

PHYSIOLOGIE CARDIO-VASCULAIRE

Objectifs du cours

1. Connaitre l'hémodynamique du sang qui obéit à la dynamique des fluides
2. Connaitre les caractéristiques anatomiques du cœur
3. Connaitre le rôle de pompe du cœur et du système cardiovasculaire
4. Comprendre les mécanismes à l'origine de la régulation de la pression artérielle.

Généralités sur l'appareil cardiovasculaire

L'appareil cardiovasculaire est composé du cœur, des vaisseaux (artères, veines et capillaires) et du sang.

Le sang est pénétré dans le cœur par les veines et quitte le cœur par les artères.

Le système cardiovasculaire, a pour rôle principal le transport de substances vers les cellules de l'organisme. Ces substances sont les nutriments, l'eau, les gaz, les matériaux internes qui sont transportés entre les cellules et débarrasser l'organisme des déchets métaboliques, la chaleur et les CO₂.

CHAPITRE I: PHYSIOLOGIE DE LA CIRCULATION: HÉMODYNAMIQUE

1. Le débit sanguin

Le débit sanguin est le volume de sang qui s'écoule dans un organe en un temps donné (en ml/min).

2. La pression sanguine

La pression sanguine est la force que le sang exerce sur la paroi d'un vaisseau. Elle s'exprime en mm Hg.

Chez l'Homme, et selon les données de l'OMS, la pression (Pr) systolique doit être égale à 140 mm Hg. Le cœur se contracte.

La Pr diastolique c'est à dire le relâchement du cœur: le cœur se repose doit être égale à 70 mm Hg.

L'unité s'exprime par mm Hg c'est la PH exercée par 1 colonne de 1 mm sur 1 surface de 1 cm².

Lors de l'écoulement d'un fluide, la Pr diminue à cause des frottements.

PH : Pression Hydrostatique = Pression Hydraulique (ce terme est plus adéquat).

Le volume d'un liquide ne varie pas quand la Pr change : exemple d'un ballon rempli d'eau. Si on exerce une pression croissante sur le ballon, le volume contenu ne change pas.

La Pression MOTRICE est la Pr générée par le ventricule.

La P_r exercée sur les parois du cœur diminue quand le cœur se relâche et se dilate. De même que la P_r exercée sur la paroi d'un vaisseau diminue quand le vaisseau se dilate.

Le sang s'écoule des zones de hautes Pr vers les zones de basses Pr.

Haute Pr \Rightarrow Débit \Rightarrow Basse pression

$$P_1 - P_2 = \Delta P$$

S'il n'y a pas de différence de P_r , il n'y aura pas de débit. $P_1 = P_2$

$$P_1 - P_2 = \Delta P = 0$$

Le débit est fonction de la différence de Pr mais pas de sa valeur absolue.

Exemple :

100 mmHg

75 mmHg



$$\Delta P = 100 - 75 = 25 \text{ mmHg}$$

40 mmHg

15 mmHg



Débit

$$\Delta P = 40 - 15 = 25 \text{ mmHg}$$

3. La résistance

C'est la force qui s'oppose à l'écoulement du sang dans les vaisseaux. Elle résulte de la friction du sang sur la paroi des vaisseaux.

La résistance périphérique (RP) est la friction du sang sur la paroi des vaisseaux systémiques situés loin du cœur. La pression sanguine tend à diminuer lorsqu'on s'éloigne du cœur.

Les facteurs influençant la résistance sont la viscosité du sang, la longueur totale des vaisseaux sanguins et le diamètre des vaisseaux sanguins.

- Viscosité du sang

Si la viscosité du sang augmente, la résistance périphérique augmente.

Si la viscosité du sang diminue, la résistance périphérique diminue.

- Longueur totale des vaisseaux sanguins

Si la longueur totale des vaisseaux sanguins augmente, la résistance périphérique augmente.

Si la longueur totale des vaisseaux sanguins diminue, la résistance périphérique diminue.

- Diamètre des vaisseaux sanguins

C'est le facteur le plus important.

Si le diamètre des vaisseaux sanguins augmente, la résistance périphérique diminue.

Si le diamètre des vaisseaux sanguins diminue, la résistance périphérique augmente.

Les artéries sont les principaux déterminants de la Résistance Périphérique (parce que leur diamètre peut varier).

- Equation de Poiseuille

Elle indique les facteurs qui modifient la résistance des vaisseaux sanguins.

$$R = 8 \eta l / \pi r^4$$

R: résistance hydraulique

η (éta): viscosité du sang Pa/s (Pascal/seconde)

l : longueur

r^4 : rayon du vaisseau sanguin à la puissance 4

La résistance est proportionnelle à la viscosité du sang et inversement proportionnelle à la puissance quatrième du rayon des vaisseaux sanguins.

Comme $8/\pi$ est une constante la formule s'écrit:

$$R = \eta l / r^4$$

η qui est la viscosité du sang est fonction de la proportion des cellules et des protéines = constante.

L qui est la longueur des vaisseaux qui est liée à l'anatomie = constante. La formule s'écrit :

$$R = 1/r^4$$

C'est la formule qui est utilisée en biologie.

Quand on double le rayon (r), la résistance (R) devient 16 fois plus faible.

Tableau 1 : Effet du rayon du vaisseau sur le débit (Siverthorn, 2007)

Résistance $\approx 1/r^4$		Débit $\approx 1/R$	
Tube A	Tube B	Tube A	Tube B
$R \approx 1/l^4$	$R \approx 1/2^4$	Débit $\approx 1/1$	Débit $\approx 1/16$
$R \approx 1$	$R \approx 1/16$	Débit ≈ 1	Débit ≈ 16

La R devient 16 fois plus faible quand r double.

$$\text{Débit} \approx \Delta P / R$$

Il existe deux types de résistance: la résistance en parallèle et la résistance en série.

- La résistance en parallèle

Dans la circulation systémique, chaque organe est alimenté par une artère qui part de l'aorte. La résistance totale (RT) est exprimée par l'équation:

$$1/R_{\text{totale}} = 1/R_a + 1/R_b + \dots + 1/R_n$$

R_a, R_b, et R_n sont les résistances des artères rénales, hépatiques ...

La résistance totale est inférieure à la résistance de l'une ou l'autre des artères prises individuellement.

- La résistance en série

Elle illustrée par la disposition des vaisseaux sanguins à l'intérieur d'un organe donné. Chaque organe est alimenté par une :

- Une grosse artère
- Des petites artères
- Des artérioles
- Des capillaires
- Des veines

La résistance totale (RT) est exprimée par l'équation :

$$R_{\text{totale}} = R_{\text{artères}} + R_{\text{artéries}} + R_{\text{capillaires}} + R_{\text{veines}}$$

En résumé les forces qui s'opposent à l'écoulement du sang dans les vaisseaux résultent de la friction du sang sur la paroi de ces vaisseaux.

4. L'écoulement laminaire

Il se fait par couches stationnaires (de façon) linéaire (figure 1).

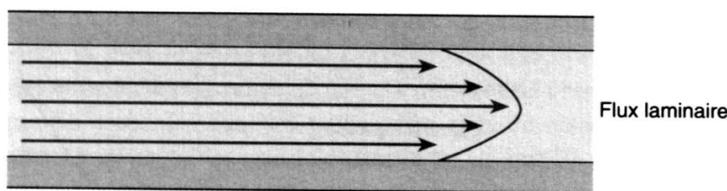


Figure 1: L'écoulement laminaire

5. L'écoulement turbulent

Inversement à laminaire, l'écoulement turbulent est provoqué par un obstacle sur le trajet du sang comme par exemple une plaque d'athérome (figure 2).

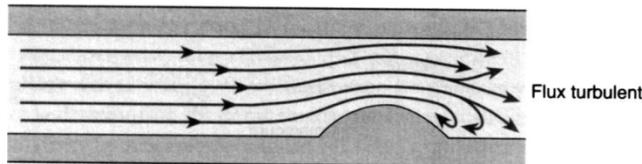


Figure 2: L'écoulement turbulent

6. La capacitance (compliance)

La capacitance, décrit la distensibilité des vaisseaux sanguins. Elle est décrite par l'équation suivante :

$$C = V / P$$

C : est la capacitance. Elle est exprimée en ml / mm Hg

V : est le volume en ml

P : est la pression en mm Hg

La capacitance est directement proportionnelle au volume et inversement proportionnelle à la pression.

Elle est beaucoup plus élevée pour les VEINES que pour les artères.

Du point de vue hémodynamique le secteur veineux est subdivisé en volume contraint et volume non contraint.

Le volume non contraint correspond au volume sanguin qui remplit les vaisseaux sans générer de pression.

Le volume contraint est le volume sanguin supplémentaire qui génère la pression veineuse.

Cela veut dire que seule une petite partie du volume contenu dans le réservoir génère une pression hydrostatique à l'origine du retour veineux systémique c'est : « le volume contraint ».

Le reste du volume veineux ne génère pas de pression c'est : « le volume non contraint » (figure 3).

Il faut noter que 65 % de la volémie est contenue dans le système veineux qui a un rôle de stockage.

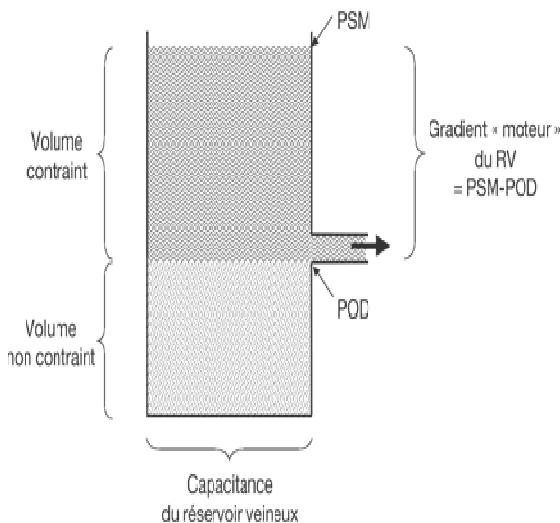


Figure 3 : Représentation schématique du réservoir veineux

La taille du récipient représente la capacitance du réservoir, qui est d'autant plus grande que les veines sont dilatées.

La hauteur de l'orifice correspond à la pression de l'oreillette droite (POD).

La hauteur totale de liquide représente la pression systémique moyenne (PSM).

