LA CHIMIE DE L'EFFORT

Les différentes sources d'énergie du muscle lors de l'effort Magnésium et effort musculaire

A) Les différentes sources d'énergie du muscle lors de l'effort

1. L'énergie de la contraction musculaire provient de l'hydrolyse de l'ATP

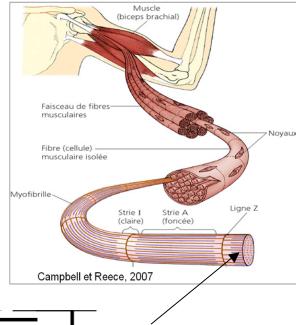
1.1. La contraction musculaire

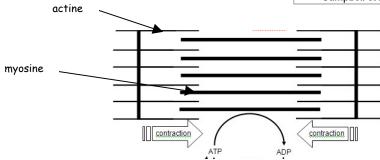
L'effort est toujours associé à une contraction des muscles squelettiques (muscles liés aux os). C'est la contraction des muscles qui entraîne le déplacement des os et le mouvement.

Au niveau moléculaire, la contraction du muscle est du au déplacement de longs filaments protéiques : (nommés actine et myosine). Ce déplacement

- Consomme de l' ATP
- Nécessite du calcium

Le muscle se raccourci car les filaments glissent les uns par rapport aux autres et s'encastrent





Remarque : Le calcium est stocké dans un compartiment de la cellule, libéré au moment de la contraction puis recapturé. Il « circule » mais n'est pas consommé au sens propre. Il est « réutilisé » plusieurs fois.

1.2. L'ATP Adénosine Triphosphate

L'ATP est une molécule à haut potentiel d'hydrolyse, à cause des liaisons entre les deux phosphates (liaison anhydride d'acide ou pyrophosphate)

L'ATP est l'hydrolysé en ADP + Pi : réaction fortement exergonique.

ATP +
$$H_2O \rightarrow ADP + Pi \qquad \Delta G'O = -30.5 \text{ kJ.mol}^{-1} \text{ (à pH=7 et } 37^{\circ}C\text{)}$$

Remarque : dans la cellule, les concentrations en Pi sont faibles, et le ΔG observé est de l'ordre de - $45~\mathrm{kJ.mol}^{-1}$

Question : Les quantités d'ATP dans la cellule sont réduites, d'où provient l'ATP pendant l'effort?

2. Les origines possibles de l'ATP pendant l'effort musculaire

2.1. Les phosphagènes : réserves immédiates d'ATP

La cellule contient une faible quantité d'ATP libre. Mais une autre molécule présente dans les muscle constitue aussi une réserve immédiate d'ATP : la créatine phosphate

L'ATP + la créatine P constituent les PHOSPHAGENES.

Quantité totale : environ 25 mmol.kg⁻¹ de muscle

Cet ATP est libéré <u>instantanément</u> en cas de besoin, pas de latence.

Mais les réserves sont rapidement épuisées : en quelques secondes

(Calcul très théorique...

0,025 x 45 = environ 1 kJ.kg-¹ muscle soit un travail de 12 KJ pour un sprinter qui aurait 12kg de muscles dans les jambes !!! Sur 1 seconde, la puissance maximale développée grâce aux phosphagènes serait de 12kW

D'où provient l'ATP lorsque ces réserves sont épuisées ? L'ATP sera fourni par oxydation de molécules organiques :

- D'un glucide : le glucose

- Eventuellement des acides gras

2.2. Le glucose comme source d'énergie lors de l'effort

a) Glucose disponible et réserves de glucose

Le glucose est un ose, présent dans le sang à une concentration stable de 1g/L soit 5 mmol/L (glycémie).

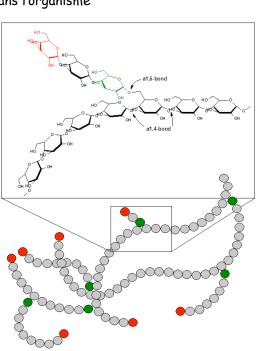
Il traverse la paroi des capillaires sanguins et pénètre dans les cellules musculaires.

