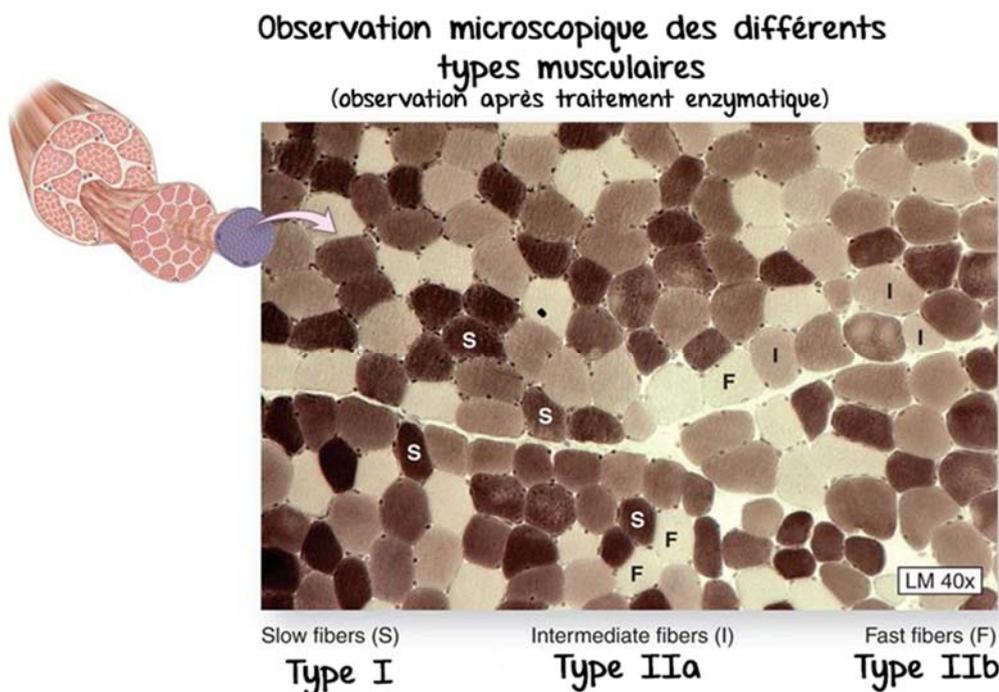


SVT	Thème 3B : Produire le mouvement : contraction musculaire et apport d'énergie	Term Spé SVT
Cours	Chapitre 2 : Origine de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire	ESTHER

Introduction/Fil rouge :



L'image ci-contre montre les fibres musculaires observées en coupe longitudinale. Nous avons étudié ces fibres au cours du chapitre précédent. On constate néanmoins que ces fibres n'ont pas toutes la même couleur (certaines sont plus rouges que d'autres). Cela est dû à la présence d'une molécule, la myoglobine (molécule proche de l'hémoglobine qui donne sa couleur rouge au sang et transporte le dioxygène) et cela est lié à la vitesse de consommation de l'ATP...

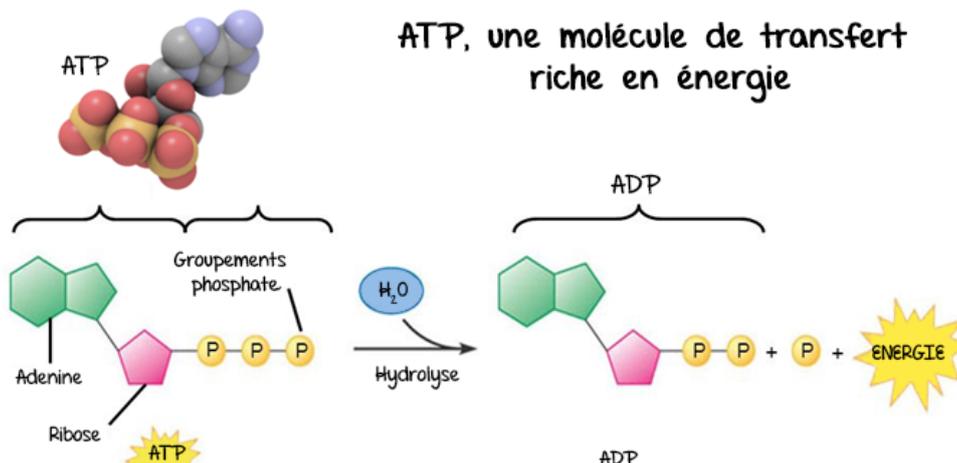
En effet, nous avons vu que la contraction musculaire nécessite la consommation d'ATP (Adénosine TriPhosphate) au niveau des molécules de myosine. On peut alors se poser plusieurs questions : d'où provient cette molécule énergétique ? Sa consommation/production a-t-elle les mêmes conséquences nos efforts : court (sprint) ou long (marathon) ?

