

ADAPTATIONS CARDIO-VASCULAIRE ET VENTILATOIRE A L'EFFORT & REGULATION DE LA PRESSION ARTERIELLE MOYENNE (PAM)

A/ DES MODIFICATIONS A L'EFFORT

1/ Au cours d'un exercice long et/ou peu intense, l'énergie est fournie par la respiration qui a lieu dans les mitochondries de toutes les cellules, et qui utilise le dioxygène et les nutriments organiques, fournissant ainsi aux organes leur énergie utile pour fonctionner.

- a/ le bilan de la respiration à partir du glucose (exemple de nutriment) est :



- b/ les principaux nutriments oxydés par respiration sont le glucose et les acides gras

- c/ la demande énergétique augmente avec l'activité musculaire globale

2/ L'effort physique augmente la consommation de dioxygène O_2 :

- a/ plus l'effort est intense, plus le volume de dioxygène consommé VO_2 augmente

- b/ il y a une limite à la consommation de dioxygène : c'est le VO_2 max, volume maximal d' O_2 consommé par unité de temps et de masse pour un individu donné (en $\text{mL d'O}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) : il dépend de l'hérédité et de l'environnement car sédentarité, surpoids et âge l'abaissent quand l'entraînement augmente sa valeur. Il conditionne la performance physique.

3/ La consommation de nutriments dépend aussi de l'intensité de l'effort fourni :

Plus l'effort est intense, plus la consommation de nutriments augmente : ils proviennent du sang (glucose et acides gras) et des réserves du corps (glycogène et triglycérides). Selon la durée et l'intensité de l'effort, les nutriments consommés changent. (AP # 2) : les lipides sont plus consommés à long terme pour une intensité modérée.

4/ L'exercice physique est un des facteurs qui aident à lutter contre l'obésité

L'obésité résulte du stockage en excès de lipides dans les tissus adipeux : les glucides et lipides non utilisés par l'organisme sont stockés. Une activité physique régulière utilise ceux qui sont en excès et limite la mise en réserve globale et ainsi les risques d'obésité. Une activité physique régulière d'endurance et d'intensité moyenne (50% de la VO_2 max) utilise les lipides stockés .

5/ Au cours de l'effort, un certain nombre de paramètres physiologiques sont modifiés :

a/ au niveau cardiaque, le débit augmente :

La fréquence cardiaque en battements par minute (F_c en bpm) et le volume d'éjection systolique, volume de sang éjecté par battement (VES en $\text{L} \cdot \text{batt}^{-1}$) augmentent donc le débit cardiaque $D_c = \text{VES} \times F_c$ augmente proportionnellement (volume de sang éjecté par minute en $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$).

au repos : $F_c = 75 \text{ bpm}$ / $\text{VES} = 70 \text{ mL} \cdot \text{batt}^{-1}$ / $D_c = 5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

La F_c maximale conditionne la VO_2 max.

b/ au niveau pulmonaire, le débit augmente :

La fréquence ventilatoire (Fv) est le nombre de mouvements ventilatoires (inspirations + expirations par minute) et augmente à l'effort, comme le volume courant (Vc), volume d'air inspiré à chaque inspiration donc le débit ventilatoire $Dv = Fv \times Vc$ augmente proportionnellement (volume d'air inspiré en litres par minute, L.min⁻¹).

au repos : $Vc = 400 \text{ mL} \cdot \text{cycle}^{-1}$

L'augmentation du débit ventilatoire est complémentaire de celui du débit cardiaque.

c/ au niveau de l'organisme, la pression artérielle moyenne PAM augmente

La force exercée par le sang sur la paroi des artères augmente : les contractions cardiaques assurent la propulsion du sang et donc la circulation des nutriments organiques et du dioxygène O₂. Cette pression oscille entre 2 valeurs : la pression maximale à la contraction (pression artérielle systolique PAS) et la pression minimale au relâchement (pression artérielle diastolique PAD)

$PAM = PAD + \frac{1}{3} (PAS - PAD)$.

au repos, en moyenne : PAM = 83 mm Hg (mm de mercure) / PAS = 120 mm Hg , PAD = 80 mm Hg

⇒ **Ces modifications physiologiques permettent un meilleur approvisionnement des muscles en dioxygène et en nutriments organiques. L'organisation anatomique facilite cet apport privilégié (circuit en parallèle, possibilité de variation du diamètre artériolaire suivant les priorités, nombre d'ouvertures des sphincters pré-capillaires).**

Un bon état cardiovasculaire et ventilatoire est indispensable à la pratique d'un exercice physique.

