

LA PHYSIOLOGIE DU MARATHONIEN

Le marathon a été créé pour commémorer la course de Philippidès qui, selon la légende, franchit les 40 km de Marathon à Athènes, pour annoncer la victoire de Miltiade sur les Perses (490 av. J.-C.) et en mourut d'épuisement. Cette légende est en-dessous de la réalité. Selon Hérodote, Phillipidès fut en fait dépêché à Sparte pour chercher de l'aide contre les Perses, et parcourut en moins de 2 jours les 250 km qui séparaient les deux cités. Il n'en mourut pas car il revint "aussitôt" à Athènes. Cette performance est tout à fait plausible si on la compare aux records actuels sur les distances d'ultra-marathons: 304 km en un jour, 474 km en deux jours (Yiannis Kouros, AUS).

Le marathon, qui fut disputé pour la première fois aux Jeux Olympiques d'Athènes en 1896, se court aujourd'hui sur la distance curieuse de 42,195 km. C'est une tradition qui remonte aux Jeux de Londres, en 1908, où le parcours fut rallongé, au dernier moment, pour que l'arrivée s'effectue en face de la loge royale. Le record à l'époque de 2 h 55 min 18 s (Louis Spiridon), est aujourd'hui de 2 h 05 min 42 s (Kannouchi Khalid, MAR, Chicago 24.10.1999) pour les hommes et de 2 h 18 min 47 s (Catherine Ndereba, KEN, Chicago 7.10.2001)

1) De quoi dépend la performance au marathon?

Le marathon est une épreuve où la performance dépend, avant tout, de la capacité du coureur à soutenir une dépense énergétique par unité de temps, c'est-à-dire une puissance élevée pendant un temps prolongé. Cette capacité dépend de 3 facteurs qui sont par ordre d'importance:

- * La puissance aérobie maximale
- * L'endurance
- * L'efficacité de la foulée

Les facteurs psychologiques interviennent également, mais seulement pour permettre au coureur d'utiliser ses capacités énergétiques.

a) La puissance aérobie maximale

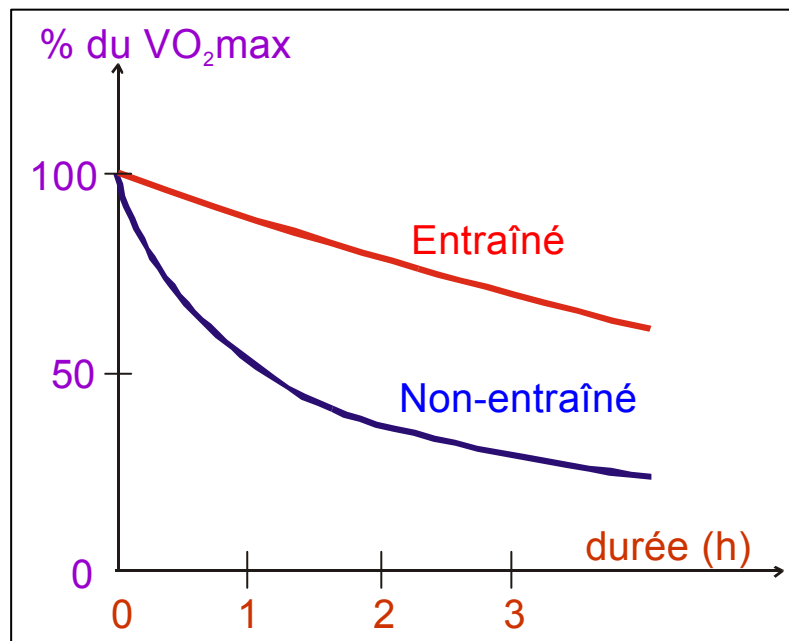
Il s'agit de la puissance maximale des voies énergétiques aérobies. Elle définit la capacité de l'organisme à consommer et à utiliser l'oxygène de l'air pour couvrir ses besoins énergétiques: l'oxygène sert en effet à "brûler" les carburants nécessaires à la recharge énergétique des muscles. On la calcule en mesurant le volume d'oxygène consommé (VO_2), par seconde et par kg de masse du coureur (afin de pouvoir comparer des coureurs de masse différente!), au cours d'une épreuve d'effort progressif, de préférence sur tapis roulant. Lorsque le VO_2 atteint sa valeur maximale (VO_{2max}), la puissance fournie est la puissance aérobie maximale.

Il existe une bonne relation entre le VO_{2max} et la performance au marathon. Les coureurs dont le VO_{2max} est plus élevé peuvent fournir en moyenne de plus fortes puissances: comme la vitesse soutenue dépend de la puissance

disponible, ils courent plus vite et réalisent de meilleurs temps. Toutefois le temps au marathon ne peut être prédit à partir du $VO_2\max$. En effet pour un $VO_2\max$ donné, les performances peuvent varier de près d'une heure, et une performance donnée peut être réalisée par des coureurs de $VO_2\max$ très différents.

b) L'endurance

Il s'agit de la capacité du coureur à utiliser un pourcentage élevé du $VO_2\max$ pendant de longues périodes de temps. Le $VO_2\max$ ne peut être soutenu que pendant 5 à 12 minutes environ, soit sur des courses de 2 à 4 km au maximum. Pour des distances et des temps de course plus longs, le pourcentage du $VO_2\max$ maintenu décroît progressivement avec le temps total de course. La réduction du pourcentage du $VO_2\max$ avec le temps de course varie d'un coureur à l'autre et ceci reflète précisément des durances différentes. Prise isolément, l'endurance qui est indépendante du $VO_2\max$, n'a pas de valeur pour prédire la performance au marathon: une excellente endurance peut s'observer chez des coureurs dont le $VO_2\max$ n'est pas très élevé et qui réalisent donc des temps moyens au marathon. En revanche, si le $VO_2\max$ et l'endurance sont connus, on peut estimer pour n'importe quel temps de course, la puissance disponible et donc la vitesse soutenue et la distance parcourue.



c) L'efficacité de la foulée

Il s'agit en quelque sorte du rendement de la puissance fournie. Plus ce rendement est élevé, moins il y a de pertes d'énergie: la foulée est plus économique. On exprime ce rendement par la consommation d'oxygène nécessaire pour courir à une vitesse donnée. Ce rendement peut certes varier d'un coureur à l'autre sans toutefois dépasser des écarts de 5 %. Il est donc un déterminant mineur de la performance au marathon.

2) Comment améliorer la performance par l'entraînement?

a) Améliorer le VO_2 max

Le VO_2 max d'un coureur dépend des caractéristiques du système de transport et d'utilisation de l'oxygène. L'appareil respiratoire, l'appareil circulatoire et le muscle squelettique sont les trois principaux maillons de cette chaîne de l'oxygène. On pense aujourd'hui que les facteurs limitants ne sont pas les mêmes pour tous les individus.

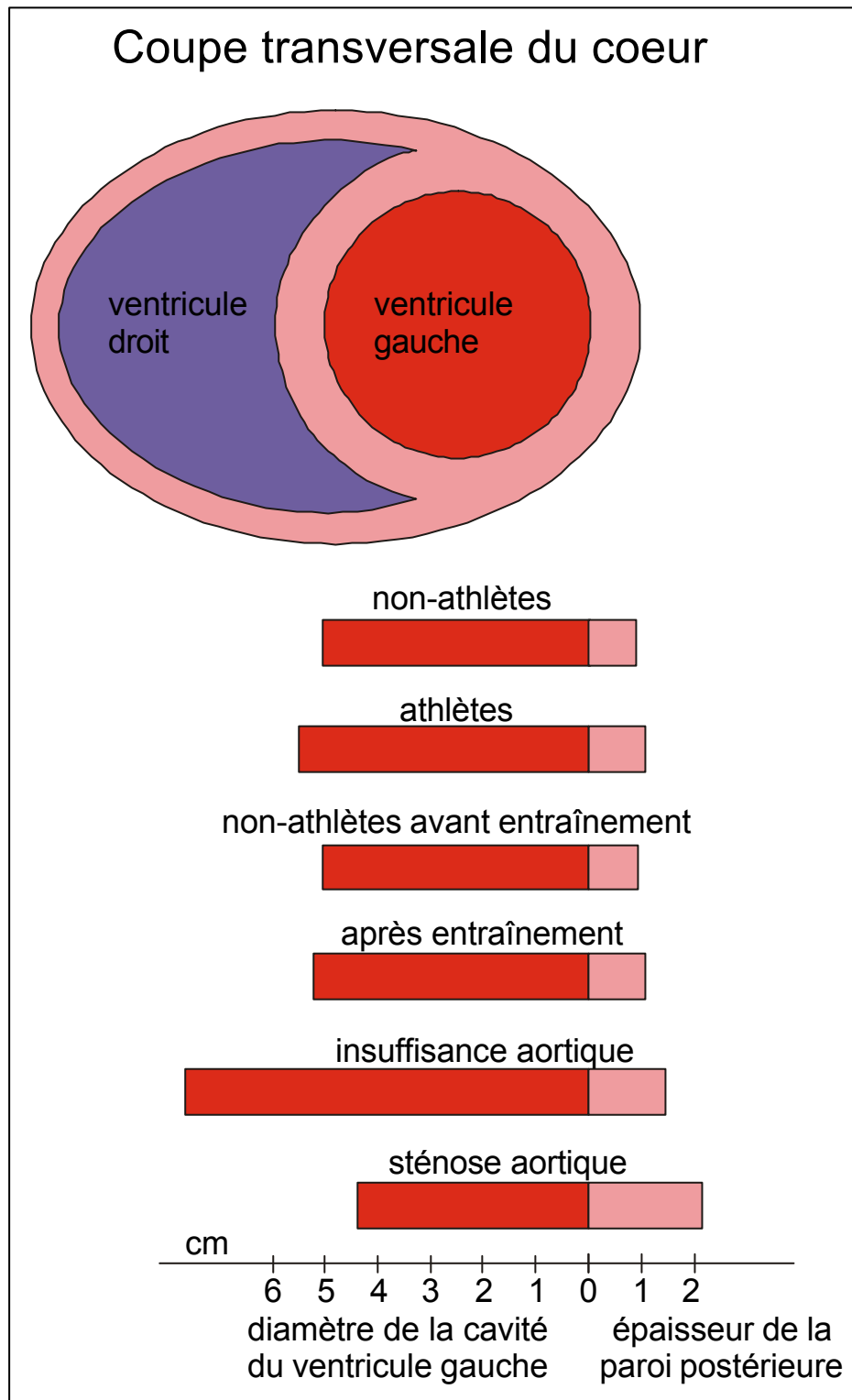
Un VO_2 max peu élevé serait limité par une capacité réduite des muscles à utiliser l'oxygène qui leur est apporté. Les systèmes respiratoire et circulatoire seraient "surdimensionnés" par rapport aux capacités métaboliques.

