

# LES MÉTABOLISMES ÉNERGÉTIQUES

Se prendre le mur en marathon correspond à l'épuisement du stock de glycogène, environ 2000 à 2200 kcals stockées dans le foie et les muscles.

1 calorie = quantité d'énergie pour éléver la température d'un gramme d'eau de 14,5°C à 15,5°C

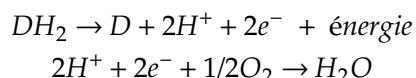
Il existe deux types de réactions, les **anaboliques** (énergivores) et **cataboliques** (libèrent de l'énergie). Les réactions anaboliques du corps humain ont un rendement d'environ 40%.

Les échanges d'énergie reposent chez les êtres vivants sur des réactions enzymatiques **d'oxydation**. Elles sont régies par la **perte d'électrons** (**enzymes respiratoires**), ou de **protons et d'électrons** (**déshydrogénases**) ou par **des gains d'oxygène** (**oxydases**).

Tout système d'oxydation biochimique établit un couple d'oxydo-réduction.

**Rappel :** l'élément qui cède un électron est le **réducteur**, celui qui capte est **l'oxydant**

Chez l'Homme, l'oxydant est l'oxygène.



L'énergie créée permet d'effectuer un travail : **mécanique, thermique, électrique ou chimique**.

## LES SUBSTRATS ÉNERGÉTIQUES

### Les glucides

- Glucides convertis en glucose, convertis en énergie ou glycogène ou lipides
- Glycogène stocké dans le **foie et les muscles**
- Son transport est assuré par des protéines spécifiques : les GLUT
  - GLUT-1 et -4 interviennent au niveau musculaire
- Les concentrations de glycogène musculaire diminuent avec l'exercice :
  - Ex sous max : déplétion importante surtout dans les fibres type I
  - Sinon plutôt type II
  - De l'ordre de -10%
- Régime hyperglucidique (70% de glucides) pendant plusieurs jours avant la compétition augmente les stocks hépatiques
- Apport exogène en glucide pendant l'exercice permet de reculer l'apparition de la fatigue
- Réplétion prend 24 à 48h, deux phases
  - Une par les GLUT-4

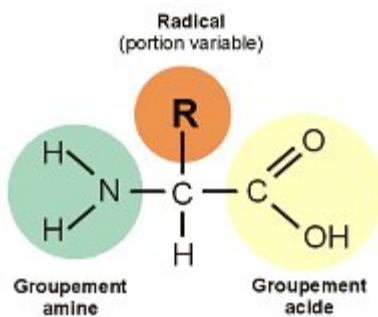
- Une par l'insuline

# Les lipides

- Stockés en grande quantité mais difficilement accessible
  - Seuls les **AGL** peuvent former de l'ATP
  - Stéroïdes et phospholipides ne permettent pas de former de l'ATP
  - Trois types de tissu adipeux :
    - Blanc, réserve de triglycérides et synthétiseurs d'hormones endocrines
    - Beige, intermédiaires
    - Brun, bcp de mitochondries, localisé dans des zones précises, augmentent la thermogenèse par leur capacité d'oxyder les acides gras et le glucose sans production d'ATP
  - Acides gras libres ou non estérifiés sont des acides monocarboxyliques saturés ou insaturés.
  - Participation des TG musculaires reste modérée à l'exercice (<30%)
  - Régime hyperlipidique accroît la B oxydation, mais pas la performance lors d'épreuves de longue durée
  - Diminution des réserves en glucose et glycogène stimule l'utilisation des lipides
  - Entraînement aérobio améliore le transport membranaire

## Les Protéines

- Contribution au métabolisme modeste
  - Néoglucogenèse ou lipogenèse à partir de protéine possible
  - Peuvent fournir jusqu'à 10% de l'énergie nécessaire lors d'un exercice prolongé
  - Groupement amine + carboxyle + radical
  - Protéine = chaîne d'aa via liaisons peptidiques
  - Synthèse protéique musculaire plus ou moins augmentée 2h après un exercice de résistance en fonction des aa consommés, mais à noter que cela ne reflète pas l'hypertrophie au niveau intégratif

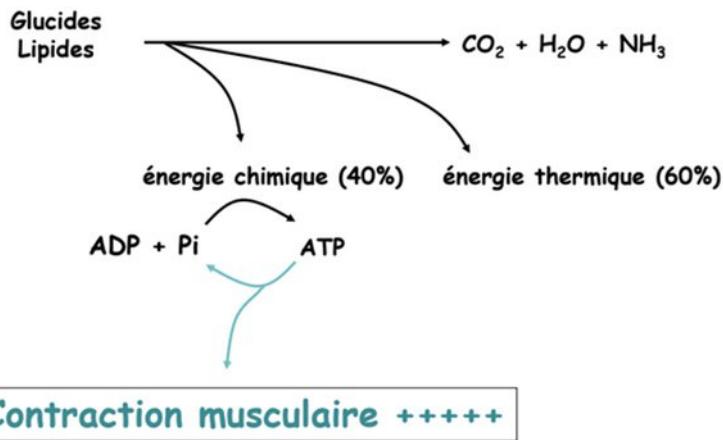


## CONTRÔLE DE LA PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE

- **Loi d'action de masse** : utilisation prioritaire des substrats en grande quantité
- Disponibilité en **cofacteurs** influencent le fonctionnement de l'enzyme et donc le débit métabolique de la voie
- Concentration élevée du produit final **diminue** la production du produit : elle influence l'activité de **l'enzyme limitante**

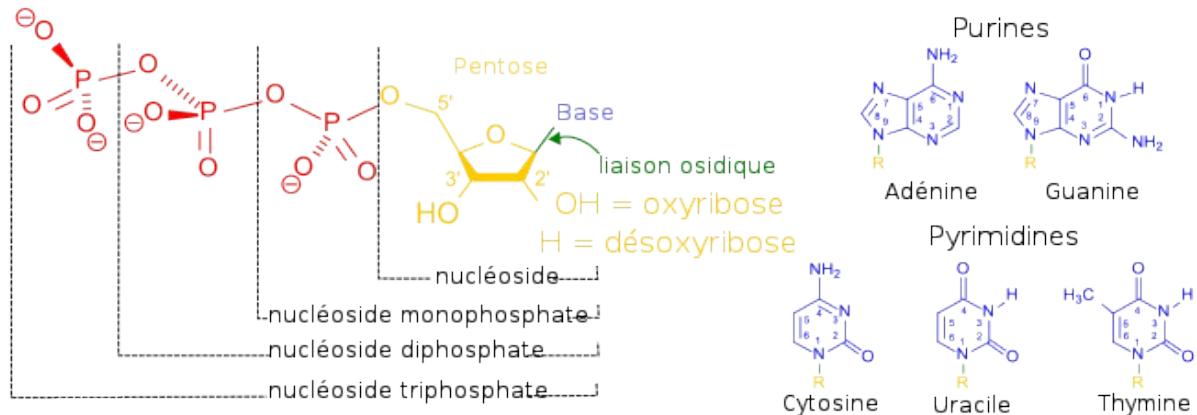
## L'ATP

Les glucides et les lipides sont **oxydés** pour produire de l'ATP.



