

Adaptations cardiovasculaires à l'exercice et à l'entraînement

PLAN DU CHAPITRE

Volume d'éjection systolique	168
Fréquence cardiaque	169
Pression artérielle	170
Débit sanguin local	171

L'activité physique, en particulier l'exercice aérobie, implique une adaptation du système cardiovasculaire pour faire face à la demande énergétique : apporter l'oxygène aux muscles, transporter les substrats nécessaires et véhiculer les produits des dégradations métaboliques. Ces adaptations cardiovasculaires doivent en premier lieu adapter le débit sanguin aux besoins des muscles en activité, donc augmenter le débit cardiaque (DC).

Ce débit (DC) est fonction du volume d'éjection systolique (Vs) et de la fréquence cardiaque (FC) soit :

$$DC(l \cdot \text{min}^{-1}) = Vs(ml) \times FC(bpm).$$

Lorsqu'on suit l'évolution du débit cardiaque lors d'un exercice d'intensité croissante, on obtient une relation quasi linéaire avec la consommation d'oxygène exprimée par la [figure 10.1](#).

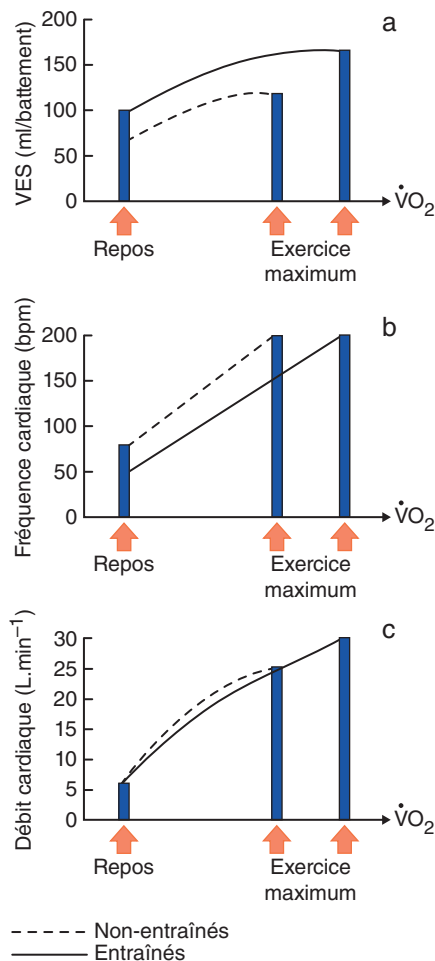


Figure 10.1

Évolution du volume d'éjection systolique (a), de la fréquence cardiaque (b) et du débit cardiaque (c) avec l'intensité de l'exercice.

Dessin d'Éléonore Lamoglia.

On atteint $\dot{V}O_{2\text{max}}$ en même temps que le débit cardiaque maximal. Ces données confirment ce qui a déjà été dit : le débit cardiaque (DC) est très étroitement lié à la consommation d'oxygène et constitue un facteur limitant

essentiel de $\dot{V}O_{2\text{max}}$. L'augmentation du débit cardiaque à l'exercice est due à l'accroissement conjoint du volume d'éjection systolique et de FC.

Au repos, le débit cardiaque est d'environ 4 à 5 $l \cdot \text{min}^{-1}$. Il atteint 20 à 25 $l \cdot \text{min}^{-1}$ chez le non-sportif lors d'un effort maximal, c'est-à-dire correspondant à $\dot{V}O_{2\text{max}}$. Il peut s'élever jusqu'à 30 à 35 $l \cdot \text{min}^{-1}$, voire plus, chez des sujets très entraînés en aérobie.

L'entraînement augmente le débit cardiaque maximal et donc $\dot{V}O_{2\text{max}}$. Le débit cardiaque dépend du volume d'éjection systolique et de FC. Analysons successivement l'évolution de chaque facteur lors d'un effort aérobie maximal.

