# Chapitre 13. CARBURANTS, COMBURANT, POMPE CARDIAQUE, DÉPENSES ET RECETTES

Carburant : Combustible qui, mélangé à l'air, peut être utilisé dans un moteur. Chez l'homme, on peut considérer que les aliments sont du carburant.

Comburant : Corps qui, en se combinant avec un combustible, opère la combustion de ce dernier. L'oxygène est un comburant.

Pompe : Appareil destiné à déplacer les fluides et leur contenu.

Dépense : Usage d'un bien.

Recette : Compensation du coût de l'usage d'un bien.

# 13.1. ÉNERGÉTIQUE MUSCULAIRE

## 13.1.1. ORIGINE DE L'ÉNERGIE

Pour se contracter, le muscle a besoin d'énergie. Celle-ci lui est fournie par la transformation de l'adénosine triphosphate (ATP) en adénosine diphosphate (ADP). Voyons comment et dans quelles conditions. Le soleil bombarde notre planète de radiations porteuses d'énergie qui, au sein du monde végétal, assure la décomposition de l'eau (photolyse) en oxygène, en hydrogène et en énergie fixée à l'atome d'hydrogène.

#### Eau + soleil → oxygène + (hydrogène-énergie)

Cet hydrogène riche en énergie s'incorpore dans les aliments sous forme de glucides, de lipides ou de protides. La digestion va permettre d'extraire l'hydrogène et de libérer l'énergie qu'il transporte. Celle-ci est aussitôt captée et emmagasinée dans des « condensateurs », les molécules d'ATP. Et l'hydrogène, vidé de son énergie, s'unit à l'oxygène pour reformer de l'eau.

L'adénosine triphosphate est formée, comme son nom l'indique, d'adénosine (une substance essentielle à la vie des cellules) et de trois radicaux phosphorés. L'un de ces radicaux est relié à l'adénosine par une liaison dite « riche en énergie ». La rupture de cette liaison, grâce à l'action d'une enzyme, l'ATPase, s'accompagne d'une libération d'énergie qui est utilisée par la cellule musculaire pour la contraction du muscle, en présence de sodium et de potassium.



# $ATP \rightarrow ADP + P + Énergie$



Maurice ne s'en doute pas, mais chaque jour, ce sont 85 kg d'adénosine triphosphate (ATP) qui sont formés et utilisés dans tout son organisme. Pour cela, chaque molécule d'adénosine diphosphate est phosporylée et déphosphorylée plusieurs milliers de fois.

Le muscle est ainsi une machine qui transforme une énergie chimique en énergie mécanique. Le rendement de cette transformation n'est pas parfait, une grande partie de l'énergie est dépensée sous forme de chaleur, selon un pourcentage variable suivant les individus. Nous y reviendrons à la fin de ce chapitre. Pour l'instant, constatons qu'en moyenne la relation est la suivante :

Énergie chimique → Énergie mécanique (20 %) + Chaleur (80 %)

# 13.1.2. STOCKAGE ET UTILISATION DE L'ÉNERGIE

Dès le début de la contraction musculaire, tout l'ATP présente dans le muscle est utilisée. Un système de régénération immédiate et rapide, situé dans le muscle, permet à partir du phosphagène (forme de stockage de liaisons riches en énergie) de prolonger encore, pendant 40 secondes environ, la contraction musculaire. Au-delà de ce délai, il faut fabriquer d'autres molécules d'ATP. L'organisme utilise alors ses réserves énergétiques glucidiques et lipidiques.

Les glucides sont l'aliment de premier choix pour le muscle. Seul le cœur fait exception en utilisant aussi bien les sucres que les graisses. Cela vaut mieux, car que se passerait-il en cas d'hypoglycémie? La digestion transforme les glucides en glucose qui est alors transporté par le sang dans lequel sa concentration reste aux alentours de 1 g/l à l'état normal et à jeun. S'il n'est pas utilisé par l'organisme, le glucose est stocké sous deux formes.

La première forme de stockage est limitée mais rapidement mobilisable, c'est le glycogène présent dans les muscles et le foie, dont les capacités énergétiques sont d'environ 6.000 à 8.000 kJ ou 1.500 à 2.000 kcal. Le glucose excédentaire est transformé en graisses et emmagasiné dans le tissu adipeux dont la capacité est quasi-infinie (en général plus de 300.000 kJ ou 70.000 kcal). En cas de besoin, le glycogène musculaire est d'abord utilisé, puis le glucose sanguin, puis le glycogène hépatique. En dernier lieu, pour des efforts de longue durée, l'organisme pioche dans les stocks de graisse.

	Réserves estimées de combustibles de Maurice (en kilocalories) :						
		Sang	Foie	Cerveau	Muscles	Graisses	
	Glucose ou glycogène	60	390	8	1200	80	
	Triglycérides	45	450	0	450	100.000	

# 13.1.2.1. Utilisation du glucose

Le glucose libéré pénètre dans la cellule où sa destinée sera différente selon qu'il y a ou non de l'oxygène. En présence d' $O_2$ , le glucose est broyé pour en extraire l'hydrogène et surtout l'énergie qui lui est attachée. À partir d'une molécule de glucose, ce sont 38 liaisons riches en énergie qui sont produites, qui donnent 38 ATP. Un gramme de glucose fournit une énergie de 4 kcal.

Glucose 
$$C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 + 38 P + 38 ADP \rightarrow 6 CO_2 + 44 H_2O + 38 ATP$$

En l'absence d'oxygène, le glucose est dégradé en acide lactique. Le rendement de cette réaction est piteux (2 ATP pour une molécule de glucose), il y a une surconsommation des aliments disponibles et une accumulation de déchets, dont l'acide lactique.

Glucose 
$$C_6H_{12}O_6 + 2P + 2ADP \rightarrow 2$$
 acide lactique  $C_3H_6O_3 + 2H_2O + 2ATP$ 

Mais si l'oxygénation redevient suffisante, l'acide lactique peut être utilisé pour fournir de l'énergie et participer à la reconstitution des réserves en glycogène hépatique. Notons ici que le cerveau n'utilise que le glucose comme apport énergétique, qu'il en consomme 120 g environ par jour et que, ses stocks étant faibles, il doit être en permanence approvisionné par le sang.

#### 13.1.2.2. Utilisation des lipides

Les lipides ne sont pas les aliments de première intention pour le muscle, sauf pour le myocarde, nous l'avons vu. En effet, leur structure chimique est complexe et ils ne peuvent fournir de l'ATP qu'après une dégradation complexe (des triglycérides sous forme d'acides gras libres). La seule limite à la consommation des lipides est la « lenteur » des réactions chimiques qui ne peuvent répondre à la demande musculaire d'un effort intense. Mais si la demande en énergie est modérée et si l'oxygénation est bonne, les lipides peuvent efficacement contribuer à la fourniture de l'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

Un gramme d'acide gras libre fournit alors une énergie de 9 kcal, soit 2,25 fois plus qu'un gramme de glucose. La participation énergétique des lipides est d'autant plus importante que l'effort est peu intense et long. Ils constituent donc l'aliment musculaire de choix pour les cyclistes et surtout les cyclotouristes. Mais il faut toujours se souvenir que les lipides ne sont jamais la seule source d'énergie. C'est pourquoi les réserves de glycogène musculaire et hépatiques sont d'une importance capitale, même dans l'effort peu intense et prolongé.

# 13.2. L'OXYGÈNE ET LE TRAVAIL CARDIAQUE

Il est maintenant nécessaire de s'intéresser au travail du système cardiovasculaire et respiratoire, car, *in fine*, la vitesse du cycliste va dépendre de ses capacités et performances. Or celles-ci sont faciles à quantifier et leur connaissance est utile à l'intelligence et à la bonne gestion de la pratique cycliste. Le système cardiovasculaire et respiratoire est indispensable au bon fonctionnement de tous les autres systèmes. C'est lui qui apporte à chaque cellule l'oxygène et les aliments dont elle a besoin, et élimine les déchets. Par le sang, il transporte les hormones, contribue au maintien de la température corporelle, à la régulation de l'acidité et de l'hydratation de l'organisme et joue un rôle essentiel dans la défense contre les maladies infectieuses.

# 13.2.1. OXYGÈNE ET ENDURANCE

# 13.2.1.1. L'oxygène O<sub>2</sub>

L'oxygène est le comburant indispensable à la vie. La combustion du glucose (le carburant) en présence d'oxygène est la plus importante et la plus rentable des réactions chimiques productrices d'énergie dans chaque cellule. Notons ici qu'un litre d'O<sub>2</sub> permet de libérer 5 kcal ou 21.000 joules.

L'oxygène se trouve dans l'air que nous respirons. Chaque personne possède un système cardio-respiratoire et vasculaire chargé de le prélever, transporter et délivrer aux cellules en activité.

## 13.2.1.2. Capacité aérobie ou VO<sub>2</sub>max

Une formule simple, mais fondamentale, l'équation de Fick, donne la consommation d'oxygène :

$$VO_2 = f_c \times Vs \times (CaO_2 - CvO_2)$$

dans laquelle  $VO_2$  est la consommation d'oxygène, fc la fréquence cardiaque, Vs le volume d'éjection systolique,  $(CaO_2 - CvO_2)$  la différence artério-veineuse. Nous allons préciser tous ces concepts ci-dessous. La capacité du système permettant de distribuer l'oxyxgène est limitée. Sa valeur maximale est appelée capacité aérobie ou consommation maximale d'oxygène ou  $VO_2$ max. Elle correspond aux limites physiques d'une personne. On l'exprime en millilitre d' $O_2$  par kg de poids corporel et par minute. La mesurer est probablement le meilleur moyen de déterminer l'aptitude d'un individu à l'effort. Nous y reviendrons également ci-dessous.

