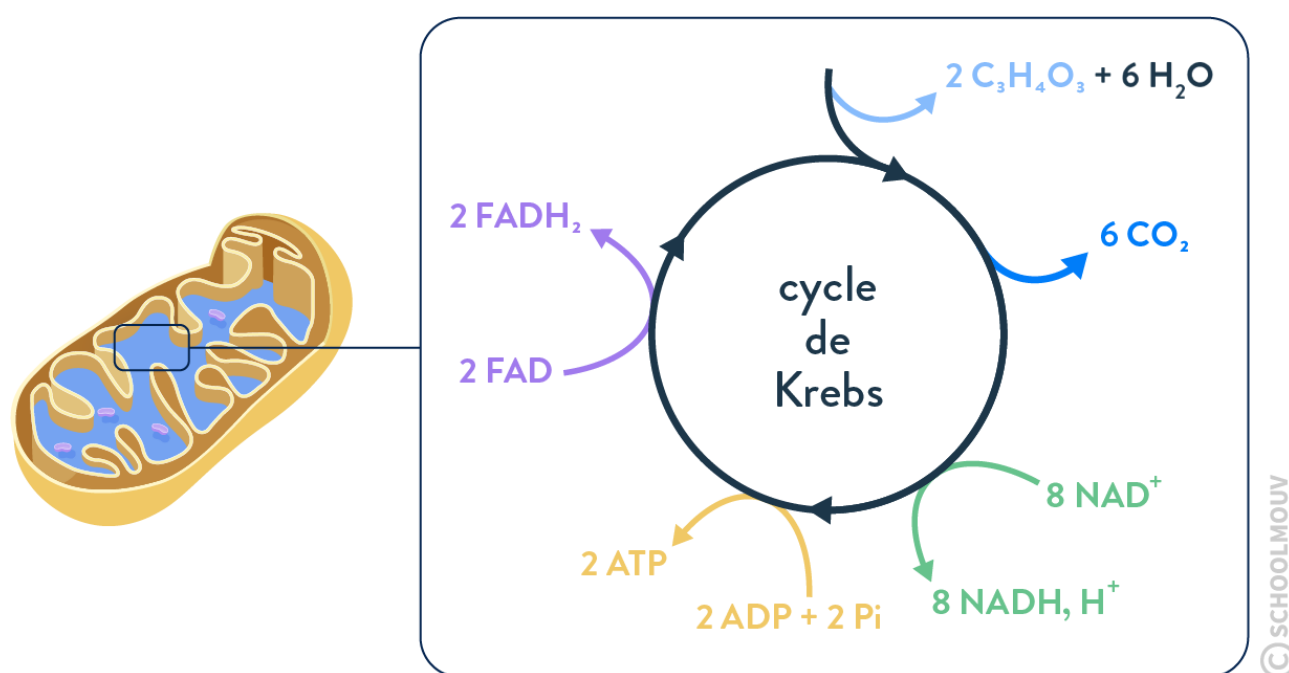
→ C'est ce que l'on appelle le **cycle de Krebs**.

 Rappel

- Une réaction est exothermique lorsqu'elle cède de l'énergie calorifique au milieu. Il y a donc dégagement de chaleur dans le milieu.
- Une réaction est endothermique lorsqu'elle prend de l'énergie calorifique au milieu. Il y a donc une perte de chaleur pour le milieu.

L'**oxydation du carbone** s'achève par la **transformation du pyruvate en dioxyde de carbone**. En parallèle, les composés NAD^+ sont **réduits en composés NADH , H^+** .

→ Ce cycle permet la formation de molécules d'ATP.



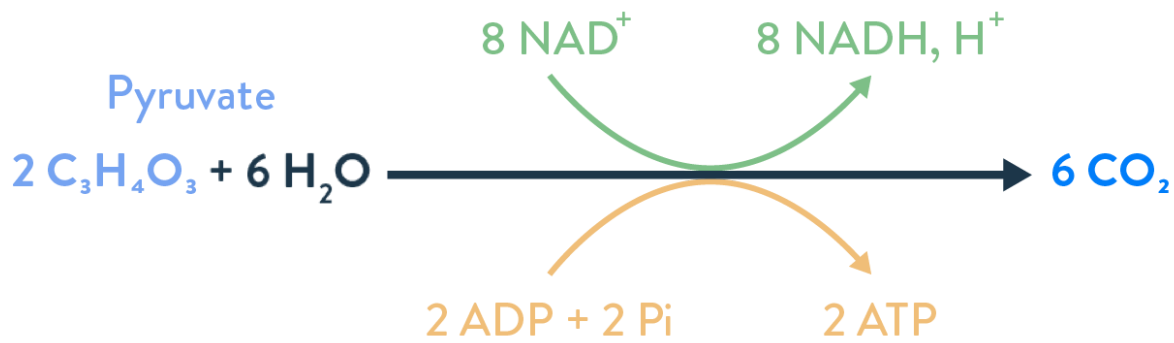
On appelle aussi le cycle de Krebs : le « cycle de l'acide citrique ».

