



PCEM1

THÈME IX

LA CIRCULATION

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-2017

www.fmt.rnu.tn

SOMMAIRE

3	ANATOMIE	
	LA CIRCULATION	4
	LE CŒUR	5
	VAISSEAUX DE LA CIRCULATION SYSTÉMIQUE	17
	VAISSEAUX DE LA CIRCULATION PULMONAIRE	24
	LE MÉDIASTIN	25
33	BIOPHYSIQUE	
	ÉCOULEMENT DES FLUIDES	34
	HÉMODYNAMIQUE	42
51	HISTOLO-EMBRYOLOGIE	
	HISTOLOGIE DE L'APPAREIL CIRCULATOIRE	52
	EMBRYOLOGIE DE L'APPAREIL CIRCULATOIRE	62
737	PHYSIOLOGIE	
	LE CŒUR	80
	- Propriétés électriques du cœur	80
	- ECG	82
	- Phénomènes mécaniques de la révolution cardiaque	89
	- Débit cardiaque	92
	LA CIRCULATION	96
	- Système haute pression	97
	- Système basse pression	101
	- Adaptation cardio-vasculaire à l'exercice	104

PCEM1

THÈME IX LA CIRCULATION

ANATOMIE

LA CIRCULATION

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

- Définir la circulation
- Décrire la circulation systémique
- Décrire la circulation pulmonaire

DÉFINITION :

La circulation est l'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins selon un circuit bien déterminé. On distingue en fait 2 circuits circulatoires :

LA CIRCULATION SYSTÉMIQUE (circulation générale ou grande circulation).

Le sang propulsé par le ventricule gauche s'écoule dans les artères systémiques pour être distribué dans les différents tissus et organes du corps au niveau de leur réseau capillaire où se font les échanges entre le sang et les cellules.

Le sang est par la suite récupéré par le système veineux et retourne au cœur au niveau de l'atrium (oreillette) droit par l'intermédiaire des 2 veines caves supérieure et inférieure, complétant ainsi la circulation générale.

LA CIRCULATION PULMONAIRE (ou petite circulation).

Elle fait suite à la grande circulation, le sang arrivé à l'atrium (oreillette) droit passe dans le ventricule droit puis l'artère pulmonaire et se distribue aux artéioles pulmonaires et enfin aux capillaires pulmonaires péri-alvéolaires où se font les échanges de gaz entre l'air et le sang, transformant le sang « veineux » en sang « artériel ».

Le sang « artériel » enrichi en oxygène passe à travers les veinules pulmonaires puis les 4 veines pulmonaires pour retourner à l'atrium (oreillette) gauche du cœur puis au ventricule gauche (son point de départ) bouclant ainsi ce double circuit sanguin.

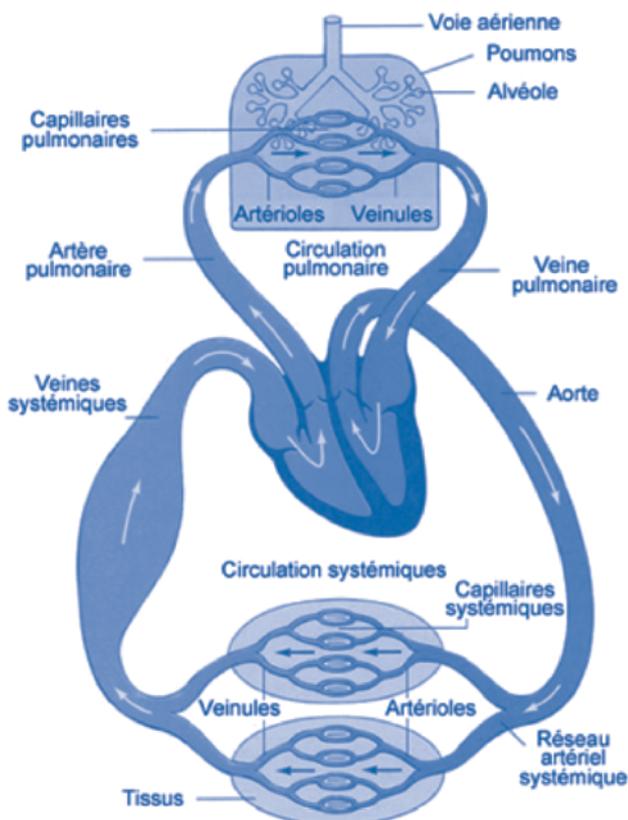


Figure n° 1 : Circulation

LE CŒUR

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

- Décrire la morphologie externe du cœur : forme, disposition des atriums (oreillettes) et des ventricules.
- Décrire les cavités cardiaques : forme, taille, parois, rapports.
- Identifier les structures valvulaires de la valve atrio-ventriculaire gauche (mitrale) : cuspides (valvules), anneau, cordages, piliers.
- Identifier les structures valvulaires de la valve atrio-ventriculaire droite (tricuspide) : cuspides (valvules), anneau, cordages, piliers.
- Reconnaître les orifices sigmoïdes aortiques et pulmonaires avec leurs cuspides (valves) et leurs rapports respectifs.
- Décrire les artères coronaires en précisant leur origine, leur trajet et leurs branches collatérales.
- Décrire les veines coronaires et le sinus coronaire.
- Décrire le péricarde séreux en précisant les lignes de réflexion du péricarde autour des pédicules artériel et veineux du cœur.
- Décrire l'innervation du cœur : innervation intrinsèque et extrinsèque.

INTRODUCTION

Le cœur est un organe musculaire situé dans le médiastin et composé de quatre cavités : 2 atriums (oreillettes) et 2 ventricules.

Le cœur est séparé en **cœur droit** (atrium droit et ventricule droit) et **cœur gauche** (atrium gauche et ventricule gauche) par la **cloison cardiaque ou septum**.