ATP très peu concentrée dans les muscles  $\approx 5 \text{ mmol.kg}^{-1}$

L'ATP est un nucléotide à 3 groupements phosphate. Pour rappel :



Dans le cas de l'ATP, le pentose est le ribose, la base azotée de l'adénine. Adénine + ribose = adénosine. (Un nucléoside)

L'ATP sert à

- L'ATPase Na-K environ 10%
- ATPase Ca-Mg environ 20 à 30%
- ATP se fixe sur les chaînes légères de la myosine, environ 5% pour la phosphorylation de ces chaînes
- Et 65 à 80% par la myosine ATPase

## MÉTABOLISME CELLULAIRE

### La Glycolyse

Elle se déroule dans le **cytosol**, c'est le catabolisme du glucose en **pyruvate**. Elle est composée de 10 étapes, au cours desquelles on a :

**Glucose → 2 pyruvates**

On peut identifier 3 phases principales.

- **L'activation du glucose** (*Glucose → fructose 1,6-biphosphate via hexokinase/glucokinase*)  
Cette phase consomme 2 ATP
- **La scission** (*fructose 1,6-biphosphate → 2(3-Phosphoglycéraldéhyde)*)  
A partir de là, on a toujours 2 **métabolites** impliqués
- **L'oxydation**  
On a une oxydation : **NAD → NADH<sub>2</sub>**

Bilan un peu plus détaillé :



### GLYCOGÉNOLYSE

**Glycogène → G-6-P → 2 Pyruvates → 2 Lactates**

Processus similaire à la glycolyse mais utiliser un ATP de moins : il produit **3 ATP**.

### LE DEVENIR DU PYRUVATE

- Souvent par les fibres de Type I, et produit par les fibres de Type II
- 80 à 90% du lactate change de cellule pour être oxydé par diffusion passive, transport facilité ou par l'intermédiaire des MCTs (MonoCarboxylate Transporters)
- Il peut également être transformé en acide pyruvique puis en glucose dans le foie : **cycle de Cori**



L'oxydation du Lactate dans les mitochondries produit **17 ATP**, les ions H<sup>+</sup> par diminution du Ph entraînent un **acidose** et l'arrêt de l'effort.

Ou le pyruvate entre dans la mitochondrie et devient de l'**Acétyl-CoA** (*via la pyruvate déshydrogénase*) qui entraîne le cycle de Krebs et les phosphorylations oxydatives.

**Le devenir du pyruvate ne dépend pas de la disponibilité en O<sub>2</sub> car au niveau du muscle l'oxygène est toujours en quantité suffisante.**

**Quand la glycolyse est en action pendant un moment, les mitochondries sont saturées et le pyruvate se transforme alors en acide lactique pour obtenir un substrat énergétique plus rapide d'accès.**

L'apport de glucose exogène à raison de 60-75g/h pendant un exercice de course à 70% VO<sub>2</sub>max réduit la déplétion glycogénique d'environ 25% dans les fibres de type I.

### IMPORTANT !

Roberts et coll (2015) affirment que l'acidose lactique n'est pas liée à une production de protons par le lactate. L'acidose métabolique résultant de la glycolyse est issue principalement de l'[hydrolyse de l'ATP par la myosine ATPase](#). Ainsi, l'[hydrolyse de l'ATP](#), et non l'accumulation de lactate, serait la source dominante de la production acide qui accompagne l'anaérobiose. Lors d'exercices intenses !!!



Donc deux explications, ça ne réfute pas explication liée au lactate.

## Synthèse des glucides

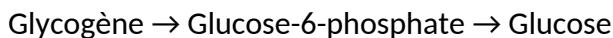
### GLYCOGENÈSE

Le glucose se trouve dans les compartiments sanguins. On colle juste des molécules de glucose pour en faire un polymère.

### LA GLYCOGÉNOLYSE

Le glycogène est un polymère de glucose qui se trouve exclusivement dans le foie et le muscle strié squelettique

- **Dans le foie** le glycogène peut être dégradé en glucose par phosphatase



Ce glucose rejoint le sang et [régule la glycémie](#)

- **Dans le muscle strié squelettique** le glycogène ne peut être dégradé en glucose, [on n'a pas de phosphatase](#)



### LA NÉOGLUCOGÉNÈSE

Ce processus se déroule dans le **foie et les reins**. On synthétise du glucose avec des substrats non glucidiques, dits [glucoformateurs](#).

Le [glycérol](#) peut devenir du G-3-P et [certaines protéines](#) du pyruvate.

## Métabolisme des lipides

### MÉTABOLISME DES TG

Les triglycérides sont la famille des lipides la plus abondante. Ils sont stockés dans les **adipocytes** et les amas d'adipocytes forment le **tissu adipeux**.

## Anabolisme des TG : la Lipogenèse

Les adipocytes synthétisent et stockent les TG au cours de l'apport alimentaire. Les acides gras sont synthétisés à partir d'ACoA.

## Catabolisme des TG : la Lipolyse

Pendant le jeûne les adipocytes hydrolysent les TG pour en faire du **glycérol** et **3 acides gras** qui sont libérés dans le sang.

## MÉTABOLISME DU GLYCÉROL ET DES ACIDES GRAS

### Catabolisme du Glycérol

Le glycérol est transformé en un intermédiaire de la glycolyse : le 3-phosphoaldehyde. (3GPA) Ce 3GPA devient du **glucose** (*néoglucogenèse*) si la **réserve en ATP est importante**, sinon en **pyruvate**.