Problème : comment est produit l'ATP dans les fibres musculaires ?

I - L'ATP et les fibres musculaires

L'ATP ou Adénosine TriPhosphate est une molécule (de type acide nucléique) riche en énergie, facilement mobilisable, par les cellules. Au niveau des cellules musculaires, l'ATP est consommé au niveau des têtes de myosine pour permettre le déplacement de celle-ci sur les filaments d'actine (ce qui entraîne la contraction musculaire).

Figure 1 :



On peut mesurer la quantité d'ATP au niveau musculaire et on constate qu'elle est très faible.

Figure 2 : Concentration en ATP dans les muscles chez l'être humain

	Mesures		Quantité d'énergie nécessaire pour monter un escalier de 4 étages (KJ)
	Concentration en ATP (millimoles/L)	Quantité d'énergie correspondante (KJ)	
Par kg de muscle	4-6	0.17-0.25	1.17
Pour un individu de 70kg (avec environ 30kg de muscles)	120-180	5.1-7.5	35

Source : <http://beaussier.mayans.free.fr/>

L'ATP n'est pas une forme de stockage de l'énergie dans les muscles, plutôt une molécule de transfert, qui doit être renouvelée en permanence.

Au niveau des cellules musculaires, il existe trois voies métaboliques principales de régénération de l'ATP :

- **L'hydrolyse de la phosphocréatine** est la voie la plus rapide ; elle permet une libération d'énergie importante sur une durée de quelques secondes (les stocks de phosphocréatine musculaire sont 4 à 6 fois supérieurs à ceux d'ATP) ;
- **La voie anaérobie par fermentation lactique** utilise le glucose mis en réserve dans les cellules musculaires et intervient après 20 à 30 secondes d'efforts ; cette voie permet la synthèse d'ATP pendant quelques minutes ;
- **La voie aérobie, ou respiration,** utilise différentes molécules organiques mises en réserves ou apportées par le sang (glucose, acides gras) ; elle se met en place après quelques minutes d'efforts et permet de réaliser des efforts allant jusqu'à plusieurs heures ;