# 13.2.1.3. Endurance aérobie ou endurance cardiorespiratoire

L'endurance est la qualité qui permet de poursuivre un effort le plus longtemps possible. On distingue, selon la manière d'utiliser ou non l'oxygène, une endurance aérobie et une endurance anaérobie. Dans l'endurance aérobie, il y a équilibre entre l'apport et les besoins en oxygène. Le système cardiovasculaire et respiratoire chargé de fournir  $O_2$  aux cellules n'est pas débordé, l'effort reste en deçà des capacités de l'organisme et ne met en jeu que les mécanismes chimiques aérobies, les plus rentables.

#### 13.2.1.4. Endurance anaérobie ou endurance musculaire ou résistance

L'endurance anaérobie est la qualité qui permet de prolonger le plus longtemps possible un effort d'intensité maximale. On l'appelle aussi résistance. Il y a déséquilibre entre l'apport en oxygène, qui est limité, et son besoin. Pour trouver l'énergie nécessaire, l'organisme utilise d'autres voies que celle de la combustion en présence d'oxygène. Ces voies, dites anaérobies (c'est-à-dire n'utilisant pas l'oxygène) sont plus coûteuses et produisent plus de déchets que la voie aérobie. L'acide lactique est l'un de ces déchets. Son accumulation contribue à la fatigue. Nous verrons plus bas comment on utilise son dosage, lors d'épreuves d'effort, pour déterminer le moment du passage de l'endurance aérobie à l'endurance anaérobie (en 13.2.4.3).

#### 13.2.1.5. Hiérarchisation des deux qualités

L'endurance aérobie reste la qualité primordiale, toujours nécessaire et souvent suffisante. C'est une évidence chez les cyclotouristes dont l'effort est, par définition et par technique, long et modéré. Ça l'est un peu moins chez les coureurs cyclistes qui doivent faire preuve de mordant et de qualités d'accélération à certains moments de la course. Leur entraînement repose donc d'abord sur un travail d'endurance aérobie, mais doit comporter des séances de travail intense en endurance anaérobie.

# 13.2.2. LE SYSTÈME CARDIOVASCULAIRE ET RESPIRATOIRE

Il est composé du cœur, de l'appareil respiratoire, du sang et des vaisseaux.

#### 13.2.2.1. Le cœur

Le cœur est une pompe aspirante et refoulante, qui sait s'adapter aux circonstances. Le sang arrive dans l'oreillette droite par les deux veines caves, chargé des déchets métaboliques qui n'ont pas été éliminés par le

foie et les deux reins. Il passe dans le ventricule droit qui l'envoie vers les poumons par les artères pulmonaires. Le sang est alors réoxygéné et débarrassé de ses déchets. Puis il chemine vers l'oreillette gauche par les veines pulmonaires et, enfin, le ventricule gauche par la valve mitrale. Il est éjecté dans l'aorte pour être distribué à l'ensemble des organes et tissus. La phase de remplissage du ventricule s'appelle diastole et la phase d'éjection s'appelle systole.

Le cœur est un muscle (le myocarde) surtout puissant au niveau du ventricule gauche car il doit éjecter le sang avec une pression suffisante pour irriguer tout l'organisme, du cerveau aux orteils. Il est proche d'un muscle squelettique mais est structuré pour que ses fibres restent liées entre elles et puissent se contracter ensemble, d'une manière simultanée et homogène.

Le muscle cardiaque peut générer sa propre activité rythmique, à partir d'un système spécifique qui assure

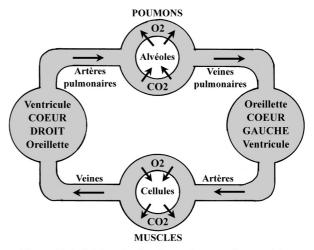


Figure 13.1. Schématisation du système cardiovasculaire et respiratoire montrant les échanges au niveau des poumons et des muscles.

l'automatisme cardiaque. En l'absence de toute stimulation extérieure, la fréquence de contraction du cœur ou fréquence cardiaque  $f_c$  est de 70 à 80 battements par minute (bpm). Cette  $f_c$  de repos diminue chez les sportifs très entraînés en endurance. Mais le coeur peut aussi être stimulé par le système nerveux végétatif ou par des hormones. Le parasympathique intervient plutôt au repos, il ralentit le cœur et diminue la force du myocarde. À l'inverse, le sympathique intervient plutôt à l'effort ou en réponse aux stress, il accélère la fréquence cardiaque et augmente la force de contraction du myocarde.

Figure 13.2. Un petit bout de tracé électrocardiographique.

Le travail du myocarde génère une activité électrique bien connue, facilement enregistrée grâce à l'ECG (électrocardiographie). Cet examen simple et banal donne des renseignements précis sur le rythme cardiaque, mais aussi sur le fonctionnement intime du muscle cardiaque.

À chaque contraction du ventricule gauche, le cœur éjecte un volume de sang, variable suivant les individus, qu'on appelle volume d'éjection systolique. Le

volume sanguin éjecté par unité de temps est un débit qu'on appelle débit cardiaque. Il est égal au volume d'éjection systolique multiplié par la fréquence cardiaque.



Maurice n'est pas inquiet mais est raisonnable et rationnel. Il a donc subi tous les examens utiles à sa pratique sportive au centre médico-sportif du CHU.

Au repos, pendant la pleine saison des randonnées, son cœur a un fréquence de 60 bpm, son volume d'éjection systolique est de 70 ml et son débit cardiaque est donc de 4,2 l/mn.

# 13.2.2.2. L'appareil respiratoire

La respiration est la fonction qui permet les échanges gazeux, en oxygène  $O_2$  et dioxyde de carbone  $CO_2$ , entre les cellules et le milieu extérieur. On distingue une respiration pulmonaire d'échanges de gaz au niveau des alvéoles pulmonaires et une respiration cellulaire pour les échanges entre sang et tissus.

La ventilation représente l'ensemble des phénomènes qui déplacent l'air dans les voies respiratoires sous l'action des mouvements alternatifs de l'inspiration et de l'expiration. L'appareil respiratoire pulmonaire est d'abord composé du soufflet des deux poumons mus par de nombreux muscles. Une tuyauterie apporte l'air jusqu'aux alvéoles pulmonaires, par la bouche, les fosses nasales, le pharynx et le larynx, la trachée et les bronches et bronchioles.

L'inspiration est active, grâce à l'intervention de nombreux muscles (figure 13.3). Certains soulèvent les côtes et le sternum, ce sont les intercostaux, le grand dentelé, le petit dentelé... Le plus important et efficace des muscles respiratoires est le diaphragme qui sépare le thorax de la cavité abdominale. En s'abaissant, et en travaillant en synergie avec les muscles abdominaux, il refoule les viscères abdominaux et accroît le diamètre vertical de la cage thoracique.

L'expiration est passive au repos, due au relâchement des muscles inspirateurs et à l'élasticité du tissu pulmonaire. La régulation de la ventilation est le fait de centres nerveux respiratoires, sensibles à la teneur en dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et à l'acidité du sang. Ils sont situés dans le tronc cérébral. Mais la ventilation peut aussi être volontaire, tant à l'inspiration qu'à l'expiration.

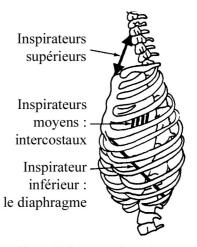


Figure 13.3. La cage thoracique. Schématisation des muscles inpirateurs.

Capacité vitale

Capacité pulmonaire totale

Capacité pulmonaire totale

Capacité pulmonaire totale

Capacité pulmonaire totale

Figure 13.4. Les volumes respiratoires.

L'appareil ventilatoire permet de brasser des volumes d'air variables selon les individus (figure 13.4). La quantité d'air mobilisable est appelée capacité vitale (CV), elle est d'environ 3 à 5 litres chez des sujets normaux, mais peut atteindre 7 l chez certains athlètes. La capacité vitale est divisée en trois volumes. Au repos, seul le volume courant (VC), d'environ un demi-litre, est utilisé à chaque inspiration et expiration. Un volume de réserve inspiratoire (VRI) d'environ 2 l, et un volume de réserve expiratoire (VRE) d'environ 1,5 l sont mobilisables si la demande ventilatoire augmente, notamment à l'effort.

Enfin, tout l'air des poumons ne peut être brasé. Il reste en permanence un volume résiduel correspondant à la tuyauterie. Le débit ventilatoire est fonction du volume d'air mobilisé à chaque cycle respiratoire et de la fréquence de ces cycles. On l'exprime en litres par minute.



La CV de Maurice est de 5,3 l. Au repos, VC = 0,55 l, et rythme respiratoire = 14 cycles/mn. Le débit ventilatoire est donc de  $0,55 \times 14 = 7,7$  l/mn.

