

Physiologie

1. Physiologie musculaire

1.1. Introduction

1.1.1. Un bref historique

La physiologie est la science qui étudie les fonctions et les propriétés des organes et des tissus des êtres vivants.

Trois grandes périodes divisent l'évolution de la physiologie.

La première période s'étendit de l'Antiquité jusqu'au XIV^{ème} siècle : l'analyse objective était liée à l'interprétation mythologique du monde.

La deuxième période s'étendit de la Renaissance jusqu'au XVIII^{ème} siècle : apparut la notion de systèmes (circulatoire, respiratoire et musculaire). Cette période dura jusqu'à Lavoisier (1743-1794), qui, le premier, assimila l'organisme humain à une machine à transformer l'énergie.

La troisième époque, l'époque moderne (contemporaine), étudie les processus qui règlent le fonctionnement des organes entre eux. On tente de comprendre les mécanismes cellulaires à l'échelle moléculaire. Les techniques d'étude des muscles ont beaucoup évolué.

- On est passé du microscope optique au microscope électronique.
- Les techniques histologiques ont évolué (on pratique la technique de la coloration).
- La pratique des biopsies musculaires est autorisée (par exemple, on prélève des échantillons de muscle sur des êtres vivants).

Ainsi, on connaît de mieux en mieux le muscle :

- sa constitution,
- son innervation,
- sa vascularisation,
- les mécanismes de sa contraction,
- son énergétique.

1.1.2. La place du muscle dans l'organisme

La fonction principale du tissu musculaire est la contraction.

Le tissu musculaire est formé de cellules qui, en raison de leur forme allongée, sont appelées fibres.

Il existe trois types de fibre musculaire :

- la fibre musculaire striée squelettique (muscles du corps - biceps, deltoïde), dont la contraction produit un déplacement et une tension,
- la fibre musculaire lisse (paroi des viscères, des vaisseaux sanguins), dont la contraction permet le déplacement des fluides, les mouvements de l'œil, le battement des cils bronchiques,
- la fibre musculaire cardiaque (cœur), dont la contraction permet une augmentation des pressions intra-cavitaires.

Les mécanismes de contraction de ces trois types de fibre musculaire sont voisins.

1.1.3. Généralités sur le muscle strié squelettique

Le corps humain compte environ 430 muscles (nombre variable en fonction des classifications).

Leur forme est très variable (confer figure 1) :

- muscles longs (membres),
- muscles plats (tronc),
- muscles courts (intercostaux),
- muscles annulaires (autour de la bouche).

Le muscle strié squelettique représente 40 pour cent de la masse corporelle.

Au repos, 25 pour cent de la dépense énergétique de base correspond au muscle strié squelettique. En exercice, la dépense énergétique musculaire peut être multipliée par 50.

Le mouvement humain s'effectue grâce à la transformation d'énergie chimique (glucides, lipides et protéines)

- en énergie mécanique (25 pour cent),
- en énergie thermique (75 pour cent).

La contraction musculaire aboutit à une force.

- S'il y a déplacement, le mouvement est un travail musculaire.
- S'il n'y a pas déplacement, la tension est un tonus musculaire.

Le muscle possède plusieurs propriétés.

- C'est un organe excitable, soit de façon interne par un influx nerveux, soit de façon externe par une excitation électrique.
- C'est un organe élastique : il peut être étiré et revenir à sa position de repos.
- C'est un organe contractile : il peut se raccourcir.
- C'est un organe thermogénique : il produit de la chaleur tant au repos que pendant la contraction.
- C'est un organe de réserve énergétique : l'adénosine triphosphate (A.T.P.), et la créatine phosphate (C.P.) (énergie de la contraction) ; le glycogène (réserve, stockage de glucose) ; le dioxygène (sous forme de myoglobine).

1.2. Le muscle strié squelettique, structure et fonctions

1.2.1. Structures macroscopique et microscopique

1.2.1.1. Macroscopique

1.2.1.1.1. Organisation générale du muscle

Confer figure 2.

Un muscle est constitué de milliers de cellules géantes polynucléées. Ces cellules sont allongées, contractiles et parallèles entre elles (myocytes ou fibres musculaires). Elles font de quelques millimètres à plusieurs dizaines de centimètres de long.

Chaque fibre est enveloppée par une fine couche de tissu conjonctif appelée l'endomysium.

L'endomysium est en contact avec une membrane sarcoplasmique appelée le sarcolemme.

A l'intérieur du sarcolemme se trouve le sarcoplasme.

Les fibres musculaires se regroupent en faisceaux.

Chaque faisceau est entouré d'une membrane appelée le pérимыsium. Chaque faisceau contient environ 150 fibres musculaires.

Le regroupement des faisceaux, l'ensemble du muscle, est entouré par une membrane appelée l'épимыsium. Au bout, l'épимыsium constitue le tendon.

1.2.1.1.2. Composition chimique

Le muscle squelettique est composé d'environ

- 75 pour cent d'eau,
- 20 pour cent de protéines,
- 5 pour cent d'autres substances.

Le cytoplasme de la cellule musculaire est appelé le sarcoplasme. Il contient

- des protéines contractiles (actine et myosine),
- différents substrats du métabolisme énergétique (myoglobine - fixe le dioxygène - ; glycogène, lipides, acides aminés, A.T.P., C.P., enzymes - permettent les différentes réactions chimiques - ; réticulum sarcoplasmique - permet la circulation - ; mitochondries - usines énergétiques - ; plusieurs noyaux cellulaires - cerveaux de la cellule).

1.2.1.1.3.Vascularisation

Les muscles sont des organes richement vascularisés. La vascularisation musculaire comprend

- le système artériel, qui alimente le muscle en dioxygène et en nutriments nécessaires à la contraction (glucose, acides gras, acides aminés),
- le système veineux, qui permet de dissiper la chaleur produite par la contraction et de débarrasser le muscle de ses déchets (dioxyde de carbone et acide lactique).

Dégageons deux points particuliers concernant la vascularisation.

- Lors d'une contraction isométrique (sans variation de longueur), le muscle est mal irrigué (peu de dioxygène) et doit utiliser les mécanismes anaérobies pour se contracter, ce qui entraîne une grande fatigabilité (forte production d'acide lactique).
- L'entraînement en endurance permet une augmentation du nombre de capillaires qui irriguent le muscle squelettique. Le réseau capillaire des muscles sollicités d'un athlète entraîné en endurance est de 40 pour cent supérieur à celui d'un sédentaire.

1.2.1.1.4.L'innervation musculaire et l'unité motrice

Les nerfs qui arrivent au niveau du muscle contiennent à la fois

- des fibres sensibles, véhiculant de l'information depuis le muscle jusqu'au système nerveux central (moelle épinière et cerveau) comme la douleur, l'orientation du muscle ou du membre dans l'espace,
- des fibres motrices (motoneurones), véhiculant des informations depuis le système nerveux central jusqu'au muscle (leur stimulation entraîne la contraction musculaire, c'est l'ordre moteur).

La fonction entre la fibre motrice et la fibre musculaire s'appelle la fonction neuromusculaire ou la plaque motrice.

Est appelé unité motrice l'ensemble constitué par le motoneurone, son axone et l'ensemble des fibres musculaires qu'il innerve (il y a 50 à 2000 unités motrices par muscle).

Le nombre de fibres musculaires par unité motrice est très variable :

- 10 à 15 fibre motrices pour des muscles très rapides et très précis (muscle occhio-moteur),
- 2000 fibres musculaires pour des muscles grossiers comme le quadriceps.

Il y a trois règles dans une unité motrice.

- Toutes les fibres musculaires possèdent les mêmes propriétés.
- Toutes les fibres musculaires sont activées en même temps.
- Les unités motrices sont recrutées progressivement (gradation de la force).

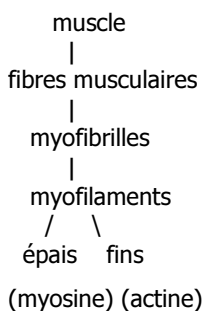
1.2.1.2.Microscopique

1.2.1.2.1.Description

Confer figure 3.

L'ultrastructure du muscle strié squelettique est observée grâce au microscope électronique et aux techniques histochimiques de coloration.

On observe une alternance de bandes transversales claires et sombres, d'où le nom de muscle strié.



Confer figure 4.

Les myofilaments de myosine sont épais, situés en position centrale et uniquement formés de molécules de myosine. Chaque molécule de myosine est constituée de deux parties : la queue de la myosine et la tête de la myosine. Sur la tête de myosine se trouvent deux sites :

- le site A.T.P.-asique, qui permet la création d'énergie grâce à des réactions chimiques,
- le site actif de liaison, qui permet la contraction musculaire grâce à l'énergie.

Les myofilaments d'actine sont fins, situés en position de "touche" et constitués

- essentiellement de molécules d'actine (vrillées côte à côte comme un double collier de perles),
- mais aussi de molécules de tropomyosine et de troponine, qui jouent un rôle très important dans la contraction et le relâchement musculaires.

Dans la fibre musculaire, les filaments d'actine et de myosine sont rigoureusement organisés de telle sorte que chaque filament de myosine est entouré de six filaments d'actine.

```
*
* *
O
* *
*
```

Vue en coupe

O : filament de myosine

* : filaments d'actine

1.2.1.2.2.Organisation des myofibrilles

1.2.1.2.2.1.L'examen microscopique

Confer figures 3, 4 et 5.

Les bandes sombres s'appellent les bandes A. Elles sont constituées de l'interpénétration de myofilaments de myosine et de myofilaments d'actine. En leur milieu se trouve une zone plus claire appelée la zone H, constituée uniquement de myofilaments de myosine. La zone H est elle-même coupée en son milieu par la ligne M, qui correspond à la jonction de deux myofilaments de myosine.

Les bandes claires s'appellent les bandes I. Elles correspondent à des myofilaments d'actine. En leur centre se trouve la ligne Z, qui correspond à la jonction de deux myofilaments d'actine.

1.2.1.2.2.2.Le sarcomère

C'est la région comprise entre deux lignes Z. C'est l'unité fonctionnelle de la contraction.

- Au repos, le sarcomère a une longueur constante.
- Au cours de la croissance, les myofibrilles augmentent leur longueur en formant de nouveaux sarcomères (le sarcomère a une taille unique).
- Quelles que soient les circonstances, le sarcomère garde toujours la longueur pour laquelle son efficacité mécanique est la meilleure (un muscle ne développe pas la même force à toutes les longueurs).
- Un autre avantage de cette plasticité est la restauration relativement rapide des fibres musculaires victimes de lésions (ruptures ou distensions).

1.2.1.2.3.Le réticulum sarcoplasmique et le système tubulaire

Confer figure 6.

Les canalicules se rejoignent dans les citernes terminales.

Les citernes terminales sont en contact avec les tubules transverses (tubules T).

- Les citernes terminales servent de réservoirs aux ions calcium Ca^{2+} .

- Les tubules T conduisent l'influx nerveux à l'intérieur des myofibrilles.

Deux citernes terminales et un tubule T forment une triade. Les triades jouent un rôle important dans la contraction musculaire (couplage excitation-contraction).

1.2.2.Mécanismes de la contraction musculaire

1.2.2.1.Théorie des filaments glissants d'Huxley (théorie de l'interdigitation)

1.2.2.1.1.Observation microscopique du sarcomère

Confer figure 7.

Malgré certaines zones d'ombre dans les explications de la contraction musculaire, plusieurs preuves accréditent cette théorie. Ainsi, la contraction musculaire correspond au glissement des filaments fins d'actine entre les filaments épais de myosine. Ce glissement aboutit à une diminution de la longueur de chaque sarcomère sans que les filaments fins ou épais ne changent eux-mêmes de longueur. Au cours de la contraction, les lignes Z sont tirées au centre du sarcomère. Les bandes I, claires, changent de dimension et se raccourcissent. Les bandes A, sombres, ne changent pas de dimension.

1.2.2.1.2.Les ponts d'union

Confer figure 8.

Quatre étapes permettent la création des ponts d'union.

- Au repos, les têtes des molécules de myosine sont maintenues à distance des molécules d'actine en raison de l'interposition des molécules de tropomyosine et de troponine.
- La contraction débute avec la liaison entre les têtes des molécules de myosine et les molécules d'actine. Il s'agit de la création des ponts d'union.
- La contraction correspond à une inclinaison de 90 à 45 degrés des têtes de myosine. Il y a alors raccourcissement de chaque sarcomère et donc de la myofibrille. Le glissement de l'actine entre la myosine est complet après huit à seize répétitions de ce processus.
- La liaison entre la myosine et l'actine est rapidement libérée pour qu'une nouvelle liaison soit possible. L'énergie permettant le mouvement est l'A.T.P.. On peut comparer ce mécanisme à des rameurs qui donnent des coups d'aviron pour avancer.

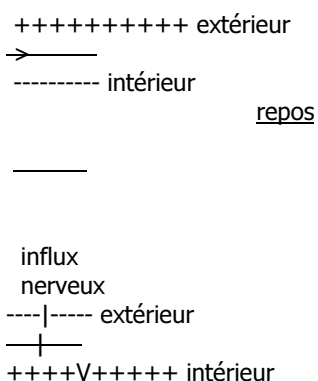
1.2.2.2.Le couplage excitation-contraction : séquences des phénomènes au cours de la contraction musculaire

Le couplage excitation-contraction est le mécanisme par lequel une décharge électrique (un influx nerveux dans le corps humain) déclenche la séquence des phénomènes chimiques qui aboutissent à la contraction musculaire.

Confer figure 9.

Neuf étapes aboutissent à la contraction et au relâchement musculaires.

- 1.Un ordre moteur prend naissance du système nerveux central (S.N.C.) et chemine jusqu'au muscle par le motoneurone. Si l'ordre part du cerveau, il y a contraction volontaire. Si l'ordre part de la moelle épinière, il y a contraction involontaire ou réflexe.
- 2.Cet ordre moteur (influx nerveux) arrive au niveau de la plaque motrice (jonction neuromusculaire) et provoque la libération d'acétylcholine.
- 3.L'acétylcholine entraîne la création d'un potentiel d'action, c'est-à-dire une augmentation de la perméabilité de la membrane des cellules musculaires et donc une modification de répartition des ions sodium Na^+ et des ions potassium K^+ de part et d'autre de celles-ci.

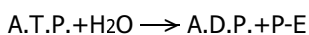


← → potentiel d'action
contraction

-
- 4.Ce potentiel d'action pénètre à l'intérieur de la myofibrille par les tubules T, qui le conduisent jusqu'aux citernes terminales.
 - 5.Dans les citernes terminales, le potentiel d'action augmente la pénétrabilité de celles-ci aux ions calcium Ca^{2+} . La concentration en ions calcium Ca^{2+} à l'intérieur des citernes terminales est 2000 fois plus importante que celle des sarcoplasmes.
 - 6.Les ions Ca^{2+} se fixent sur le système troponine-tropomyosine, enlevant ainsi l'inhibition de l'actine pour la myosine. Cette fixation du Ca^{2+} déclenche l'hydrolyse de l'A.T.P. avec donc libération d'énergie nécessaire à la création des ponts d'union.
 - 7.La contraction se poursuit tant que la concentration en ions Ca^{2+} est suffisante.
 - 8.A l'arrêt de la stimulation, le Ca^{2+} retourne dans les citernes terminales grâce au fonctionnement des pompes à calcium. L'énergie nécessaire est fournie par l'hydrolyse de l'A.T.P..
 - 9.Les filaments d'actine et de myosine retrouvent alors leur position initiale : on obtient le relâchement musculaire.

1.2.2.3.Rôles de l'A.T.P.

L'énergie nécessaire à ces phénomènes de contraction-relâchement est fournie par l'hydrolyse de l'A.T.P..



A.D.P. : adénosine diphosphate

E : 10 kcal/mol

1 mol = 10^{23} molécules (nombre d'Avogadro)

Cette énergie E libérée servira

- à l'accrochage actine-myosine,
- aux mouvements des ponts d'union,
- au fonctionnement de la pompe à Ca^{2+} .

1.2.3.Les sources d'énergie de la contraction musculaire

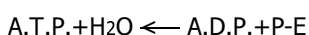
1.2.3.1.L'A.T.P.

Confer figure 10.

L'énergie utilisée par la contraction musculaire est stockée dans un composé riche en énergie, l'A.T.P..

rappel

→



La quantité d'A.T.P. en réserve dans l'organisme est très faible et ne permet que quelques secondes d'exercice (3 secondes environ).

1.2.3.2.Les trois filières de production d'énergie pour la resynthèse de l'A.T.P.

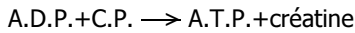
Confer figure 11.

Pour que le muscle puisse se contracter plus longtemps, il est nécessaire que l'A.T.P. soit resynthétisée au fur et à mesure de son utilisation. Cette resynthèse s'effectue grâce à la C.P. et à des voies métaboliques fonctionnant en aérobie ou en anaérobie et

utilisant différents substrats énergétiques (glucides, lipides, protéines).