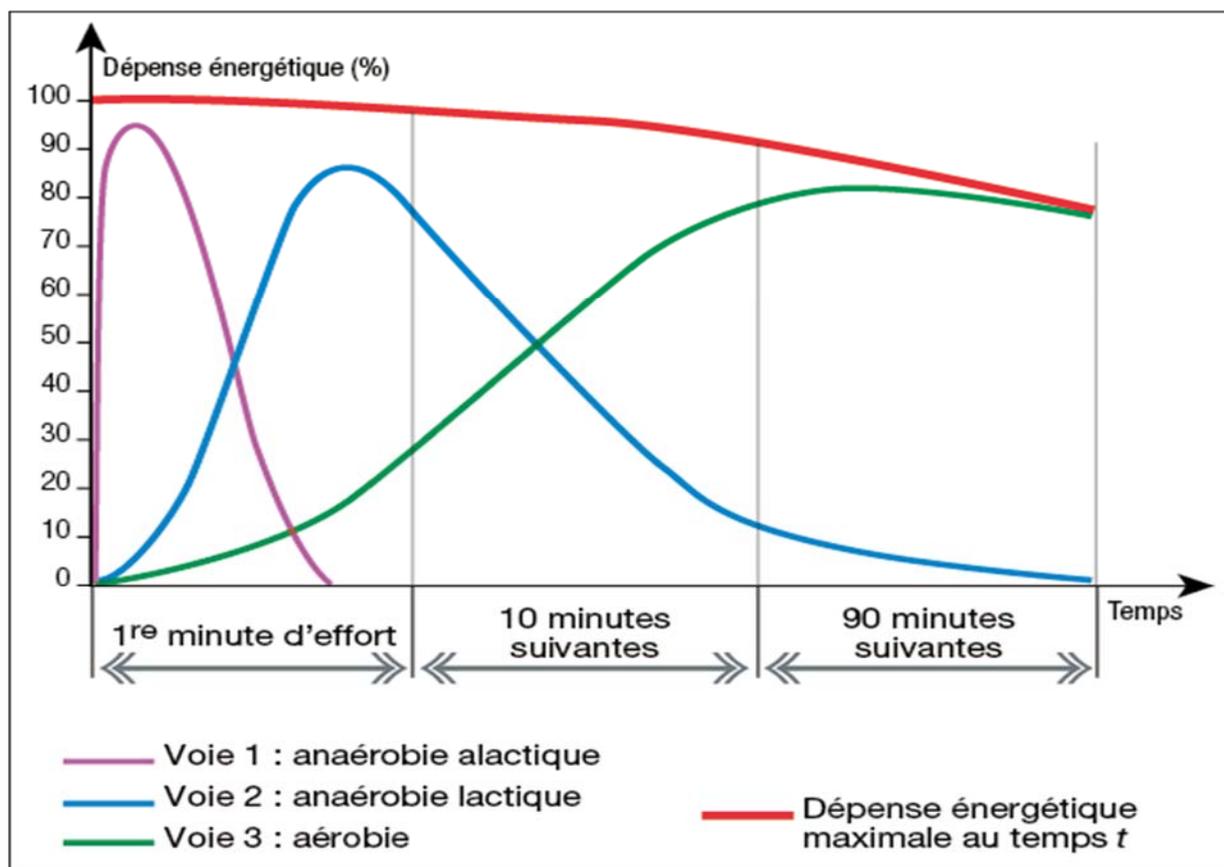


Figure 3 : Graphique montrant la part de chaque voie énergétique au cours d'un effort selon sa durée

Voie 1 : hydrolyse de la phosphocréatine ; Voie 2 : voie anaérobie par fermentation lactique ; Voie 3 : voie aérobie, ou respiration

Au niveau du muscle, on constate que certaines fibres musculaires utilisent certaines voies métaboliques. Voici un tableau de comparaison des trois types de fibres musculaires :

Figure 4 : Propriétés des différents types de fibres musculaires

		Fibre type I	Fibres type IIA	Fibre types IIB
Autre nom		Fibres lentes, fibres rouges	Fibres rapides, fibres blanches	
Particularités cellulaires		→ Nombreuses mitochondries → Forte concentration de myoglobine (couleur rouge, facilite la captation du dioxygène) → Nombreuses connexions aux capillaires sanguins	→ Importantes réserves en glycogène*	
Caractéristiques mécaniques	Résistance à la fatigue	Forte	Modérée	Faible
	Force produite	Faible	Modérée	Forte
	Vitesse de contraction	Faible	Rapide	Rapide
Métabolisme	Principale source énergétique	Lipides et Glucose	Glucose	Glucose
	Principale voie de régénération de l'ATP	Voie aérobie (respiration mitochondriale)	Hydrolyse de la phosphocréatine + Voie anaérobie par fermentation lactique	
Type d'effort associé (exemple de course à pied)		10000m	800m	100m

* Glycogène = polymère de glucose (molécule permettant la mise en réserve du glucose)

II – La fermentation lactique (voie anaérobie lactique)

Au niveau cellulaire, la voie anaérobie par fermentation lactique est un ensemble de réactions qui se produisent dans le cytoplasme. On a deux grandes réactions :

