

LIERES ENERGETIQUES

INTRODUCTION :

➤ ATP et exercices :

L'ATP, c'est de l'adénine-ribose (adénosine) et 3 phosphates inorganiques qui ont entre chacun une liaison riche en énergie, dont « la lyse » va apporter l'énergie nécessaire à la contraction.

L'ATP, en présence d'enzymes de l'ATPase va donner de l'ADP plus un phosphate inorganique (Pi), et surtout de l'énergie, qui va être utilisée par le muscle pour se contracter.

Deux types de réactions sont possibles par le muscle :

- Une contraction avec déplacement (mouvement) : La contraction isotonique : la tension reste constante mais la longueur varie.
- Une contraction avec développement d'une force : La contraction isométrique : la tension va augmenter et produire la force du muscle, alors que la longueur reste constante.

Quelle que soit la contraction, le rendement musculaire est très faible (entre 22 et 23%).

➤ Les caractéristiques de l'ATP :

- Source exclusive d'énergie pour le muscle
- Rendement faible (énergie libérée sous forme de chaleur à un peu moins de 80%)
- Paradoxalement, bien que source exclusive d'énergie du muscle, les réserves sont très faibles (5-7 mmol/kg de muscle, ce qui représente l'ATP nécessaire à un exercice de 2 à 4 secondes)
- Le muscle l'utilise peu : la déplétion maximum (au maximum, ce que le muscle va perdre) est de 40% au repos

=> Il y a donc en permanence resynthèse d'ATP au cours d'un exercice.

1- LE RENOUVELLEMENT NECESSAIRE DE L'ATP :

Les **muscles** ont **besoin** de l'**énergie** stockée sous forme d'**ATP** (adénosine triphosphate) pour **se contracter** et nous faire avancer. Or les **réserves d'ATP stockées** par l'organisme sont **minimes** et ne permettent que **quelques secondes de travail musculaire (2 à 4 sec)**. La réaction de dégradation de l'ATP est la suivante :



C'est la **rupture** d'une **liaison phosphate** qui permet de **libérer** de l'**énergie** et forme de l'**ADP** (adénosine di-phosphate) et un **phosphate (Pi)**. Pour **continuer l'effort**, le corps doit donc en permanence **renouveler l'ATP** qui est aussitôt « **consommée** ». L'**ATP** est produite à partir des **substrats énergétiques**, qui sont obtenus grâce aux **aliments** que nous mangeons.

- **Pourquoi l'organisme ne stocke-t-il pas plus d'ATP ?**

On peut se demander pourquoi notre organisme ne stocke pas toute l'ATP nécessaire pour des efforts plus longs que quelques secondes. Dans ce cas, il n'aurait qu'à piocher dans ces réserves qui seraient alors reformées après l'effort.

Prenons le cas d'un **coureur** de **70kg** sur **10km**. Il va consommer environ **700kcal**, ce qui nécessite **700/7 = 100 moles d'ATP**. Le problème est que l'**ATP** est une **molécule très lourde, 507g par mole**, ce qui donne environ **50kg d'ATP** pour **courir un 10km** ! Imaginez le surplus de poids nécessaire ! Il est donc beaucoup plus judicieux de **former l'ATP selon les besoins**, en travaillant à « flux tendus » pour **éviter de le stocker**.

Les **substrats énergétiques** (les « carburants ») sont les **glucides, lipides, protéines** et qu'ils sont **utilisés** en **proportion différentes** selon l'**intensité** et la **durée** de l'**effort**, et également selon le **niveau d'entraînement**.