1.2.3.2.1. Le système des phosphagènes : la voie anaérobie alactique

La resynthèse de l'A.T.P. à partir de la créatine phosphate contenue dans le muscle se fait selon la réaction suivante :

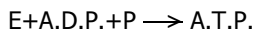
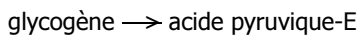


Ce processus permet la resynthèse de l'A.T.P. en début d'exercice.

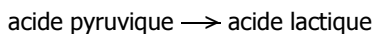
Cette voie est utilisée dans la course des 100 mètres par exemple.

1.2.3.2.2. Le système de la glycolyse anaérobie : la voie anaérobie lactique

La glycolyse anaérobie correspond à la dégradation du glycogène en acide pyruvique qui permet la synthèse de 3 A.T.P.. A partir d'une mole de glycogène, on obtient la resynthèse de 3 moles d'A.T.P..



Ces réactions ne nécessitent pas la présence de O₂ (anaérobie), mais elles aboutissent à la formation d'acide lactique (anaérobie lactique).



L'accumulation de l'acide lactique dans le muscle entraîne une baisse du pH qui perturbe les processus contractiles.

Cette voie métabolique intervient surtout au début de l'exercice, quand l'apport en dioxygène aux muscles est insuffisant, et lors d'exercices intenses, quand la voie aérobie n'apporte plus assez d'énergie.

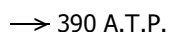
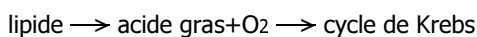
Cette voie est utilisée dans la course des 400 mètres par exemple.

1.2.3.2.3. Le système de la glycolyse aérobie et des acides gras : la voie aérobie

La voie aérobie est représentée par la dégradation en présence de dioxygène et de substrats glucidiques et lipidiques dans la mitochondrie. Cette voie constitue le système le plus important de resynthèse ou de production d'A.T.P., qui peut aller de 37 A.T.P. par le glycogène à plus de 390 A.T.P. par certains lipides. Si l'apport en O₂ est satisfaisant, cette voie métabolique permet la poursuite des contractions musculaires pendant plusieurs heures.



La dégradation d'une mole de glycogène permet la resynthèse de 37 moles d'A.T.P. (36 moles d'A.T.P. à partir d'une mole de glucose).



La dégradation d'une mole de lipide permet la resynthèse de 390 moles d'A.T.P..

Cette voie est utilisée dans le marathon par exemple.

1.2.3.3. Caractéristiques des trois filières

Cette partie concernant les trois filières, c'est-à-dire la théorie des réservoirs, est traitée dans les bases de la préparation physique à l'entraînement des trois filières énergétiques.

1.2.4. Typologie des fibres musculaires

1.2.4.1. Introduction

Grâce aux biopsies musculaires, on peut étudier, observer et différencier les types de fibres musculaires qui entrent en jeu dans la composition du muscle.

Cette différenciation est importante car on a démontré que le muscle est capable de s'adapter, de modifier ses caractéristiques, de modifier son équipement enzymatique et biochimique en fonction du type d'entraînement.

On classe les fibres musculaires de plusieurs façons :

- selon leur contenu (rouges ou blanches),
- selon leur vitesse de contraction,
- selon leur nombre de mitochondries, etc.

Retenons le classement suivant :

- fibres de type I,
- fibres de type II (IIa, IIb et IIc).

1.2.4.2.Principales caractéristiques des différents types de fibres musculaires

Confer tableau 1.

1.2.4.2.1.Les fibres de type I

Les fibres de type I ou slow twitch (S.T.) sont rouges à cause de leur grande quantité de myoglobine et de leur riche vascularisation. Elles contiennent beaucoup de glycogène et de lipides. Elles sont durantes et peu fatigables.

1.2.4.2.2.Les fibres de type II

Les fibres de type IIa ou fast twitch a (F.T. a) sont blanches à cause de leur petite quantité de myoglobine et de leur pauvre vascularisation. Elles contiennent beaucoup de glycogène. Elles sont résistantes et fatigables.

Les fibres de type IIb ou fast twitch b (F.T. b) sont blanches à cause de leur très petite quantité de myoglobine et de leur très pauvre vascularisation. Elles contiennent beaucoup de glycogène et d'enzymes glycolytiques. Elles sont puissantes et très fatigables.

Les fibres de type IIc ou fast twitch c (F.T. c) sont intermédiaires entre les fibres I et II.

1.2.4.3.Répartition des différents types de fibres musculaires à l'intérieur d'un muscle

Rappelons qu'une unité motrice rassemble un motoneurone et les fibres musculaires qu'il innerve.

Suivant la fonction du muscle, un motoneurone peut innerver quelques-unes à plusieurs centaines de fibres musculaires.

Les fibres d'une même unité motrice possèdent les mêmes caractéristiques (type I ou type II).

Un même muscle possède des unités motrices contenant des fibres de type I et des unités motrices contenant des fibres de type II. La proportion varie avec la fonction du muscle.

- Les muscles posturaux (soléaire) possèdent une majorité de fibres de type I. Ils sont donc toniques.
- Les muscles des membres supérieurs possèdent une majorité de fibres de type II. Ils sont donc phasiques.

1.2.5.Caractéristiques de la contraction du muscle strié squelettique

1.2.5.1.Propriétés générales du muscle

Elles sont au nombre de quatre.

1.2.5.1.1.L'excitabilité musculaire

La cellule vivante est dite excitable lorsqu'elle répond de façon spécifique à une stimulation. Par exemple, la cellule musculaire répond à une stimulation électrique par une production d'énergie qui détermine une réponse mécanique.

Trois lois de l'excitabilité (trois conditions pour que le stimulus soit efficace) sont dégagées :

- nécessité d'une brusquerie d'action (pour être efficace, la stimulation électrique doit être brutale),
- nécessité d'une intensité minimale (pour être efficace, la stimulation doit avoir une certaine intensité, le seuil d'excitation),
- nécessité d'une durée minimale d'action (pour être efficace, le stimulus doit avoir une certaine durée, de l'ordre de la milliseconde).

1.2.5.1.2.L'élasticité musculaire

Sous l'action d'une force extérieure, le muscle peut se déformer puis reprendre sa longueur initiale. Il est donc élastique.

Normalement insérés sur le squelette, les muscles se trouvent légèrement étirés, quelle que soit leur position, même au repos.

La rupture accidentelle ou la section d'un tendon se traduit par un raccourcissement de 20 pour cent du corps charnu du muscle.

1.2.5.1.3.La tonicité musculaire

La tonicité est une propriété du muscle dans les conditions physiologiques, c'est-à-dire en place et innervé par son nerf moteur (motoneurone).

Le tonus musculaire est un état de tension ne nécessitant qu'un minimum de fatigue. Il ne disparaît qu'au cours d'un sommeil profond. Il permet

- la fixation des segments osseux entre eux et assure donc l'attitude corporelle,
- les réflexes de posture et d'équilibration,
- la vasomotricité des artérioles.

1.2.5.1.4.La contractilité musculaire

C'est la capacité d'un muscle à se raccourcir sous l'action d'une stimulation (influx nerveux) sans changer de volume (confer figure 12).

La contraction musculaire aboutit au développement d'une force. Deux cas sont distingués. Dans la vie courante et dans la vie sportive, les contractions musculaires (gestes, mouvements) sont une combinaison des sollicitations isométriques et des sollicitations isotoniques.

1.2.5.1.4.1.La contraction isométrique

La force musculaire développée est égale à la force extérieure : le muscle augmente sa tension en gardant sa longueur constante. Cette contraction isométrique aboutit à un travail statique.

1.2.5.1.4.2.La contraction isotonique (ou anisométrique)

La force musculaire développée est différente de la force extérieure : le muscle change de longueur.

Il existe deux cas dans cette contraction isotonique.

- Lors d'une contraction concentrique, la force musculaire est supérieure à la force extérieure : le muscle se raccourcit.
- Lors d'une contraction excentrique, la force musculaire est inférieure à la force extérieure : le muscle s'allonge.

Ces deux cas sont à l'origine d'un travail dynamique.

1.2.5.2.Les différentes réponses musculaires

1.2.5.2.1.La réponse mécanique

Confer figure 12.

1.2.5.2.1.1.Introduction

Cette réponse est étudiée grâce à des myographes.

- Dans des conditions isométriques, les myographes enregistrent des variations de tension.
- Dans des conditions anisométriques, les myographes mesurent des déplacements (vitesse, force, etc.).

La réponse mécanique du muscle dépend du nombre et de la fréquence des stimulations.

- Une stimulation unique donne une réponse unique, élémentaire, appelée la secousse musculaire.
- Plusieurs stimulations donnent une réponse plus complète appelée le téтанos physiologique.

L'intensité de la réponse mécanique dépend de

- la longueur à laquelle le muscle est stimulé (diagramme tension-longueur ou force-longueur),
- la vitesse à laquelle le muscle se raccourcit (relation force-vitesse).

1.2.5.2.1.2.La secousse musculaire et la loi du tout ou rien

Dans un premier cas, prenons une fibre musculaire isolée (cas que l'on ne rencontre qu'en situation expérimentale). Quand elle est excitée, elle répond d'emblée par une contraction maximale : c'est la loi du tout ou rien.

Dans un deuxième cas, prenons un muscle en entier. Lorsqu'un muscle est stimulé par l'intermédiaire de son nerf moteur (motoneurone), on obtient une réponse en trois phases.

- Tout d'abord a lieu une phase de latence.
- Ensuite a lieu une phase de tension croissante (isométrique) ou de déplacement (anisométrique), qui aboutit à la contraction.
- Enfin a lieu une phase de tension décroissante (isométrique) ou de retour à la position initiale (anisométrique), qui aboutit à la décontraction (au relâchement).

La stimulation croissante du motoneurone permet d'obtenir une réponse mécanique d'intensité croissante jusqu'à l'obtention d'une réponse maximale. Cela correspond à un recrutement progressif des unités motrices.

Chaque unité motrice obéit à la loi du tout ou rien mais pas le muscle en entier. Nous pouvons ainsi doser la force musculaire à développer. Cela contribue à la finesse des mouvements.

Confer figure 13.

1.2.5.2.1.3. La sommation des contractions : le téтанos physiologique

Deux situations sont distinguées :

- la situation expérimentale,
- la situation physiologique.

Confer figure 14.

- Dans la situation A (expérimentale), des stimulations espacées entraînent une succession de secousses simples. Il y a un petit temps de latence juste avant la première secousse.
- Dans la situation B (expérimentale), des stimulations successives pendant la phase de décontraction entraînent un téтанos imparfait.
- Dans la situation C (expérimentale), des stimulations successives pendant la phase de contraction entraînent un téтанos parfait.

La contraction volontaire (situation physiologique) correspond à un téтанos physiologique qui est toujours parfait.

1.2.5.2.1.4. La relation tension-longueur (ou force-longueur)

La tension (la force) développée par un muscle dépend de la longueur des fibres au moment de leur activation.

Confer figure 16.

- La longueur d'équilibre est la longueur d'un muscle désinséré lorsqu'il n'est soumis à aucune force extérieure.
- La longueur de repos est la longueur d'un muscle inséré au repos. Elle est de 120 à 125 pour cent de la longueur d'équilibre. Elle correspond à la longueur optimale du muscle, la longueur pour laquelle le muscle développe la plus grande force.
- La force totale (courbe du haut) correspond à une activation du muscle en condition isométrique. C'est pour la longueur de repos que le muscle développe une force maximale.

En deçà et au delà de la longueur de repos, la force que peut développer un muscle diminue.

- La longueur des sarcomères est moins favorable : le nombre de ponts entre l'actine et la myosine est réduit.
- Les mouvements avec charge sont plus difficiles à réaliser lorsque les articulations sont très ouvertes ou très fermées.
- Dans l'organisme, les muscles sont insérés à une longueur égale à la longueur de repos de manière à pouvoir développer une force maximale.
- Les muscles à contraction rapide (de type II) ont une longueur optimale.
- Les muscles à contraction lente (de type I) possèdent quant à eux un intervalle de longueur optimale plus large.

1.2.5.2.1.5. La relation force-vitesse

La vitesse maximale à laquelle un muscle peut se raccourcir dépend de la force qui lui est opposée. Elle est obtenue pour une charge nulle.

La force maximale développée par un muscle diminue avec la vitesse du mouvement. Elle est obtenue pour la vitesse la plus lente.

La puissance du muscle est égale au produit de la vitesse par la force exercée.

$$P=v.F$$

Etudions les conséquences pratiques (confer figure 17).

La relation force-vitesse est influencée par le type de muscle : pour une fraction donnée de la force maximale, les muscles blancs (de type II) ont des vitesses de raccourcissement supérieures à celles des muscles rouges (de type I).

Confer figure 18.

La puissance maximale n'est obtenue ni à vitesse maximale, ni à force maximale, mais pour des valeurs sous-maximales de ces deux grandeurs. La puissance maximale est obtenue pour des valeurs sous-maximales de vitesse et de force d'environ 50 pour cent. Les muscles blancs (de type II) développent leur puissance maximale pour des vitesses supérieures à celles des muscles rouges (de type I).

1.2.5.2.2.La réponse bioénergétique

Cette réponse est étudiée dans les filières énergétiques de resynthèse de l'A.T.P..

1.3.La fatigue et les accidents musculaires

1.3.1.La fatigue musculaire

1.3.1.1.Introduction

La fatigue musculaire est une fatigue objective. C'est une baisse d'activité du muscle, liée à une activité antérieure de celui-ci, alors que l'incitation des centres nerveux est constante. Cette baisse d'activité est réversible par le repos.

Sont distingués

- la fatigue simple, qui disparaît au bout de 24 heures,
- l'épuisement, qui disparaît après presque une semaine avec un apport thérapeutique.

Les causes de la fatigue sont variées et liées au type d'exercice réalisé. Les exercices de force, de résistance et d'endurance sont distingués.

La fatigue musculaire a pour conséquence la défaillance de la contraction volontaire. Elle peut se situer à plusieurs niveaux.

- Le système nerveux central n'émet plus d'influx nerveux (volonté).
- Le motoneurone ne transmet plus d'ordre moteur.
- La fonction neuromusculaire ne joue plus son rôle. Le taux d'acétylcholine diminue.

1.3.1.2.La fatigue du mécanisme contractile

1.3.1.2.1.Accumulation d'acide lactique

Lorsque l'exercice musculaire fait appel essentiellement aux mécanismes anaérobie lactique comme fourniture d'énergie, il se produit une accumulation d'acide lactique au niveau des fibres musculaires sollicitées. Le pH diminue (il s'agit d'une acidose métabolique).

Cette acidose est responsable

- de la baisse des réactions enzymatiques et notamment de l'hydrolyse de l'A.T.P.,
- de la diminution de la concentration en calcium dans le sarcoplasme.

Retenons que

- le sportif entraîné possède une plus grande tolérance à l'acidose que le sujet sédentaire,
- la récupération après ce type d'exercice est plus rapide et plus efficace si elle est active.

1.3.1.2.2.Epuisement des processus de fourniture d'énergie

1.3.1.2.2.1.Epuisement du système des phosphagènes A.T.P.-C.P.

L'A.T.P. constitue la réserve d'énergie immédiate pour la contraction musculaire tandis que la C.P. est utilisée pour sa resynthèse.

L'épuisement de ces réserves en phosphagènes entraîne la fatigue.

1.3.1.2.2.2.Épuisement des réserves en glycogène

Pour des exercices physiques de longue durée, les réserves en glycogène diminuent. Alors, même si ces exercices sont peu intenses, la dégradation du glycogène reste le point de départ du métabolisme énergétique (les acides gras ne suffisent plus).

Le manque de glycogène est responsable de la fatigue musculaire pour des exercices aérobies.

1.3.1.2.3.Modification de l'état physico-chimique

Au cours d'exercices épuisants, il se produit des modifications de l'équilibre ionique des cellules musculaires.

- Il y a accumulation d'ions K^+ dans les tubules T.
- Il y a diminution des ions Ca^{2+} dans le milieu intracellulaire (sarcoplasme).

Ceci est dû à une modification de la perméabilité de la membrane sarcoplasmique à cause de l'acidose.

Cette modification de l'équilibre ionique aboutit à la modification des propriétés électriques des tubules T et donc l'onde de dépolarisation n'atteint plus la totalité des sarcomères.

Ainsi, la principale cause de la fatigue des mécanismes contractiles est essentiellement la baisse du pH par accumulation d'acide lactique (et de CO_2).

1.3.2.Les accidents musculaires

Deux catégories de traumatismes musculaires sont distinguées :

- sans lésions anatomiques (chaleur, massages),
- avec lésions anatomiques (froid, immobilisation).

1.3.2.1.Les accidents sans lésions anatomiques

1.3.2.1.1.La courbature

C'est une douleur musculaire diffuse survenant 12 à 24 heures après l'effort. Le repos, la chaleur puis les massages légers et la réhydratation permettent au muscle d'éliminer les toxines.