# 13.2.2.3. Le sang

Le volume du sang est d'environ 5 litres chez l'homme, un peu moins chez la femme. Il est constitué par les éléments figurés (40 à 45 %) et par le plasma (55 à 60 %). Le pourcentage des éléments figurés est l'hématocrite. Les éléments figurés sont les globules rouges, les globules blancs et les plaquettes. Les globules rouges en représentent 99 %. Ils contiennent l'hémoglobine, pigment qui leur donne la couleur rouge et joue un rôle capital en permettant le transport de l'oxygène vers les cellules. Le plasma est composé à 90 % d'eau. Il assure le transport des électrolytes, des enzymes, des hormones, des anticorps, des substances nutritives, de certains déchets...



La numération formule sanguine de Maurice est normale.

- Globules rouges =  $5.000.000 / \text{mm}^3$
- Taux d'hémoglobine =  $17 \text{ g} / 100 \text{ cm}^3$
- Hématocrite = 45 %

#### 13.2.2.4. Les vaisseaux

Le système vasculaire est composé d'une arborescence de vaisseaux qui permet d'irriguer toutes les cellules de l'organisme et d'y ramasser les déchets. Du cœur part l'aorte qui se divise en artères se dirigeant vers les différents organes et les muscles. Les artères se divisent ensuite en artérioles puis en capillaires. C'est au niveau des capillaires que s'effectuent les échanges gazeux et nutritifs. Puis, le sang revient au cœur par les veinules, les veines et enfin les deux veines caves.

La circulation du sang dans les artères se fait sous la pression créée par le myocarde. Cette pression artérielle (TA) est facile à mesurer. On en retient deux chiffres. Le premier, pendant la systole ventriculaire, est la pression artérielle systolique. Le second est appelé pression artérielle diastolique. On exprime ces deux chiffres en mm de mercure ou, plus couramment, en cm de mercure. La pression artérielle est, en partie, sous le contrôle du système nerveux autonome. Le retour veineux est moins actif. Il est favorisé par la respiration, les contractions musculaires et par des clapets anti-retour (les valvules) sur les veines des territoires inférieurs, situés en dessous du cœur. Les pressions sanguines évoluent le long de l'appareil circulatoire (figure 13.5).

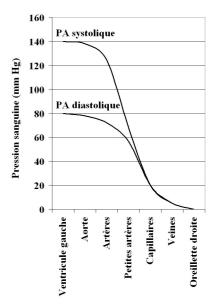


Figure 13.5. Evolution de la pression sanguine dans les vaisseaux.



La TA de Maurice est stable : Pression systolique de repos = 13. Pression diastolique = 7.

Quand on lui demande qu'elle est sa tension artérielle, il répond 13 - 7.

Il existe une différence de quantité d'oxygène entre le sang artériel  $(CaO_2)$  et le sang veineux  $(CvO_2)$  due à l'utilisation de l'oxygène par les organes ou les muscles. C'est la différence artério-veineuse  $(CaO_2 - CvO_2)$ . Au repos, le sang artériel contient environ 20 ml d' $O_2$  pour 100 ml de sang, ce qui correspond presque à sa capacité maximale de transport de l' $O_2$ . Le sang veineux n'en contient que 14 ml d' $O_2$  / 100 ml. La différence artério-veineuse de repos est donc de l'ordre de 6 ml / 100ml de sang.

# 13.2.3. RÉPONSE CARDIOVASCULAIRE ET RESPIRATOIRE À L'EFFORT

À l'effort, les muscles consomment plus d'oxygène et de substances énergétiques, et éliminent plus de déchets. Le système cardiovasculaire et respiratoire s'adapte donc pour répondre aux besoins.

### 13.2.3.1 Augmentation du débit cardiaque

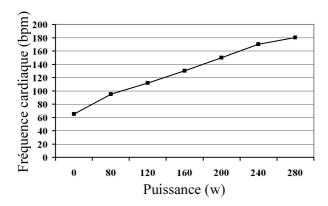
La fréquence cardiaque  $f_c$  augmente en proportion de l'activité (figure 13.6), jusqu'à un maximum qu'elle ne peut dépasser et qu'on appelle là fréquence cardiaque maximale ou  $f_{cmax}$ . Nous y reviendrons en 13.2.6.1. Sous les effets conjugués d'un meilleur retour veineux (augmentation des mouvements respiratoires et contractions musculaires), d'un meilleur remplissage du ventricule, d'une contraction plus puissante du muscle cardiaque, d'une diminution des résistances périphériques (dilatation des vaisseaux alimentant les muscles), le volume d'éjection systolique augmente à l'effort. Il peut doubler chez des personnes habituées à une activité physique.

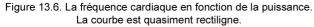
C'est un déterminant important de la capacité d'endurance. Produit de la fréquence cardiaque et du volume d'éjection systolique, le débit cardiaque augmente et peut passer de 5 l/mn au repos, à 20 l/mn, voire plus.



La  $f_{\rm cmax}$  de Maurice est de 180 bpm. Elle est atteinte pour une puissance de 280 watts. Sa  $f_{\rm c}$  de repos étant de 60 bpm

On peut écrire (pour lui seul, bien sûr, et à un moment donné) la relation suivante entre sa  $f_c$  et sa puissance développée :  $f_c = (0.43 \times \text{Puissance}) + 60$  ou Puissance =  $(f_c - 60) / 0.43$ .





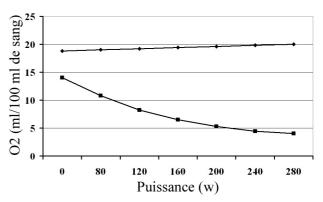


Figure 13.7. Quantité d'oxygène dans les sangs artériels et veineux en fonction de la puissance développée.



Figure 13.8. L'épreuve d'effort maximale, avec étude des métabolisme, réalisée en centre médico-sportif spécialisé sous surveillance médicale.

#### 13.2.3.2. Augmentation de la ventilation

Le débit ventilatoire s'accroît, en jouant sur les volumes d'air mobilisés et sur la fréquence des cycles respiratoires. Le volume courant augmente et mobilise largement, voire totalement, la capacité vitale. Pendant un effort modéré, le volume courant atteint environ 50 % de la capacité vitale. La fréquence respiratoire augmente elle aussi, peu dans des efforts modérés, beaucoup plus dans les efforts intenses. Au total, le débit ventilatoire augmente et peut atteindre plus de 100 l/mn.

À l'effort, les muscles servant à l'inspiration sont mis en jeu en tout ou en partie. Mais la position à bicyclette, en fléchissant la colonne vertébrale lombaire, diminue la capacité abdominale et contrarie la descente du diaphragme. Elle n'est donc pas favorable à l'inspiration. C'est vrai dans la position de recherche de vitesse, les mains en bas du guidon. Ce l'est moins dans la position des cyclotouristes ou chez les grimpeurs en plein exercice. Dans les circonstances d'un effort important, l'expiration devient active, mettant en jeu les muscles intercostaux internes et surtout les muscles de la sangle abdominale. La position du cycliste, qui accroît la pression intra-abdominale, est ainsi favorable à l'expiration.



Pendant la montée du Ventoux, le volume courant de Maurice s'élève à 2,5 litres. Son rythme respiratoire est légèrement accéléré à 24 cycles/minute. Son débit ventilatoire est de l'ordre de 60 litres/minute.

#### 13.2.3.3. Augmentation de la perfusion sanguine des muscles

La pression artérielle systolique augmente en proportion de l'effort, en lien avec le débit cardiaque. À l'inverse, la pression artérielle diastolique varie peu, le cœur étant « au repos » pendant la diastole.

Et le volume plasmatique diminue, notamment lors d'exercices prolongés. Comme le nombre des globules rouges reste stable ou augmente (à partir du petit stock de la rate) il y a une augmentation de l'hématocrite. Au total, le débit sanguin augmente à l'effort. Mais pas partout. Le sang est distribué d'une manière préférentielle, là où c'est vital (coeur, cerveau...) et là où les besoins augmentent (muscles). Au repos, les muscles ne reçoivent qu'un petit cinquième du débit sanguin total. À l'effort, ils peuvent en capter les 4/5<sup>ème</sup>, notamment aux détriments de la circulation sanguine de l'appareil digestif. Pédaler ou digérer, il vaut mieux ne pas choisir et diminuer son braquet. À l'effort, le taux artériel en oxygène reste stable, alors que le taux veineux en oxygène diminue, voire s'effondre pour devenir quasiment nul dans les veines qui drainent les muscles (figure 13.7). La quantité d'oxygène (CaO<sub>2</sub> – CvO<sub>2</sub>) prélevée par les muscles augmente donc.



Pression artérielle de Maurice, mesurée dans le Ventoux à l'aide d'un holter tensionnel :

- PA systolique = 20 cm Hg.
- PA diastolique = 6,5 cm Hg, proche de sa valeur de repos.