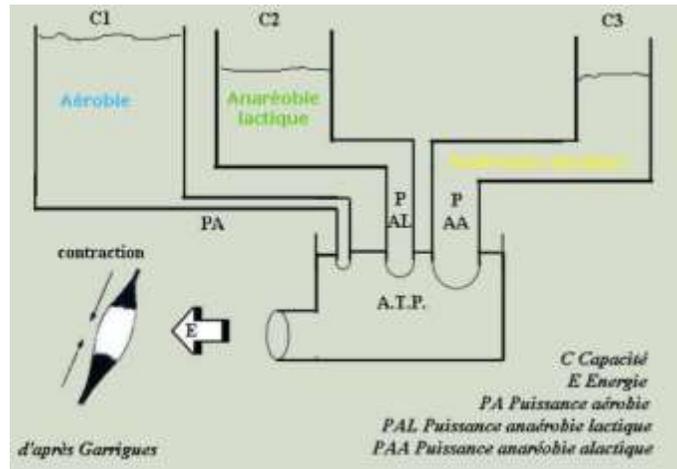
2- LES FILIERES ENERGETIQUES :

Il existe **3 filières énergétiques** qui permettent de fournir de l'ATP aux muscles au cours d'un effort. Deux d'entre elles sont dites **anaérobies** car elles ne nécessitent pas d'oxygène lors de la transformation des substrats en ATP. Ces 2 filières diffèrent par la production ou non d'**acide lactique** (elles sont qualifiées de **lactique** ou **alactique**). L'autre filière est dite **aérobie** car de l'oxygène est utilisée lors de la dégradation du substrat. En résumé, ces 3 filières sont :

- La **filière anaérobie alactique**
- La **filière anaérobie lactique**
- La **filière aérobie**

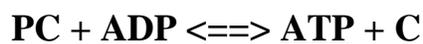
- **Puissance et capacité des filières énergétiques :**

La **puissance** d'une filière énergétique est la **quantité d'énergie produite par unité de temps**. On peut assimiler la puissance à un **débit d'énergie**. Plus la puissance sera grande, plus la quantité d'énergie libérée à un moment donné sera importante. La **capacité** correspond à la **quantité d'énergie fournie au total** (le « **volume du réservoir** »).



2-1- LA FILIERE ANAEROBIE ALACTIQUE :

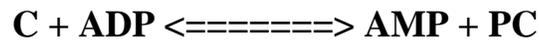
Cette filière est ainsi qualifiée car elle ne **nécessite pas d'oxygène** et n'**entraîne pas la production d'acide lactique**. Elle utilise l'**ADP** formée par la dégradation de l'ATP pour **resynthétiser de l'ATP** en utilisant la **phosphocréatine (PC)** :



Dès le **début** d'un **effort intense** (un sprint par exemple), la **phosphocréatine (PC)** cède un **phosphate (Pi)** à l'**ADP** pour former de l'**ATP** et permet, dans un premier temps, de **maintenir la concentration en ATP constante**. Malheureusement, les **stocks de phosphocréatine (PC)** sont **très limités** et ne permettent de **fournir l'énergie** à un **effort** de **(20-30 sec)** à **70% de VO₂max**, pas plus. La **concentration d'ATP baisse** alors et cette chute s'accompagne d'une **fatigue ressentie** par l'organisme. La **capacité de cette filière** est donc **très faible**, par contre sa **puissance** est **élevée** car la **libération d'énergie** est **rapide** : c'est la **filière des efforts courts et intenses** (sauts, lancers, sprints, etc.).

Après l'effort, les **stocks de phosphocréatine (PC)** sont **reconstitués** par la **réaction inverse**, en utilisant la **créatine (C)** formée lors de l'effort. D'où l'idée de certains d'**ingérer** de la **créatine** pour augmenter cette réserve d'énergie. Cette pratique est d'ailleurs répandue dans beaucoup de sport (mais **interdite** dans certains pays), mais certaines études ont montré la **dangerosité** d'une

telle méthode (la dose proposée aux sportifs est de **20g/jour**, ce qui correspond à la teneur en créatine de **4kg** de **viande rouge** !).



Lors d'un **sprint** de **100m**, la **phosphocréatine (PC)** participe à environ **50%** de l'**apport total** en **ATP**, l'autre partie étant apportée par la deuxième filière...

