

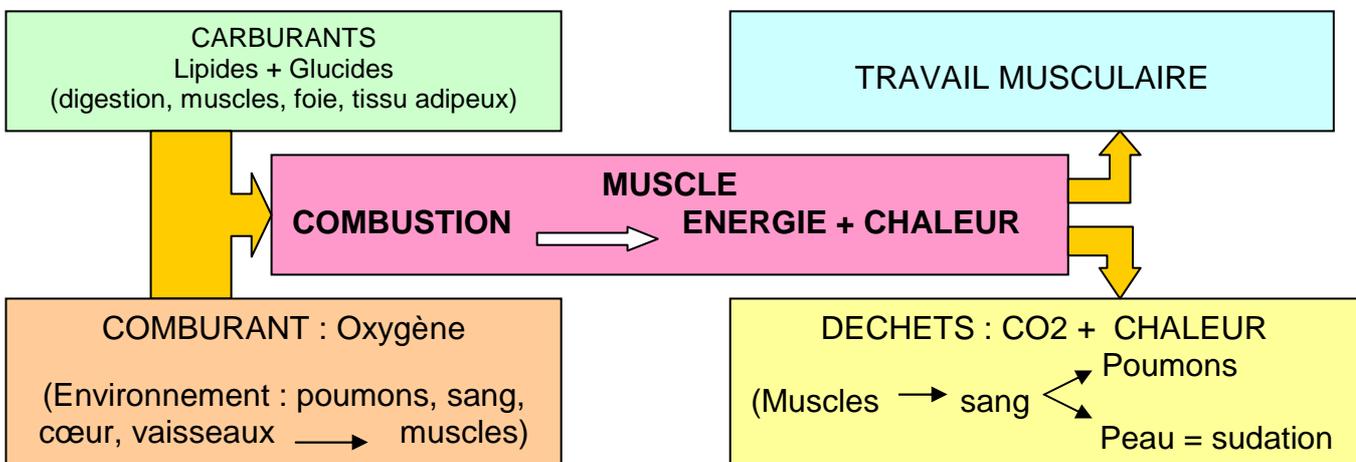
## QUELQUES ELEMENTS DE COMPREHENSION

Lorsque vous courez, pédalez, nagez, skiez ou tout simplement, lorsque vous montez un escalier, réalisez un certain nombre de tâches ménagères (laver le sol, les vitres....) ou de jardinage (bêcher, sarcler....) vous constatez que votre cœur et votre respiration s'accroissent. Ces adaptations ne sont que la conséquence la plus perceptible de l'élévation des besoins en énergie des muscles sollicités par l'exercice. Pour l'essentiel, cette énergie provient d'une combustion qui a lieu dans le muscle. Selon l'intensité et la durée de l'exercice, cette combustion peut utiliser différents « carburants » présents dans le muscle lui-même ou transportés par le sang :

- Pour les exercices de longue durée et de faible intensité, c'est surtout un mélange constitué d'une petite quantité de glucides (sucres) et d'une grande quantité de lipides (graisses) qui en constitue le carburant essentiel.
- Lorsque l'intensité de l'exercice augmente progressivement, les proportions lipides/glucides s'inversent.
- A l'opposé, pour les exercices intenses, ce sont essentiellement les glucides et, plus particulièrement l'un d'entre eux « le glycogène » qui en deviennent les carburants presque exclusifs.

Comme dans toute combustion, ces carburants ne peuvent « brûler » longtemps sans apport conséquent d'oxygène. L'oxygène constitue, en quelque sorte, le « comburant » de toute combustion.

### Schéma de la production de l'énergie nécessaire au travail musculaire



Le schéma résume comment l'énergie est produite pour permettre le travail musculaire prolongé. Il met notamment en évidence les deux conditions indispensables : le transport et l'utilisation de l'oxygène. La longue chaîne qui permet de fixer par les poumons l'oxygène de l'air que l'on respire, d'où le terme « aérobic », de le transporter par l'intermédiaire du sang, d'en augmenter son débit grâce à l'adaptation de la « pompe » cardiaque et de la circulation sanguine, est chaque fois mise à contribution à mesure que l'intensité de l'exercice augmente. Cette même chaîne transporte et évacue en sens inverse la chaleur et les déchets produits par la combustion musculaire. Au niveau des muscles sollicités, l'utilisation de l'oxygène dépend directement de la qualité et du niveau d'entraînement des fibres qui les constituent.

