

La production d'ATP

Cours

Sommaire

I La molécule d'ATP, source d'énergie des cellules

II L'oxydation du glucose et la production d'ATP

A L'oxydation complète du glucose : la respiration cellulaire

1. La glycolyse
2. Le cycle de Krebs
3. La production d'ATP par les chaînes respiratoires

B L'oxydation partielle du glucose : la fermentation lactique

III Les métabolismes et le dopage

A Le métabolisme anaérobie

B Le métabolisme aérobie

C Le dopage

RÉSUMÉ

La molécule d'ATP est la source d'énergie de toutes les cellules. L'oxydation du glucose permet la libération de composés réduits qui sont ensuite utilisés dans les chaînes respiratoires mitochondriales pour produire de l'ATP. Les cellules produisent également de l'ATP par fermentation lactique. Il existe deux types de métabolisme : le métabolisme anaérobie et le métabolisme aérobie, qui dépendent du type d'effort à fournir. Le dopage est utilisé pour modifier le métabolisme musculaire. Ses conséquences sur la santé peuvent être graves.

I La molécule d'ATP, source d'énergie des cellules

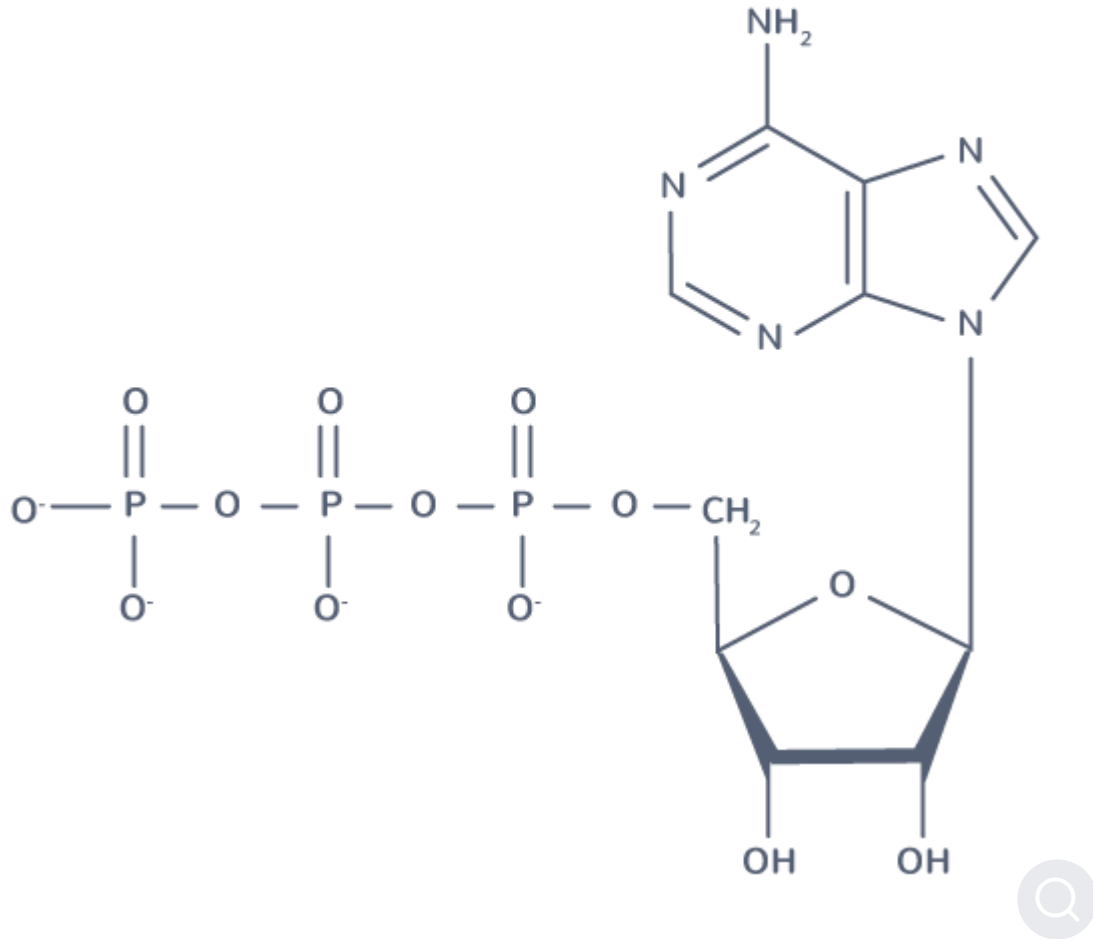
L'adénosine triphosphate (ATP) est la molécule universellement utilisée par les cellules pour leur fonctionnement. C'est l'hydrolyse des liaisons phosphate de cette molécule qui dégage l'énergie utilisable par les cellules.

Toutes les cellules vivantes utilisent de l'énergie pour toutes leurs activités banales :

- répliquer l'ADN ;
- se diviser ;
- fabriquer des protéines ;
- transcrire et traduire les gènes ;
- entrer en mouvement, etc.

Toutes ces tâches consomment de l'énergie. Cette énergie est apportée par l'utilisation d'une molécule particulière : l'adénosine triphosphate ou ATP.