2-2- LA FILIERE ANAEROBIE LACTIQUE :

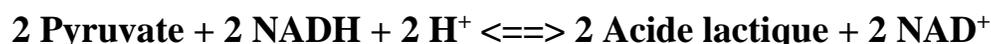
Cette filière correspond à la **dégradation** du **glucose sans utiliser d'oxygène** : c'est la **glycolyse anaérobie**. L'**avantage principal** de cette filière est sa **rapidité** pour **libérer l'énergie**. En effet, la **dégradation du glucose est rapide** (une **dizaine** de **réactions**) et elle ne **dépend pas** d'un **apport** en **oxygène** de l'air que nous respirons. La **puissance** disponible est toutefois **moins élevée** que la filière anaérobie alactique à cause de la **chaîne de réactions nécessaire** à la **libération** de l'**énergie**. En revanche, sa **capacité** est plus **grande** en raison d'un **stock** en **glycogène** (le substrat) plus important. La chaîne de réactions de la glycolyse anaérobie peut être résumée ainsi :



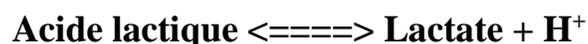
Le (NAD) **Nicotinamide Adénine Dinucléotide** est une **coenzyme** présente dans toutes les **cellules vivantes**. Le **NAD** existe sous une forme oxydée, notée **NAD⁺**, et une forme réduite, notée **NADH**.

Le **NAD** intervient dans le **métabolisme** comme **transporteur** d'**électrons** dans les **réactions d'oxydoréduction**, le **NAD⁺** comme **oxydant** et le **NADH** comme **réducteur**. Le **NAD** peut être **synthétisé in vivo** à partir du **tryptophane** et de l'**aspartate**, deux **acides aminés protéinogènes**, ainsi que de la **vitamine B₃** (niacine).

Cette partie est **commune** à la **glycolyse aérobie**. À ce stade, le **pyruvate** entre dans les **mitochondries** où il suit une **chaîne de réactions** appelées **cycle de Krebs** : c'est la **glycolyse aérobie**. Cependant, lors d'un **effort intense**, la **première réaction produit plus** de **pyruvate** **que le cycle de Krebs ne peut en consommer**, d'où son **accumulation** dans la **cellule**. Cet **excès** de **pyruvate** entraîne la **formation** d'**acide lactique** par la réaction suivante :



L'**acide lactique n'est donc pas responsable de l'acidité cellulaire** ! Il sert seulement d'**intermédiaire** pour les **protons H⁺**. L'**acide lactique** qui s'**accumule** se **dissocie** ensuite en **lactate** et **proton H⁺** :



Le **lactate** est **évacué** de la cellule vers le **sang**. Il est transporté et pourra ensuite être **recyclé**, notamment pour **former** du **glucose** après l'effort au niveau du **foie (néoglucogénèse)** ou pour

servir de **carburant** dans les organes capables de l'oxyder (principalement le **cœur** et les **muscles**). En fait, seule une **faible partie** du **lactate** est **éliminée** par le **rein** et la **sueur**.

La glycolyse anaérobie entraîne donc une acidification du milieu par accumulation de protons H⁺. L'**acidité** est l'**inconvenient principal** de cette filière. En effet, l'acidité entraîne :

- Le blocage la contraction musculaire
- Une baisse de la glycolyse anaérobie
- Une douleur difficile à soutenir

Finalement, l'enchaînement des réactions ci-dessus donne le bilan suivant :



Le **rendement** de la **glycolyse anaérobie** est donc **très faible**, puisque la **dégradation** d'une **molécule** de **glucose** ne fournit que **2 molécules** d'**ATP** !

Ex : L'**énergie dépensée** en **course à pied** est de **1kcal/kg/km**. Une personne de **70kg** a donc besoin de **700kcal** pour courir **10km**. La **dégradation** de **300g** de **glycogène** (environ la moitié du stock) ne permet de fournir que **24kcal** soit $\frac{24}{700} = 3,4\%$ de l'**énergie nécessaire**, soit les **340 premiers mètres** ! **Pas de quoi aller bien loin**... l'**utilisation exclusive** de **cette filière** serait même **dangereux** puisque la **totalité** des **réserves** en **glycogène** serait **rapidement épuisée** et qu'une **forte acidité** entraînerait la **mort des cellules**. Finalement, **heureusement** que la **fatigue** et la **douleur nous forcent à ralentir** et à **utiliser préférentiellement** la **filière aérobie** pour des **efforts moins intenses** mais **plus longs**.

