

CHAPITRE 11 PHYSIOLOGIE DU SYSTEME
CARDIOVASCULAIRE

II. Physiologie du système cardiovasculaire

II.1. Développement embryonnaire du cœur

Le cœur, qui est dérivé du mésoderme, commence à se développer avant la fin de la troisième semaine de la grossesse. Son développement commence dans la région ventrale de l'embryon, sous l'intestin antérieur (**Fig.01**). La première étape correspond à la formation des tubes endothéliaux (endocardiques) à partir de cellules mésodermiques. Ces tubes s'unissent ensuite pour n'en former qu'un, le tube cardiaque primitif. Ensuite, ce dernier se divise en cinq régions : le ventricule, le bulbus cordis, l'oreillette, le sinus veineux et le tronc artériel. Etant donné que le bulbus cordis et le ventricule croissent par la suite plus rapidement que les autres composants, et que le cœur croît plus rapidement que ses attaches supérieure et inférieure, le cœur prend la forme d'un U et, par la suite, celle d'un S. Les courbures du cœur réorientent les régions, de cette façon, l'oreillette et le sinus veineux prennent une position supérieure par rapport au bulbus cordis, au ventricule et au tronc artériel. Les contractions du cœur primitif commencent le 22^{ème} jour. Elles partent du sinus veineux et expulse le sang dans le cœur tubulaire.

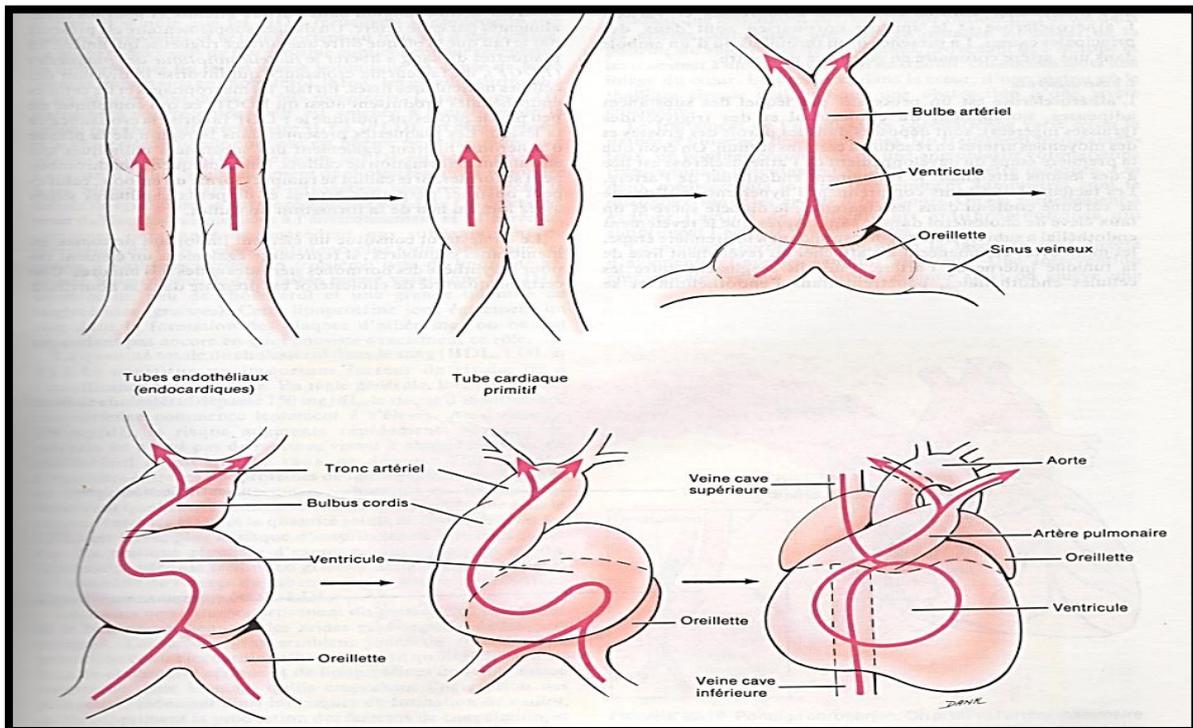


Fig. 01 : Développement embryonnaire du cœur.

(Les flèches rouges indiquent la direction du flux sanguin de l'extrémité veineuse à l'extrémité artérielle).

Vers la septième semaine de la grossesse, le septum interatrial, se forme dans la région atriale, et divise celle-ci en oreillette droite et gauche. L'ouverture du septum est constituée par le foramen ovale, qui se referme normalement après la naissance et forme une dépression appelée fosse ovale.