Volume d'éjection systolique

Le volume d'éjection systolique (Vs) est le volume de sang éjecté dans la circulation générale lors de chaque systole ventriculaire. Le volume d'éjection systolique augmente à l'exercice d'intensité croissante, de 40 à 60 % pour passer de 70 à 90 ml au repos à des valeurs de 100 à 120 ml quand on atteint $\dot{V}O_{2\text{max}}$. Chez le sportif entraîné en aérobie, il peut atteindre 100 à 120 ml au repos et 150 ml, voire 200 ml au maximum, chez des spécialistes de haut niveau.

L'entraînement a donc pour effet d'accroître le débit d'éjection systolique. C'est le résultat d'un volume ventriculaire accru suite à un retour veineux beaucoup plus élevé selon la loi d'Otto Frank. C'est aussi le résultat d'une contractilité plus forte du myocarde. En même temps, le retour élastique ventriculaire augmente en accord avec la loi de Frank-Starling.

Rappelons ici que le remplissage du ventricule dispose de 0,8 seconde à une seconde, au repos, pour se réaliser. Lorsque FC s'approche des 200 battements par minute, le ventricule doit se remplir et se contracter en 0,3 seconde, par exemple lors d'un exercice aérobie maximal.

Lorsqu'on s'intéresse à l'évolution du volume d'éjection systolique lors d'un exercice d'intensité croissante, on obtient une courbe représentée sur la [figure 10.1](#). Vs

s'accroît ainsi jusqu'aux alentours de 50 % $\dot{V}O_{2\text{max}}$ avant de plafonner ensuite jusqu'à l'effort maximal. Par la suite,

l'augmentation du débit cardiaque est liée à l'élévation de la fréquence cardiaque. En conséquence, V_s , s'il intervient dans l'augmentation de $\dot{V}O_2$, n'est pas un facteur limitant de $\dot{V}O_{2\max}$ puisque $\dot{V}O_2$ continue d'augmenter linéairement alors que $V_{s\max}$ est atteint.

Fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque, comme chacun peut aisément le constater, augmente avec l'intensité de l'exercice. La [figure 10.1](#) décrit ce phénomène tout au long d'un exercice aérobie d'intensité croissante jusqu'au maximum.

Il est remarquable de constater que l'évolution de la courbe est linéaire avec l'augmentation de $\dot{V}O_2$. Elle s'incurve légèrement en toute fin d'effort pour atteindre son maximum. De surcroît, on atteint $FC_{\max}$ en même temps que $\dot{V}O_{2\max}$. On peut dès lors affirmer que le débit car-

diaque est un facteur limitant de $\dot{V}O_{2\max}$ par l'intermédiaire de la fréquence cardiaque.

FC se situe aux alentours de 70 battements par minute au repos et peut atteindre 200 battements par minute, à l'exercice maximal, chez un sujet de 20 ans. Ces valeurs varient en particulier avec l'âge. La valeur maximale a été estimée par diverses formules. Celle qui semble aujourd'hui remporter l'adhésion du plus grand nombre : $FC = 210 - 0,7$ (âge en années).

La proportionnalité entre FC et intensité de l'exercice est particulièrement intéressante car connaître, lors d'un exercice aérobie (et seulement dans ce cas), la valeur de FC, c'est avoir un regard sur le niveau d'exercice atteint et sur la $\dot{V}O_2$ exigée par l'exercice. C'est ce qu'indique la [figure 10.2](#).

Lorsqu'on s'intéresse à la valeur relative de l'exercice, c'est-à-dire lorsqu'on exprime l'intensité de l'exercice en pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$, FC est la même quels que soient la valeur de $\dot{V}O_{2\max}$ et le niveau d'entraînement ([figure 10.3](#)).