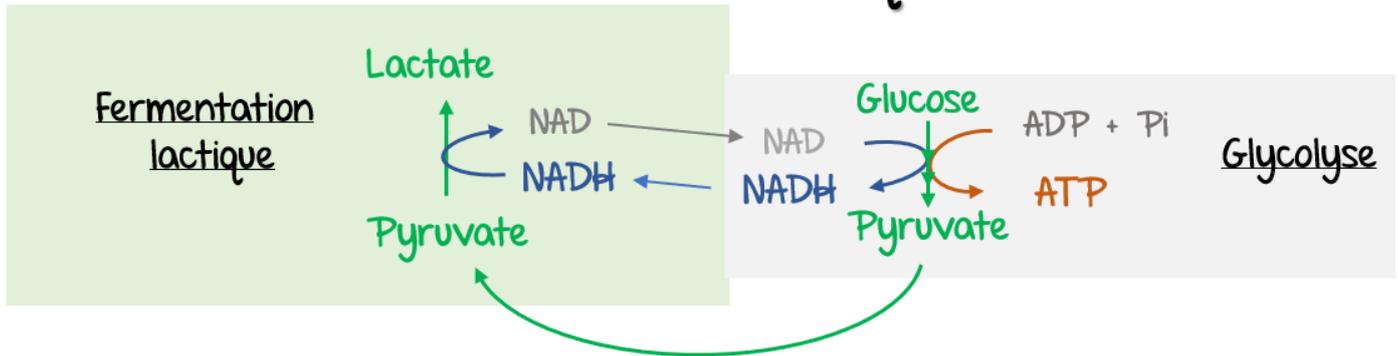
- La glycolyse (1) qui consiste à transformer les molécules de glucose en pyruvate ; avec libération d'ATP et de coenzymes réduits (NADH) ;
- La fermentation lactique (2) qui entraîne la transformation du pyruvate en lactate (= acide lactique) et permet la régénération des coenzymes (NAD⁺) ;

<p>Glycolyse</p> $\text{Glucose} + 2\text{ADP} + 2\text{P}_i + 2\text{NAD}^+ \rightarrow 2 \text{Pyruvate} + 2 \text{ATP} + 2 \text{NADH} \quad (1)$ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \qquad \qquad \qquad \text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$ <p><i>Remarque : le glucose provient des réserves musculaires en glycogène ou du sang</i></p>
<p>Fermentation lactique</p> $2 \text{Pyruvate} + 2 \text{NADH} \rightarrow 2 \text{Lactate} + 2 \text{NAD}^+ \quad (2)$ $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3 \qquad \qquad \qquad \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$
<p>BILAN</p> $\text{Glucose} + 2\text{ADP} + \text{P}_i \rightarrow 2 \text{Lactate} + 2 \text{ATP} \quad (1+2)$

On a donc une production de deux molécules d'ATP par molécule de glucose avec un rendement global faible de 2%. Ce rendement est sous-estimé car les molécules de lactate sont ensuite recyclées.

Remarque : chez les levures, on observe une autre forme de fermentation nommée « fermentation alcoolique » dont le rendement est globalement identique à la fermentation lactique mais les molécules formées sont de l'éthanol (alcool) et pas du lactate (acide lactique).

Les principales étapes de la fermentation lactique



Encart - Lactate-acide lactique et crampes : une infox !

Le lactate (ou acide lactique, selon le pH) est souvent « accusé » de provoquer fatigue et douleurs musculaires (crampes et courbatures). C'est un mythe qui a la vie dure. Le lactate est produit en quantité pendant l'effort intense de courte à moyenne durée et cela coïncide avec une baisse de pH musculaire et des douleurs MAIS c'est une simple corrélation PAS une relation de cause à effet.

La baisse de pH musculaire est en revanche *probablement* liée à l'apparition de la fatigue musculaire.

Pour les crampes, les scientifiques n'ont toujours pas d'hypothèse solide.