De la capacité maximale de transport et d'utilisation de l'oxygène, dépend donc la quantité d'énergie susceptible d'être produite par voie aérobic. C'est ce qui définit votre **capacité physiologique aérobic**, ou votre capacité à maintenir longtemps un travail musculaire de haute intensité.

## LES FILIERES ENERGETIQUES

Tout effort physique est donc subordonné à une dépense énergétique ; le muscle produit un travail mécanique en transformant l'énergie potentielle contenue dans l'adénosine triphosphate (ATP). Cette molécule, résultant de l'association de trois phosphates, d'une base azotée (l'adénine) et d'un sucre (le ribose), fournit la plus grosse partie de l'énergie nécessaire à la contraction des fibres musculaires en cédant l'un de ses phosphates



**L'ATP perd une molécule de phosphate pendant la réaction et se transforme en ADP ou adénosine di-phosphate.**

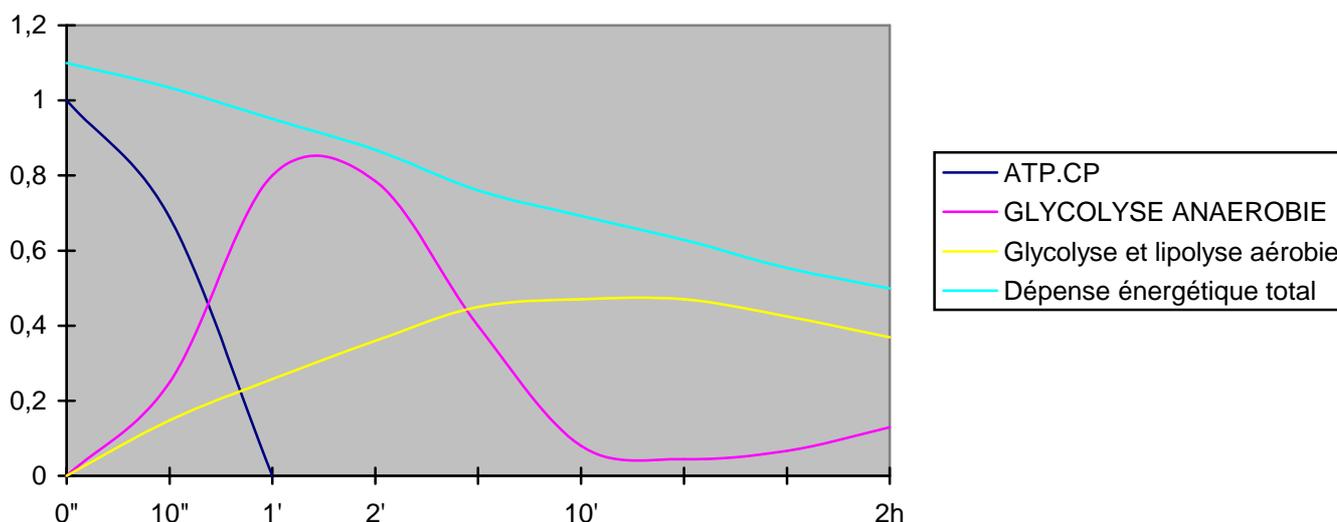
Au cours d'un exercice suffisamment long et d'intensité variée, quatre filières énergétiques différentes sont mises successivement en fonction, au fur et à mesure des besoins :

- Σ La filière anaérobie alactique (filière ATP-PC)
- Σ La filière anaérobie lactique (glycolyse anaérobie)
- Σ La filière aérobie, subdivisée en deux : la glycolyse aérobie et la lipolyse aérobie

Il existe un « décalage » entre l'augmentation immédiate de l'intensité de l'effort et l'adaptation plus lente des systèmes cardiaques et respiratoire au surcroît d'activité.