On obtient donc **2** molécules d'ATP, **6** molécules de dioxyde de carbone, **8** composés réduits de NADH , H^+ et **2** de FADH_2 à partir de **6** molécules d'eau et **2** molécules de pyruvate.



- Le cycle de Krebs a lieu dans la matrice mitochondriale.

- Lors du cycle de Krebs, les deux molécules de pyruvate formées lors de la glycolyse permettent la formation de deux molécules d'ATP.



© SCHOOLMOUV

d. La chaîne respiratoire

Les nombreux composés NADH et FADH_2 doivent maintenant être réoxydés en NAD^+ et FAD .

→ C'est le rôle de la **chaîne respiratoire** et du dioxygène.



Définition

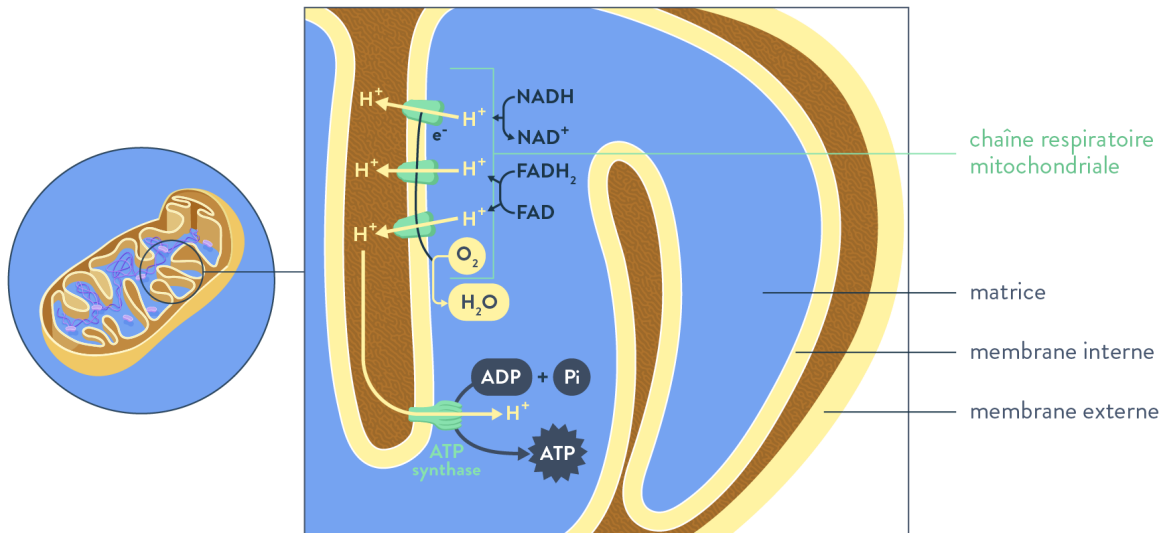
Chaîne respiratoire :

La chaîne respiratoire est un ensemble de réactions d'oxydo-réduction. Celles-ci entraînent le passage de protons H^+ de part et d'autre de la membrane interne de la mitochondrie.

Les composés NADH et FADH_2 vont être réoxydés en NAD^+ et FAD grâce à la chaîne respiratoire, et les protons libérés (H^+) vont alimenter une pompe à protons productrice d'ATP et permettre la réduction de l' O_2 en H_2O .

→ On obtient une molécule d'ATP à partir de l'ADP et d'un phosphate (Pi). Les composés réduits NADH et FADH_2 sont oxydés en composés NAD^+ et FAD .