1.3.2.1.2.La crampe

C'est une contraction brutale, involontaire, intense et douloureuse intervenant pendant l'activité (étirement, chaleur puis massages).

1.3.2.1.3.La contracture

C'est un état qui se situe entre la courbature et la crampe. Elle peut masquer une lésion plus grave comme une petite élongation ou une petite déchirure (repos puis chaleur et massages infra-douloureux).

1.3.2.2.Les accidents avec lésions anatomiques

Il s'agit de lésions aiguës beaucoup plus importantes que les précédentes. En général, il y a saignement à l'intérieur du muscle.

1.3.2.2.1.L'élongation

C'est un dépassement des limites d'élasticité du muscle par allongement brutal de celui-ci (cessation immédiate de l'activité puis, après un temps de repos, légers massages et reprise très progressive de l'activité).

1.3.2.2.2.La déchirure (le claquage)

C'est la rupture d'un nombre plus ou moins important des fibres musculaires. Le muscle saigne et une ecchymose apparaît (froid puis contention souple en position de repos).

1.3.2.2.3.La rupture musculaire

Le muscle cède dans son entier et se rétracte (froid et immobilisation ; le traitement est chirurgical).

1.3.2.2.4.La désinsertion

Le muscle cède à son insertion.

1.3.2.2.5.La contusion (la "béquille")

C'est un écrasement des fibres provoqué par un choc direct sur le muscle (froid et immobilisation en position de repos par une contention souple).

1.4.Conclusion

Dans les gestes de la vie courante, quelle que soit l'activité, plusieurs muscles entrent en jeu. Ces gestes font appel à trois formes de travail pour que l'activité soit la plus économique, adaptée et précise :

- le travail statique (isométrique),
- le travail dynamique concentrique (anisométrique),
- le travail dynamique excentrique (anisométrique).

Pour cette activité complexe, les muscles sont regroupés en quatre catégories fonctionnelles.

- Les muscles agonistes sont actifs sur le mouvement considéré.
- Les muscles antagonistes sont freinateurs sur le mouvement considéré.
- Les muscles directeurs orientent le mouvement.
- Les muscles fixateurs sont nécessaires pour fixer certaines parties du corps.

L'activité de l'ensemble de ces muscles est régulée par les centres nerveux supérieurs.

1.5.Bibliographie

Précis de physiologie de l'exercice musculaire, Astrand et Rodhal, Masson, 1980

Physiologie de l'activité musculaire, Karpowitch et Sinning, Vigot

Bioénergétique de l'exercice musculaire (et de l'entraînement physique), Rieu, PUF : le biologiste, 1988

2. Le système respiratoire

2.1. Introduction

Le dioxygène est indispensable au fonctionnement des cellules. Toutes les cellules consomment du dioxygène et rejettent du dioxyde de carbone. La principale fonction du système respiratoire est d'amener le dioxygène jusqu'aux cellules et de débarrasser l'organisme du dioxyde de carbone produit. Différentes étapes permettent d'amener le dioxygène jusqu'aux cellules :

- la ventilation pulmonaire, qui permet d'amener le O₂ jusqu'aux poumons,
- les échanges gazeux,
- le transport des gaz,
- l'utilisation par les muscles.

2.2. Anatomie du système respiratoire

L'air s'écoule dans des conduits aériens. Des résistances peuvent empêcher l'écoulement de l'air dans ces conduits. En général, les avantages de la circulation de l'air sont supérieurs aux inconvénients, sauf en cas de pathologie comme l'asthme.

Le système respiratoire est constitué de la cage thoracique (confer anatomie) et des poumons.

Les poumons sont divisés en lobes pulmonaires. Il y a trois lobes pulmonaires à droite et deux lobes pulmonaires à gauche. Chaque lobe est divisé en segments. La plus petite division visible à l'œil nu s'appelle un lobule. Une structure plus petite que le lobule s'appelle l'acinus, unité fonctionnelle du poumon. Le poumon est vascularisé.

2.2.1. Les voies aériennes

Elles sont de deux types, soit extrathoraciques, soit intrathoraciques. C'est dans ces voies aériennes que l'air circule.

2.2.1.1. Les voies aériennes supérieures ou extrathoraciques

Elles comprennent le nez, le pharynx, le larynx et la partie supérieure de la trachée.

La muqueuse nasale présente différents replis. Ces replis ont deux rôles.

- Ils permettent les échanges thermohydriques. La muqueuse nasale réchauffe et humidifie l'air inspiré.
- Ils offrent beaucoup de résistances nasales, qui gênent l'écoulement de l'air.

Le pharynx, situé au niveau du carrefour aérodigestif, au croisement de l'œsophage et de la trachée, présente un squelette musculaire. Le pharynx est divisé en plusieurs parties, qui sont, du haut vers le bas,

- le nasopharynx,
- l'oropharynx,
- le laryngopharynx.

Le larynx est également un organe de phonation. Il est constitué de cartilage et offre des résistances importantes, en moins grande quantité que la muqueuse nasale.

2.2.1.2. Les voies aériennes inférieures ou intrathoraciques

Elles se différencient en plusieurs zones.

La zone de convection s'étend de la trachée jusqu'à la 15^{ème} division. Y sont présentes de grosses bronches, présentes du début jusqu'à la 5^{ème} division. Y sont présentes de petites bronches, présentes de la 6^{ème} jusqu'à la 9^{ème} division. Y sont présentes des bronchioles, présentes de la 10^{ème} jusqu'à la 15^{ème} division. Les grandes bronches, les petites bronches et les bronchioles ont un rôle unique de conduction de l'air.

La zone de transition s'étend de la 16^{ème} à la 19^{ème} division, de la bronchiole respiratoire jusqu'à la bronchiole respiratoire terminale. Cette zone est partiellement alvéolisée (y sont présentes des alvéoles). Les alvéoles sont de petits sacs en contact avec des capillaires sanguins permettant le passage du dioxygène de l'air jusqu'au sang. La zone de transition a un rôle de conduction et un rôle d'échanges. C'est ainsi une zone mixte (d'où le nom de transition).

La zone respiratoire s'étend de la 20^{ème} à la 24^{ème} division. Y sont présentes des canaux alvéolaires, une multitude d'alvéoles (400 milliards chez un adulte). Cette zone est exclusivement réservée aux échanges gazeux. C'est essentiellement dans cette zone que le dioxygène passe de l'air jusqu'au sang.

2.2.1.3. Structure des voies aériennes

Il existe une armature cartilagineuse dans la trachée et les grosses bronches. La présence de cartilage permet à ces structures de résister au phénomène de compression. Les petites bronches contiennent aussi du cartilage. Petit à petit, la quantité de cartilage diminue et on n'en trouve plus dans les bronchioles. Par contre, la quantité de fibres musculaires augmente de la trachée jusqu'aux bronchioles.

La muqueuse des voies respiratoires contient des cellules ciliées qui fabriquent du mucus bronchique. Ce mucus a un rôle de protection : il dégage les particules étrangères de l'organisme.

2.2.1.4. Contrôle neurohumoral

Il y a un contrôle nerveux des voies aériennes.

- Dans les voies aériennes supérieures, une innervation est faite par des nerfs crâniens, par la 9ème et la 10ème paire des nerfs crâniens.
- Dans les voies aériennes inférieures, une innervation est faite par le système nerveux sympathique et le système nerveux parasympathique. Lorsque le système nerveux parasympathique est dominant, il y a une bronchoconstriction (les bronches rapetissent). Lorsque le système nerveux sympathique est dominant, il y a une bronchodilatation (les bronches s'agrandissent).

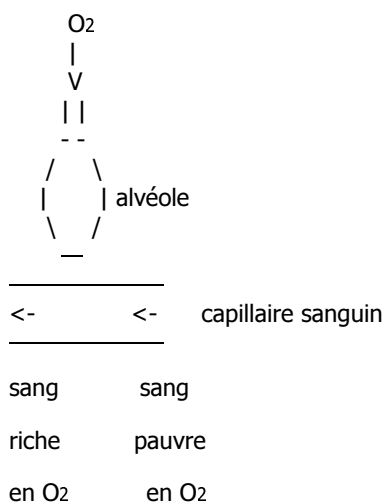
2.2.2. Parenchyme pulmonaire et vascularisation

2.2.2.1. Parenchyme pulmonaire

Il est formé de trois composantes

- alvéolaire (air),
- interstitielle (entre les deux),
- capillaire (sang).

Le parenchyme pulmonaire est le site des échanges gazeux.



Au niveau de l'alvéole, il y a une film liquidien endoalvéolaire constitué de trois couches.

- Le glycocalix est en contact avec des cellules alvéolaires.
- Une couche, au milieu, contient des substances anti-inflammatoires.
- Le surfactant pulmonaire est une substance tensioactive. Il a un rôle important : grâce à lui, les alvéoles peuvent garder une certaine forme même étant vides.

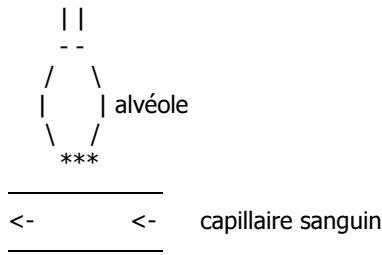
Dans l'épithélium alvéolaire, tissu entourant l'alvéole, sont présentes des cellules alvéolaires de deux types.

- Les pneumocytes I sont de petites cellules.
- Les pneumocytes II sont de grosses cellules fabriquant le surfactant pulmonaire.

Des macrophages sont présents dans l'alvéole, collés à la membrane alvéolaire. Ce sont des cellules du système immunitaire qui luttent contre les agressions et résorbent l'excès de surfactant.

L'interstitium est une zone formée par la fusion des parois alvéolaires et des parois capillaires. Y sont présentes des fibres de

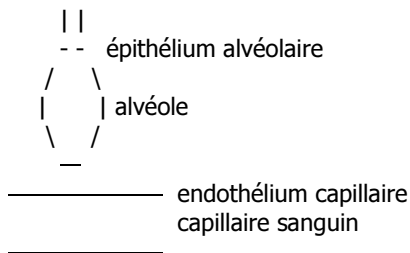
collagène donnant aux poumons leur propriété élastique. L'interstitium a un rôle dans les échanges gazeux et un rôle de nutrition.



*** : interstitium

L'endothélium capillaire est formé de grandes cellules formant la paroi des capillaires.

La fonction du parenchyme est l'échange gazeux. Il s'agit d'une surface alvéolo-capillaire.



L'ensemble des trois couches épithélium, interstitium et endothélium s'appelle la membrane alvéolo-capillaire. Le dioxygène doit traverser ces trois couches pour parvenir dans le sang.

2.2.2.2. Vascularisation

Pour aller aux poumons, le sang utilise deux types de vascularisation

- pulmonaire,
- bronchique.

Ces deux types diffèrent en taille, fonctionnement et origine.

Etudions la vascularisation pulmonaire. Le sang veineux, pauvre en dioxygène, arrive aux poumons en venant du cœur grâce à des artères pulmonaires, au nombre de deux. C'est le seul endroit du corps où les artères transportent du sang pauvre en dioxygène. Les artères pulmonaires suivent les bronches principales. Dans le poumon, les artères se ramifient pour aboutir à un réseau de capillaires entourant les alvéoles. Le sang dioxygéné est ramené des poumons au cœur grâce à des veines pulmonaires, au nombre de quatre.

Etudions la vascularisation bronchique. Les artères bronchiques, qui naissent au niveau l'aorte, se dispersent en un réseau au milieu des bronches. Ce réseau arrive jusqu'à la plèvre du poumon. Les veines bronchiques se jettent dans le cœur droit et dans les veines pulmonaires. En se jetant dans les veines pulmonaires, les veines bronchiques court-circuitent le système : il y a contamination du sang riche en dioxygène par du sang pauvre en dioxygène.

2.2.2.3. Contrôle neurohumoral

Les artères pulmonaires et bronchiques sont sous l'influence des systèmes sympathique et parasympathique.

Les veines pulmonaires et bronchiques sont uniquement sous l'influence du système parasympathique.

Lorsque le système sympathique est stimulé, il y a constriction des artères.

Lorsque le système parasympathique est stimulé, il y a dilatation des veines ou artères.

2.2.3. La plèvre

2.2.3.1. Définition

La plèvre est une séreuse, une membrane humide située dans les cavités fermées du corps. Elle est la séreuse du poumon. Elle est constituée de deux feuillets.

- Le feuillet viscéral a une position interne. Il est accolé au poumon. Il est soumis aux forces de rétraction élastique du poumon.

- Le feuillet pariétal a une position externe. Il est accolé à la cage thoracique, au diaphragme. Il est soumis aux forces de rétraction élastique du thorax.

Les feuillets ne se touchent pas. L'espace entre les deux feuillets est appelé le sac pleural. A l'intérieur de ce sac se trouve le liquide pleural, qui permet aux deux feuillets de glisser l'un sur l'autre. Dans le sac pleural, on peut mesurer la pression pleurale, qui est inférieure à la pression atmosphérique, donc négative.

La pleurésie est une inflammation de la plèvre entraînant une diminution du volume du liquide pleural. Se prolongeant dans le temps, cette maladie entraîne la disparition du liquide pleural, un assèchement très grave pour les malades.

Le pneumothorax se caractérise par la présence d'air dans le sac pleural. Cette anomalie peut intervenir après de graves accidents de la route.

2.2.3.2. Facteurs de différences de la pression pleurale

Il existe différentes valeurs de pression pleurale selon l'endroit du poumon et le volume pulmonaire. En inspiration, il y a un haut volume pulmonaire. En expiration, il y a un bas volume pulmonaire.

La pression pleurale est négative car inférieure à la pression atmosphérique et encore plus négative à grand volume. La pression pleurale est plus négative en haut qu'en bas du poumon : il existe donc un gradient de pression pleurale. A petit volume, la pression pleurale a tendance à se rapprocher de zéro (valeur de la pression atmosphérique). Parfois, à petit volume, la pression pleurale peut devenir positive dans la région basse du poumon.

Le gradient de pression pleurale est dû à la gravité.

- Le poids du poumon entraîne une dépression importante en haut du poumon, donnant ainsi des valeurs plus négatives.
- Le poids de l'abdomen accentue ce gradient par la traction qu'il exerce sur la plèvre.

Le gradient de pression pleurale influence les structures sous-jacentes à la plèvre, les alvéoles.

- Dans les parties hautes du poumon, à haut volume pulmonaire, en inspiration, la pression pleurale est très négative : les alvéoles sont distendues (importantes).
- Dans les parties basses du poumon, à bas volume pulmonaire, en expiration, la pression pleurale est parfois positive : les alvéoles sont presque collabées (réduites).

2.3. La mécanique ventilatoire

Le système respiratoire amène le mélange gazeux depuis l'air ambiant jusqu'à la zone des échanges respiratoires. Le système respiratoire refoule l'air vicié (chargé en CO₂) vers l'extérieur. Il existe des forces motrices et des forces de résistances.

La mécanique ventilatoire est l'ensemble des mécanismes permettant ou s'opposant au renouvellement de l'air.

2.3.1. Données métrologiques

Elles permettent de mesurer les mécanismes respiratoires et sont constituées de trois paramètres :

- les pressions,
- les volumes,
- les débits.

2.3.1.1. Les pressions

Il en existe différents types :

- la pression pleurale,
- la pression alvéolaire,
- la pression buccale (à l'entrée de la bouche),
- la pression atmosphérique ou barométrique,
- la pression intrabronchique (à l'intérieur des bronches).

2.3.1.2. Débits et volumes

Un débit instantané est proportionnel à la différence de pression de part et d'autre d'un conduit à condition qu'il y ait flux laminaire (flux se dirigeant tout droit). Les débits instantanés se mesurent grâce à un appareil appelé le pneumotachographe.

Pour un débit moyen, on ramène le volume à une unité de temps. On mesure les débits moyens grâce à un appareil appelé le

spirographe.

2.3.2. Le cycle respiratoire

C'est le phénomène élémentaire de la ventilation. Un cycle ventilatoire comprend une inspiration et une expiration. L'inspiration et l'expiration suivent deux notions fondamentales.

- A température constante, une augmentation de volume entraîne une diminution de pression et une diminution de volume entraîne une augmentation de pression (loi de Boyle-Mariotte).
- Les gaz s'écoulent toujours des zones de haute pression vers les zones de basse pression.

2.3.2.1. Inspiration

Les muscles inspiratoires se contractent en inspiration. La cage thoracique s'élève et le diaphragme descend. Le volume thoracique augmente. Le volume alvéolaire augmente et la pression alvéolaire diminue. La pression alvéolaire est inférieure à la pression barométrique. L'air rentre dans les alvéoles jusqu'à ce que ces deux pressions soient égales.