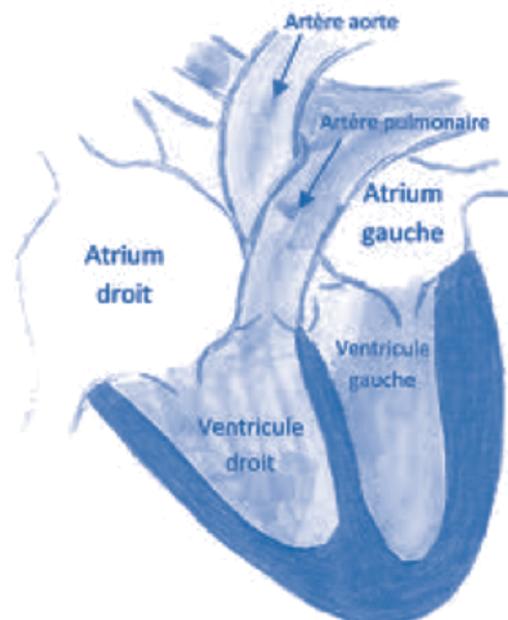
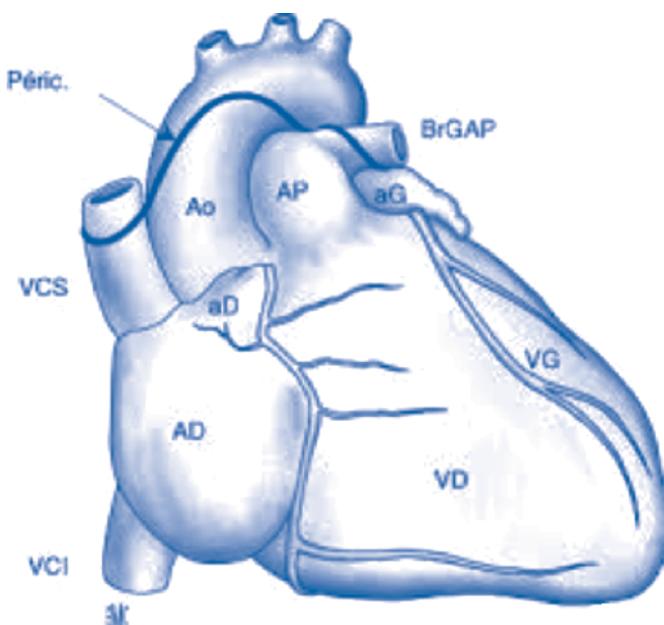
De chaque côté du septum, atrium et ventricule, communiquent par un orifice atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) : **orifice atrio-ventriculaire gauche (mitral)** à gauche et **orifice atrio-ventriculaire droit (tricuspide)**

à droite. Ces orifices sont pourvus de valves destinées à permettre l'écoulement du sang dans une seule direction et à empêcher le reflux du ventricule vers l'oreillette.

L'atrium droit (oreillette droite) reçoit les 2 veines caves supérieure et inférieure et le sinus coronaire (sang veineux du cœur).

L'oreillette gauche (atrium gauche) reçoit les 4 veines pulmonaires.

Des ventricules naissent l'**artère pulmonaire** à droite et l'**aorte** à gauche. Les orifices de ces artères comportent également des valvules : **les valvules sigmoïdes**.



1. CONFIGURATION EXTERNE DU CŒUR.

Le cœur a la forme d'une pyramide triangulaire à base postéro-supérieure et légèrement à droite, ses faces sont orientées selon un axe légèrement oblique en bas, en avant et à gauche avec une face inférieure qui repose sur le diaphragme, une face antéro-droite (qui répond au sternum) et une face postéro-gauche. Sa pointe ou apex repose sur le diaphragme pointant vers la gauche.

Le cœur présente des sillons :

- Le **sillon atrio-ventriculaire ou sillon coronaire** (auriculo-ventriculaire) : il entoure le cœur en couronne et sépare les étages atrial (auriculaire) et ventriculaire, c'est à son niveau que se trouvent les orifices atrio-ventriculaires (auriculo-ventriculaires).
- Les **sillons interventriculaires antérieur et postérieur** séparent les 2 ventricules.
- Le **tubercule inter-atrial (interauriculaire)** (en avant) et le **sillon inter-atrial (inter-auriculaire) postérieur** séparent les atriums (oreillettes)

Sur la face antérieure du cœur à la base des atriums (oreillettes), on trouve un étage horizontal où se trouvent les orifices de sortie de l'aorte et de l'artère pulmonaire, l'artère pulmonaire étant située en avant de l'aorte.

On distingue donc 3 étages :

- un étage supérieur atrial (auriculaire).
- un étage moyen vasculaire.
- un étage inférieur ventriculaire.

2. ANATOMIE INTERNE DU CŒUR.

Le cœur droit et le cœur gauche sont séparés par la cloison cardiaque ou septum.

2.1 LA CLOISON CARDIAQUE.

Formée de trois parties avec d'avant en arrière :

2.1.1 LA CLOISON INTERVENTRICULAIRE.

Triangulaire, étendue entre les faces antérieure et inférieure du cœur, elle est oblique, regardant en avant, à droite et en haut, elle est convexe bombant dans le ventricule droit. Elle présente deux parties :

- Une **portion musculaire** très étendue (les 9/10, épaisse de 1 cm).