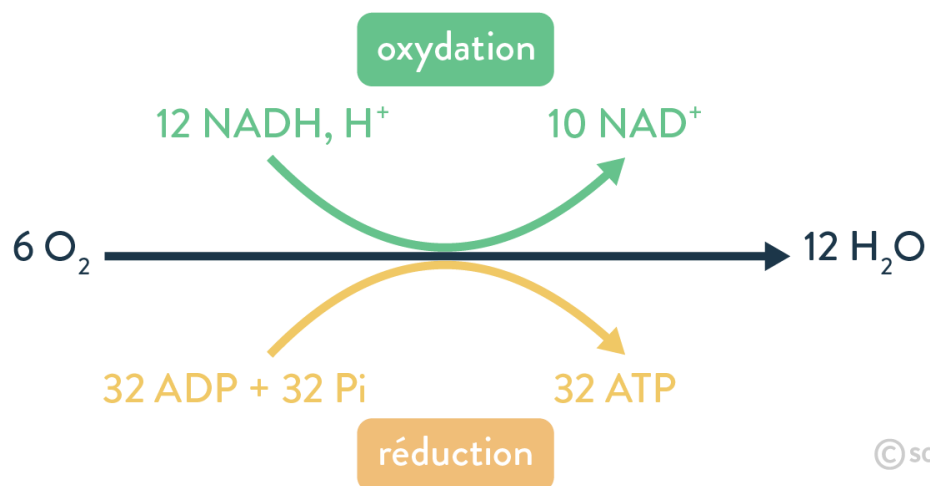
Chaîne respiratoire



© SCHOOLMOUV

 À retenir

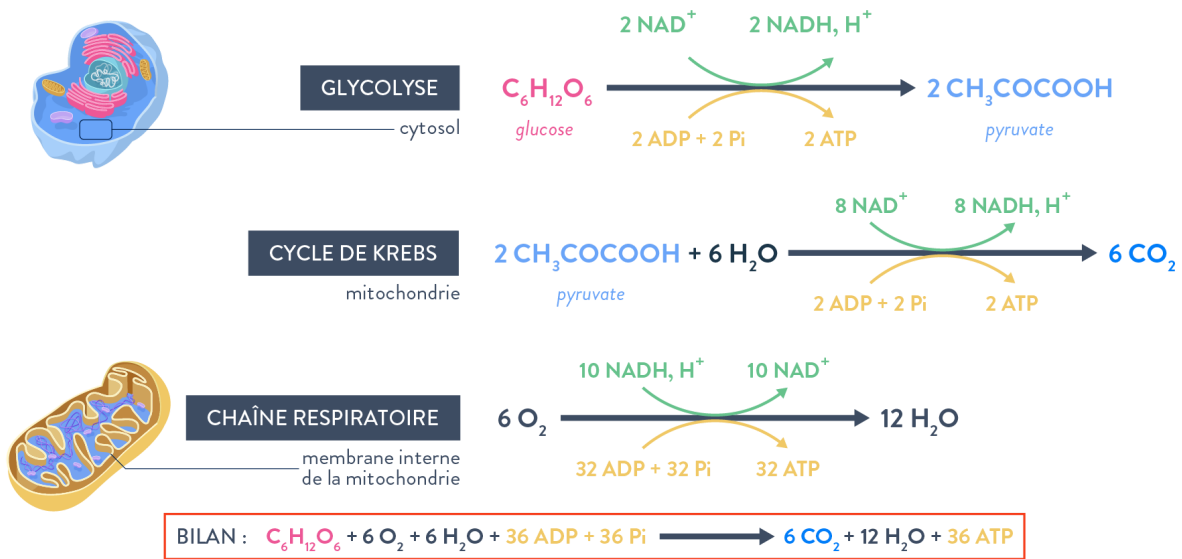
Ainsi, la chaîne respiratoire permet la formation de **32** molécules d'ATP grâce à l'oxydation de **6** molécules de dioxygène pour former **12** molécules d'eau.



© SCHOOLMOUV

En faisant le bilan de la respiration cellulaire pour une molécule de glucose, nous obtenons :

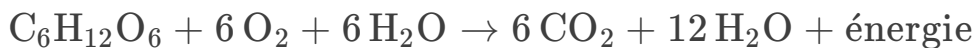
La respiration cellulaire



© SCHOOLMOUV



Bilan de la respiration :



2 | Les fermentations

a. Des efforts en anaérobie

La respiration cellulaire est un métabolisme capable de produire de grandes quantités d'énergie. Elle nécessite cependant un milieu en aérobie. Par exemple, lors d'un effort faible ou si la ventilation est bonne, l'apport de dioxygène est suffisant pour permettre la respiration.

Mais dans le cas d'un effort (au début du moins) ou d'une mauvaise ventilation, la quantité de dioxygène n'est pas suffisante et les cellules musculaires utilisent d'autres moyens pour générer de l'ATP.