La molécule d'ATP



La molécule d'ATP

© Wikimedia Commons

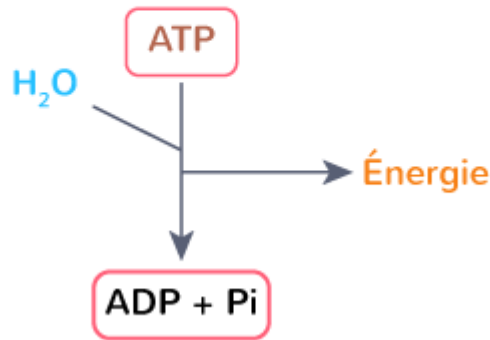
C'est l'hydrolyse d'une liaison entre les deux derniers groupes phosphate de l'ATP qui libère de l'énergie (31 kJ/mol). L'hydrolyse de l'ATP entraîne la formation d'adénosine diphosphate (ADP) et de phosphate inorganique (Pi).

DÉFINITION

Hydrolyse

Une hydrolyse est la rupture d'une liaison covalente par l'utilisation de molécules d'eau.

Hydrolyse de l'ATP et libération d'énergie



Hydrolyse de l'ATP et libération d'énergie

Les cellules ne possèdent pas de grandes quantités d'ATP, alors que les travaux qu'elles doivent accomplir sont permanents. Il faut donc régénérer l'ATP au fur et à mesure de son utilisation, en recyclant l'ADP et le Pi produits par l'hydrolyse. Mais si l'hydrolyse libère de l'énergie, la régénération de l'ATP en consomme.

L'énergie nécessaire à la régénération de l'ATP provient de nutriments organiques comme le glucose. Ces molécules contiennent une énergie chimique potentielle. Celle-ci est libérée lors de leur oxydation.

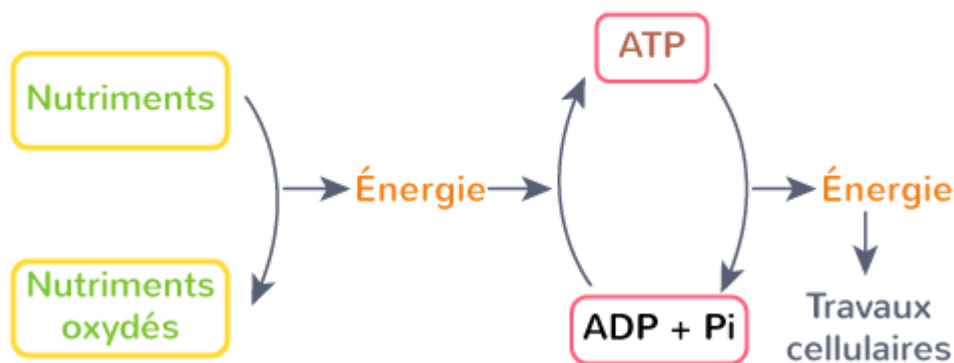
DÉFINITION

Oxydation

Une oxydation est une réaction chimique au cours de laquelle une molécule perd un ou plusieurs électrons. Une oxydation est toujours couplée à une réduction, c'est-à-dire l'acceptation par une molécule des électrons arrachés à la molécule qui a été oxydée. Une oxydation libère de l'énergie.

Dans les cellules, la régénération de l'ATP est donc couplée à l'oxydation de molécules comme le glucose.

Oxydations cellulaires et synthèse d'ATP



Oxydations cellulaires et synthèse d'ATP

L'oxydation complète du glucose correspond au processus de respiration cellulaire. La fermentation lactique est une oxydation incomplète du glucose. Toutes deux permettent la formation de composés réduits RH , H^+ qui sont ensuite utilisés pour produire de l'ATP.

A L'oxydation complète du glucose : la respiration cellulaire

L'oxydation du glucose comprend la glycolyse, dans l'hyaloplasme, puis le cycle de Krebs, dans la mitochondrie. Ces réactions forment du CO_2 et des composés réduits RH , H^+ . Ces composés réduits sont ensuite utilisés pour la production d'ATP par les chaînes respiratoires mitochondriales.

1. La glycolyse

La glycolyse est une suite de réactions biochimiques se déroulant dans le hyaloplasme. Une molécule de glucose y est transformée en 2 molécules d'acide pyruvique, ce qui génère 2 ATP et des transporteurs d'électrons à l'état réduit.

La glycolyse est une voie métabolique assurant les premières étapes de l'oxydation cellulaire du glucose.

DÉFINITION

Voie métabolique

Une **voie métabolique** est une succession de réactions métaboliques dans laquelle le produit d'une réaction est le substrat de la réaction suivante. Chaque réaction est catalysée par une enzyme.

La glycolyse se déroule dans le hyaloplasme, elle ne nécessite pas de dioxygène. Elle permet de fabriquer de l'acide pyruvique, un composé à 3 atomes de carbone, de l'ATP, et des transporteurs d'électrons (qui prennent en charge les électrons arrachés au substrat organique).

DÉFINITION

Hyaloplasme

Le **hyaloplasme** est la partie liquide du cytoplasme dans laquelle baignent les organites.