<https://www.cairn.info/revue-staps-2001-1-page-63.htm>

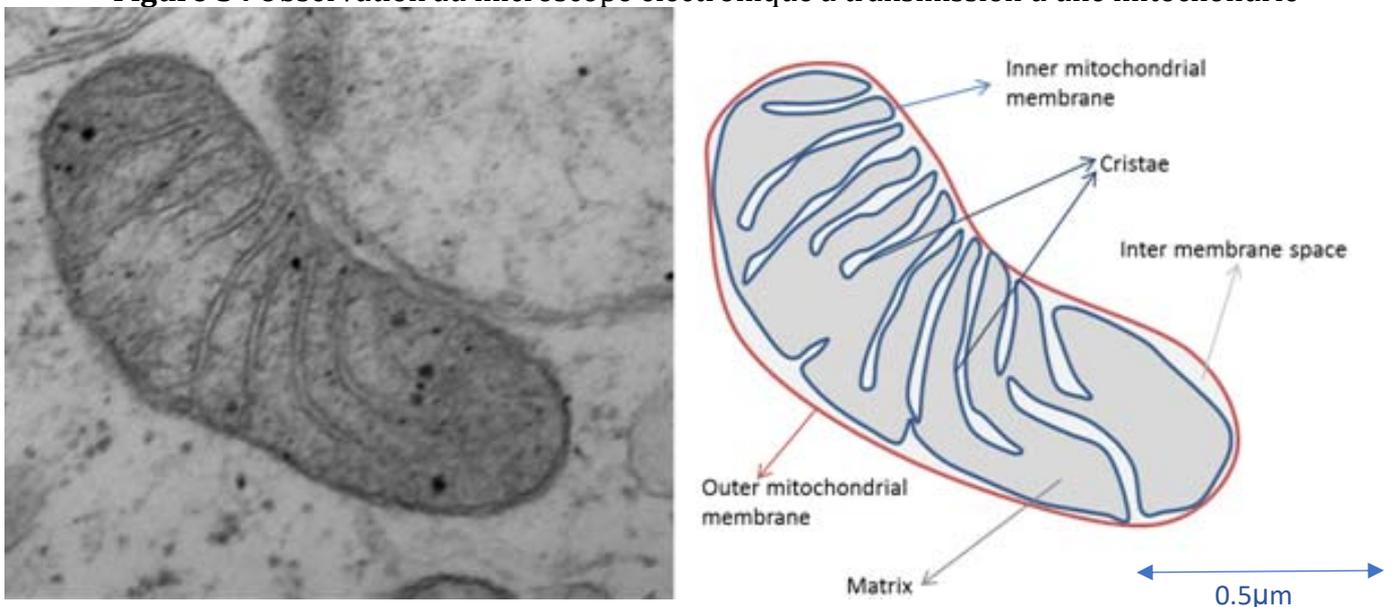


III - La respiration (voie aérobie)

La voie aérobie fait intervenir les **mitochondries** ; on peut la découpler en trois étapes qui permettent l'oxydation complète du glucose :

- La **glycolyse** au niveau cytoplasmique (voir paragraphe précédent) ;
- Le **cycle de Krebs** dans la mitochondrie ;
- La production d'ATP au niveau de la **chaîne respiratoire mitochondriale** ;

Figure 5 : Observation au microscope électronique à transmission d'une mitochondrie



nommé « chaîne respiratoire » qui va permettre la conversion de l'énergie des coenzymes NADH, en énergie pour produire de l'ATP au niveau de l'ATP synthase.

Au cours des réactions de la chaîne respiratoire, on a une consommation de dioxygène (accepteur final des électrons). Le bilan de la chaîne respiratoire mitochondriale peut être simplifié ainsi :