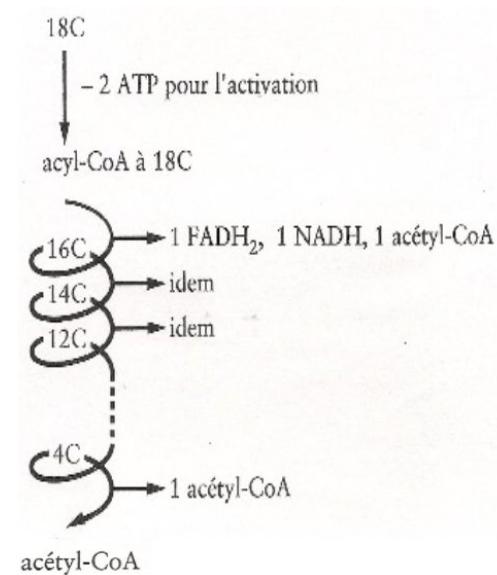
### Anabolisme du Glycérol

Il peut être formé à partir d'un intermédiaire du catabolisme du glucose

Glucose → 3GPA → Glycérol

### Catabolisme des acides gras (la $\beta$ -oxydation)

Se déroule dans la matrice mitochondriale par la  **$\beta$ -oxydation**.



On consomme 2 ATP pour activer l'Acide Gras en **AcylCoA**.

On retire 2 C à la fois pour former de **l'acétyl-CoA** (ACoA) à chaque étape ainsi que 1 NADH et 1 FADH<sub>2</sub>

Chaque ACoA entre dans le cycle de Krebs dans la matrice mitochondriale, et chaque co-enzyme activée dans les phosphorylations oxydatives dans les crêtes mitochondrielles.

On a  $8,5C-7 = 8,5 \cdot 16 - 7 = 129$ ATP (acide palmitique)

Soit 5 ATP par nombre de cycle-1, 12 par cycle, et -2 pour l'activation.

### Anabolisme des acides gras

ACoA + ACoA Donne un chaînon de 4 atomes de carbones, ce processus se répète et constitue une chaîne au rythme de 2 atomes de carbones à chaque fois. C'est un processus qui **consomme de l'énergie**, et se situe dans le **foie**.

## Métabolisme des protéines

### Catabolisme des protéines

Par **protéase**, les liaisons peptidiques peuvent être coupées. On peut alors avoir des acides aminés qui peuvent être catabolisés pour fournir de l'énergie, ou servir à la synthèse d'autres molécules.

Le catabolisme des protéines comprend l'extraction de l'atome d'azote et son élimination sous la forme d'urée dans le foie, et l'élimination des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène sous forme de CO<sub>2</sub> et d'eau dans le cycle de Krebs (à différents endroits en fonction des aa)

## Synthèse des protéines

Par transcription de l'ADN en ARNm par l'ARN polymérase et par traduction de l'ARNm en chaîne d'acide aminés dans les **ribosomes** on obtient les protéines.

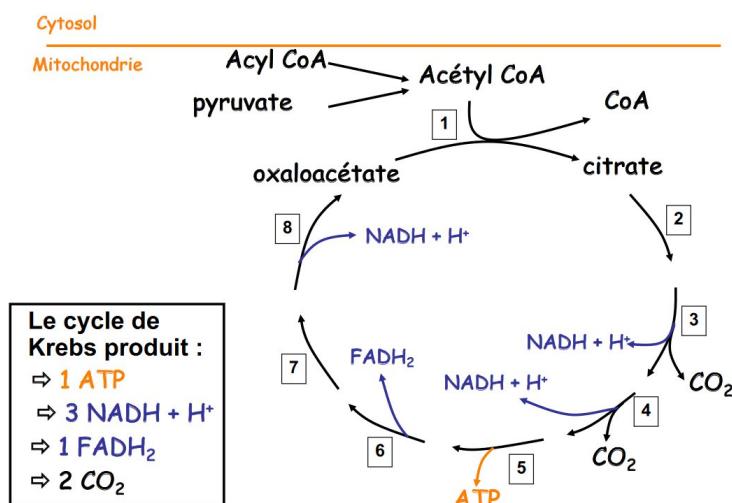
## Le cycle de Krebs

Il se déroule dans la **matrice mitochondriale**.



L'ACoA peut résulter du **pyruvate**, des **acides gras** ou de certains **acides aminés**.

Il est composé de 8 étapes dont 4 **réactions d'oxydation** qui produisent 4 **coenzymes réduits** (3 NADH<sub>2</sub> + FADH<sub>2</sub>), un ATP est aussi produit.



## Les phosphorylations oxydatives

Elles se déroulent dans les **crêtes mitochondrielles**, et nécessitent de l'oxygène pour se réaliser.

Les atomes d'hydrogène des Coenzymes réduits sont séparés en électrons et protons.

### LE DEVENIR DES ÉLECTRONS

Le transport des électrons est localisé au niveau de la membrane mitochondriale interne. Ils se déplacent d'un des 3 complexes à un autre et cèdent **une petite quantité d'énergie** (**équivalent de 0,5 ATP**) qui sert à **activer** ces complexes.

Le 1<sup>er</sup> complexe **oxyde** les NADH<sub>2</sub> en NAD, le 2<sup>e</sup> **oxyde** les FADH<sub>2</sub> en FAD.

Le 3<sup>e</sup> complexe permet de transférer **l'oxygène** de la molécule qui s'associe à des protons pour donner de **l'eau**.

