

## M2. Origine de l'ATP nécessaire à la contraction de la cellule musculaire

### Métabolisme cellulaire et synthèse d'ATP.

#### La molécule d'ATP

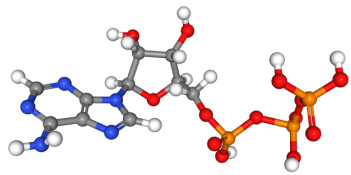


Image libmol

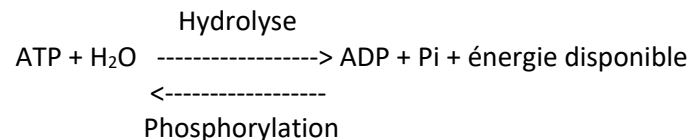
- L'**ATP** ou **adénosine triphosphate** est synthétisé à partir d'**ADP** (ou **adénosine diphosphate**) et de **phosphate inorganique Pi**.

- L'ATP est un **nucléotide** constitué d'une base azotée, l'adénine, et d'un sucre, le ribose, auquel sont rattachés successivement trois groupements phosphate  $PO_4^{3-}$  (et donc deux pour l'ADP).

- C'est une **molécule riche en énergie** parce que son unité triphosphate contient une liaison riche en énergie entre les deux derniers phosphates. Une **grande quantité d'énergie est libérée lorsque l'ATP est hydrolysé en ADP**, ce qui permet à la cellule **de réaliser des réactions nécessitant un apport énergétique**.

- **La synthèse d'ATP nécessite un apport d'énergie** : c'est une phosphorylation.

- **L'apport énergétique** nécessaire à sa synthèse **provient de l'oxydation des molécules organiques** (par exemple le glucose).



- La **quantité d'ATP stockée dans les cellules** musculaires est **trop faible** pour pouvoir assurer l'effort : l'ATP est donc **continuellement formé et consommé** dans la cellule.

- Le **stock d'ATP est renouvelé par deux voies** dans la cellule musculaire : la **voie anaérobie** (= sans  $O_2$ ) et la **voie aérobie** (= avec  $O_2$ ).

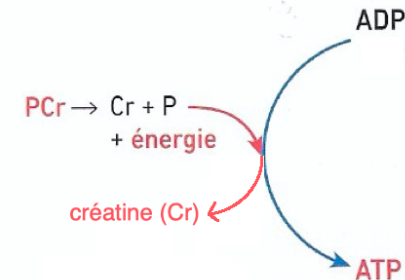
- La voie anaérobie regroupe la régénération de l'ATP par la **phosphocréatine** et par la **fermentation lactique**.

- La voie aérobie est assurée par la **respiration cellulaire**.

### \* La voie anaérobie de la phosphocréatine.

- La **phosphocréatine** (PCr) est une molécule présente dans le **hyaloplasme** (= cytosol = phase plus ou moins liquide du cytoplasme dans laquelle baignent les organites) des cellules musculaires. La PCr possède une **liaison phosphate à haut potentiel énergétique**.

- **L'énergie libérée** par l'hydrolyse de la phosphocréatine en créatine permet par couplage de **reconstituer très rapidement de l'ATP à partir de l'ADP** :



- En moins de 20 s, le stock de phosphocréatine s'épuise et l'ATP ne peut plus être régénéré par cette voie.

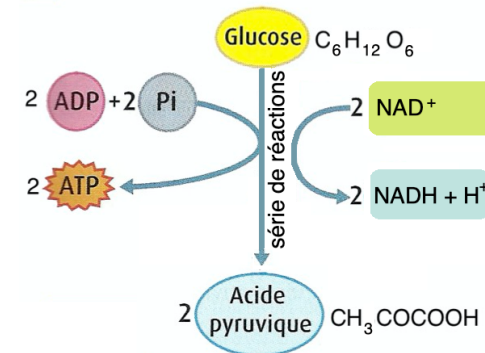
- Après l'effort, le stock de PCr est reconstitué à partir de la créatine.

### \* La voie anaérobie de la fermentation lactique.

- Elle débute par la **glycolyse, voie commune à la fermentation lactique et à la respiration cellulaire**.

- Dans le **hyaloplasme, le glucose est transformé en acide pyruvique**.

- Au cours de la glycolyse, une **série de transformations chimiques catalysées par différentes enzymes oxydent partiellement le glucose en acide pyruvique**.



- Cette oxydation partielle du glucose en acide pyruvique est **couplée à la réduction de transporteurs NAD<sup>+</sup> en NADH + H<sup>+</sup>**. Le NAD<sup>+</sup> (nicotinamide adénine dinucléotide) est une molécule qui peut être sous **forme oxydée (NAD<sup>+</sup>)** ou **réduite (NADH)**.