Un septum interventriculaire se développe également et divise la région ventriculaire en ventricule droit et gauche. Le bulbus cordis et le tronc artériel se séparent en deux vaisseaux, l'aorte (qui émerge du ventricule gauche et le tronc pulmonaire (qui émerge du ventricule droit). Les grosses veines du cœur, les veines caves supérieure et inférieure, se développent à partir de l'extrémité veineuse du tube cardiaque primitif (**Jean-Caud-parent.,Sandra Reynolds Grabowski.& Gerard.J.Tortora.,1999**).

II.1.2. Anatomie cardiaque normale

Le cœur est un organe creux contenant du sang. Il est pourvu de quatre cavités séparées par des structures appelées valves, aisément observables lorsque on réalise une coupe frontale de cet organe (*Christèle Manuelle.,2008*).

II.1.2.1. Cavités et valves cardiaque

➤ Les cavités cardiaques

Les cavités cardiaques font référence aux deux oreillettes situées dans la partie supérieure et aux deux ventricules localisés dans la partie inférieure du cœur (**Fig. 02**)

- **Les Oreillettes (ou atrium)**

Les oreillettes correspondent à de petites cavités, à paroi mince, dotées chacune d'un prolongement aplati et plissé appelé auricule (permettant d'accroître le volume de chaque oreillette). Chaque oreillette est en relation avec des vaisseaux sanguins dit afférents (des veines). En conséquence, les oreillettes constituent le point d'arrivée du sang en provenance de la circulation pulmonaire ou systémique.

- **Les ventricules**

Grande cavité à paroi épaisse, la surface interne des ventricules est pourvue de saillies musculaire nommées muscles papillaires (ou piliers). Ces derniers sont reliés aux valves auriculo-ventriculaires au moyen de structures appelées cordages tendineux. Les ventricules sont en relation avec des vaisseaux sanguins dits efférents (des artères). En conséquence, les ventricules constituent les points de départ du sang vers la circulation (pulmonaire ou systémique) ; en d'autres termes, ce sont la véritable « pompe » du cœur.

- Les septums (ou cloisons)

Chaque oreillette communique exclusivement avec le ventricule situé du même côté ; c'est pourquoi il est usuel de parler du « cœur droit » et du « cœur gauche ». Ainsi les deux oreilletes sont séparées l'une de l'autre par septum inter-auriculaire, tandis que les deux ventricules sont séparés par un septum inter-ventriculaire, D'un point de vue histologique, les septums sont formés par le myocarde.