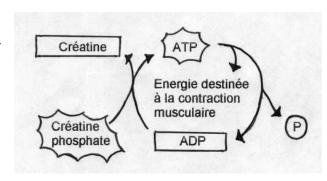
Quantitativement : 5L sang = 5 g de glucose, c'est très peu ! De plus, si le glucose est prélevé, la glycémie devrait baisser. Or, elle reste à peu près constante même pendant l'effort. Il y a donc des réserves de glucose dans l'organisme

Le glucose est stocké sous forme de **glycogène** : chaîne ramifiée de glucoses reliés par des liaisons $\beta(1,4)$ osidiques, les ramifications sont constituées de liaisons $\alpha(1,6)$.

Les seuls organes capables de stocker le glycogène (donc les glucides) sont :

- Les muscles: environ 14 g/kg de muscle soit environ 400 g pour un homme de 70 kg. Mobilisé en premier (sur place)
- **Le foie** : le glycogène hépatique (environ 60 à 100g selon l'individu). Doit passer dans le sang





b) L'utilisation du glucose en aérobiose

Lorsque le muscle est suffisamment oxygéné par le sang, le glucose est totalement oxydé en CO_2 : on parle de **voie aérobie**:

Glucose + 6
$$O_2 \rightarrow$$
 6 CO_2 + 6 H_2O + 36 ATP / glucose

Cette réaction est une oxydo-réduction : les électrons passent du glucose (donneur) vers l' O_2 qui est l'accepteur d'électrons ; l' O_2 est réduit en H_2O .

Dans la cellule, cette réaction se fait par étapes : c'est la glycolyse (cytosol) suivie du cycle de Krebs (mitochondrie). On parle aussi de la respiration du glucose

Le rendement énergétique **est élevé** car l'oxydation est totale : **36 ATP/glucose** Le CO_2 (acide faible) est éliminé par la respiration pulmonaire La mise en route de cette voie demande un délai de quelques minutes.

c) L'utilisation du glucose en anaérobiose

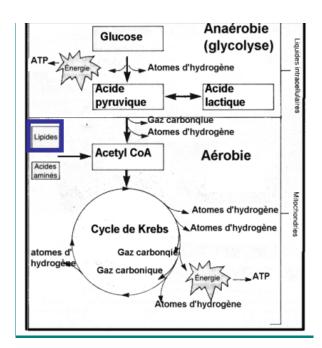
Lors d'un effort violent, l'oxygène n'est pas apporté aux muscles en quantité suffisante. Le glucose doit alors être oxydé par une autre voie : c'est la voie anaérobie lactique.

Le glucose entre la dans la voie de la glycolyse mais son oxydation est incomplète et abouti à un résidu : l'acide lactique qui se dissocie en lactate $+ H^+$ (pKa couple acide lactique/lactate = 3.8).

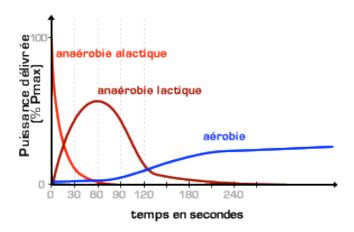
- Le rendement énergétique est faible : 2 ATP/glucose donc ce mécanisme ne peut pas durer longtemps
- La réaction entraîne une acidose

Conclusion : 3 filières possibles de production d'ATP pendant l'effort

voie	substrats
voie anaérobie alactique	ATP + créatine P
voie anaérobie lactique	Glucose 🛘 acide lactique
voie aérobie	Glucose (ou acides gras) [CO2



3. L'utilisation des différentes filières énergétiques pour différents types d'efforts



3.1. Les efforts de très courte durée (qqs sec à 20 sec) mais de type « explosifs »

Saut, sprint, lancer de poids

Utilisation presque exclusive de l'ATP immédiatement disponible : donc ATP + créatine phosphate. (On parle aussi de voie anaérobie alactique)

Pas de délai, mais délai de récupération (pour reconstituer les stocks après l'effort grâce à la voie aérobie)

Puissance possible 4 à 12KW

3.2. <u>Les efforts de durée moyenne (20 sec à 2 minutes)</u>, de puissance élevée supérieure à la PMA

courses 400m, 800m, natation (400m, 800m), gymnastique (agrès), ski de descente.