2.3.2.2. Expiration

Les muscles inspiratoires se relâchent en expiration. La cage thoracique descend et le diaphragme s'élève. Le volume thoracique diminue. Le volume alvéolaire diminue et la pression alvéolaire augmente. La pression alvéolaire est supérieure à la pression barométrique. L'air sort des alvéoles jusqu'à ce que ces deux pressions soient égales.

2.3.2.3. Les muscles respiratoires

Ce sont des muscles adaptés, plus performants que les autres. Ils ont

- une plus grande capacité oxydante (ils ont un meilleur fonctionnement aérobie),
- une plus grande densité en capillaires sanguins,
- un grand débit sanguin.

Les muscles respiratoires sont très endurants. Ils ne sont pas fatigables.

2.3.2.3.1. Le diaphragme

C'est un muscle inspiratoire. Il est fin, en forme de coupole. Il sépare la cage thoracique de la cavité abdominale. Il est innervé par des nerfs phréniques. Sa vascularisation est importante : en exercice, dans le diaphragme, le débit sanguin peut être multiplié par dix. Il consomme peu de dioxygène au repos mais il en consomme beaucoup en exercice (30 pour cent). Il présente différents types de fibres :

- 55 pour cent de fibres de type I (lentes, endurantes),
- 20 pour cent de fibres de type IIa (rapides mais résistantes à la fatigue),
- 25 pour cent de fibres de type IIb (rapides mais fatigables).

Dans le diaphragme, 75 pour cent de fibres résistent à la fatigue. Il s'agit donc d'un muscle très endurant.

2.3.2.3.2. Les muscles intercostaux

Internes et externes, ils sont constitués de fibres de type I.

- Les muscles intercostaux externes sont inspiratoires.
- Les muscles intercostaux internes sont expiratoires.

2.3.2.3.3. Les scalènes

Situés au niveau du cou, ils sont issus des cinq dernières vertèbres cervicales. Ils s'insèrent au niveau des deux premières paires de côtes. Ils sont inspiratoires.

2.3.2.3.4. Les muscles inspiratoires accessoires

Ils aident à l'inspiration. Ils interviennent grandement en inspiration forcée, pendant laquelle travaillent les muscles sterno-cléido-mastoïdien, trapèze, petit pectoral et grand pectoral.

2.3.2.3.5. Les muscles abdominaux

En expiration normale, leur rôle est négligeable. En expiration forcée, leur rôle est important. Interviennent les muscles grand droit et oblique externe. Lorsque ces muscles se contractent, la pression abdominale augmente, ce qui fait remonter le diaphragme. L'air est ainsi expulsé. Il y a expiration.

2.3.3. Propriétés statiques de l'appareil respiratoire

En conditions statiques peuvent être étudiés les propriétés élastiques et les volumes pulmonaires.

2.3.3.1. Les volumes pulmonaires et les capacités

Dans le poumon, il y a deux types de volumes :

- les volumes pulmonaires mobilisables,
- les volumes pulmonaires non mobilisables.

Les volumes pulmonaires mobilisables ou non varient selon l'âge, le sexe et la taille. Il existe des tables de référence avec des valeurs théoriques permettant de savoir si un individu est dans la norme.

Il existe différents espaces morts.

- Une partie de l'air inspiré remplit les conduits de la zone de convection (zone où il n'y a pas d'échanges). Cette zone correspond à un volume appelé l'espace mort anatomique, équivalent à 0,15 litres. Donc, si $V_t=0,5$ L, alors seulement 0,35 litres sont consacrés aux échanges gazeux.
- Si certaines alvéoles cessent de participer aux échanges gazeux, on ajoute un espace mort alvéolaire (physiologique), équivalent à 0,005 litres.
- L'espace mort total est la somme de l'espace mort anatomique et de l'espace mort alvéolaire.

2.3.3.1.1. Les volumes pulmonaires mobilisables

Le volume courant (V_t , t pour tidal) est le volume d'air mobilisé à chaque inspiration lors d'un cycle normal (en situation calme). Ce volume courant est compris entre 0,6 et 0,8 litres.

Le volume de réserve inspiratoire (V_{ri}) est le volume d'air mobilisé au cours d'une inspiration forcée.

Le volume de réserve expiratoire (V_{re}) est le volume d'air mobilisé au cours d'une expiration forcée.

$$V_t + V_{ri} + V_{re} = C_v$$

La capacité vitale (C_v) est la somme des volumes pulmonaires mobilisables. Elle est équivalente à 4,8 litres. Les volumes mobilisables sont mesurables par spirométrie ou pléthysmographie.

2.3.3.1.2. Les volumes pulmonaires non mobilisables

Le volume résiduel (V_r) est le volume d'air restant dans les poumons à la fin d'une expiration forcée.

$$V_r + C_v = C_{pt}$$

La capacité pulmonaire totale (C_{pt}) est la somme des volumes pulmonaires mobilisables et non mobilisables. Elle est équivalente à 6 litres.

$$V_r + V_{re} = C_{rf}$$

La capacité résiduelle fonctionnelle (C_{rf}) est la somme du volume résiduel et du volume de réserve expiratoire.

2.3.3.2. Les propriétés élastiques

A l'intérieur du système respiratoire, la pression totale est égale au volume du système respiratoire multiplié par l'élastance (compliance) du système respiratoire.

$$P = V \cdot E$$

L'élastance constitue la propriété élastique du système respiratoire et dépend de différents facteurs :

- la constitution du poumon (fibres collagènes, élastine),
- les facteurs physico-chimiques, comprenant les forces de tension superficielle, situées au niveau de l'interface air-liquide.

En assimilant les alvéoles à des sphères, la pression à l'intérieur des alvéoles est égale à deux fois la tension superficielle divisées par le rayon.

$$P=2T/r$$

Si la pression dans l'alvéole est trop importante, l'alvéole a tendance à se vider. Ainsi, plus l'alvéole est petite, plus elle devrait se vider dans les grandes alvéoles. Il devrait donc y avoir une véritable instabilité. Mais cette instabilité n'apparaît pas car il existe le surfactant (substance tensio-active dont le renouvellement est rapide qui est synthétisée par des pneumocytes II). Le surfactant s'adapte au rayon de l'alvéole pour diminuer la force de tension superficielle. Il y a ainsi une stabilité alvéolaire. Sur une grande alvéole, il y a peu de surfactant. Sur une petite alvéole, il y a beaucoup de surfactant.

L'élastance peut être diminuée par différents facteurs :

- facteurs diminuant l'élasticité naturelle du poumon (la maladie de la fibrose par exemple),
- facteurs obstruant les bronches ou les bronchioles (maladies entraînant des sécrétions abondantes de mucus par exemple),
- facteurs limitant la synthèse de surfactant,
- facteurs altérant la flexibilité de la cage thoracique (déformation - syphose - de la colonne vertébrale par exemple).

Plus l'élastance est faible, plus il faut de l'énergie pour respirer.

2.3.4. Propriétés dynamiques de l'appareil respiratoire

En condition dynamique, on doit lutter contre les résistances à l'écoulement de l'air.

2.3.4.1. Les résistances pulmonaires

Un gaz peut s'écouler de deux façons dans un conduit :

- soit de façon laminaire (la ligne de flux est parallèle au conduit),
- soit de façon turbulente (le flux n'est pas orienté mais circule aléatoirement).

Selon le type d'écoulement, les résistances sont différentes.

- Dans le cas de l'écoulement laminaire, les résistances sont faibles.
- Dans le cas de l'écoulement turbulent, les résistances sont élevées.

Dans les voies aériennes, il existe un mélange des deux écoulements.

- Dans les grosses bronches, l'écoulement est turbulent, entraînant des résistances importantes.
- Dans les petites bronches, l'écoulement est laminaire, entraînant des résistances faibles.

Il y a une répartition topographique des résistances.

- Dans les voies aériennes supérieures (extrathoraciques), on trouve 50 pour cent des résistances totales.
- Dans la trachée et les grosses bronches, on trouve 40 pour cent des résistances totales.
- Dans les petites bronches, on trouve 10 pour cent des résistances totales.

Les facteurs modifiant les résistances des voies aériennes sont :

- le niveau de volume pulmonaire (à haut volume, il y a diminution des résistances ; à bas volume, il y a augmentation des résistances),
- la pesanteur (la pression pleurale est plus faible en haut qu'en bas du poumon ; en haut du poumon, les résistances sont donc diminuées),
- l'influence nerveuse (le système nerveux autonome est constitué de deux branches sympathique et parasympathique ; lorsque le système parasympathique est activé, les résistances sont élevées à cause de la bronchoconstriction ; lorsque le système sympathique est activé, les résistances sont faibles à cause de la bronchodilatation).

Il existe en plus des résistances tissulaires engendrées par la friction du tissu pulmonaire. Elles représentent 20 pour cent des résistances totales.

2.3.4.2. Débits maximaux expiratoires

Ils sont plus utilisés que la mesure des résistances. Ils sont en effet plus facilement mesurables et on s'intéresse à l'arbre bronchique en entier. Tous les débits maximaux expiratoires sont déterminés par une courbe d'expiration forcée.

2.3.4.2.1. Débits moyens (courbe volume/temps)

V.E.M.S. : volume expiratoire maximal pour une seconde

Le V.E.M.S. explore globalement l'arbre bronchique. Un sujet normal expire 80 pour cent de sa capacité vitale en une seconde.

D.E.M.25-75 : débit expiratoire maximal à 25 pour cent et à 75 pour cent de la capacité vitale

Le D.E.M.25-75 explore les bronches de moyen et de petit calibre. C'est un test plus sensible pour mettre en évidence une obstruction bronchique.

Le rapport de Tiffeneau est un index de la fonction pulmonaire. Il est égal au V.E.M.S. divisé par la capacité vitale. Il est très important pour mettre en évidence une obstruction bronchique.

2.3.4.2.2. Débits instantanés (courbe débit/temps)

Le débit instantané est exprimé en fonction de la capacité vitale. Lors d'une expiration, on mesure le débit maximal et les débits à 75, 50 et 25 pour cent de la capacité vitale.

2.4. Les échanges respiratoires

2.4.1. Notion de ventilation

2.4.1.1. Ventilation globale

V_t = ventilation globale

f = fréquence respiratoire = nombre de cycles respiratoires par minute

V_t = volume courant

$V_t = V_t \cdot f$ = volume d'air qui pénètre dans le poumon par minute en L/min

2.4.1.2. Ventilation alvéolaire

V_a = ventilation alvéolaire

f = fréquence respiratoire = nombre de cycles respiratoires par minute

V_t = volume courant

V_d = espace mort

$V_a = (V_t - V_d) \cdot f$ = volume d'air qui pénètre dans l'alvéole par minute en L/min

La distribution de la ventilation alvéolaire est régionale : dans certaines zones, l'air a plus de mal à arriver dans les alvéoles que dans d'autres zones. La ventilation alvéolaire est élevée à la base du poumon et faible au sommet du poumon.

En faisant inhaler du produit radioactif à des individus, on compte les molécules radioactives dans les différentes zones du poumon. On s'aperçoit que la répartition du produit radioactif est inégale. Les parties inférieures du poumon sont mieux ventilées que les parties supérieures du poumon à cause du gradient de pression pleurale.

- En haut du poumon, la pression pleurale est faible (les alvéoles sont distendues).
- En bas du poumon, la pression pleurale est élevée (les alvéoles peuvent s'étendre).

2.4.2. Notion de circulation pulmonaire (perfusion)

2.4.2.1. Pressions

2.4.2.1.1. Pression motrice

La pression motrice est égale à la différence entre la pression artérielle pulmonaire (entrée du système) et la pression de l'oreillette gauche du cœur (sortie du système).

2.4.2.1.2.Pression capillaire

La pression capillaire est une pression intermédiaire entre la pression d'entrée (artérielle pulmonaire) et la pression de sortie (de l'oreillette gauche).

2.4.2.2.Distribution de la perfusion (Q)

La perfusion est inégale, élevée à la base du poumon et diminuée au sommet.

2.4.3.Distribution du rapport V_a/Q

V_a et Q ont une distribution inhomogène.

Le rapport V_a/Q a donc une distribution inhomogène.

$V_a/Q > 1$ en haut du poumon

$V_a/Q < 1$ en bas du poumon

. .

En haut du poumon, $V_a > Q$. La ventilation alvéolaire est meilleure que la perfusion. La pression alvéolaire en O_2 est donc augmentée et la pression alvéolaire en CO_2 est diminuée.

. .

En bas du poumon, $V_a < Q$. La ventilation alvéolaire est moins bonne que la perfusion. La pression alvéolaire en O_2 est donc diminuée et la pression alvéolaire en CO_2 est augmentée.

L'inhomogénéité de ce rapport entraîne des modifications des pressions alvéolaires en O_2 et donc des pressions artérielles en O_2 .

Il existe des inégalités extrêmes de ce rapport.

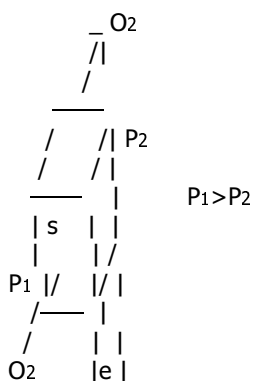
- $V_a \rightarrow 0$ et $Q > 1$, donc $V_a/Q \rightarrow 0$. Il s'agit d'un effet shunt physiologique. La quantité de O_2 diminue dans le sang, ce qui est appelé une hypoxémie.
- $V_a > 1$ et $Q \rightarrow 0$, donc $V_a/Q \rightarrow +\infty$. Il s'agit d'un espace mort alvéolaire.

2.4.4.Diffusion

De chaque côté de la membrane alvéolo-capillaire, il existe un gradient de pression partielle en O_2 . Pour équilibrer ces différences de pression de chaque côté de la membrane, il y a diffusion de gaz. C'est un phénomène passif qui fait passer le O_2 de la zone de haute pression jusqu'à la zone de basse pression.

2.4.4.1.Processus de diffusion

La diffusion est un phénomène physique.



e =épaisseur

s =surface d'échange

d =constante

$V = d \cdot (P_1 - P_2) \cdot s / e$ =débit d'un gaz transféré

Le cube représente la membrane alvéolo-capillaire en physiologie.

$$V(O_2) = d \cdot [P_{\text{alvéolaire}}(O_2) - P_{\text{artérielle}}(O_2)] \cdot s/e$$

2.4.4.2. Diffusion au niveau pulmonaire

Elle comprend deux étapes :

- la diffusion transmembranaire,
- la diffusion sanguine.

2.4.4.2.1. Diffusion transmembranaire

Il y a passage par toutes les couches de la membrane alvéolo-capillaire :

- le film tension-actif,
- l'épithélium alvéolaire,
- l'interstitium,
- l'endothélium capillaire.

Un équilibre rapide (0,25 s environ) s'établit entre le gaz alvéolaire et le sang capillaire (entre la pression artérielle en O₂ et la pression alvéolaire en O₂).

2.4.4.2.2. Diffusion sanguine

Lors de cette étape, le O₂ est transféré de la membrane jusqu'aux globules rouges et il y a combinaison avec l'hémoglobine.

2.4.4.3. Capacité de diffusion pulmonaire

$$V(O_2) = d \cdot [P_{\text{alvéolaire}}(O_2) - P_{\text{artérielle}}(O_2)] \cdot s/e$$

Or d, s et e ne sont pas mesurables. On mesure la capacité de diffusion pour le CO (monoxyde de carbone qu'on fait inhaler).

$$DL(CO) = TL(CO)$$

DL = diffusion limitation

TL = transfert limitation

La DL(CO) représente la capacité de transfert de la membrane, la quantité de CO qui traverse la barrière air/sang par rapport au temps (en mL.min⁻¹.mmHg⁻¹).

Cette capacité dépend de différents facteurs :

- facteur physique (conductance de la membrane),
- facteur chimique (vitesse de combinaison du O₂ et de l'hémoglobine),
- facteur temporel (le temps de transit et le temps d'équilibre).

Le temps de transit est le temps pendant lequel le sang qui traverse le capillaire est en contact avec l'alvéole. Au repos, il est de 0,78 s. Lors d'exercices physiques à haute intensité, le cœur fonctionne vite, le trajet du sang est accéléré et le temps de transit diminue.

Le temps d'équilibre est le temps nécessaire pour qu'il y ait équilibre entre les pressions de l'alvéole et les pressions du sang. Il est de 0,25 s.

La DL(CO) peut présenter des variations.

- Elle peut augmenter lorsque la surface d'échange (s) augmente (en condition d'exercice) ou lorsque le nombre de globules rouges augmente.

- Elle peut diminuer lorsque la surface d'échange (s) diminue, lorsque le nombre de globules rouges diminue ou lorsque l'épaisseur (e) augmente (par exemple, lors de la formation d'un œdème - accumulation d'eau au niveau des tissus).

2.4.5.Fonction respiratoire du sang

Le dioxygène est capté par les poumons. Il se fixe sur l'hémoglobine, au niveau des globules rouges. Il est libéré dans les tissus.

L'inverse se passe pour le dioxyde de carbone, qui est rejeté des tissus et expulsé à l'extérieur du corps.

