

Circulation sanguine et apport de dioxygène aux muscles

Nous savons que les cellules musculaires dégradent des nutriments pour libérer de l'énergie au cours d'un ensemble de réactions chimiques qui consomment du dioxygène. Nous savons aussi que ces cellules prélèvent dans le sang le dioxygène et les nutriments dont elles ont besoin mais que ces besoins sont très variables : ils augmentent considérablement au cours d'un effort physique. Comment la circulation sanguine peut-elle satisfaire cette augmentation des besoins ?

1 Les caractéristiques du cœur et de la circulation sanguine

1. Le cœur : deux pompes synchrones.

Le sang est mis en mouvement par le cœur, muscle creux divisé en deux parties, le **cœur droit** et le **cœur gauche**, qui ne communiquent pas directement entre elles. Chacune de ces parties est divisée en deux cavités : une oreillette et un ventricule.

Le sang arrive dans les oreillettes par des **veines**, il quitte les ventricules par des **artères**. L'organisation interne du cœur et la contraction successive des oreillettes et des ventricules sont responsables de la **circulation à sens unique du sang** :

- les **valvules auriculo-ventriculaires** situées entre les oreillettes et les ventricules ne laissent passer le sang que dans le sens oreillette – ventricule ;
- les **valvules sigmoïdes** situées à la sortie des ventricules, ne permettent l'écoulement du sang que des ventricules vers les artères.

Le fonctionnement des parties droite et gauche du cœur est parfaitement **synchrone**. Au cours de la révolution cardiaque, la même suite de phénomènes se reproduit régulièrement à un rythme d'environ 70 battements par minute au repos :

- la **systole auriculaire** ou contraction des oreillettes, qui dure $1/10^e$ de seconde, chasse le sang des oreillettes dans les ventricules ;
- la **systole ventriculaire** ou contraction des ventricules, qui dure $3/10^e$ de seconde, expulse le sang des ventricules dans les artères, les valvules auriculo-ventriculaires étant fermées ;

- la **diastole générale** ou relâchement total du cœur, qui dure $5/10^e$ de seconde, permet au sang arrivant par les veines de remplir les oreillettes et de s'écouler dans les ventricules, les valvules auriculo-ventriculaires étant ouvertes.

2. La circulation sanguine.

• Deux circuits « en série ».

Nous savons depuis le collège que le sang sort du cœur par des artères qui se ramifient ensuite en artérioles alimentant un réseau de capillaires au sein de tous les organes. Ces capillaires se rassemblent ensuite en veinules puis veines qui ramènent le sang au cœur.

Nous savons aussi que la circulation sanguine comporte deux circuits :

- la **circulation pulmonaire**, ou « petite circulation », qui conduit le sang du ventricule droit à l'oreillette gauche, en passant par les poumons ;
- la **circulation générale**, ou « grande circulation », qui conduit le sang du ventricule gauche à l'oreillette droite, en irriguant l'ensemble des organes du corps à l'exception des poumons.

Ces deux circuits sont placés « en série » puisque tout le sang ayant parcouru le premier parcourt ensuite le second.

• Une distribution « en parallèle ».

Chaque organe (hormis les poumons) reçoit du sang oxygéné par une artère qui est une ramification de l'aorte puis le renvoie par une veine vers l'une des veines caves. À l'intérieur de la grande circulation, les circuits irriguant les différents organes sont donc, par analogie avec un circuit électrique, disposés « en parallèle ».

• Un même débit dans les deux circulations.

La disposition en série des deux circulations a une conséquence importante : à un instant donné, le **débit sanguin** (volume de sang parcourant le circuit par unité de temps) est le même dans la circulation pulmonaire et dans la circulation générale. Ce débit est aussi le **débit cardiaque** (c'est-à-dire le débit à la sortie de l'un ou l'autre des ventricules).

Le **débit cardiaque** se calcule en multipliant le **volume d'éjection systolique** (volume de sang éjecté à chaque systole) par la **fréquence cardiaque** (nombre de systoles par minute) : il est de l'ordre de 5 litres par minute au repos.