Le volume de liquide situé sous le niveau de l'orifice représente le volume non contraint (ne générant aucun débit), alors que le volume situé au-dessus représente le volume contraint. La hauteur de liquide situé au-dessus de l'orifice représente la pression motrice du retour veineux, qui correspond à la différence entre PSM et POD.

Le débit de retour veineux entrant dans le ventricule droit est égal en moyenne au débit éjecté par le ventricule gauche.

Le retour veineux est proportionnel au gradient entre la pression veineuse périphérique, dont la valeur moyenne s'appelle « pression systémique moyenne » et la pression de l'oreillette droite.

Le retour veineux est inversement proportionnel à la résistance au retour veineux. Le retour veineux est donné par la formule suivante:

$$RV = PSM - POD / R_{RV}$$

RV = retour veineux

PSM = pression systémique moyenne

POD = pression de l'oreillette droite

R_{RV} = résistance au retour veineux.

Ces trois paramètres sont les principaux déterminants du retour veineux.

Le retour veineux systémique obéit à la Loi de Poiseuille. Il est proportionnel au gradient de pression régnant entre la périphérie des veines (appelée pression systémique moyenne) et l'oreillette droite, et il est inversement proportionnel à la résistance au retour veineux .

7. La vitesse d'écoulement du sang

La vitesse d'écoulement du sang dépend du débit et de la surface de section du vaisseau. Elle est représentée par la formule suivante (tableau 3) :

$$\text{Vitesse} = \text{Débit (Q)} / \text{surface de section}$$

$$\text{Débit} \approx \Delta P / R$$

Tableau 3 : Débit et vitesse de l'écoulement (Siverthorn, 2007)

Vitesse (v) = Débit (Q) / Surface de section	
Au point X	Au point Y
$V = 12 \text{ cm}^3/\text{mn}/1\text{cm}^2$	$V=12 \text{ cm}^3 / \text{mn} / 12 \text{ cm}^2$
$V=12 \text{ cm} / \text{mn}$	$V= 1 \text{ cm} / \text{mn}$

$$DC = VES \times FC$$

DC: débit cardiaque

FC: fréquence cardiaque

VES: volume d'éjection systolique

DC (l/min) = VES (l/batt) x FC (battements/min)

Exemple

Si FC = 70 battements/min et le VES = 70 ml, alors :

DC = 70 x 70 = 4 900 ml/min soit 4,9 litres

Formules-1

Débit cardiaque = ΔPression/ Résistance

$$= MAP-Pod / Rvs$$

Retour veineux = ΔPression/résistance

$$= Pvs-Pod/Rrv$$

Formules-2

Compliance = Volume / ΔPression

Pression = Volume / Compliance

Compliance = 1/ Élastance

$$= \Delta \text{Pression} / \text{Volume}$$

Formules 1

Débit cardiaque (DC) = $\Delta P / \text{Résistance}$

$$= P_{AM} - P_{OD} / R_{VS}$$

Retour veineux = $\Delta \text{Pression} / \text{Résistance}$

$$= P_{VS} - P_{OD} / R_{RV}$$

Formules 2

Compliance = Volume / $\Delta \text{Pression}$

Pression = Volume / Compliance

Compliance = $1 / \text{Élastance}$

$$= \Delta \text{Pression} / \text{Volume}$$

Le tableau 5 donne un aperçu sur la pression artérielle, la fréquence cardiaque, le volume d'éjection systolique (VES) et le débit cardiaque de quelques espèces animales.

Tableau 4 : Paramètres cardiaques chez différentes espèces animales (Prosser 1991, modifié)

Animal	Pression artérielle		Fréquence	Volume	Débit	Débit/kg
	(Sys/dia-mmHg)					
	Systémique Respiratoire		(Puls/min)	(ml)	(ml/min)	
Mammifères						
Homme	120/75	-	75	77	5775	80-90
Cheval	171/103	-	48	1350	64800	150
Vache	160/110	-	50	870	43500	115
Rat	130/91	-	360	0,18	65	209
Ecureuil	139/99	-	276	0,5	138	313
Dauphin	150/121	55/35	100	109	10900	60

Oiseaux						
Pigeon	135/103	-	100	-	-	-
Poulet	149/43	-	270	1,1	220	220
Canard	-	-	180	2,5	450	300
Reptiles						
Tortue	25	24/19	23	3,7	85	57
Crocodile	45/30		20	-	-	-
Iguane	48/37	30/13	38	1,5	57	57
Amphibiens						
Grenouille	35/21	31/16	40	0,035	1,4	20

CHAPITRE 2: LE COEUR ET LE MUSCLE CARDIAQUE

Objectifs de ce chapitre :

- Savoir situer le cœur dans l'organisme.
- Pouvoir identifier les structures cardiaques.
- Connaître le rôle et l'emplacement des coronaires.
- Comprendre la circulation du sang à travers la pompe cardiaque.
- Connaître la circulation systémique et pulmonaire.
- Pouvoir identifier les structures conductrices du cœur.
- Savoir expliquer la différence anatomique entre les veines et les artères.
- Connaître les gros troncs veineux et artériels irrigant les organes.

I. ANATOMIE DU CŒUR

1. Description

Le cœur est un organe musculaire creux situé dans la cage thoracique (figure 4).

La paroi du cœur comprend de l'extérieur vers l'intérieur :

- Le péricarde
- Le myocarde
- L'endocarde

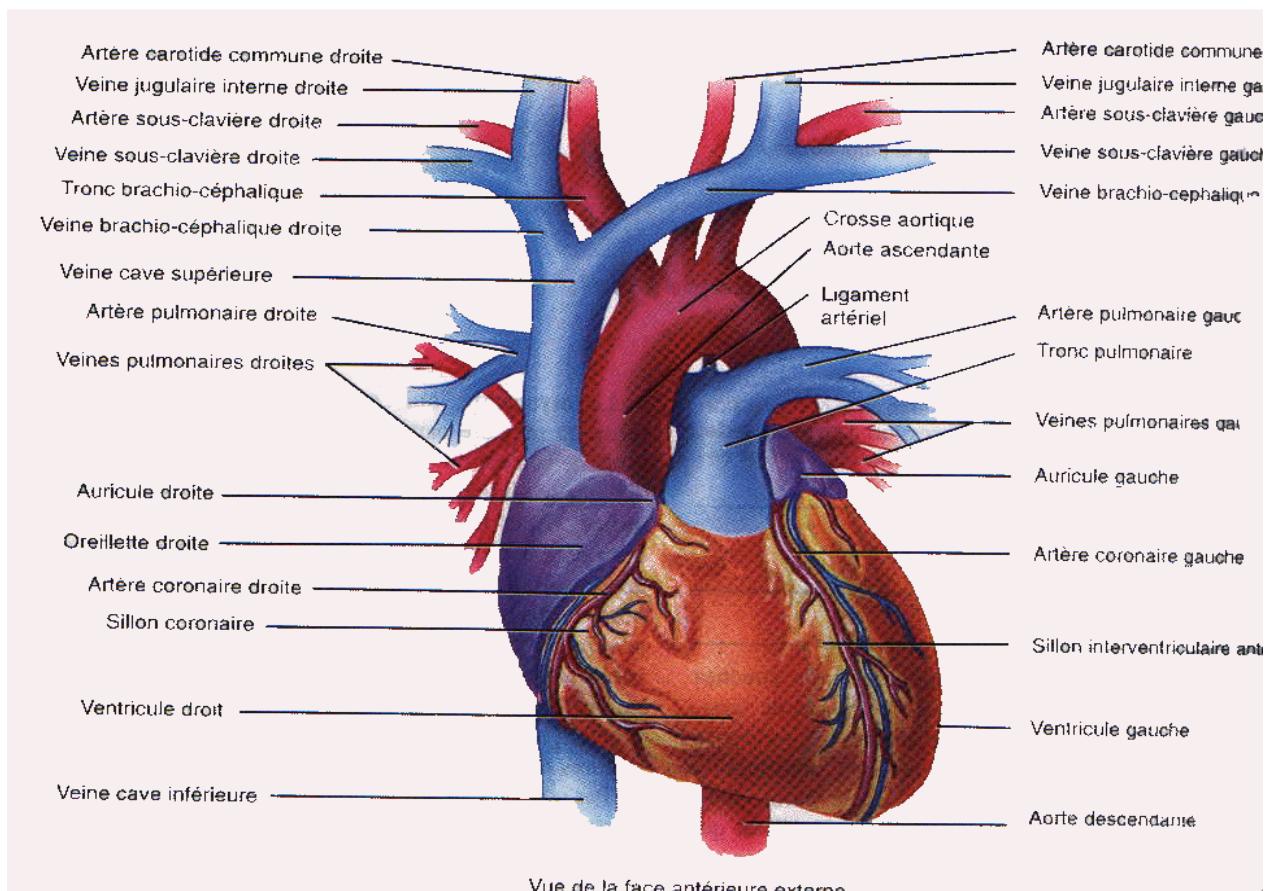


Figure 4: Cœur humain : face antérieure externe

Sa taille est fonction de l'espèce animale.

La taille et le poids du cœur sont proportionnels à la taille de l'animal, c'est à dire que plus l'animal est grand et plus la taille du cœur est grande et *vice versa* (tableau 5).

Tableau 5 : Relation entre la taille de l'animal et le poids du cœur

Espèce	Bovin	Chien	Chat	Girafe	Lapin	Cheval	Homme
Poids du cœur	2.5 kg	40-600g	10-20g	12.5 kg	10-15g	3.5kg	250 g

Chez le cheval le cœur a en moyenne les dimensions suivantes 26 x 19 x 15 cm et pèse ≈ 3,5 kg.

Chez le cheval de trait et le cheval de course (entraînement et travail) le cœur pèse environ 6,5 Kg.

Le cœur a la forme d'un cône. Il est situé dans la cage thoracique entre les poumons chez l'homme. Chez les bovins, il est situé ventralement, entre la 3^{ème} et la 6^{ème} paire de côtes, il atteint la moitié du thorax, la base est vers orienté vers le haut et l'apex est dirigé vers le bas, caudalement et légèrement vers la gauche. Les 3/5 du myocarde sont à gauche.

Le cœur est un organe creux . Il a 4 cavités qui communiquent deux à deux, deux oreillettes ou atrium et deux ventricules.

L'oreillette droite communique avec le ventricule droit. Les oreillettes sont séparées par un septum inter-atrial.