2.4.5.1.L'hémoglobine

Elle est formée par 4 hèmes et 1 chaîne de globine.

- L'hème contient un atome de fer, grâce auquel il fixe une molécule de dioxygène.
- La globine est un ensemble de chaînes de différents peptides.

La fixation du dioxygène engendre un réarrangement spatial de l'hémoglobine. La quatrième molécule de dioxygène se fixe plus facilement que la première sur l'hème.

Il existe différents types d'hémoglobine.

- L'oxyhémoglobine, ensemble de 4 molécules de O₂ et d'1 molécule d'hémoglobine, donne la couleur rouge vive au sang des artères.
- L'hémoglobine réduite est la forme non dioxygénée de l'hémoglobine (avant que le dioxygène ne se soit fixé).
- Une petite partie de l'hémoglobine réduite peut fixer du dioxyde de carbone. Il s'agit de carboxyhémoglobine.
- Le monoxyde de carbone a une très forte attirance pour l'hémoglobine. La carboxyhémoglobine est mortelle.

2.4.5.2.Transport du O₂ par le sang

Ce transport est double.

- Une forme dissoute du O₂ est présente dans le sang.
- Une forme combinée du O₂ est présente dans le sang.

2.4.5.2.1.Forme dissoute

Le O₂ est libre. Il n'est pas lié à l'hémoglobine. C'est une forme de passage obligée car les cellules utilisent uniquement le O₂ libre. Cette forme dissoute du O₂ représente 0,3 mL pour 100 mL de sang. Le rôle quantitatif de cette forme est donc faible. Par contre, son rôle qualitatif est important puisque les cellules n'utilisent que cette forme.

2.4.5.2.2.Forme combinée

Elle est formée par le O₂ et l'hémoglobine. Il s'agit de l'oxyhémoglobine. Elle représente 20,8 mL de O₂ pour 100 mL de sang. Le rôle quantitatif de cette forme est donc important. Par contre, son rôle qualitatif est faible puisque les cellules ne peuvent utiliser cette forme.

2.4.5.2.3.Saturation de l'hémoglobine en O₂

C'est le mode d'expression du O₂ combiné.

hémoglobine dioxygénée

—————=cette saturation=99 %

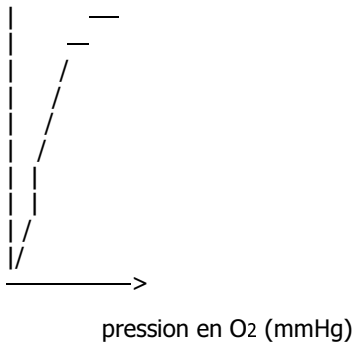
hémoglobine dioxygénable

2.4.5.2.4.Relation entre la saturation de l'hémoglobine en O₂ et la pression en O₂

Elle est représentée par la courbe de Barcroft, qui est une sigmoïde (en forme de S).

saturation de l'hémoglobine en O₂ (%)

^
|



Si la saturation de l'hémoglobine en O₂ est augmentée, il y a plus de O₂ fixé sur l'hémoglobine.

Si la saturation de l'hémoglobine en O₂ est diminuée, il y a moins de O₂ fixé sur l'hémoglobine. Le O₂ est donc sous forme dissoute. Il est utilisé par les cellules.

Dans la zone de l'asymptote horizontale (la zone plateau du haut de la courbe), une diminution de pression en O₂ n'a pas d'effet notable sur la saturation de l'hémoglobine en O₂.

Dans la zone de l'asymptote oblique (la zone pente du milieu de la courbe), une diminution de pression en O₂ entraîne une diminution importante de saturation de l'hémoglobine en O₂.

Des facteurs peuvent modifier la courbe. Il existe donc des facteurs pouvant modifier l'affinité du dioxygène pour l'hémoglobine.

Lorsque la courbe est déplacée vers la droite, les facteurs possibles sont

- une augmentation de la température,
- une diminution du pH,
- une augmentation de la pression en CO₂,
- une augmentation du 2,3-DPG (constituant interne du globule rouge).

Lorsque la courbe est déplacée vers la droite, pour une même pression en O₂, la saturation est diminuée.

Lorsque la courbe est déplacée vers la gauche, les facteurs possibles sont

- une diminution de la température,
- une augmentation du pH,
- une diminution de la pression en CO₂,
- une diminution du 2,3-DPG (constituant interne du globule rouge).

Lorsque la courbe est déplacée vers la gauche, pour une même pression en O₂, la saturation est augmentée.

2.4.5.3. Transport du CO₂ par le sang

Ce transport est double.

- Une forme dissoute du CO₂ est présente dans le sang.
- Une forme combinée du CO₂ est présente dans le sang.

2.4.5.3.1. Forme dissoute

Elle représente 3 mL de CO₂ pour 100 mL de sang. Son rôle quantitatif est donc peu important. Son rôle qualitatif est important car c'est la seule forme qui peut passer à travers les membranes.

2.4.5.3.2. Forme combinée

Elle existe en deux endroits.

- Dans le plasma, le CO₂ peut se combiner avec une protéine. C'est un mode secondaire (une forme de combinaison faible). Dans le plasma, le CO₂ peut aussi se combiner avec H₂O pour former H₂CO₃. C'est une forme de combinaison faible puisqu'elle nécessite la présence de l'enzyme anhydrase carbonique, qui existe en très faible quantité dans le plasma.
- Dans le globule rouge, la présence de CO₂ provoque différents événements. La première possibilité est la diminution de

L'affinité de l'hémoglobine pour le dioxygène. Ainsi, l'hémoglobine relâche le dioxygène qu'elle transporte.



oxyhémoglobine \rightarrow hémoglobine + O₂

hémoglobine + CO₂ \rightarrow carbhémoglobine

La deuxième voie est la voie majoritaire. C'est la voie des bicarbonates. Dans le globule rouge, l'anhydrase carbonique (A.C.) permet au CO₂ de se combiner à l'H₂O pour former H₂CO₃, qui se dissocie en ions par la suite.



A.C.

Les ions H⁺ augmentent l'acidité dans le globule rouge.



oxyhémoglobine \rightarrow hémoglobine + O₂

L'hémoglobine éponge les ions H⁺. H⁺ est fixé : il reste les ions HCO₃⁻, qui sont en excès. Il y a libération de Na⁺ et de K⁺. Cette libération devient vite insuffisante. Les ions HCO₃⁻ s'accumulent, passent dans le plasma (en dehors du globule rouge). Pour compenser la fuite de HCO₃⁻ vers le plasma, des ions Cl⁻ entrent dans le globule. Cet échange de charges négatives est appelé le phénomène de Hamburger.

2.5. Dysfonctionnements du système respiratoire

Il existe deux types de dysfonctionnements.

- Dans les maladies obstructives, la capacité pulmonaire totale est intacte mais les voies respiratoires sont obstruées. C'est le cas de l'asthme, de la B.P.C.O..
- Dans les maladies restrictives, la capacité pulmonaire totale est amputée. C'est le cas de la tuberculose, du cancer des poumons.

2.5.1. L'asthme

C'est une maladie chronique des bronches caractérisée par une hyperréactivité bronchique. Les muscles bronchiques se contractent de façon exagérée. Cette contraction musculaire est associée à une inflammation des bronches (mucus). L'obstruction empêche l'air de circuler facilement et rend plus difficile l'expulsion de l'air en expiration. Une crise d'asthme entraîne une diminution

- du V.E.M.S.,
- du rapport de Tiffeneau.

2.5.2. La broncho pneumopathie chronique obstructive (B.P.C.O)

C'est un ensemble de maladies respiratoires chroniques avec diminution du calibre des bronches (obstruction) et augmentation des résistances dans les voies aériennes. Elle entraîne une diminution, même au repos,

- du V.E.M.S. en permanence,
- du rapport de Tiffeneau.

Au repos, la fonction respiratoire est quasiment hors service. A l'exercice, c'est pire. Les malades s'essouffent dès qu'ils font un effort. Ils font donc de moins en moins d'effort : ils sont déconditionnés, sédentaires. La maladie s'aggrave et aboutit à la mort.

Grâce à des activités physiques adaptées, on arrive à reconditionner les malades.

3. Le système cardiovasculaire

Toutes les cellules de l'organisme doivent être irriguées en permanence par le sang, qui permet

- le transport du dioxygène jusqu'aux cellules,
- la sortie du dioxyde de carbone,
- l'apport de nutriments.

Pour accomplir ces fonctions, l'appareil circulatoire comprend

- une pompe (le cœur),
- des tuyaux (les vaisseaux sanguins),
- un liquide (le sang).

Ce système cardiovasculaire est soumis à des régulations du système nerveux.

3.1. Le sang

3.1.1. Généralités

Le sang est un tissu liquide (constitué de cellules). C'est un tissu conjonctif spécialisé contenant des cellules vivantes appelées éléments figurés. Ces derniers baignent dans une matrice appelée le plasma.

Si on centrifuge un tube de sang, on obtient plusieurs couches.

- La première couche (transparente, jaunâtre), dans le haut du tube, est le plasma.
- La deuxième couche (très fine), au milieu du tube, est la couche leucocytaire. Dans cette couche se trouvent quelques éléments figurés : le globules blancs et les plaquettes.
- La troisième couche (lourde), dans le fond du tube (le culot), rassemble des éléments figurés : les globules rouges.

L'hématocrite est la valeur des globules rouges par rapport à la valeur totale (environ 45 pour cent).

Le sang riche en O₂ est rouge vif.

Le sang pauvre en O₂ est rouge sombre.

Le pH sanguin est compris entre 7,35 et 7,45.

La température sanguine est de 38°C.

Le volume sanguin est compris entre 5 et 6 L pour un homme.

Le volume sanguin est compris entre 4 et 5 L pour une femme.

Les différentes fonctions sanguines sont les suivantes :

- le transport (de O₂, de nutriments, de déchets, d'hormones),
- la régulation (de la température corporelle, du volume liquidien dans l'organisme),
- la protection (transport de substances immunitaires - les anticorps et les globules blancs).

3.1.2. Le plasma

C'est un liquide visqueux jaunâtre.

Il contient

- 90 pour cent d'H₂O,
- 8 pour cent de protéines plasmatiques (l'albumine sert de navette pour certaines molécules, assure le maintien du pH et conserve la pression osmotique - pression permettant de maintenir le plasma dans les vaisseaux sanguins).

3.1.3. Les éléments figurés

Il existe trois types de cellules sanguines :

- les érythrocytes (globules rouges),
- les leucocytes (globules blancs),
- les plaquettes.

Les caractéristiques de ces cellules sont les suivantes.

- Les globules rouges et les plaquettes ne sont pas de vraies cellules car elles ne comprennent pas de noyau.
- La survie des éléments figurés est très limitée (quelques jours).
- Il n'existe pas de division cellulaire (mitose) en général. Le renouvellement est assuré par la moelle osseuse.

3.1.3.1. Les érythrocytes (globules rouges)

3.1.3.1.1. Définition

Le globule rouge, ou hématie, est une petite cellule de 7,5 µm de diamètre ayant la forme d'un disque biconcave. Il ne comprend pas de noyau. Il comprend de rares organites. Il présente deux protéines :

- l'hémoglobine,
- la spectrine (protéine très souple permettant au globule rouge de se déformer).

Le globule rouge ne présente pas de mitochondrie. Il n'utilise donc pas le dioxygène qu'il transporte.

Le sang des femmes contient entre $4,3 \cdot 10^{12}$ et $5,2 \cdot 10^{12}$ globules rouges par litre.

Le sang des hommes contient entre $4,5 \cdot 10^{12}$ et $5,8 \cdot 10^{12}$ globules rouges par litre.

Si le nombre de globules rouges augmente, la viscosité du sang augmente et la circulation sanguine diminue.

3.1.3.1.2. Fonction

La fonction principale est le transport de O₂ et de CO₂ grâce à l'hémoglobine, protéine ayant une très forte affinité pour le O₂. L'hémoglobine est une protéine qui se lie facilement et de façon réversible au dioxygène.

La concentration normale d'hémoglobine est comprise entre 120 et 160 g/L pour les femmes.

La concentration normale d'hémoglobine est comprise entre 130 et 180 g/L pour les hommes.

L'hémoglobine est constituée de quatre hèmes et d'une chaîne de globine. La chaîne de globine est constituée de deux unités α et de deux unités β. L'hème contient un atome de fer qui se combine avec le O₂. Une molécule d'hémoglobine peut fixer quatre molécules de O₂ pour former l'oxyhémoglobine.

3.1.3.1.3. Synthèse et destruction des globules rouges

3.1.3.1.3.1. Synthèse

L'hématopoïèse est la synthèse des cellules sanguines, quelles que soient les cellules. Elle s'effectue dans la moelle osseuse rouge, présente au niveau des os plats et au niveau des épiphyses proximales des os longs.

Même si les fonctions de ces trois types de cellules sont très différentes, les éléments figurés ont la même origine (la même cellule souche - l'hémocytoblaste). Cet hémocytoblaste se divise pour donner trois types de précurseurs.

La synthèse spécifique de globules rouges est appelée l'érythropoïèse. Elle comprend cinq phases.

- 1. Dans la différenciation de la cellule souche, l'hémocytoblaste se transforme en proérythroblaste.
- 2. Le proérythroblaste se transforme en érythroblaste basophile. Des ribosomes synthétisent des chaînes α et β de globine.
- 3. L'érythroblaste basophile se transforme en érythroblaste polychromatophile. Il y a synthèse et accumulation d'hémoglobine.
- 4. L'érythroblaste polychromatophile se transforme en érythroblaste acidophile. La quantité d'hémoglobine augmente : il y a la même concentration en hémoglobine que dans un globule rouge terminé.
- 5. Il y a expulsion du noyau : l'érythroblaste acidophile se transforme en réticulocyte, jeune globule rouge. En fixant du O₂, le jeune globule rouge devient un véritable globule rouge.

Cette transformation dure de 3 à 5 jours.

3.1.3.1.3.2.Destruction

Les globules rouges ne comprennent pas de noyau : leur durée de vie est limitée. Ils ne peuvent ni se diviser, ni croître.

Les globules rouges vieux présentent une membrane rigide. Ils deviennent fragiles. L'hémoglobine dégénère et ne devient plus fonctionnelle.

La durée de vie d'un globule rouge est comprise entre 100 et 120 jours.

Les globules rouges dégénérés sont dirigés vers la rate (cimetière des globules rouges). Un recyclage a lieu. L'hème est séparé de la globine. Le fer est récupéré et stocké. L'hème, sans son fer, est dégradé en bilirubine. La bilirubine est envoyée dans le foie et évacuée par les fèces. La globine est dégradée en acides aminés.

3.1.3.1.3.3.Régulation de l'érythropoïèse

Il y a un équilibre constant entre la synthèse et la dégradation des globules rouges. Cet équilibre est rendu possible grâce à la régulation hormonale, à un apport suffisant de fer et de vitamines B. L'hormone qui régule l'érythropoïèse est l'érythropoïétine (E.P.O.), qui est synthétisée par les reins quand les cellules rénales sont en manque de O₂. Les reins fabriquent de l'E.P.O. en altitude, dans le cas d'une hémorragie ou dans le cas d'un exercice intense. S'il y a trop de globules rouges, un signal fait diminuer la synthèse d'E.P.O. (rétrocontrôle).

L'E.P.O. stimule la prolifération des proérythroblastes.

La testostérone (hormone mâle) favorise la synthèse d'E.P.O. (les hommes ont plus de globules rouges et d'hémoglobine que les femmes).

65 pour cent des réserves en fer se trouvent dans l'hémoglobine sous forme de complexe que l'on appelle la ferritine. Dans le sang, le fer n'est pas seul. Il est lié à une protéine. Ce complexe s'appelle la transferrine.

La vitamine B₁₂ est indispensable à la fabrication d'acide désoxyribonucléique (A.D.N.). Sans A.D.N., il n'y a pas de cellules souches.

3.1.3.2.Les leucocytes (globules blancs)

3.1.3.2.1.Définition

Ce sont des éléments figurés du sang qui contiennent un noyau et les organites de base de la cellule.

3.1.3.2.2.Fonction

Ils assurent la protection contre les virus et les bactéries. Pour cette fonction, il existe des particularités :

- la diapédèse (les globules blancs peuvent sortir des vaisseaux sanguins et aller vers différents tissus),
- les mouvements amiboïdes (permettant le déplacement),
- le chimiotaxisme (attirance des globules blancs par des substances chimiques sur le lieu de l'inflammation).

3.1.3.2.3.Les différents types de globules blancs

Il existe deux types de leucocytes :

- les granulocytes,
- les agranulocytes.

3.1.3.2.3.1.Granulocytes neutrophiles, éosinophiles, basophiles

Trois sortes de granulocytes sont distinguées :

- les neutrophiles (attirance par les bactéries),
- les éosinophiles (attirance par les parasites),
- les basophiles (réactions inflammatoires).