- Par couplage, **deux molécules d'ATP sont synthétisées** suite à l'énergie libérée par l'oxydation partielle du glucose.

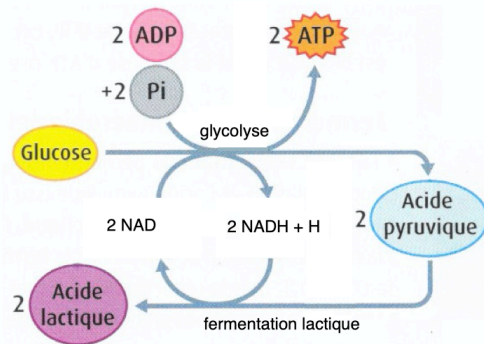
#### \* La fermentation lactique.

- En l'absence d'O<sub>2</sub>, **la fermentation lactique** suit la glycolyse, toujours dans le **hyaloplasme**.

- A partir des 2 acides pyruviques, **de l'acide lactique est synthétisé** (et cette molécule contient encore potentiellement de l'énergie): **l'oxydation du glucose est alors incomplète**.

- Cela **permet alors l'oxydation des molécules de NADH en NAD<sup>+</sup>** (qui pourront de nouveau servir dans la glycolyse).

- Il n'y a **pas de production d'ATP en dehors de la glycolyse**.



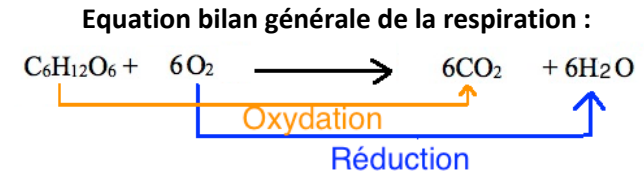
- Précision : les levures en l'absence d'O<sub>2</sub> réalisent quant à elle la **fermentation alcoolique** : le bilan énergétique est le même (2 ATP par molécule de glucose lors de la glycolyse), mais à la place de l'acide lactique il y a **production d'éthanol et de CO<sub>2</sub>**.

#### \* La respiration cellulaire.

- La respiration cellulaire correspond à l'**oxydation complète du glucose en présence d'O<sub>2</sub>**. Toute l'énergie potentiellement présente dans le glucose est alors récupérée (contrairement aux fermentations).

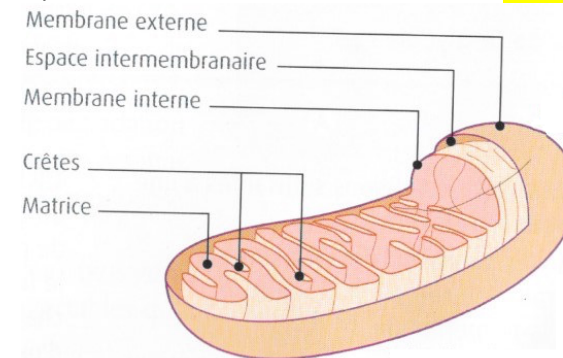
- On peut démontrer la respiration cellulaire par **expérimentation assistée par ordinateur (ExAO)** sur des levures (champignons unicellulaires).

- **L'équation bilan globale** de la respiration cellulaire est :



- La respiration cellulaire se déroule dans les organites **mitochondries**.

- La mitochondrie est un organite long de quelques μm, enveloppé par **deux membranes** : la **membrane externe** et la **membrane interne qui forme** vers l'intérieur de la mitochondrie **des replis ou crêtes**. Un **espace intermembranaire** large de quelques nm sépare ces deux membranes. Le compartiment le plus interne d'une mitochondrie est la **matrice**.