La glycolyse a lieu en milieu aérobie, mais également dans les milieux anaérobies.

Certains métabolismes peuvent se produire sans O_2 (en milieu anaérobie) : les **fermentations**. Elles permettent une oxydation du glucose sans O_2 . Elles commencent, comme la respiration, par une étape de glycolyse mais empreinte ensuite des chemins différents. La fermentation existe sous plusieurs formes, en fonction du patrimoine génétique des cellules qui oriente le type de métabolisme.



Astuce

Ainsi, les cellules musculaires ne savent faire que la fermentation lactique, et les levures que la fermentation alcoolique.



À retenir

- Lors d'un effort en anaérobie, les cellules musculaires peuvent utiliser un métabolisme ne nécessitant pas de dioxygène, la fermentation.
- Le rendement de la fermentation est assez faible, elle produit donc moins d'ATP que la respiration.



La fermentation alcoolique

Chez certains organismes, comme les levures *Saccharomyces cerevisiae*, le pyruvate issu de la glycolyse est réduit en **éthanol**.

À la suite de la glycolyse, le pyruvate est décarboxylé (perte d'une molécule de dioxyde de carbone) et ainsi transformé en éthanol. En parallèle, les composés NAD^+ sont d'abord réduits en $NADH$, H^+ , puis ces derniers sont ensuite réoxydés en NAD^+ . Cette réaction **produit très peu d'ATP**, elle permet seulement la régénération des composés NAD^+ .



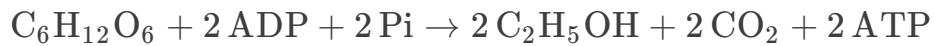
Attention

Lors de la fermentation alcoolique, l'ATP est produite par la glycolyse, et non par la fermentation.

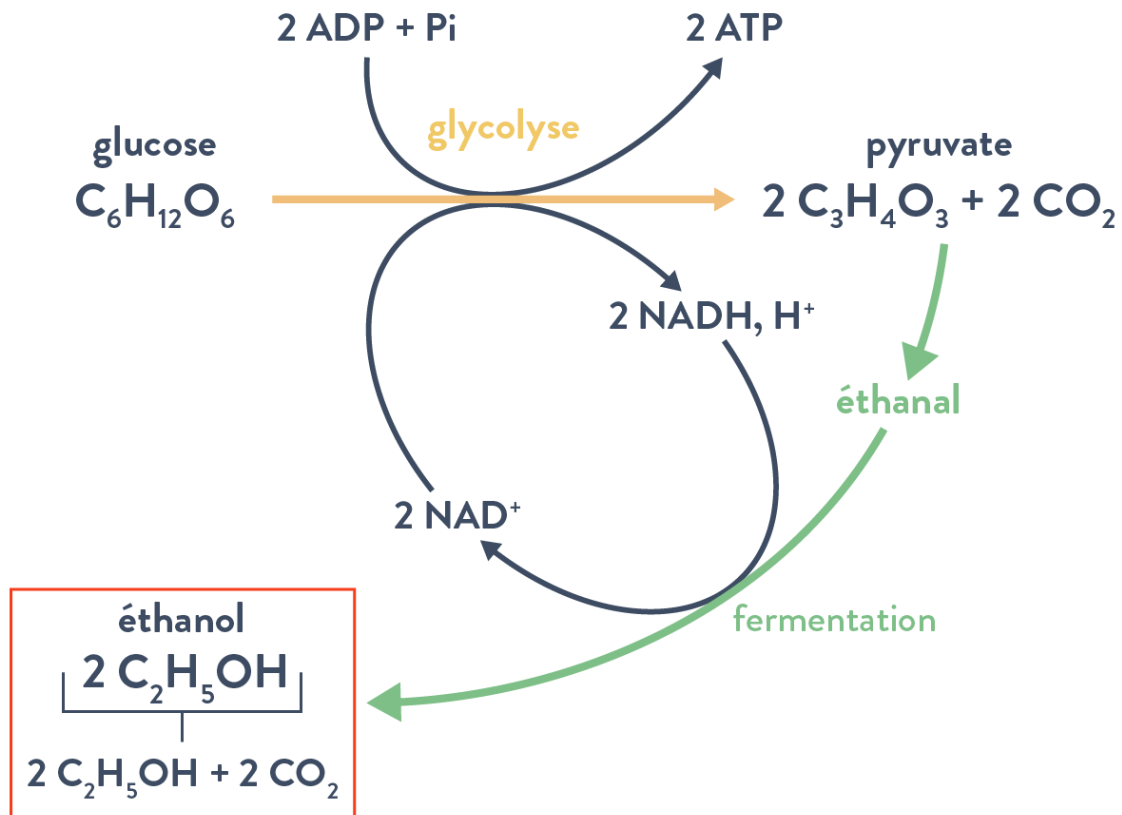


À retenir

- On obtient donc le bilan suivant pour la fermentation alcoolique :



- Cette réaction a lieu dans le cytosol de la cellule.