## DEVENIR DES PROTONS

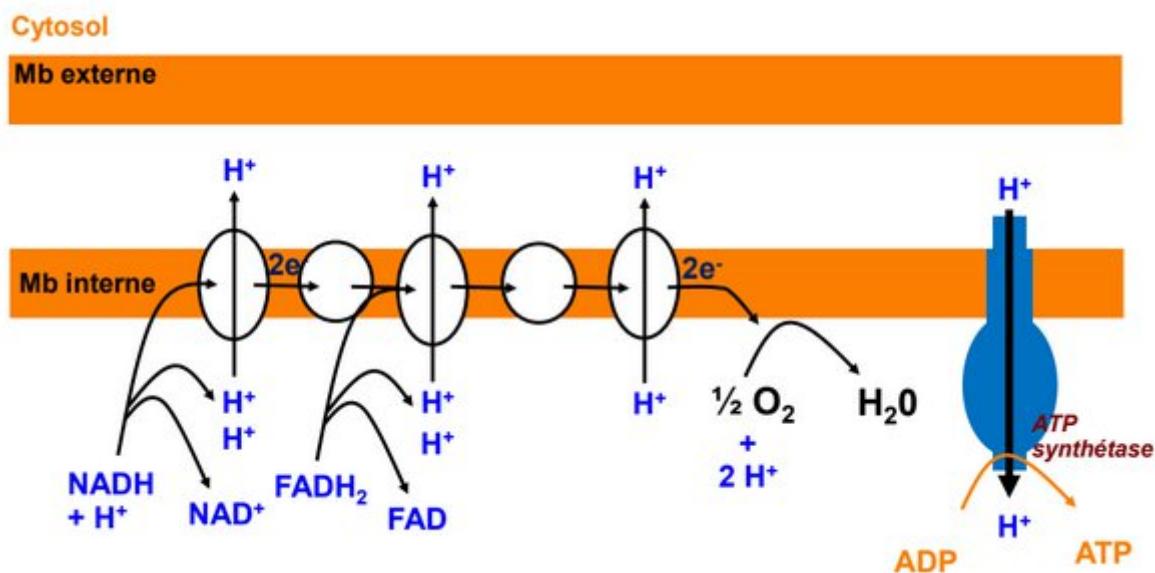
L'énergie libérée aux complexes par les électrons permet le transfert des protons de la matrice mitochondriale vers l'espace intermembranaire.

On a alors une concentration en protons importante dans l'espace intermembranaire, ce qui crée un **gradient électrochimique**.

Ils vont alors revenir dans la membrane interne via **ATP Synthétase** : on a alors



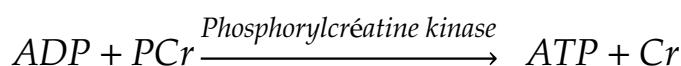
On synthétise 3 ATP pour 1 NADH<sub>2</sub> et 2 ATP pour 1 FADH<sub>2</sub>



## BIOÉNERGÉTIQUE : PRODUCTION D'ATP PAR LES VOIES MÉTABOLIQUES

### Système ATP-PCr (anaérobiose alactique)

Cette filière utilise l'ATP déjà en réserve dans le muscle, et la phosphocréatine.



La phosphocréatine est stockée dans le muscle, de 80 à 150 mmol.kg<sup>-1</sup> poids sec de muscle. C'est plus important que la réserve d'ATP mais beaucoup plus faible que les réserves de glucides ou lipides.

**Phosphagène** = contient un groupement phosphate (ATP, PCr)

Plusieurs isomères de la PCKinase : MM dans le muscle, MB dans le cœur et BB dans le cerveau.

Réaction se fait ou dans l'espace intermembranaire de la mitochondrie (PCKm) ou dans le cytosol (PCKc)

Synthèse de la créatine se fait à partir de 3 aa, débute dans le rein et libérée dans le tissu musculaire.

Concentration basale environ 3 fois supérieure à celle de l'ATP.

PC/C réaction réversible qui permet de tamponner la concentration de l'ATP

L'essentiel de l'ATP provient des réactions de la glycolyse et des oxydations mitochondrielles, même pour les exercices de courte durée (10s à 2Min)

### Resynthèse de la PC

Constante de temps de  $\frac{1}{2}$  de resynthèse de 40s, soit une réplétion majeure en 5 à 6min. Fonctionnement des mitochondries indispensable.

### ADÉNYLATE KINASE OU MYOKINASE



#### Avantages

- Immédiatement disponible
- Puissance d'effort considérable
- Ne nécessite pas d'oxygène
- Ne produit pas d'acide lactique, donc pas d'acidification

#### Inconvénient

- Capacité faible : effort court

## Système glycolytique (Anaérobie lactique)

Elle repose sur l'utilisation du glycogène (Muscle, Foie =  $250 \text{ mmol.kg}^{-1}$ ) et du glucose (apport du milieu sanguin). Elle utilise la **glycogénolyse** et la **glycolyse**. (Qui se rejoignent au niveau du G-6-P)

La glycolyse et la glycogénolyse créent de l'acide lactique qui se transforme en **Lactate + H<sup>+</sup>** qui rejoignent le compartiment sanguin. Ces protons sont responsables d'une **acidose**. (Diminution du Ph et arrêt de la contraction), même si le système qui produit le plus de protons et l'hydrolyse de l'ATP.

- Facteur limitant le lactate qui acidifie et inhibe le fonctionnement enzymatique et diminue la capacité des fibres à libérer le calcium
- Enzyme clé : **phosphofructokinase**



#### Avantages

- Inertie faible
- Ne nécessite pas d'oxygène
- Puissance élevée
- Capacité importante

#### Inconvénients

- Produit de l'acide lactique

## Système oxydatif (Aérobie)

- Dans la mitochondrie, excès d'oxygène néfaste
- Localisées en **péphérie** et proche des capillaires
- **Cytochromes**, des protéines agissant comme de petits aimants transfèrent les électrons d'un complexe à un autre

### OXYDATION DES GLUCIDES

Si le pyruvate ne se transforme pas en lactate, il peut rentrer dans la mitochondrie, se transformer en Acétyl-CoA et rentrer dans **Krebs** puis **phosphorylations oxydatives** et donne **30 à 36 ATP**. (+ 2 ou 3).

Ces valeurs sont cependant théoriques : en pratique, il existe des **pertes** dues à la **dissipation du gradient électrochimique par diffusion passive des protons à travers la membrane**, ce qui abaisse le rendement effectif de la phosphorylation oxydative.

### OXYDATION DES ACIDES GRAS

Par lipolyse les Triglycérides sont scindés en AGL et Glycérol et vont dans le compartiment sanguin.

Les acides gras sont activés en AcylCoA et subissent la **β-oxydation** dans la **matrice mitochondriale** et donne **des Acétyl-CoA et des coenzymes réduites**.