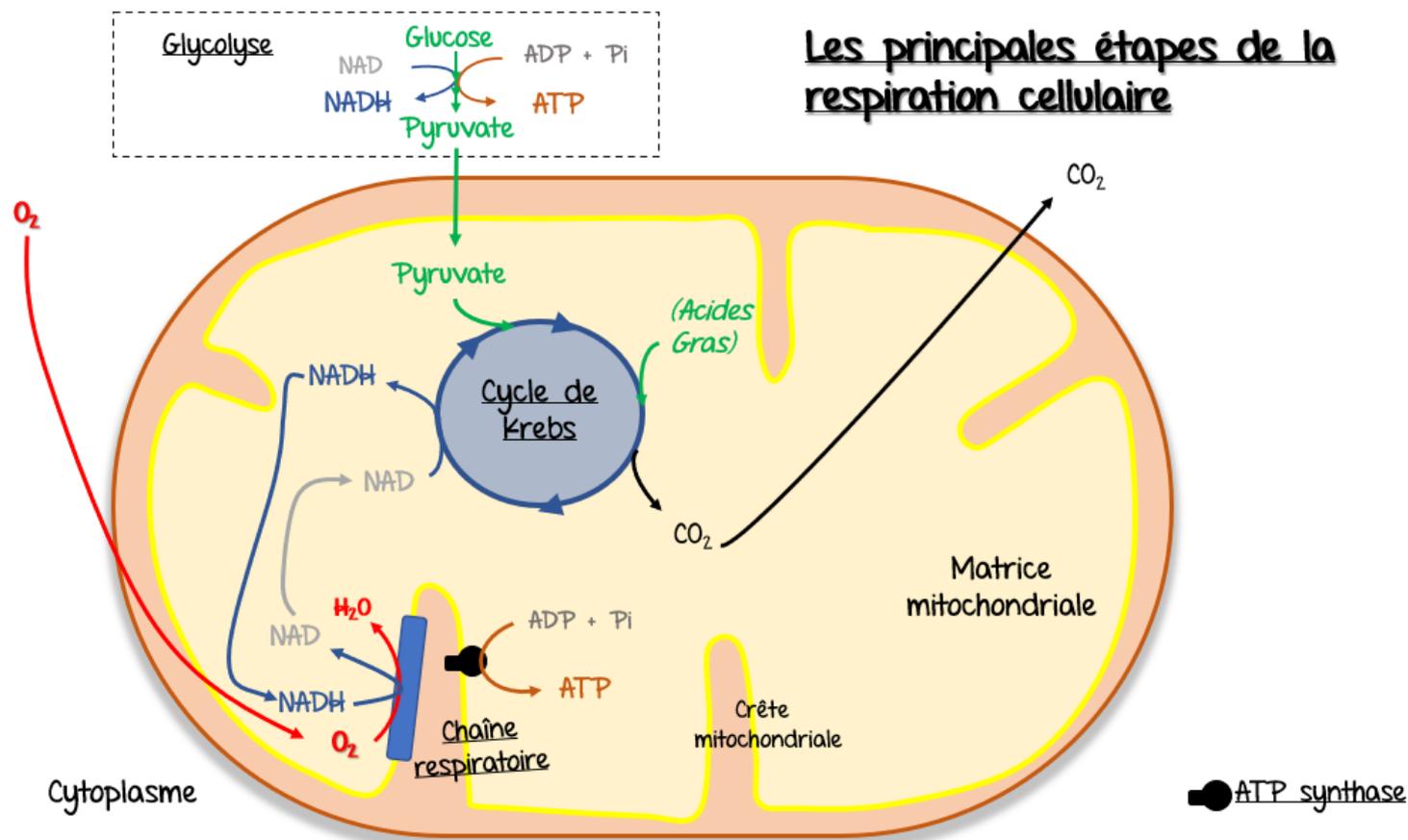


Rappel : le dioxygène consommé provient de la respiration (au niveau pulmonaire) et est transporté par l'hémoglobine jusqu'aux organes (ici les muscles).

III 4 - Bilan chimique et schéma de la voie aérobie

Dans le cas où le substrat initial est du glucose, on peut faire le bilan suivant :

<p>Glycolyse</p> $\text{Glucose} + 2\text{ADP} + 2\text{P}_i + 2\text{NAD}^+ \rightarrow 2\text{Pyruvate} + 2\text{ATP} + 2\text{NADH} \quad (1)$
<p>Cycle de Krebs</p> $2\text{Pyruvate} + 6\text{H}_2\text{O} + 10\text{NAD}^+ + 2\text{ADP} + 2\text{P}_i \rightarrow 6\text{CO}_2 + 10\text{NADH} + 2\text{ATP} \quad (3)$
<p>Chaîne respiratoire</p> $12\text{NADH} + 6\text{O}_2 + 32\text{ADP} + 32\text{P}_i \rightarrow 12\text{NAD}^+ + 12\text{H}_2\text{O} + 32\text{ATP} \quad (4)$
<p>BILAN de la respiration cellulaire</p> $\text{Glucose} + 6\text{O}_2 + 36\text{ADP} + 36\text{P}_i \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \mathbf{36\text{ATP}} \quad (1 + 3 + 4)$



Remarque : comme dans le cas de la photosynthèse, les coenzymes (NAD⁺/NADH) ne sont que des molécules de transfert qui sont renouvelés en permanence.