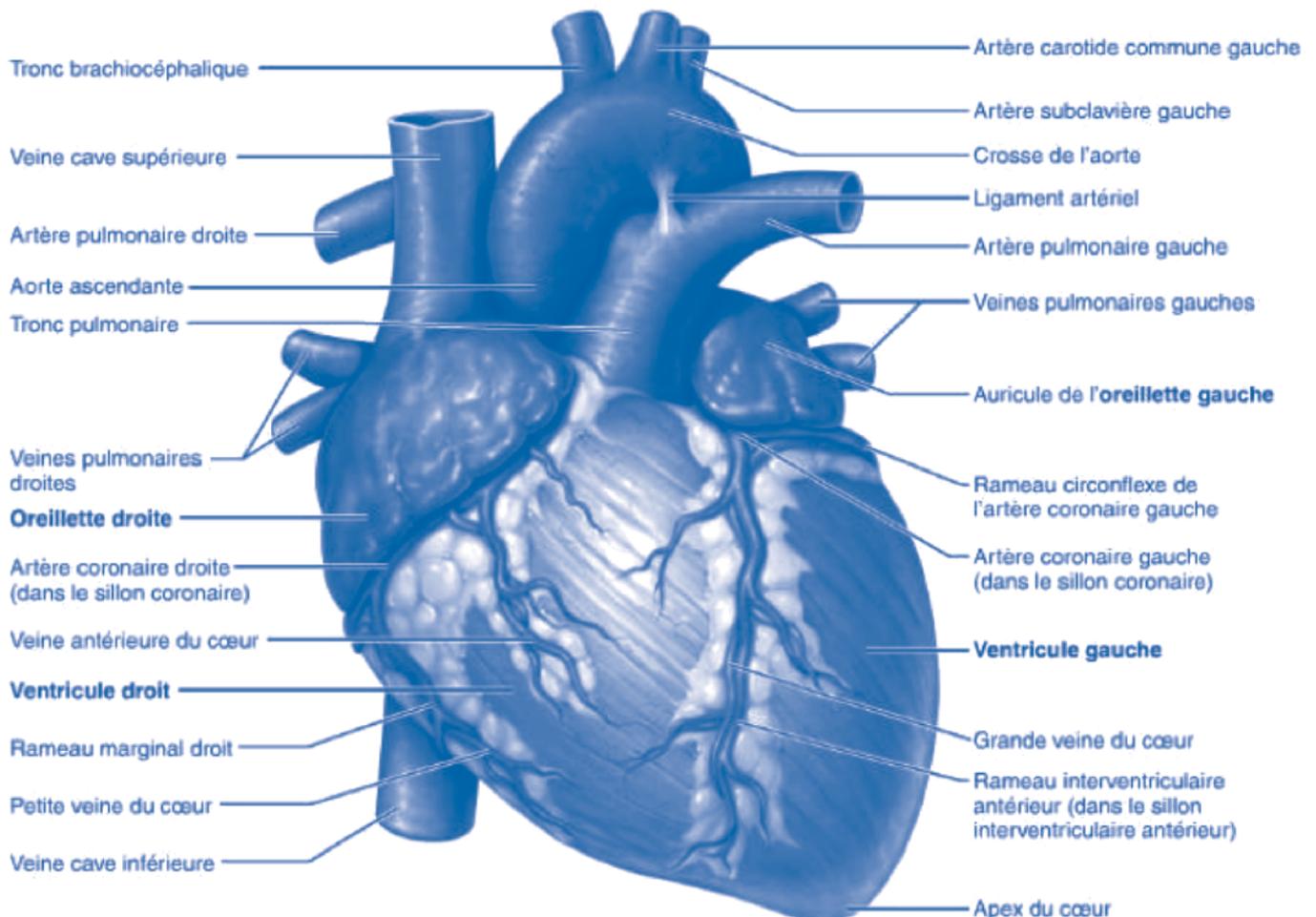
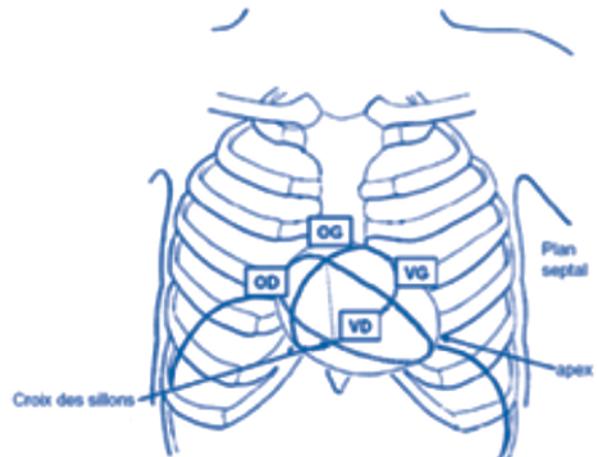


Figure n° 2 : Configuration externe du cœur

-Une **portion membraneuse** postérieure située sous la valve aortique et en regard de la grande valve atrio-ventriculaire gauche (mitrale) à gauche, à droite elle est masquée par la cuspside septale (valve interne) de la valve atrio-ventriculaire droite (tricuspide).

2.1.2 LE SEPTUM ATRIO VENTRICULAIRE.

Courte portion membraneuse comprise entre la cloison interventriculaire et la cloison inter-atriale (interaauriculaire), son bord antérieur donne attache à droite à la valve interne de la valve atrio-ventriculaire droite (tricuspide). Ce septum sépare l'atrium droit (oreillette droite) du ventricule gauche.

2.1.3 LA CLOISON INTER-ATRIALE (INTERAURICULAIRE).

Quadrilatère, très oblique, regarde en avant, à droite et en haut, c'est une cloison mince de 2,5 mm d'épaisseur.

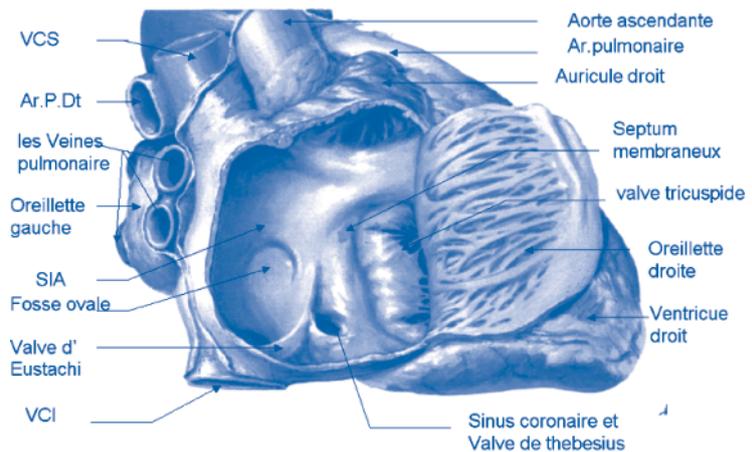


Figure n° 4 : Vue latérale de l'atrium droit ouvert

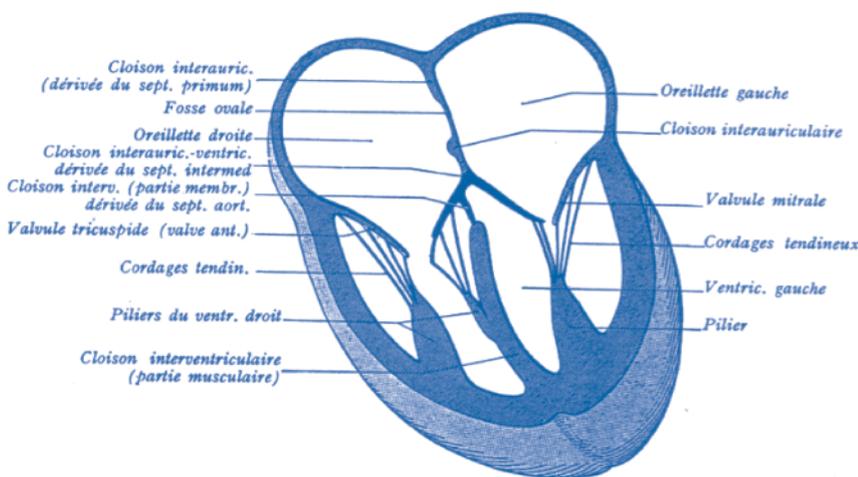


Figure n° 3 : Coupe demi-schématique montrant la cloison cardiaque

2.2 CŒUR DROIT

2-2-1 L'ATRIUM DROIT (OREILLETTE DROITE).