Ces acétyl-CoA entrent dans un cycle de **Krebs** chacun, puis **phosphorylations oxydatives** et donnent en tout pour 1 AG plus de 100 ATP : **8,5C – 7 ATP**

2500 kcals pour les réserves de glycogènes, contre environ **70 000 à 75 000 kcal** pour les cellules adipeuses

### OXYDATION DES PROTÉINES

- Assez faible, dépend des acides aminés
- Souvent **moins de 5%** de l'énergie totale dépensée
- Pour mesurer il faut connaître la quantité d'azote éliminée par l'organisme : collecter les urines

#### Avantages

- Capacité considérable (*théoriquement infini*)
- Ne produit pas d'acide lactique

#### Inconvénients

- Plus grande inertie
- Puissance faible
- Limitée par la VO<sub>2</sub> max

## INTERACTION DES TROIS SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

Les 3 systèmes agissent toujours ensemble mais dans des proportions différentes

Système énergétique	Nécessité de l'oxygène	Réaction chimique globale	ATP formée par seconde	ATP formée par molécule de Substrat	Capacité disponible
ATP-PCr	Non	PCr en Cr	10	1	< 15s
Glycolyse	Non	Glucose ou Glycogène en lactate	5	2-3	~1min
Voie aérobie	Oui	Glucose ou glycogène	2,5	(38-39) ou <b>32-</b>	~90min

(glucides)		en CO <sub>2</sub> et H <sub>2</sub> O		33	
Voie aérobie (lipides)	Oui	AGL ou triglycérides en CO <sub>2</sub> et H <sub>2</sub> O	1,5	> 100	En jours

## Le Concept du Crossover

Crossover point correspond au moment où **50% de l'énergie fournie vient des lipides et 50% vient des glucides**, en aérobie. Il dépend de chacun, de son entraînement en endurance et du régime alimentaire.

## Notion de PMA et VO<sub>2</sub> max

La PMA se détermine avec un exercice de puissance croissante. Si on y mesure l'O<sub>2</sub> consommé on arrive à un plateau de la consommation d'oxygène : c'est la **VO<sub>2</sub> max**. La **PMA** (*puissance maximale aérobie*) est la **plus petite puissante à l'atteinte de la VO<sub>2</sub> max**.

- Exercice à la PMA : maximal
- Exercice inférieur : sous-maximal, **endurance**
- Exercice supérieur : supra-maximal, **résistance**