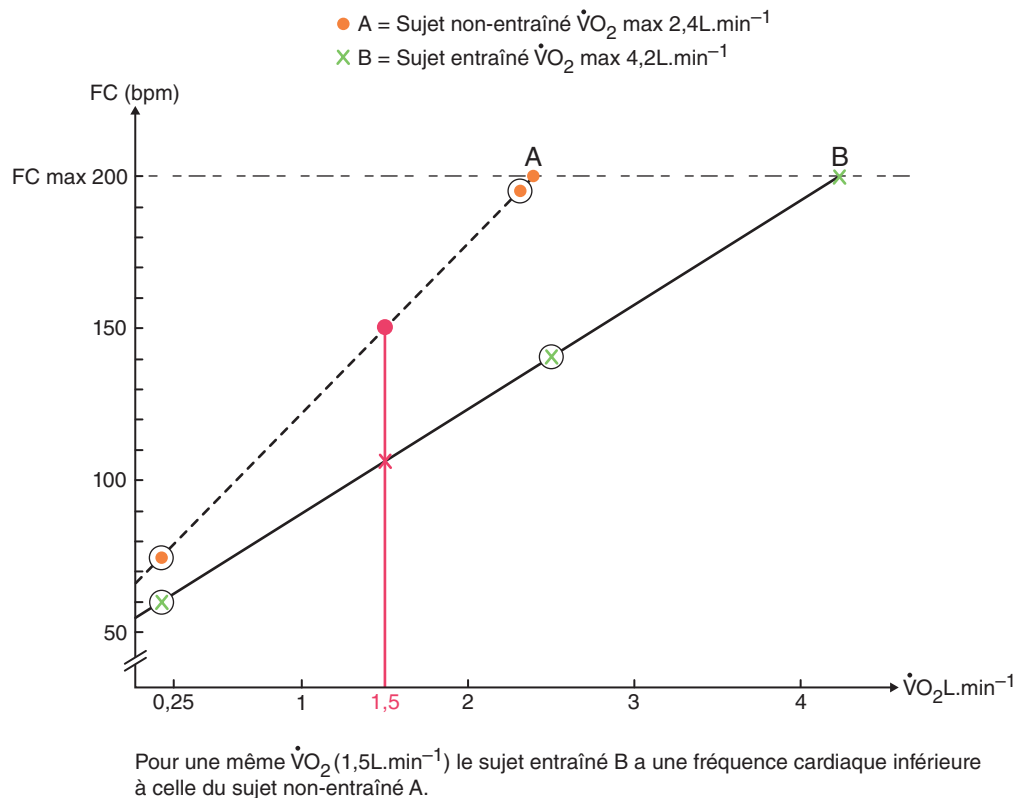


Figure 10.2

Augmentation de la fréquence cardiaque en fonction de la puissance de l'exercice et de la consommation d'oxygène chez deux sujets d'aptitudes différentes.

Dessin d'Éléonore Lamoglia.

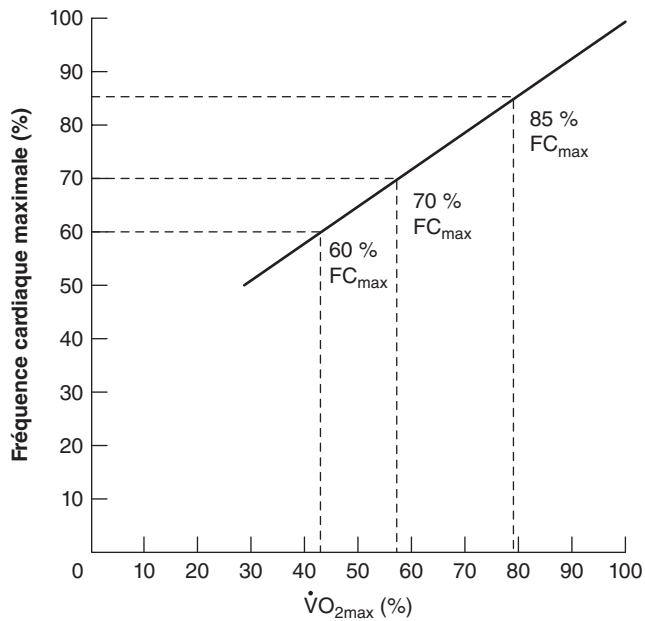


Figure 10.3

Évolution de la fréquence cardiaque exprimée en pourcentage de $FC_{\max}$ en fonction de l'intensité relative de l'exercice exprimée en pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$.

Cette relation est valable quel que soit le sujet.