REMARQUE

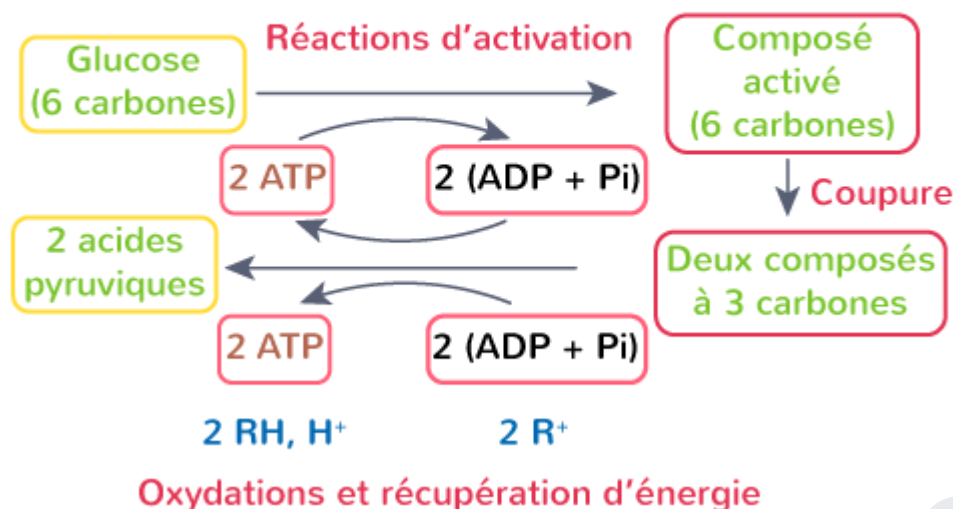
Parmi les molécules jouant le rôle d'accepteur/transporteur d'électrons dans ces réactions d'oxydoréduction, le NAD (nicotinamide adénine dinucléotide) est le plus fréquemment impliqué.

Dans la glycolyse, ce sont 10 réactions qui se succèdent :

- Les premières sont des réactions d'activation des molécules qui consomment de l'ATP (2 par molécules de glucose).
- Puis le composé à 6 atomes de carbone formé est scindé en 2 molécules à 3 atomes de carbone.
- Enfin, ces composés sont oxydés. Il y a réduction de 2 transporteurs, notés RH , H^+ (R^+ à l'état oxydé R), et production de 4 ATP.

Deux ATP ayant été utilisées lors des étapes d'activation, le bilan final de la glycolyse s'élève à 2 ATP produites pour une molécule de glucose utilisée.

La glycolyse



La glycolyse

DÉFINITION

Glycolyse

La **glycolyse** est la dégradation du glucose dans le hyaloplasme. Cette voie métabolique ne nécessite pas de dioxygène. Elle produit 2 molécules d'acide pyruvique, 2 ATP et 2 transporteurs réduits RH , H^+ pour une molécule de glucose utilisée.

Le bilan de la glycolyse est :



2. Le cycle de Krebs

Les réactions du cycle de Krebs se déroulent dans les mitochondries. L'acide pyruvique est totalement oxydé. Cela génère de l'ATP et des composés réduits et s'accompagne du rejet de CO_2 .

L'acide pyruvique formé dans le hyaloplasme par la glycolyse passe ensuite, en présence de dioxygène, dans les mitochondries. Il subit alors tout un ensemble de réactions nommé cycle de Krebs.

Il faut que la glycolyse se soit déjà produite car les mitochondries n'utilisent pas directement le glucose.

DÉFINITION

Cycle de Krebs

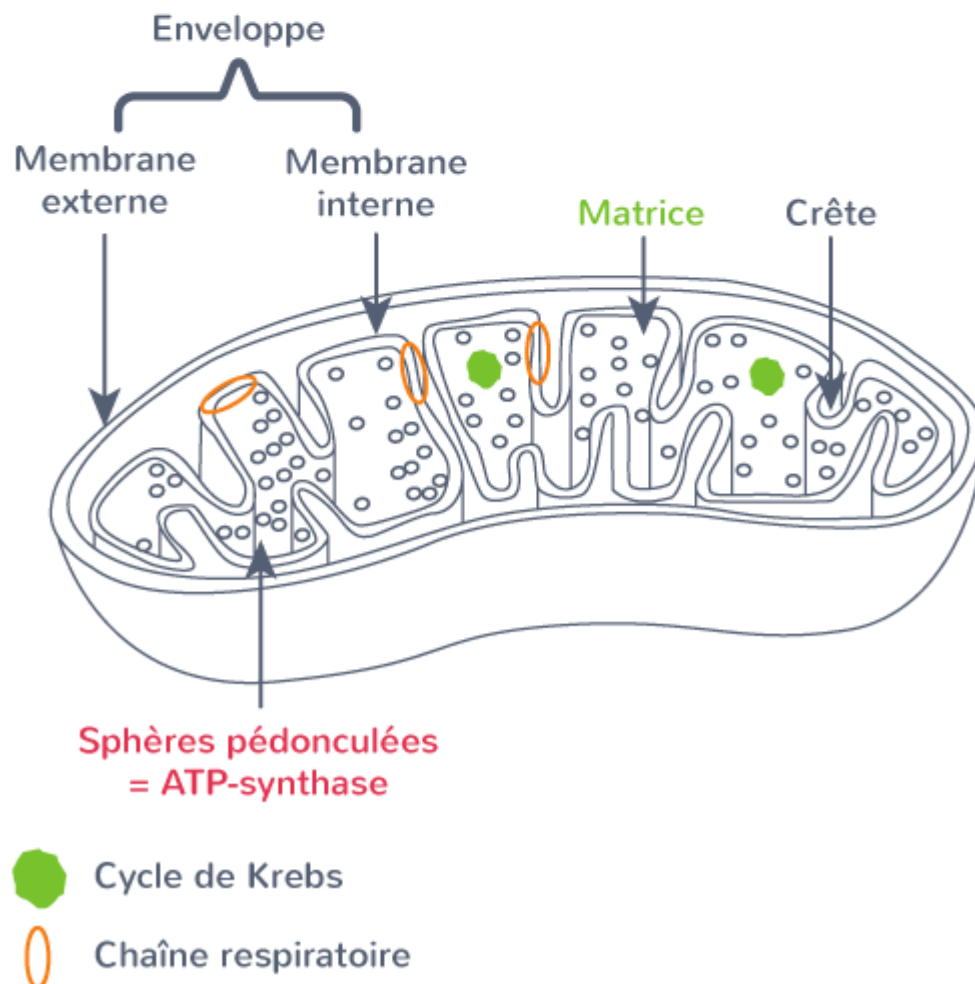
Le **cycle de Krebs** est une étape d'oxydation du glucose qui suit la glycolyse. Il se déroule dans les mitochondries et aboutit à la production de CO_2 et de transporteurs réduits de type RH , H^+ .