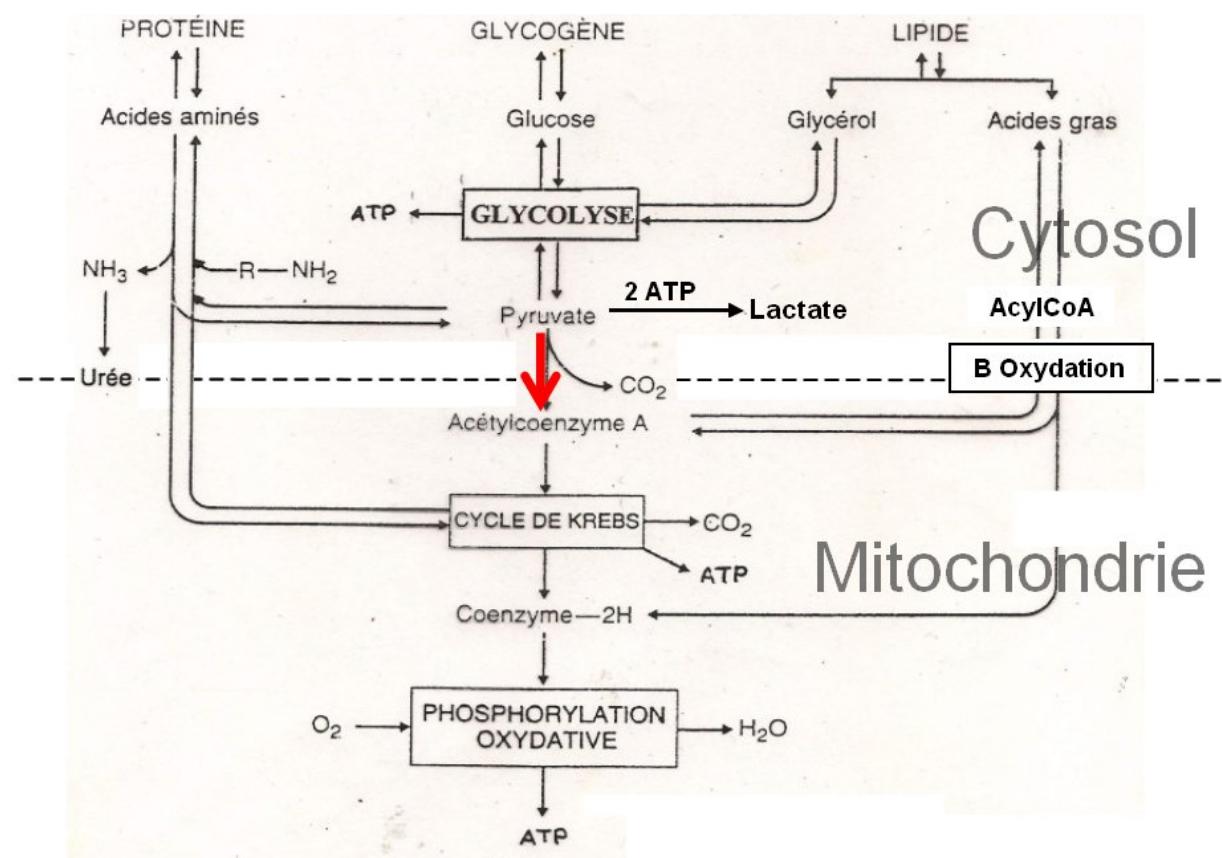
## Valeurs de VO<sub>2</sub> max

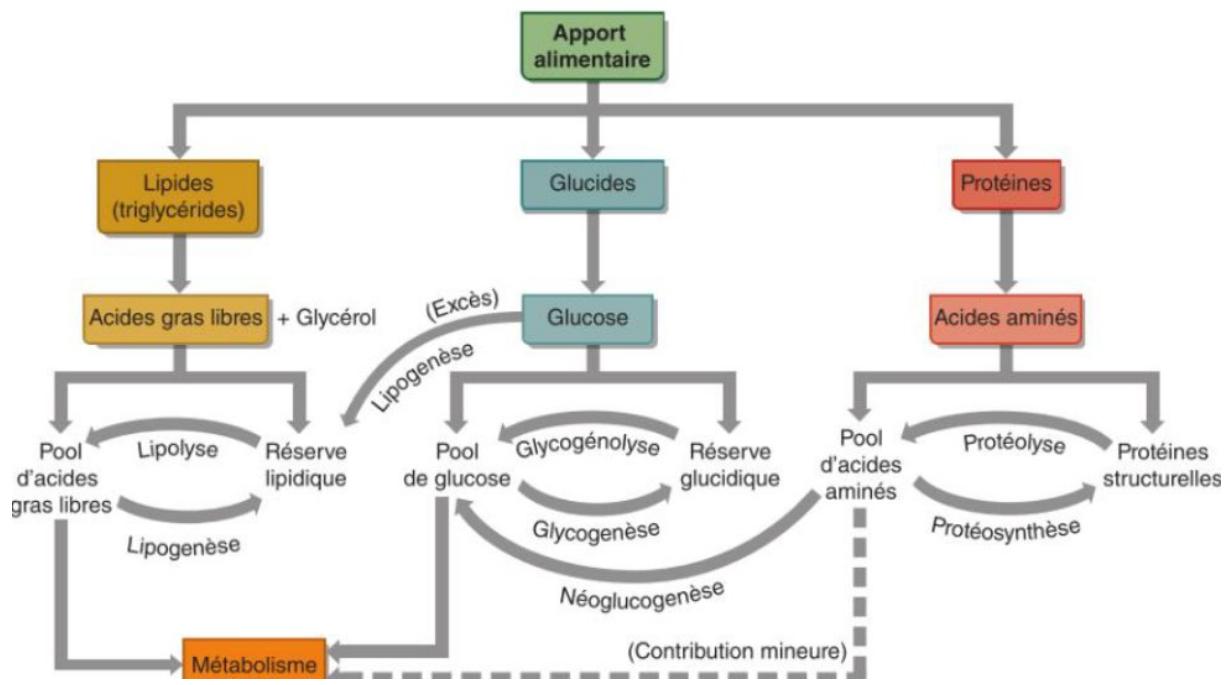
Chez un homme sédentaire, on tourne à **40 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>**, chez des sujets entraînés on monte de **50 à 70**, chez des sujets **très entraînés à 80**.

Chez une femme même valeur -12% en valeur relative, -30% en valeur absolue.

On a une diminution avec l'âge à partir de 20-30 ans.

## RÉSUMÉ





## LES ADAPTATIONS MUSCULAIRES À L'ENTRAÎNEMENT AÉROBIE

L'entraînement conduit à une augmentation de la **concentration de glycogène** et de **lipides intra musculaires**.

### Le type de fibre

L'exercice aérobie peut augmenter la **surface de section des fibres de type I** jusqu'à 25%. De plus, même si le type de fibre ne change que de peu il semble y avoir un **continuum évolutif** des fibres IIx vers IIa et IIa vers I.

Dans l'étude **HERITAGE**, sur un entraînement de 20 semaines on a pu observer :

	AVANT	APRÈS
<b>FIBRES TYPE I</b>	43%	47%
<b>FIBRES TYPE IIa</b>	Inchangé	Inchangé
<b>FIBRES TYPE IIx</b>	20%	15%

Cependant, la transformation de IIa vers I est assez controversée et pas retrouvée de manière systématique dans les études.

### La circulation capillaire

L'augmentation de la densité capillaire (*nombre de capillaires par fibre musculaire*) est une des adaptations les plus **importantes** à l'entraînement aérobie. Ce nombre peut augmenter de plus de 15% après un travail aérobie long et intensif.

Cette capillarisation supplémentaire augmente les **échanges gazeux** entre le sang et les muscles qui travaillent mais aussi pour les transferts de **chaleur** et de **nutriments**.

Probablement un **des facteurs le plus important** permettant d'expliquer le **gain de VO<sub>2max</sub>**.

### La teneur en myoglobine

Lorsque l'oxygène pénètre dans la fibre musculaire il se fixe sur la **myoglobine**, une molécule semblable à l'hémoglobine. La myoglobine **assure la navette** des molécules d'oxygène entre la membrane cellulaire et les **mitochondries**. Elle confère même aux fibres de type I leur **couleur rouge**.

Lors de la contraction musculaire, l'**oxygène stocké sur la myoglobine** est relâché vers la mitochondrie. Cette **réserve** est utilisée au tout début de l'exercice, elle permet de fournir l'oxygène avant que le système cardiovasculaire n'assure à son tour l'approvisionnement des cellules musculaires

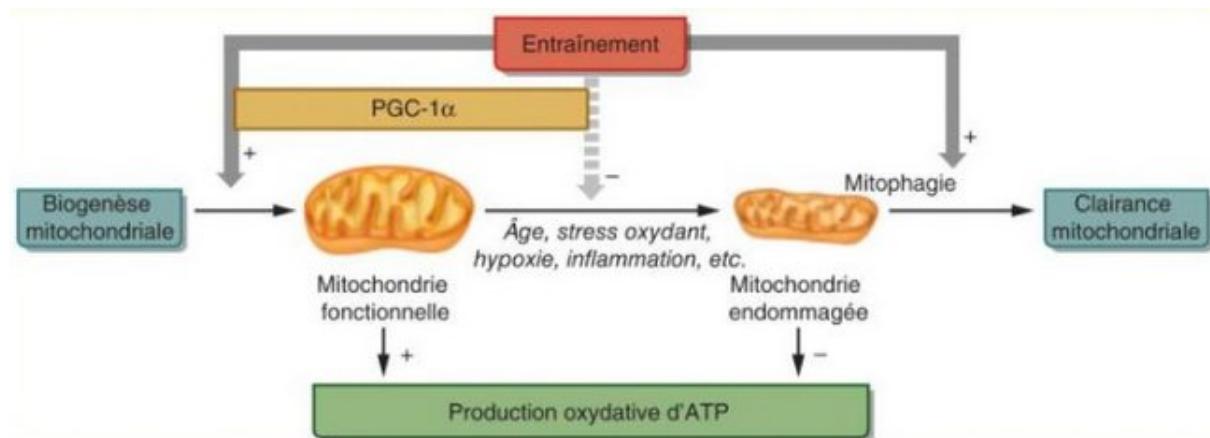
L'entraînement aérobie peut améliorer le contenu en myoglobine de 75 à 80%.

### La fonction mitochondriale

L'entraînement en aérobie améliore le **nombre de mitochondrie** (15% dans une étude chez des rats) et leur **taille** (35% dans la même étude).