2 Les adaptations circulatoires à l'effort physique

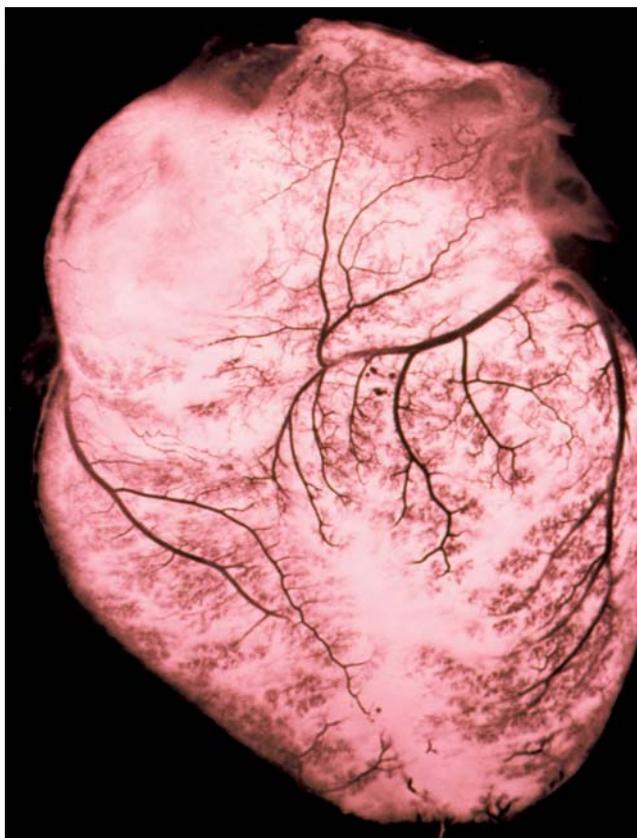
1. Une augmentation du débit cardiaque au cours de l'effort.

De 5 litres par minute au repos, le débit cardiaque peut passer à 25 litres au cours d'un effort intense. Cette augmentation se fait grâce à :

- une accélération du rythme cardiaque qui peut passer d'environ 70 battements par minute au repos à près de 200 battements par minute ;
- une augmentation du volume d'éjection systolique.

2. Une redistribution du débit sanguin.

La disposition en parallèle de l'irrigation des différents organes permet une redistribution des débits sanguins locaux. Au cours de l'effort, les organes n'intervenant pas dans cette activité physique (appareil digestif, reins...) voient leur débit sanguin relatif diminuer au profit des organes actifs : muscles et cœur qui se contractent, peau qui évacue la chaleur produite par le travail musculaire. Ainsi, les muscles qui reçoivent 15 à 20 % du débit sanguin au repos en reçoivent jusqu'à 85 % lors d'un exercice physique intense. L'encéphale conserve un débit constant quelle que soit l'intensité de l'effort.



Lors d'un effort physique, le débit sanguin augmente dans les coronaires, artères qui irriguent le cœur.

Cette redistribution est rendue possible par l'existence, au niveau des organes actifs, d'adaptations circulatoires locales remarquables. À l'origine des réseaux de capillaires de ces organes, des muscles en forme de manchon, les sphincters, règlent le débit sanguin dans les capillaires :

- au repos, les sphincters sont fermés et très peu de sang s'écoule dans les réseaux capillaires ;
- pendant l'effort, les sphincters s'ouvrent et les réseaux capillaires se gorgent de sang.

3 La couverture des besoins en dioxygène des muscles en activité

Plusieurs mécanismes permettent de satisfaire les besoins accrus en dioxygène des cellules musculaires pendant l'effort.

1. Le maintien d'une saturation en oxygène du sang artériel.

La disposition en série de la circulation générale et de la circulation pulmonaire permet à tout le sang qui a irrigué les organes de passer s'oxygéner au niveau des poumons avant de repartir à nouveau vers ces organes.

Au cours d'un effort physique, l'augmentation simultanée des débits cardiaque et respiratoire permet à un plus grand volume de sang de se charger en dioxygène par unité de temps. Pourtant, ceci ne modifie pas la teneur en dioxygène du sang artériel : celui-ci est toujours saturé en dioxygène quelle que soit l'intensité de l'effort.