Les mitochondries sont des organites cellulaires spécialisés dans les mécanismes d'oxydation et la production d'ATP.

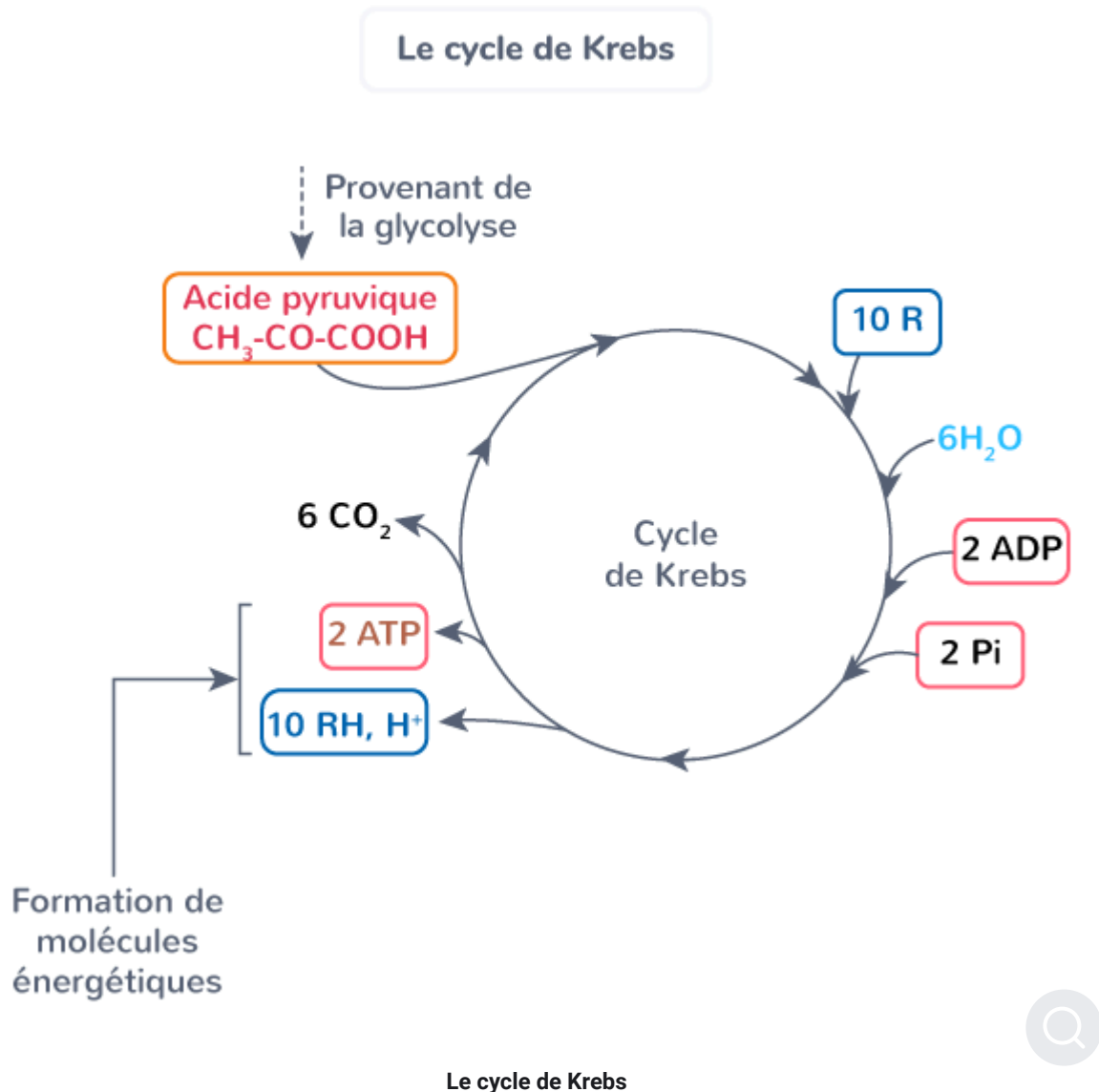
Ce sont des petits organites, limités par une double membrane, riches en enzymes métaboliques. Leur membrane interne présente des replis, nommés crêtes. Cette membrane interne contient :

- des chaînes respiratoires sur lesquelles des électrons transitent par des réactions d'oxydoréduction ;
- des sphères pédonculées qui produisent de l'ATP (grâce à leur activité ATP-synthase).