Elle a une forme ovoïde.

- L'orifice de la veine cave supérieure s'ouvre au niveau de la paroi supérieure de l'oreillette (atrium)
- L'orifice de la veine cave inférieure et celui du sinus coronaire débouchent au niveau de la paroi inférieure de l'atrium droit (oreillette droite).

L'orifice de la veine cave inférieure présente un repli valvulaire en forme de croissant : **la valvule de la veine cave inférieure (d'Eustachi).**

L'orifice du sinus coronaire, situé en avant et en dedans de l'orifice de la veine cave inférieure présente également un repli valvulaire : **la valvule du sinus coronaire (de Thébesius).**

- La paroi antérieure correspond à l'orifice atrio-ventriculaire droit (tricuspide), au-dessus de cet orifice on trouve l'orifice de l'auricule droit qui est un prolongement diverticulaire qui communique avec l'atrium (oreillette).
- La paroi postérieure lisse, présente à sa partie moyenne, une saillie, le **tubercule interveineux (de Lower).**
- La paroi interne correspond à la cloison inter atriale, elle présente un anneau fibreux : limbe de **la fosse ovale (anneau de Vieussens)**, qui entoure une dépression : **la fosse ovale.**

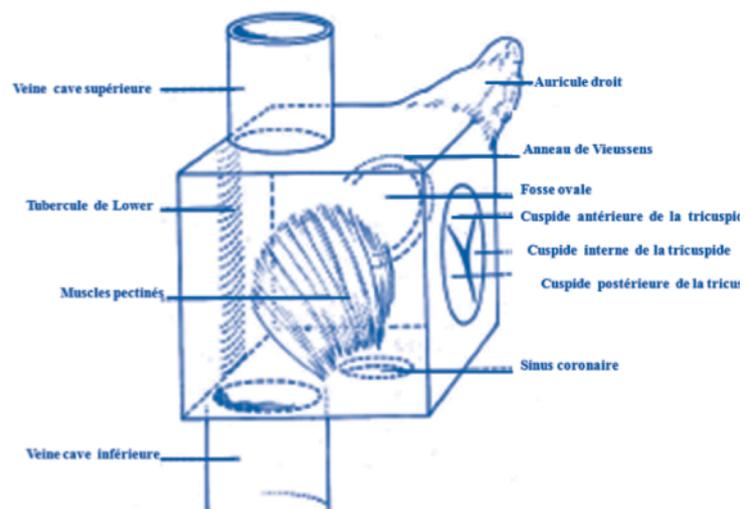


Figure n° 5 : Représentation schématique de l'atrium droit

2.2.2. LE VENTRICULE DROIT.

Il a la forme d'une pyramide triangulaire. On lui décrit 3 parois, un sommet et une base.

- La paroi antérieure : répond à la face sterno-costale
- La paroi inférieure : répond à la face diaphragmatique du cœur
- La paroi interne : convexe, formée par la cloison inter-ventriculaire.

De nombreuses colonnes charnues ou muscles papillaires, qui constituent les piliers des valves (muscles papillaires de 1er ordre) sont implantées sur les parois du ventricule.

Un pont musculaire (colonne charnue de 2e ordre) constitue le **trabécule sépto-marginal (bandelette ansiforme)** qui s'implante par son extrémité inférieure sur la paroi antérieure du VD et par son extrémité supérieure sur la paroi interne du VD au-dessus et en avant de l'infundibulum. Cette bandelette est reliée aux parois interne et antérieure du ventricule par de petites colonnes charnues.

La base du ventricule droit est occupée par l'orifice atrio-ventriculaire droit (tricuspide) et l'orifice de l'artère pulmonaire avec leurs valves.

L'orifice atrio-ventriculaire droit (tricuspide) occupe la partie inférieure de la base de l'atrium droit (oreillette droite), il est vertical et regarde en arrière et à droite.

En haut et en avant, le ventricule droit émet un diverticule en forme d'entonnoir dont le sommet est occupé par l'orifice pulmonaire, c'est l'**infundibulum pulmonaire** ou **cône artériel** dont la paroi interne présente une saillie : **crête supra-ventriculaire (éperon de Wolff)** qui limite en bas et en arrière l'entrée de l'infundibulum.

L'orifice pulmonaire est situé à l'extrémité supérieure de l'infundibulum, au-dessus, en avant et un peu à gauche de l'orifice atrio-ventriculaire droit (orifice tricuspide), il regarde en haut, en arrière et à gauche. Il est situé en avant de l'orifice aortique.

Sur le plan hémodynamique, la cavité ventriculaire droite est divisée en 2 chambres :

- Une chambre d'entrée ou de remplissage postéro-inférieure, oblique de l'orifice tricuspide (orifice atrio-ventriculaire droit) à la pointe.
- Une chambre artérielle (ou chambre de chasse) antérieure dirigée de bas en haut et de droite à gauche vers l'infundibulum.

Ces 2 chambres sont séparées par la valvule (cuspide) antérieure de la tricuspide (valve atrio-ventriculaire droite), ses cordages, ses 2 piliers et le trabécule sépto-marginal (bandelette ansiforme).

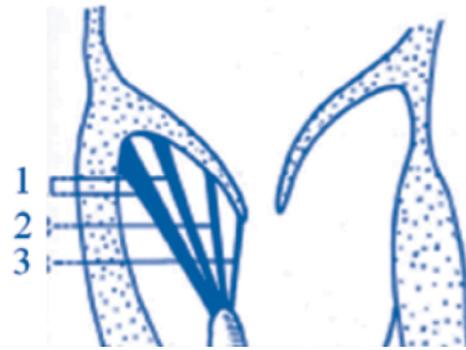


Figure n° 7 : Les colonnes charnues

2-2-3 L'APPAREIL VALVULAIRE ATRIO-VENTRICULAIRE DROIT (TRICUSPIDIEN).