En effet, au niveau des poumons, les mécanismes de recharge du sang en dioxygène sont très efficaces : le sang pauvre en dioxygène qui entre dans les capillaires alvéolaires se sature en dioxygène en 0,25 seconde alors qu'il séjourne dans ces capillaires trois fois plus de temps. On en déduit donc que la durée de l'écoulement sanguin dans les capillaires alvéolaires pourrait diminuer des deux tiers sans que pour autant l'oxygénation du sang artériel soit diminuée.

2. Une augmentation de l'extraction du dioxygène sanguin par les muscles.

Comme nous venons de le voir, le sang artériel entrant dans les muscles est toujours saturé en dioxygène. En revanche, le sang veineux sortant des muscles est d'autant plus pauvre en dioxygène que l'effort est intense. Cette différence de concentration artério-veineuse correspond à la quantité de dioxygène prélevée par les muscles.

Ainsi au cours de l'effort, une plus grande proportion d'hémoglobine cède son dioxygène ce qui permet de couvrir les besoins accrus des muscles.

Remarque : Le cœur est un muscle qui se contracte beaucoup plus au cours d'un effort qu'au repos. À ce titre, il a besoin comme tous les autres muscles de dioxygène supplémentaire qui lui est apporté par le sang des artères coronaires.

3. Les limites de l'approvisionnement en dioxygène.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la $\dot{V}O_2$ max représente le volume maximal de dioxygène consommé en une minute par un individu, cette consommation restant stable au delà d'un certain niveau d'effort.

Compte tenu de l'efficacité de la recharge du sang en dioxygène au niveau des poumons, le débit ventilatoire ne constitue jamais un facteur limitant de la $\dot{V}O_2$ max : le sang artériel est toujours saturé en dioxygène quelle que soit l'intensité de l'effort.

En revanche, l'augmentation du débit cardiaque a des limites rapidement atteintes, principalement parce que le rythme cardiaque ne peut pas augmenter indéfiniment

(on rappelle l'existence d'une fréquence cardiaque maximale estimée par la formule : $FC_{max} = 220 - \text{âge en années}$). C'est donc le débit cardiaque qui constitue le facteur limitant de la $\dot{V}O_2$ max.

Nous avons également vu que la $\dot{V}O_2$ max d'un sujet pouvait être amélioré par l'entraînement sportif. Cet entraînement s'accompagne en effet d'une augmentation du volume du cœur (qui permet d'avoir un volume d'éjection systolique plus important) et d'une diminution de la fréquence cardiaque au repos. Au cours d'un effort intense, la fréquence cardiaque maximale est voisine de celle du sujet non entraîné, mais, le volume d'éjection systolique étant plus important, le débit cardiaque est lui-même plus important.

En conclusion, on peut dire que le maintien de la saturation en dioxygène du sang artériel nécessite une variation simultanée des activités cardiaque et respiratoire, adaptées à l'intensité de l'effort. La variation de l'une n'aurait aucune conséquence physiologique si elle n'était pas accompagnée d'une variation de l'autre. Nous verrons dans le chapitre suivant comment ces variations sont synchronisées.

L'essentiel

- Les cellules musculaires prélèvent dans le sang le dioxygène et les nutriments dont elles ont besoin mais ces besoins sont considérablement accrus au cours d'un effort physique. Les activités cardiaque et respiratoire doivent alors augmenter de façon synchronisée pour s'adapter à ces besoins accrus.
- L'augmentation de la ventilation pulmonaire par accélération du rythme respiratoire et augmentation du volume courant permet de maintenir dans l'air alvéolaire une pression en dioxygène suffisante pour assurer la saturation du sang qui sort des poumons.
- L'augmentation du débit cardiaque par accroissement du rythme et du volume d'éjection systolique permet d'apporter ce dioxygène aux muscles en activité.
- La disposition en série des circulations pulmonaire et générale permet, au niveau des poumons, la recharge en dioxygène de l'ensemble du volume sanguin.
- La disposition en parallèle de l'irrigation des différents organes permet une redistribution des flux sanguins et un apport préférentiel de dioxygène aux muscles en activité.
- Le maintien de la saturation en dioxygène du sang artériel nécessite une variation simultanée des activités cardiaque et respiratoire. Le chapitre suivant explique comment ces variations sont synchronisées.

Schéma-bilan

Circulation sanguine et apport de dioxygène aux muscles