On constate donc que l'oxydation complète d'une molécule de glucose au cours du métabolisme aérobie permet la production (ou régénération) de 36 molécules d'ATP.

IV - Modifications du fonctionnement musculaire

Les muscles sont des organes qui présentent une certaine plasticité selon l'usage qui en est fait.

IV 1 - Les effets de l'entraînement sur le fonctionnement musculaire

On peut distinguer deux types d'entraînement :

- L'entraînement en endurance, avec des exercices prolongés d'intensité faibles à moyenne ;
- L'entraînement en résistance avec des exercices courts d'intensité très forte ;

Les conséquences sur les muscles et leur fonctionnement sont différentes selon le type d'entraînement :

Figure 6 : entraînement et effet sur les muscles

	Entraînement en endurance	Entraînement en résistance
Type de fibres Effet sur le muscle en général	<ul style="list-style-type: none"> ↗ fibres de type I (fibres lentes) ↗ nombre de fibres musculaires 	<ul style="list-style-type: none"> ↗ fibres de type IIB (fibres rapides) ↗ nombre de fibres musculaires ↗ nombre de l'épaisseur des fibres musculaires
Autres effets constatés	<ul style="list-style-type: none"> ↗ mitochondries ↗ capillaires sanguins (vascularisation) ↗ enzymes mitochondriales 	<ul style="list-style-type: none"> ↘ mitochondries
Conclusion	On a globalement une augmentation des capacités de la voie aérobie au niveau musculaire.	On a une augmentation du volume musculaire et de la puissance.

Sources : <https://www.revmed.ch/RMS/2006/RMS-74/31608> + http://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/2721/1994_8-9_868.pdf?sequence=1

Un entraînement adapté peut donc modifier la répartition des fibres musculaires (I/II) et le métabolisme énergétique du muscle.

IV 2 - Les effets du dopage - exemple de l'EPO

Le métabolisme par la voie aérobie est limité par l'approvisionnement en dioxygène du muscle. Cet approvisionnement en dioxygène dépend de nombreux paramètres physiologiques : fréquence cardiaque, volume d'éjection cardiaque, pression partielle du sang en O₂, intensité de l'effort réalisé, etc.

L'entraînement favorise le renforcement musculaire du cœur et donc le volume d'éjection cardiaque.

La pression partielle en dioxygène dépend notamment de la concentration en hémoglobine (une protéine qui transporte le dioxygène dans le sang).

L'érythropoïétine, ou EPO, contrôle la production de globules rouges dans l'organisme. C'est une hormone indispensable à l'érythropoïèse, le mécanisme qui, à partir de cellules souches, aboutit à la production d'érythrocytes ou globules rouges.

L'EPO favorise la production d'hémoglobine et donc l'apport en dioxygène au muscle. Il favorise donc le métabolisme aérobie pendant l'effort physique.

Cette molécule peut être fabriquée en laboratoire et est parfois utilisée comme substance dopante par les sportifs.