Les mitochondries : photographie et schéma d'interprétation

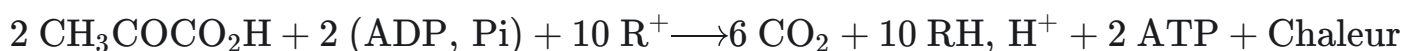


Au cours de ces réactions, la dégradation totale des nutriments se produit. Cela entraîne le dégagement de 3 molécules de CO_2 pour chaque molécule d'acide pyruvique utilisée. Il y a également production d'une ATP et de 5 transporteurs réduits au cours des réactions d'oxydation mitochondriale de l'acide pyruvique. À partir du glucose, deux cycles de Krebs consécutifs se produisent. Leur déroulement est le suivant :



Les transporteurs réduits produits lors de ces réactions sont ensuite recyclés dans les mitochondries. Ce processus permet de générer des quantités importantes d'ATP.

Le bilan des réactions mitochondriales est, pour 2 acides pyruviques, et sans tenir compte des molécules d'eau :



Le bilan produit peu d'ATP. De plus, il n'y a, dans ce bilan, aucune consommation de dioxygène. Enfin, il faut impérativement réoxyder les transporteurs, sous peine de voir les réactions d'oxydation des nutriments cesser totalement, faute d'accepteurs d'électrons.

C'est la phase suivante, au niveau des chaînes respiratoires, qui assure tous ces phénomènes.

3. La production d'ATP par les chaînes respiratoires

L'ATP peut être produite après l'oxydation du glucose au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale. Les composés réduits RH , H^+ formés lors de l'oxydation du glucose sont réoxydés en présence de dioxygène au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale. Une importante quantité d'ATP est alors produite.

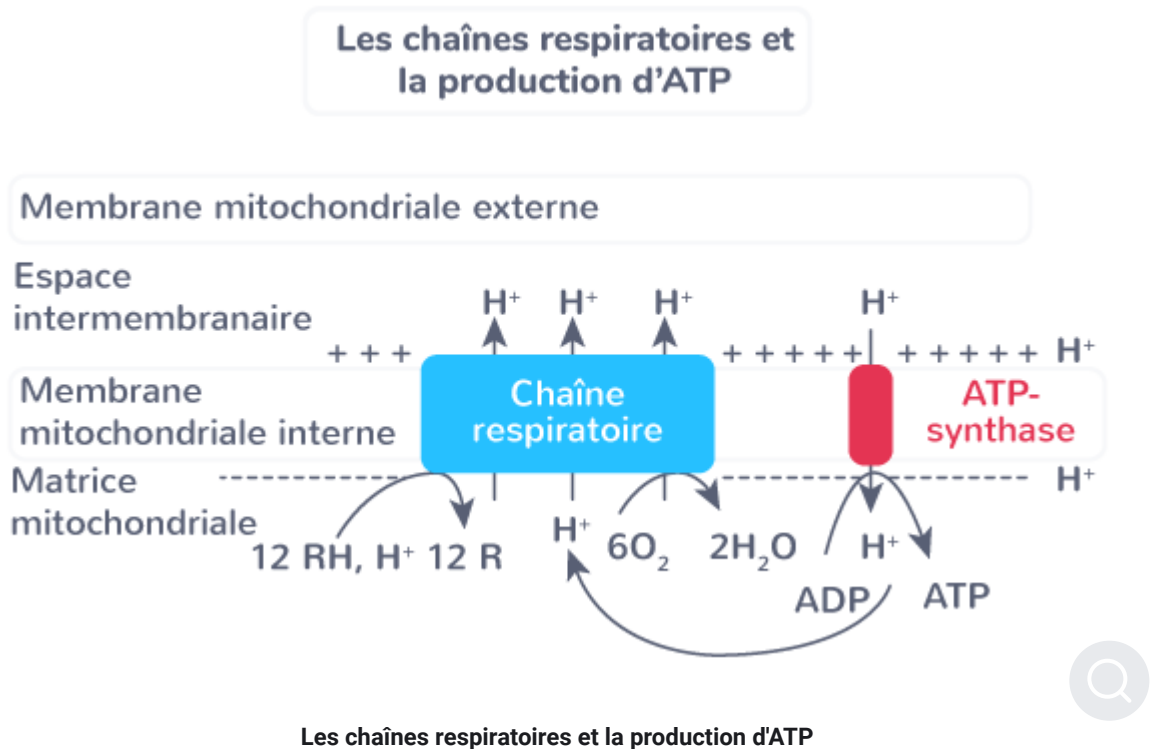
Les nutriments ont été totalement oxydés et du CO_2 a été produit. Mais il reste les 12 transporteurs réduits à réoxyder : 2 proviennent de la glycolyse et 10 des mécanismes respiratoires mitochondriaux.

Cette réoxydation des transporteurs s'effectue au niveau des chaînes respiratoires de la membrane mitochondriale interne.

Les transporteurs de type RH , H^+ cèdent leurs électrons aux protéines des chaînes respiratoires. Ces électrons transitent alors sur ces chaînes d'oxydoréduction, jusqu'à un accepteur final : le dioxygène.

