

Les filières énergétiques

- Sources :**
- Bases physiologiques de l'activité physique.* Fox et Mathews. Vigot, Paris, 1984.
 - Biologie de l'exercice musculaire.* J.R. Lacour. Masson, Paris, 1992.
 - Biologie du sport.* J.Weineck. Vigot, Paris, 1992.
 - Bases physiologiques des activités physiques et sportives.* H.Monod, R.Flandrois. 4^e édition, Masson, Paris, 1997.
 - Physiologie et méthodologie de l'entraînement.* V.Billat. DeBoeck Université, Paris, Bruxelles, 1998.
 - Physiologie de l'exercice musculaire.* G.Millet, S.Perrey, Ellipses, Paris, 2005.
 - Physiologie du sport et de l'exercice,* C.Le Page, Collection Objectif STAPS, Ellipses, Paris, 2016.
 - Physiologie du sport et de l'exercice,* J.H.Wilmore, D.L.Costill, 6^e édition, De Boeck Supérieur, Paris, Bruxelles, 2017.

Les contractions musculaires à l'origine des mouvements corporels nécessitent beaucoup d'énergie. Elle est fournie par l'adénosine triphosphate (ATP), seule forme d'énergie chimique utilisable par les protéines contractiles (le muscle ne peut en effet pas extraire directement l'énergie utile à leur contraction à partir des aliments) pour produire de l'énergie mécanique. La dégradation (hydrolyse) de l'ATP fournit de l'énergie mécanique grâce à la rupture de la liaison phosphate (environ 7 kcal) :



Figure 1 : La rupture de la dernière liaison phosphate de l'ATP permet la libération d'énergie directement utilisable par la cellule

Néanmoins, les réserves intramusculaires d'ATP sont très limitées (environ 5 mmol par kg de muscle frais) et permettent seulement de réaliser par exemple un exercice de 2 sec. à 70% de la VO_2 max, ou une détente verticale. Il existe donc des mécanismes qui permettent de resynthétiser l'ATP à partir d'autres sources d'énergie. Ces mécanismes sont au nombre de trois :

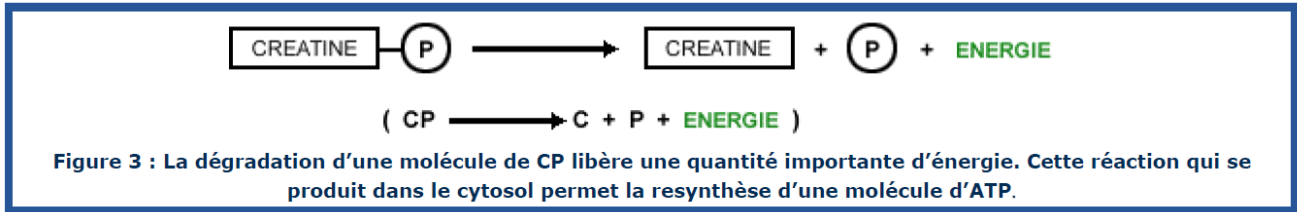
- **La filière anaérobie alactique,**
- **La filière anaérobie lactique,**
- **La filière aérobie.**

Ces trois filières possèdent des caractéristiques distinctives :

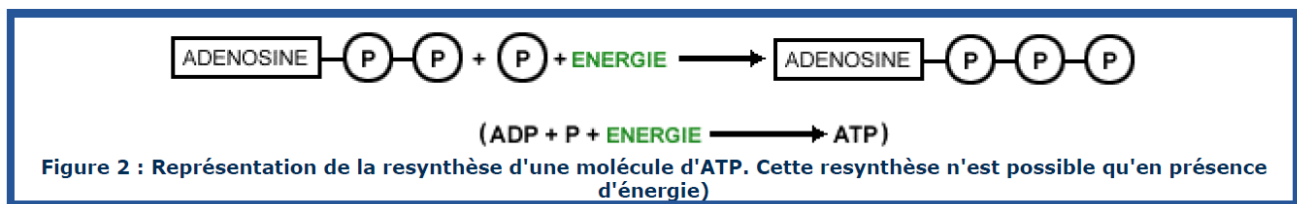
- de puissance = quantité d'énergie disponible par unité de temps = taux de resynthèse d'ATP par unité de temps (débit),
- de capacité = quantité totale d'énergie pouvant être libérée = ATP total resynthétisé,
- d'inertie = rapidité de mise en place,
- de récupération = vitesse de resynthèse des substrats et d'élimination des déchets.
- ainsi que des modalités d'entraînement spécifiques (voir cours sur les procédés d'entraînement en cyclisme).