D'après Pollock ML, Wilmore JH, Fox SM III. *Health and fitness through physical activity*. Modified from American College of Sports Medicine Series. New York: Wiley, 1978, p. 123.

L'entraînement induit cependant un certain nombre d'adaptations. La première est la diminution de la fréquence cardiaque de repos associée à une augmentation du volume d'éjection systolique. Le débit cardiaque ne varie pas au repos. On peut donc mesurer fréquemment des fréquences cardiaques de repos de 60 battements par minute et souvent même de 50 à 55 battements par minute chez des sportifs. Ces valeurs peuvent être encore plus basses chez des spécialistes de l'effort aérobie, qui peuvent descendre jusqu'à 40 battements par minute, parfois moins.

L'autre adaptation fondamentale liée à la chronicité de l'entraînement est la modification de la relation $FC / \dot{V}O_2$ ou FC /intensité exprimée en watt ou en $km \cdot h^{-1}$. Elle se traduit par une modification de la pente de la droite qui unit ces différents paramètres, comme l'indique la figure 10.2. Pour un exercice sous-maximal donné, la fréquence cardiaque du sportif est plus basse. $FC_{\max}$ n'ayant pas changé, le sujet, pour le même exercice, se situe à un pourcentage plus faible de ses possibilités maximales. Il est donc plus performant (figure 10.2).

Ces relations font de FC un outil remarquable pour le suivi de l'entraînement dans le domaine aérobie. C'est, à ce jour, certainement le plus pertinent, même s'il fait l'objet de certaines critiques. Celles-ci sont liées à la variabilité que

peut avoir la fréquence cardiaque pour un exercice effectué à des moments différents (figure 10.3). Il faut d'abord s'assurer que les conditions sont les mêmes (vent, température et hygrométrie). Toute contrainte évolutive de l'environnement agit sur la réponse cardiaque. Ensuite, l'activité cardiaque, et FC en particulier, intègre l'ensemble des paramètres qui influent sur le fonctionnement de l'organisme. Si FC est différente pour un même exercice, il faut plutôt s'interroger sur les causes et non la dénigrer comme moyen de suivi de l'entraînement. Ce peut être le résultat d'un état de fatigue lié à un entraînement trop intense.

Pression artérielle

L'augmentation de l'activité cardiaque à l'exercice induit en premier lieu l'adaptation de la pression artérielle ou plutôt des pressions artérielles systolique (Pas), diastolique et moyenne qui varient à l'exercice (figure 10.4).

Lors d'un effort progressivement croissant, la pression artérielle systolique (Pas) augmente linéairement avec l'intensité de l'exercice. D'une valeur de repos de 120 mmHg chez une personne saine, elle peut s'élever à 200 mmHg et plus lors d'un exercice aérobie maximal. Elle va baisser ensuite régulièrement lors de la récupération pour revenir à la valeur de repos en une dizaine de minutes. La pression artérielle diastolique ne varie pas ou s'élève très peu lors de ce type d'épreuve.

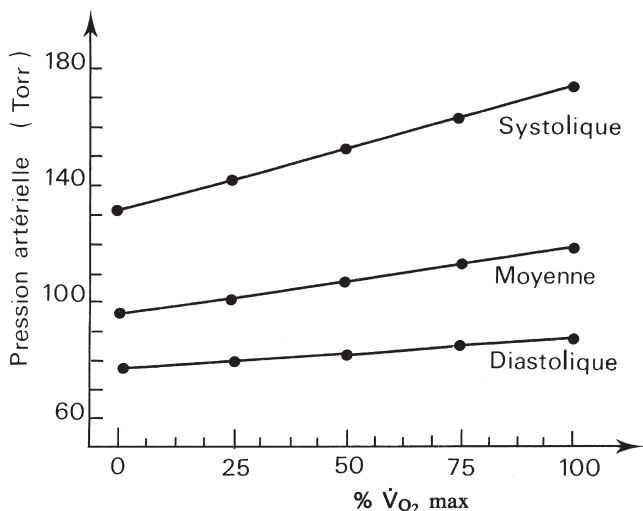


Figure 10.4

Évolution de la pression artérielle avec l'intensité relative de l'exercice.