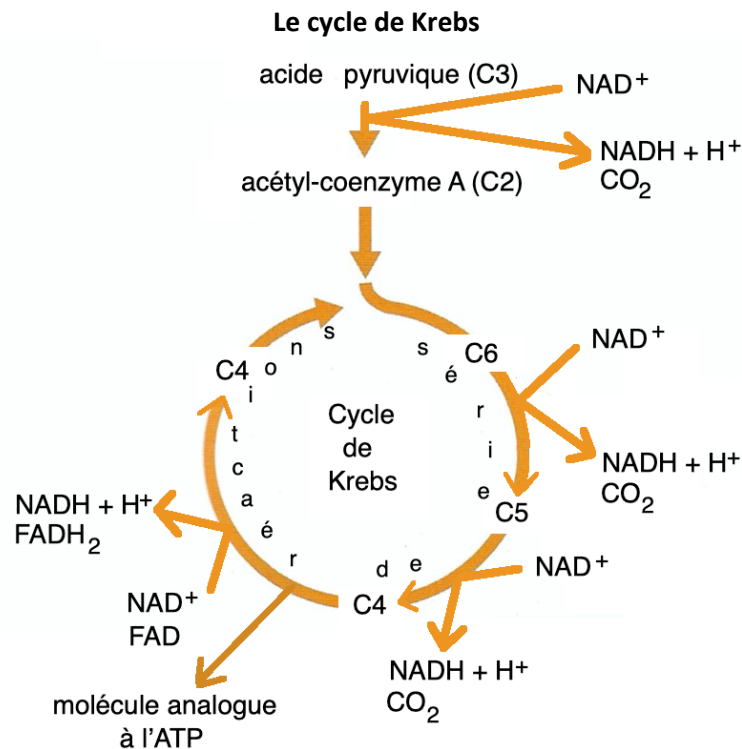


D'après SVT spécialité SVT 2012

- La respiration mitochondriale se déroule avec **l'acide pyruvique** et non le glucose. On peut le démontrer par **ExAO** sur des suspensions mitochondriales. Elle se fait en **deux phases** : le **cycle de Krebs** et la **chaîne respiratoire**.

**\* La respiration cellulaire : le cycle de Krebs.**

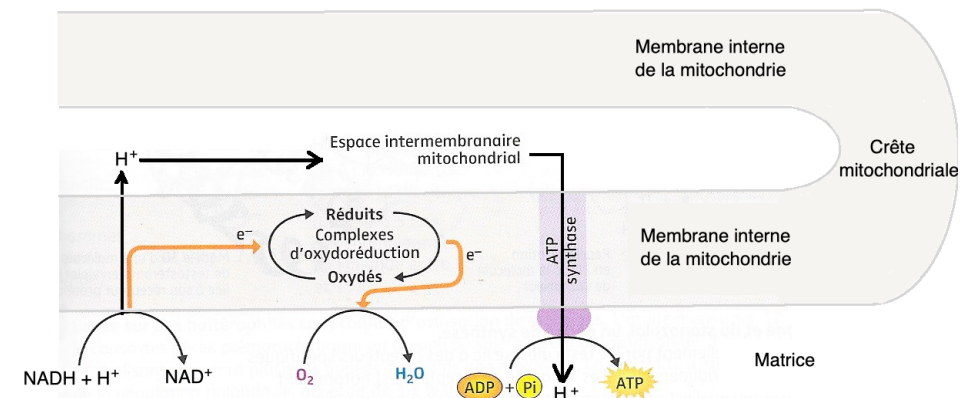
- Une fois entré dans la mitochondrie, **l'acide pyruvique se transforme en acétyl-coenzyme A** (suite à un départ de  $\text{CO}_2$  et une réduction d'un  $\text{NAD}^+$  en  $\text{NADH} + \text{H}^+$ ).
- **L'acétyl coenzyme A est la molécule qui entre dans le cycle de Krebs** qui se déroule dans la **matrice mitochondriale**.
- Les molécules carbonées du cycle subissent des **décarboxylations** (= **départ de  $\text{CO}_2$**  qui quitte ensuite la cellule pour rejoindre le sang puis les poumons) et une **oxydation progressive couplée à la réduction de  $\text{NAD}^+$  et  $\text{FAD}$**  (flavine adénine dinucléotide). **De l'ATP est également produit** à partir d'ADP et Pi (molécule analogue dans le schéma).



- Au cours du cycle de Krebs, **l'acide pyruvique est totalement oxydé en  $\text{CO}_2$** .
- Le fonctionnement du cycle permet **par couplage la synthèse de deux molécules d'ATP**.

**\* La respiration cellulaire : la chaîne respiratoire.**

- Elle se déroule au niveau des **crêtes mitochondriales**.
- On peut l'étudier à partir d'expériences sur les particules submitochondriales.
- La membrane interne des mitochondries est très riche en protéines (80 % de ses constituants). Parmi celles-ci, certaines constituent **la chaîne respiratoire**.
- **Ces molécules assurent une réoxydation des composés réduits  $\text{NADH}$ ,  $\text{H}^+$  et  $\text{FADH}_2$**  produits par la **glycolyse et le cycle de Krebs**. Chaque transporteur de la chaîne accepte les électrons du transporteur précédent et les transmet au suivant. Ce transfert d'électrons est accompagné d'un **flux de protons  $\text{H}^+$**  vers **l'espace intermembranaire**.
- **En bout de chaîne, c'est le dioxygène qui accepte les électrons (ainsi que des protons) pour former de l'eau** (c'est donc une réduction).
- On observe aussi de **nombreuses sphères pédonculées** sur la **membrane interne des mitochondries** : elles sont au contact de la matrice mitochondriale. Les sphères pédonculées correspondent à des **ATP synthases**. Les protons situés dans l'espace intermembranaire retournent vers la matrice à travers les ATP synthases, ce qui génère une importante quantité d'ATP.
- **Les oxydations qui se produisent au cours de la chaîne respiratoire fournissent à l'ATP synthase l'énergie permettant de produire 32 molécules d'ATP à partir de 12 molécules de  $\text{NADH}$ ,  $\text{H}^+$** .