Les filières anaérobies alactiques puis lactiques interviennent en premier et servent de « relais » à la filière énergétique aérobie en attendant que celle-ci ait le temps de s'adapter progressivement à un effort plus intense.

Il y a continuité dans la mise en route des différentes filières ; l'organisme n'attend pas l'épuisement d'un système énergétique pour mettre en route le suivant. C'est ce que Fox et Matthews ont appelés le « continuum énergétique ». Le graphique d'Howald, reproduit ci-dessous met en évidence les filières énergétiques et leur délai d'intervention.

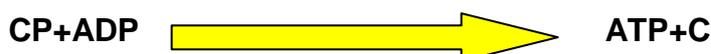


## Interprétation des trois filières énergétiques

### 1. La filière « anaérobie alactique », filière ATP-créatine phosphate

Le stock d'adénosine triphosphate (ATP) des fibres musculaires au repos est très faible. Quel que soit le niveau d'entraînement, il ne représente qu'environ six millimoles par kilo de muscle frais. Il est complété par une petite réserve (20 millimoles par kilo) de créatine phosphate (CP) aux mêmes propriétés. Disponibles dès le début de l'exercice, ces stocks permettent une dizaine de secondes de contractions et représentent la principale source d'énergie du sprinter. C'est elle qui réagit presque spontanément en cas d'effort d'intensité maximale de courte durée.

L'ATP et la créatine phosphate (ou phosphocréatine) sont appelés phosphagènes. Dès que la concentration d'ATP diminue à cause de l'effort, la phosphocréatine se dégrade en créatine et cède un atome de phosphore à l'ADP (adénosine di-phosphate) pour re synthétiser l'ATP.



Ces réactions qui s'effectuent sans la participation de l'oxygène sont vite épuisées. C'est la filière anaérobie (sans intervention de l'oxygène) alactique (sans production d'acide lactique). Si cette filière n'a pas de délai d'intervention, sa capacité est très faible. Ce petit réservoir d'énergie permet de se mettre quelque cinq à quinze secondes en sur régime, comme lors d'un sprint par exemple, ou d'un démarrage violent, mais sa contenance limitée oblige rapidement à ralentir l'allure. L'organisme est alors au maximum de la zone rouge. Pour ce processus, on parle d'une puissance élevée, mais d'une faible capacité.

### 2. La filière « anaérobie lactique »

Une fois la créatine phosphate cellulaire épuisée et le temps que les amplitudes et fréquences cardiaques et pulmonaires augmentent, permettant un apport suffisant d'oxygène, les cellules musculaires utilisent le glucose et le glycogène sans présence d'oxygène pour re synthétiser l'ATP à partir de l'ADP. L'acide pyruvique, issu de leur dégradation capte l'hydrogène libéré par le catabolisme glucidique (normalement l'hydrogène aurait dû se lier à l'oxygène pour former de l'eau). Il se transforme en acide lactique qui s'accumule dans les cellules musculaires. Cette accumulation d'acide lactique, en bloquant l'activité des enzymes permettant la contraction musculaire, limite dans le temps cette filière énergétique qui n'est efficace qu'entre 30 et 120 secondes après le début de l'effort. Seule l'abondance d'oxygène dans une cellule revenant à une situation de repos permettra à l'acide lactique accumulé de se retransformer, grâce à la réaction inverse, en acide pyruvique.

La dégradation incomplète du glucose ne fournit que 2 ATP. A noter que ceci se passe dans les cellules et non pas directement dans le muscle en contraction. En fait le processus nécessite une dizaine de réactions chimiques successives et la vitesse de production de l'ATP est plus lente que la filière précédente.



Le réapprovisionnement en ATP est toutefois relativement rapide (moins de trois minutes). Après l'effort, grâce à un apport d'oxygène, l'acide lactique est retransformé en acide pyruvique, puis poursuit son métabolisme pour être dégradé dans le cycle de KREBS.