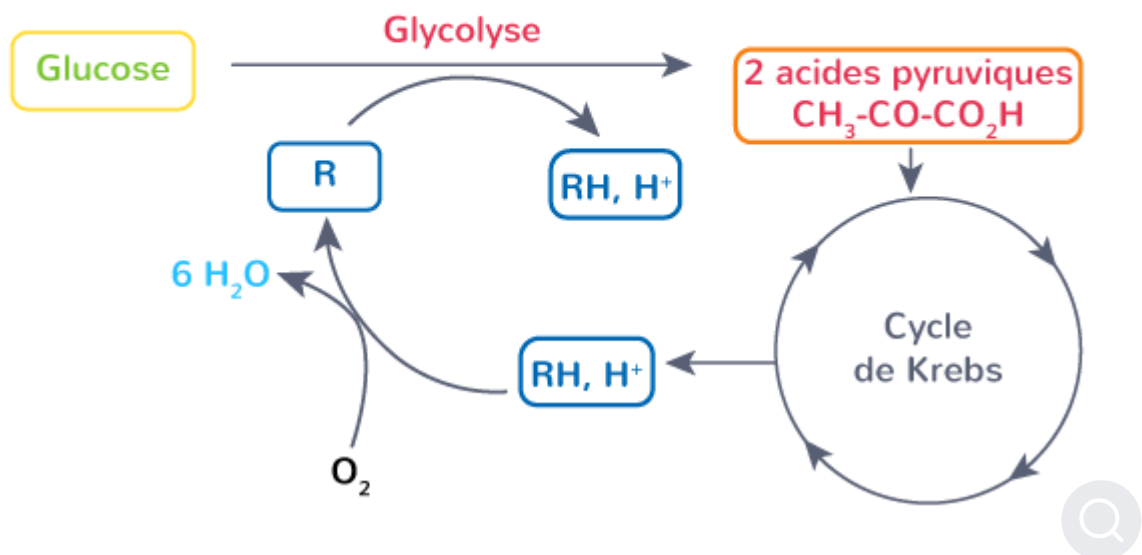
Au cours du transfert des électrons, des protons sont pompés vers l'espace intermembranaire des mitochondries. Ces protons ne peuvent revenir qu'en passant par les sphères pédonculées. L'activation des sphères pédonculées permet de synthétiser de l'ATP à partir d'ADP et de P_i .

Pour les 12 transporteurs qui doivent être réoxydés, la production d'ATP est importante, puisque ce sont 34 de ces molécules qui sont formées. Le dioxygène qui a reçu les électrons prend également en charge les protons qui reviennent dans la matrice. Il y a alors formation de molécules d'eau.



Le bilan chimique détaillé des phénomènes de respiration cellulaire peut être dressé :

Le bilan chimique détaillé de la respiration cellulaire



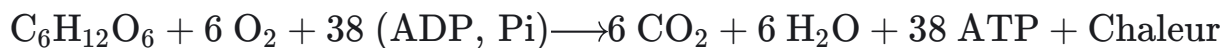
Le bilan chimique détaillé de la respiration cellulaire

Le bilan énergétique complet des mécanismes respiratoires cellulaires, en termes d'ATP, s'établit donc, à partir d'une molécule de glucose, à :

- 2 ATP produites au cours de la glycolyse ;
- 2 ATP produites au cours du cycle de Krebs ;
- 34 ATP produites par l'ensemble chaînes respiratoires/sphères pédonculées.

Soit un total de 38 ATP par molécule de glucose.

Le bilan définitif est donc, pour une molécule de glucose :



PROPRIÉTÉ

Un ATP représente 31 kJ/mol.

L'énergie chimique potentielle du glucose est 2860 kJ/mol.

Le rendement énergétique ($100 \times \frac{\text{Énergie récupérée sous forme utile}}{\text{Énergie initiale disponible}}$) est excellent, il est de :

$$100 \times \frac{38 \times 31}{2860} = 40 \% \text{ environ}$$

Pour que tous ces mécanismes puissent se dérouler correctement, il faut impérativement du dioxygène, qui sert d'accepteur final des électrons (et des protons).

B L'oxydation partielle du glucose : la fermentation lactique

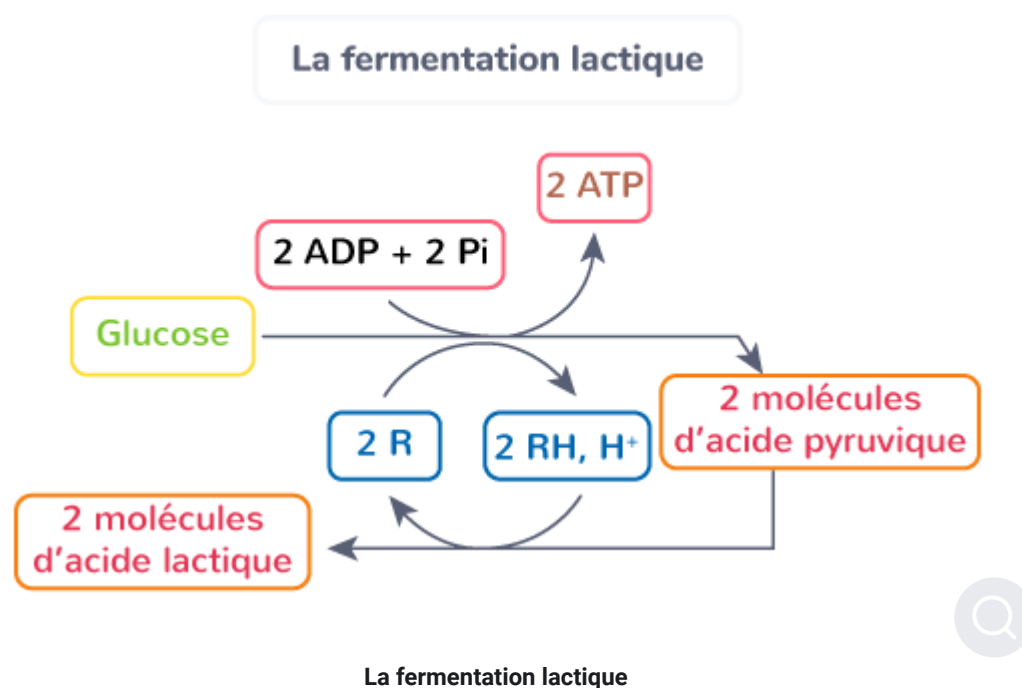
Lorsqu'elles n'ont pas d' O_2 , les cellules utilisent une voie métabolique alternative pour produire leur