Si la pression artérielle diastolique varie peu, la pression artérielle systolique augmente proportionnellement avec l'intensité de l'exercice.

Source : H. Monod, R. Flandrois, H. Vandewalle. *Physiologie du sport*. 6th ed. Elsevier Masson; 2007.

Débit sanguin local

Toutes ces adaptations cardiocirculatoires ont pour objectif de permettre la contraction musculaire dans un régime aérobie. L'augmentation du débit cardiaque, à l'exercice, entraîne une élévation du débit sanguin local pour satisfaire les besoins des muscles en activité. Des capillaires non fonctionnels au repos le deviennent sous l'influence de la pression artérielle qui s'élève. La surface d'échange entre les capillaires sanguins et les fibres musculaires augmente et permet de satisfaire les besoins des muscles en activité.

Ce phénomène est amplifié par l'entraînement et la création de nouveaux capillaires qui accroît encore la vascularisation musculaire.

Un autre phénomène participe à l'amélioration de la fonction cardiovasculaire. Il s'agit de la redistribution de la masse sanguine. L'activation du système sympathique et les modifications physico-chimiques qui accompagnent l'exercice induisent une vasodilatation locale, donc une augmentation du débit sanguin dans les territoires musculaires actifs. Ceci se fait au détriment des territoires viscéraux dont le débit sanguin diminue, parfois sévèrement, en raison d'une vasoconstriction viscérale importante. Le débit sanguin s'accroît également dans les territoires vitaux (cœur, cerveau, poumons). Le débit sanguin musculaire augmente quant à lui considérablement à l'exercice aérobie maximal (figure 10.5).

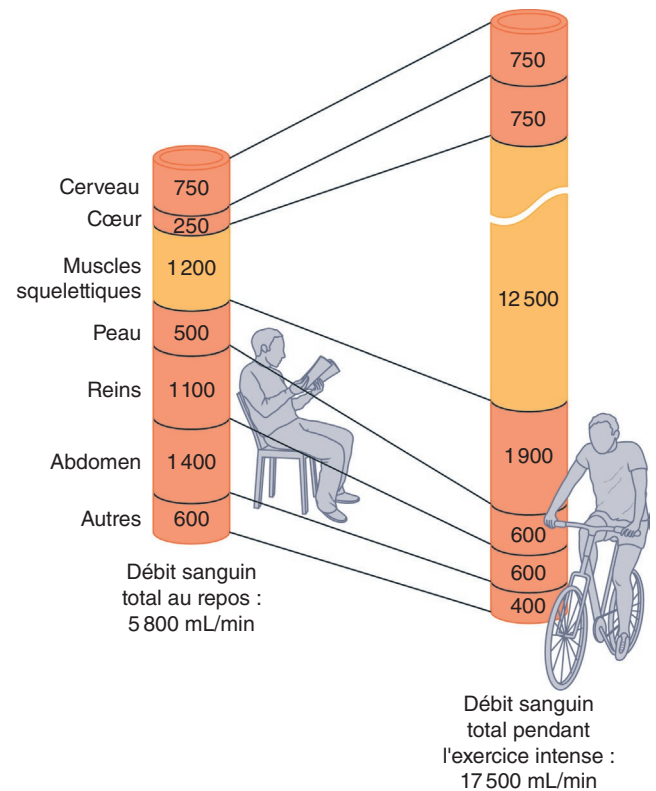


Figure 10.5

Adaptations cardiovasculaires à l'exercice.

Dessin d'Éléonore Lamoglia.



À retenir

Le débit cardiaque évolue linéairement avec la consommation d'oxygène.

La fréquence cardiaque évolue linéairement avec la consommation d'oxygène. Elle fournit alors un excellent repère d'intensité de l'exercice pour s'entraîner.

La pression artérielle systolique augmente linéairement avec l'intensité de l'exercice.

À l'exercice, la pression artérielle diastolique varie peu.

L'exercice induit une augmentation du débit sanguin dans les territoires musculaires actifs au détriment des autres territoires à l'exception du cœur, du cerveau et des poumons.