# 13.2.4. FRÉQUENCE CARDIAQUE, PUISSANCE, VO2max ET SEUILS LACTIQUES

# 13.2.4.1. Des paramètres liés

Tous les travaux de laboratoires, confirmés par les constatations du terrain, montrent le lien qui unit la fréquence cardiaque et la puissance développée par le sportif. C'est intéressant. En effet, la fréquence cardiaque est facile à connaître, par la prise du pouls, ou grâce à un cardiofréquencemètre ou par un enregistrement électrocardiographie. Mais la puissance développée est beaucoup plus difficile à mettre en évidence. On la connaît indirectement en la quantifiant de l'extérieur. Nous avons donné des exemples de sa mesure sur le terrain aux chapitres 11 et 12. Les appareils pour tester les sportifs, par exemple le cycloergomètre souvent utilisé et particulièrement bien adapté aux cyclistes, permettent de faire varier la résistance opposée d'une quantité connue. Rapportée à la vitesse de pédalage, cette résistance donne une puissance. Puissance d'opposition, si l'on peut dire, égale à celle développée par le sujet testé. Il existe aussi un lien linéaire entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène. Reportez-vous, à cet égard, à la formule de Fick proposée plus haut (en 13.2.1.1). De plus, la consommation d'O<sub>2</sub> est corrélée à la puissance développée (figure 13.9). Tout se tient et c'est bien pratique, même si ce n'est pas tout à fait aussi simple.

#### 13.2.4.2. La VO<sub>2</sub> et la VO<sub>2</sub>max

Pour déterminer la consommation d'oxygène, il faut mesurer O2 dans l'air inspiré et dans l'air expiré et rapporter cette consommation à l'effort fourni et au poids du cycliste. Cette mesure directe de la VO2 est la meilleure méthode, mais elle est compliquée à mettre en œuvre hors d'un centre médico-sportif spécialisé. On fait la mesure à l'état stationnaire, au cours de plusieurs exercices sousmaximaux d'intensité donnée. Si l'on va jusqu'au bout des possiblités du cycliste, pendant la même épreuve, on peut déterminer la fréquence cardiaque maximale et la VO<sub>2</sub>max. Mais, même si c'est moins précis et moins fiable, on préfère souvent une mesure indirecte, à partir de la fréquence cardiaque, reposant sur les constats que nous venons d'énoncer.

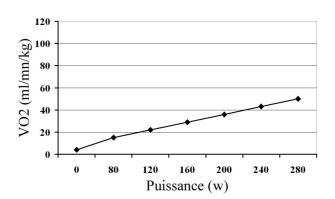


Figure 13.9. Evolution de la consommation d'oxygène (VO2) en fonction de la puissance. Au niveau de puissance maximale, on atteint la VO2max.

Cette méthode indirecte ne permet pas de comparaisons entre plusieurs sportifs, mais seulement des comparaisons à divers moments, pour une même personne. La valeur de la VO<sub>2</sub>max est variable suivant les individus, leur âge, leur sexe et leur entraînement aux efforts d'endurance. En moyenne, à 20 ans, les jeunes femmes moyennement actives ont une VO<sub>2</sub>max aux alentours de 40 ml/mn/kg. Chez les hommes, elle est un peu plus élevée, aux alentours de 45 à 50 ml/mn/kg. La valeur maximale observée est de 95 ml/mn/kg chez un skieur de fond. La VO<sub>2</sub>max des meilleurs coureurs cyclistes situe aux alentours de 80 ml/mn/kg.



La consommation d'oxygène (VO<sub>2</sub>) de Maurice a été mesurée suivant la méthode directe. Sa VO<sub>2</sub>max culmine à 50 ml/mn/kg. C'est une bonne valeur pour un homme de 45 ans. Elle est due à ses qualités et à sa pratique sportive régulière

### 13.2.4.3. Seuils lactiques et seuil d'accumulation des lactates dans le sang

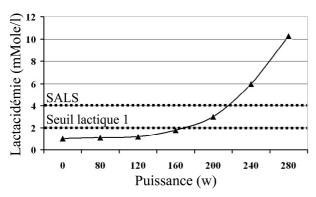


Figure 13.10. Evolution du taux d'acide lactique dans le sang en fonction de l'effort. Mise en évidence du seuil lactique 1 et du seuil d'accumulation des lactates dans le sang.

Le dosage de l'acide lactique dans le sang est fait à chaque palier de la détermination de la VO2max (par prélévement d'une goutte de sang au lobe de l'oreille).

On peut ainsi mettre en évidence deux seuils lactiques, que l'on exprimera soit en pourcentage de la VO<sub>2</sub>max, soit par le niveau de la fréquence cardiaque (figure 13.10).

Par convention, le « seuil lactique 1 » correspond à un taux de lactates égal à 2 mMole/litre. C'est le moment où la production d'acide lactique est censée dépasser la production de repos. Le « seuil lactique 2 » ou seuil d'accumulation des lactates dans le sang, ou SALS, est fixé à 4 mMole/litre. Au-dessus, on considère que la production d'acide lactique déborde la capacité de son utilisation par l'organisme. L'acide lactique va s'accumuler et

contribuer rapidement à l'apparition de la fatigue. Le seuil d'accumulation des lactates dans le sang est un des meilleurs déterminants de la capacité d'endurance d'un athlète, notamment chez les cyclistes.



Pour Maurice, l'acide lactique commence à augmenter à partir de 160 watts. Seuil lactique 1 vers 170 w, à 62% de la  $VO_2$ max pour une  $f_c$  de 134 bpm. SALS : vers 220 watts, à 76 % de la  $VO_2$ max pour une fréquence cardiaque de 157 bpm.

# 13.2.5. EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT AÉROBIE

#### 13.2.5.1. L'entraînement aérobie

Pour développer la qualité d'endurance aérobie, il faut faire des « travaux » longs, peu difficiles mais suffisamment, à cadence peu variée. C'est la relation entre les seuils lactiques et la fréquence cardiaque qui va permettre, pour un cycliste donné, de fixer le niveau d'entraînement ou de réguler l'effort. Il est classique de dire que la fréquence cardiaque doit se situer entre un minimum, égal à sa valeur au seuil lactique 1, et un maximum égal à sa valeur au seuil d'accumulation des lactates dans le sang. Insistons pourt rappeler que ces limites sont individuelles et doivent être déterminées lors d'épreuves spéciales dans un centre médico-sportif, telles que nous les avons présentées ci-dessus.

Les coureurs cyclistes s'entraînent d'abord en aérobie. Mais les nécessités de la compétition leur imposent de compléter leur entraînement par des scéances de travail en anaérobie pour pouvoir répondre à un démarrage ou pour mener un sprint, nous l'avons vu en 13.2.1.4. Chez les cyclotouristes, ce n'est pas explicite. Ils ne considèrent pas qu'ils suivent un entraînement. Ils roulent plus ou moins vite, selon le moment de la saison. Mais, s'ils refusent le mot, ils ont constaté que leur forme s'améliore au fur et à mesure des kilomètres parcourus, notamment après des randonnées de montagne. Les cyclotouristes, sans le reconnaître vraiment, font un entraînement strictement aérobie.



Les médecins du centre médico-sportif ont déterminé les bons niveaux de fc pour que Maurice améliore ses qualités d'endurance aérobie.

Ils lui conseillent une  $f_c$  supérieure à 134 (72,4 % de sa  $f_{cmax}$ ) pour faire un travail efficace. Ils lui disent qu'au-delà de 157 pulsations par minute (85 % de sa  $f_{cmax}$ ), il se " met dans le rouge" du point de vue de l'acide lactique, mais il développe des qualités d'endurance anaérobie. Et s'il aime ça...

#### 13.2.5.2. Amélioration du débit cardiaque et de la ventilation

Sous l'effet de l'entraînement, la fréquence cardiaque de repos diminue souvent, de l'ordre de 10 battements par minute. Elle diminue aussi, légèrement, pour un même effort si celui-ci reste peu intense. L'effet le plus sensible concerne le retour plus rapide à la fréquence de repos. C'est un excellent signe de bonne santé cardiovasculaire. Le volume d'éjection systolique augmente, tant au repos qu'à l'effort, par amélioration du remplissage diastolique du ventricule et par amélioration de la contraction du myocarde.

Le débit cardiaque au repos ou à l'effort n'est pas modifié, sauf pour un exercice maximal par augmentation du volume d'éjection systolique maximal. L'entraînement a peu d'effet sur la capacité et les volumes pulmonaires. La capacité vitale augmente peu. La fréquence respiratoire, pour un même exercice, tend à diminuer attestant la meilleure efficacité pulmonaire. Pour des efforts maximaux, le débit ventilatoire augmente, tout comme les échanges gazeux au niveau des poumons.

#### 13.2.5.3. Amélioration de la perfusion sanguine des muscles

Le flux sanguin local, au niveau des muscles, augmente. Ceci est dû à l'augmentation du nombre des capillaires musculaires, à la dilatation des vaisseaux des muscles et à la meilleure répartition du débit sanguin, au profit des masses musculaires.

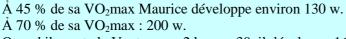
L'augmentation du débit sanguin musculaire constitue un des facteurs les plus importants de l'entraînement aérobie, et c'est un des éléments essentiels de la performance aérobie. La pression artérielle n'est pas, ou peu, affectée par l'entraînement. Mais elle peut l'être, à la baisse, chez des personnes souffrant d'une hypertension artérielle. On ne sait pas pourquoi. Cette constatation est suffisante pour proposer un exercice modéré comme adjuvant efficace du traitement médicamenteux et diététique de l'hypertension artérielle.