Figure 7 : la molécule d'EPO

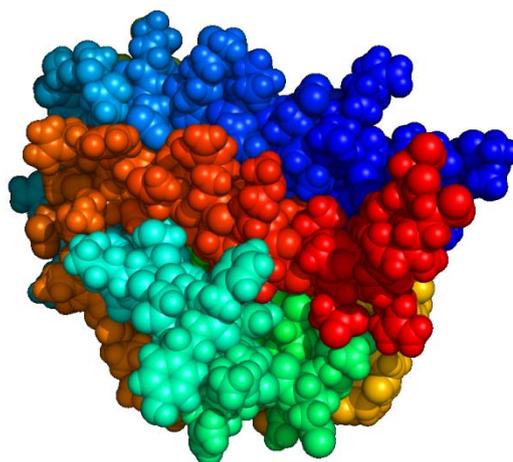
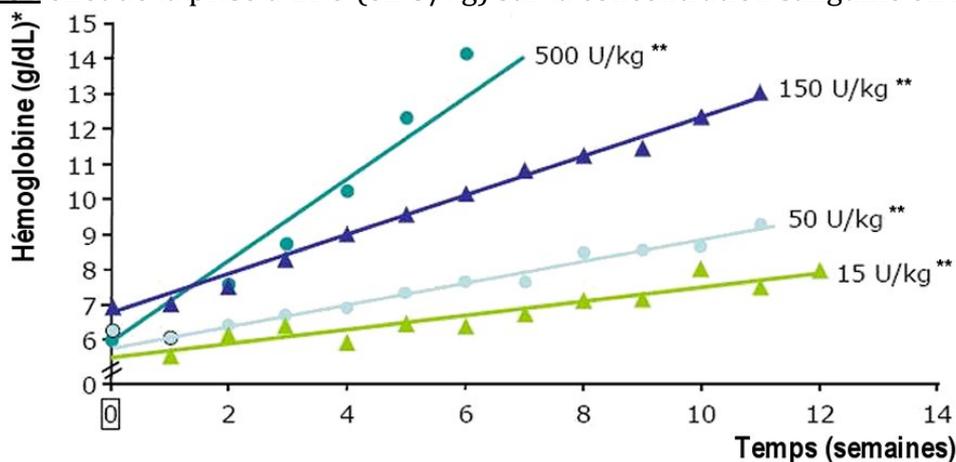


Figure 8 : effet de la prise d'EPO (en U/kg) sur la concentration sanguine en hémoglobine



* La quantité d'hémoglobine est calculée à partir de la mesure de l'hématocrite.
Moyenne pour 25 individus

** Trois fois par semaine

D'après Eschbach JW, et al. *N Engl J Med.* 1987;316:73-78.

Outre que l'utilisation de l'EPO dans une optique d'amélioration des performances va à l'encontre de l'éthique et de l'équité sportive, la lutte contre ce type de dopage est nécessaire, car il n'est pas sans conséquences délétères pour la santé du sportif. Les effets secondaires dangereux sont :

- Une augmentation de la viscosité sanguine (excès de globule rouge), et risque de complications cardiovasculaires et d'AVC ;
- Une augmentation du nombre de plaquettes et donc risque de thrombose artérielle pouvant aller jusqu'à l'infarctus ;

De plus, les effets de la prise régulière d'EPO sont mal connus à long terme.

Encart – Stage d'altitude et fabrication « naturelle » d'EPO

L'hypoxie sanguine, c'est-à-dire la faible quantité de dioxygène dans le sang, entraîne une fabrication naturelle d'EPO. Lors d'un stage en altitude, le peu de dioxygène dans l'air, entraîne une hypoxie et

donc une production d'EPO et une augmentation du nombre de globules rouges dans le sang. C'est pour cette raison que des stages sportifs sont organisés en altitude avant certaines grandes compétitions.

Conclusion

On s'interrogeait au début de ce chapitre sur les différents modes de renouvellement de l'ATP. On en a mis trois en évidence : **la voie des phosphocréatines** (voie anaérobie alactique), **la voie anaérobie lactique** et la **voie aérobie** (avec respiration mitochondriale).

On a également vu que selon le type et la durée de l'effort réalisé, les différentes voies métaboliques et les différentes fibres musculaires mises en jeu ne seront pas les mêmes. Dans le cas d'un exercice court et intense, les voies anaérobies et les fibres de type II seront utilisées. Dans le cas d'un exercice long de type endurance, la voie aérobie et les fibres de type I seront plus utilisées.

Nous avons globalement mis en évidence que l'ATP est renouvelé grâce à l'oxydation du glucose (ou des acides gras). Dans le chapitre suivant, nous allons montrer comment est régulé la quantité de glucose dans le sang (et dans l'organisme).

Pour s'entraîner :

Type 2 :

http://didac.free.fr/bac_s_archive_2013-20/ts19amerique_s/3s.htm (maladie de McArdle)