Chez les coureurs dont le VO_2 max est très élevé, la limite se situerait au niveau du système respiratoire, dont la capacité deviendrait insuffisante par rapport au système circulatoire et aux voies métaboliques. Chez des coureurs de ce niveau, on a en effet observé que l'hémoglobine du sang artériel est partiellement désaturée en oxygène à l'approche du VO_2 max. Cette désaturation ne serait pas due à une mise en défaut de la ventilation pulmonaire, mais plutôt au nombre de capillaires disponibles dans le poumon, nombre qui devient trop petit par rapport au débit cardiaque lorsque celui-ci atteint des valeurs très élevées. L'augmentation du débit cardiaque a pour conséquence une réduction du temps de transit dans les capillaires pulmonaires. Celui-ci devient alors trop court pour assurer le passage de l'oxygène des alvéoles pulmonaires au sang et, par conséquent, la saturation de l'hémoglobine du sang artériel en oxygène ne se fait pas complètement.

Enfin **chez les sportifs qui possèdent des VO_2 max intermédiaires** (c'est-à-dire, la majorité des participants au marathon), le système respiratoire et les voies métaboliques seraient "surdimensionnés" par rapport au système circulatoire, lequel serait le facteur limitant de la consommation d'oxygène. La limitation de la quantité d'oxygène transportée par la circulation tiendrait à la limitation du sang éjecté par le cœur à chaque contraction (le volume d'éjection systolique). C'est en effet le seul facteur qui soit très différent chez un sujet dont le VO_2 max est élevé et chez celui où le VO_2 max est bas.

On a longtemps attribué les différences importantes **du volume d'éjection systolique** aux différences de taille de la pompe cardiaque et on croit encore parfois que l'entraînement provoque des hypertrophies considérables du cœur.

Au cours des 10 dernières années, l'utilisation de l'échocardiographie a conduit à réviser cette notion du **"cœur d'athlète"**. Les résultats montrent que les athlètes dont le VO_2 max est élevé possèdent des cœurs à peine plus gros que les non-athlètes et que les variations de la taille du cœur à la suite d'un entraînement sont à peine détectables. **Les différences de volume d'éjection systolique sont plutôt à rechercher dans les propriétés contractiles du myocarde, qui permettraient au cœur d'avoir plus de puissance.**



Les meilleures démonstrations d'un rôle limitant de la circulation sur le $VO_2\max$ sont les études dans lesquelles la concentration d'hémoglobine est artificiellement augmentée par réinjection de globules rouges prélevés quelques semaines auparavant chez le même sujet. Ce petit "coup de pouce" au transport d'oxygène, d'ailleurs interdit par le Comité international olympique, tout en étant actuellement indétectable, a pour effet d'accroître le $VO_2\max$.

Les différences de $VO_2\text{max}$ observées entre les hommes et les femmes s'explique sans doute aussi par une différence dans la capacité de transport de l'oxygène par le sang. La concentration d'hémoglobine chez l'homme est en moyenne supérieure à celle observée chez la femme (15,8 contre 13,9 g par 100 ml de sang). Cette différence correspond très bien à celle de $VO_2\text{max}$ des coureurs de haut niveau masculins et féminins. Ceci pourrait expliquer toutes les différences de performance entre l'homme et la femme sur les distances de demi-fond et de fond. En effet, l'efficacité de la foulée n'est pas systématiquement différente chez l'homme et la femme, alors que l'endurance apparaît soit la même, soit légèrement supérieure chez la femme!

Pour progresser, il faut s'entraîner. Mais comment s'entraîner? Comment améliorer son $VO_2\text{max}$?

La marge d'amélioration du $VO_2\text{max}$ avec l'entraînement est environ de 15 à 25 %. Comme d'une personne à l'autre la variabilité du $VO_2\text{max}$ est nettement supérieure à ces valeurs, on a longtemps pensé que le $VO_2\text{max}$ d'un individu était pour une très grande part déterminé génétiquement.

Des études récentes conduites au sein de familles comprenant des enfants non jumeaux, des vrais ou faux jumeaux et des enfants adoptés, ont montré que la part de l'inné dans le $VO_2\text{max}$ est relativement faible (30 %). En revanche, la marge d'amélioration possible peut atteindre 90 % chez certains tandis qu'elle est pratiquement nulle chez d'autres. Autrement dit, l'entraînement n'a pas les mêmes effets sur tout le monde. Cette sensibilité différente à l'entraînement ayant aussi pour une grande part une origine génétique, ceci veut dire qu'il faut bien choisir ses parents si l'on veut avoir un $VO_2\text{max}$ élevé et devenir champion de marathon.

Cela étant, la plupart des participants doivent pouvoir améliorer leur $VO_2\text{max}$ en courant **souvent** (5 à 9 fois par semaine), **vite et longtemps** à chaque séance. Or comme un coureur ne peut courir à la fois longtemps et vite, il court le plus souvent à des vitesses assez basses, qui suffisent pour une activité d'entretien, mais n'améliorent pas son $VO_2\text{max}$. Cependant il doit également courir à des vitesses correspondant à des puissances voisines de son $VO_2\text{max}$ (fréquence cardiaque égale à environ 190 - 200 battements par minute). Mais de telles vitesses ne peuvent être soutenues longtemps de sorte qu'il faut alterner les courses rapides de 20 s à 2,5 min, avec des périodes de récupération allant de 30 s à 2 min de repos ou de course à allure modérée. Ceci constitue un **entraînement du type "par intervalles"**.

b) Améliorer son endurance

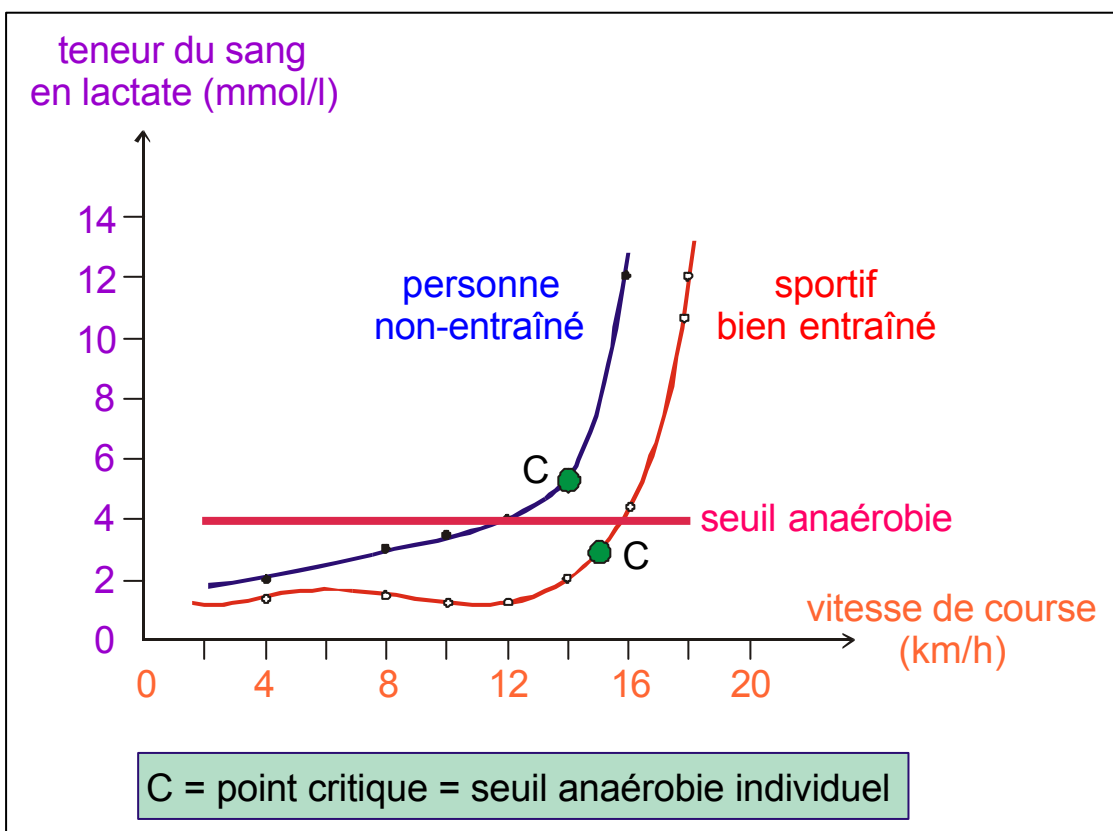
Les bases physiologiques de l'endurance sont difficiles à identifier. Comme l'efficacité de la foulée, l'endurance pourrait être le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs, dont aucun n'est véritablement prédominant.