Le volume sanguin total augmente avec l'entraînement, essentiellement par augmentation du volume plasmatique liée à une rétention d'eau et par augmentation de l'albumine plasmatique. Le volume des globules rouges augmente relativement moins. Le rapport entre le volume des globules rouges et celui du sang total (c'est l'hématocrite) diminue donc, avec comme conséquence la diminution de la viscosité du sang qui favorise la circulation et le transport de l'oxygène dans les capillaires musculaires.

L'augmentation du volume plasmatique, qui entraı̂ne une élévation du volume d'éjection systolique, et l'augmentation moindre de nombre des globules rouges améliorent le transport de l'oxygène vers les muscles. Au total, l'entraı̂nement augmente un peu la  $VO_2$ max. Enfin, chez les cyclistes bien entrainés en aérobie, le seuil d'accumulation des lactates dans le sang (en % de la  $VO_2$ max) peut s'élèver d'une manière conséquente.

#### 13.2.5.4. Effets de l'entraînement aérobie sur l'utilisation des glucides et des lipides.

Sous réserve d'une alimentation adaptée, l'entraînement aérobie augmente le contenu musculaire en glycogène et les réserves de lipides stockées dans le muscle sous forme de triglycérides. De plus cet entraînement améliore l'activité des enzymes impliqués dans d'oxydation des lipides. Au total, il y a une utilsation privilégiée des lipides permettant d'épargner les réserves en glycogène. On considère que les lipides sont la source préférentielle d'énergie pour les efforts ne dépassant pas 45 % de la VO<sub>2</sub>max. À l'inverse, les glucides fournissent l'essentiel de l'énergie pour les exercices dépassant 70 % de la VO<sub>2</sub>max.



Quand il monte le Ventoux en 2 heures 30, il développe 168 w, est aux 2/3 de sa VO<sub>2</sub>max et utilise d'une manière équilibrée ses réserves de glucides et de lipides.

S'il voulait absolument ménager ses réserves de glucides, il faudrait qu'il réalise l'escalade en environ 3 heures.



Dans le Ventoux, en une heure et quart, Kévin développe une puissance de 311 watts. Il utilise un peu moins de 80 % de sa  $VO_2$ max mais il pioche allègrement dans sa réserve en glucides.

Il est cependant toujours en aérobie et n'accumule pas les lactates (comme nous le verrons plus loin en 13.2.9).

De temps en temps, il avale quelques gorgées de la boisson sucrée contenue dans son bidon.

# 13.2.6. EFFETS DE L'ÂGE ET DIFFÉRENCES LIÉES AU SEXE

# 13.2.6.1. L'âge

La performance sportive diminue avec l'âge, à cause d'une détérioration des fonctions physiologiques, grandement majorée par la diminution d'activité. La baisse des performances porte sur les qualités de force et d'endurance. La force musculaire baisse avec l'âge par diminution des synthèses protéiques musculaires et par perte d'unités motrices contrôlant les fibres rapides. L'entraînement de force est cependant très efficace pour conserver des bons muscles. Quand on vieillit, il faut faire de la musculation!

La diminution de la fréquence cardiaque maximale résulte d'une baisse de l'activité du système nerveux sympathique et d'une altération du myocarde. La fcmax selon l'âge peut être calculée, en première approche, en retranchant le nombre d'années vécues à 220 :

# $f_{\rm cmax} = 220 - {\rm \hat{a}ge~en~ann\acute{e}s}$

C'est bien pratique mais cette formule approximative ne doit être utilisée que pour fournir une première indication. Les variations individuelles sont de plus de 10 %, en plus ou en moins (figure 13.11). Le seul moyen d'en juger est de faire une épreuve maximale d'effort en milieu médico-sportif.



La baisse du volume d'éjection systolique maximal est due à une augmentation des résistances périphériques par vieillissement des artères (conséquence de l'athérosclérose entre autres) et à une altération probable de la contractilité du ventricule gauche. Le débit cardiaque et le débit sanguin périphérique diminuent donc.

La VO<sub>2</sub>max diminue aussi avec l'âge, d'environ 10 % par décades, mais c'est très variable selon les

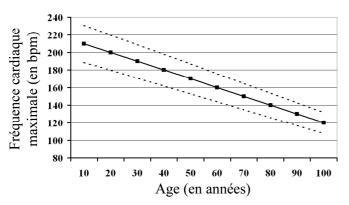


Figure 13.11. Diminution de la fréquence cardiaque maximale avec l'âge. En pointillé les variations en plus ou en moins.

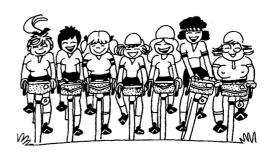
individus. Les seuils lactiques diminuent avec l'âge, plus ou moins selon les individus et selon le degré d'entraînement.

Ils sont, en effet, un des seuls paramètres de l'effort améliorable par une activité sportive bien conduite, même à un âge avancé. Répètons ici que seul un examen médicosportif régulier (tous les deux ou trois ans par exemple) permet de suivre l'évolution des différents paramètres et d'en tirer les conséquences pratiques, notamment sur les modalités de l'entraînement ou sur la bonne intensité des efforts entrepris. Au total, le niveau de puissance développée en endurance diminue avec l'âge. Nous vous en proposons une illustration en 13.2.7.

### 13.2.6.2. Différences entre les sexes.

C'est à partir de la puberté que des différences apparaissent entre les deux sexes. Les femmes sont, sous l'effet des oestrogènes, plus petites, plus légères, et ont, en proportion, plus de graisses. Leur force musculaire est moindre car la masse musculaire est moins importante.

La fréquence cardiaque des femmes est plus élevée, mais le volume d'éjection systolique est plus faible parce que le cœur est plus petit et le volume sanguin moins important. Pour un même effort, le débit cardiaque est donc semblable à celui des hommes. Enfin, moins d'hémoglobine et une proportion plus importante de graisses expliquent que la VO<sub>2</sub>max soit plus basse.



# 13.2.7. SYNTHÈSE POUR MAURICE

Sur les conseils de son médecin généraliste, Maurice a d'abord consulté son cardiologue qui l'a trouvé en excellente santé et a jugé ses coronaires impeccables. Puis il a pris un rendez-vous au centre médico-sportif du CHU voisin, en compagnie de Thérèse et de Kevin, et ils ont réalisé, sous surveillance médicale, une épreuve d'effort maximale. Les figures 13.12, 13.13 et 13.14 avec leurs trois courbes de fréquence cardiaque ( $\blacksquare$ ), de consommation d'oxygène  $VO_2$  ( $\blacklozenge$ ) et des taux d'acide lactique dans le sang ( $\blacktriangle$ ) montrent les résultats pour chacun d'entre eux, avec d'éventuels commentaires de la part des médecins du centre.

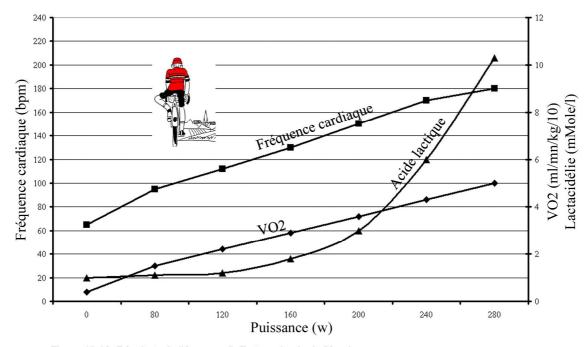


Figure 13.12. Résultats de l'épreuve d'effort maximale de Maurice.

Nom: ... Prénom: Maurice Åge: 45 ans Poids: 70 kg Taille: 1,76 m Épreuve d'effort maximale pratiqué sur ergocycle par paliers de 4 minutes de 80 à 280 watts. Incrément: 40 watts.



Fréquence cardiaque maximale mesurée : 180 bpm. VO<sub>2</sub>max directe (ml/mn/kg) : 50.

Lactatémie : SALS à 76 % de la  $VO_2$ max pour une fréquence de 157 bpm. Seuil lactique 1 à 170 w, au moment où fréquence cardiaque = 134 bpm et la  $VO_2$  = 62 % de la  $VO_2$ max.

« CONCLUSION : Condition physique satisfaisante. L'électrocardiogramme de repos est normal. Il le demeure sans trouble du rythme ni de la repolarisation. La VO<sub>2</sub>max est satisfaisante compte tenu de l'âge. Actuellement, le travail en endurance active peut se faire autour de 145 bpm de fréquence cardiaque. La résistance commence au delà de 157 bpm. »

Reportons-nous au chapitre 11, au paragraphe sur la puissance (en 11.1.3), et comparons les valeurs des puissances développées par Maurice de Caen à la Mer, dans le Ventoux à partir de Bédoin, et dans l'escalier qui monte à son appartement, avec celles du l'épreuve d'effort relatée ci-dessus.

Le long du canal de Caen à la mer, Maurice maintient une vitesse de 22,5 km/h. Puissance = 100 w. Sur son cardiofréquencemètre il constate une fréquence cardiaque autour de 100-105 bpm. D'après la courbe ci-dessus elle serait de 103 bpm pour une telle puissance.



De Bédoin au sommet du Ventoux, en 2 heures 30, la puissance de Maurice est de 168 watts, ce qui correspond aux 135 bpm constatés sur le cardiofréquencemètre.