ATP : la fermentation lactique. La fermentation lactique est une oxydation incomplète des substrats organiques. Il en résulte une faible production d'ATP, ainsi que des déchets encore riches en énergie chimique potentielle.

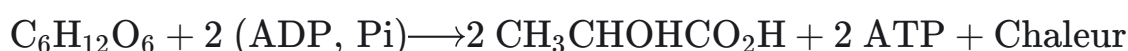
Lorsque les cellules sont placées dans des conditions où le dioxygène vient à manquer (conditions anaérobies), l'oxydation du glucose est très incomplète.

En absence d' O_2 , l'essentiel pour les cellules est de pouvoir maintenir la production d'ATP par la glycolyse, puisque ce phénomène ne nécessite pas de dioxygène.

Dans ce cas, c'est l'acide pyruvique produit par la glycolyse qui sert d'accepteur d'électrons et de protons. Il est réduit en acide lactique. Ce phénomène est la fermentation lactique.



Le bilan chimique peut s'écrire :



PROPRIÉTÉ

Cette voie métabolique est beaucoup moins rentable, sur le plan énergétique, que la respiration. En effet, l'acide lactique produit est encore riche en énergie chimique potentielle, et il n'y a que 2 ATP produites.

Le rendement est donc : $100 \times \frac{2 \times 31}{2860} = 2 \%$ seulement .

III Les métabolismes et le dopage

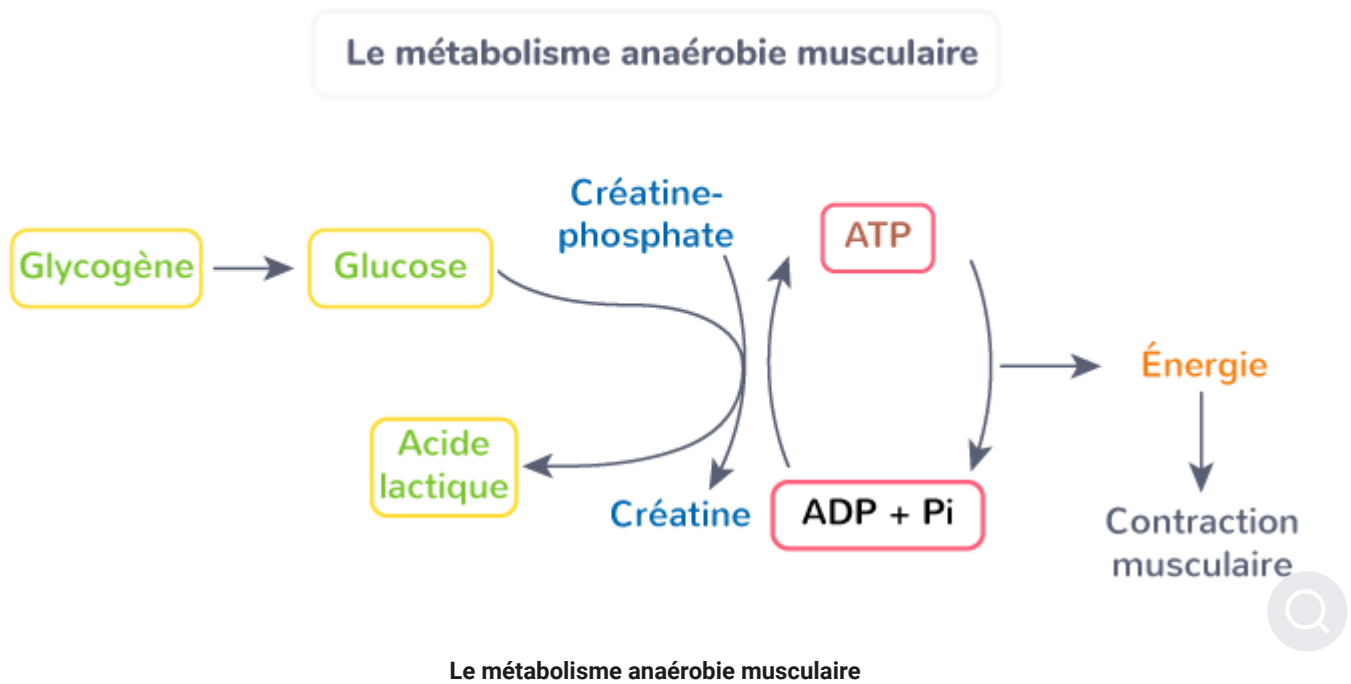
En fonction du type d'effort fourni, le métabolisme est différent. Il existe deux types de métabolisme : le métabolisme anaérobie et le métabolisme aérobie. Des substances exogènes (extérieures) dopantes peuvent intervenir sur le métabolisme lors du dopage, et augmenter le rendement énergétique des mécanismes mis en œuvre.