Utilisation d'abord des phosphagènes puis de la voie anaérobie lactique.

L'oxygène est le facteur limitant :

- l'organisme ne s'est pas encore adapté au niveau respiratoire et ventilatoire
- Le volume d'O2 qu'il faudrait ne pas peut pas être apporté

Les muscles sont OBLIGES de travailler +/- en anaérobiose.

L'acidose est temporaire, car le foie utilise le lactate comme substrat énergétique et l'oxyde en CO_2 (le lactate a disparu environ 1h après un effort intense). Cette oxydation AEROBIE du lactate consomme de l'oxygène.

La durée d'un tel effort est limitée par

- la fatique musculaire (mécanique)
- L'acidose (peut être douloureuse mais temporairement : sensation de brûlure lors d'un effort bref)
- L'épuisement rapide du glycogène musculaire

L'acidose est accusée à tort :

- des crampes (origine +/- inconnue, liée à des déséquilibres minéraux provoquant une hyperexcitabilité des neurones)
- des courbatures du lendemain (en fait liées aux micro-déchirures entraînent une inflammation du muscle qui cause de la douleur musculaire)

3.3. Les efforts de longue durée (> 3 minutes, jusqu'à plusieurs heures), de puissance modérée et inférieure à la PMA : épreuves de type endurance

(10km, 20 km, marathon, vélo, ski de fond).

Au départ, les voies anaérobies sont utilisées

L'organisme doit s'adapter et augmenter sa capacité d'oxygénation des muscles.

Au bout de 2/3 min, tout l'ATP est produit par la voie aérobie.

a) Notion de VO2 max et PMA

Lors d'un effort long, l'oxygène est le facteur limitant : le VO_2 (volume d'oxygène) consommé peut augmenter en augemntant le débit ventilatoire (essoufflement) et le débit cardiaque (fréquence et force des contractions)

Chaque individu a un VO_2 max (en L.min⁻¹) : volume d'oxygène maximal consommé par minute. L'entraînement \uparrow le VO_2 max

On appelle PMA la puissance maximale aérobie la puissance atteint lorsqu'un effort est produit avec un VO_2 max.

Un effort à 100% du VO² max ne pas être soutenu plus de 7/8 minutes.

Un travail en endurance correspond à un effort soutenu et long de puissance inférieure à la PMA (70/80% de la PMA); Il est donc uniquement (ou presque) aérobie.

Un effort de puissance > à PMA fait obligatoirement appel à la voie lactique et est impossible sur une durée de plus de quelques minutes ;

b) Les substrats consommés lors d'un effort long

Le glucose issu du glycogène musculaire et **surtout hépatique** est le principal substrat. Il est suffisant pour un effort de environ 2h.

Lors d'un effort long, la part des acides gras consommés augmente de plus en plus et épargne le glycogène.

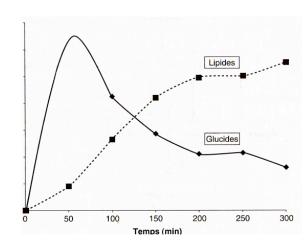
La part des lipides devient significative au bout de 30 minutes environ puis atteint 50% de l'énergie produite en une heure à deux environ.

Au bout de 3h, les réserves de glycogène sont épuisées et l'organisme doit puiser uniquement dans ses graisses : ceci correspond au « coup de barre » classique des marathoniens au bout de 3h.

Important : La glycémie doit être maintenue coûte que coûte à 1g/L (cerveau)

La consommation de glucides (boisson, aliments sucrés) pendant un effort type endurance économise le stock de glycogène et peut éviter le passage à vide qui s'observe lorsque les stocks de glycogène sont bas.