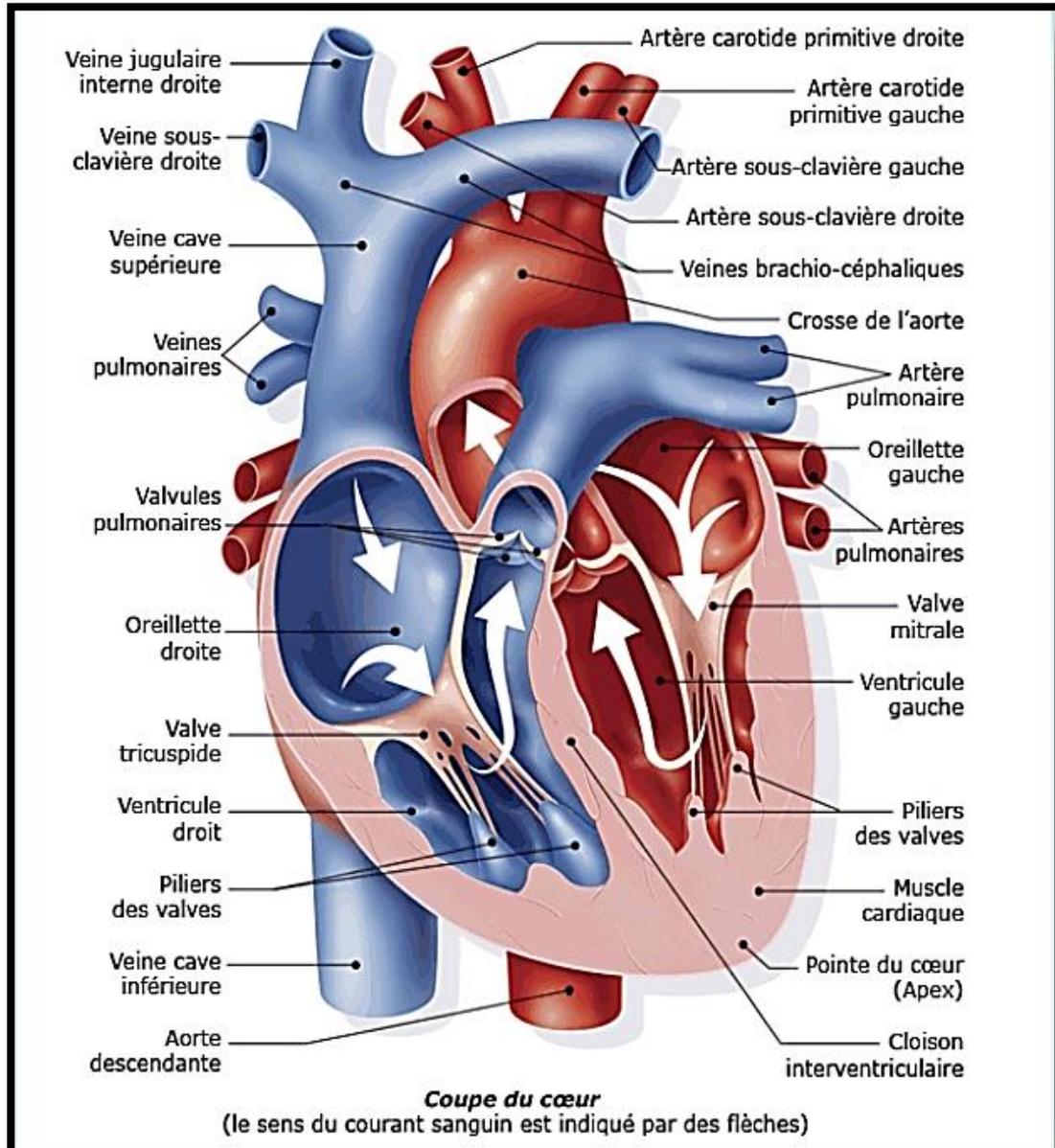


Fig.02 : Anatomie du cœur

➤ **Les valves cardiaques**

Insérées sur quatre anneaux continus de tissu conjonctif (le squelette fibreux), les valves cardiaques jouent le rôle de « clapet » s'ouvrant ou se fermant au cours de l'activité cardiaque (Fig.3).

- **Les valves auriculo-ventriculaires**

Localisé entre l'oreillette et son ventricule, les valves auriculo-ventriculaires ont la forme d'un entonnoir qui s'enfonce dans les ventricules. Elles sont constituées de lame flexible appelées valvules (ou cuspides) qui sont reliées aux muscles papillaires par les cordages tendineux. Ce dispositif, très spécifique empêche leurs éversions lorsque les ventricules se contractent. Ainsi, elles s'opposent au reflux du sang des ventricules vers les oreillettes.

- **Les valves sigmoïdes**

Localisées entre un ventricule et son vaisseau efférent, les valves sigmoïdes sont formées de trois valvules semi-lunaires en forme de pochette, elles s'opposent au reflux du sang des vaisseaux efférents vers les ventricules lorsque ces derniers sont au repos (Christèle Manuelle., 2008).