Elle dépend de la composition du muscle squelettique en fibres "rouges" (fibres de très haute densité de capillaires, **fibres lentes, slow-twitch, ST**, comprenant

d'importantes réserves de glycogène, riches en enzymes du métabolisme aérobie, résistantes à la fatigue), et "blanches" (*fibres rapides, fast-twitch, FT*, riches en composés phosphatés et en réserves de glycogène et en d'enzymes du métabolisme anaérobie). La quantité et le pourcentage des divers fibres dans les muscles semble déterminé génétiquement, cependant, il n'est pas exclu que ces proportions puissent être modifiées à la suite de plusieurs années d'entraînement très dur.

D'un autre côté, l'endurance peut être déduite de la ***courbe représentant le lactate dans le sang en fonction de la vitesse de course***:

Lorsque l'intensité de l'effort augmente, l'approvisionnement énergétique par voie anaérobie prend de plus en plus d'importance, de sorte que la teneur en lactate dans le sang s'élève progressivement. Aussi longtemps que cette teneur est en-dessous de 2 mmol/l, cet approvisionnement se fait presque entièrement suivant les voies aérobie. Entre 2 mmol/l et 4 mmol/l, la production de lactate due au métabolisme anaérobie est compensée par le recyclage du lactate dans le coeur et le foie (*néoglucogenèse*, c. à d., nouvelle production de glucose par le foie à partir du lactate), de sorte que la teneur en lactate reste constante dans le temps (*lactat-steady-state*). Lorsque l'intensité de l'effort augmente davantage la production de lactate devient également plus importante et la teneur en lactate dépasse le **seuil anaérobie (point critique C** sur la courbe) qui correspond à une teneur de lactate dans le sang de 4 mmol/l environ. Dans ce cas la production de lactate dépasse la consommation de sorte que la teneur en lactate augmente très rapidement: le coureur aura mal aux jambes, les contractions musculaires ne pourront plus se faire en présence de telles concentrations de lactate, et l'athlète réduira son effort physique de façon à revenir sous le seuil anaérobie.



La valeur de 4 mmol/l pour le seuil anaérobie est une valeur empirique moyenne. En réalité ce seuil varie légèrement d'une personne à l'autre.

En particulier, il dépend de l'état d'entraînement: Une personne non entraînée a un seuil plus élevé atteint à une vitesse plus faible qu'un coureur bien entraîné, lequel atteint ce seuil à une vitesse plus élevée. La position du point critique C sur la courbe, renseigne donc sur la vitesse qui peut être soutenue, et donc sur le pourcentage le plus élevé du $VO_2\text{max}$ qui peut être utilisé, lors d'un effort d'endurance de longue durée.

Il semble en revanche que ***ni le système respiratoire, ni la pompe cardiaque ne constituent des facteurs limitants de l'endurance***. En effet, immédiatement après un marathon, la fonction pulmonaire n'apparaît pas détériorée. En plus, la fonction du ventricule gauche évaluée à l'échocardiographie quelques minutes après l'arrivée d'un marathon était pratiquement inaltérée. Des signes de "fatigue" cardiaque ont été observés à l'échocardiographie à la suite d'une course de 24 heures ou du célèbre Iron Man d'Hawaï, mais cette fatigue est réversible en quelques heures.

Les limites de l'endurance sont plutôt à chercher au niveau du métabolisme énergétique.

Le glucose et les acides gras sont les principaux carburants "brûlés" pendant un marathon. Le glucose est fourni par les réserves de glycogène du muscle et du foie. Il peut également être synthétisé par le foie (c'est la ***néoglucogenèse***) ou provenir de l'intestin si le coureur ingère des boissons sucrées pendant la course. Les acides gras proviennent des réserves de graisse du tissu adipeux, qui sont très abondantes, et du muscle lui-même. Les réserves de glycogène sont au contraire limitées et les sources de glucose d'appoint que sont la néoglucogenèse et les boissons sucrées sont quantitativement presque négligeables.

Plus le pourcentage du $VO_2\text{max}$ soutenu est élevé, plus le muscle utilise ses propres réserves de glycogène. Les coureurs réalisant un marathon en moins de 3.30 heures (5 min pour 1 km), qui soutiennent des pourcentages élevés de leur $VO_2\text{max}$, brûlent principalement leurs réserves de glycogène musculaire. Si elles s'épuisent avant la fin de la course, la puissance ne peut être maintenue et le coureur doit réduire considérablement sa vitesse. L'endurance dépend donc en grande partie de leur capacité à mettre en réserve des quantités importantes de glycogène musculaire. Elle dépend aussi de leur capacité à utiliser parcimonieusement ces réserves en brûlant de préférence les acides gras dont les réserves sont pratiquement inépuisables: pour un pourcentage donné du $VO_2\text{max}$, un coureur entraîné oxyde un mélange de carburants plus riche en acides gras qu'un coureur non entraîné. Ceci pourrait tenir à ce que l'entraînement favorise l'accumulation de réserves de graisses dans les fibres musculaires. Il accroît également la sensibilité du tissu adipeux aux hormones lipolytiques et donc sa capacité à fournir des acides gras aux muscles qui travaillent. C'est en partie du moins pour ces raisons que l'entraînement améliore l'endurance.

L'objectif des séances d'entraînement de l'endurance ne devrait pas être d'accumuler un maximum de kilomètres, ce qui oblige à courir à des vitesses

basses correspondant à 60 - 70 % du VO_2 max. Le marathon est une épreuve d'endurance, mais elle se court à des puissances correspondant à 70 - 85 % du VO_2 max et c'est dans cette fourchette de puissance que devrait s'effectuer le maximum de kilomètres. L'entraînement de l'endurance par de la course continue sur des distances qui varient de 4 à 20 km selon le niveau de performance, le moment dans la saison et la puissance choisie. Il peut aussi s'effectuer par de la course intermittente sur des distances plus courtes, chaque répétition étant séparée de la suivante par une période de récupération sous forme de course à vitesse réduite.

De façon plus ponctuelle, ***une préparation alimentaire particulière d'environ une semaine peut contribuer à améliorer l'endurance:***

Ce régime appelé encore ***régime aux spaghettis***, comprend schématiquement une période de 2 à 3 jours où le coureur se prive de glucides (pain, pâtes alimentaires, pommes de terre), suivie d'une période de même durée qui se termine la veille de la course, et pendant laquelle il se repose et se gave de glucides. La première période épuise les réserves de glycogène musculaire et celles du foie. La seconde permet de les reconstituer à des niveaux pouvant atteindre 150 % des valeurs normales. L'endurance peut être aussi augmentée transitoirement par l'ingestion de la caféine, l'équivalent de 2 à 3 tasses de café, qui potentialise l'action des hormones lipolytiques.

Les participants qui terminent le marathon en plus de 3.30 h ou 4.00 h courent à des pourcentages plus réduits de leur VO_2 max. Ils consomment donc moins de glycogène musculaire. Par contre, ils consomment plus de glucose circulant dans le sang. La concentration de ce glucose dans le sang (***la glycémie***) est maintenue à une valeur constante par le foie qui déverse continuellement du glucose dans le sang à partir de ses réserves de glycogène. Si ces réserves s'épuisent avant la fin de la course, c'est ***la chute de la glycémie***. Dans ce cas, le coureur ne pourra plus maintenir sa vitesse de course.

Il est assez facile de maintenir la glycémie par l'ingestion de boissons sucrées pendant l'épreuve. Afin d'éviter que les sucres n'entraînent, par un phénomène d'osmose, un transfert d'eau du sang vers l'estomac et l'intestin et que ne soit retardé l'apport du sucre au sang, ***il faut ingérer à intervalles réguliers de petites quantités*** (150 - 200 ml 4 à 6 fois par heure) ***d'une boisson très hypotonique par rapport au plasma sanguin***. Cela veut dire que la concentration en glucose de la boisson (20 - 25 g de sucre/litre) est largement inférieure à celle du plasma sanguin. (Lire en annexe: Comment prendre du sucre pendant la course?)

Un inconvénient de l'ingestion de glucose est qu'elle s'accompagne d'une hausse de la concentration d'***insuline*** dans le sang, laquelle ***inhibe l'oxydation des graisses***, réduisant ainsi la disposition des acides gras comme carburant, et conduisant par là à une utilisation plus importante des réserves de glycogène musculaire. Ces inconvénients peuvent être réduits si le glucose est ingéré en petites rations successives.

Enfin, **le repas précédant la course** contribue également à assurer le maintien de la glycémie. Constitué principalement de glucides et pris environ 3 heures avant la course, son objectif principal est de maximiser les réserves de glycogène hépatique.

En revanche, l'ingestion d'une ration d'attente entre le dernier repas et le départ est à déconseiller. Elle entraîne une hausse de la concentration d'insuline dans le sang qui persiste pendant la course et réduit l'utilisation des acides gras, favorisant l'oxydation du glycogène musculaire et du glucose circulant. Le résultat net est exactement l'inverse de celui recherché: la chute de la glycémie est précipitée pendant la course.