L'oreillette gauche communique avec le ventricule gauche. Les deux ventricules sont séparés par un septum inter-ventriculaire.

L'oreillette droite communique avec le ventricule droit par une valve composée de trois feuillets qu'on appelle la valve tricuspidale.

L'oreillette gauche communique avec le ventricule gauche par une valve composée de deux feuillets qu'on appelle la valve mitrale.

Les oreillettes et les ventricules sont séparés par un **tissu fibreux qui n'est pas conducteur: c'est l'anneau fibreux qui entoure les valves.**

La paroi du cœur comprend de l'extérieur vers l'intérieur (figure 5):

- Le péricarde
- Le myocarde
- L'endocarde

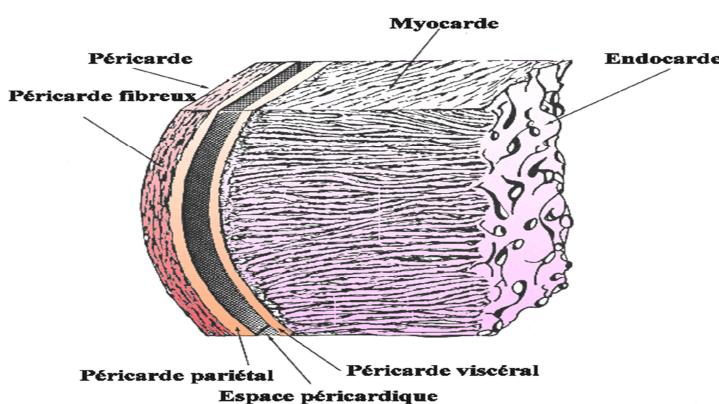


Figure 5: structure de la paroi du cœur

2. Le péricarde

Le cœur est recouvert d'une tunique membraneuse fibreuse appelée péricarde qui comprend deux feuillets. Un feuillet en regard du muscle cardiaque ou feuillet viscéral et un feuillet externe ou pariétal. Une mince pellicule péricardique remplit l'espace entre les deux feuillets et sert de lubrifiant entre le cœur et le sac qui l'enveloppe et soutient le cœur en amortissant les battements.

3. Le myocarde

C'est le muscle cardiaque (figure 6). C'est un tissu musculaire composé de fibres organisées en réseau.

Il comporte des fibres musculaires striées formant un réseau anastomotique où les jonctions intercellulaires spécialisées constituent les stries scalariformes. Ce tissu est richement vascularisé, par des branches tributaires du réseau artériel coronaire.

Le myocarde est constitué de 3 types de cellules ou myocytes :

- Les cellules musculaires myocardiques contractiles, majoritaires
- Les cellules nodales génératrices et conductrices du potentiel d'action
- Les cellules myocardiques endocrines

3.1. Les cardiomyocytes contractiles

La fibre cardiaque a l'aspect d'un syncytium mais il existe une séparation inter fibre par le sarcolemme, terminaison des fibres par des disques intercalés en continuité avec le sarcolemme.

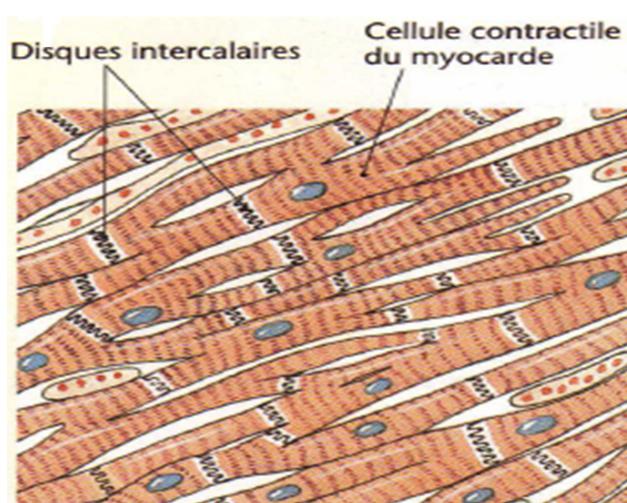


Figure 6 : Les cellules contractiles du myocarde

Les cellules myocardiques sont ramifiée. Elles possèdent un seul noyau. Elles sont striées et reliées entre elles par des jonctions spécialisées qui portent le nom de disques intercalaires (figure 6).

Les cellules musculaires cardiaques présentent 4 propriétés fondamentales:

- Excitables du fait d'un équipement membranaire particulier,
- Contractiles ,

- Conductrices
- et pour certaines, douées d'automaticité

Il existe des différences importantes entre les fibres musculaires squelettiques et les fibres musculaires cardiaques mais cependant il existe des analogies du système contractile.

Les ventricules

Les ventricules constituent la plus importante partie de la masse cardiaque.

Les ventricules cardiaques ont une paroi musculaire épaisse contrairement à la paroi des atriums qui est plus fine. Le ventricule gauche est plus développé que le ventricule droit. En effet c'est lui qui envoie le sang dans tout l'organisme, donc il développe une force plus importante (grande circulation: cœur-corps - cœur). Quant au ventricule droit, il est peu développé car il envoie le sang uniquement aux poumons (petite circulation: cœur - poumons - cœur) . Il développe une force moins importante que le ventricule droit (figure 7).

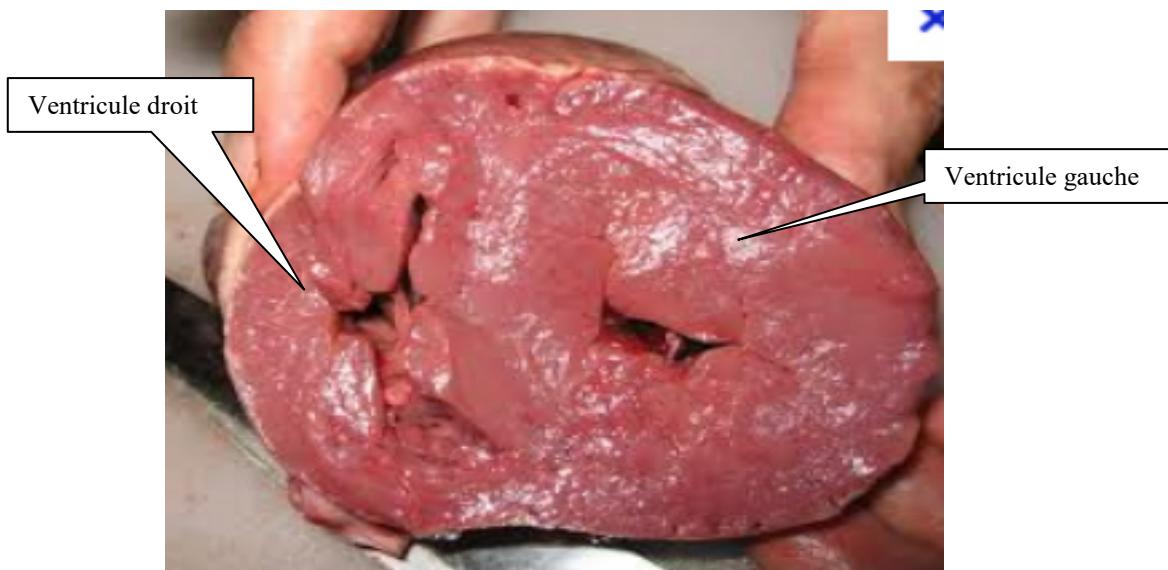


Figure 7: Les ventricules gauche et droit d'un cœur de mouton

Tous les gros vaisseaux émergent de la base du cœur: les artères pulmonaire et aortique; les veines pulmonaires et les veines caves (figure 4).

3.2 Les cellules cardionectrices

L'automatisme cardiaque

La coordination de la contraction du myocarde entre les 4 cavités est liée à l'existence d'un tissu musculaire spécialisé qui est le tissu nodal (figure 8).

Le système cardionecteur ou système de conduction du cœur (**2 %** des cellules) est organisé de la façon suivante:

- Le nœud sinusal ou nœud de Keith et Flack qui est le pacemaker cardiaque (il a la fréquence de décharge la plus élevée: 70 à 100 chez l'homme). C'est lui qui impose son rythme au cœur.

Nœud SA > nœud AV > His-Purkinje

- Le nœud atrio-ventriculaire ou noeud d'Aschoff-Tawara qui a une fréquence de décharge moins importante que le nœud sinusal (40 à 60/ mn).
- Le faisceau de His qui se divise en deux (2) branches : la branche droite et gauche du faisceau de His.
- Chaque faisceau de His, se ramifie et donne le réseau de Purkinje (20 à 40 / mn).

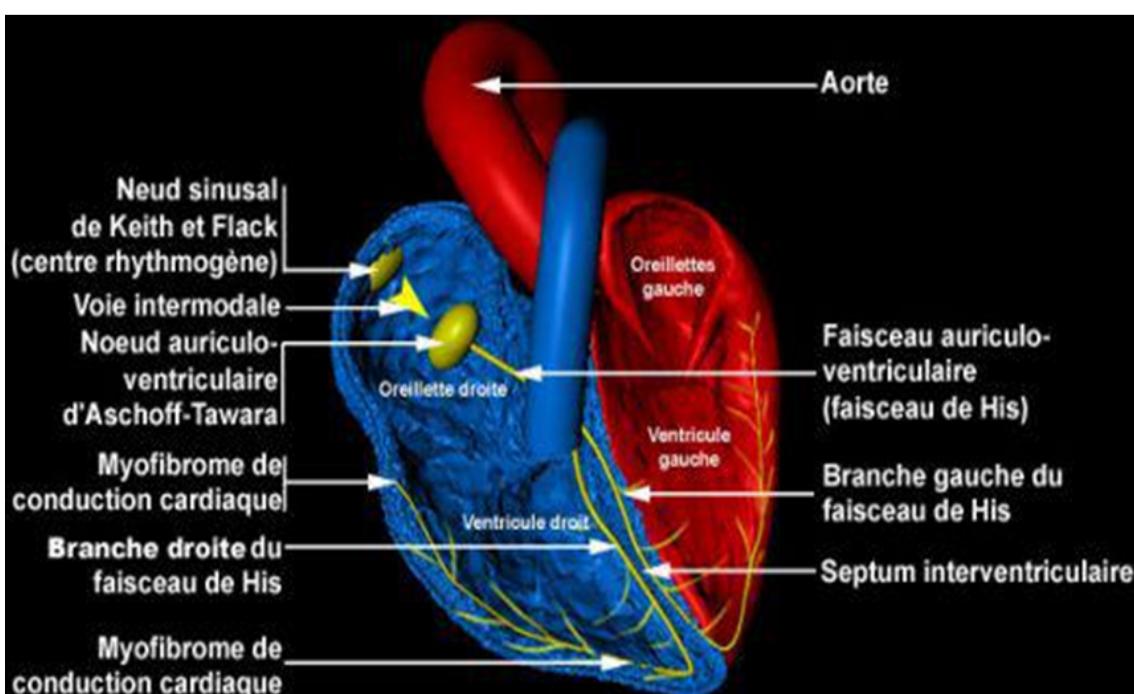


Figure 8 : Le système cardionecteur

Le système cardionecteur produit et conduit dans l'ensemble du myocarde l'excitation qui est à l'origine de la contraction cardiaque.