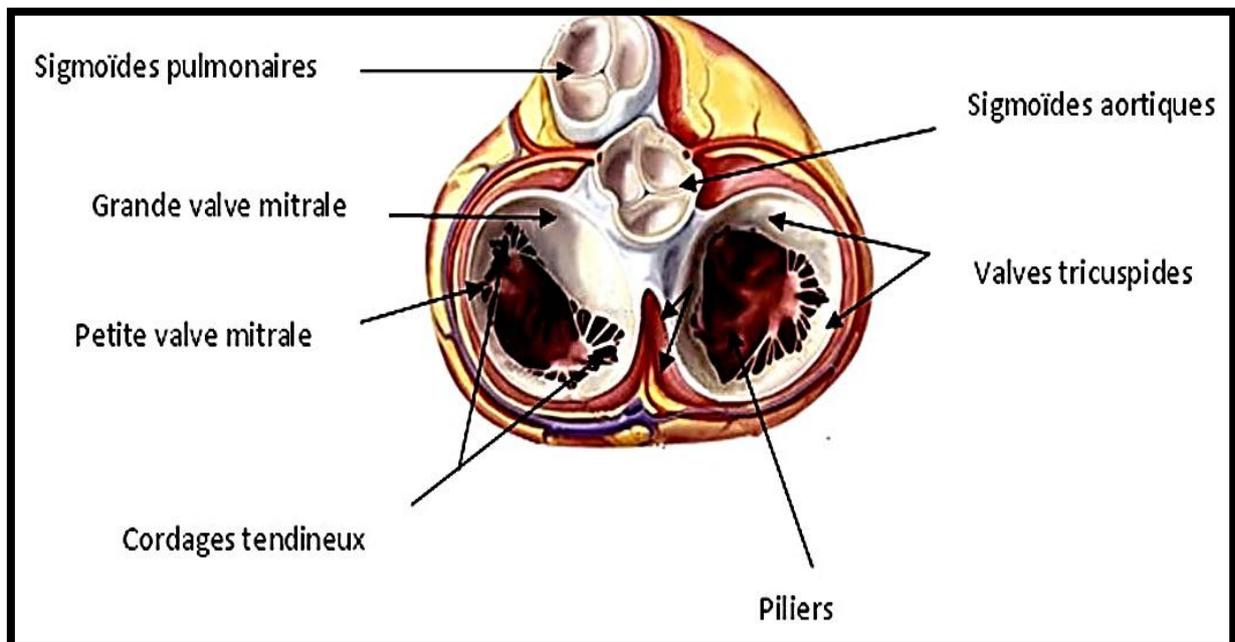


Fig.03 : Structure de l'appareil valvulaire.

II.1.2.2. Organisation du cœur droit et gauche

Tableau 1 : Elément constitutifs du cœur droit et du cœur gauche

	Cœur droit	Cœur gauche
Vaisseaux afférent	Veines caves supérieur et inférieurs Sinus carotidien	Veines pulmonaires
Cavités cardiaque supérieur	Oreillette droite	Oreillette gauche
Valves auriculo-ventriculaires	Valve tricuspide (formé de trois valvules)	Valve mitrale (formé de deux valvules)
Cavité cardiaque inférieur (apex)	Ventricule droit	Ventricule gauche
Valve sigmoïde	Valve sigmoïde pulmonaire (formé de 3 valvules)	Valve sigmoïde aortique (formé de trois valvules)
Vaisseaux efférent	Tronc pulmonaire qui se ramifie en deux artères pulmonaires	Aorte

II.1.2.3. Constitution de la paroi du cœur

La paroi du cœur se compose de trois couches tissulaires (**Fig.5**) portant les noms de : endocarde, myocarde et épicarde.

❖ L'endocarde

Constituant la tunique interne de la paroi cardiaque, l'endocarde est formé d'un endothélium. Il tapisse la face interne des cavités cardiaques et des valves cardiaques. Ce tissu endothélial forme un « revêtement » lisse qui s'oppose à l'apparition de turbulences lors du passage du sang.

❖ Le myocarde

Constituant la tunique moyenne de la paroi cardiaque, le myocarde est formé de tissu musculaire spécifique dont les cellules s'organisent en « ruban » nommés travées myocardiques. Ces enfilades cellulaires s'insèrent sur le squelette fibreux (situé autour des valves cardiaques). Entre les travées myocardiques, on rencontre du tissu conjonctif riche en capillaires sanguins et en fibres nerveuses (sympathique et parasympathique appartenant au système nerveux végétatif). D'un point de vue cytologique, toutes les cellules constitutives du myocarde ne sont pas identiques on distingue :

- **Les cardiomyocytes** : quantitativement les plus importants, les cardiomyocytes sont le support de la contraction cardiaque. Ils ont l'aspect d'un Y et se singularisent notamment par la présence de disques intercalaires (ou stries scalariformes) assurant d'une part une cohésion permanente entre les cardiomyocytes (via les desmosomes) et d'autre part une transmission rapide des influx nerveux entre les cardiomyocytes (via les jonctions ouvertes).

- **Les cellules cardionectrices** : constituant le système nerveux intrinsèque du cœur, elles sont responsables de l'automatisme cardiaque.

- **Les cellules myoendocrines** : elles sont à l'origine d'une hormone appelée facteur natriurétique auriculaire (ANF ou cadiodilatine) qui contribue à diminuer la pression artérielle en favorisant notamment le passage des ions de sodium dans les urines.

❖ L'épicarde

Constituant la tunique externe de la paroi cardiaque, l'épicarde correspond à l'un des feuillets constitutifs du péricarde séreux (l'enveloppe externe du cœur). Il est constitué d'un endothélium reposant sur une mince couche de tissu conjonctif. Il est séparé du myocarde par une couche sous-épicardique formée de tissu adipeux et renfermant des fibres nerveuses (appartenant au système végétatif) ainsi que les vaisseaux coronaires (les artères, les veines et leurs subdivisions) (*Christèle Manuelle.,2008*).