Maurice est au seuil lactique 1, en pleine aisance cardiorespiratoire et métabolique.

Dans son escalier, quatre à quatre, il était à fond et s'il a développé une telle puissance de 396 watts, c'est pendant un temps très bref, en faisant une dette en quelque sorte. Sur un temps plus long, un tel débit d'énergie serait très au dessus de ses capacités.

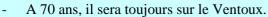
Admettons que la fréquence cardiaque maximale et la VO<sub>2</sub>max de Maurice vont décroître linéairement avec l'âge, ce qui n'est pas certain. Les aléas de la vie peuvent réduire ses capacités ou, au contraire, sa pratique sportive peut lui permettre de garder des performances supérieures à la moyenne de son âge. Admettons encore que le seuil d'accumulation des lactates dans le sang restera au même pourcentage de la VO<sub>2</sub>max, ce qui n'a rien d'évident. Mais ça va nous permettre de rêver avec Maurice.

Tout en roulant, un jour limpide et serein, Maurice pense à ses perspectives de vieillissement.

- A 60 ans, sa  $f_{\text{cmax}}$  sera de 180 - 15 = 165 bpm.

Pour ne pas se mettre dans le rouge, il n'aura " pas le droit " de dépasser  $165 \times 85 \% = 140 \text{ bpm}$ , ce qui correspond à peu près à une puissance de 180 watts.

À poids égal, il lui faudra toujours dépenser 1.512.540 joules pour monter le Ventoux depuis Bédoin. Calcul rapide : 1.512.540 / 180 = 8.403 secondes = 2 h 20 mn et 3 s. Il pourra encore faire l'escalade en 2 h 30 et même un peu plus vite si le coeur lui en dit (c'est le cas de le dire).



Sa  $f_c$ , pour ne pas être dans le rouge, sera limitée à 132 bpm, et donc sa puissance à 167 watts. Il montera le Ventoux en 2 heures 45, en diminuant son braquet.

- Et à 80 ans, sa  $f_{\rm cmax}$  sera peut-être encore de 145 bpm et son SALS à 123 bpm.

Il devrait avoir encore 130 watts à sa disposition.

Il faudra supprimer la sacoche, acheter un vélo léger, maigrir, prendre son temps... Ça devrait aller en 3 heures avec 24/28. Ou alors, il partira de Sault...

# 13.2.8. SYNTHÈSE POUR THÉRÈSE

Examinons maintenant les performances de Thérèse. Sur le vu de ses résultats, on peut affirmer que quand Thérèse monte le Ventoux en 2 h 15 (144,5 watts) elle ne s'économise pas beaucoup.

Thérèse atteint sa  $f_{\rm cmax}$  de 190 bpm pour un effort de 200 watts.

Sa VO<sub>2</sub>max est de 45 ml/mn/kg, ce qui est très correct pour une femme de 40 ans.

Le seuil lactique 1 est atteint à la puissance d'environ 120 watts, au moment où la fréquence cardiaque est de 144 bpm, et la VO<sub>2</sub> égale à 62 % de la VO<sub>2</sub>max.

Le seuil d'accumulation des lactates dans le sang est atteint vers 150 watts, pour une fréquence cardiaque de 162 bpm, à 80 % de la VO<sub>2</sub>max.

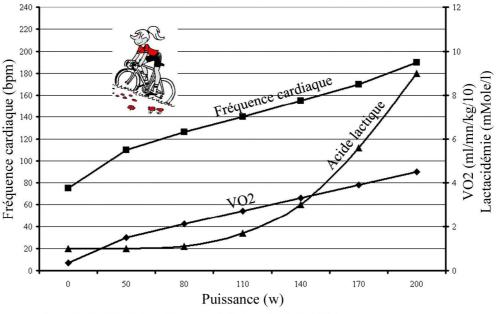


Figure 13.13. Résultats de l'épreuve d'effort maximale de Thérèse.

# 13.2.9. SYNTHÈSE POUR KEVIN

Les performances de Kevin ne sont pas au même niveau que celles de ses parents. Mais il n'a que 19 ans et il ne pratique pas le cyclisme de la même manière. Les résultats de l'épreuve d'effort expliquent parfaitement ses performances. S'il n'est pas encore à la hauteur des coureurs professionnels, il est un cycliste doué.

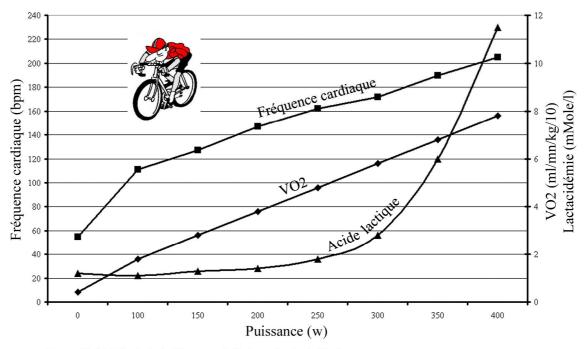
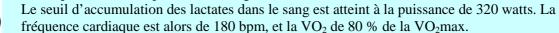


Figure 13.14. Résultats de l'épreuve d'effort maximale de Kevin.

Kévin atteint sa  $f_{\rm cmax}$  de 205 bpm en développant une puissance de 400 watts.

Sa VO<sub>2</sub>max est de 78 ml/mn/kg, ce qui est excellent et explique (en partie) ses performances. Le seuil lactique 1 est atteint à la puissance d'environ 265 watts, au moment ou la fréquence cardiaque est de 165 bpm, et la VO<sub>2</sub> égale à 67 % de la VO<sub>2</sub>max.



Dans le Ventoux, en une heure et quart, Kévin a développé une puissance de 311 watts. Il est monté régulièrement, sans se mettre dans la zone d'accumulation des lactates dans le sang. Dans un contre la montre de Bédoin au sommet, à 90 % de sa  $VO_2$ max, il accumule beaucoup de lactates mais il développe 360 watts et monte le Ventoux en une heure et 5 petites minutes.



# 13.3. BILAN ÉNERGÉTIQUE : DÉPENSES ET RECETTES

À partir de ce que nous savons maintenant sur la quantification des efforts à fournir, sur l'économie interne et externe du cycliste, nous allons pouvoir nous livrer à une comptabilité stricte de ses dépenses et de ses recettes. Nous reprendrons les exemples de Maurice, Thérèse et Kevin, largement exploités jusqu'ici. Et nous prolongerons cette réflexion au chapitre 14, en abordant le dernier grand problème des cyclistes : la fréquence de pédalage.

# 13.3.1. RETOUR SUR LA LOI DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

Si le système {vélo + cycliste} était isolé, on pourrait dire, à chaque instant du mouvement, que l'énergie mécanique  $E_M$  est constante. Elle serait la somme de l'énergie potentielle gravitationnelle  $E_{PG}$  et de l'énergie cinétique  $E_K$  de toutes ses parties.  $E_M = E_{PG} + E_K$ . Ainsi, l'énergie cinétique augmentant, l'énergie potentielle diminuerait, et vice-versa. En fait, le système n'est pas isolé. Il y a des frottements qu'il faut vaincre et qui consomment une énergie  $E_F$ . Nous pouvons admettre que dans le système {vélo + cycliste + milieu ambiant}

l'énergie E nécessaire au déplacement est égale, à chaque instant du périple, à la somme de l'énergie mécanique et de l'énergie dépensée pour lutter contre les frottements :  $E = E_M + E_F = E_{PG} + E_K + E_F$ . Nous avons distingué, au chapitre 12, les frottements dits « secs », indépendants de la vitesse et quasiconstants, qui consomment une énergie  $E_{Fsecs}$ , et les frottements avec l'air, dépendants de la vitesse v du fluide par rapport au cycliste, qui consomment  $E_{Fair}$ . On a donc :  $E = E_{PG} + E_K + E_{Fsecs} + E_{Fair}$ . Nous nous satisferons de cette formule, sans oublier que d'autres facteurs agissent sur la consommation d'énergie du cycliste, dans sa pratique. Citons le froid ou la chaleur, l'altitude... Nous n'en tiendrons pas compte ici.

# 13.3.2. DÉPENSES DANS DIFFÉRENTS CAS DE FIGURE VÉLOCIPÉDIQUES

#### 13.3.2.1. Sur le plat, sans vent

Il n'y a pas de variation de l'énergie potentielle gravitationnelle. La seule dépense est due à la lutte contre les frottements, notamment ceux avec l'air qui prennent de plus en plus d'importance au fur et à mesure que la vitesse augmente (cf chapitre 12). L'énergie cinétique  $E_K$  évolue avec le carré de la vitesse du cycliste, tout comme l'énergie dépensée à cause des turbulences de l'air. Pour calculer les dépenses, il suffit donc d'appliquer une formule du type de celles qui ont été proposées en 12.2.1.



Le long du canal de Caen à la mer, Maurice maintient 22,5 km/h (6,25 m/s). Dépense énergétique = 16 J/m.

#### 13.3.2.2. En montant

C'est le gain d' $E_{PG}$  qui domine l'effort du cycliste. Il faut appuyer sur les pédales pour gagner, minute après minute, les mètres qui rapprochent du sommet du col. Pour 1 kg de « poids hissé » sur 100 m de dénivellée, le travail fourni est de 981 joules (100 fois g, l'intensité de la pesanteur). Soit 0,234 kcal par 100 m. La vitesse est plus faible que sur le plat et donc l'énergie cinétique. Même chose pour les frottements avec l'air qui deviennent quasi négligeables par rapport aux frottements secs.