B/ UNE BOUCLE DE REGULATION NERVEUSE

coeur : étymologie : vient du grec cardia, « cœur », de la racine indo-européenne kērd

Pour que le sang arrive jusqu'aux plus petits vaisseaux et irrigue donc toutes les cellules de tous les tissus de tous les organes, il doit circuler à forte pression. L'appareil cardiovasculaire est donc pourvu d'une pompe très efficace : le cœur. C'est un organe situé entre les 2 poumons, au-dessus du diaphragme et protégé par le thorax. Il est irrigué par des vaisseaux spécifiques appelés vaisseaux coronaires (car formant une couronne autour du cœur).

Le cœur est composé de 3 tissus superposés :

- le péricarde, enveloppe fibreuse permettant la fixation du cœur dans la cage thoracique
- le myocarde, muscle cardiaque
- l'endocarde, couche de cellules tapissant les parois internes du cœur et les valvules qui séparent les différents compartiments cardiaques

1/ Morphologie et circulation cardiaque

Le cœur est un organe en forme de pyramide, avec la pointe (apex) vers le bas légèrement à gauche. Il est constituée de 4 cavités : 2 parties imposantes, les ventricules, surmontées de 2 petits « sacs aplatis » : les oreillettes.

Des vaisseaux sanguins sont connectés à ces 4 compartiments.

Chez les mammifères, le cœur est séparé en 2 parties indépendantes gauche et droite :

- le cœur droit [oreillette droite (3) + ventricule droit (7)], qui reçoit le sang appauvri en O₂ et enrichi en CO₂ des veines caves inférieure (4) et supérieure (2) et l'envoie dans la circulation pulmonaire par les artères pulmonaires (1-9)
- le cœur gauche [oreillette gauche (11) + un gros ventricule gauche (14)], qui reçoit le sang enrichi en O₂ et appauvri en CO₂ des veines pulmonaires (10) et l'envoie dans la circulation générale par l'artère aorte (8-16)

Dans un cœur cloisonné de mammifère, il y a :

a / une double circulation

⇒ la grande circulation ou circulation générale aussi appelée systémique partant du ventricule gauche (VG) par l'aorte et véhiculant un sang enrichi en O₂ et appauvri en CO₂ et retournant au cœur via la veine cave dans l'oreillette droite (OD) véhiculant un sang appauvri en O₂ et enrichi en CO₂ par suite de l'activité cellulaire des différents organes.

⇒ la petite circulation ou circulation pulmonaire, permettant la recharge du sang en O₂ et la décharge en CO₂, partant du ventricule droit (VD) par une artère pulmonaire et retournant au cœur via une veine pulmonaire dans l'oreillette gauche (OG) afin d'alimenter via la circulation générale les cellules.

b / un cloisonnement cœur gauche / cœur droit sans communication possible

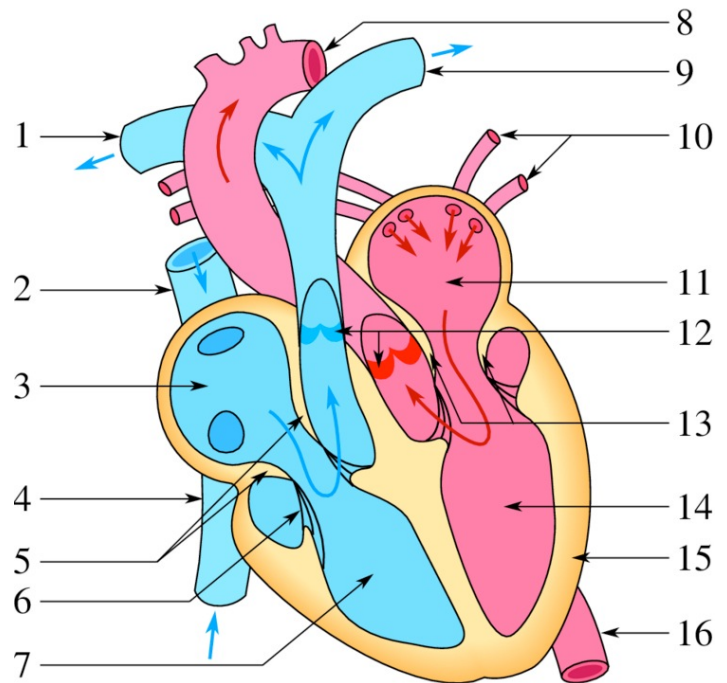
c/ un tissu auto- contractile, le tissu nodal, responsable de la fonction de pompe du cœur qui met en mouvement le sang dans ces 2 circulations de manière synchrone