© SCHOOLMOUV

Cette fermentation est exploitée dans l'agroalimentaire : elle permet une forte production de dioxyde de carbone, ce qui permet de faire lever les pâtes (exemple : le pain), l'alcool s'évaporant à la cuisson.

Elle permet également la fabrication d'alcool (exemple : la bière) en transformant les glucides (fructose ou amidon) en éthanol.

c. La fermentation lactique

Chez certains organismes, comme les cellules musculaires, le pyruvate issu de la glycolyse est réduit en **acide lactique**.

À la suite de la glycolyse, le pyruvate est réduit et transformé en acide

lactique en cédant deux protons H^+ aux composés NAD^+ . Par la suite, comme pour la fermentation alcoolique, les composés NADH , H^+ sont réoxydés en composés NAD^+ . En parallèle, les composés NAD^+ sont donc réduits en composés NADH . Cette réaction **produit très peu d'ATP**, elle permet seulement la régénération des composés NAD^+ .



Lors de la fermentation lactique, l'ATP est produite par la glycolyse, et non par la fermentation.



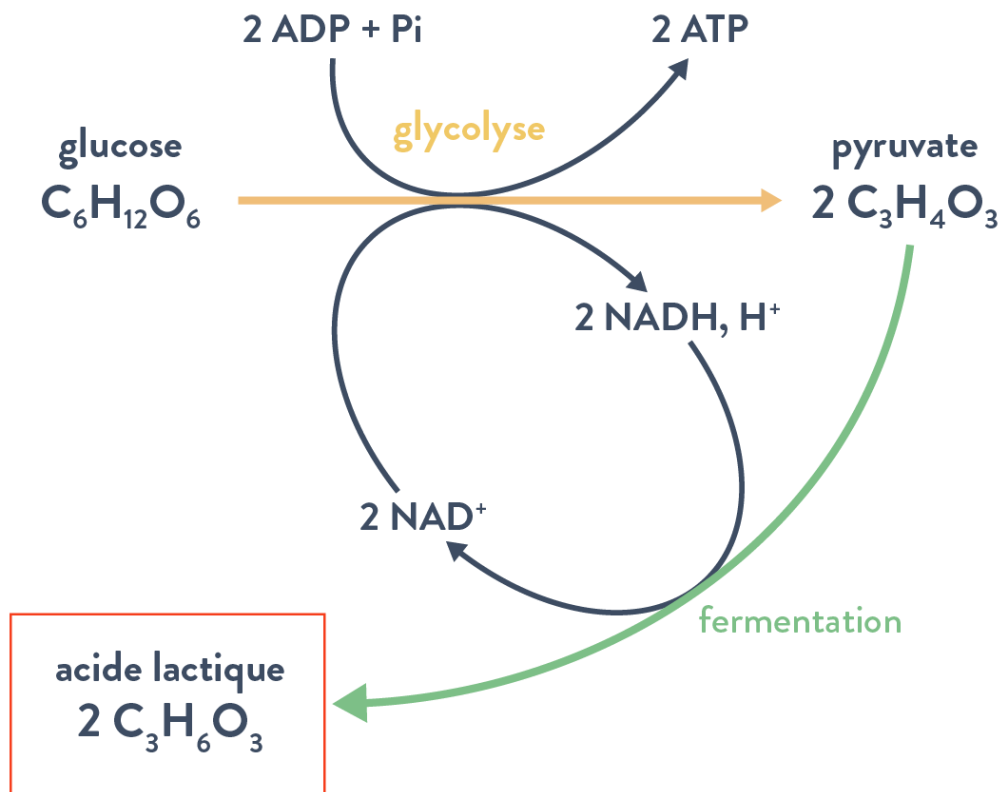
La production d'ATP est moindre que lors de la respiration car les étapes de la réoxydation des NADH , H^+ par l' O_2 n'existent pas ; seule l'étape de glycolyse permet de produire l'ATP.