Finalement il est possible que l'endurance d'un coureur dépende, au moins en partie, **de sa capacité à limiter l'augmentation de sa température corporelle**, en se débarrassant des énormes quantités de chaleur produites dans le corps par l'accroissement de l'activité métabolique. Ceci provoque l'élévation de la température dans les muscles, mais surtout de la température centrale du corps. Chez les hommes à l'issue d'un marathon, des températures centrales de 41 à 41,5 °C ont été mesurées. Cette chaleur, estimée à 2000 kcal (8500 kJ) est dissipée dans l'environnement par radiation, par convection, par conduction et par évaporation de la sueur. La contribution de ces différentes voies au refroidissement du coureur varie selon les conditions atmosphériques, notamment la température externe, l'agitation de l'air et son humidité relative. Toutefois l'évaporation de la sueur reste quantitativement la plus importante. Par exemple, dans de bonnes conditions de température, environ la moitié de la chaleur est cédée sous cette forme (beaucoup plus lorsqu'il fait chaud). Ceci représente environ 2 l de sueur évaporée (3,5 l lorsqu'il fait chaud). Mais la production de sueur est en réalité supérieure car une partie ruisselle et ne contribue pas au refroidissement. Dans des conditions d'humidité élevée où l'évaporation de la sueur est difficile, et qui peuvent être aggravées par la présence de chaleur rayonnante provenant du soleil, il faudrait l'évaporation de plus de 7 l de sueur dont 3 l environ proviennent de l'oxydation du glycogène (1 g de glycogène produit 2,7 g d'eau métabolique). Le coureur fait alors face à un danger de déshydratation et d'hyperthermie qui caractérisent **le "coup de chaleur", seul danger réel du marathon**.

Pour prévenir de tels accidents, **le coureur doit s'astreindre à boire régulièrement tout au long du parcours**. De façon pratique, un coureur de 70 kg devrait consommer un litre d'eau par heure de course (au-delà de ce volume, l'eau n'est pas absorbée et s'accumule dans l'intestin) en petites quantités prises à intervalles de temps réguliers. La sensation de soif diminuant pendant l'effort, il est prudent de boire même sans envie dès la première demi-heure de course. Certaines boissons commerciales contiennent des sels minéraux destinés à remplacer ceux qui sont perdus dans la sueur, ainsi que des vitamines. En fait, les pertes de sels minéraux sont très faibles. Il est donc inutile de prendre des suppléments de sels minéraux pendant ou après la course. Quant aux suppléments de vitamines, ils n'ont aucun effet sur la performance.

Les capacités de thermorégulation ne sont pas les mêmes d'un sujet à l'autre. Les pertes de chaleur s'effectuant principalement au niveau de la peau, les sujets les plus légers et les plus longilignes sont avantagés car ils possèdent

une surface d'échange plus élevée par unité de masse. Ceci pourrait expliquer pourquoi la femme, dont la masse est en moyenne les deux tiers de celle de l'homme, soit capable de perdre plus de chaleur par radiation, par convection et conduction, par conséquent, ait besoin de moins transpirer, accusant des pertes d'eau moins grandes que celles de l'homme. La capacité du système circulatoire détermine aussi, pour une part, les capacités de thermorégulation car c'est lui qui assure le transfert de la chaleur des muscles, où elle est produite, vers la peau, où elle est dissipée, et dont le débit sanguin augmente au cours de l'effort.

L'acclimatation améliore la tolérance du coureur à la chaleur. elle s'accompagne d'une expansion du volume sanguin, qui permet ainsi d'assurer un meilleur débit cutané, et augmente la production de sueur par les glandes sudoripares, tout en réduisant son contenu en sels minéraux. Un coureur acclimaté sue donc plus vite et plus abondamment qu'un coureur non acclimaté et ses pertes en sels minéraux sont proportionnellement plus faibles. Pratiquement l'acclimatation peut être obtenue de façon passive en s'exposant à la chaleur, par exemple, dans un sauna.

3) Programme d'entraînement

Rien ne sert d'accumuler les kilomètres comme le croient la plupart des participants au marathon: mieux vaut développer la consommation maximale d'oxygène en effectuant des courses rapides interrompues par des périodes de repos ou de courses plus lentes. Pour planifier ce type d'entraînement par intervalles, on peut utiliser des logiciels qui aident le coureur à préparer un programme. Le tableau illustre le programme hebdomadaire d'un coureur dont l'objectif est de réaliser 3.30 h au marathon (5 min/km).

20 ^e semaine: phase de progression				
		VO ₂ max	km	temps (min:s)
134 ^e jour		jour sans course		
135 ^e jour	PAM 12,2 km	65 %	2	10:55
		100 %	9x500 m (8x400 m)	1:51 (2:30)
		65 %	2,5	13:40
136 ^e jour	1 ^{re} séance facile 6 km	65 %	2	10:55
		70 %	3	15:20
		65 %	1	5:30
	2 ^e séance	20 à 40 min de musculation		
137 ^e jour	séance endurance 15 km	65 %	2,5	13:40
		85 %	4x2 km (3x500 m)	8:34 (3:00)
		65 %	3	16:25
138 ^e jour	séance	20 à 40 min de musculation		
139 ^e jour	séance facile 6 km	65 %	2	10:55
		70 %	3	15:20
		65 %	1	5:30
140 ^e jour	séance longue 20 km	65 %	3	16:25
		72 %	2x6 km (500 m)	29:52 (3:00)
		65%	4,5	24:40
Total hebdomadaire: 59,2 km; total cumulatif: 968,6 km				

Le logiciel planifie, séance pour séance, l'ensemble de la saison du coureur selon les principes d'entraînement acceptés actuellement (progression, alternance, récupération,...) en fonction de son niveau de performance, c'est-à-dire de son VO₂max et de son endurance, estimés à partir des meilleurs temps réalisés jusqu'ici en compétition et selon les objectifs qu'il se fixe. **La semaine présentée ici en exemple se situe à la fin de la phase de progression, deux mois avant la compétition.**

On notera la présence de 3 séances clés:

- * une séance d'entraînement par intervalle pour le développement du VO₂max (PAM = puissance aérobie maximale) effectuée à 100 % du VO₂max;
- * une séance de course intermittente pour le développement de l'endurance, qui est effectuée à 85 % du VO₂max;

- * une séance longue effectuée à la vitesse de compétition (3,35 m/s), c'est-à-dire à 72 % du VO_2max , qui peut contribuer à améliorer l'efficacité de la foulée et l'endurance.

Toutes ces séances sont constituées de courses intermittentes: les courses rapides sont systématiquement entrecoupées de courses plus lentes (les informations notées entre parenthèses correspondent à des courses de récupération).

On notera également la présence de 2 séances de musculation, qui devraient s'effectuer avec des charges légères principalement au niveau des membres inférieurs et du tronc.

Annexe: Approvisionnement en énergie pour la contraction musculaire

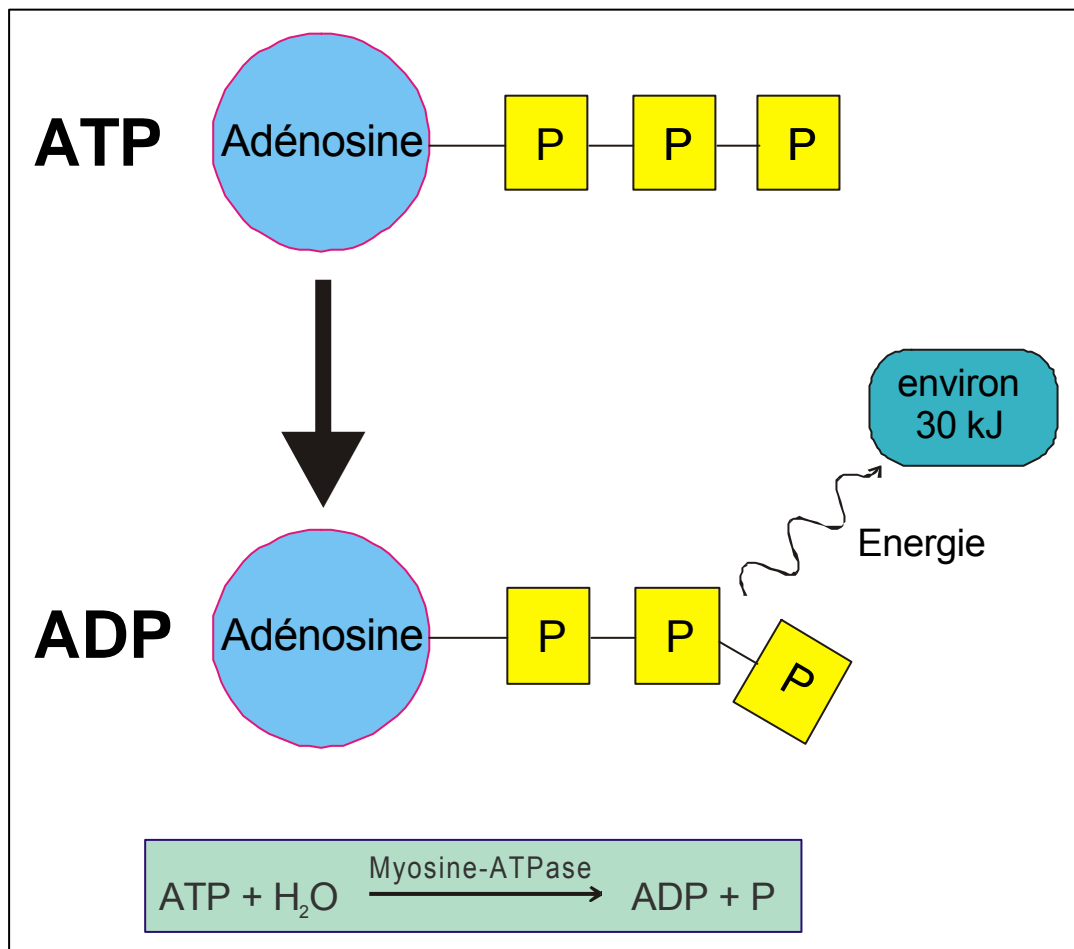
La seule source d'énergie directement utilisable par le muscle pour se contracter, est l'ATP (adénosine triphosphate, phosphate riche en énergie). Comme les réserves intracellulaires d'ATP sont faibles, le tout est d'assurer sa resynthèse continue.