On appelle pacemaker ectopique, les autres régions du cœur qui peuvent initier des contractions sous des circonstances particulières.

4. L'endocarde

L'endocarde est un tissu très lisse, où passent les nerfs et les vaisseaux sanguins. L'endocarde tapisse l'ensemble des cavités internes du cœur et revêt les différentes faces ainsi que les cordages des valvules cardiaques. Il est séparé du myocarde sous-jacent par une couche sous-endocardique conjonctive contenant des nerfs, des petits vaisseaux sanguins ainsi que des cellules du tissu nodal (réseau sous-endocardique de Purkinje).

5. Les cellules endocrines cardiaques

Ce sont des myocytes spécialisées situées essentiellement dans les oreillettes. Ces cellules sécrètent le **facteur natriurétique (ANF)**, qui rentre dans la régulation de la pression artérielle et du volume sanguin.

II. LES VAISSEAUX DU CŒUR, LES VAISSEAUX CORONAIRES ET LE SENS DE LA CIRCULATION DU SANG DANS LE CŒUR

1. La structure des veines et des artères (rappel) (figure 9)

Les artères comme les veines comprennent 3 couches plus ou moins développées selon leur diamètre et leurs localisations. Elles comprennent de l'extérieur vers l'intérieur 3 couches :

- L'avventice
- La média
- L'intima

2. La circulation dans le cœur

La circulation dans le cœur est assez particulière. En effet les veines peuvent transporter à la fois du sang riche en CO₂ c'est le cas des veines caves et les veines pulmonaires transportent le sang riche en O₂. Il en est de même pour les artères. L'artère pulmonaire transporte jusqu'aux poumons le sang riche en CO₂ et l'artère aorte transporte le sang riche en O₂ à tout le corps.

Le sang arrive aux oreillettes par les VEINES : veine cave supérieure et veine cave inférieure (oreillette droite) et veines pulmonaires (oreillette gauche).

Le sang quitte les ventricules par les ARTÈRES : artère aorte (ventricule gauche et artère pulmonaire (ventricule droit) (figure 9).

Les valves atrio-ventriculaires, séparent les oreillettes des ventricules et sont entourées d'un anneau fibreux.

- La valve **Tricuspidé** : sépare l'oreillette droite du ventricule droit.
- La valve **Mitrale** : sépare l'oreillette gauche du ventricule gauche.

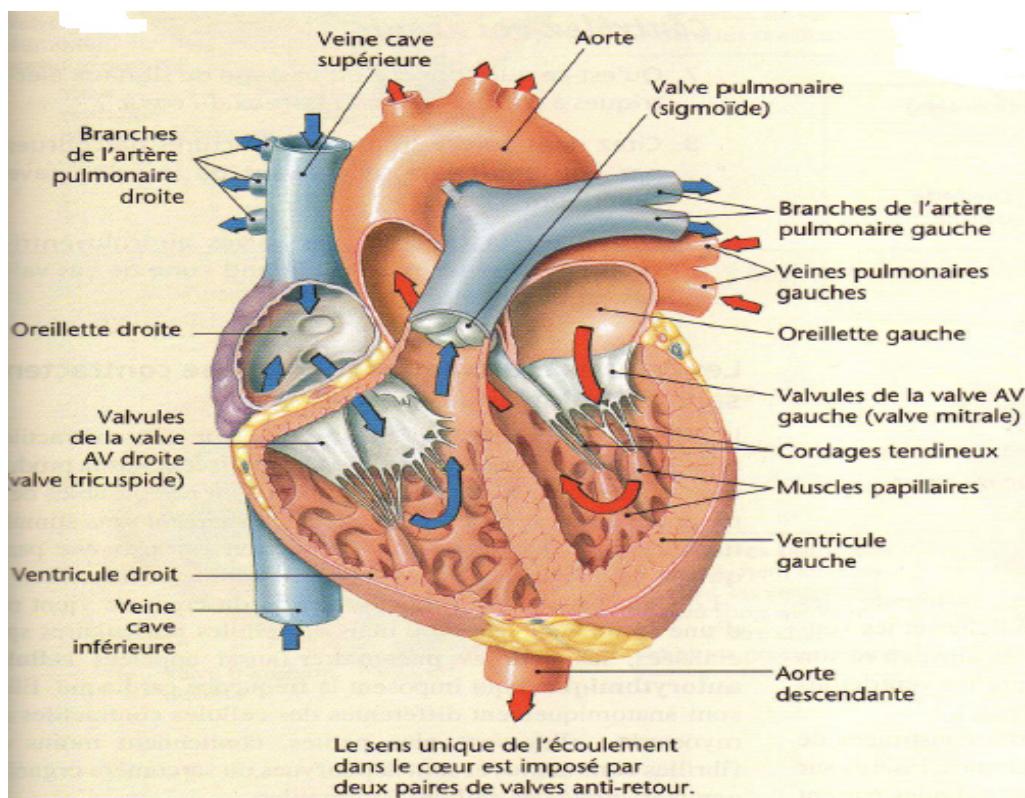


Figure 9 : Sens de la circulation sanguine dans le cœur (Siverthorn, 2007)

Les valves artérielles sont aussi appelées valves sigmoïdes ou encore valves semi-lunaires. Elles sont entourées d'un anneau fibreux. Elles empêchent le reflux du sang des artères vers les ventricules. Il en existe deux (02): la valve Aortique entre le ventricule gauche et l'aorte. Et la valve Pulmonaire entre le ventricule droit et l'artère pulmonaire (figure 9). Quand les valves atrio-ventriculaire ou auriculo-ventriculaires (Tricuspidé : cœur droit) et (Mitrale : cœur gauche) se ferment , les valves sigmoïdes artérielles Pulmonaires (cœur droit) et Aortique (cœur gauche) s'ouvrent.

Les 4 valves sont entourées de 4 anneaux fibreux de tissu conjonctif. Le tissu fibreux n'est pas conducteur, c'est un isolant électrique.

Quand les valves atrio-ventriculaires sont endommagées on a recours à des prothèses biologiques chez l'Homme (figure 10).



Figure 10 : Prothèse biologique avec armature (valves) la prothèse Epic/Epic Supra (Goldman et al., 2016 ; Sanogo, 2020)

Le rôle des valves est d'empêcher le reflux du sang. C'est à dire qu'en se fermant elle empêchent le sang de retourner en arrière vers les oreillettes pour les valves atrio-ventriculaires. Les valves sigmoïdes pulmonaire et aortique, empêchent le reflux du sang des artères vers les ventricules. De ce fait le sang circule à sens unique.

3. La circulation pulmonaire et la circulation systémique

La petite circulation ou circulation pulmonaire : le sang va de l'artère pulmonaire (artère droite et gauche pour les poumons droit et gauche) vers les poumons et retourne vers le cœur via les veines pulmonaires pour pénétrer dans l'oreillette gauche.

La grande circulation ou circulation systémique: le sang va de l'aorte vers tout le corps et retourne au cœur par les veines caves et se jette dans l'oreillette droite (figure 11).

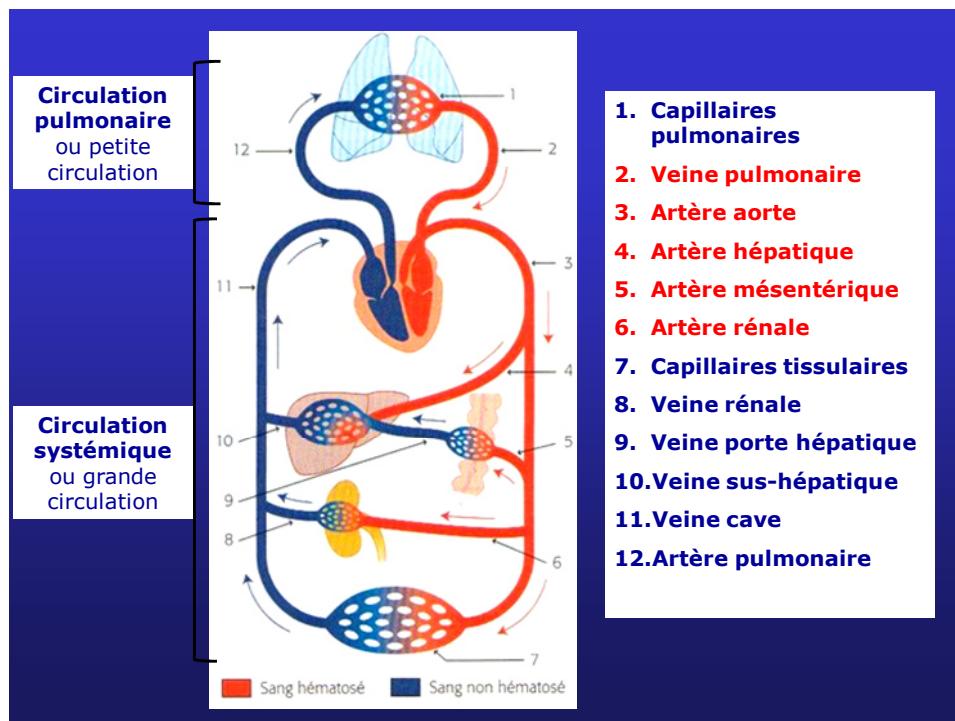


Figure 11: Les circulations systémique et pulmonaire

4. La vascularisation cardiaque

La vascularisation du cœur se fait par les vaisseaux appelés vaisseaux coronaires.

Ils sont peu profonds à la surface des ventricules.