- Il y a donc **production de 36 molécules d'ATP par molécule de glucose oxydée dans le cas de la respiration cellulaire** : 2 lors de la glycolyse, 2 lors du cycle de Krebs et 32 dans la chaîne respiratoire. **L'ATP produit permet alors les activités cellulaires**.

- Si l'on compare **le rendement** de la fermentation lactique (de la fermentation en général) et de la respiration cellulaire, il **penche nettement en faveur de la respiration cellulaire** (environ 60 % contre moins de 4%). Cela s'explique par le fait que le glucose est complètement oxydé lors de la respiration cellulaire, alors que ce n'est pas le cas dans la fermentation.

#### \* Le métabolisme des cellules musculaires et le type d'effort à fournir.

- **L'O<sub>2</sub> apporté aux muscles est prélevé au niveau des poumons**, puis **apporté par le sang**. Le sang apporte également les **nutriments**, dont le glucose, issus de la digestion ou de réserves dans l'organisme et permettant la synthèse d'ATP.

- **Différentes voies métaboliques** fournissent l'énergie nécessaire à la contraction musculaire à partir de **métabolites variés et avec des délais d'intervention différents**.

- Pour un **effort intense et très bref**, c'est d'abord **le stock de phosphocréatine** qui est utilisé, **puis la fermentation lactique** prend rapidement le relais.

- **Pour un effort long (endurance)**, c'est progressivement **la voie aérobie** qui s'enclenche et qui devient dominante (le délai de latence étant en partie dû au **retard lié à la modification progressive des paramètres respiratoire et cardiaque**).

- Ainsi les **efforts brefs et intenses mobilisent surtout les voies anaérobies** (phosphocréatine et fermentation lactique) alors que **les efforts d'endurance reposent sur la voie aérobie**.

- Par ailleurs, il existe **deux types de fibres musculaires dans les muscles** : les **fibres de type I** (rouges) et les **fibres de types II** (blanches). Les **proportions** des deux types de fibres dans les muscles **évoluent suivant les types d'efforts** (sachant qu'il y a aussi détermination génétique et qu'avec l'âge la proportion de FT I augmente au détriment des FT II).

- Les **fibres de types I** sont surtout développées chez les sportifs pratiquant l'**endurance**, celles de **type II** chez ceux faisant des **efforts courts et intenses** de type sprint.

- Les **FT I** ont une **vitesse de contraction lente**, une forte teneur en enzymes du cycle de Krebs et de la chaîne respiratoire (et **beaucoup de mitochondries**). Le **réseau de capillaires est très développé** : elles effectuent surtout **la respiration cellulaire**.

- Les **FT II** ont une **vitesse de contraction rapide** (explosivité), une teneur élevée en **enzymes permettant la fermentation lactique** et **peu de mitochondries**. Le

**réseau de capillaires est peu développé** : elles effectuent surtout **la fermentation lactique**.

#### L'effet de substances exogènes.

- La prise de **substances exogènes** (= n'étant pas produites par l'organisme) **peut modifier la masse et le métabolisme musculaire**.

- C'est le cas des **produits dopants** qui **modifient ainsi les performances**, avec par exemple les **SAA (stéroïdes androgènes anabolisants** : molécules dérivées de la testostérone).

- La prise de ces **substances de synthèse** de structure voisine de la testostérone modifie le métabolisme des cellules musculaires en **stimulant l'anabolisme** (= augmentent la synthèse des protéines) : on observe un **accroissement de la masse musculaire et de la force musculaire** et donc des performances (particulièrement lors d'un entraînement régulier).

- Cela s'explique par le fait que **les cellules musculaires ont des récepteurs à la testostérone** auxquels **ces substances exogènes se lient**.

- Ces substances peuvent également provoquer **des effets secondaires qui ont parfois de graves conséquences sur la santé**.

- Le **stanozolol** est un exemple de SAA. Il figure sur la liste des **substances interdites par l'AMA** (Agence Mondiale Antidopage) en compétition et en hors compétition.