La puissance disponible par cette filière est moins forte que celle disponible dans la filière précédente, mais sa durée est légèrement plus longue. Elle est mise en action par exemple, lors d'un démarrage, d'une accélération brutale qu'il faut maintenir pour faire la différence ou pour revenir sur une échappée.

On peut rouler à cette allure environ trois minutes mais rarement au-delà, car on est déjà en anaérobie c'est à dire dans la zone rouge. L'accumulation de l'acide lactique perturbe le fonctionnement du muscle, d'où des sensations de « brûlures ».

Passer dans cette zone oblige ensuite à beaucoup ralentir de manière à permettre à l'organisme de recharger en glycogène le réservoir énergétique complémentaire, et selon l'intensité de l'effort produit, cette reconstitution s'effectue dans un délai allant de une à trois heures.

Pour la période allant de 20 à 45 secondes, on parle habituellement de puissance anaérobie lactique, et pour la période allant de 45 secondes à 3 minutes, on parle de capacité anaérobie lactique.

### 3. Les deux filières « aérobies »

Au bout de deux à trois minutes, lorsque les deux premières filières énergétiques arrivent à épuisement, le débit d'oxygène dans les cellules est devenu suffisamment important pour permettre la dégradation totale des glucides et lipides en gaz carbonique et eau.

La seule filière énergétique qui utilise aussi bien les glucides que les lipides pour re synthétiser l'ATP des cellules est la filière aérobie. Si l'utilisation de ces deux substrats se fait à parts égales lors des périodes de repos relatifs ou d'efforts modérés, l'emploi des glucides prévaut lorsque l'intensité des efforts aérobies augmente. Ceci s'explique par le fait que les hydrates de carbone contiennent dans leur structure chimique plus d'atomes d'oxygène que les lipides. Cette teneur en oxygène permet de mieux « compenser » l'accroissement des besoins dû à l'augmentation de l'intensité de l'effort. C'est d'ailleurs également cette teneur en oxygène des hydrates de carbone qui justifie leur usage unique dans la filière anaérobie lactique.

A mesure que l'exercice se prolonge, le muscle est de mieux en mieux alimenté en oxygène. Ainsi au bout de cinq minutes, seuls 20% de l'ATP proviennent de la filière anaérobie. Le reste est synthétisé à partir de l'oxydation de l'acide pyruvique issu de la dégradation du glycogène et d'une partie de l'acide lactique accumulé durant les premières secondes de l'exercice. Ces derniers, doivent, pour cela, pénétrer à l'intérieur des mitochondries de la fibre musculaire, ce sont des petits compartiments cellulaires qui contiennent tous les enzymes nécessaires à l'oxydation. En terme d'énergie, cette réaction est beaucoup plus rentable que l'hydrolyse du glycogène puisqu'elle conduit à la synthèse de 38 molécules d'ATP au lieu de 2. Par ailleurs lorsque l'effort se prolonge et que les réserves de glycogène diminuent, elle s'accompagne de l'oxydation des lipides qui fournit encore plus d'ATP, (45 molécules d'ATP, et même plus, en fonction de la nature du lipide oxydé). **Le cycle de dégradation des substrats fait appel à des réactions biochimiques complexes, dont la partie commune est appelée cycle de KREBS.** Lorsque l'effort s'effectue sur de longues distances, les réserves de glycogène finissent par s'épuiser ; l'organisme fait appel aux ressources alimentaires. C'est l'apport de glucides tout au long d'un effort en endurance aérobie qui permet d'assurer la production d'énergie. Ce mécanisme explique pourquoi c'est bien l'alimentation pendant l'effort, et non l'accumulation des kilomètres d'entraînement, qui permet de soutenir une compétition de longue durée.

La lipolyse est l'unique système de production d'énergie lorsque l'on travaille en dessous de la zone d'endurance aérobie. C'est le domaine de la promenade, du cyclotourisme. Si vous vous promenez dans la campagne, vous pouvez rester des heures au grand air. Une fois la sortie terminée, vous ne ressentirez pas la sensation de faim. En effet, les réserves glucidiques ne seront pratiquement pas entamées puisque seules les graisses auront permis ce type d'efforts. Lorsque les efforts ont lieu dans la zone d'endurance aérobie, s'installe un équilibre entre glycolyse et lipolyse, où les deux métabolismes s'imbriquent pour fournir l'énergie nécessaire.