3.1.3.2.3.2.Agranulocytes lymphocytes, monocytes

Deux sortes d'agranulocytes sont distinguées :

- les lymphocytes (cellules peu présentes dans le sang, présentes dans les tissus, leur rôle est la défense immunitaire),
- les monocytes (exercent la phagocytose - manger les intrus).

3.1.3.2.4.Synthèse et devenir des globules blancs

La synthèse des globules blancs s'appelle la leucopoïèse. Elle est stimulée par les cytokines. Assez tôt, il existe des différences entre les cellules souches myéloïdes (granulo et mono) et les cellules souches lymphoïdes (lympho). Les précurseurs sont

- les myéloblastes,
- les lymphoblastes,
- les monoblastes.

Quant à leur devenir, les globules blancs vivent plus longtemps que les globules rouges.

- Les monocytes vivent quelques mois.
- Les lymphocytes vivent quelques heures à quelques mois.

3.1.3.3.Les plaquettes

Ce ne sont pas de vraies cellules mais des fragments de cytoplasmes de grosses cellules (mégacaryocytes). Leur rôle essentiel est la réparation des vaisseaux sanguins lors de la coagulation. La synthèse des plaquettes est appelée la thrombopoïèse car les cellules qui s'en occupent sont les thrombopoïétines. Les plaquettes ont une vie brève.

3.1.4.Anomalies du sang

3.1.4.1.Au niveau des globules rouges

Un excès de globules rouges est appelé une polyglobulie. Elle peut être

- naturelle,
- artificielle (dopage).

Lorsqu'il y a trop de globules rouges, le sang devient visqueux. Le cœur travaille donc plus pour faire circuler le sang.

Une déficience en globules rouges est appelée une anémie.

3.1.4.2.Au niveau des globules blancs

Une déficience en globules blancs est appelée une leucopénie.

Un excès de globules blancs est appelé une leucémie. Cette dernière peut toucher la lignée myéloïde et la lignée lymphoïde. Une leucémie aiguë est curable chez les enfants. Une leucémie chronique est difficilement curable chez les personnes âgées.

La mononucléose est un nombre excessif de lymphocytes qui provoque une grande fatigue.

3.1.5.Une propriété spécifique : l'hémostase

S'il y a rupture des vaisseaux sanguins, il y a saignement. Des mécanismes sont mis en jeu pour arrêter le saignement : ils constituent l'hémostase. Cette dernière est constituée de différentes phases.

3.1.5.1.Spasmes vasculaires

Sur le lieu de la lésion, il y a une vasoconstriction qui est due à l'action de substances chimiques et à un phénomène réflexe. Il y a diminution de la perte de sang, ce qui amorce la réparation.

3.1.5.2.Formation du clou plaquettaire

Il y a adhésion des plaquettes entre elles sur le siège de la lésion. Cette adhésion forme un bouchon sur le trou. Ceci dépend de l'influence de substances chimiques (thromboxane A2 et prostacyclines). Un clou est formé in situ en un temps réduit et renforcé par des filaments de fibrine (colle).

3.1.5.3.Coagulation

La synthèse du clou plaquettaire déclenche la coagulation. La formation du caillot sanguin s'effectue en trois étapes.

- Un activateur de prothrombine est synthétisé.
- L'activateur de prothrombine transforme la prothrombine en thrombine.
- La thrombine transforme le fibrinogène en fibrine, qui retient les globules rouges. Il y a ainsi formation du caillot.

Cette coagulation est possible grâce à l'existence de facteurs de coagulation de I à XIII (protéines plasmatiques fabriquées par le foie et transportées dans le sang).

3.1.5.4. Rétraction du caillot

En 30 à 60 minutes, il y a rétraction des plaquettes. La structure de réparation est ainsi stable. Dans les plaquettes, des protéines contractiles entraînent une contraction de la fibrine. Le sérum est expulsé. Le caillot est rétracté. Les conditions de cicatrisation sont bonnes.

3.1.5.5. Fibrinolyse









L'élimination du caillot est importante sinon il y a bouchage. Elle fait intervenir la plasmine, qui dégrade la fibrine. Dans les deux jours après la lésion, le caillot a disparu.

3.1.6. Les groupes sanguins humains

Les membranes des cellules humaines portent des signes de reconnaissance, des glycoprotéines spécifiques qui permettent de différencier chaque individu. Ces glycoprotéines sont les antigènes. Lorsque les antigènes sont sur les globules rouges, ce sont des agglutinogènes. Dans certains cas, ces signes de reconnaissance peuvent provoquer une agglutination des globules rouges. Ceci permet de déterminer les groupes sanguins, importants car déterminent la compatibilité des transfusions sanguines. La transfusion sanguine permet de compenser des pertes de sang très importantes.

- Lorsque la perte est comprise de 15 à 30 pour cent, cela provoque de la fatigue.
- Lorsque la perte est supérieure à 30 pour cent, cela provoque la mort.

3.1.6.1. Groupes sanguins : système A, B, O et système rhésus

groupe	agglutinogène	agglutinine
A	 A	 anti-B
B	 B	 anti-A
AB	 AB	
O		 anti-A  anti-B

Le système A, B, O est basé

- sur la présence ou l'absence de certains agglutinogènes sur la membrane des globules rouges,
- sur la présence ou l'absence d'agglutinines dans le plasma (anticorps naturels et spécifiques à un antigène donné).

Le système rhésus est basé sur la présence d'un agglutinogène D positif ou négatif.

Le système A, B, O existe en permanence. L'agglutinogène rhésus arrive plus tard. La première transfusion est donc bonne mais les suivantes peuvent être fatales.

3.1.6.2. Détermination des groupes A, B, O

On place deux gouttes de sang diluées dans du sérum contenant des agglutinines anti-A et dans du sérum contenant des agglutinines anti-B.

anti-A	anti-B	résultat
coagulation	coagulation	AB
rien	coagulation	B
coagulation	rien	A
rien	rien	O

3.1.6.3. Réaction hémolytique

Si le sang transfusé est incompatible, les agglutinines du receveur se fixent aux agglutinines du donneur. Ainsi,

- il y a obstruction des petits vaisseaux sanguins,
- les globules rouges dégèrent et sont phagocytés,

- l'hémoglobine est libérée.

Le transport de dioxygène devient donc impossible. Les tissus meurent. L'hémoglobine libre dans le sang est toxique au niveau rénal, ce qui provoque une insuffisance rénale aiguë.

3.2. Les vaisseaux sanguins

Le sang est acheminé dans l'ensemble de l'organisme grâce aux vaisseaux sanguins (artères, veines, capillaires). Le sang s'y déplace grâce à la propulsion permise par les battements du cœur.

3.2.1. Caractéristiques générales des parois vasculaires

3.2.1.1. Réseau

cœur -> artères (aorte) -> ramification ->

lits capillaires de tissu -> sortie capillaire ->

veinules -> veines -> grosses veines -> cœur

3.2.1.2. Structure

Les artères et les veines sont formées de trois couches ou tuniques :

- la tunique interne ou intima, surface lisse qui diminue la friction du sang (si les vaisseaux sont supérieurs à 1 mm, l'endothélium repose sur une couche sous-endothéliale de tissu conjonctif lâche),
- la tunique moyenne ou media (elle contient des cellules musculaires lisses), dont le rôle est la vasoconstriction ou vasodilatation (régulation circulatoire sanguine),
- la tunique externe ou externa, qui assure la protection et le maintien.

Pour les capillaires, il n'existe qu'une seule couche, l'endothélium.

3.2.2. Artères

Ce sont des vaisseaux qui conduisent le sang depuis le cœur jusqu'aux tissus. Dans les artères, en général, le sang est riche en dioxygène. Selon la taille et la fonction, il y a différents types d'artères.

- Les artères élastiques sont de grosses artères proches du cœur (aorte). La propriété élastique de ces artères peut leur permettre de prendre un large diamètre et donc une diminution des résistances à l'écoulement sanguin. Ce sont des artères conductrices qui résistent aux différences de pression.
- Les artères musculaires sont des artères distributrices. Il y a une présence importante de cellules musculaires, qui ont un rôle actif important avec un niveau d'extension limitée.
- Les artérioles sont de petites artères dont le diamètre est compris entre 0,3 et 10 μm .

3.2.3. Capillaires

Ce sont les plus petits vaisseaux sanguins. Leurs parois sont fines (elles ne présentent qu'une seule tunique interne). Ils se situent au niveau des tissus. Il existe différents types de capillaires. Ils se regroupent en réseau pour former les lits capillaires, qui permettent la circulation d'une artériole à une veinule (la microcirculation).

Les lits capillaires sont constitués

- d'une dérivation vasculaire qui relie directement artérioles et veinules,
- de capillaires vrais où il existe des échanges entre le sang et le liquide interstitiel,
- de sphincters précapillaires qui régissent l'écoulement du sang dans les capillaires (si les sphincters sont dilatés, le sang va vers les capillaires vrais - échanges -, sinon, le sang circule dans le canal de passage - pas d'échanges).

Le sphincter se dilate selon les conditions locales ou selon le système nerveux.

Par exemple, pendant la digestion, les lits capillaires musculaires sont ouverts : les cellules reçoivent les nutriments. S'il y a activité musculaire, les lits se referment puis se réouvrent à cause du besoin.

3.2.4. Veines

Ce sont des vaisseaux qui apportent le sang des lits capillaires jusqu'au cœur. En général, dans les veines, le sang est pauvre en dioxygène. Il existe différents types de veines selon leur taille.

- Les veinules sont formées par l'union de capillaires. Les plus petites veinules se situent à la sortie des lits capillaires (veinules post-capillaires).
- Les veines sont constituées de trois tuniques mais leurs parois sont plus minces que celles des artères. Elles ont une grande lumière (trou où passe le sang). Les pressions sont faibles et les résistances à l'écoulement du sang sont faibles. Dans les veines, il y a des valvules anti-reflux de sang (valvules veineuses). Ces valvules correspondent à des replis de la tunique interne. Elles se situent dans les veines des membres où la gravité s'oppose à la montée du sang.

Faisons une remarque sur le système lymphatique. Au niveau des capillaires, il y a transsudation. Du plasma et des globules blancs peuvent traverser les parois des capillaires, ce qui aboutit à la formation du liquide interstitiel où baignent les cellules. Ce liquide est évacué sous le nom de lymph et revient à la circulation par le système des vaisseaux lymphatiques. Le système lymphatique a un rôle de drainage et d'épuration.

3.2.5. La physiologie de la circulation

3.2.5.1. Définitions (débit sanguin, pression sanguine, résistance)

Ce sont les différences de pression dans le système cardiovasculaire qui permettent de propulser le sang.

La résistance est une force qui s'oppose à l'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins. Ce sont souvent des forces de friction. La résistance varie selon la viscosité du sang (plus le sang est visqueux, plus les résistances sont importantes). Plus les vaisseaux sont longs, plus il y a de résistances. Plus le diamètre des vaisseaux sanguins est petit, plus il y a de résistances. Plus on s'éloigne du cœur, plus le système est sensible aux résistances.

Il existe une relation entre débit, pression et résistance :

$$\text{débit} = \frac{\Delta(\text{pression})}{\text{résistance}}$$

3.2.5.2. La pression sanguine

Tout liquide propulsé par une pompe dans un circuit fermé circule sous pression. Plus le liquide est près de la pompe, plus la pression est grande. La pression sanguine est élevée à la sortie du cœur et faible à l'entrée du cœur. Ces modifications de pression permettent au sang de circuler selon le gradient de pression. Le sang va des zones de haute pression vers les zones de basse pression.

3.2.5.2.1. La pression artérielle et sa régulation

3.2.5.2.1.1. Définition

C'est la pression du sang qui se situe dans les artères. Dans les artères, l'écoulement du sang est pulsatif. Ces pulsations correspondent aux contractions du cœur.

- Lorsque le sang est expulsé du cœur, il possède une énergie cinétique qui étire les parois des artères au maximum. Pour un individu normal, la pression artérielle systolique est environ égale à 120 mmHg.
- Après contraction, le cœur se relâche. Les parois des artères reprennent leur position mais il existe toujours une pression minimale appelée la pression artérielle diastolique. Pour un individu normal, cette pression est comprise entre 70 et 80 mmHg.
- La pression différentielle est égale à la pression artérielle systolique moins la pression artérielle diastolique.

Lorsque l'on touche une artère, on sent une palpitation, le pouls. Le pouls correspond à la pression exercée par le sang pendant la systole (la contraction du cœur). En fait, il existe des différences de pression à chaque fois que le cœur bat. Pour être juste, il faut utiliser une pression moyenne.

$$\text{pression moyenne} = \text{pression artérielle diastolique} + \frac{(\text{pression différentielle})}{3}$$

Le repos dure plus longtemps que la phase de contraction. C'est pourquoi la pression moyenne n'est pas égale à la moitié de la somme des pressions artérielles systolique et diastolique.

3.2.5.2.1.2. Variations de la pression artérielle

pression artérielle=(débit cardiaque).résistance

Le débit cardiaque est la quantité de sang envoyée à chaque contraction par rapport au temps. Au repos, le débit cardiaque est de 5 L/min.

Les résistances dépendent du diamètre des vaisseaux sanguins (vasoconstriction ou vasodilatation).

Quand la pression artérielle est affaiblie (pression artérielle systolique inférieure à 100 mmHg), on parle d'hypotension artérielle. En cas contraire, on parle d'hypertension artérielle (pression artérielle systolique supérieure à 140 mmHg et pression artérielle diastolique supérieure à 90 mmHg). Lorsque la pression artérielle diastolique est supérieure à 90 mmHg, il y a soit occlusion au niveau des artères, soit durcissement des artères.

3.2.5.2.1.3.Mécanismes de régulation à court terme

3.2.5.2.1.3.1.Mécanismes nerveux

Le système nerveux central permet de réguler la pression artérielle. Ces mécanismes nerveux agissent par des arcs réflexes. Dans ces arcs réflexes se trouvent des récepteurs, des fibres nerveuses et un centre nerveux (le centre vasomoteur, situé au niveau du cerveau, dans le système nerveux central).

Les réflexes sont déclenchés par des barorécepteurs, récepteurs sensibles à la pression. Ces récepteurs sont situés dans les artères carotides internes, dans l'aorte et dans les grosses artères du cou et du thorax.

Lorsque la pression artérielle augmente, les barorécepteurs sont stimulés et envoient des influx nerveux vers le centre nerveux, le centre vasomoteur. Le cerveau donne l'ordre aux artères de se dilater : il y a vasodilatation des artères, les résistances deviennent plus faibles, ce qui fait baisser la pression artérielle. Le cerveau ordonne de diminuer la fréquence cardiaque : le cœur se contracte moins, la pression artérielle diminue.

La régulation nerveuse est importante car elle est rapide. Elle intervient pour empêcher les modifications transitoires de pression artérielle (par exemple, lorsqu'on passe de la position couchée à debout).

Les chimiorécepteurs sont sensibles à des substances chimiques, notamment à la concentration de dioxygène, de CO₂ et au pH. Si la pression en dioxygène ou le pH est diminué, il y a vasoconstriction des vaisseaux sanguins et la pression artérielle augmente.

3.2.5.2.1.3.2.Mécanismes chimiques

L'action est très rapide. Il y a une action directe sur le muscle lisse des artères ou bien une action directe sur le centre vasomoteur. Cette régulation à court terme chimique se fait par des hormones qui circulent dans le sang. Par exemple, l'adrénaline et la noradrénaline provoquent une vasoconstriction.

3.2.5.2.1.4.Mécanismes de régulation à long terme

La régulation à long terme est effectuée grâce aux reins et agit sur le volume sanguin. Si le volume sanguin est augmenté, la pression artérielle est augmentée et inversement.

Il existe deux types de mécanisme.

- Le mécanisme direct tient compte de la vitesse à laquelle les liquides passent du sang vers les reins.
 - Si les liquides passent très vite, il y a beaucoup d'urine, qui est par la suite éliminée. Par conséquent, le volume sanguin est diminué tout comme la pression artérielle.
 - Si les liquides passent très lentement, il y a retenue de H₂O. Par conséquent, le volume sanguin est augmenté tout comme la pression artérielle.
- Le mécanisme indirect fait intervenir des hormones du système rénine-angiotensine. Lorsque la pression artérielle diminue, les cellules rénales libèrent de la rénine (une enzyme), qui donne la formation d'angiotensine II. L'angiotensine II entraîne une vasoconstriction, ce qui permet d'augmenter la pression artérielle et de compenser la chute à l'origine du mécanisme. Parallèlement, l'angiotensine II provoque la libération d'une hormone, l'aldostérone, qui a la capacité de retenir l'eau. Ceci entraîne une augmentation de la pression artérielle.

3.2.5.2.2.La pression capillaire

A l'entrée des capillaires, la pression est d'environ 40 mmHg. Lorsque les lits capillaires sont franchis, la pression chute à 20 mmHg. Il s'agit de pressions basses car

- les capillaires sont des vaisseaux fragiles (une seule tunique),
- les capillaires sont perméables (même avec une faible pression, il peut y avoir passage du sang vers le milieu interstitiel).