Ils fournissent :

- De l'O₂
- Des nutriments et
- Débarrassent les tissus des déchets métaboliques.

La vascularisation du myocarde est assurée par les deux premières branches collatérales de l'aorte, les artères coronaires droite et gauche qui naissent de la toute première partie de la racine de l'aorte (figure 12).

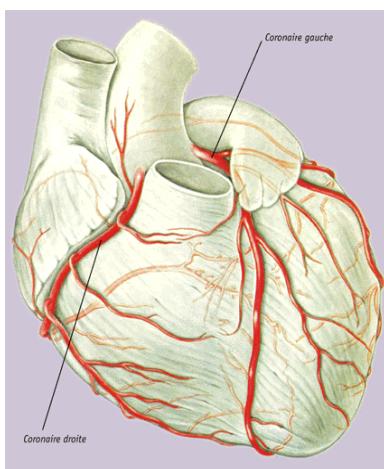


Figure 12 : Les artères coronaires

Les artères coronaires issues de l'aorte sont les vaisseaux nourriciers du cœur. Les veines coronaires drainent le sang veineux vers la veine cave supérieure via le sinus veineux coronaire.

III. LA FONCTION DU CŒUR

La fonction principale du cœur c'est de maintenir le débit sanguin grâce à 2 systèmes:

Une circulation systémique comprenant les veines pulmonaires et l'aorte: circulation à haute pression.

Une circulation pulmonaire comprenant les veines caves et les artères pulmonaires : circulation à basse pression.

Chez un homme au repos, le volume sanguin moyen est de 5 à 6 l. Lors d'un exercice intense, le débit cardiaque peut atteindre ≈ 25 l/min.

Pendant toute la vie de l'homme, cette petite pompe pesant environ 300 g, est responsable de la circulation. En 70 ans le volume éjecté par les deux ventricules dépasse 400 millions de litres.

1. Les évènements mécaniques du cycle cardiaque

Ils peuvent être différencier en différents temps qu'on appelle la « révolution cardiaque ». La
La pression artérielle

Définition : la pression artérielle est la pression sanguine moyenne du réseau artériel au cours d'un cycle cardiaque. Sa valeur est comprise entre la pression systolique et la pression diastolique.

Les pressions systolique et diastolique

A chaque systole, un volume important de sang afflue dans les artères systémiques. La pression sanguine s'élève : c'est la pression artérielle systolique, qui est la pression maximale exercée sur la paroi des artères. La paroi de l'artère est distendue.

Lors du relâchement du cœur (diastole), le sang s'écoule progressivement vers les artéries, la paroi n'est plus distendue. La pression diminue, c'est la pression artérielle diastolique qui est la pression minimale exercée sur la paroi des artères.

La pression artérielle est exprimée par la différence entre ces deux pressions : 120 mm Hg / 70 mm Hg, d'où les chiffres énoncés : 12/7.

2. Rappel : Loi du Tout ou Rien

Toute excitation d'une cellule **ventriculaire** entraîne l'excitation complète des cellules des deux ventricules. En effet, toutes ces cellules sont liées par des ponts perméables inter cellulaires (gap junction), créant ainsi un véritable **syncytium**, d'où une stimulation de toutes les cellules ventriculaires à partir d'une seule.

La présence de **mitochondries** en densité importante, assurent l'apport énergétique en phosphorylation oxydative de la cellule musculaire cardiaque c'est une cellule à haute consommation d'énergie et qui a donc un appareil de fabrication d'énergie important (mitochondries).

Les apports de substrat et d'oxygène importants sont permis par la densité importante des capillaires sanguins (un capillaire par fibre musculaire cardiaque).

Pour augmenter les communications inter fibre on a la présence d'invagination du sarcolemme à l'intérieur des fibres qu'on appelle tubule T. Ces ponts ou invaginations vont permettre une communication de l'ensemble des fibres et permettre une contraction de l'ensemble du myocarde c'est la loi du tout ou rien.

Le cycle cardiaque

Il comprend 4 phases:

- Contraction des oreillettes ou systole atriale
- Relaxation des oreillettes
- Contraction des ventricules ou systole ventriculaire
- Relaxation des ventricules

Le cycle cardiaque peut être représenté par une courbe pression-volume (figure 13 a et 13 b).

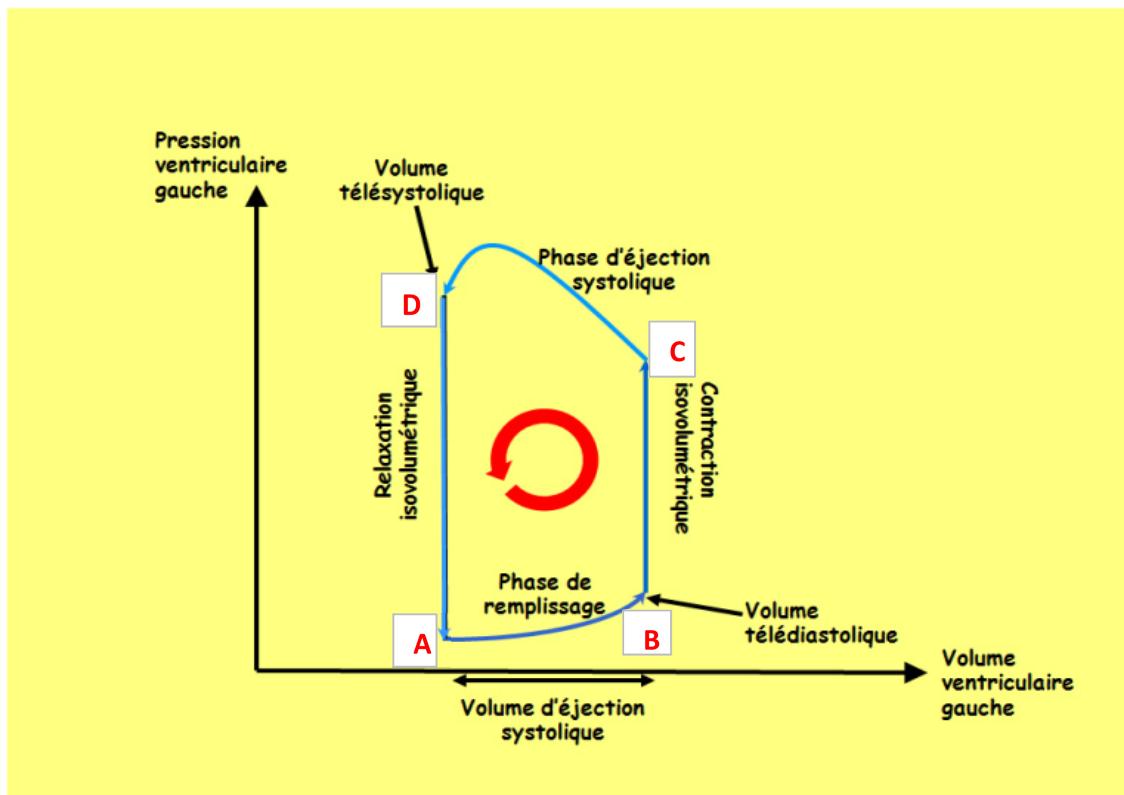


Figure 13 a: La courbe pression-volume du ventricule gauche

Le cycle commence au point A.

Au point A, la valve mitrale s'ouvre et le sang passe de l'oreillette au le ventricule.

De A-B : remplissage du ventricule gauche.

Au point B la quantité de sang est maximale alors le contenu du ventricule est appelé volume téldiaistolique ou (VTD) car le ventricule est toujours relâché. La valve mitrale se ferme et la valve aortique est fermée.

De B - C : contraction isovolumétrique du ventricule gauche. C'est à dire sans changement de volume. La pression augmente mais le volume de sang ne change pas d'où le nom de "contraction isovolumétrique".

Au point C: ouverture de la valve aortique car la pression dans le ventricule devient supérieure à la pression dans l'aorte.

De C - D : éjection systolique. Lors de l'éjection systolique un certain volume de sang est éjecté dans l'aorte c'est le c'est le volume d'éjection systolique ou VES. Le ventricule gauche éjecte une partie du sang et il ne reste pas complètement vide.

Au point D: le volume qui reste dans le ventricule est appelé "volume télésystolique" ou VTS.

De D - A : relâchement isovolumétrique. La relaxation isovolumique sans modification du volume avec relâchement du muscle cardiaque.