- On obtient donc le bilan suivant pour la fermentation lactique :



- Cette réaction a lieu dans le cytosol de la cellule.



© SCHOOLMOUV

En cas d'apport insuffisant de dioxygène, cette fermentation est exploitée, au début de l'exercice d'effort physique, par les cellules musculaires.



L'accumulation anormale d'acide lactique (normalement repris par la circulation sanguine et métabolisé par le foie) dans les muscles peut être à l'origine de crampes musculaires.



- Lors de la fermentation lactique, une molécule de glucose est utilisée pour produire deux molécules d'ATP et deux molécules d'acide lactique.

- Son rendement en termes d'énergie est moins important que lors de la respiration, mais la finalité reste la même : produire de l'énergie utilisable par la cellule.

3 | Le dopage, un moyen d'améliorer ses performances physiques

Pour améliorer leurs performances physiques, certain·e·s sportif·ve·s ont recours au **dopage**. Certains produits dopants agissent sur des mécanismes liés au fonctionnement musculaire pour le rendre plus performant.



Non seulement le dopage va à l'encontre de l'éthique et de l'équité sportive, mais il se fait aussi au détriment de la santé de l'utilisateur·rice.

a. La créatine

La **créatine** est une protéine apportée par la consommation d'aliments riches en protéines (viandes, œufs, produits laitiers etc.). Si l'apport exogène alimentaire n'est pas suffisant, le foie est capable d'en **fabriquer à partir d'acides aminés**. La créatine peut également être **synthétisée en laboratoire** et est commercialisée comme complément alimentaire.

On retrouve la créatine au niveau des muscles où elle est phosphorylée (ajout d'un phosphate) pour former la phospho-créatine. Sa déphosphorylation libère un phosphate, ce qui permet une synthèse d'ATP rapide à partir d'ADP :



Elle est aussi associée à une rétention d'eau au niveau des muscles. Ainsi, une forte consommation de créatine de synthèse peut causer des troubles musculaires, hépatiques, rénaux, cardiovasculaires et est suspectée d'avoir un effet cancérigène.



La créatine permet de générer de l'ATP rapidement lors d'un effort intense. Pour autant, la surconsommation de cette protéine peut entraîner des troubles de l'organisme.

L'érythropoïétine

L'**EPO**, ou l'érythropoïétine, est une protéine naturellement produite par l'organisme lors d'un manque de dioxygène (exemple : en séjour prolongé en haute altitude) ou en cas d'hypoxie. Elle stimule la production de globules rouges et **améliore l'apport de dioxygène** aux organes.

Il est possible de la synthétiser en laboratoire à l'aide de cultures de cellules modifiées. Son utilisation dans un but thérapeutique entre dans le traitement de nombreuses pathologies liées à des anémies chroniques, une destruction des cellules souches de la moelle osseuse ou lors de certaines opérations.

L'EPO de synthèse est également utilisée en tant que **substance dopante**, car une meilleure oxygénation permet une pratique sportive plus longue, dans les sports d'endurance notamment.

L'administration d'EPO sur une période prolongée entraîne une augmentation des besoins en fer, de la viscosité du sang ainsi que de son volume. Le sang circule donc moins bien dans l'organisme. Ainsi, cette utilisation peut entraîner des complications cardiovasculaires, augmenter les risques d'hypertension artérielle et d'infarctus.

De plus, l'effet de l'EPO perdure plusieurs jours après l'injection, rendant ses effets négatifs difficiles à contrôler.



L'EPO, ou l'érythropoïétine, permet de stimuler la respiration cellulaire en augmentant l'apport de dioxygène aux organes. En tant que produit dopant, l'EPO n'est cependant pas sans danger.

Conclusion :

Pour fonctionner, les cellules musculaires ont besoin d'énergie sous forme d'ATP. Cette molécule peut être générée de différentes façons.

- La respiration cellulaire, un métabolisme réalisé en aérobie qui permet la synthèse de **36** ATP à partir d'**1** molécule de glucose et de **6** molécules de dioxygène. Ce métabolisme a lieu dans les mitochondries. La respiration est plus efficace en présence de grandes quantités de dioxygène, elle peut donc être optimisée en augmentant les apports aux cellules.
- La fermentation, un métabolisme réalisé en anaérobie qui permet la synthèse de **2** ATP à partir d'**1** molécule de glucose. Ce métabolisme a lieu dans le cytosol des cellules.

Les produits dopants permettent d'améliorer les performances sportives mais sont également à l'origine de complications graves sur la santé.