Dans le Ventoux en 2 h 15, Thérèse dépense 51,7 J/m contre la pesanteur et 6,8 contre les frottements.

Dépense énergétique = 58,5 J/m.

#### 13.3.2.3. En descendant

L'E<sub>PG</sub>, acquise à la montée, est restituée et se transforme en énergie cinétique. Pour 1 kg de « poids descendant » l'énergie restituée est de 981 joules par 100 m de dénivelée. Il s'agit, en première intention, d'une transformation intégrale, mais rapidement limitée par les frottements. Même s'il ne pédale pas, le travail du cycliste n'est pas nul dans une descente. Sa fréquence cardiaque en témoigne. Il doit se maintenir sur une bicyclette lancée à vive allure, rester concentré, prendre les virages, freiner... On va cependant dire qu'il ne dépense pas d'énergie interne. Il ne fait que récupérer et consommer toute l'énergie potentielle gravitationnelle qu'il a emmagasinée à la montée, sur une dénivelée équivalente. Cette énergie est gachée, elle part en chaleur dans les frottements, notamment avec l'air, et par freinage.



Kevin dégringole le Ventoux en 24 minutes, à 50 km/h.

Il restitue les 1.202.216 joules engrangés à la montée, soit 60 J/m dont, en moyenne, 46 J/m pour les frottements et 14 J/m dans le freinage.

Par rapport au métabolisme interne, pas de dépense mais un remboursement.

#### 13.3.2.4. Avec du vent

On fait les mêmes remarques qu'au paragraphe 13.3.2.1, mais en utilisant comme vitesse v pour calculer les frottements, la somme des deux vitesses du cycliste et du vent.

	Le long du canal, de Caen à la mer, vent à 30 km/h.				
		Vent de face	Vent dans le dos		
940	Vitesse de déplacement (km/h)	15	40		
	Vitesse relative de l'air (km/h)	45	10		
	Dépense énergétique (J/m)	47	7,5		

# 13.3.3. DÉPENSES DANS QUELQUES EXEMPLES DE SORTIES À VÉLO

Pour pouvoir faire le lien avec les recettes (en 13.3.4) nous exprimerons les dépenses en kcal.

## 13.3.3.1. Randonnée de 150 km, en terrain vallonné

Nous sommes dans l'Orne, par exemple. Il s'agit d'un circuit partant et arrivant à Alençon, avec 1.000 m de dénivelée en 20 km de montée, un jour sans vent, avec une température douce. Maurice et Thérèse roulent ensemble en 7 h 30 à 20 km/h, dont les 110 km de plat à 21 km/h et les 20 km de montée à 12 km/h. Kevin fait le même trajet en 5 h à 30 km/h, dont les 110 km de plat à 30 km/h et les 20 km de montée à 20 km/h. Il fait un entraînement tranquille. On estime les dépenses d'énergie pour Maurice, Thérèse et Kevin à :

Dépenses liées aux frottements sur le plat $\mathbf{E}_{\mathbf{F}}$ (kcal)	386	357	536
Dépenses liées aux frottements en montée $\mathbf{E}_{\mathbf{F}}$ (kcal)	40	39	58
Dépenses pour créer de l'énergie potentielle gravitationnelle $\mathbf{E}_{PG}$ (kcal)	202	151	180
Dépense totale (kcal)	628	547	774
Dont % en frottements	68	72	77

#### 13.3.3.2. Même randonnée, mais avec du vent

Vent modéré et constant de 20 km/h, de face la 1ère moitié du parcours, de dos la 2ème moitié. Maurice effectue l'aller en 5 heures (moyenne = 15 km/h) et le retour en 2 h 30 (moyenne = 30 km/h). Thérèse roule avec son mari. À l'aller, elle reste à l'abri dans sa roue et économise 1/4 de l'énergie qu'elle consommerait seule (voir en 12.2.2.4). Au retour, elle cherchant surtout à bien profiter du vent qui la pousse. Kevin poursuit son entraînement, profitant du vent : Aller en 3 h 15 (moyenne : 23,1 km/h), retour en 1 h 45 (moyenne : 42,9 km/h). Les 150 km sont donc parcourus dans le même temps de 5 heures :

	Aller:	$E_F$ sur le plat (55 km à 15 km/h - vitesse relative de l'air 15 + 20 = 35 km/h) = 402 kcal. $E_F$ en montée (10 km à 10 km/h – vitesse relative de l'air 10 + 20 = 30 km/h) = 57 kcal. $E_{PG}$ (500 m de dénivellée) = 101 kcal. Dépense aller : 560 kcal.				
	Retour:	$E_F$ sur le plat (55 km à 30 km/h - vitesse relative de l'air $30 - 20 = 10$ km/h) = 98 kcal. $E_F$ en montée (10 km à 15 km/h - vitesse relative de l'air $20 - 15 = -5$ km/h) = 10 kcal. $E_{PG}$ (500 m de dénivellée) = 101 kcal. Dépense retour : 209 kcal.				
	Dépense totale : 769 kcal dont 73 % à l'aller et 74 % en frottements.					
	Aller:	$E_F$ sur le plat (55 km à 15 km/h - $v_{air}$ = 35 km/h) = 75 % de 363 kcal = 272 kcal. $E_F$ en montée (10 km à 10 km/h – $v_{air}$ = 30 km/h) = 75 % de 52 kcal = 39 kcal. $E_{PG}$ (500 m de dénivellée) = 76 kcal. Dépense aller : 387 kcal.				
	Retour :	E <sub>F</sub> sur le plat (55 km à 30 km/h - $v_{air}$ = 10 km/h) = 95 kcal. E <sub>F</sub> en montée (10 km à 15 km/h - $v_{air}$ = -5 km/h) = 10 kcal. E <sub>PG</sub> (500 m de dénivellée) = 76 kcal. Dépense retour : 181 kcal. totale : 568 kcal dont 68 % à l'aller et 73 % en frottements.				
	En se mettant à l'abri de Maurice, Thérèse a économisé 104 kcal.					

 $E_F$  sur le plat (55 km à 24 km/h - vitesse relative de l'air 24 + 20 = 44 km/h) = 487 kcal. Aller:

 $E_F$  en montée (10 km à 15 km/h – vitesse relative de l'air 15 + 20 = 35 km/h) = 61 kcal.

 $E_{PG}$  (500 m de dénivellée) = 88 kcal.

Dépense aller : 636 kcal.

 $E_F$  sur le plat (55 km à 45 km/h - vitesse relative de l'air 45 – 20 = 25 km/h) = 209 kcal.

 $E_F$  en montée (10 km à 30 km/h - vitesse relative de l'air 30 - 20 = 10 km/h) = 17 kcal.

Retour:  $E_{PG}$  (500 m de dénivellée) = 88 kcal.

Dépense retour : 314 kcal.

Dépense totale : 950 kcal dont 67 % à l'aller et 82 % en frottements.

# 13.3.3.Randonnée de 100 km, en montagne

Dans l'Ubaye. Étape courte et musclée, se terminant par une nuit en altitude. Il y a 3.000 m de dénivelée positive, sur 60 km, et 2.000 m de dénivelée négative. Pas de plat, pas de vent. Maurice et Thérèse font le trajet ensemble, en 7 heures, avec randonneuses, sacoches de guidon et chacun 5,5 kg supplémentaires de bagages car ils randonnent sur plusieurs jours. Ils grimpent à 10 km/h.

Kevin rejoint ses parents à l'hôtel pour passer la soirée avec eux et en profite pour affiner sa forme. Il fait le même trajet en 4 heures (sans bagages, ses parents se sont occupés de la logistique). Il grimpe à 18,5 km/h.

E <sub>F</sub> en montée (kcal)	107	104	160
E <sub>PG</sub> (kcal)	643	492	527
Dépense totale (kcal)	750	596	687
Dont % en frottements	14	17	23

# 13.3.4. RECETTES: LES APPORTS ÉNERGÉTIQUES NÉCESSAIRES

Choisissons trois aliments différents, bien adaptés au cyclisme : une banane, une barre de pâte d'amande et un bidon de thé sucré (avec 6 morceaux de sucre raffiné n° 4), qui vont nous permettre d'illustrer le rapport entre l'effort exercé et la satisfaction des besoins caloriques.

	Une banane	Une pâte d'amande	Un bidon de thé sucré
Poids (grammes)	95	25	750
Eau (%)	76	8	95
Glucides (%)	22	68	4,7
Lipides (%)	0	16	0
Autres substances (%)	2	8	0,3
Valeur énergétique (kcal)	80	113	133

Tableau XII: Apports nutritifs et énergétiques de trois aliments utilisés dans la pratique sportive.