Constitue la valvule atrio-ventriculaire droite (tricuspide) comporte :

- L'anneau atrio-ventriculaire droit (tricuspide) : anneau fibreux qui circonscrit l'orifice atrio-ventriculaire droit (tricuspide)
- La valvule atrio-ventriculaire droite (tricuspide) : formée par 3 cuspidés (valves) triangulaires fixées par leur base à l'anneau tricuspide, elles répondent aux 3 parois du ventricule : cuspide (valve) antérieure, cuspide (valve) inférieure, et cuspide septale (interne).
- L'appareil sous-valvulaire : les cuspidés (valves) s'attachent par des cordages à des piliers implantés sur les faces ventriculaires.
 - * Le pilier antérieur de la valvule atrio-ventriculaire droite (tricuspide) : se détache de la partie moyenne de la face antérieure, de sa base par l'extrémité inférieure du trabécule sépto-marginal (bandelette ansiforme).
 - * **Le muscle papillaire du cône artériel (de Luschka)** : naît de la paroi interne du ventricule sous l'infundibulum au niveau de l'extrémité supérieure de la bandelette ansiforme (trabécule sépto-marginal).
 - * **Les muscles papillaires de la cloison** : petites co-

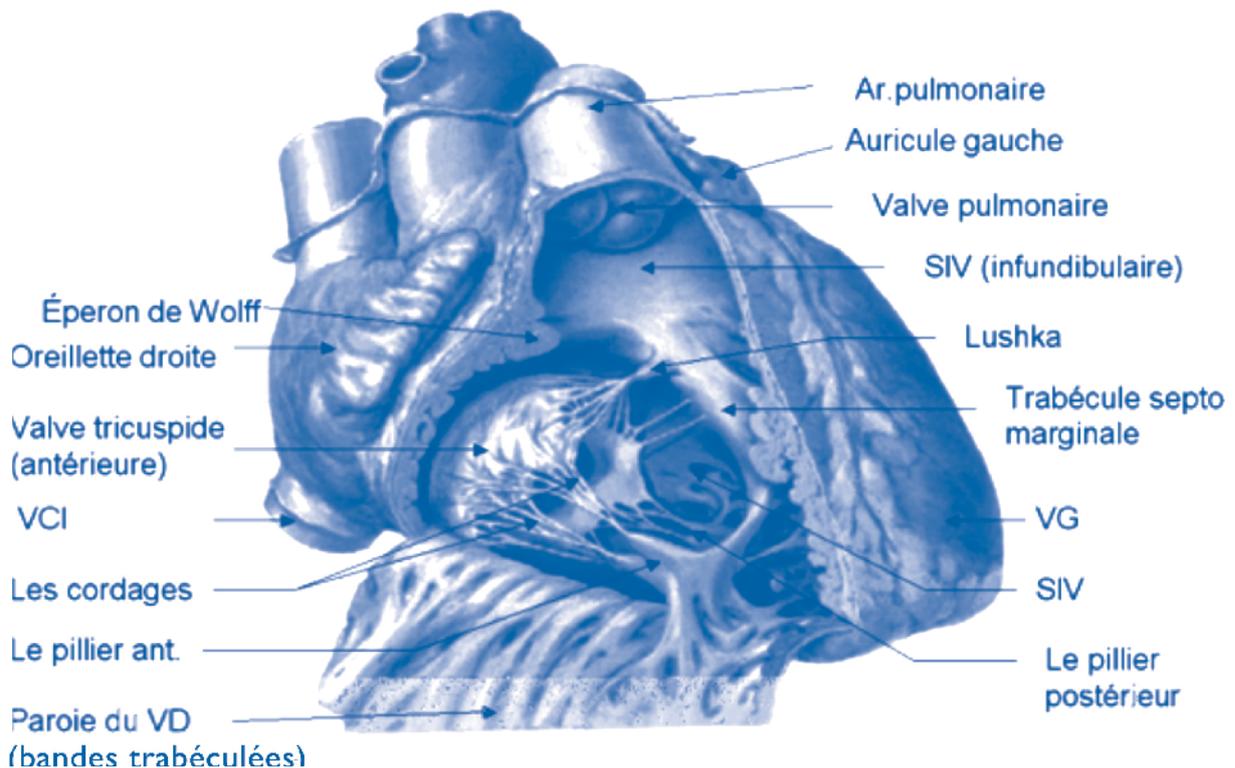
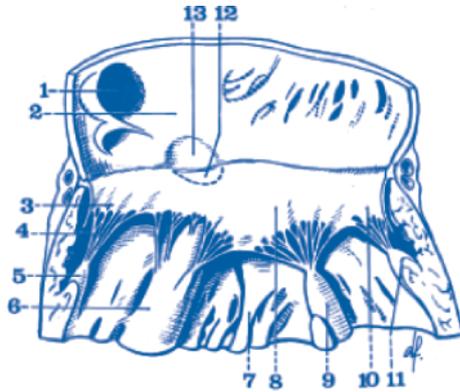


Figure n° 6 : Configuration interne du VD

lonnes charnues situées sur la paroi interne sous le muscle du cône artériel.

* **Les muscles papillaires inférieurs** : situés sur la paroi inférieure du ventricule.

- La cuspside (valve) antérieure s'attache par ses cordages sur le pilier antérieur et sur le muscle du cône artériel.
- La cuspside (valve) inférieure s'attache sur les piliers inférieurs.
- La cuspside (valve) septale sur les muscles papillaires de la cloison.



L'orifice tricuspide ouvert et étalé (d'après Netter)

1. Orifice de la veine cave inférieure.
2. Atrium droit.
3. Cuspside interne de la tricuspide.
4. Cordages tendineux.
5. Pilier postérieur (sectionné).
6. Pilier interne.
7. Bandelette ansiforme.
8. Cuspside antérieure de la tricuspide.
9. Pilier antérieur.
10. Cuspside postérieure de la tricuspide.
11. Pilier postérieur (sectionné).
12. Portion membraneuse de la cloison inter-ventriculaire.
13. Septum atrio-ventriculaire.