I. La filière anaérobie alactique

Elle est ainsi dénommée car elle ne nécessite pas d'oxygène et ne s'accompagne pas de la formation d'acide lactique. En plus de l'ATP, le muscle possède des réserves de phosphocréatine (PC) qui s'élèvent à 20 mmol/kg de muscle frais (soit environ 400 mmol si la masse musculaire impliquée dans l'exercice est de 20 kg, ce qui équivaut à une énergie de 16,7 kJ). La rupture de la liaison phosphate de la créatine phosphate permet de libérer de l'énergie.



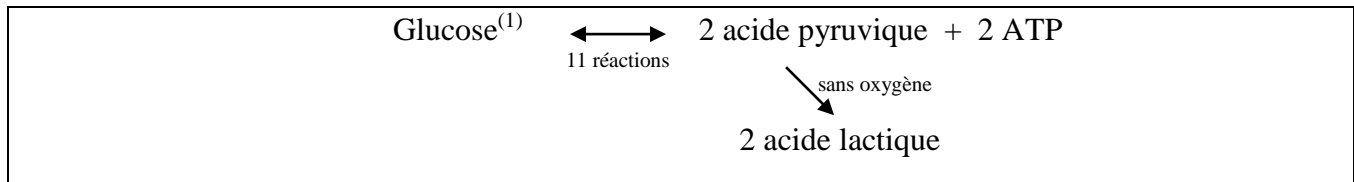
Cette énergie permet ensuite de synthétiser de l'ATP :



FILIERE ANAEROBIE ALACTIQUE				
Capacité	Puissance	Délai d'intervention	Durée de récupération	Exemples dans les APSA
Très faible = pour un effort maximal, les réserves de PC sont épuisées en moins de 10 sec.	Très importante (80 à 90 fois les dépenses de repos) = chez l'homme sédentaire : 9-10 W/kg chez le sprinter : 20-25 W/kg chez la femme sédentaire : 7-8 W/kg chez la sprinteuse : 12 W/kg	Immédiat = disponibilité dès le début de l'exercice (car cette filière ne dépend pas d'une longue série de réactions)	Très rapide = 50% des réserves d'ATP-PC sont reconstituées après 30 sec., et 100% après 3 min. (si suffisamment d'oxygène est disponible) Optimisée en cas de récupération active	Efforts de vitesse (très courts et très intenses) Sprints courts Sauts Lancers Haltérophilie + au début de toute activité musculaire En cyclisme : Accélération Attaques Sprints
Modalités d'entraînement : I7				

II. La filière anaérobie lactique ou glycolyse anaérobie

Elle est ainsi dénommée car elle ne nécessite pas d'oxygène et s'accompagne de la formation d'acide lactique. L'énergie provient d'une dégradation du glycogène musculaire ou du glucose sanguin (dans le cytoplasme de la cellule). La dégradation du glucose conduit à la formation d'acide pyruvique et la formation de 2 ATP. Comme l'acide pyruvique ne peut s'accumuler dans l'organisme, soit il y a suffisamment d'oxygène et il est oxydé (filière aérobie), soit il n'y a pas d'oxygène en quantité suffisante et il est réduit en acide lactique. L'accumulation progressive d'acide lactique provoque une diminution des pH musculaire et sanguin (par une accumulation de protons H⁺) qui elle-même provoque une fatigue musculaire précoce.



(1) la dégradation du glycogène musculaire conduit à la formation de 3 molécules d'ATP pour une molécule de glycogène