L'aérobie est la filière de l'endurance. Elle exploite un système énergétique où l'énergie alimentaire est transformée en énergie musculaire en présence d'oxygène apportée par les globules rouges du sang depuis l'air inhalé par les poumons. Peu de déchets apparaissent et cet effort d'intensité moyenne peut être poursuivi de manière prolongée.

#### **4. La zone de transition « aérobie-anaérobie »**

Quand l'oxygène parvient en quantité juste suffisante pour assurer la dépense d'énergie, on se trouve en phase limite aérobie. A ce niveau, les filières aérobie et anaérobie sont utilisées. Au début de l'effort, le coureur se trouve dans un état durant lequel « les recettes » en oxygène sont égales aux « dépenses » sans productions importantes de lactates. Lorsque l'intensité augmente puis se prolonge de plusieurs minutes, on note l'apparition d'acide lactique dans le sang. Plus l'exercice est intense, plus la contribution du processus anaérobie est importante et réduit l'intervention du processus aérobie.

La limite anaérobie est le niveau maximal que l'on peut soutenir. Au-delà, on passe dans l'anaérobie totale et le corps change de mode de production énergétique. La fréquence cardiaque à la limite anaérobie est un des meilleurs indicateurs de la performance en endurance.

#### **5. Au niveau des muscles**

Si toutes les fibres qui constituent un muscle sont identiques par leur structure, elles diffèrent dans leurs caractéristiques physiologiques et se classent en trois catégories distinctes :

Σ Les fibres rouges 1 ou ST (slow twitch fibers) ou « lentes »

Dans ces fibres, la production d'ATP se fait par oxydation dans les « mitochondries ». Elles sont desservies par un important réseau de capillaires leur permettant d'être bien approvisionnées en oxygène.

Σ Les fibres 2a ou FT (fast twitch fibers) ou « intermédiaires »

La production d'ATP s'y fait par glycolyse anaérobie et par oxydation.

Σ Les fibres blanches 2b ou FTb (fast twitch fibers) ou « rapides »