Cette resynthèse peut se faire soit par la **voie aérobie** (oxydative, en présence d'oxygène) soit par la **voie anaérobie** (en absence d'oxygène).

1) Production d'énergie par voie anaérobie

Au début d'un effort dont l'intensité est élevée, les besoins énergétiques ne peuvent être couverts par le processus oxydatif, en raison de la lenteur du système cardio-respiratoire, qui prend un certain temps pour s'ajuster à la demande. Le muscle est donc contraint d'utiliser de l'énergie anaérobie pour se contracter.

La première réaction biochimique à produire de l'énergie provient de l'hydrolyse de l'ATP:



Les réserves d'ATP dans la cellule musculaire sont d'environ 6 mmol/kg de muscle et ne suffisent que pour 2 à 3 secondes (!) de contraction maximale.

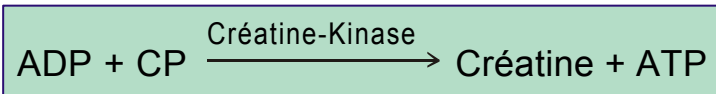
L'ADP et le P inorganique qui résultent de la réaction précédente stimulent la respiration jusqu'à la centupler, activant ainsi intensément les processus métaboliques. Dès que l'effort cesse, l'ADP et le P réagissent entre eux pour resynthétiser de l'ATP, le système respiratoire retourne progressivement à son état de repos.

Le **rôle central de l'ATP** apparaît lorsqu'on se rend compte que le muscle ne peut utiliser que l'énergie fournie par l'ATP. Tous les autres processus d'approvisionnement d'énergie (Créatine-phosphate, glycogène, acides gras) ne font qu'assurer la resynthèse continue de l'ATP.

Certains de ces processus se déroulent sans production de lactate (sel de l'acide lactique), ils sont appelés **processus alactacide**. D'autres produisent du lactate et sont appelés **processus lactacide**.

a) Processus anaérobie alactacide

Pour que l'effort puisse se poursuivre, l'ATP est renouvelé progressivement avec une très grande rapidité par un autre composé riche en phosphate, la créatine-phosphate (CP) qui, elle aussi est en réserve dans le muscle. En gros la réserve de CP est de l'ordre de 20 à 30 mmol/kg de muscle.



Cette **synthèse immédiate de l'ATP** à partir de la CP permet un effort maximal de 20 secondes environ. Au cours de l'effort le réservoir de CP est vidé jusqu'à 20 % de la valeur de repos. Ceci explique également pourquoi la concentration d'ATP ne descend jamais en-dessous de 40 % de la valeur de repos.

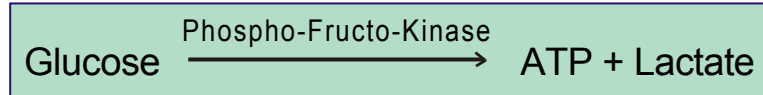
La reconstitution de ce réservoir suit une loi exponentielle, c'est-à-dire, qu'il y a une première phase rapide suivie d'une deuxième phase relativement lente. Cette reconstitution se fait grâce à la contribution de processus oxydatifs et glycolytiques et met environ 4 minutes.

La mobilisation d'énergie, exclusivement à partir de la CP, se maintient pendant 7 à 10 secondes, sans production de lactate. La production d'énergie par unité de temps (puissance), lors d'activités sportives telles que l'haltérophilie ou le 100 m en athlétisme, par exemple, est considérable et provient des composés riches en phosphates. Ce genre d'effort épuise pratiquement la totalité des réserves en ATP-CP.

La **succession permanente de la mobilisation du réservoir de CP et de sa reconstitution** au cours de l'activité physique, provoque chez le sportif l'agrandissement du réservoir de CP ainsi que l'augmentation de l'activité des enzymes ATPase et Créatine-Kinase. Le réservoir d'ATP par contre n'est presque pas modifié. De cette manière, le sportif bien entraîné dispose d'un meilleur approvisionnement en énergie sous forme anaérobie alactacide.

b) Processus anaérobie lactacide

Après 5 s environ d'effort maximal, un autre processus fournisseur d'ATP commence à entrer en action, ceci indépendamment des autres processus. Il s'agit de la **glycolyse anaérobie**, qui elle est productrice de lactate.



La production d'énergie par la glycolyse anaérobie a lieu dans le sarcoplasme de la cellule musculaire. Elle représente l'apport d'énergie principal, lorsque l'effort est très intense et que les besoins en oxygène des muscles ne sont pas satisfaits. La puissance maximale de la glycolyse est atteinte vers la 45^e seconde environ.

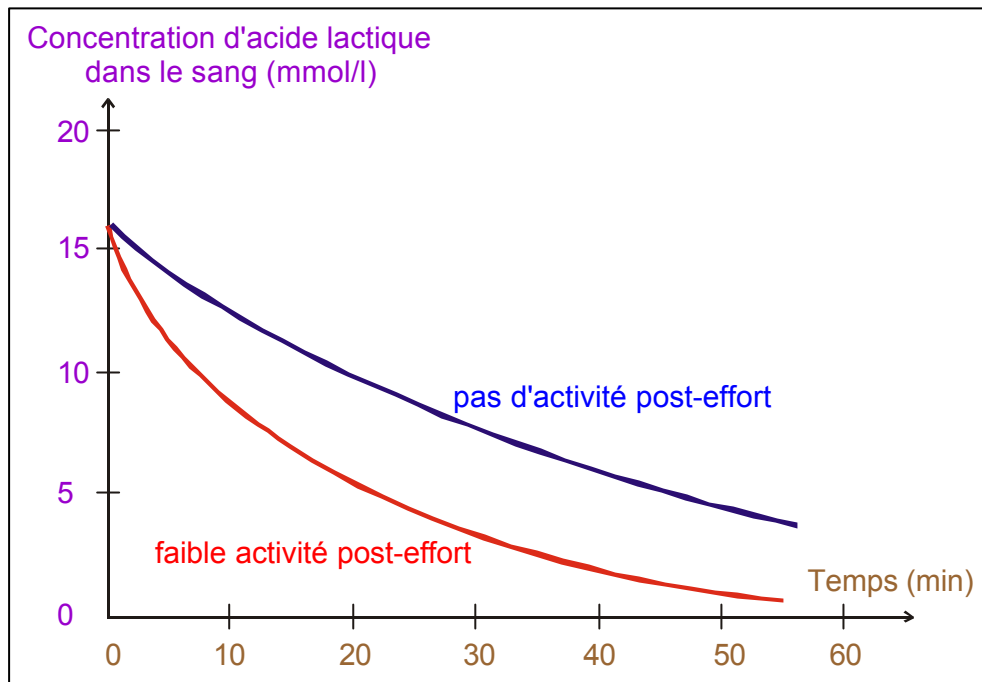
Dans la glycolyse anaérobie, seul le glucose ou le glycogène sont utilisés comme substrat énergétique. Du point de vue énergétique, le glycogène intramusculaire est plus favorable car il n'a pas à être transporté par le sang, il n'a pas à traverser de membrane cellulaire et il produit plus d'ATP que le glucose.

Le glycogène stocké dans le foie n'est presque pas utilisé car il sert à maintenir constant le taux de glycémie dans le sang, condition indispensable au bon fonctionnement du système nerveux central.

Le produit final de la glycolyse anaérobie est le lactate. Celui-ci va produire des modifications tant locales que générales dans les échanges métaboliques. Après des efforts épuisants, la concentration de lactate intramusculaire peut excéder 25 mmol/kg, alors que dans le sang la concentration d'acide lactique maximale avoisine les 20 mmol/l.

Avec des contractions de lactate aussi élevées il se produit une acidose extrême, c'est-à-dire, que le pH intramusculaire peut descendre aux environs de 6,4, alors que le pH artériel peut atteindre des valeurs approximatives de 6,8 (le pH normal étant de 7,4). Par conséquent, localement, les processus enzymatiques de la glycolyse sont pratiquement inhibés. Cette inhibition agit comme soupape de sécurité pour prévenir une acidose trop élevée, et ainsi la destruction des protéines intracellulaires.

Durant la période de récupération, après un exercice épuisant, le taux d'acidose se normalise progressivement selon le niveau d'entraînement de l'athlète. Le lactate intramusculaire passe dans le sang relativement facilement. Il est ensuite recyclé (dans des processus aérobie et avec gain d'énergie) dans le foie, le coeur, et dans les muscles non-sollicités par l'exercice. **Le métabolisme retourne plus vite à des valeurs normales de repos lorsque durant la phase de récupération post-effort, l'organisme est soumis à un effort d'intensité relativement faible (course légère par exemple).** On peut ainsi réduire le temps de normalisation du taux de lactate d'un tiers! Dans tous les cas, ce taux s'est normalisé au bout de 3 heures (et n'est donc pas responsable des courbatures survenant éventuellement le lendemain!)