FILIERE ANAEROBIE LACTIQUE				
Capacité	Puissance	Délai d'intervention	Durée de récupération	Exemples dans les APSA
<p>Faible = la limitation de la durée de l'effort ne provient pas d'un manque de substrat (glycogène), mais de la baisse du pH cellulaire (acidose liée à l'accumulation d'ions H⁺). Elle est proportionnelle à la concentration max. de lactate tolérée par l'organisme⁽¹⁾ :</p> <p><u>sédentaires</u> : 14-17 mmol/l de sang soit environ 75 kJ</p> <p><u>haut niveau</u> : jusqu'à 30 mmol/l soit environ 150 kJ</p>	<p>Importante = environ 8-9 W/kg pour un effort de 30 sec., et 6-7 W/kg pour un effort d'une min. (Medbo et Tabata, 1989)</p>	<p>Très rapide = il faut quelques secondes (< 5 sec.) pour que la puissance maximale de ce métabolisme soit atteinte</p>	<p>Assez rapide = elle consiste à retrouver les valeurs de repos d'acide lactique c-a-d 1 à 2 mmoles/l de sang. Cette récupération n'est pas linéaire : 50% d'élimination après 15 min., et 100% après 1 h ⁽²⁾.</p>	<p>Efforts max. de 30 sec. à 2 min. 400 m en athlé. escalade de vitesse 100 m en natation</p> <p>En cyclisme : Km sur la piste Race BMX Sprints longs Train de sprint</p>
Modalités d'entraînement : I6				

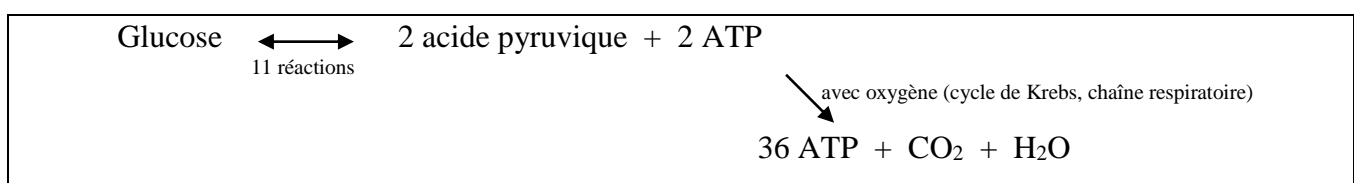
- (1) la baisse du pH altère directement les processus contractiles au niveau des myofibrilles ainsi que les réactions chimiques qui se déroulent dans la cellule (ralentissement de l'activité enzymatique de la PFK).
- (2) La réalisation d'une activité modérée permet une disparition plus rapide de l'acide lactique (idéal à environ 40-50% de la VO₂ max → environ 120-140 bpm).

III. La filière aérobie ou glycolyse aérobie

Elle est ainsi dénommée car elle nécessite un approvisionnement en oxygène. La dégradation du glycogène, en présence d'oxygène, se poursuit après le stade de l'acide pyruvique par un passage dans le cycle de Krebs et la chaîne de transport des électrons (dans les mitochondries de la cellule).

Au contraire du processus anaérobie où seul le glucose peut être utilisé, la filière aérobie peut aussi métaboliser les lipides (sous la forme d'acides gras) et dans certaines conditions extrêmes les protéines (les acides aminés en cas d'effort prolongé lorsque les stocks de glycogène sont fortement diminués).

Le bilan énergétique de l'oxydation des glucides est nettement plus favorable que celui de la glycolyse anaérobie : 38 molécules d'ATP par molécule de glucose au lieu de 2 (39 à partir du glycogène contre 3 pour la glycolyse anaérobie). L'inconvénient réside dans le fait que l'organisme ne peut apporter de l'oxygène à volonté au niveau musculaire (limitation appelée consommation maximale d'oxygène ou VO₂ max).



FILIERE AEROBIE

Capacité	Puissance	Délai d'intervention	Durée de récupération	Exemples dans les APSA
<p>Importante voire très importante = la durée de l'effort dépend de son intensité (exprimée en % de VO₂max) et du niveau d'entraînement du sujet → de 5 à 10 min. (à VO₂max) à plusieurs heures (exercice sous-maximal aérobie) ⁽¹⁾</p>	<p>Limitée = elle est liée à la consommation maximale d'oxygène du sujet (VO₂max) à laquelle correspond la puissance maximale aérobie (PMA) : <u>homme non sportif</u> : 45 ml/min/kg ⁽²⁾ soit environ 3 W/kg <u>femme non sportive</u> : 35 ml/min/kg soit environ 2,5 W/kg <u>homme haut niveau</u> : 80-90 ml/min/kg soit environ 6 W/kg soit environ <u>femme haut niveau</u> : 60-70 ml/min/kg soit environ 5 W/kg</p>	<p>Ralenti = il faut quelques min. après le début d'un exercice de moyenne intensité pour atteindre un état stable de consommation d'oxygène (entre 3 et 5 min. pour atteindre la puissance maximale) ⁽³⁾ il faut environ 30 min. pour atteindre la puissance maximale à partir de l'oxydation des lipides (lipolyse)</p>	<p>Longue = elle consiste surtout en la reconstitution des stocks de glycogène → de 12 à 72 heures selon la durée et l'intensité de l'effort + le niveau d'entraînement</p>	<p>Efforts de moyenne et de longue durée Courses de demi et de fond en athlétisme Marathon Triathlon Aviron Ski de fond Marche</p> <p>En cyclisme : Cyclisme sur route Cyclo-cross Certaines disciplines sur piste (poursuite, course aux points, keirin, etc.) VTT (cross-country)</p>