2/ Le cycle cardiaque

La circulation du sang dans le cœur et les vaisseaux est assurée par un ensemble de contractions (systoles) et de relâchements (diastoles) successifs des différents compartiments du myocarde du 1^{er} mouvement autocontractile foetal à la mort. On appelle révolution cardiaque l'ensemble des mécanismes qui permettent au sang de faire le tour complet de la circulation.

Il existe différentes méthodes pour explorer le mécanisme de la révolution cardiaque :

- externe : on peut évaluer la fréquence, l'automatisme et donc la durée d'une révolution cardiaque à l'aide de méthodes très simples et non invasives :
 - la palpation au niveau des 4^e et 5^e espaces intercostaux, qui permet d'évaluer les mouvements du cœur qui frappe contre la cage thoracique ;
 - la prise du pouls, qui permet de sentir l'onde de propagation du sang dans les artères ;
 - l'auscultation grâce à un stéthoscope, qui permet d'entendre les bruits du cœur dus à la fermeture des valvules tricuspide et mitrale (« TOUM ») et sigmoïdes (« TA ») ;
 - l'électrocardiogramme (ECG), qui mesure l'activité électrique du cœur (voir plus loin).
- Interne : on peut réaliser un cardiogramme en introduisant une petite canule appelée cathéter dans les cavités cardiaques, afin de mesurer les variations de pression dans les différents compartiments (ventricule, oreillette, artère).



3/ mise en mouvement du sang (AP # 3)

Le sang circule toujours des veines vers les oreillettes, puis des oreillettes vers les ventricules, et enfin des ventricules vers les artères. Pour empêcher un reflux qui pourrait perturber l'ensemble de la circulation sanguine, des valvules cloisonnent les compartiments cardiaques :

- la valvule tricuspide (5) se trouve entre l'oreillette et le ventricule droit
- la valvule mitrale (ou bicuspide) (13) se trouve entre l'oreillette et le ventricule gauche
- les valvules sigmoïdes (12) se trouvent entre les ventricules et les artères
- Les valvules sont maintenues par des piliers tendineux (6) qui les empêchent de se retourner en doigt de gant sous la pression sanguine ventriculaire

4/ la pression artérielle moyenne (PAM) et sa régulation

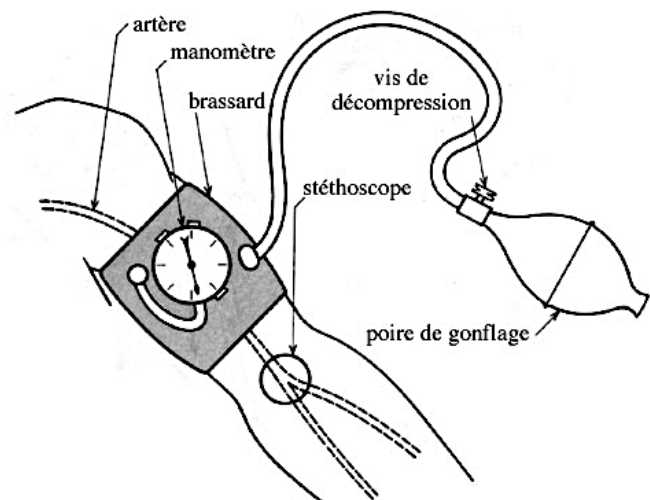
a/ les 3 paramètres sanguins majeurs

⇒ le débit sanguin, DS, (en mL.min⁻¹) : c'est le volume de sang s'écoulant pendant une durée donnée dans un vaisseau, un organe (débit variable suivant les besoins à un instant t) ou le système cardio-vasculaire entier (appelé alors débit cardiaque, relativement constant au repos, environ 5 à 6 L.min⁻¹)

⇒ la pression sanguine P (en mm de Hg) : c'est la force par unité de surface que le sang exerce sur la paroi d'un vaisseau

Habituellement, pression artérielle signifie celle de la circulation générale, correspondant à celle des gros vaisseaux près du coeur, la PAM (pression artérielle moyenne). Elle est régie par des mécanismes autorégulateurs

mesure : par un brassard gonflable relié à un sphygmomanomètre.