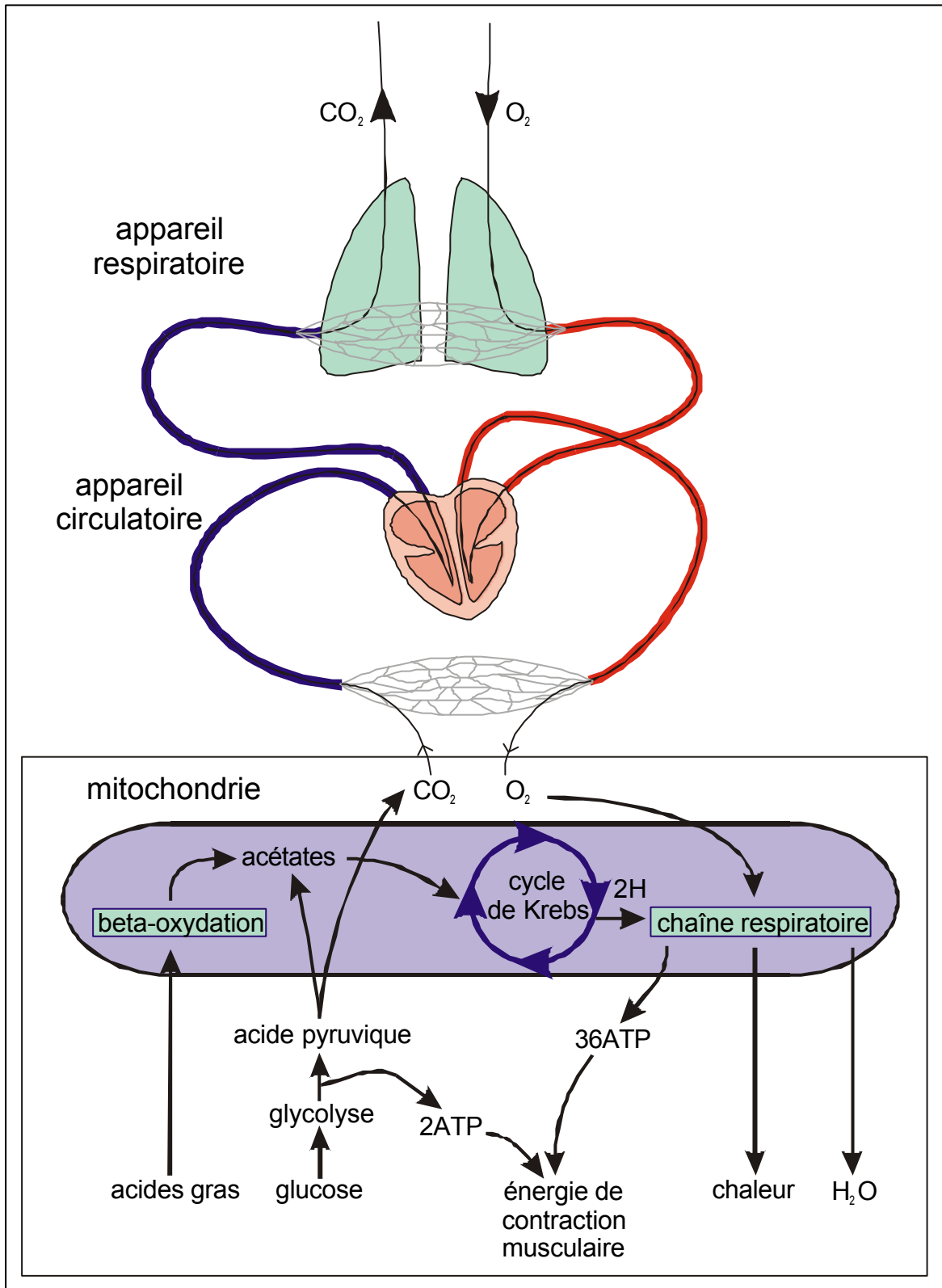
N'oublions pas que le sang présente une certaine capacité d'agir en **tampon** vis-à-vis de l'acide lactique. Un tampon est une substance qui est capable d'inhiber l'effet des acides et des bases sur la variation du pH, ceci jusqu'à épuisement de sa **capacité tampon**. Pour le sang cette capacité est due aux contributions du bicarbonate (64 %) de l'hémoglobine (29 %) et des protéines du plasma (6 %).

L'acide lactique dans le sang est donc principalement tamponné par le bicarbonate du plasma sanguin. En s'entraînant l'athlète accroît sa capacité de tampon due au bicarbonate et à l'hémoglobine, ceci à cause de l'augmentation du volume sanguin. Par conséquent le pH est maintenue constant plus longtemps de sorte que l'**hyperacidification** ("Übersäuerung") du sang est retardée.

Volume sanguin	Non entraînés	Entraînés en endurance
relatif	76 ml/kg	95 ml/kg (+25 %)
absolu (personne de 70 kg)	5,7 l	7,1 l

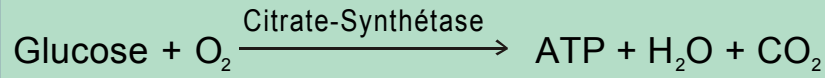
Il est également intéressant de voir que l'athlète bien entraîné présente une plus grande capacité de poursuivre les contractions musculaires malgré l'hyperacidification. Ceci joue un rôle important pour l'endurance anaérobie de l'athlète. Pour ce qui est de l'aspect purement biochimique de cette capacité, on a pu mettre en évidence des différences individuelles non-négligeables ainsi qu'une certaine entraînabilité. D'autre part un aspect psychique s'y mélange intimement, et qui consiste à être plus ou moins capable de persévérer dans l'effort en dépit de douleurs ressenties. Ceci serait dû à la **sécrétion d'endorphines** dans le système nerveux central.

2) Production d'énergie par voie aérobie

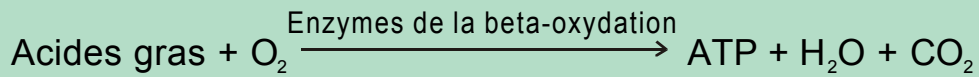


Lorsqu'un effort dure plus d'une minute, la production d'énergie aérobie, qui a lieu dans les mitochondries, prend de plus en plus d'importance. Elle met environ 2 minutes pour se développer pleinement.

La réaction de resynthèse de l'ATP par la glycolyse aérobie s'écrit de façon simplifiée:



Au contraire de ce qui se passe dans le processus anaérobie, ici, en plus du glucose, **les graisses sous forme d'acides gras libres** peuvent être métabolisées par la voie aérobie.



L'oxygène libère l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'organisme, en lui permettant de brûler ses carburants (acides gras libres, glucose). Inspiré par les poumons, l'oxygène passe dans la circulation sanguine qui le délivre aux cellules de l'organisme, principalement celles des muscles lors d'un exercice. Par le même circuit, le gaz carbonique produit par les cellules en activité est rejeté dans l'atmosphère. A l'intérieur des cellules, l'oxygène est acheminé dans la mitochondrie. Là, les acétates fournis par les acides gras ou le glucose sont décarboxylés et déshydrogénés dans le cycle de Krebs. Les hydrogènes H₂ libérés alimentent la chaîne respiratoire et sont finalement acceptés par l'oxygène pour former de l'eau métabolique, en libérant de la chaleur et de grandes quantités d'énergie, dont environ la moitié est récupérée sous forme d'ATP. L'oxygène n'est donc utilisé qu'à la fin de la chaîne des réactions métaboliques. **Le volume maximal d'oxygène qu'un athlète est capable de consommer (VO₂max)** nous renseigne donc sur l'importance du métabolisme aérobie.

VO ₂ max	Non entraînés		Entraînés en endurance	
	femmes (60 kg)	Hommes (80 kg)	femmes (60 kg)	hommes (80 kg)
absolu	2 l/min	3 l/min	4 l/min	4,5 l/min
relatif	32 ml/(kg· min)	38 ml/(kg· min)	40 ml/(kg· min)	55 ml/(kg· min)

La signification des valeurs absolue et relative dépend de la discipline sportive: dans les sports où le propre poids du corps n'est pas transporté durant le déplacement, ou l'est en partie seulement (cyclisme, natation, aviron), la valeur absolue est plus importante; dans les autres cas c'est la valeur relative.

La voie aérobie est utilisée lorsque le débit énergétique sollicité par l'organisme est relativement faible. En effet, le débit énergétique maximal qui peut être fourni, est beaucoup plus faible pour la glycolyse et la lipolyse aérobie que pour la glycolyse anaérobie. Par contre par voie aérobie, les substrats énergétiques sont utilisés avec un rendement beaucoup plus élevé: 1 mol de glucose fournit 38 mol d'ATP, soit 18 fois plus que par voie anaérobie.

Substrat Processus de production énergétique	Débit énergétique maximal (μmol d'équivalent ATP/g-s)	Vitesse et intensité des contractions musculaires	Durée d'utilisation maximale
ATP, CP anaérobie alactacide	1,6 - 3,0	très élevée	7 à 10 s
Glycogène anaérobie lactacide	1,0	élevée	40 à 90 s
Glycogène aérobie	0,5	moyenne	60 à 90 min
Acides gras aérobie	0,24	faible	heures

Pour la lipolyse, la quantité d'oxygène nécessaire est plus grande que pour la glycolyse aérobie. Ceci compense la valeur élevée de l'énergie fournie par la combustion de 1g de graisse, de sorte qu'à consommation d'oxygène égale, le glucose fournit encore 13 % plus d'énergie que les graisses (16 % s'il s'agit du glycogène, qui représente la forme de mise en réserve du glucose intracellulaire). On comprend donc bien pourquoi un sportif d'endurance doit chercher à avoir la plus grande réserve possible de glycogène avant la compétition.