Modalités d'entraînement : I2 + I3 + I4 + I5

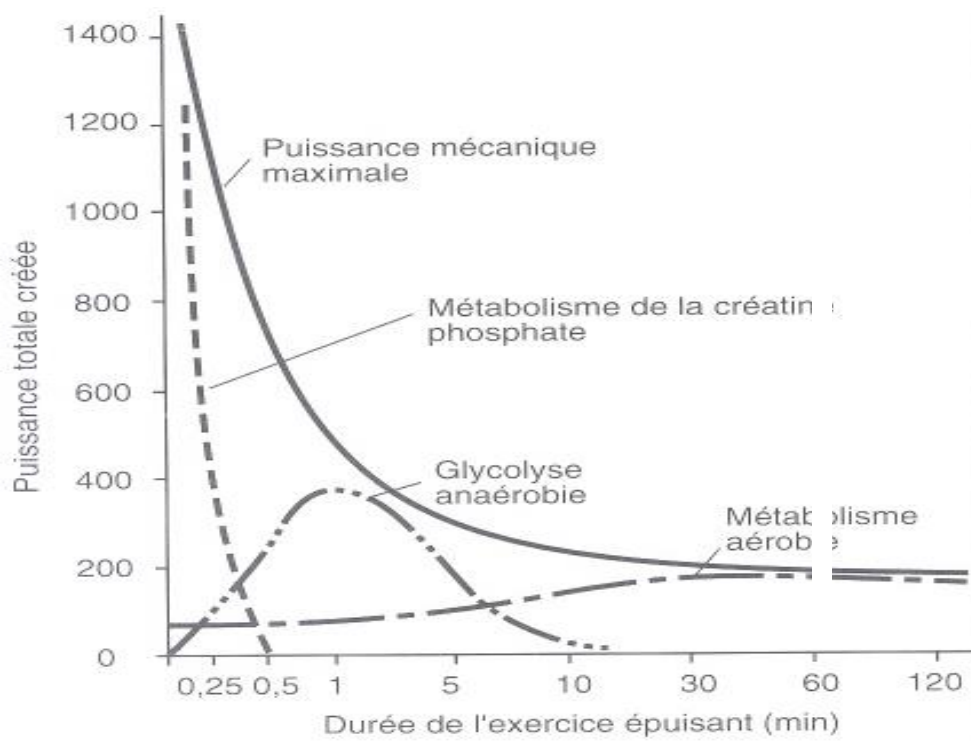
- (1) 3 principaux facteurs interviennent pour limiter la capacité du système : l'acidose musculaire provenant d'un accroissement d'acide lactique (intensité proche de VO₂max), l'épuisement des réserves de glycogène musculaire (à 75% de VO₂max, l'épuisement survient lorsque le glycogène musculaire a disparu), les possibilités de thermorégulation de l'organisme (= lutte contre la chaleur et la déshydratation).
- (2) Ce qui équivaut à environ 10 fois le métabolisme de repos.
- (3) Le délai pour atteindre l'état d'équilibre varie en fonction de l'âge et de l'entraînement : plus court chez l'enfant et chez l'adulte entraîné.