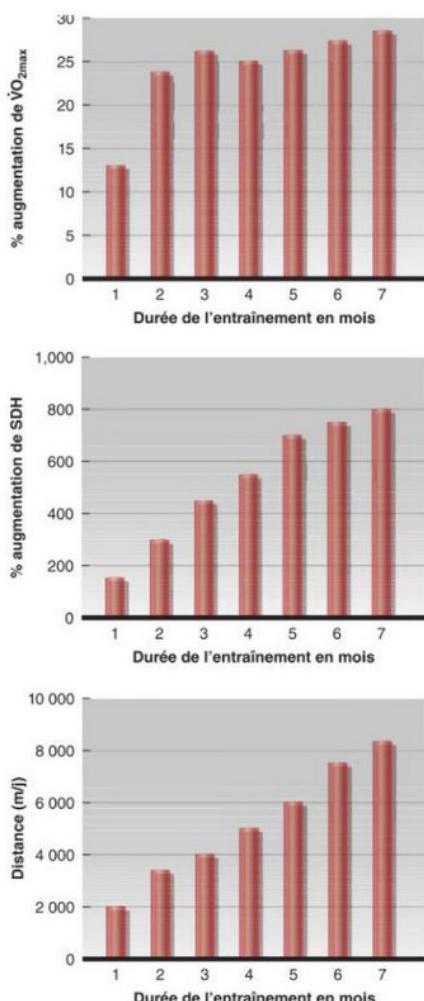
De plus, les mitochondries d'une fibre ne sont pas toutes aussi efficaces, de **nouvelles se forment** constamment (**biogenèse**), d'autres sont **éliminées** (**mitophagie**). La protéine **PGC-1a** est une protéine clé

impliquée dans la biogenèse mitochondriale. Les exercices aigus et l'entraînement qu'ils soient aérobie ou de musculation améliorent l'expression du PGC-1 $\alpha$ .



Il est important d'avoir un ajout de nouvelles mitochondries, mais le **maintien d'une population fonctionnelle** l'est tout autant. L'augmentation de **PGC-1 $\alpha$**  améliore non seulement la **biogenèse**, mais aussi le **remplacement des anciennes mitochondries endommagées** (hypoxie, inflammation, accumulation de sous-produits métaboliques) par de nouvelles fonctionnelles.

## Les enzymes oxydatives



L'augmentation du nombre et de la taille des mitochondries induite par l'entraînement aérobie contribue à améliorer l'aptitude oxydative du muscle. Les dégradations oxydatives des substrats métaboliques et la production d'ATP nécessitent des enzymes oxydatives mitochondrielles. L'entraînement aérobie améliore cette activité enzymatique.

On peut voir une augmentation de l'**enzyme succinate déshydrogénase** (SDH, complexe II de la chaîne respiratoire). A noter que, même si l'activité enzymatique continue de monter la  $\dot{V}O_{2\max}$  varie peu au cours des 2 derniers mois. Cela laisse supposer que  **$\dot{V}O_{2\max}$  est plus influencée par la capacité du système circulatoire de transport de l'oxygène que par le potentiel oxydatif musculaire**.

L'entraînement aérobie augmente également l'activité de la **citrate-synthase** (1<sup>ère</sup> étape de Krebs). L'entraînement quotidien, même modéré, peut augmenter l'activité de SDH de 25% par rapport à des sujets non entraînés. On peut monter même à une multiplication par 2 ou 3 dans un **entraînement plus conséquent**.

Une conséquence métabolique est donc l'**épargne du glycogène**. En effet, le muscle après entraînement utilisera **plus de lipides** que de glycogène pour une même intensité.

# LES ADAPTATIONS MÉTABOLIQUES À L'ENTRAÎNEMENT AÉROBIE

Trois variables liées :

- Seuil lactique
- Quotient respiratoire
- Consommation d'oxygène

Pour étudier l'utilisation des substrats : calorimétrie indirecte (échange des gaz, permet d'avoir QR), marquage par isotopes stables, mais aussi via dosages plasmatiques ou de la micro dialyse in situ.

Intensité de l'exercice qui augmente implique augmentation de l'utilisation des substrats glucidiques, **musculaires** notamment (et pas plasmatiques).

## Mesure des substrats

### ISOTOPES STABLES

Apport de molécules exogènes (traceurs) pour étudier l'utilisation des substrats. Les traceurs peuvent être : lipides, glucides, protéines, eau lourde. Après on mesure la spectrométrie de masse (en récupérant urines/gaz) et on a **dépense énergétique** et utilisation des substrats (en fonction du traceur choisi).

### DOSAGES PLASMATIQUES

Invasif, permet de mesurer la présence de différents substrats dans le sang (glucose, glycérol/acide gras...). On étude la différence artérioveineuse : indication indirecte de l'utilisation des substrats (glycérat plasmatique qui augmente peut refléter une augmentation de la mobilisation des lipides du tissu adipeux par lipolyse.)

### MICRO DIALYSE IN SITU

Très invasif, permet de mesurer la présence de différents substrats dans le liquide interstitiel du tissu adipeux. Indication directe de la mobilisation des substrats du tissu adipeux (par ex, augmentation de la concentration de glycérat dans le dialysat reflète une augmentation de la lipolyse adipocytaire.)

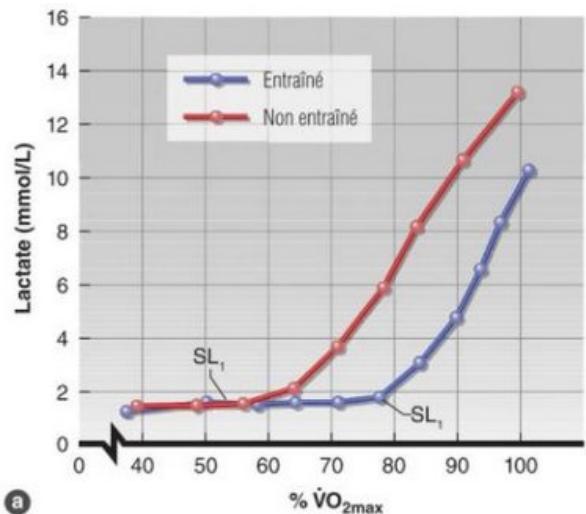
## Le seuil lactique

L'entraînement aérobie élève le niveau du seuil lactique. Le décalage du seuil vers la droite sur la courbe indique la possibilité de travailler à un pourcentage plus élevé de  $\dot{V}O_{2\max}$  avant que le lactate ne s'accumule dans le sang.

Plus les sportifs sont entraînés en aérobie, plus faible est leur lactatémie pour un même niveau d'exercice. On a une augmentation de la clairance du lactate.