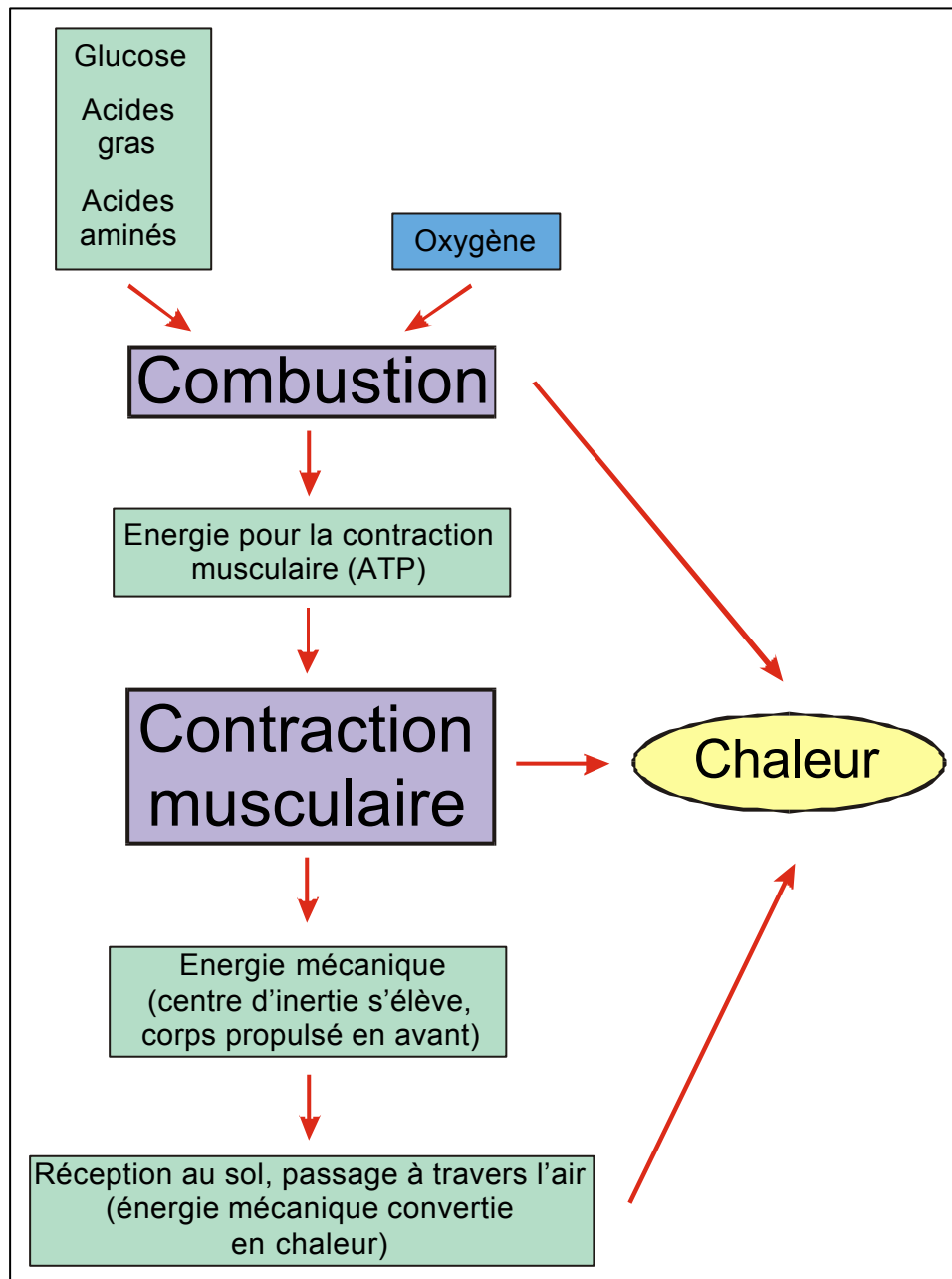
Compte tenu que les réserves de glycogène ne suffisent pas à elles seules lors des efforts de longue durée, la combustion des acides gras joue un rôle de plus en plus important au fur et à mesure que l'effort se prolonge. Ils peuvent couvrir environ 70 à 90 % des besoins énergétiques des muscles lorsque l'effort dure plusieurs heures.

Sources d'énergie	Energie fournie par la combustion d'1 g (kJ)	Energie fournie par litre d'oxygène consommé (kJ)
Hydrates de carbone	17,1	21,3
Graisses	38,9	18,8
Protéines	17,1	19,7

Les sources d'énergie les plus importantes pour le métabolisme aérobie de la cellule musculaire sont apportées par la nutrition:

- * les hydrates de carbone couvrent 2/3 des besoins énergétiques.
- * les graisses couvrent 1/3 des besoins.
- * Les protéines peuvent être négligés car, bien qu'elles jouent un rôle de premier plan dans l'anabolisme, elles n'ont qu'une importance négligeable dans la production d'énergie, dans des conditions normales. Par contre dans des conditions anormales (effort prolongé durant des heures), certains acides

aminés sont métabolisés par voie aérobie. Cette production d'énergie ne dépassera jamais les 3 à 5 % de la production totale d'énergie.

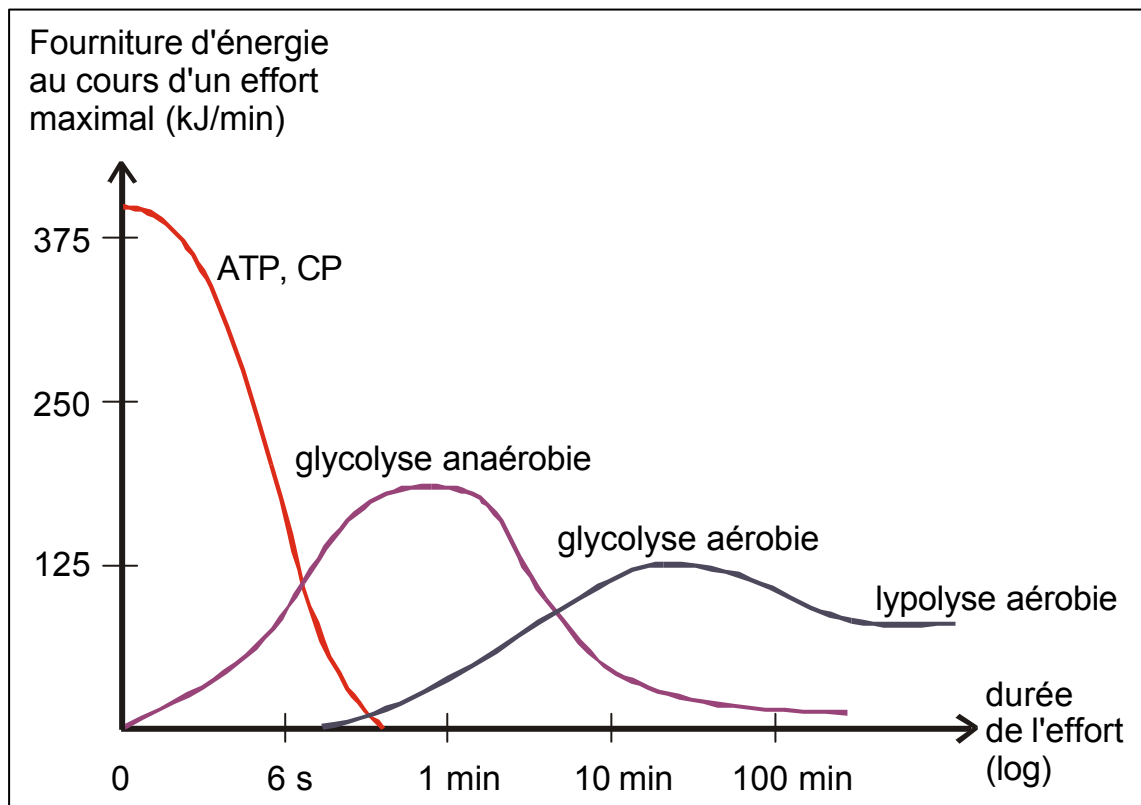


Au cours de la course, le rendement global (combustion et contraction musculaire) de la transformation d'énergie chimique en énergie mécanique utile pour avancer est au mieux de 25 %, généralement même inférieur à cette valeur. Ceci veut dire qu'au cours d'un marathon, pour un coureur de niveau moyen et de masse 60 kg par exemple, la quantité de chaleur produite à l'intérieur du corps humain est d'environ 8500 kJ pour une dépense totale d'énergie d'environ 10500 kJ (2500 kcal). Pour cela il consomme approximativement 300 g de glycogène, 150 g d'acides gras (on ne « maigrit » donc pas trop au cours d'un marathon !) et 15 g de protéines.

3) Production énergétique au cours de l'effort

Au cours d'un effort, les différentes voies d'approvisionnement en énergie de la cellule musculaire se recoupent de sorte qu'on peut distinguer tout au plus des intervalles de temps avec production dominante d'énergie:

- * Les 10 premières secondes: ATP, C.P. musculaire.
- * Entre la 25^e seconde et la 2^e minute: surtout glycolyse anaérobie.
- * Entre la 2^e et la 10^e minute: la glycolyse aérobie est dominante, mais la glycolyse anaérobie est encore importante.
- * Au-delà de la 10^e minute: surtout voies aérobie. D'abord la glycolyse domine.
- * Au-delà de la 45^e à la 60^e minute: la combustion des acides gras libres prend de plus en plus d'importance.



Pour chacune des voies métaboliques la production énergétique dépend de la quantité de substrat ainsi que des enzymes clés. Les enzymes agissant en biocatalysateurs, déterminent la vitesse des réactions.

L'activité d'une enzyme dépend de:

- * sa concentration: plus il y en a, plus grande est l'activité;
- * de la valeur du pH: plus proche d'un pH optimum, l'activité est plus grande;
- * de la température: plus proche d'une température optimum, l'activité est plus grande;

- * de la quantité de substrat énergétique (carburant): plus il y en a, plus l'activité est grande.

Ainsi apparaît clairement l'importance que prennent l'échauffement des muscles, les réserves énergétiques, l'hyper-acidification.

Une importance déterminante incombe aux **enzymes clés**. Ce sont elles qui déterminent la vitesse de toute une chaîne de réactions en régulant celle de la réaction la plus lente de la chaîne.