Bilan du métabolisme aérobie

Glucides	Lipides
Exemple : oxydation d'une molécule de :	
glucose	palmitate
$C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 + 38 ADP + 38 Pi$ $\rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + 38 ATP$	$C_{15}H_{31}COOH + 23 O_2 + 129 ADP + 129 Pi$ $\rightarrow 16 CO_2 + 16 H_2O + 129 ATP$
Bilan énergétique	
38 ATP pour 6 O ₂ soit 6,3 ATP/O ₂	129 ATP pour 23 O ₂ soit 5,6 ATP/O ₂
Quotient respiratoire	
Rapport entre le gaz carbonique produit sur l'oxygène consommé	
QR = VCO ₂ / VO ₂	
QR = 6/6 = 1	QR = 16/23 = 0.7

IV. Conclusion : l'évolution de la contribution des filières et de l'utilisation des substrats à l'effort

Les trois filières énergétiques ne se juxtaposent pas selon une succession temporelle stricte, mais elles se chevauchent et interviennent plus ou moins (il y a participation accrue des unes et décréue des autres). Au début de tout travail musculaire, c'est l'ATP puis la PC en réserve qui fournit l'énergie mécanique. Ensuite la participation respective de chaque filière dépend de la durée et de l'intensité de l'effort. L'évolution de cette contribution est bien représentée par le **schéma de Howald (1974)** :

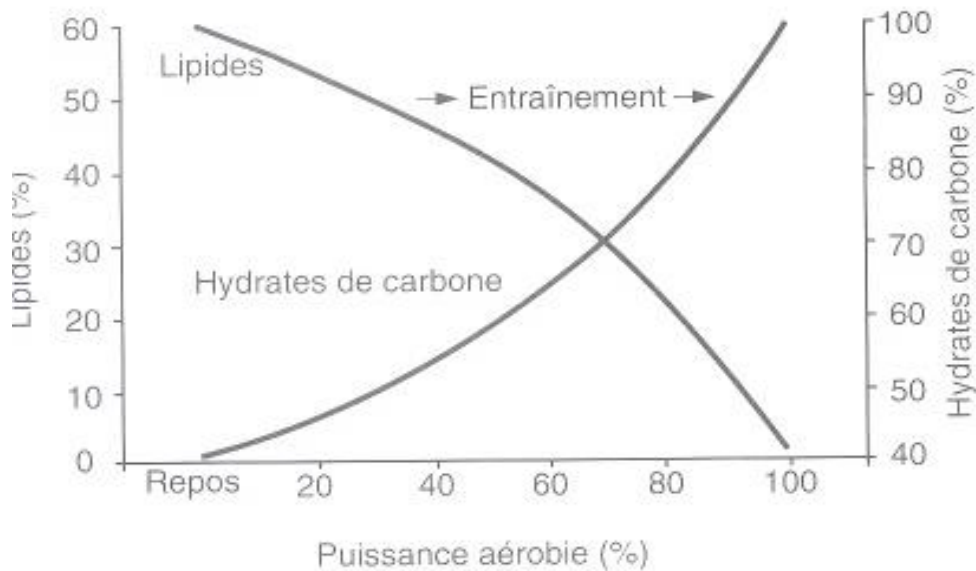


L'utilisation préférentielle des glucides, des lipides, voire des protéines dépend de l'intensité de l'exercice (et donc sa durée) :

- Les lipides sont surtout utilisés lorsque l'exercice est de faible intensité, continu et prolongé. Ils sont surtout métabolisés par les fibres lentes qui sont mises en jeu pour les exercices d'intensité modérée ne dépassant pas cinq fois le métabolisme de repos (les réserves lipidiques sont quasi-inépuisables : on pourrait théoriquement courir 120 h avec les seules réserves de graisse). Au repos, on utilise environ 1/3 de glucides et 2/3 de lipides (métabolisme de base = 1500 kcal).
- Les glucides interviennent à toutes les puissances d'exercice **dans des proportions croissantes en fonction de l'intensité**. La part des glucides augmente avec l'intensité de l'exercice pour être quasi-exclusive lorsque l'on approche les limites du métabolisme aérobie (VO_2max).
- Les protéines entrent dans la production d'énergie en cas d'exercices de très longue durée et/ou de jeûne (lorsque les stocks de glycogène sont fortement abaissés).

Quand l'intensité dépasse 90% de VO_2max , le glycogène est au début le seul substrat utilisé. A l'inverse, pour des exercices de longue durée et donc d'intensité modérée (moins de 50% de VO_2max), les lipides peuvent couvrir de 50 à 80% de l'énergie nécessaire.

L'entraînement à l'endurance conduit à une meilleure utilisation des lipides, ce qui permet une épargne du glycogène.



Source : Véronique Billat. *Physiologie et méthodologie de l'entraînement*. De Boeck Université. Bruxelles, Paris, 1998.

Mobilisation des substrats selon la puissance de l'exercice (V.Billat, 1998)