2-3- LA FILIERE AEROBIE :

Cette filière permet la **synthèse** d'**ATP** grâce à la **dégradation** du **glucose** (via la **glycolyse aérobie**) ou des **acides gras libres (AGL)** (via la **bêta-oxydation** puis la **glycolyse**).

Les acides gras issus de la lipolyse (**dégradation** des **lipides** qui conduit à la libération des **acides gras estérifiant** du **glycérol** par **hydrolyse** des **glycérides** (**triglycérides**, **diglycérides** et **monoglycérides**)) sont ensuite métabolisés principalement selon une des deux voies suivantes :

- la **β-oxydation** : elle a lieu principalement dans les mitochondries et produit de l'acétyl-CoA à travers quatre réactions itératives formant « l'hélice de Lynen ». En présence d'oxygène, l'acétyl-CoA est intégrée au cycle de Krebs et produit du CO₂ et de l'énergie sous forme d'ATP ainsi que du pouvoir réducteur sous forme de coenzymes réduites (NADH).
- la **cétogenèse** : elle a lieu dans le foie. En période de jeûne (supérieure à dix-huit heures), le cycle de Krebs ne fonctionne plus car il est détourné pour produire du glucose par la néoglucogenèse. La bêta-oxydation des acides gras, uniques substrats énergétiques du foie, provoque alors l'accumulation d'acétyl-CoA dans les cellules hépatiques. L'acétyl-CoA est alors convertie en corps cétoniques qui sont exportés dans le sang pour être utilisés comme substituts au glucose (cœur/cellules nerveuses). En excès, ils s'évacuent dans l'urine ou s'évaporent par les poumons en provoquant une haleine rance.

Pour le **glucose**, la **première partie** de dégradation est **identique** à la **glycolyse anaérobie**, c'est-à-dire qu'il y a **formation** de **pyruvate** à partir de glucose dans la cellule. Nous avons vu que

cette partie libère seulement **2 molécules d'ATP par molécule de glucose**. La suite est différente, le **pyruvate** entre dans les **mitochondries** où il suit le **cycle de Krebs**. La **partie aérobie** de la **dégradation** du **glucose** permet de libérer **36 molécules d'ATP** (des fois vous trouverez 37 molécules d'ATP) soit **38 au total** (ou 39) pour une **molécule de glucose**. On est loin des **2 ATP** pour la **glycolyse anaérobie** ! La **filière aérobie** a donc une **capacité** bien **plus grande** que les deux **filières anaérobie**. Voici son bilan :



La **production** d'**ATP** s'accompagne de **CO₂** et d'**H₂O** qui sont **éliminés** par la **respiration** et la **sueur**. Elle n'**engendre pas d'acidité**. De plus, la **filière aérobie** n'est **pas dépendante** du **glucose** et permet de **dégrader** les **acides gras libres (AGL)** stockés dans le **tissu adipeux** (via la **lipolyse**). Leur **oxydation** fournit encore **plus d'énergie** que celle du glucose **mais consomme** en revanche **plus d'oxygène**.