Le sang s'écoule selon le gradient de pression (ΔP)

des pressions plus hautes vers les plus faibles : ce sont donc les différences de pression qui génèrent cette force de propulsion, elles sont donc maintenues partout constantes pour assurer les mouvements du fluide.

⇒ la résistance R, force s'opposant à l'écoulement sanguin résultant de la friction du sang sur la paroi d'un vaisseau. Surtout dans la circulation périphérique loin du coeur, on l'appelle souvent résistance périphérique totale (RPT). Elle correspond à celle dans un unique vaisseau imaginaire résumant toute la circulation générale.

Elle dépend de 3 paramètres : la viscosité du sang (résistance du sang à l'écoulement lié à sa fluidité et son épaisseur), la longueur totale des vaisseaux et leur diamètre.

En ce qui concerne le diamètre des vaisseaux : c'est surtout au niveau des artérioles que la variation de diamètre se fait. La résistance est plus forte dans un petit vaisseau qu'un grand car la part de liquide en contact avec les parois est plus grande, ce qui gêne le mouvement.

La résistance est inversement proportionnelle à la puissance quatrième du rayon du vaisseau (r^4)

La régulation nerveuse de la Fc est basée sur un système impliquant différents acteurs coordonnés :

a/ des récepteurs sensitifs

fonction : capture de la variation du facteur régulé, ici la PAM, quand éloignement de la valeur de référence

qui ? les récepteurs (barorécepteurs et chimiorécepteurs), qui captent les variations de pression artérielle ou de composition du sang

les fibres nerveuses sensitives : dans les nerfs de Hering (IX) et de Cyon-Ludwig (X) pour les sinus, et dans la fibre cardiosensible pour l'oreillette droite des fibres nerveuses sensitives transmettant l'information au centre nerveux du bulbe rachidien à la base du cerveau

b/ les centres nerveux

fonction : traitement de l'information reçue et envoi d'une réponse au tissu cible par l'intermédiaire des fibres nerveuses motrices

qui ?

- le centre nerveux parasympathique, qui est situé dans le bulbe rachidien : on le nomme centre cardiomodérateur (CCM) ;
- le centre nerveux sympathique, qui est situé dans la moelle épinière : il est nommé centre cardio-accélérateur (CCA). Entre les 2 centres nerveux, des neurones inhibiteurs sont chargés d'affaiblir l'un des deux systèmes quand l'autre est stimulé.
- les fibres nerveuses motrices, regroupées dans le nerf pneumogastrique (ou nerf vague), qui est connecté au nœud sinusal, et dans le nerf cardiaque, connecté au nœud sinusal et aux ventricules => la variation est alors corrigée

La fréquence cardiaque est régulée par le système nerveux autonome (SNA) ou végétatif (SNV) de façon involontaire. Composé de 2 systèmes opposés mais complémentaires d'effet contraire (on dit qu'ils sont antagonistes) : le système parasympathique et le système orthosympathique ou sympathique.

- au repos : les systèmes nerveux parasympathique et sympathique envoient sans cesse des influx au nœud sinusal, mais comme les fibres parasympathiques envoient plus d'influx, globalement la Fc est abaissée à 70-75 battements par minute, c'est le tonus vagal (car imposé par le nerf vague).

- quand il est stimulé, le nerf pneumogastrique libère son neurotransmetteur, l'acétylcholine, qui abaisse la fréquence cardiaque
- quand les fibres sympathiques sont stimulées, elles libèrent de la noradrénaline, qui augmente la fréquence cardiaque

Remarque : une hormone sécrétée après stimulation nerveuse lors d'un stress par la médullosurrénale, l'adrénaline, joue le même rôle que la noradrénaline sur la Fc.