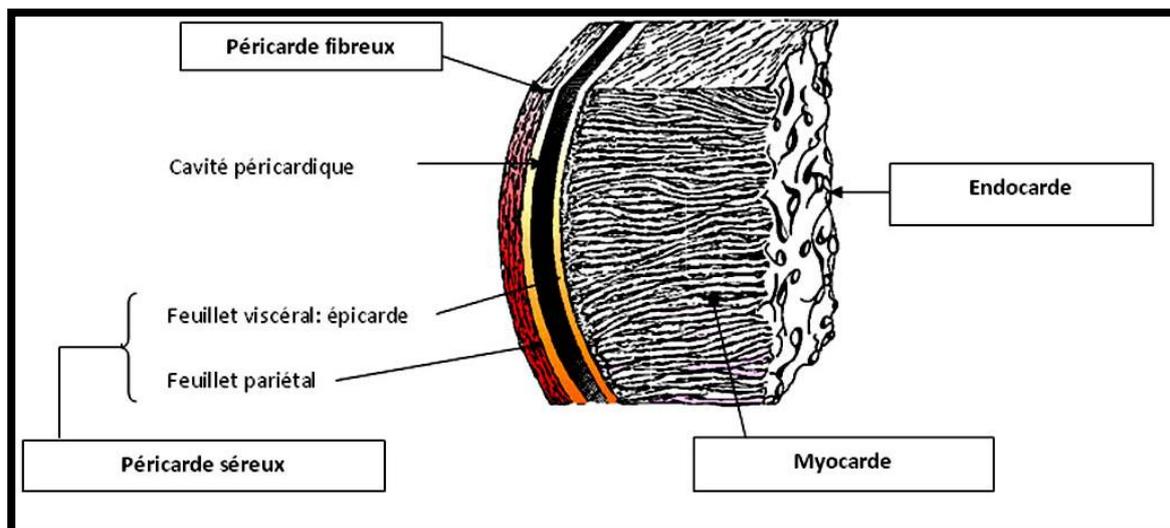


Fig.04 : Structure de la paroi du cœur (F. Netter, 2011)

II.1.3. Physiologie cardiaque

II.1.3.1. Automatisme cardiaque

Physiologiquement, le cœur doit se contracter à un rythme donné afin d'assurer son rôle de pompe. Comme tous les autres muscles de notre organisme, la contraction du myocarde est initiée par des influx nerveux (ou potentiel d'action) générés par un centre nerveux.

Expérimentalement, si on sectionne les différents nerfs parvenant au muscle cardiaque, plus ; or, il continue à battre à un rythme très soutenu. En conséquence, le cœur possède, en son sein, un centre nerveux appelé le système nerveux intrinsèque (ou tissu nodal) qui conditionne l'automatisme cardiaque.

➤ Constitution du système nerveux intrinsèque

D'un point de vue cytologique, le myocarde est formé de très nombreux cardiomyocytes impliqués dans la contraction du cœur et de quelques cellules très particulières nommées cellules cardionectrices constituant le système nerveux intrinsèque.

• Les cellules cardionectrices

Caractéristiques des cellules cardionectrices

Différents critères spécifient les cellules cardionectrices :

- ✓ Elles ne se contractent pas.
- ✓ Elles ont la capacité de générer elles-mêmes des influx nerveux selon une rythmicité donnée, c'est pourquoi on les qualifie de cellules auto-excitables.
- ✓ Elles conduisent ces influx nerveux.

Agencement des cellules cardionectrices

Ces cellules sont regroupées en amas ou en travées (**Fig.5**) en vue de former quatre structures ayant chacune un propre rythme :

- **Le nœud sinusal (ou nœud sino-atrial)** : situé dans la paroi de l'oreillette droite, au-dessous de l'entrée de la veine cave supérieure, le nœud sinusal est qualifié de **pacemaker naturel du cœur** du fait qu'il impose son rythme aux autres structures du système nerveux intrinsèque. En conséquence, le rythme normal d'un sujet au repos est appelé un **rythme sinusal**.
- **Le nœud auriculo-ventriculaire (ou nœud septal)** : situé dans la partie inférieure du septum inter-auriculaire, au-dessus de la valve tricuspide, le nœud auriculo-ventriculaire reçoit les influx nerveux émis par le nœud sinusal.

- **Le faisceau de His (ou faisceau auriculo-ventriculaire)** : partant du nœud auriculo-ventriculaire, le faisceau de His traverse le squelette fibreux puis se ramifie en deux branches qui parcourent le septum inter-ventriculaire.