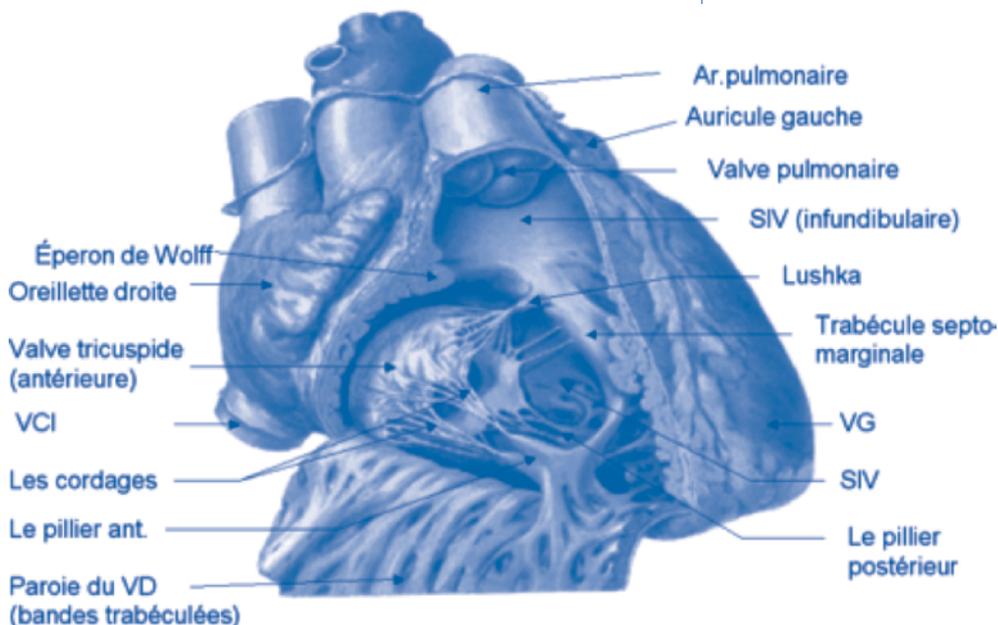
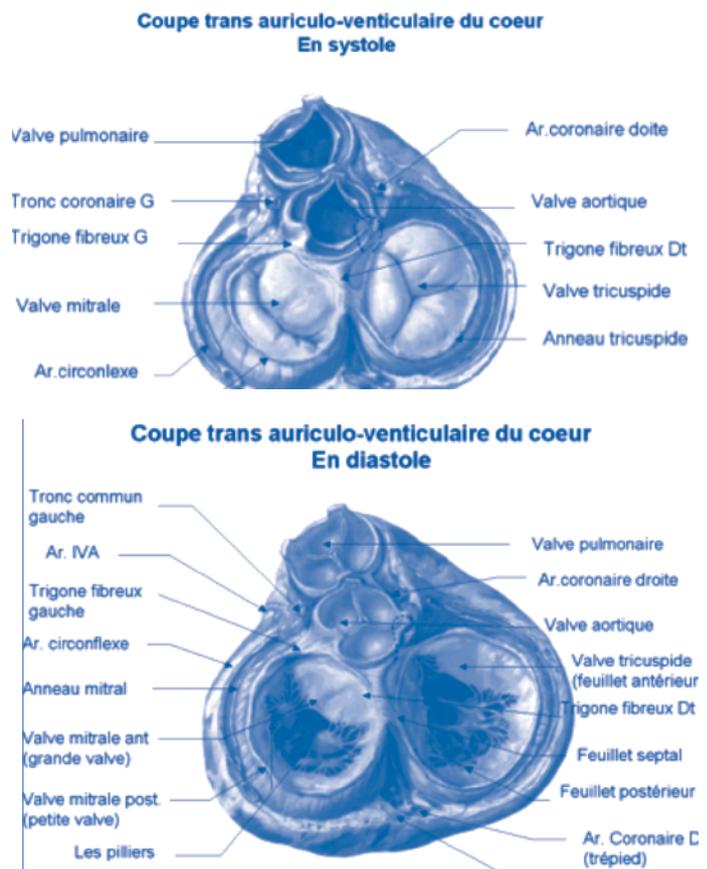
Figures 8 et 9 : Appareil valvulaire tricuspide

2-2-4 L'ORIFICE PULMONAIRE.

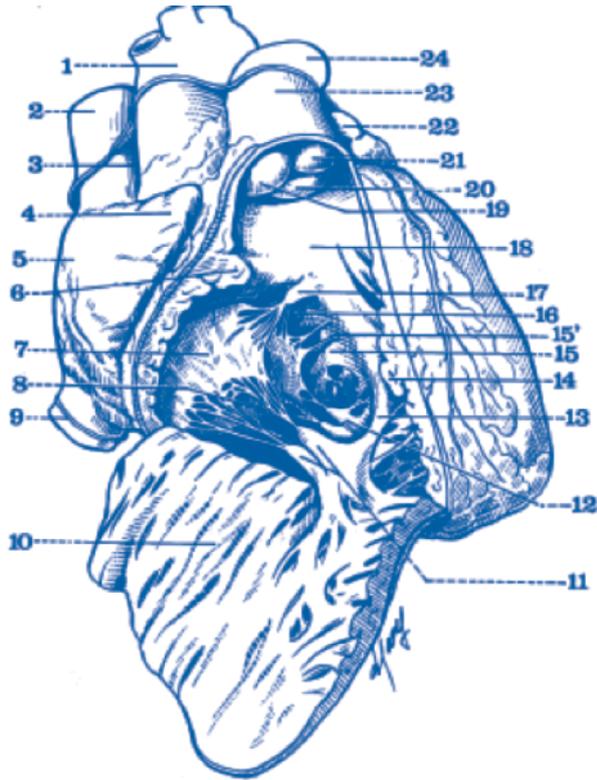
Comporte un anneau fibreux pourvu de 3 valvules : les cuspsides (valvules) sigmoïdes qui sont de minces replis membraneux en demi-lune qui délimitent des poches en « nid de pigeon » avec la paroi artérielle sur laquelle ils s'insèrent par leur bord adhérent, leur bord libre présente un nodule fibreux à sa partie moyenne (nodule de Morgani). La face supérieure ou pariétale de ces cuspsides (valvules) est concave et leur face inférieure ou axiale est convexe.

On distingue une cuspside (valvule) antérieure, une cuspside (valvule) postéro-droite et une cuspside (valvule) postéro-gauche.

Figures 10 et 11 : Disposition et constituants de l'orifice pulmonaire



Figures 12 : Disposition et constituants de l'orifice pulmonaire



Vue latérale du ventricule droit ouvert (d'après Netter)

1. Crosse de l'aorte.
2. Veine cave inférieure.
3. Orifice droit du sinus de Thelle.
4. Auricule droite.
5. Atrium droit.
6. Eperon de Wolff.
7. Cuspide antérieure de la tricuspide.
8. Cuspide postérieure de la tricuspide.
9. Veine cave inférieure.
10. Paroi antérieure du ventricule droit.
11. Pilier antérieur.
12. Pilier postérieur.
13. Bandelette ansiforme.
14. Section de la paroi ventriculaire.
15. Pars musciosa.
- 15'. Muscle de Lancisi.
16. Pars membranacea.
17. Muscle papillaire du cône artériel.
18. Cône artériel (infundibulum).
19. Valvule sigmoïde droite.
20. Valvule sigmoïde gauche.
21. Valvule sigmoïde antérieure.
22. Auricule gauche.
23. Tronc de l'artère pulmonaire.
24. Bifurcation pulmonaire.