Quand la pression artérielle augmente, les barorécepteurs du sinus carotidien stimule le centre cardiomodérateur, ce qui fait diminuer la fréquence cardiaque.

petit exercice de math : quelle est l'influence finale d'un doublement du diamètre sur la résistance ?

Relation globale entre ces 3 paramètres : $D = \Delta P / R$

b/ la PAM

La pression artérielle moyenne (PAM) est un paramètre régulé en permanence autour d'une valeur moyenne consigne : c'est une constante régulée.

$PAM = Pd + (Ps - Pd) / 3$ où Ps est la pression systolique (phase de contraction du myocarde) et Pd la pression diastolique (phase de relâchement du myocarde)

Le coeur, les vaisseaux et les reins agissent de concert pour maintenir ce paramètre. La PAM est une variation de pression. Selon la formule précédente, sachant qu'elle correspond au débit cardiaque DC pour une résistance périphérique totale RPT, on a :

$$D = \Delta P / R \Leftrightarrow \Delta P = D \times R \text{ soit } PAM = DC \times RPT = Fc \times Ves \times RPT$$

- $DC = Fc \times VES$ avec Fc : la fréquence cardiaque et VES , le volume d'éjection systolique qui dépend lui-même de la volémie, le volume global dans le sang
- RPT dépend essentiellement du rayon du vaisseau imaginaire global

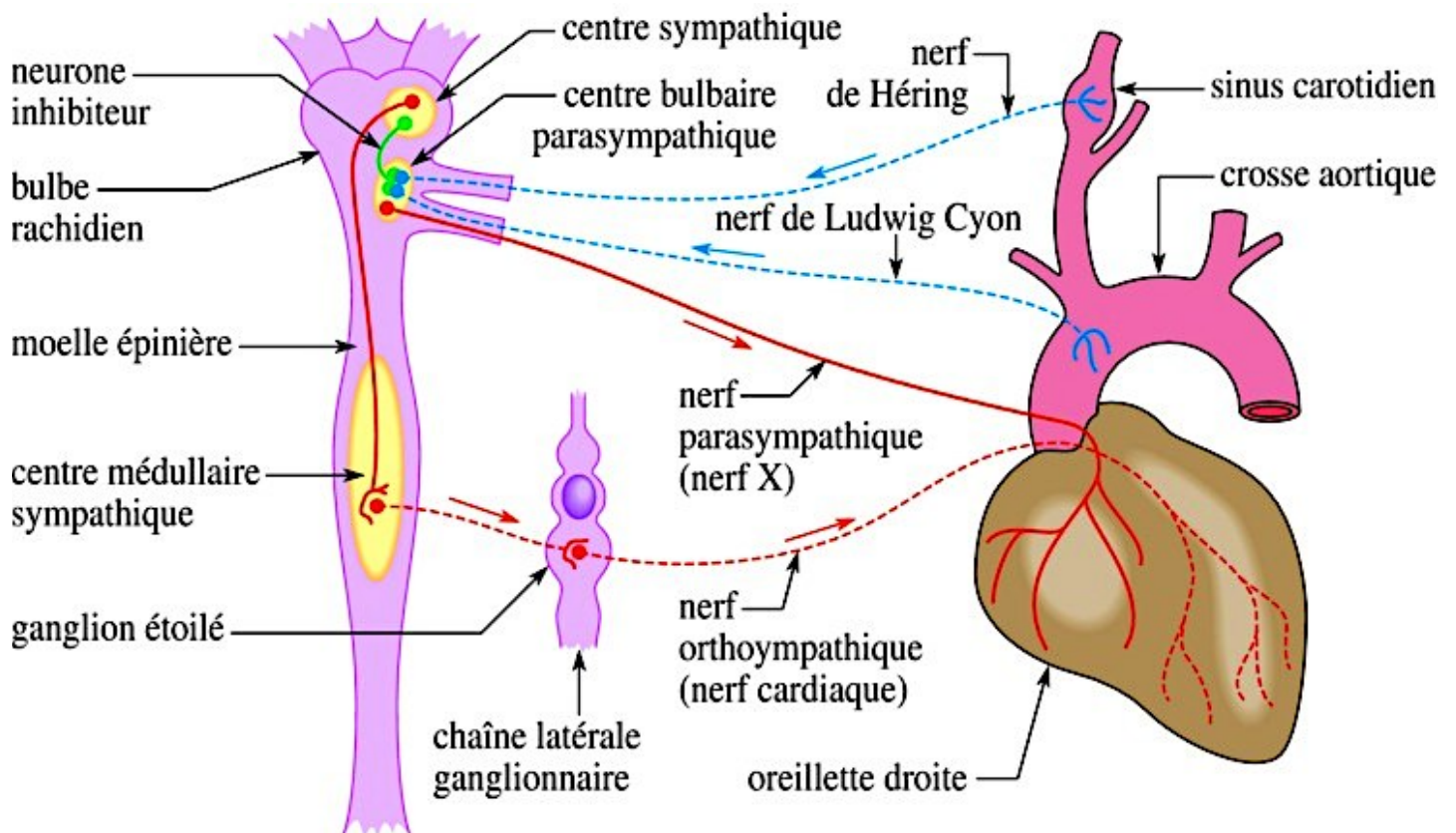
Ainsi, la régulation de la PAM dépend de la régulation de DC et RPT à un instant t.