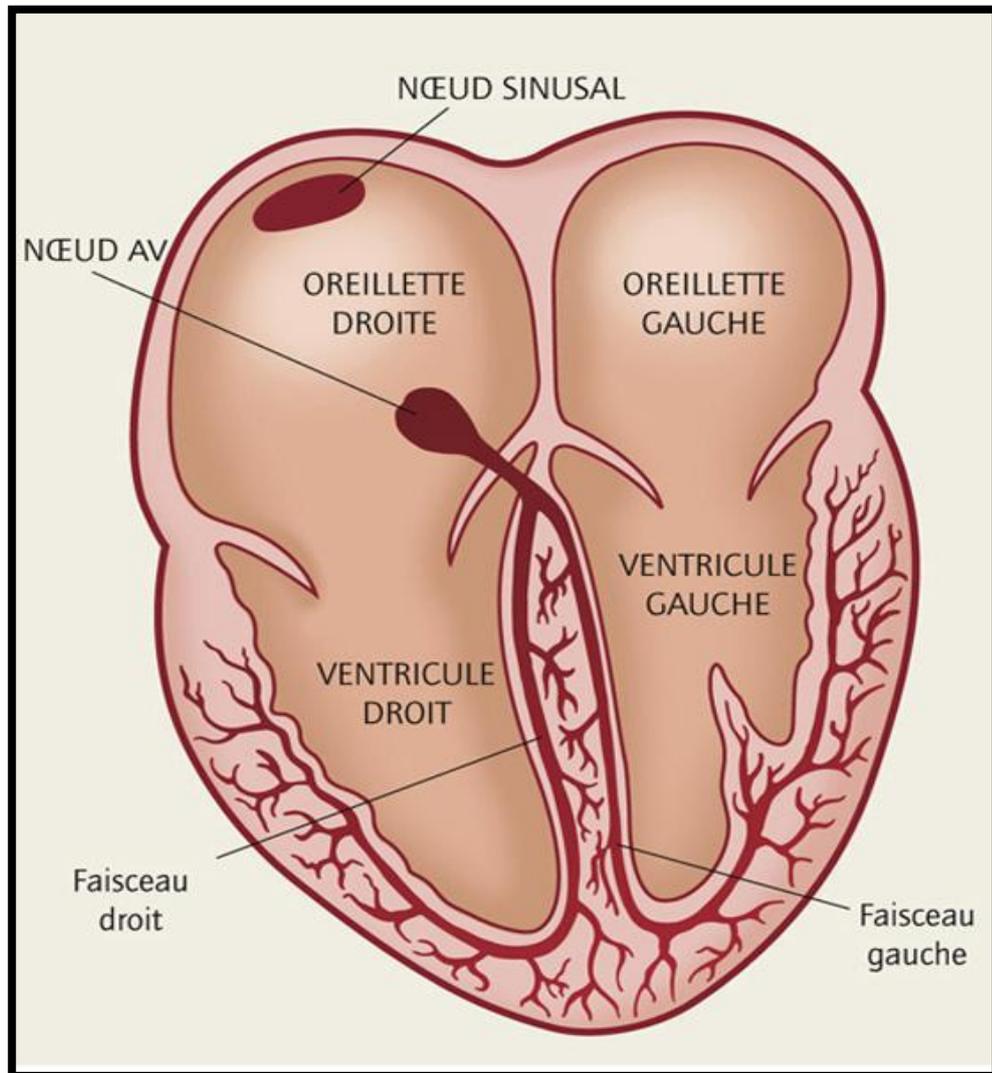


Fig. 5 : Conduction électrique du cœur

(Le schéma présente le tissu conducteur du cœur au niveau des oreillettes et ventricules droit et gauche : nœud sinusal et auriculo-ventriculaire (AV), faisceaux droit et gauche).

➤ **Fonctionnement du système intrinsèque**

Lorsque le nœud sinusal génère un influx nerveux celui-ci se propage progressivement au niveau des cardiomyocytes de l'oreillette droite puis de ceux de l'oreillette gauche grâce aux jonction ouvertes. Après un laps de temps très court, tous les cardiomyocytes auriculaires sont

stimulés ; on parle de dépolarisation auriculaire entraînant la contraction simultanée des deux oreillettes (c'est la systole auriculaire).

L'influx nerveux émis par le nœud sinusal ne peut pas se propager vers les cardiomyocytes ventriculaires en raison de la présence du squelette fibreux, jouant un véritable rôle de gaine isolante.. Durant cette période de conduction, les cardiomyocytes auriculaires commencent leur repolarisation c'est-à-dire qu'ils retrouvent leur polarisation initiale.