2-3 CŒUR GAUCHE.

2-3-1 L'ATRIUM (OREILLETTE) GAUCHE : irrégulièrement arrondie, sur sa paroi postérieure s'ouvrent les 4 orifices des veines pulmonaires.

L'auricule gauche, prolongement diverticulaire de l'atrium (oreillette) s'ouvre à l'union entre la paroi externe et la paroi antérieure.

La paroi interne constituée par la cloison présente à sa partie supérieure le **repli arqué** situé sous l'orifice de l'auricule et à sa partie moyenne le **repli semi-lunaire** et au-dessous de ce repli la dépression ovale.

La paroi antérieure correspond à l'orifice atrio-ventriculaire gauche (mitral).

2-3-2 LE VENTRICULE GAUCHE : À une forme de cône légèrement aplati transversalement avec 2 parois, un sommet et une base.

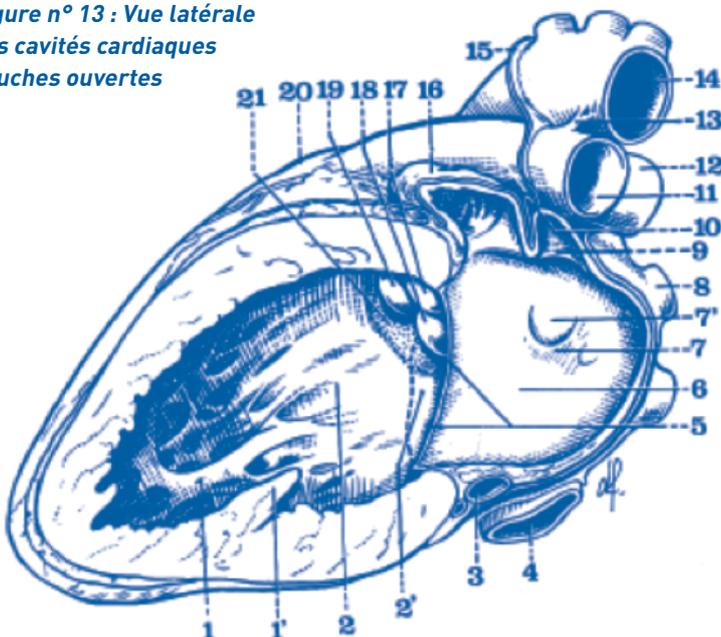
Les 2 parois : septale ou interne (correspond à la cloison interventriculaire) et latérale ou gauche sont concaves, leur épaisseur est en moyenne de 1 cm (0,5 cm pour le ventricule droit).

Les parois sont réunies le long de 2 bords arrondis : antéro-supérieur et postéro-inférieur.

La base du ventricule gauche est occupée par les orifices atrio-ventriculaire gauche (mitral) et aortique et leurs cuspidés (valvules).

L'orifice atrio-ventriculaire gauche (mitral), placé à la

Figure n° 13 : Vue latérale des cavités cardiaques gauches ouvertes



1. Colonnes charnues de la paroi interne.
- 1'. Pilier postérieur (sectionné).
2. Cloison inter-ventriculaire (portion musculaire).
- 2'. Septum atrio-ventriculaire.
3. Sinus coronaire.
4. Veine cave inférieure.
5. Section de l'anneau mitral.
6. Atrium gauche.
7. Repli semi-lunaire.
- 7'. Dépression ovale.
8. Veine pulmonaire supérieure droite.
9. Veine pulmonaire supérieure gauche (sectionnée).
10. Pli vestigial de Marshall.
11. Artère pulmonaire gauche.
12. Artère pulmonaire droite.
13. Ligament artériel.
14. Crosse de l'aorte.
15. Ligne de réflexion du péricarde.
16. Auricule gauche.
17. Valvule sigmoïde gauche.
18. Valvule sigmoïde postérieure.
19. Valvule sigmoïde droite.
20. Infundibulum pulmonaire.
21. Cloison inter-ventriculaire (portion membraneuse).

partie inférieure de la base, à gauche de l'orifice atrio-ventriculaire droit (tricuspide) regarde en arrière, à droite et légèrement en haut.

L'orifice aortique est situé en avant et à droite de l'orifice atrio-ventriculaire gauche (mitral), en arrière de l'orifice pulmonaire, il regarde, en haut, à droite et en arrière.

La cavité ventriculaire gauche est divisée en deux par la grande valve atrio-ventriculaire gauche (mitrale) :

- Une chambre d'entrée ou de remplissage inféro-externe qui répond en arrière à l'orifice atrio-ventriculaire gauche (mitral).
- Une chambre artérielle (ou chambre de chasse) : gouttière verticale entre la grande valve et la cloison interventriculaire, qui aboutit au canal aortique.

2-3-3 L'APPAREIL VALVULAIRE ATRIO-VENTRICULAIRE GAUCHE (MITRAL).

La valvule atrio-ventriculaire gauche comporte :

- L'anneau atrio-ventriculaire gauche (mitral) : anneau fibreux qui circonscrit l'orifice atrio-ventriculaire gauche (mitral).

- La valvule atrio-ventriculaire gauche (mitrale) : formée de 2 valves quadrilatères.

* La grande valve (cuspidé septale) ou valve interne (ou valve droite) s'attache sur la moitié supéro-droite de l'anneau atrio-ventriculaire gauche (mitral), en regard de la cloison interventriculaire.

* La petite valve (cuspidé pariétale) ou valve externe (ou valve gauche) s'attache sur la moitié inféro-gauche de l'anneau atrio-ventriculaire gauche (mitral) en regard de la face latérale du ventricule.

- L'appareil sous-valvulaire atrio-ventriculaire gauche (mitral) : les valves s'attachent par des cordages à deux piliers.