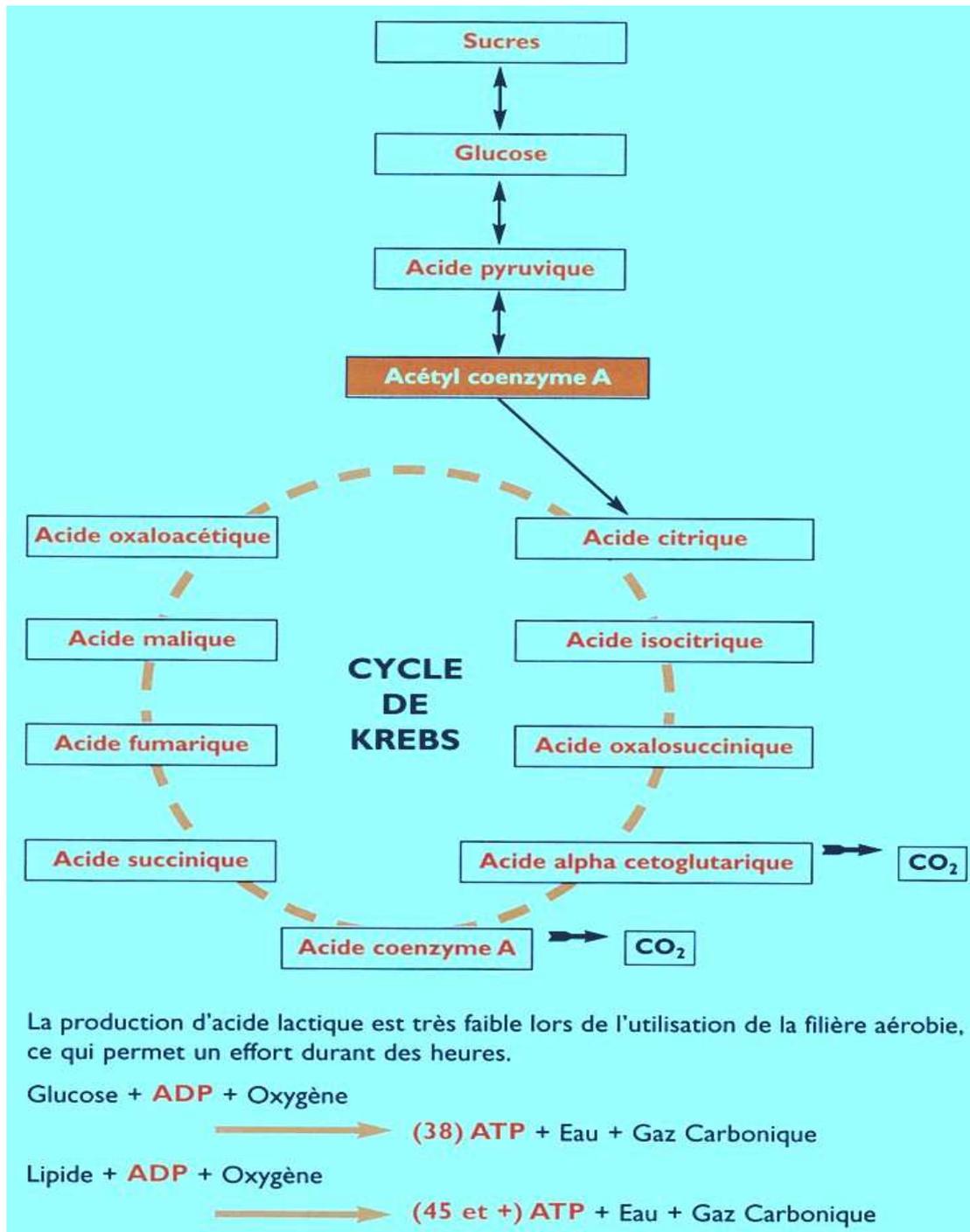
La production d'ATP s'y fait par glycolyse anaérobie. Elles sont pauvres en myoglobine et riches en glycogène.

Les fibres rouges sont la pierre angulaire de l'endurance. Même lorsque l'on pédale à cadence élevée, à condition d'être dans la filière aérobie, ce sont, principalement les fibres lentes (ou rouges) qui travaillent.

Les fibres blanches ou « rapides » sont toujours anaérobies ; elles n'ont pas besoin d'oxygène pour travailler ; elles utilisent le glucose comme carburant et leur contraction rapide produit de l'acide lactique. Ces fibres musculaires fatiguent plus rapidement et sont réservées aux sprints et aussi aux ascensions : quand on pédale avec plus de force, dans la zone de transition, même si la cadence de pédalage est lente, on mobilise plus les fibres « rapides » que les fibres « lentes ». Ainsi la dénomination « lente » ou « rapide » ne doit pas être comprise comme une indication de vitesse de contraction

## SPECIFICITES DES DIFFERENTES FILIERES ENERGETIQUES

Filières énergétiques	Anaérobie alactique	Anaérobie lactique	Aérobie	
			Glucolyse	Lipolyse
Carburant	Créatine phosphate	Glycogène	Glucides	Lipides
Type d'effort	Maximal	Intense	Modéré mais soutenu	
Puissance	Très élevée	Elevée	Moyenne	Faible
Capacité	Faible 15 à 20s	Réduite 2 à 3mn	Importante : Des heures	
Limite	Stock musculaire de créatine phosphate	Capacité à supporter l'acide lactique	Consommation d'oxygène	
Temps de récupération totale	5 à 8mn	1 à 3H	6 heures à 3 jours suivant la durée et l'intensité de l'effort	



## LES FACTEURS LIMITANT L'EFFORT

*L'étude des filières énergétiques permet de connaître l'utilisation préférentielle des carburants en fonction de l'intensité et de la durée de l'effort.*