De très nombreux mécanismes différents, à plus ou moins long terme, permettent de la réguler. Des influences nerveuses, hormonales ou rénales interviennent.

C/ REGULATION DE LA PAM VIA LA FREQUENCE CARDIAQUE (FC) (AP # 4)

On sait que la fréquence cardiaque (Fc) moyenne est de 70 à 75 battements par minute (BPM). Or, elle diminue lors du sommeil et augmente à la suite d'un stress ou d'un effort physique par exemple. De plus, une personne qui a subi une greffe cardiaque, et dont le cœur est déconnecté des voies nerveuses, a une Fc de 100 BPM environ, à la fois au repos et en activité.

Conclusion : la fréquence cardiaque est en permanence contrôlée par le système nerveux essentiellement par le nerf moteur parasympathique, qui la diminue d'environ 25 % (1/4).



BILAN :

- ⇒ LE SANG CIRCULE TOUJOURS DES VEINES VERS LES OREILLETES, DES OREILLETES VERS LES VENTRICULES ET DES VENTRICULES VERS LES ARTÈRES
 - ⇒ LES VALVULES EMPÊCHENT LE REFLUX DU SANG
 - ⇒ UN CYCLE CARDIAQUE EST CONSTITUÉ DE PLUSIEURS PÉRIODES : LE REMPLISSAGE DES VENTRICULES (DIASTOLE GÉNÉRALE), QUI SE TERMINE QUAND LES OREILLETES SE CONTRACTENT POUR SE VIDER (SYSTOLE AURICULAIRE). LES VENTRICULES SE CONTRACTENT ALORS (SYSTOLE VENTRICULAIRE) POUR ÉJECTER LE SANG DANS LES ARTÈRES
 - ⇒ ON APPELLE DÉBIT CARDIAQUE LE VOLUME DE SANG QUI PASSE PAR LE CŒUR CHAQUE MINUTE
 - ⇒ UN GROUPE DE CELLULES AUTO-EXCITABLES, LES CELLULES NODALES, SONT À L'ORIGINE DE LA CONTRACTION AUTOMATIQUE ET RYTHMIQUE DES COMPARTIMENTS CARDIAQUES
 - ⇒ LA FRÉQUENCE CARDIAQUE EST RÉGULÉE PAR LE SYSTÈME NERVEUX VÉGÉTATIF (SNV), AU TRAVERS D'UN CENTRE CARDIOMODÉRATEUR ET D'UN CENTRE CARDIOACCÉLÉRATEUR SITUÉS AU NIVEAU DU BULBE RACHIDIEN
 - ⇒ AU REPOS, LE CENTRE CARDIOMODÉRATEUR PAR L'INTERMÉDIAIRE D'UN NERF PARASYMPATHIQUE (LE NERF VAGUE OU PNEUMOGASTRIQUE OU NERF X) FREINE LA FRÉQUENCE CARDIAQUE EN PERMANENCE.
- (UN COEUR NÉOGREFFÉ BAT PLUS VITE COMME UN COEUR DE FOETUS, DANS LES 2 CAS CAR L'INNERVATION N'EST PAS ENCORE BIEN ÉTABLIE)