Finalement, l'influx nerveux parvenu aux apex ventriculaires se transmet à tous les cardiomyocytes ventriculaire grâce aux jonctions ouvertes ; on parle de dépolarisation ventriculaire entraînant la contraction simultanée des deux ventricules (c'est la diastole ventriculaire). A leur tour, les cardiomyocytes ventriculaires retrouveront leur polarisation initiale, ils se repolarise, afin qu'un nouveau cycle puisse s'opérer.

II.1.3.2. Le cycle ou révolution cardiaque

Lors de chaque contraction cardiaque, le sang est éjecté des ventricules dans les circulations pulmonaire et générale. Pour cela, la contraction réduit de manière brutale l'espace intérieur des cavités cardiaques si bien que le sang est expulsé (**Fig. 06**).

Finalement, la musculature se relâche, les cavités s'élargissent et se remplissent à nouveau de sang. Pendant le cycle cardiaque, les rapports de pression s'inversent de manière typique à l'intérieur du cœur.

Le cycle atrial

À côté des ventricules, les atriums travaillent aussi avec une alternance de contractions et de relaxations. Les contractions des ventricules et des atriums sont parfaitement coordonnées afin d'obtenir une performance d'éjection maximale.

Plus précisément, la musculature des atriums se contracte environ 0,12-0,20 seconde avant celle des ventricules, si bien qu'à la fin de la diastole la quantité de sang nécessaire a été poussée de manière active dans les ventricules.

Le cycle ventriculaire

Si l'on observe en détail le cycle ventriculaire, il est possible de le diviser en quatre phases (**Fig. 6**).

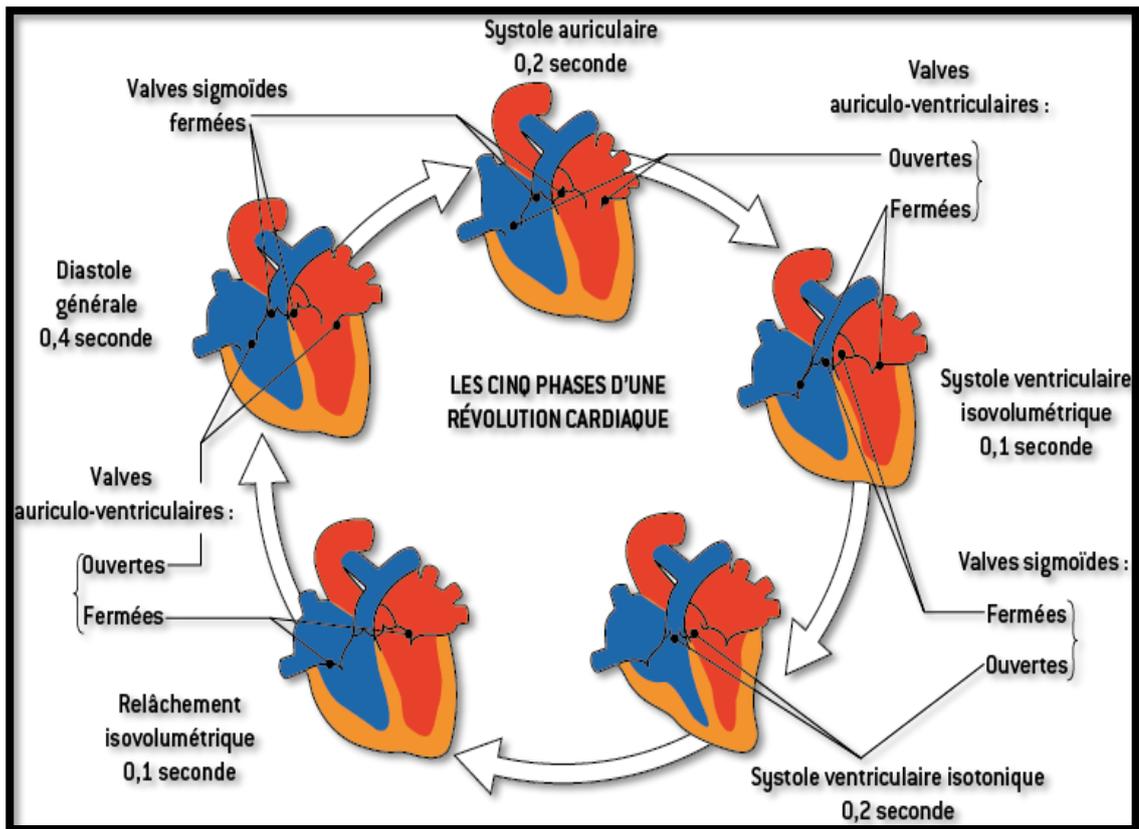


Fig. 06. Cycle ou révolution cardiaque

Les différentes phases de la systole ventriculaire sont :

- **Phase de contraction :** Les ventricules sont remplis de sang et les valvules atrio-ventriculaires sont déjà fermées. Une pression est exercée sur le sang par contraction du myocarde. La pression n'est pas encore suffisamment élevée pour repousser les valvules sigmoïdes.