*Chaque processus se trouve limité par certains facteurs qu'il faut connaître pour bâtir un plan d'entraînement afin de reculer ces limites et d'améliorer les performances du sportif. Les compétitions sur route durant plusieurs heures, la plus grande partie du travail est fournie par la filière aérobie, cependant la filière anaérobie lactique sera sollicitée chaque fois qu'un changement de rythme ou d'intensité sera nécessaire.*

*Passons en revue les différentes filières, en spécifiant les facteurs limitant.*

### 1. Pour la capacité aérobie

*En ce qui concerne les efforts en aérobie, la capacité se limite à la totale consommation des sucres et des graisses. En réalité cette limite n'est jamais atteinte car les facultés nerveuses s'épuisent en premier. L'épuisement psychologique se manifestant avant l'épuisement physiologique, le travail consistera à se forger une volonté de fer en accumulant les heures de selle à petite allure.*

*D'autre part, on pourrait imaginer que le cycliste qui a du poids à perdre possède des réserves supplémentaires lui permettant une intensité d'effort accrue. Hélas cette surcharge de poids lui impose un travail supérieur et ce stock de graisse n'est pas utilisable de suite pour fournir un effort soutenu. Par contre, ces graisses seront brûlées d'une façon préférentielle si l'allure est modérée et si l'effort dure un maximum de temps (lipolyse). A vitesse plus rapide, la consommation des graisses n'aura pas lieu et la perte de poids ne sera due qu'à l'épuisement momentané des sucres.*

*Dans un deuxième temps, l'entraînement modifiera ces données et élèvera le seuil à partir duquel les sucres seront utilisés comme source d'énergie, ce qui signifie que les corps gras seront alors consommés même si la vitesse du cycliste augmente.*

*Par contre, si la vitesse du cycliste s'accroît de façon importante, la durée de son effort sera limitée par la consommation des composés sucrés et de leur épuisement relatif constaté par la baisse de la glycémie sanguine. Cette échéance peut être repoussée d'une façon importante par l'absorption de nourriture appropriée durant l'exercice (dattes, abricots secs, pruneaux, raisins secs, pâte de fruit, pâte d'amande...)*

### 2. Pour la puissance aérobie

*La puissance aérobie correspondant à une utilisation maximale de l'oxygène par l'organisme pendant un effort très intense. Plus le cycliste consomme d'oxygène et plus il est performant. Le problème au niveau de la puissance aérobie n'est pas de ventiler un maximum d'air dans les poumons en espérant prélever un surplus d'oxygène, mais d'extraire et de fixer dans le sang le plus grand volume d'oxygène. La ventilation pulmonaire reste toujours suffisante pour apporter l'oxygène à l'organisme mais c'est celui-ci qui a ou n'a pas l'aptitude de l'utiliser.*

*Cette faculté de consommer un maximum d'oxygène dépend en premier lieu d'un facteur héréditaire, mais un entraînement spécifique peut améliorer ces données dans certaines proportions à condition que ce travail soit conduit avant la fin de la croissance. Ce type d'entraînement s'adresse donc spécialement aux juniors et jeunes seniors.*

### 3. Pour la capacité anaérobie lactique

Elle se trouve limitée par deux facteurs :

- *Tout d'abord, par la complète utilisation des réserves en glycogène. L'entraînement augmente d'une façon appréciable ces réserves grâce au phénomène de surcompensation.*
- *Ensuite, par l'aptitude qu'a l'organisme à supporter l'acide lactique qui se forme à la suite de la consommation du glycogène en l'absence d'oxygène. Cette acidité est neutralisée au niveau des muscles par des substances dites tampons. Un fort excès d'acide ne peut plus être combattu par les substances tampons et les muscles refusent alors de se contracter d'où une interruption de l'effort. L'entraînement augmente la valeur maximale du taux d'acide lactique toléré par l'organisme.*

### 4. Pour la puissance anaérobie alactique

*La puissance anaérobie alactique se trouve limitée par un seul facteur : la vitesse de destruction du carburant complexe qu'est le glycogène en un carburant plus simple directement assimilable par le muscle : l'adénosine triphosphate ou ADP.*