$$\text{Volume systolique} = \text{VTD} - \text{VTS}$$

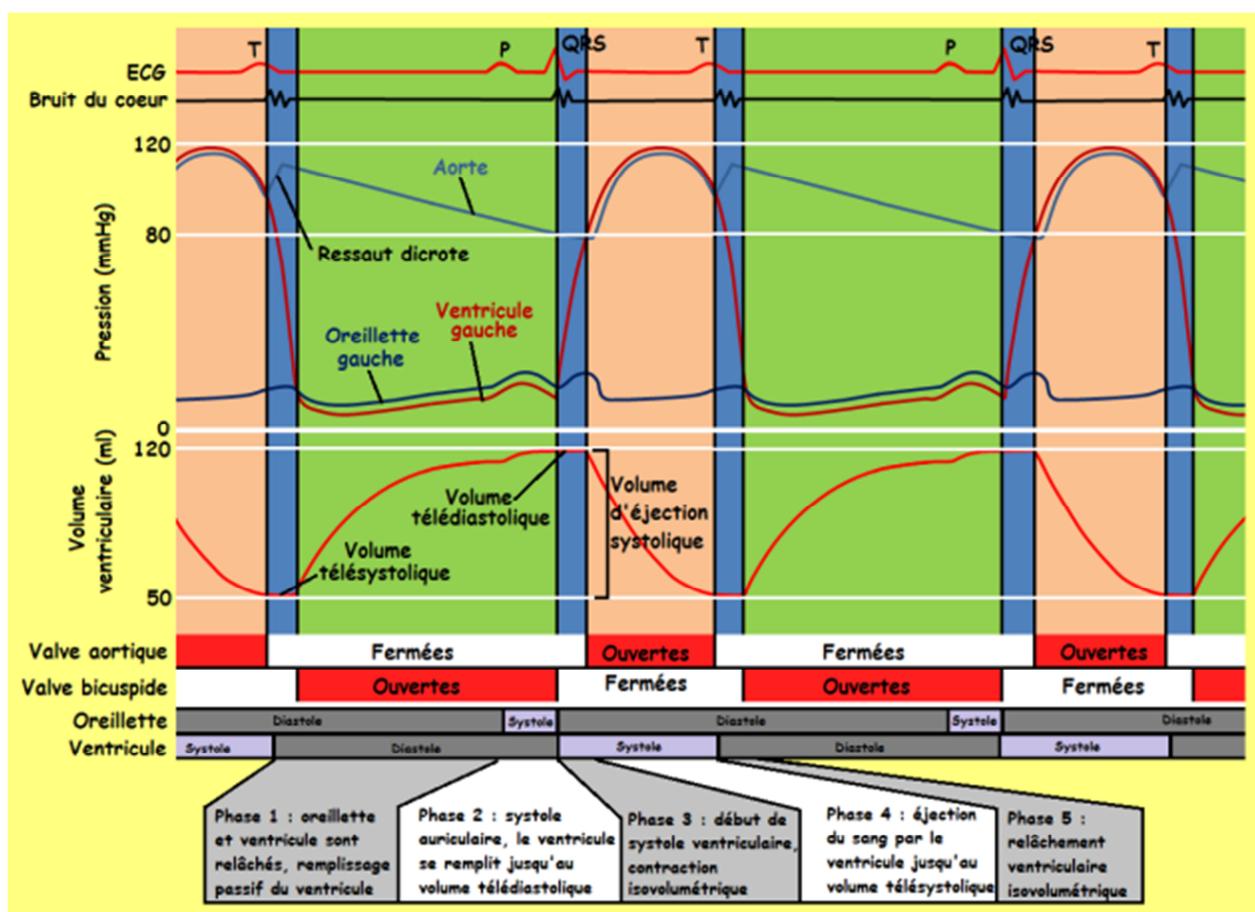


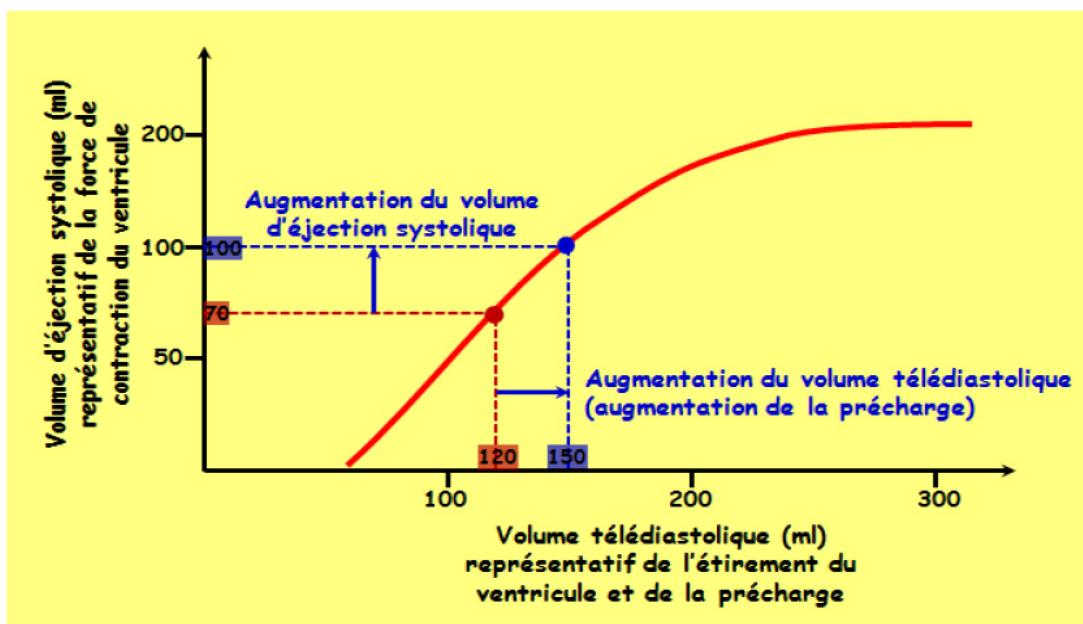
Figure 13 b: La courbe pression-volume du ventricule gauche**La relation de Frank-Starling**

Le volume d'éjection systolique dépend de plusieurs facteurs dont la relation de Frank-Starling.

Le degré d'étirement du myocarde avant la contraction est appelé "précharge".

La précharge (figure 14)

La loi de Frank-Starling est l'illustration de la relation existant entre le degré d'étirement des cellules musculaires et la force contractile de ces cellules. Pour le muscle cardiaque comme pour le muscle strié squelettique, jusqu'à une certaine limite, la force de contraction est d'autant plus importante que les cellules sont étirées.

**Figure 14: La précharge (Chassot, 2020)****La postcharge**

Elle dépend du volume téldiaastolique (VTD) et de la pression artérielle.

la pression artérielle est la pression sanguine moyenne du réseau artériel au cours d'un cycle cardiaque. Sa valeur est comprise entre la pression systolique et la pression diastolique.

Les déterminants de la postcharge sont :

- Les résistances vasculaires,
- Les conditions pathologiques,
- La viscosité du sang

Plus la postcharge augmente, plus le débit cardiaque diminue.

3. La contraction des fibres myocardiques contractiles

La formation du complexe troponine-calcium permet l'interaction entre la myosine et l'actine. La fixation du pont de myosine sur le filament d'actine provoque un raccourcissement de la fibre musculaire par déplacement de l'actine par rapport à la myosine.

Le transport ionique

Selon Ringer, une concentration extracellulaire appropriée et un équilibre ionique sont essentiels pour un fonctionnement cardiaque normal. La concentration musculaire requiert une concentration optimale en ions et les 3 principaux ions impliqués sont le Na^+ , de K^+ et de Ca^{++} .

- Une diminution de la concentration extra cellulaire de Na^+ , entraîne la diminution de l'excitabilité cardiaque diminuer sa facilité à se contracter
- Une diminution importante de la concentration extra cellulaire de K^+ , entraîne un arrêt cardiaque par hyperexcitabilité (L'insuffisance en K^+ aboutit à la tachycardie, une prolongation de P-R, abaissement de l'onde T).
- Une augmentation importante de la concentration extra cellulaire de K^+ , entraîne un arrêt cardiaque diastolique par perte de l'excitabilité (Ces variations sont dues à une altération de la repolarisation de la membrane cellulaire)
- Une diminution importante de la concentration extra cellulaire en Ca^{++} . entraîne un arrêt cardiaque diastolique
- Une augmentation de la concentration extra cellulaire en Ca^{++} . Entraîne une augmentation de la contractilité.
- Avec une concentration faible de Ca^{++} extracellulaire, la contraction ne peut pas avoir lieu.
- Une augmentation importante de la concentration extra cellulaire en Ca^{++} . Aboutit à un arrêt cardiaque systolique qu'on appelle le « **rugor** ».

Exemple : chez les animaux d'expérience, les niveaux très élevés de Ca^{++} extracellulaire augmentent la force de contraction cardiaque et si l'exposition est prolongée, la relaxation va être présente de moins en moins après chaque contraction jusqu'à ce que le cœur s'arrête en contraction. De même la présence d'une concentration adéquate en Ca^{++} extracellulaire est essentielle pour la contraction normale du muscle cardiaque.

IV. ELECTROPHYSIOLOGIE CARDIAQUE

Les myocytes automatiques présentent un **potentiel de repos instable** :

un courant entrant de sodium (courant i_f) provoque une dépolarisation spontanée, amenant progressivement le potentiel de membrane jusqu'au seuil d'ouverture des canaux voltage – dépendants.

On parle de dépolarisation diastolique automatique, du fait de l'instabilité du potentiel de repos. En effet, en dehors de tout stimuli extérieurs, les cellules nodales peuvent s'auto exciter jusqu'à dépolarisation complète, à une fréquence variable selon le type de cellules:

- 20 à 40 fois par minute environ pour le réseau de Purkinje (correspond à la fréquence du rythme d'échappement ventriculaire);
- 40 à 60 fois par minute pour les cellules du nœud atrio-ventriculaire;
- 70 à 80 fois par minute au niveau sinusal

Les ions Ca^{++} entrent alors dans la cellule, provoquant le potentiel d'action (figure 15 et 16).

Les myocytes contractiles ont un potentiel de repos stable.

Elles ne se dépolarisent donc que lorsque leur est imposée une dépolarisation provenant d'un myocyte automatique ou d'un myocyte contractile voisin.

Ce sont alors des canaux Na^+ rapides, voltage – dépendants, dont l'ouverture entraîne la dépolarisation brusque de la cellule.

L'ouverture plus progressive, mais aussi plus durable, de canaux Ca^{++} provoque un plateau de dépolarisation prolongée, caractéristique des cardiomyocytes contractiles.

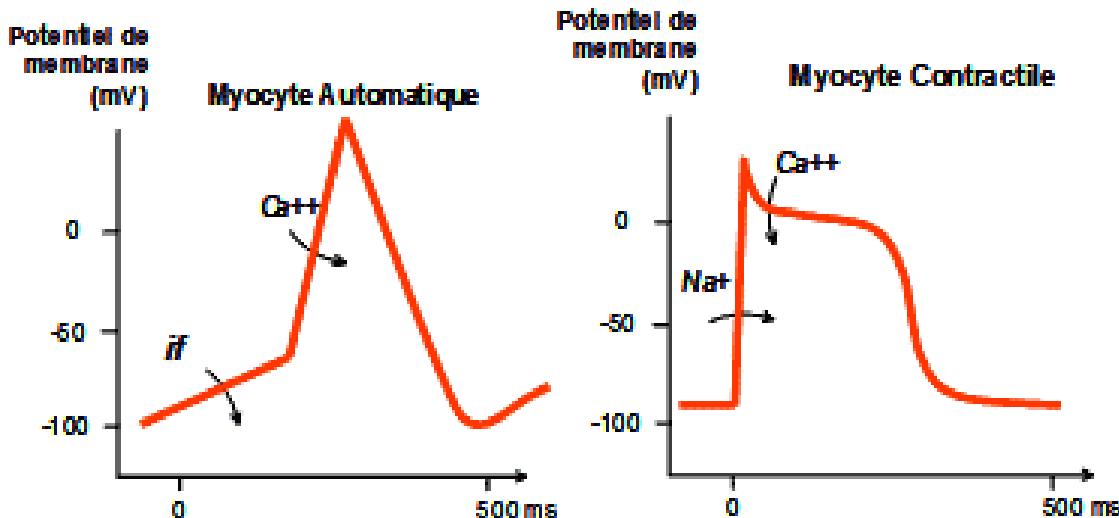


Figure 15: Le potentiel d'action d'une cellule cardionectrice et d'un cardiomyocyte contractile

Le potentiel d'action d'un cardiomyocyte contractile comprend 5 phases: les phases 0, 1, 2, 3 et 4.