- **Phase d'éjection :** La pression dans les ventricules dépasse maintenant la pression dans l'aorte et le tronc pulmonaire : les valvules sigmoïdes vont s'ouvrir et le sang sera éjecté dans les troncs artériels. À la fin de la phase d'éjection, les valvules sigmoïdes se referment car la pression dans les vaisseaux devient supérieure à celle dans les ventricules. La systole est terminée et la diastole commence.

Les différentes phases de la diastole ventriculaire

■ **Phase de relaxation** : Le relâchement du myocarde entraîne une diminution des pressions ventriculaires mais toutes les valvules restent encore fermées.

■ **Phase de remplissage** : Les pressions ventriculaires sont maintenant descendues en dessous de celles des atriums, les valvules atrio-ventriculaires sont ouvertes et le sang passe des atriums vers les ventricules. Ce phénomène est passif, la contraction des atriums évoquée précédemment ne contribue qu'à environ 10 à 20 % du remplissage des ventricules lorsque la fréquence cardiaque est normale. La phase de remplissage se termine avec la fermeture des valvules sigmoïdes, la nouvelle systole commence.

Le débit cardiaque

Par définition, le débit cardiaque (DC) correspond à la quantité du sang expulsée par le cœur dans le réseau vasculaire au cours d'un laps de temps donné.

Il dépend de deux paramètres :

- **Le volume d'éjection systolique** correspondant à la quantité de sang émise dans l'aorte ou le tronc pulmonaire à la suite d'une systole ventriculaire ;
- **La fréquence cardiaque** faisant référence au nombre de battements cardiaque par minute.

La relation entre le débit cardiaque et ces deux paramètres est définie par l'expression mathématique suivante (EQUATION 1)

$$DC = VES \times FC$$

Au repos : le volume d'éjection systolique (VES) est de 70mL/battement et la fréquence cardiaque (FC) est de 70 battements/minute

Equation 1 : relation entre le débit cardiaque, le volume d'éjection systolique et la fréquence cardiaque

Le débit cardiaque d'un sujet adulte au repos est de l'ordre de 5 litres par minute ; toutefois, il doit pouvoir s'adapter, en permanence, à nos besoins. Par exemple lors d'un exercice physique, il peut s'élever jusqu'à 25 litres par minute. Ainsi, on définit par réserve cardiaque la différence entre le débit maximal et le débit de repos, soit environ 20 litre.

Références bibliographiques

- [1] Bers, D. M. (2008). Calcium cycling and signaling in cardiac myocytes. *Annu. Rev. Physiol.*, 70, 23-49.
- [2] Abriel, H. (2010). Cardiac sodium channel Nav1. 5 and interacting proteins: physiology and pathophysiology. *Journal of molecular and cellular cardiology*, 48(1), 2-11.
- [3] Gellens, M. E., George, A. L., Chen, L. Q., Chahine, M., Horn, R., Barchi, R. L., & Kallen, R. G. (1992). Primary structure and functional expression of the human cardiac tetrodotoxin-insensitive voltage-dependent sodium channel. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(2), 554-558.
- [4] Tamargo, J., Caballero, R., Gómez, R., Valenzuela, C., & Delpón, E. (2004). Pharmacology of cardiac potassium channels. *Cardiovascular research*, 62(1), 9-33.
- [5] Petitprez, S., Zmoos, A. F., Ogrodnik, J., Balse, E., Raad, N., El-Haou, S., ... & Abriel, H. (2011). SAP97 and dystrophin macromolecular complexes determine two pools of cardiac sodium channels Nav1. 5 in cardiomyocytes. *Circulation research*, 108(3), 294-304.
- [6] Milstein, M. L., Musa, H., Balbuena, D. P., Anumonwo, J. M., Auerbach, D. S., Furspan, P. B., ... & Jalife, J. (2012). Dynamic reciprocity of sodium and potassium channel expression in a macromolecular complex controls cardiac excitability and arrhythmia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(31), E2134-E2143.
- [7] O'Malley, H. A., & Isom, L. L. (2015). Sodium channel β subunits: emerging targets in channelopathies. *Annual review of physiology*, 77, 481-504
- [8] Snyders, D. J. (1999). Structure and function of cardiac potassium channels. *Cardiovascular research*, 42(2), 377-390.