#### 13.3.4.1. De l'aliment au stockage du glycogène

La banane est prise dans la sacoche. Il faut ensuite l'éplucher, la mordre, la mâcher, la mélanger à la salive... La barre de pâte d'amande est prise dans la poche du maillot. Il faut retirer son emballage, la mâcher... Le bidon est saisi dans le porte-bidon. Il faut ouvrir le bouchon, lever le bidon et boire... Puis les aliments descendent, via l'œsophage, dans l'estomac, où ils vont être décomposés en fragments grossiers d'hydrates de carbone (au



moins la banane et la barre de pâte d'amande), qui traversent le duodénum pour arriver dans l'intestin grêle. Les constituants utiles, l'eau et les glucides essentiellement, mais aussi d'autres constituants comme le potassium ou les vitamines, sont absorbés et passent dans le sang. Ce qui reste, c'est-à-dire pas grand-chose, poursuit sa route dans le gros intestin pour être finalement évacué dans les matières fécales.

La quasi-totalité des glucides est mise à la disposition de l'organisme sous la forme du glycogène et nous avons vu au début de ce chapitre qu'il est stocké dans le foie et les muscles. Tout ce processus de digestion des glucides a un coût relativement faible, identique à celui des lipides. On considère que la transformation, le transport et le stockage coûtent environ 5 % de la valeur énergétique des aliments.

# 13.3.4.2. Du glycogène à la contraction musculaire

La machine à pédaler se met en route et les muscles réclament l'énergie dont ils ont besoin. Le glycogène musculaire ou hépatique est mobilisé. Il est oxydé et l'énergie libérée est d'abord transférée sur l'ATP (Adénosine triphosphate). Le rendement de cette première partie du processus n'est pas excellent. La moitié de la valeur énergétique de l'aliment va produire de la chaleur qui sera utilisée par l'organisme pour maintenir sa température ou qui sera éliminée si elle est en excédent.

	Une banane	Une pâte d'amande	Un bidon de thé sucré
Valeur énergétique (kcal)	80	113	133
Quantité stockée (kcal)	75	107	126
Production de chaleur (kcal)	55	79	93
Kcal utilisables par les muscles	20	28	33

Tableau XIII : Valeur énergétique, stockage et utilisation de trois aliments compatibles avec la pratique sportive.

Et l'ATP, dans la cellule musculaire, fournit l'énergie nécessaire à la contraction musculaire. Admettons que le rendement « énergie chimique / énergie mécanique » de cette deuxième partie du processus soit de 50 %. De nos aliments, il ne reste plus qu'environ 20 à 25 % de leur valeur énergétique utilisables pour compenser les dépenses liées au pédalage.

## 13.3.4.3. Le métabolisme de base et autres dépenses non liées au vélo

Les dépenses liées à l'exercice musculaire viennent en plus des dépenses énergétiques d'entretien de l'organisme ou dépenses de fond. Ces dépenses de fond constituent le « métabolisme basal » et nécessitent, chez tous les mammifères, un apport calorique qui diminue avec l'âge et est plus bas chez les femmes. Il est évalué en fonction de la surface corporelle, laquelle est donnée par des tables en fonction de la taille et du poids (que l'on trouve sans problème sur internet). Il est en moyenne un peu inférieur à 40 kcal/h/m².

À ces dépenses de fond, il faut ajouter les dépenses liées à la thermorégulation, qui peuvent devenir importantes s'il fait très chaud ou, au contraire, très froid. De même il faut tenir compte de l'activité physique quotidienne de base (se laver, faire le lit, cirer ses chaussures, nettoyer le vélo, gonfler les pneus...). Le pédalage et son coût énergétique vient en sus. Le total des besoins énergétiques quotidien est donc égal à :

#### Besoins énergétiques = Métabolisme de base + Thermorégulation + Activité quotidienne + Vélo

Le jour de leur randonnée ou sortie dans l'Orne, un jour sans vent (voir en 13.3.3.1), les besoins caloriques chez les membres de notre famille témoin sont illustrés, en kcal, dans le tableau ci-dessous. Les besoins liés à l'activité quotidienne on été estimés à 20 % des besoins de base chez Maurice et Kevin et à 40 % chez Thérèse, car c'est elle qui a accompli l'ensemble des tâches ménagères (ménage, préparation des repas, vaisselle...!). La chaleur produite est due, d'une part, à la digestion et, d'autre part, au mauvais rendement de la machine musculaire (voir en 13.1.1). Pour simplifier, nous avons considéré que la production de chaleur est égale à 4 fois le travail effectué sur le vélo.

Besoins « de base » par jour (kcal)	1.600	1.250	1.750
Activité quotidienne (kcal)	320	500	350
Sortie cycliste de 150 km (kcal)	628	547	774
Chaleur produite (kcal)	2.512	2.188	3.096
Besoins totaux de la journée (kcal)	5.060	4.485	5.970
Besoins de la journée rapportés au poids (kcal / kg)	72	90	89

#### 13.3.4.4. Faut-il équilibrer au fur et à mesure dépenses et recettes ?

Pendant l'effort, surtout s'il dure longtemps, il faut compenser les dépenses liées au pédalage. Il n'est pas nécessaire de le faire tout de suite et intégralement, compte tenu des stocks en glycogène et surtout des stocks lipidiques. Mais il faut le faire suffisamment pour maintenir la glycémie à son niveau utile. Sinon, c'est le malaise hypoglycémique, aussi appelé fringale, la panne de carburant en quelque sorte.

On considère, en général, que l'on peut tenir 3 heures sans manger pendant un effort d'intensité modérée. Ceci est très variable selon l'individu ou l'entraînement. Certains cyclotouristes peuvent rouler 100 à 120 km (5 à 6 heures) sans manger, mais pas sans boire. Des débutants sont souvent obligés de grignoter au bout d'une heure de route. Les impératifs diététiques sont plus stricts et codifiés en compétition. Reste la contrainte de ce que l'on peut avaler pendant l'effort.





Pendant sa randonnée de 100 km dans l'Ubaye, Thérèse, pour compenser sa dépense calorique due au seul pédalage, devrait ingurgiter 27 bananes et demi.

Elle ne se voit pas mettre un régime de bananes dans sa sacoche.

Elle se contente de 2 bananes, d'une barre de pâte d'amande et d'un bidon de thé sucré, en faisant une halte le midi dans une pizzeria.



Kevin roule trois ou quatre fois par semaine sur des sorties de 2 à 5 heures, rarement plus. En sus de ses dépenses d'entretien (1.740 kcal par jour) il ingère en moyenne 1.000 kcal supplémentaires chaque jour, plus ce qu'il grignote sur son vélo, soit environ 3.000 kcal quotidiens.

Il s'hydrate consciencieusement et reconstitue ses réserves en sucres lents le soir de chaque sortie.

Il faudra, de toutes manières, compenser la dépense, le soir et dans les jours suivants, surtout si l'on roule plusieurs jours de suite. Par contre, si l'on cherche à maigrir pour retrouver le poids de forme, un léger déséquilibre entre les apports et les dépenses est utile.



Chaque année, Maurice fait un voyage à bicyclette d'une dizaine de jours sur 1.200 à 1.500 km. Pendant qu'il roule, il grignote un peu. Une banane et une barre de pâte d'amande lui suffisent pour parcourir 100 km.

Le midi, il fait une pause légère au restaurant et le soir prend un bon repas, sans plus, en privilégiant les sucres dits lents (pates, riz...).

Mais au terme du voyage, il a toujours perdu 2 ou 3 kg.

Par contre, il faut impérativement, et si possible au fur et à mesure, compenser les pertes en eau, en buvant pendant l'effort. Les pertes hydriques sont augmentées, par rapport aux besoins de base (1,5 à 2,5 l par jour chez un sédentaire vivant en climat tempéré), notamment s'il fait chaud. Ceci est dû à la production de sueur et à l'évaporation par les poumons qui sont des mécanismes efficaces pour dissiper la chaleur créée par l'effort musculaire. On considère qu'il faut absorber au minimum 1 ml d'eau pour 1 kcal de dépense énergétique, c'est-à-dire en plus de la quantité normale. L'eau est indispensable au fonctionnement de tous les organes et on ne peut pas parler de réserve aqueuse dans l'organisme. Une déshydratation, même légère, fait diminuer très rapidement les capacités de travail musculaire et peut même mettre la vie en danger (coup de chaleur).



Pendant sa randonnée de 100 km dans l'Ubaye, Thérèse a fait le calcul que pour compenser intégralement ses pertes hydriques dues à l'effort, elle devait boire 600 ml d'eau en plus de sa « ration » quotidienne de 1,5 litre et de l'eau contenue dans les aliments.

En fait, elle boit un bidon de 750 ml de thé sucré pendant qu'elle est sur le vélo + un demi-litre d'eau à la pizzéria.

Le soir, à l'arrivée, elle a soif et se désaltère à satiété.

Au total, elle a absorbé 0.75 + 0.5 + 1.5 + 0.75 (eau des aliments) = 3.5 litres d'eau.

# 13.3.4.5. Régulation de l'ingestion alimentaire

Le goût, l'appétit, les influences psychiques et les habitudes jouent un rôle important sur la régulation de l'ingestion alimentaire. Mais pendant l'effort cycliste il ne faut pas attendre d'avoir faim pour se nourrir car lorsque la sensation de faim arrive, il peut être trop tard, les réserves en glucose peuvent être épuisées. Le goût peut être modifié et il vaut mieux connaître ce qu'on aime ingurgiter au cours d'une sortie. En fait, il faut s'imposer un minimum de discipline alimentaire et comme disait Paul de Vivie, alias Velocio, « boire avant d'avoir soif, manger avant d'avoir faim... »