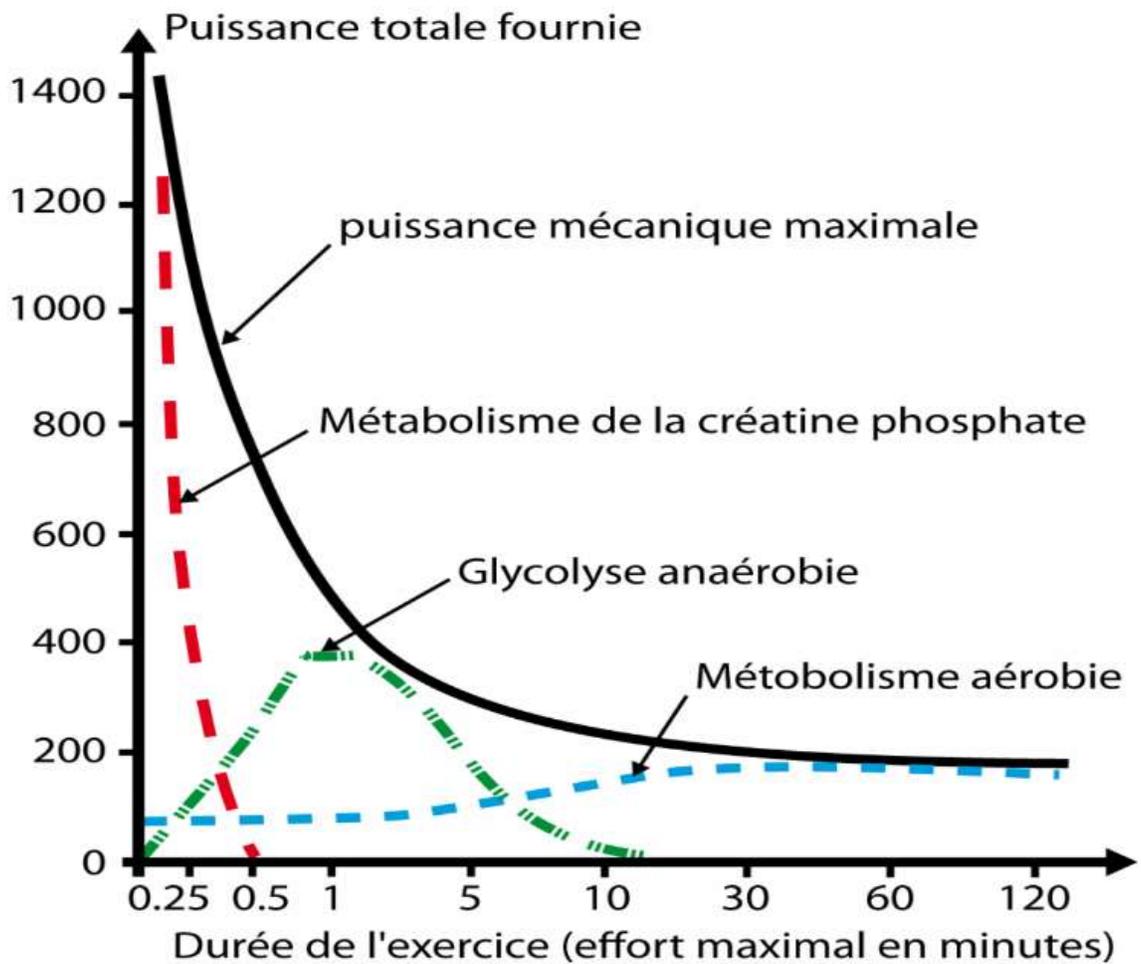
Ces **deux chaînes de réactions** étant **plus longues** que celles des filières précédentes, leur **délai** pour **fournir** l'**énergie** est **plus long** d'où une **puissance plus faible**. **Grande capacité** et **faible puissance** : la **filière aérobie** est la **filière** de l'**endurance** !

La **filière aérobie** utilise aussi bien les **glucides** que les **lipides** pour fournir de l'**ATP** aux muscles. La **proportion glucide/lipide varie** en fonction de l'**intensité** et la **durée** de l'**exercice** et aussi en fonction du **niveau d'entraînement**.

3- BILAN SUR LES FILIERES ENERGETIQUES :

	Anaérobie alactique	Anaérobie lactique	Aérobie	
	ATP, PC	Glycogène	Glycogène	Acides gras libres
100m	48%	48%	4%	0%
200m	25%	65%	10%	0%
400m	12.5%	62.5%	25%	0%
800m	6%	50%	44%	0%
1500m	0% (sprint final)	25%	75%	0%
5000m	0% (sprint final)	12.5%	87.5%	0%
10km	0% (sprint final)	3%	97%	0%
marathon	0% (sprint final)	1%	79%	20%
Ultra-travail	0% (sprint final)	0%	40%	60%

Cette proportion relative des 3 filières énergétiques est résumée dans le graphique ci-dessous, appelé **courbe d'Howald**.



*Courbe d'Howald schématisant la proportion relative des 3 filières énergétiques selon la durée de l'effort.
D'après Howald (1974).*