A Le métabolisme anaérobie

Le métabolisme anaérobie est le premier moyen utilisé par les cellules musculaires pour produire l'ATP nécessaire à l'effort.

Le métabolisme anaérobie ne nécessite pas de dioxygène. Il peut donc se mettre en place très rapidement au tout début de l'effort, alors que les muscles se contractent sans recevoir encore beaucoup de dioxygène.

C'est, dans les tous premiers instants, une molécule phosphatée, la créatine phosphate, qui assure la régénération de l'ATP.



En quelques secondes, c'est ensuite le mécanisme de fermentation lactique qui prend le relais et assure la production d'ATP au cours de l'effort.

La fermentation s'effectue majoritairement à partir des stocks glucidiques du muscle. Ainsi, ce dernier peut consommer en quelques secondes tout le stock de glycogène qu'il possède. Le rendement est faible, mais la quantité de glycogène rapidement utilisée permet au muscle de fournir des efforts « explosifs ».

EXEMPLE

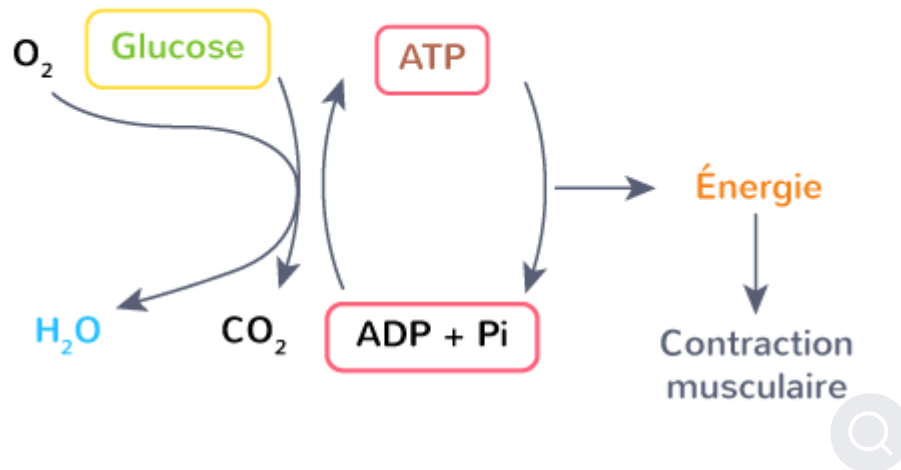
Les muscles des sprinteurs ou des sauteurs fonctionnent principalement par métabolisme anaérobie.

B Le métabolisme aérobie

Le métabolisme aérobie est le mode de régénération de l'ATP qui se met en place dans les cellules musculaires après quelques secondes d'effort. Il devient franchement prépondérant au bout de plusieurs minutes.

Le métabolisme aérobie est celui de la respiration cellulaire. Il offre un bien meilleur rendement énergétique que le métabolisme anaérobie, mais il nécessite du dioxygène. Il ne peut donc devenir prépondérant que lorsque les adaptations cardiaques et ventilatoires permettent d'apporter aux cellules musculaires tout le dioxygène dont elles ont besoin.

Le métabolisme musculaire aérobie



Le métabolisme musculaire aérobie

Le métabolisme aérobie est adapté aux efforts de longue durée mais peu intenses.

EXEMPLE

La course de fond repose sur le métabolisme musculaire aérobie.

C Le dopage

Le dopage est la prise par l'homme de substances exogènes (extérieures). Ces substances peuvent modifier la masse musculaire ou le métabolisme. Elles ont des effets nocifs sur la santé et peuvent entraîner la mort.

L'entraînement régulier, sans excès, est bénéfique pour les performances sportives et sur la santé en général. Un marathonien, avec l'entraînement, favorise la présence dans ses muscles de cellules musculaires pouvant fonctionner en métabolisme aérobie. Ses performances en compétition s'en trouvent améliorées. Inversement, l'entraînement au sprint favorise la présence dans les muscles de cellules utilisant la voie anaérobie.

Le dopage consiste à prendre des produits dopants.

DÉFINITION

Produits dopants

Les produits dopants sont des substances exogènes que prennent parfois les sportifs pour améliorer leurs performances de manière artificielle. Ils sont interdits et peuvent avoir de graves effets sur la santé.

Des produits dopants peuvent être consommés pour diminuer la perte de la sensation de fatigue ou d'épuisement et ainsi augmenter la capacité d'entraînement.

EXEMPLE

Des substances psychoactives telles que la cocaïne peuvent avoir pour conséquence une augmentation de la capacité de travail ou de l'activité de l'individu.

Les produits dopants peuvent avoir pour effet recherché une augmentation de la masse musculaire.

EXEMPLE

La consommation de stéroïdes anabolisants augmente la masse musculaire des individus et donc leur force.

Les produits dopants peuvent améliorer le métabolisme musculaire, de façon à augmenter le rendement de l'utilisation du glucose par les muscles. C'est, dans ce cas, la voie aérobie qui peut être privilégiée.

EXEMPLE

Le prise d'EPO (érythropoïétine) permet de stimuler la fabrication des érythrocytes (= hématies) et donc d'augmenter l'oxygénation des muscles.

Le dopage est dangereux pour la santé des sportifs qui l'utilisent. En effet, il peut être responsable de phénomènes d'addiction, mais aussi de pathologies cardiaques, rénales ou encore nerveuses. Sa pratique est illégale.