On peut les dénommer plutôt « seuil lactate », alors on a, uniquement dans le sang :

- Seuil d'apparition du lactate = SV1



- Seuil d'accumulation du lactate = SV2

## Le quotient respiratoire

### DÉFINITION

La consommation d'oxygène lors du métabolisme est en fonction du type de substrat utilisé.

**Le Quotient respiratoire :**  $QR = \frac{\dot{V}CO_2}{\dot{V}O_2}$

Dans le cas des glucides :  $QR = 1$

**Ex du glucose :**  $6O_2 + C_6H_2O_6 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 32ATP \Rightarrow QR = \frac{6CO_2}{6O_2} = 1$

**QR au repos :** 0.78 à 0.80

On se rend compte que les lipides fournissent plus d'énergie mais il faut davantage d'oxygène ( $QR < 1$ )

Grâce à une table on peut alors retrouver la quantité de caloric libérée par chaque litre d'oxygène :

- Pour un QR de 1 (uniquement glucide) 5,05 kcal.L<sup>-1</sup>O<sub>2</sub>
- Pour un QR de 0,7 4,69 kcal. L<sup>-1</sup>O<sub>2</sub>

### APRÈS L'ENTRAÎNEMENT AÉROBIE

On peut voir après un entraînement aérobie que le QR s'abaisse à l'exercice sous-maximal tant en valeur absolue que relative. Cela témoigne d'une meilleure utilisation des acides gras libres plutôt que des glucides.

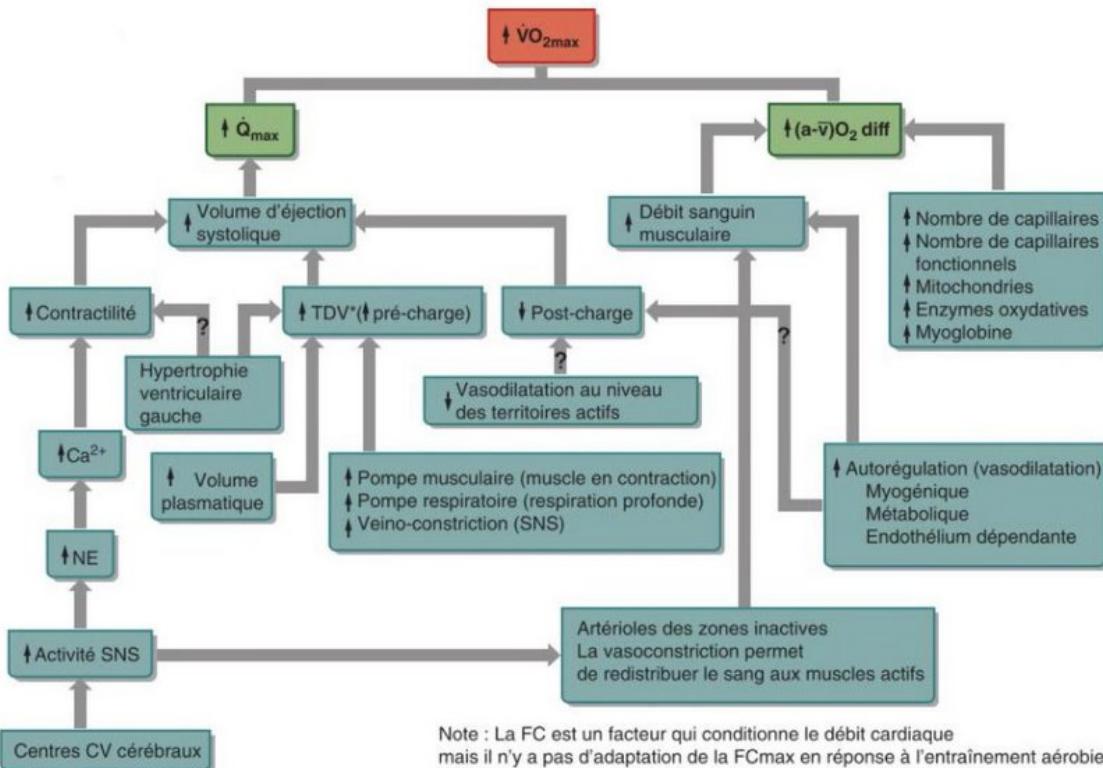
## La consommation d'oxygène au repos et à l'exercice sous maximal

La consommation d'oxygène au repos après un entraînement en endurance reste inchangée. Lors d'un exercice sous maximal, on peut soit observer une baisse légère (3,5%) avec une baisse concomitante du débit cardiaque. Mais cette légère baisse n'est pas toujours retrouvée, peut être expliquée par une amélioration de l'économie de course.

## La consommation maximale d'oxygène

$VO_{2\text{max}}$  est le meilleur indicateur de l'aptitude cardiorespiratoire à l'exercice aérobie. On peut s'attendre à un gain de 15 à 20% en 6 mois pour une personne débutante.

## CONCLUSION



## LES ADAPTATIONS À L'ENTRAÎNEMENT ANAÉROBIE

### Amélioration de la puissance et de la capacité anaérobie

Pas de meilleure méthode pour prédire le potentiel anaérobie comme la  $\dot{V}O_{2\max}$  en aérobio. On peut citer le test de Wingate : pédaler le plus vite possible pendant 30s contre une charge donnée. On observe le pic de puissance (entre 5 et 10s souvent), la puissance moyenne et le travail total (Puissance moyenne \* 30s)

Le pic de puissance est un index de la puissance maximale anaérobie, alors que la puissance moyenne et le travail total de la capacité maximale anaérobie.

### Adaptations musculaires à l'entraînement anaérobie

- Augmentation de la surface de section des fibres de type IIa et IIx (I aussi mais moins)
- Diminution du % de fibres de type I au profit des II (surtout IIa)

### Adaptations métaboliques à l'entraînement anaérobie

#### SYSTÈME ATP-PCR

Il semblerait que pour améliorer le taux d'activité de la créatine kinase, des exercices de 30s seraient plus efficaces que de 6s. Pourtant, les gains en force sur les deux types d'exercices sont similaires : 6s impliquerait alors plutôt dans le développement de la force musculaire, alors que 30s a réussi à améliorer le taux d'activité de la créatine kinase.

## **SYSTÈME GLYCOLYTIQUE**

Amélioration de l'activité de la phosphofructokinase, mais aussi phosphorylase, et lactate déshydrogénase. Peu d'information sur le sujet.