3.2.5.2.3.La pression veineuse (et le retour veineux)

Elle est inférieure à 20 mmHg. Elle fluctue très peu (elle reste relativement constante). Dans les veines, la pression est faible car l'énergie de la pression artérielle est dissipée par l'augmentation des résistances périphériques.

- Lors de la lésion d'une veine, l'écoulement est lent. La pression y est donc faible.
- Lors de la lésion d'une artère, l'écoulement est rapide (jet de sang). La pression y est donc élevée.

Dans les veines, la pression veineuse est faible. Pourtant, le sang veineux doit retourner vers le cœur. Il faut trouver un moyen pour que le sang soit propulsé. Ce retour du sang vers le cœur est appelé le retour veineux, qui est favorisé par différents facteurs.

- La lumière des veines est grande, ce qui permet de remonter une grande quantité de sang.
- Les valvules sont des invaginations de la tunique interne des veines empêchant le reflux de sang.
- Lorsque l'on respire, il y a des changements de pression dans la cavité abdominale qui fonctionnent comme une pompe. Ces changements sont appelés la pompe respiratoire, qui aspire le sang vers le cœur. Le diaphragme, en descendant, écrase des veines. Comme il y a des valvules dans les veines, le sang est chassé vers le cœur.
- La contraction et le relâchement des muscles squelettiques se trouvant autour des veines provoque un effet de massage. Ce phénomène est appelé la pompe musculaire. En massant les veines, le sang est chassé dans la seule direction où il peut aller, c'est-à-dire vers le cœur. On progresse ainsi de valvule en valvule.

3.3.Le cœur

3.3.1.Anatomie

3.3.1.1.Généralités

Le cœur est un muscle pesant entre 250 et 350 grammes, mesurant de 12 à 14 cm. Sa forme est conique. Il est logé dans le médiastin (la cavité centrale du thorax). Il a une position oblique dans le médiastin.

Le cœur étant conique est définie une base, plate, située face à l'épaule droite. Est définie une apex, une pointe vers le bas de la hanche gauche.

Le cœur se trouve dans une enveloppe, le péricarde.

- Le péricarde fibreux, couche externe, joue un rôle de protection et de maintien.
- Le péricarde séreux, couche interne, présente deux lames.
 - Une lame pariétale se trouve sur la face interne du péricarde fibreux.
 - Une lame viscérale, appelée l'épicarde, correspond à la paroi du cœur.

Entre les deux lames se trouve une cavité contenant du liquide lubrifiant.

3.3.1.2.Paroi du cœur

Le cœur est constitué de plusieurs parois. Il existe trois tuniques de l'extérieur vers l'intérieur :

- l'épicarde,
- le myocarde, constitué de cellules musculaires cardiaques capables de se contracter,
- l'endocarde, qui tapisse les cavités du cœur et constitue un revêtement lisse.

3.3.1.3.Cavités et vaisseaux

Le cœur est un organe creux présentant quatre cavités.

- Deux oreillettes se situent dans la partie supérieure.
- Deux ventricules se situent dans la partie inférieure.

Les ventricules sont plus grands que les oreillettes.

Ces cavités sont séparées par des cloisons appelées septums.

- L'oreillette droite est séparée de l'oreillette gauche par un septum interauriculaire.
- Le ventricule droit est séparé du ventricule gauche par un septum interventriculaire.

3.3.1.3.1.Oreillettes

Elles correspondent aux points d'arrivée du sang dans le cœur. Leur intérieur est lisse. Leurs parois contiennent un peu de faisceaux de fibres musculaires (faible pouvoir de contraction). Au niveau du septum interauriculaire se trouve la fosse ovale, qui correspond à un vestige du cœur fœtal. Les oreillettes sont de petite taille par rapport aux ventricules car leur rôle est assez négligeable dans la contraction. Leurs parois sont minces car elles ne jouent pas un grand rôle dans la contraction.

Trois veines arrivent dans l'oreillette droite.

- La première veine est la veine cave supérieure, qui déverse dans le cœur le sang venant des régions situées au-dessus du diaphragme.
- La deuxième veine est la veine cave inférieure, qui déverse dans le cœur le sang venant des régions situées en dessous du diaphragme.
- Le sinus coronaire ramène dans le cœur le sang drainé par le myocarde.

Quatre veines arrivent dans l'oreillette gauche. Il s'agit des veines pulmonaires, qui ramènent le sang des poumons vers le cœur.

3.3.1.3.2.Ventricules

Ils constituent les points de départ du sang. Leur volume est important. Leur intérieur présente des saillies musculaires (le pouvoir de contraction est important). Les ventricules sont les pompes du cœur : ils présentent des parois épaisses capables de résister à de fortes pressions.

- Le ventricule droit propulse le sang dans un réseau d'artères pulmonaires formant le tronc pulmonaire. Le sang va ensuite vers les poumons.
- Le ventricule gauche propulse le sang dans l'aorte, permettant la distribution du sang dans tout l'organisme.

3.3.2.Trajet du sang dans le cœur

Le cœur est constitué de deux pompes situées côte à côte. Il y a donc deux circulations.

- La circulation droite correspond à la circulation pulmonaire (la petite circulation), qui amène le sang jusqu'aux poumons.
- La circulation gauche correspond à la circulation systémique (la grande circulation), qui distribue le sang dans les différents tissus.

Le sang venant de l'organisme est pauvre en dioxygène, riche en dioxyde de carbone. Ce sang rentre dans l'oreillette droite. Il passe ensuite dans le ventricule droit. Le sang part du ventricule droit par les artères pulmonaires pour rejoindre les poumons. Au niveau des poumons, le sang est chargé en dioxygène, déchargé en dioxyde de carbone. Le sang arrive par les veines pulmonaires dans l'oreillette gauche. Il passe dans le ventricule gauche et ressort du cœur par l'aorte. Le sang arrive aux différents tissus. Le dioxygène est utilisé. Le sang est pauvre en dioxygène. Il retourne dans l'oreillette droite par la veine cave supérieure, la veine cave inférieure et le sinus coronaire.

Ce trajet est réalisé en continu et en sens unique. L'unicité du sens est permise par des valves, qui s'ouvrent et se ferment selon les pressions sanguines hautes ou basses. Il existe plusieurs types de valves.

- Les deux valves auriculo-ventriculaires gauche et droite permettent la jonction entre oreillettes et ventricules du même côté. Elles empêchent le sang de refluer vers les oreillettes. La valve auriculo-ventriculaire droite est appelée la valve tricuspide car elle est constituée de trois lames. La valve auriculo-ventriculaire gauche est appelée la valve bicuspidale (ou mitrale) car elle est constituée de deux lames. Les valves sont ancrées aux muscles des parois par des cordages tendineux. Lorsque le cœur est relâché, les valves sont ouvertes et le sang passe des oreillettes vers les ventricules. Lorsque les ventricules se contractent, les valves se ferment pour empêcher que le sang ne remonte.
- Les valves de l'aorte et du tronc pulmonaire empêchent le sang de refluer vers les ventricules. Elles sont appelées valves sigmoïdes. Lorsque les ventricules se contractent, la pression intraventriculaire est augmentée. Cette pression est tellement grande qu'elle est supérieure à celle de l'aorte et du tronc pulmonaire. Lorsque les ventricules sont relâchés, la pression intraventriculaire est plus petite que dans l'aorte et le tronc pulmonaire. Le sang va vers le cœur et les valves sont refermées.

Confer schéma du cœur.

3.3.3.Le tissu musculaire cardiaque

Il est proche du tissu musculaire squelettique mais présente des spécificités par rapport au rôle de pompe.

3.3.3.1.Structure

Le muscle cardiaque est un muscle strié, comme le muscle squelettique.

La contraction s'effectue de la même façon que pour un muscle strié squelettique, c'est-à-dire qu'il y a un glissement des myofilaments.

Mais les faisceaux des fibres musculaires cardiaques sont plus courts et plus épais que ceux des muscles squelettiques.

Les membranes plasmiques des cellules cardiaques sont rattachées par des jonctions spéciales qui empêchent les cellules de se séparer lors de la contraction. Les jonctions spéciales laissent passer des ions et du courant électrique d'une cellule à l'autre.

Beaucoup de mitochondries sont présentes dans les fibres musculaires cardiaques, plus que dans les fibres musculaires squelettiques.

On y retrouve des sarcomères avec des filaments de myosine (épais) et d'actine (fins). Ces filaments déterminent des stries, moins bien définies que dans les fibres musculaires squelettiques.

On retrouve le système de transport de Ca^{2+} .

3.3.3.2. Besoins énergétiques

Le grand nombre de mitochondries implique un besoin important et continu en O_2 .

Le muscle cardiaque a une respiration cellulaire presque exclusivement de type aérobie. S'il y a un manque de O_2 , le cœur se contracte mal. Par contre, le muscle squelettique, même s'il manque du O_2 , peut fonctionner en anaérobie.

Le muscle cardiaque peut utiliser des nutriments, le glucose et les acides gras - lipides -, pour produire de l'énergie, tout comme le muscle squelettique. Cependant, le muscle cardiaque s'adapte mieux que le muscle squelettique. Le muscle cardiaque utilise différentes voies métaboliques (il peut même réutiliser l'acide lactique pour produire de l'énergie).

Le muscle cardiaque est plus sensible au manque de O_2 qu'au manque de nutriments.

3.3.3.3. Déroulement de la contraction

3.3.3.3.1. Les différences

Dans le muscle cardiaque, on applique la loi du tout ou rien à l'organe en entier. Le cœur se contracte d'un bloc ou ne se contracte pas du tout.

Dans le cœur, il existe des cellules auto-excitables, qui se contractent seules. Dans le muscle squelettique, il faut absolument une terminaison nerveuse pour la contraction.

La période réfractaire absolue est la période pendant laquelle la cellule musculaire est inexcitable.

- Dans le muscle cardiaque, cette période est de 250 ms.
- Dans le muscle squelettique, cette période est de 2 ms.

Si on prolonge cette période, on empêche les contractions prolongées (tétaniques), qui altèrent l'efficacité de la pompe.

3.3.3.3.2. Les similitudes

La contraction cardiaque, comme la contraction squelettique, est déclenchée par des potentiels d'action (potentiels électriques) se propageant dans les membranes des différentes cellules du cœur (les cellules myocardiques). Il existe le même enchaînement que dans les fibres musculaires squelettiques.

- 1. La modification du potentiel de repos de la membrane entraîne l'ouverture rapide de canaux à Na^+ . Le flux de Na^+ passe de l'extérieur à l'intérieur de la cellule. Les canaux se ferment.
- 2. Il y a transmission de l'ordre de dépolarisation dans les tubules transverses. Il y a libération de Ca^{2+} dans le sarcoplasme.
- 3. Intervient le couplage excitation-contraction.

Lorsque le Ca^{2+} entre dans la cellule cardiaque, cette entrée est lente et prolonge la dépolarisation. Ceci explique la présence d'un plateau au niveau du potentiel d'action. En même temps, la perméabilité au K^+ diminue : le K^+ sort de la cellule musculaire cardiaque. Il y a retour au potentiel de repos de la membrane.

3.4. La physiologie du cœur

3.4.1. Les phénomènes électriques

Le cœur dispose d'une double innervation. Il est doué d'un automatisme (fonctionnement spontané avec répétition de contraction) qui détermine le rythme cardiaque (la fréquence cardiaque). L'activité automatique du cœur est sous la dépendance du système nerveux autonome (dépendance extrinsèque, venant en dehors du cœur) et sous l'influence d'un système nerveux intrinsèque.

3.4.1.1. Le rythme de base

C'est une activité indépendante du cœur due à la présence

- de jonctions spéciales entre les cellules,
- d'un système de commande intégré (système de conduction),
- de cellules cardionectrices (qui se contractent toutes seules) dans les parois du cœur (l'ensemble de ces cellules forme le tissu nodal).

Le tissu nodal est organisé en faisceaux et en nœuds.

- Le nœud sinusal (nœud de Keith et Flack) est situé dans la paroi de l'oreillette droite. Le rôle de ce nœud est d'émettre des impulsions électriques (60 à 80 par minute lorsque le cœur est bien connecté) : c'est le pacemaker, la pile du cœur. Le pacemaker a un rythme de 100 pulsations par minute lorsque le cœur est privé de facteurs hormonaux ou d'innervation. C'est le rythme des impulsions du nœud sinusal qui détermine la fréquence cardiaque en provoquant la contraction des oreillettes.
- Le nœud auriculo-ventriculaire (nœud d'Aschoff Tawara) est le point de départ de l'excitation des ventricules.
- Le faisceau auriculo-ventriculaire (faisceau de His) se situe en bas du septum interauriculaire. Des branches partent de ce faisceau dans les ventricules gauche et droit.
- Chaque branche du faisceau de His se ramifie et donne le réseau de Purkinje. Ce réseau fait remonter l'excitation dans les ventricules.

3.4.1.2. Les modifications du rythme de base : innervation extrinsèque

Le système nerveux autonome comprend le système nerveux sympathique et le système nerveux parasympathique.

Le rythme cardiaque est le résultat d'un compromis entre le système sympathique et le système parasympathique sur le rythme de base.

3.4.1.3. Electrocardiographie

Quand l'onde de dépolarisation se répand à travers le myocarde, il existe des courants électriques dans les tissus proches.

L'enregistrement d'une action électrique est l'électrocardiogramme (E.C.G.). On met en place des électrodes à différents endroits du corps car les courants sont conduits dans les liquides de l'organisme. Les électrodes sont reliées à un amplificateur. On obtient un tracé représentant un tableau global de l'activité du cœur. Un E.C.G. typique comprend cinq ondes :

- l'onde P (faible amplitude, dure peu de temps – 0,08 ms -, dépolarisation des oreillettes engendrée par le nœud sinusal),
- le complexe Q, R, S (dépolarisation ventriculaire ; avant la contraction des ventricules, il y a les ondes Q, R, S, qui durent peu de temps – 0,08 ms),
- l'onde T (repolarisation des ventricules ; la repolarisation des oreillettes est masquée par le complexe Q, R, S).

En général, la durée et la succession des ondes sont constantes. Tout irrégularité entraîne donc un problème du système de contraction.

3.4.1.4. Anomalies des phénomènes électriques

Ils sont visibles à l'E.C.G..

Par exemple, l'onde R augmente. Il y a donc hypertrophie des ventricules.

Par exemple, il y a bloc auriculo-ventriculaire : l'onde P n'est pas conduite au nœud auriculo-ventriculaire. Il y a plus d'ondes P que d'ondes Q, R, S. Le nœud sinusal n'entraîne donc pas de dépolarisation des ventricules.

Par exemple, il y a fibrillation ventriculaire : il y a dépolarisation des fibres anarchiques, il y a des ondes bizarres. Cela provoque donc une crise cardiaque aiguë.

3.4.2. Les phénomènes mécaniques : la révolution cardiaque

Sans arrêt, il y a contraction des oreillettes et des ventricules pour éjecter le sang. Puis il y a relâchement afin que les cavités se remplissent.

Il y a ainsi une alternance entre contraction et relâchement, c'est l'alternance systole-diastole.

Une systole et une diastole auriculaires suivies d'une systole et d'une diastole ventriculaires représentent une révolution cardiaque.

Les différences de pression sont plus élevées dans le ventricule gauche que dans le ventricule droit mais les deux ventricules pompent le même volume de sang par battement.

3.4.2.1. La phase de remplissage ventriculaire

La pression est basse dans les cavités du cœur. Ainsi, le sang venant de la circulation entre dans l'oreillette puis dans le ventricule car les valves auriculo-ventriculaires sont ouvertes. Les valves du tronc pulmonaire et de l'aorte sont fermées.

Pendant cette période, les ventricules se remplissent à 70 pour cent et les valves commencent à se fermer.

Il y a dépolarisation des oreillettes (onde P), ce qui entraîne une compression du sang puis une augmentation de la pression auriculaire. 30 pour cent du sang manquant est éjecté dans les ventricules. Les oreillettes se relâchent (diastole). Les ventricules se dépolarisent (ondes Q, R, S).

3.4.2.2. La systole ventriculaire

Les ventricules se contractent. Donc la pression ventriculaire augmente. Donc les valves auriculo-ventriculaires sont fermées.

Ainsi, à ce moment-là, tout est fermé et le volume de sang est constant. C'est la phase de contraction isovolumétrique.

Puis la pression ventriculaire augmente fortement. La pression ventriculaire est donc supérieure à la pression aortique. C'est la phase d'éjection ventriculaire. La pression est de 120 mmHg dans l'aorte.

3.4.2.3. La relaxation isovolumétrique

Les ventricules se relâchent (onde T).

La pression ventriculaire chute et le sang reflue dans le tronc pulmonaire et l'aorte, ce qui entraîne la fermeture des valves.

Une fois de plus, tout est clos. C'est la relaxation isovolumétrique.