Le potentiel d'action d'une cellule cardionectrice ne comprend que 3 phases : 0, 3 et 4.

• La phase 0

C'est la montée du PA. Elle est provoquée par une augmentation de la conductance au Ca^{++} . Cette augmentation provoque un courant entrant de Ca^{++} qui entraîne le potentiel d'action de la membrane vers le potentiel d'équilibre du Ca^{++} .

La base ionique de la phase 0 est différente de celle du ventricule (qui résulte d'un courant entant de Na^+).

• La phase 3

C'est la repolarisation. Elle est provoquée par une augmentation de la conductance en K^+ . Cette augmentation aboutit à un courant sortant de K^+ qui entraîne la repolarisation de la membrane.

• La phase 4

C'est la phase de repolarisation lente. Elle est due à une augmentation de la conductance au Na^+ qui aboutit à un courant entrant de Na^+ appelé I_f . I_f est déclenché par la repolarisation de la membrane pendant le PA qui précède.

• Les phase 1 et 2

Ces phases n'existent pas dans le PA du nœud SA.

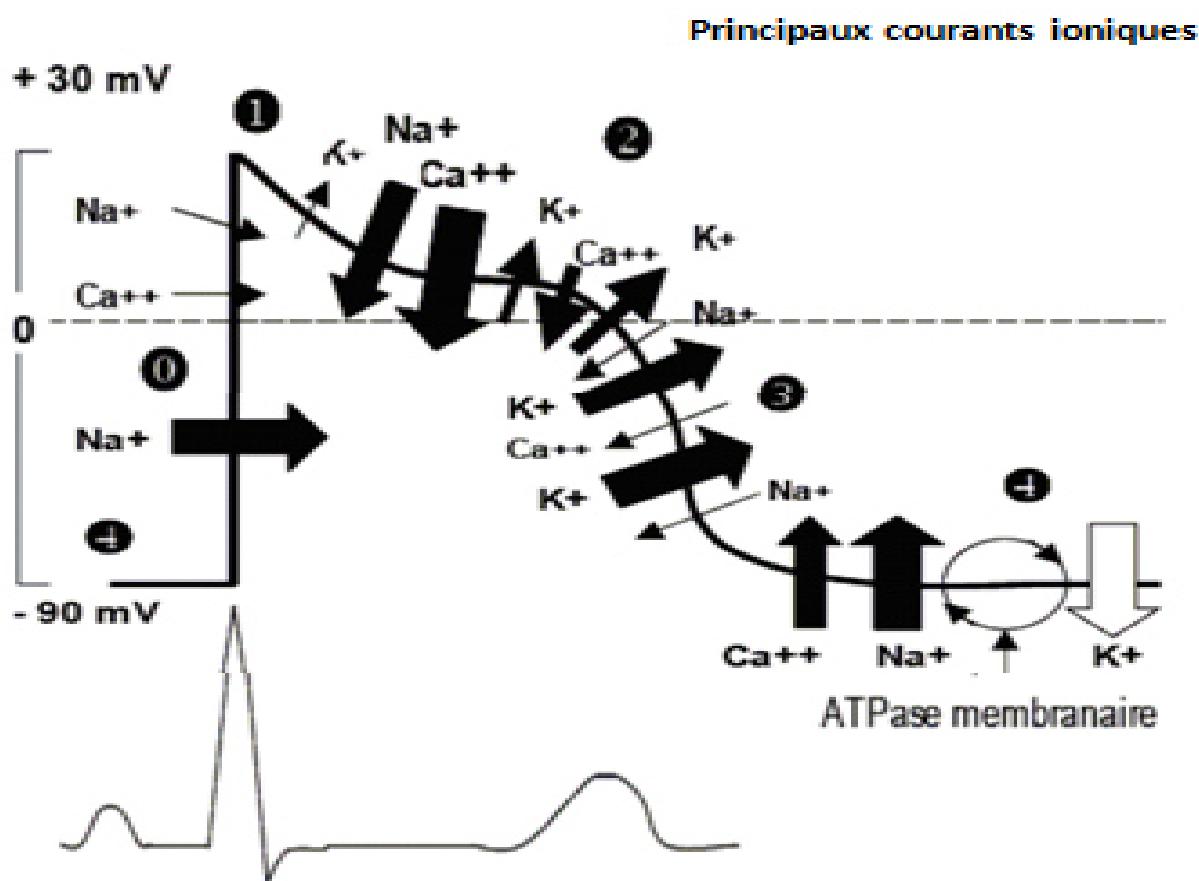


Figure 16: le potentiel d'action d'une cellule myocardique contractile (mouvements ioniques)

1. Le couplage excitation-contraction et relâchement du muscle cardiaque

La figure 17 montre comment se fait la contraction et le relâchement du cardiomyocyte contractile.

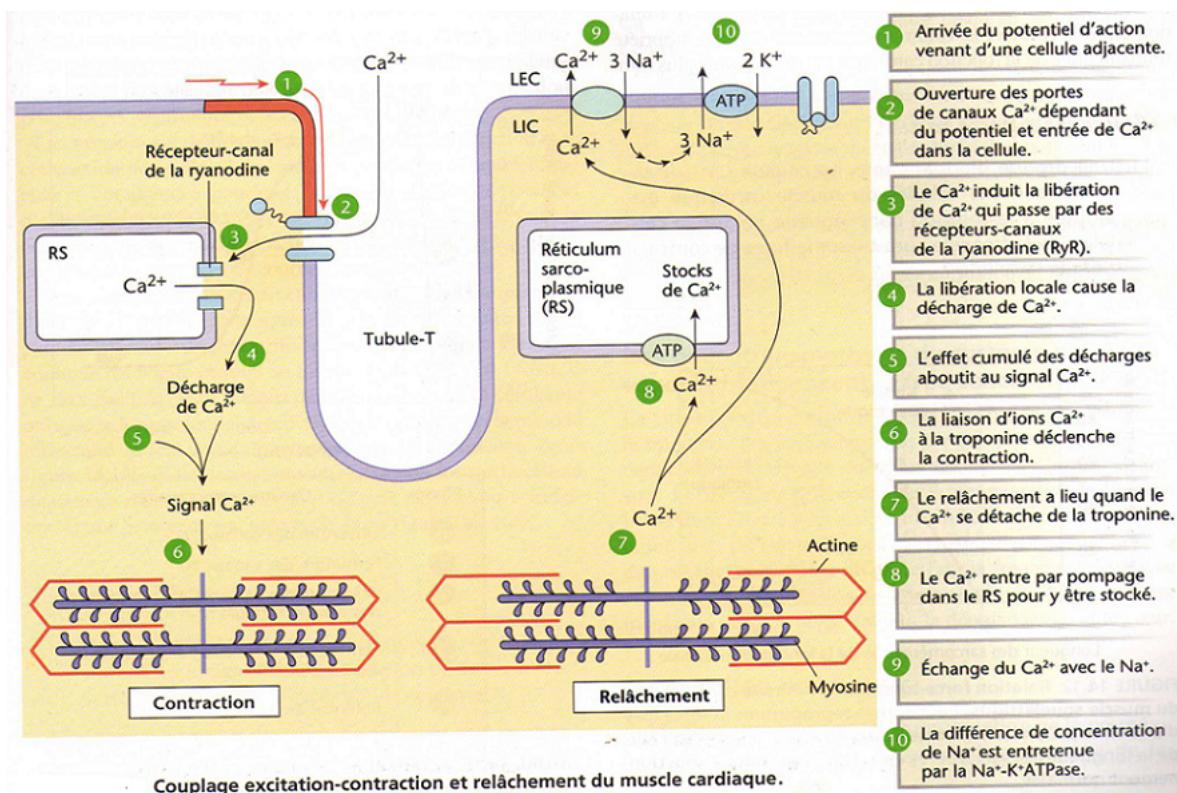


Figure 17 : Couplage excitation-contraction et relâchement du muscle cardiaque (Siverthorn, 2007)

2. L'électrocardiogramme (ECG)

Pour réaliser un ECG des électrodes de surface sont utilisées. C'est une méthode non invasive.

L'électrocardiographe est un appareil inventé par Willem Einthoven (Hollandais, invention 1895, prix Nobel 1924) qui enregistre et reproduit l'activité électrique du cœur sous forme d'**électrocardiogramme**. Le premier ECG en 1901 et la première commercialisation a eu lieu en 1911.

L'ECG nous renseigne sur la fréquence et le rythme cardiaque. Il nous renseigne également sur la vitesse de conduction et sur l'état du muscle cardiaque ou myocarde.

Le cœur est un organe automatique. Il est capable de battre en dehors du système nerveux central. Cet automatisme est lié au tissu nodal.

Le cœur se contracte parce qu'un stimulus prend naissance au niveau du nœud sinusal. Ce stimulus traverse d'abord les deux oreillettes puis passe par le nœud atrio-ventriculaire, les ventricules se contractent à leur tour. La figure 16 représente le tracé de l'ECG en dérivation I.

• L'onde P

Elle représente la dépolarisation du muscle auriculaire. Elle n'inclut pas la repolarisation auriculaire, qui est masquée par le complexe QRS.

L'oreillette droite se contracte légèrement avant l'oreillette gauche; ce qui explique que chez les grands animaux il y a un dédoublement de l'onde P.

- **L'intervalle PR**

C'est l'intervalle qui va du début de la dépolarisation auriculaire au début de l'onde Q (dépolarisation initiale du ventricule).

Il varie avec la fréquence cardiaque : l'intervalle PR diminue quand la fréquence cardiaque augmente.

- **Le complexe QRS**

Il représente la dépolarisation des ventricules.

- **L'intervalle QT**

C'est l'intervalle qui va du début de l'onde Q à la fin de l'onde T.

- **Le segment ST**

C'est le segment qui va de la fin de l'onde S au début de l'onde T.

Il représente la période pendant laquelle tout le muscle ventriculaire est dépolarisé.

- **L'onde T**

C'est la repolarisation ventriculaire.