Proportion de substrat consommé par la voie aérobie au cours d'un effort long (unités arbitraires)



3.4. Bilan : Comparaison des trois filières énergétiques

	Anaérobie alactique	Anaérobie lactique	Aérobie
Capacité totale (quantité d'énergie pouvant être produite)	15 à 30 kJ	100 à 200 kJ	Presque illimitée
Puissance possible	4 à 12KW	3 à 8 kW	0,8 à 1,7 kW
Durée approximative des épreuves couvertes par cette filière	1 à 20 sec	20 sec à 2 min	Qqs min à qqs heureset plus
Substrats énergétiques	ATP Créatine-P	Glycogène musculaire	Glycogène hépatique, TG (acides gras)
Facteur limitant la capacité	Stocks d'ATP et de créatine-P	Q glycogène, pH	Fatigue générale
Exemple d'épreuves sportives typiques de ces filières	saut, 100m, lancer de poids	courses 400m, natation 800m, gymnastique (agrès), ski de descente	10 km ski de fond

Evolution de	<mark>quelques parar</mark>	<mark>nètres mesuré</mark>	<mark>s chez un ath</mark>	l <mark>lète au cou</mark>	irs de courses	de durée ci	<mark>roissante</mark>
Durée de l'effort	Distance parcourue	% anaérobie alactique	% anaérobie lactique	% voie aérobie	Origine des substrats		Puissance max (kW)
					glucides	lipides	
10 s	100	98	2	0	0	0	12
20 s	200	96	4	0	0	0	6
45 s	400	55	40	5	5	0	3
1 min 45s	800	30	62	8	8	0	2.3
3 min 45 s	1500	25	55	20	20	0	1.8
9 min	3200	15	45	40	37	3	1.6
29 min	10000	4	8	88	52	35	1.5
2 h 15 min	42500	1	2	97	30	67	1.3

B) Magnésium et effort musculaire

1. La répartition du Mg dans l'organisme

La quantité totale de magnésium chez l'homme est de environ 25 g (1 mole) : plus de la moitié se trouve dans les os, le reste étant principalement **intracellulaire**. Seulement 0,3% du magnésium est plasmatique (20 mg/L soit environ 0,9 mmol/L).

Le dosage du magnésium dans le plasma ne reflète pas les stocks réels de Mg car il est principalement intracellulaire et donc non accessible aux méthodes classiques de dosage.

2. les rôles biologiques du Mg ; carences

Rôles biologiques très variés, complexes,

- Il permet la fixation du calcium sur l'os et contribue à la prévention de l'ostéoporose
- Il joue un rôle dans la transmission de l'influx nerveux et l'excitabilité cellulaire, participe à la régulation du rythme cardiaque. Il pourrait soulager

les migraines

- Il est utilisé dans les voies de synthèse des anticorps et améliore les défenses immunitaires
- Le magnésium est un COFACTEUR d'enzyme : est indispensable à l'activité des enzymes impliquées dans le transfert d'un groupent phosphate : ce sont les enzymes liées à la production d'énergie :

OH O O

ADENOSINE O -P - O P - O P - OH

O O O

Magnesium bridging an enzyme with adenosine triphosphate

Le Mg2+ est donc utile à toutes les réactions de stockage et d'utilisation de l'ATP

Le Mg2+ est un ion intracellulaire qui contribue à l'équilibre hydrominéral général de l'organisme :

3. Le magnésium pour le sportif

Le rôle du Mg dans les réactions de production d'énergie a rendu le magnésium très populaire dans le milieu sportif : qu'en est il ?

- 1) Il n'est pas démontré qu'un apporte en Mg améliore la performance des sportifs en endurance ou en résistance.
- 2) Une carence à long terme du magnésium peut être à l'origine de troubles très variés tels
- troubles cardiovasculaires, rénaux, osseux, immunitaires
- anxiété, stress, fatique
- hyperexitabilité nerveuse et musculaire Ceci est vrai chez TOUS les individus.

L'effort induit de une légère augmentation des pertes en Mg (sueur : très peu soit 36 mg/L de sueur contre 1000 mg de Na+, mais aussi urine, selles), mais en principes compensées par l'alimentation et les régulation naturelles.

Une supplémentation, évite cette carence à long terme qui reste possible si l'alimentation est peu variée (aliments riches en Mg: chocolat, oléagineux, céréales, donc pain, légumes secs). Cette carence à long terme est dommageable particulièrement pour le sportif pour qui les pertes sont légèrement augmentées.