Quelques semaines d'entraînement physique suffisent déjà à augmenter la concentration de ces enzymes. Inversement en mesurant ces concentrations on peut suivre l'effet qu'ont les différentes formes d'entraînement sur l'organisme. De telles mesures contribuent donc à l'élaboration des programmes d'entraînement.

De plus l'entraînement provoque une augmentation du réservoir de CP ainsi que du réservoir de glycogène stocké dans le foie et dans les muscles. De plus, les fibres musculaires des sportifs possédant une bonne endurance aérobie de longue durée, sont le siège d'une accumulation accrue de triglycérides.

L'acide lactique constitue un bon carburant énergétique pour le muscle cardiaque. Il y est transformé directement en H_2O et CO_2 , et peut assurer les besoins énergétiques jusqu'à 90 % dans le cas d'une activité extrême.

4) Comment prendre du sucre pendant un effort de longue durée?

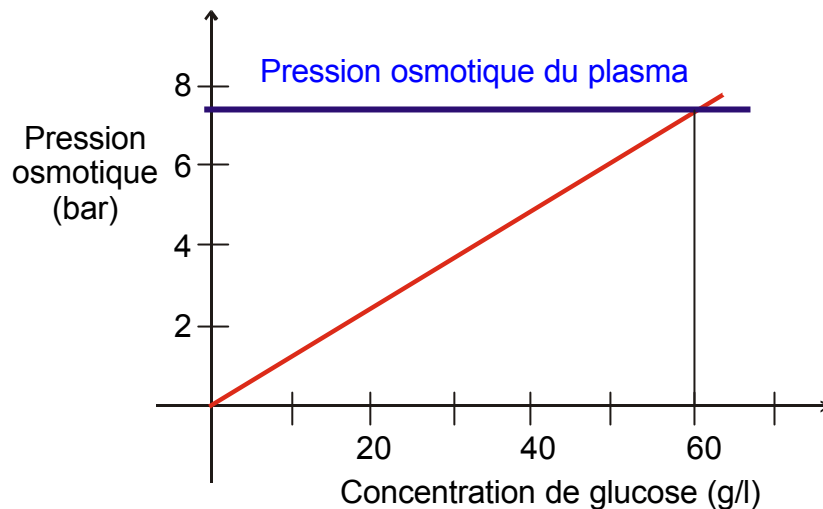
L'ingestion de sucre pendant un long effort présente deux inconvénients:

- * La mobilisation des acides gras diminue en raison de la libération d'insuline. Ceci conduit à utiliser plus de glycogène musculaire et hépatique, dont les réserves s'épuiseront plus tôt.
- * Si la concentration de la solution de sucre ingérée est trop élevée, il y aura des déplacements d'eau du sang vers l'estomac en raison des différences de pression osmotique entre le sang et le contenu de l'estomac.

La **pression osmotique** d'une solution de glucose dépend (à température constante) de la concentration de la solution. Ainsi elle est à la température du corps humain, de 7,5 bar pour une concentration de 60 g/l. Cette valeur équivaut à la pression osmotique du plasma sanguin.

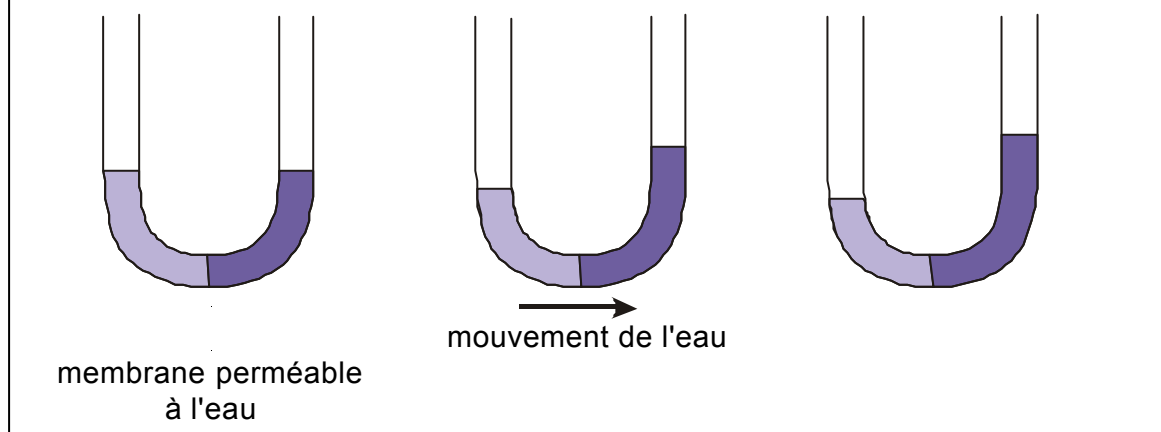
Lorsque deux solutions ont la même pression osmotique, on dit qu'elles sont **isotoniques**. Lorsque les pressions osmotiques sont différentes, la solution dont la pression osmotique est la plus faible est dite **hypotonique** par rapport à l'autre, qui est dite **hypertonique** par rapport à la première. Ainsi une solution de glucose de 30 g/l est hypotonique par rapport au plasma sanguin.

Variation de la pression osmotique d'une solution de glucose en fonction de sa concentration



Si deux solutions dont les pressions osmotiques sont différentes sont séparées par une membrane perméable à l'eau mais non à la substance dissoute, l'eau se déplace de la solution hypotonique vers la solution hypertonique en vue d'équilibrer les pressions osmotiques de part et d'autre de la membrane.

Mouvements d'eau entre deux solutions dont les pressions osmotiques sont différentes



Lorsqu'on ingère une solution de glucose hypertonique par rapport au plasma sanguin (ou si on prend des tablettes de glucose), de l'eau se déplace du plasma vers l'estomac à travers la paroi de l'estomac (paroi non perméable au glucose qui est absorbé plus bas dans le tube digestif au niveau de l'intestin grêle). Ceci a deux conséquences. La première est que le volume de l'estomac augmente: on se sent "ballonné" on peut avoir des nausées et des renvois... ce qui est désagréable quand on court! La seconde est qu'on réduit le volume de son sang, ce qui peut entraîner une chute de la pression artérielle: on peut se sentir étourdi.

Afin de pallier à ces inconvénients il faut prendre une solution de glucose plutôt que du glucose solide, et cette solution doit être très hypotonique par rapport au plasma sanguin: sa concentration doit être inférieure à 60 g/l.

En plus, on a tout intérêt à ce que la solution qu'on a bue soit vidangée le plus rapidement possible dans l'intestin grêle. En effet, tant que la solution sucrée est dans l'estomac le glucose n'est pas disponible pour les muscles qui travaillent ou pour maintenir la glycémie. La durée pendant laquelle la solution bue demeure dans l'estomac dépend de sa pression osmotique. Des solutions très concentrées par rapport au plasma peuvent séjourner de 30 à 45 minutes dans l'estomac. Au contraire des solutions moins concentrées y séjournent moins longtemps. De l'eau pure est vidangée en une vingtaine de minutes.

De façon pratique des solutions dont la concentration est de 20 à 30 g/l sont "idéales": elles apportent de bonnes quantités de glucose et elles sont vidangées dans l'intestin presque aussi rapidement que de l'eau pure.

RESUME

La performance au marathon dépend:

- de la puissance aérobie maximale,
- de l'endurance,
- de l'efficacité de la foulée.

Comment améliorer cette performance?

Améliorer la puissance aérobie maximale (VO₂max)

- Coureurs à VO₂max faible: limitation par les muscles
- Coureurs à VO₂max élevée: limitation par système respiratoire
- Coureurs à VO₂max intermédiaire: limitation par système circulatoire (volume d'éjection systolique)
- Coeur d'athlète (?)
- Concentration d'hémoglobine artificiellement augmentée: meilleure performance
- Différence de la concentration d'hémoglobine hommes/femmes (15,8 g/l contre 13,9 g/l)
- Incertitudes sur l'origine génétique d'une certaine VO₂max, certitudes sur l'origine génétique de la sensibilité à l'entraînement
- Amélioration possible individuellement très différente (15 à 25% en moyenne, mais 0 % ou 90 % selon le coureur)

Entraînement au rythme de la puissance aérobie maximale (entraînement par intervalles).

Améliorer l'endurance

- Endurance limitée par la combinaison de nombreux facteurs dont aucun n'est prédominant
- Proportion fibres rouges/fibres blanches des muscles (origine génétique, modification très lente)
- Réserves de glycogène musculaire des membres inférieurs, ainsi que celles du foie
- Proportion des acides gras dans le mélange des carburants
- Préparation alimentaire, notamment au cours de la semaine qui précède la course
- Capacités de thermorégulation
- Adaptation du système hormonal
- Amélioration importante garantie

L'endurance ne dépend pas

- du système respiratoire,
- de la pompe cardiaque.

Entraînement au rythme de la course et à un rythme plus bas.

Bibliographie.

- * Cottureau S. : Encyclopédie Pratique du Jogging, 1994.
- * Weineck J. : Biologie du Sport, 1992, Vigot éditions Paris.
- * Péronnet F., Thibault G., Ledoux M., Brisson G. : Le Marathon : équilibre énergétique, endurance et alimentation du coureur sur route, 1983, Vigot éditions Paris.
- * Peronnet F. : La Physiologie du Marathonien. Article paru dans La Recherche No 201, 1988.
- * Carré F., Rochcongar P. : Marathon et triathlon. Quels risques immédiats ? Article paru dans la Revue du Praticien – Médecine Générale Tome 8- No 243, 1994.
- * Zintl F. : Ausdauertraining. Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung, 1990, BLV Sportwissen.