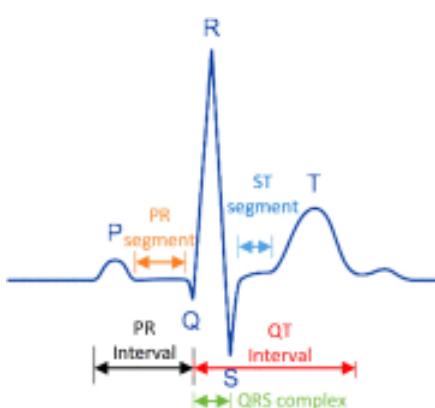


Figure 18 : Le tracé de l'ECG (Londhe et Atulkar, 2021)

Pour l'interprétation de l'ECG, l'intelligence artificielle a été utilisée tel que *Long short-term memory (LSTM)*.

L'interprétation des ondes ECG joue un rôle essentiel dans l'analyse des maladies cardiovasculaires. Par conséquent, de nombreuses approches semi-automatiques et entièrement automatiques utilisant des techniques avancées d'apprentissage automatique pour la détection des ondes ECG sont étudiées de manière exhaustive par les chercheurs. Les méthodes actuelles manquent de généralisation, de robustesse, de fiabilité et de mise en œuvre en temps réel. De plus, aucune des études existantes

n'avait présenté les informations relatives à la variabilité des dérivations qui sont des aspects impératifs à gérer pour une détection précise des ondes ECG. Dans cet article, les auteurs présentent une nouvelle approche de segmentation d'onde ECG appelée segmentation sémantique, un concept bien connu dans la segmentation d'image.

V. INNERVATION CARDIAQUE

Le cœur est un organe automatique sous la dépendance de 2 systèmes intrinsèque et extrinsèque. Le système intrinsèque est représenté par le système cardionecteur.

Le système extrinsèque est représenté par les nerfs: le nerf de Hering, le nerf de Cyon, nerf vague et nerf cardiaque (figure 19).

Le cœur bat en dehors du Système nerveux central (SNC) grâce au système cardionecteur. Le SNC module la fréquence cardiaque c'est à dire qu'il peut augmenter ou diminuer la fréquence cardiaque.

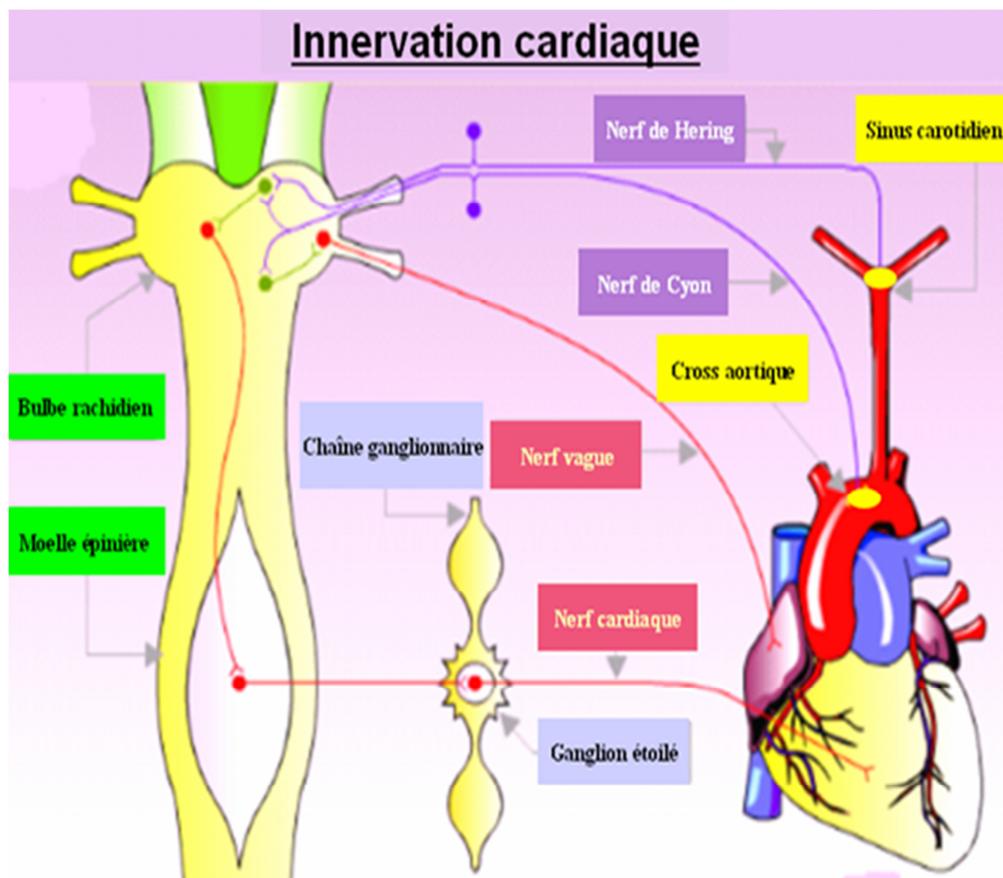


Figure 19 : Innervation cardiaque

Le système nerveux autonome (SNA) se divise en SN sympathique et SN parasympathique.

Effet du SN sympathique (Noradrénaline)

Chronotrope positif :

Il représente la variation de la fréquence cardiaque et est utilisé essentiellement pour qualifier un médicament : chronotrope positif comme la noradrénaline qui augmente la fréquence de décharge (PA) des cellules automatiques sinusoïdales.

Dromotrope positif : diminue le temps de conduction atrio-ventriculaire. (AV).

Inotrope positif : contraction plus forte et plus rapide.

Vasoconstriction périphérique : augmentation de la post-charge

Effet du parasympathique (SNP) Acétylcholine

Chronotrope négatif :

L'acétylcholine diminue la pente de la ddl (dépolarisation diastolique lente) des cellules automatiques sinusoïdales.

Dromotrope négatif : augmente le temps de conduction AV.

La régulation humorale

Hormones :

- l'adrénaline,
- l'angiotensine II (puissant vasoconstricteur),
- la thyroxine
- le facteur natriurétique auriculaire: est une hormone polypeptidique essentiellement synthétisée par l'oreillette droite .
- Elle participe à l'homéostasie du Na^+ , du K^+ et de l'eau en agissant sur l'excrétion rénale, et possède une action vasodilatatrice.

Les Ions : Ca^{++} , K^+ , Na^+ , Cl^- ...

En conclusion nous pouvons dire que le cœur est un organe complexe et perfectionné essentiel à la vie. Le système cardiovasculaire joue un rôle fondamental dans l'homéostasie du corps animal et humain.

BIBLIOGRAPHIE

1. BONNET G (2021). "Prothèses biologiques chirurgicales : des évolutions en continu". CHU de Bordeaux, Cardiologie.
2. CANON F (2016). "Physiologie des systèmes intégrés, les principes et fonctions". Université de Technologie de Compiègne.
3. CHASSOT P.G (2020). « Physiologie des systèmes intégrés, les principes et fonctions ». "La précharge et la loi de Frank Starling" – Unisciel, Précis d'Anesthésie Cardiaque 5.
<https://ressources.unisciel.fr/physiologie>.
4. CHOLLEY B. , PAYEN D. 'Retour veineux'. « Physiologie et implications cliniques ».
5. CONSTANZO L.S. (1995). PHYSIOLOGIE, chapitre 3: "Physiologie cardiovasculaire". 223p
6. FLENETT (2017). "Mesure non invasive de suivi des transfert de fluides liés aux activités cardiorespiratoires chez le rat : vers une « bague aortique virtuelle ». Thèse université Grenoble Alpes. 169p.
7. GOLDMAN S, CHEUNG A, BAVARIA J.E, MICHAEL R PETRACEK M.R, MARK A GROH MA, HARTZELL V SCHAFFMIDTERM H.V. (2017). "Midterm Multicenter clinical and hemodynamic results for the Trifecta aortic pericardial valve". J Thorac Cardiovasc Surg, 153(3):561-569.
8. GROSCH A, SAINT-REMY, KRZESINSKI J.M., "Variabilité de la pression artérielle : Curiosité Naturelle ou Phénomène à Maîtriser ?", Red Med Liège, pp.147-153, 2005.
9. GUYTON A.C. (1992). "Overview of the circulation; medical physics of pressure, flow, resistance, and vascular compliance". Human physiology and mechanisms of disease. Fifth ed. Saunders; 1992. p. 110-116.
10. KOSKI A. (1996). "Modelling ECG Signals with Hidden Markov Models", Artificial Intelligence in Medicine, vol. 8, pp. 453-471.
11. LALEG T.M, CREPEAU E, SORINE M. (2005). "Identification d'un compartiment Vasculaire et des caractéristiques de la pression et du débit aortiques". 2005, pp.58. inria-00000909.
12. Les Essentiels 2006, p. 399-410. (2006) Elsevier Masson SAS.
13. LONDHE A.N, ATULKAR M. (2021). Biomedical Signal Processing and Control. " Semantic segmentation of ECG waves using hybrid channel-mix convolutional and bidirectional LSTM". Vol 63, 102162. *Long short-term memory (LSTM)* est un réseau de neurones artificiels utilisé dans les domaines de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage en profondeur.

14. MERCADIER J.J, GOMEZ A.M , CROZATIER B. (2018). "Physiologie de la contraction et de la relaxation cardiaques". EM.consulte, Ed Elsevier Masson.
15. MERVOYER E. M (2009). "Création d'un outil informatique pour l'enseignement de la sémiologie cardiovasculaire aux étudiants de médecine". Thèse Université de Nantes Faculté de Médecine, 289p.
16. PONIKOWSKI P, VOORS A.A, ANKER S.D, BUENO H, CLELAND JGF, COATS A.J.S. *et al.* (2016). "Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure". Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure: The Task Force for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure of the European Society of Cardiology (ESC). Developed with the special contribution of the Heart Failure Association (HFA) of the ESC. Eur Heart J ; 37:2129-2200 41.
17. SANOGO S (2020). Chirurgie cardiaque : Bilan d'une année d'activité du centre André FESTOC au centre hospitalier Luxembourg « Mère – Enfant » de Bamako (Mali). Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako. 167p
18. SILVERTHORN D.U, Silverthorn A.C, Johnson B.R. (2007). « Physiologie humaine : Une approche intégrée ». Chapitre 14, "Physiologie cardiovasculaire". Ed Pearson Education France 916p.