Pendant la systole ventriculaire, les oreillettes sont en diastole.

La pression auriculaire augmente, ce qui déclenche la phase 1 puis un turn-over continu.

La durée de la révolution cardiaque est de 0,8 s :

- 0,1 s pour la systole auriculaire,
- 0,3 s pour la systole ventriculaire,
- 0,4 s pour la relaxation.

3.4.3. Les bruits du cœur

A chaque révolution cardiaque, des bruits (" toum-ta ") que l'on perçoit avec un stéthoscope apparaissent. C'est la fermeture des valves cardiaques.

- Le premier bruit (" toum ") est fort, long, résonant. Il y a fermeture des valves auriculo-ventriculaires. C'est le début de la systole ventriculaire.
- Le second bruit (" ta ") est bref et sec. Il y a fermeture des valves de l'aorte et du tronc pulmonaire. C'est le début de la diastole ventriculaire.

En fait, la valve auriculo-ventriculaire gauche se ferme avant la droite et les valves de l'aorte se ferment avant celles du tronc pulmonaire. Cela entraîne quatre bruits en auscultant quatre points précis du thorax.

Il existe des bruits anormaux, des souffles. Ce sont des turbulences dans l'écoulement du sang. Pour les jeunes sportifs, il existe des vibrations dues au passage du sang sur les parois minces du cœur. Mais les bruits anormaux sont souvent des troubles des valves.

3.4.4. Débit cardiaque et volumes cardiaques (V.E.S., V.T.D., V.T.S., précharge, contractilité, postcharge)

Le débit cardiaque est noté Q_c .

La fréquence cardiaque est notée F_c .

Q_c = quantité de sang éjecté par chaque ventricule à la minute

$$Q_c = F_c \cdot (V.E.S.)$$

Le volume sanguin éjecté par un ventricule à chaque battement est noté V.E.S.. Il est proportionnel à la force de contraction des parois du ventricule. Il est compris entre 60 et 70 mL par battement.

Le volume télédiastolique (V.T.D.) est le volume de sang dans le ventricule en fin de diastole.

Le volume téléstolique (V.T.S.) est le volume de sang dans le ventricule en fin de systole.

$$V.E.S.=V.T.D.-V.T.S.=120-50=70 \text{ mL}$$

Mais attention, le V.E.S. peut varier selon les valeurs du V.T.D. et du V.T.S., qui sont influencées par différents facteurs.

- La précharge correspond à la quantité de sang qui étire les fibres ventriculaires juste avant la systole.
- La contractilité est l'intensification de la force de contraction du cœur. Elle entraîne une éjection plus complète du sang.
- La postcharge est la pression qui s'oppose à celle que produisent les ventricules lorsqu'ils ouvrent les valves de l'aorte et du tronc pulmonaire.

4.L'équilibre hydrique, électrolytique et acido-basique

Les systèmes respiratoire et cardiovasculaire apportent au muscle les éléments nécessaires à son fonctionnement.

Ces quatre fonctions sont régulées par le système nerveux :

- le système nerveux de la vie de relation,
- le système nerveux de la vie végétative.

Nous avons fait intervenir en cours divers éléments :

- l'eau (hydrolyse de l'A.T.P., métabolisme),
- les électrolytes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , contraction),
- les nutriments (énergétique musculaire),
- les déchets acides (acide lactique, CO_2).

Or, pour le fonctionnement de l'organisme, ces différents éléments doivent rester en concentrations relativement constantes, ce qui implique un équilibre et une régulation.

4.1.Introduction : le milieu intérieur et l'homéostasie

4.1.1.Le milieu intérieur

Ce terme vient de Claude Bernard, père de la physiologie moderne.

Les organismes pluricellulaires ont créé, au cours de l'évolution, depuis l'apparition sur Terre d'une première cellule, un milieu intérieur.

Le milieu intérieur est le milieu liquide dans lequel baignent les cellules du corps. Il est constitué d'un liquide extracellulaire qui sert d'intermédiaire pour l'échange des aliments et des déchets. Le constituant le plus important de ce liquide extracellulaire est l'eau.

Grâce à la circulation, le milieu intérieur est le même dans tous les organes. Il place ainsi toutes les cellules dans des conditions de vie analogues et assure l'unité physico-chimique de l'organisme.

Confer figures 1 et 2.

4.1.2.L'homéostasie

Le milieu interstitiel présente une remarquable constance de stabilité de

- ses conditions physiques (température),
- ses conditions chimiques (pH).

Cette stabilité, malgré un milieu extérieur sujet à des variations, implique l'existence d'une régulation physiologique du milieu intérieur : l'homéostasie.

L'homéostasie est le maintien des différentes constantes physiologiques de l'individu à leur valeur normale. L'homéostasie est le maintien de la fixité du milieu intérieur.

Par exemple, il y a régulation

- de la glycémie (1 g/L de sang),
- de la température corporelle (37°C),
- de la pression en O_2 et en CO_2 (confer système respiratoire),
- de la stabilité de l'eau et des sels minéraux (équilibre hydro-électrolytique),
- de la constance du pH (équilibre acido-basique).

L'homéostasie est obtenue par le fonctionnement harmonien

- du système nerveux végétatif,
- du système hormonal.

Confer figure 3.

4.1.3.La notion de balance et l'homéostasie chimique

Confer figure 4.

En physiologie, une balance est le maintien d'un état d'équilibre.

La balance dépend

- des entrées (gains),
- des sorties (pertes).

L'équilibre dépend du bilan entre les gains et les pertes.

- Si les pertes sont supérieures aux gains, le bilan est négatif.
- Si les pertes sont égales aux gains, le bilan est équilibré.
- Si les pertes sont inférieures aux gains, le bilan est positif.

La balance doit être équilibrée. Le bilan doit donc être nul.

L'exercice physique peut modifier de façon considérable les équilibres de l'organisme :

- la glycémie,
- l'équilibre thermique,
- l'équilibre hydrique (sudation),
- l'équilibre électrolytique (sudation),
- l'équilibre acido-basique (diminution du pH).

4.2.L'équilibre hydro-électrolytique

4.2.1.Les différents éléments

4.2.1.1.L'eau

4.2.1.1.1.Généralités

L'eau est qualitativement indispensable à la vie.

- C'est le solvant des substances hydrosolubles.
- Elle conditionne la valeur de la pression artérielle.
- Elle est le lieu de nombreuses réactions chimiques.
- C'est le moyen de transport (nutriments, chaleur).

L'eau est quantitativement indispensable à la vie. Elle représente 60 pour cent de la masse corporelle. Confer figure 2.

4.2.1.1.2.Bilan de l'eau

Confer figure 5.

Ce bilan est nul grâce à un double ajustement.

- Les entrées sont variables par la sensation de soif. L'eau permet d'adapter exactement les apports aux pertes.
- Les sorties sont variables par la diurèse, qui régule la quantité d'eau éliminée par l'appareil urinaire.

L'eau est le premier besoin de l'homme. Il est impossible de vivre plus de quatre jours sans boire. Une perte d'eau de plus de 12 pour cent de la masse du corps peut être fatale.

4.2.1.2.Les électrolytes (les minéraux)

4.2.1.2.1.Définition

Les sels minéraux interviennent dans de nombreuses fonctions physiologiques (dans la contraction musculaire par exemple).

Ils représentent 4 pour cent de la masse corporelle (sodium, potassium, calcium, phosphore, chlore, magnésium, soufre, fer).

En solution dans l'eau, ils se dissocient en ions, d'où leur nom d'électrolytes.

4.2.1.2.2.Le sodium Na^+

C'est l'électrolyte le plus important dans le liquide extracellulaire. Sa présence détermine les échanges d'eau entre le liquide extracellulaire et le liquide intracellulaire.

Une pompe à sodium-potassium permet de rejeter le Na^+ à l'extérieur de la cellule en même temps qu'elle fait entrer le K^+ à l'intérieur.

Si ce processus actif ne fonctionne pas, par exemple par manque d'énergie, il peut y avoir des anomalies de la contraction musculaire (crampes).

Le Na^+ est apporté dans l'organisme sous forme de NaCl (chlorure de sodium, sel de cuisine). Les besoins sont de 1 à 2 g par jour. Les apports sont de 8 à 10 g par jour.

Les pertes en Na^+ sont

- sudorales (exercices physiques),
- urinaires (moyen de régulation).

La carence entraîne la fatigue, les crampes musculaires. L'excès peut entraîner l'hypertension artérielle.

4.2.1.2.3.Le potassium K^+

Le K^+ est un électrolyte presque exclusivement intracellulaire. Il joue un rôle dans la contraction musculaire et dans l'excitabilité neuromusculaire. Les besoins sont de 1 g par jour (jamais de carence).

4.2.1.2.4.Le calcium Ca^{2+}

Le Ca^{2+} est un électrolyte fondamental pour la contraction musculaire. Il intervient dans presque tous les phénomènes cellulaires par variation de perméabilité des membranes cellulaires.

Le taux de Ca^{2+} sanguin est maintenu à un taux très strict comme pour la glycémie.

Les besoins en Ca^{2+} sont de 1 g par jour et il faut savoir que l'exercice physique entraîne une augmentation des pertes urinaires et sudorales en Ca^{2+} .

4.2.1.3.Conclusion

En physiologie, le Na^+ et l'eau sont très intriqués (capital hydro-sodé).

Le maintien de ce capital est essentiel à la performance.

4.2.2.La régulation de l'équilibre hydro-sodé

4.2.2.1.Généralités

Nous avons vu les besoins respectifs en eau et en électrolytes, et comment l'organisme en obtient et les élimine.

Il faut retenir que, en physiologie, on aborde les problèmes liés à l'eau et au sodium ensembles.

On envisage toujours le capital hydro-sodé comme vestige des premières cellules vivantes qui se sont formées dans le milieu marin et qui, en formant des organismes terrestres, ont gardé cette particularité d'un milieu intérieur salé.

La protection du capital hydro-électrolytique et hydro-sodé en particulier est un des plus anciens programmes de défense qui soient inscrits dans nos gènes.

4.2.2.2.L'équilibre hydro-sodé au repos

4.2.2.2.1.Introduction

Pour l'eau comme pour le sodium, la principale régulation homéostatique par le maintien d'un bilan équilibré est l'excrétion rénale. Le rein joue le rôle de filtre.

La quantité d'eau ou de sodium excrétée est la différence entre la quantité filtrée et la quantité réabsorbée.

Les régulations de ce capital hydro-sodé sont complexes et font intervenir plusieurs mécanismes et, notamment, la régulation hormonale.

4.2.2.2.2.Equilibre hydrique

Le bilan hydrique se normalise à la fois par la régulation des entrées (ingestion d'eau induite par la soif) et par la régulation des sorties (quantité d'urine).

Le mécanisme se déroule ainsi.

- 1. La pression osmotique plasmatique s'élève.
- 2. L'hormone A.D.H. (hormone anti diurétique) est sécrétée.
- 3. Une action sur les reins réabsorbe le maximum d'eau.

Confer figure 6.

4.2.2.3.3. Equilibre du capital sodé

La volémie est la quantité de sang contenue dans l'organisme.

La concentration plasmatique du Na^+ détermine la volémie et règle les échanges d'eau entre le liquide intracellulaire et le liquide extracellulaire.

Quand il y a diminution de la pression osmotique plasmatique, il y a

- 1. libération de rénine,
- 2. transformation d'une protéine plasmatique (angiotensinogène -> angiotensine I -> angiotensine II),
- 3. L'angiotensine II a une action vasoconstrictrice et stimule la sécrétion d'aldostérone.
- 4. L'aldostérone augmente la réabsorption de Na^+ par les reins.

Confer figure 6.

4.2.2.3. L'équilibre hydro-sodé à l'exercice

4.2.2.3.1. Les pertes hydro-électrolytiques

Les pertes d'eau augmentent très largement à l'exercice par la sudation, qui est un des mécanismes de la thermorégulation.

Les réactions métaboliques liées à la demande énergétique induisent une production d'eau endogène.

Pendant un effort intense, la quantité d'eau perdue par la sudation est très largement supérieure à celle produite par le métabolisme. Il faut donc faire attention à la déshydratation.

La sueur est composée à 99 % d'eau mais elle contient aussi des électrolytes et notamment du Na^+ : la sueur a un goût salé.

Les pertes hydriques et électrolytiques peuvent être très importantes (jusqu'à 7 à 8 % du poids du corps lors d'un marathon et ceci en dépit de l'absorption de liquide pendant l'épreuve).

4.2.2.3.2. La sensation de soif

En cas de sudation importante, l'organisme perd plus d'eau que d'électrolytes.

La déshydratation provoque la sensation de soif.

Le facteur principal qui déclenche la soif est l'augmentation de l'osmolarité des liquides de l'organisme.

La sensation de soif n'apparaît qu'au delà d'un certain degré de déshydratation et le mécanisme de la soif n'est pas en relation parfaite avec l'état d'hydratation de l'organisme.

Il faut boire avant d'avoir soif et tenir compte du temps de latence, de la capacité d'absorption intestinale.

Lors d'un exercice physique intense et prolongé, il faut donc

- boire avant,
- boire pendant,
- boire après.

4.2.2.3.3. Déshydratation et performance

Une déshydratation, même minime, de l'ordre de 20 % du poids du corps, entraîne une forte diminution de la performance.

- Il y a baisse du rendement musculaire.

- Il y a baisse des systèmes cardiovasculaire et thermorégulateur :
 - baisse de la tension artérielle avec réduction du flux sanguin vers les muscles,
 - la peau est moins bien irriguée d'air, la thermorégulation est moins efficace.

Remarquons deux points.

- La performance aérobie est plus affectée que la performance anaérobie.
- La baisse de performance est plus grande si la déshydratation est provoquée par un exercice intense que si elle résulte du seul séjour du sportif en ambiance chaude (sauna).

4.3.L'équilibre acido-basique

4.3.1.Rappels physico-chimiques

Le pH est le potentiel hydrogène d'une solution, la concentration en ions H^+ de cette solution.

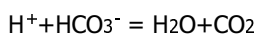
Schématiquement,

- le pH d'une solution acide est compris entre 0 et 7 ;
- le pH d'une solution basique est compris entre 7 et 14 ;
- le pH de l'eau est neutre, égal à 7 ;
- le pH du milieu intérieur est de 7,4 plus ou moins 0,05.

L'acidose est la baisse du pH du milieu intérieur : $pH < 7,4$. Il y a accumulation d'acide lactique dans le sang, dans les muscles.

acide lactique \rightarrow (ion lactate) $^- + H^+$

L'alcalose est l'augmentation du pH du milieu intérieur (élimination d'ions H^+ par l'hyperventilation).



4.3.2.Régulation de l'équilibre acido-basique

Confer figure 7.

Les réactions métaboliques (glycolyse, cycle de Krebs) sont très sensibles à la concentration des ions H^+ dans le liquide où elles se produisent. Par exemple, la fonction enzymatique de la glycolyse peut être bloquée si le pH diminue (acidose).

C'est pourquoi la $[H^+]$ est étroitement régulée dans le liquide intracellulaire.

Il existe deux niveaux de régulation :

- une régulation instantanée (elle évite les variations brusques de pH grâce aux systèmes tampons du plasma ; elle est limitée ; le principal tampon est le bicarbonate de sodium $NaHCO_3$, $Na^+ + HCO_3^-$),
- une régulation organique (elle est très puissante mais retardée, elle est réalisée à la fois par le poumon, qui élimine le CO_2 , et par le rein, qui élimine les ions H^+ par les urines).

4.3.3.L'exercice physique et l'équilibre acido-basique

Au cours d'un exercice maximal de courte durée, l'équilibre acido-basique est soumis à des grandes variations par une augmentation de la concentration d'ions H^+ par production d'acide lactique.

La quantité d'acide lactique dépend

- de la masse musculaire mise en jeu,

- de la durée de l'exercice,
- de l'intensité de l'exercice.

Au repos, la concentration sanguine de lactates est de 1 mmol/L pour un pH à 7,4.

Au cours d'un exercice très important, cette concentration peut monter jusqu'à 20 mmol/L pour un pH qui descend jusqu'à 6,8.

L'organisme humain peut tolérer très temporairement ce déséquilibre acido-basique (maux de tête, nausées, douleurs musculaires).

L'entraînement spécifique permet aux sportifs de supporter l'acidose sans toutefois augmenter la capacité à tamponner les ions H^+ .

4.4.Conclusion

Le fonctionnement cellulaire normal nécessite l'intervention simultanée de

- l'appareil digestif (entrée des nutriments),
- l'appareil respiratoire (il maintient la pression en O_2 et la pression en CO_2 dans le sang),
- l'appareil circulatoire (il distribue les substrats à utiliser et les déchets à excréter),
- l'appareil rénal (sortie des déchets ou des substances excédentaires).

C'est donc grâce à de multiples relations entre tous les organes que l'unité et la stabilité, c'est-à-dire l'homéostasie du milieu intérieur, sont assurées.