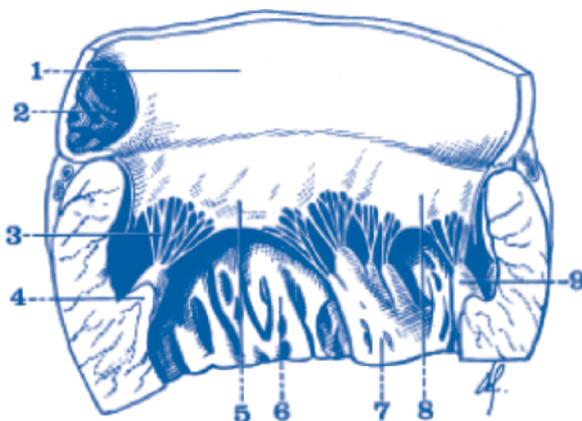
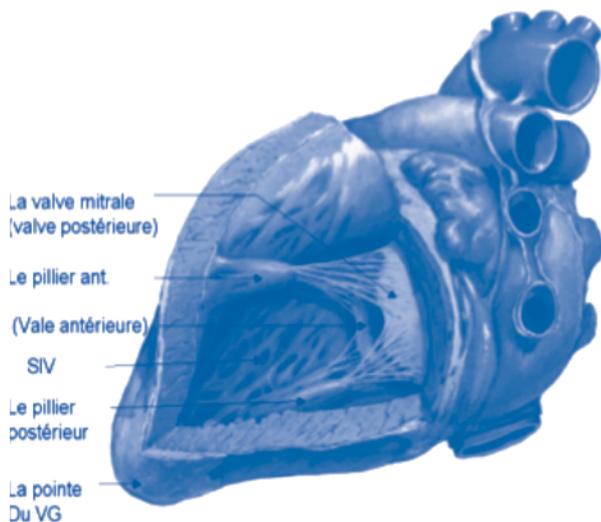
* **Le pilier antérieur** de la mitrale naît du bord antéro-supérieur du ventricule à l'union tiers antérieur, tiers-moyen du ventricule.

* **Le pilier postérieur** de la valve atrio-ventriculaire gauche (mitrale) se détache du bord postéro-inférieur près du sommet du ventricule.

2-3-4 L'ORIFICE AORTIQUE : Comporte un anneau fibreux pourvu d'un appareil valvulaire fait de 3 valvules sigmoïdes identiques à celles de la valve pulmonaire.

Les nodules fibreux du bord libre s'appellent ici nodules d'Arantius.

Les 3 valvules aortiques sont postérieures, antéro-droite et antéro-gauche.



- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. Atrium gauche. | 6. Colonnes charnues du ventricule gauche. |
| 2. Auricule gauche. | 7. Pilier postérieur. |
| 3. Cordages tendineux. | 8. Cuspide postérieure de la mitrale. |
| 4. Pilier antérieur (sectionné). | 9. Pilier antérieur (sectionné). |
| 5. Cuspide antérieure de la mitrale. | |

Figure n° 14 : appareil valvulaire mitral

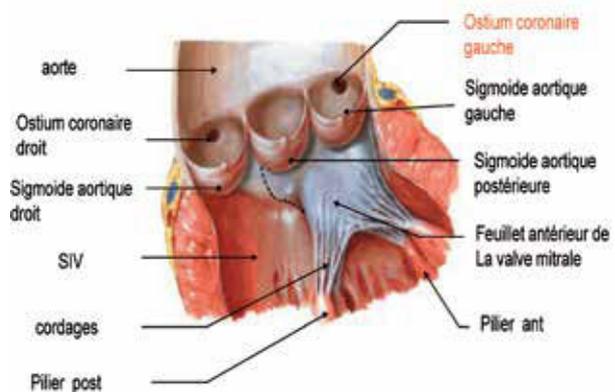


Figure n° 15 : Orifice aortique

3. VASCULARISATION DU CŒUR.

3.1 ARTÈRES DU CŒUR.

Le cœur est vascularisé par les 2 artères coronaires : droite et gauche.

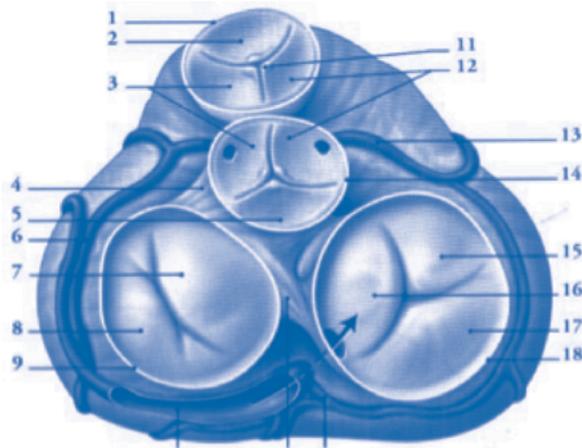
Ces artères naissent des ostia coronaires au niveau du segment initial de l'aorte ascendante juste au-dessus de l'anneau aortique.

→ L'ostium coronaire gauche est situé au dessus de la cuspidé (valve) sigmoïde aortique antéro-gauche

→ L'ostium coronaire droit est situé au dessus de la cuspidé (valve) sigmoïde antéro-droite de l'aorte.

Au cours de la systole ventriculaire les cuspidés (valves) sigmoïdes s'accolent contre la paroi aortique et

masquent les orifices des artères coronaires, ces orifices sont libérés au cours de la diastole quand la valve se referme permettant à la circulation coronarienne de se faire pendant la diastole.



- | | |
|--|--|
| 1. anneau fibreux de l'ostium de l'a. pulmonaire | 11. nodule d'une valve semi-lunaire |
| 2. valvule semi-lunaire ant. | 12. valvules semi-lunaires droites |
| 3. valvules semi-lunaires gauches | 13. a. coronaire droite |
| 4. trigone fibreux gauche | 14. anneau fibreux de l'ostium aortique |
| 5. valvule semi-lunaire post. | 15. cusptide ant. |
| 6. branche circonflexe de l'a. coronaire gauche | 16. cusptide septale |
| 7. cusptide ant. | 17. cusptide post. |
| 8. cusptide post. | 18. anneau fibreux atrio-ventriculaire droit |
| 9. anneau fibreux atrio-ventriculaire gauche | 19. a. du nœud atrio-ventriculaire |
| 10. sinus coronaire | 20. trigone fibreux gauche |

Figure n° 16 : Vue supérieure du cœur après section des atriums

3-1-1 L'ARTÈRE CORONAIRE GAUCHE : elle se place après sa naissance de l'ostium coronaire gauche dans le sillon entre l'artère pulmonaire et l'auricule gauche et se divise à l'extrémité supérieure du sillon interventriculaire antérieur en deux branches terminales.

- * l'artère interventriculaire antérieure.
- * l'artère atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) gauche ou circonflexe.

a- L'artère interventriculaire antérieure (I.V.A.) et ses collatérales.

Elle descend le long du sillon interventriculaire antérieur, contourne la pointe du cœur et se termine dans le sillon interventriculaire inférieur près de la pointe. L'interventriculaire antérieure est à destinée ventriculaire elle donne :

- Des artères ventriculaires droites :
 - * a. ventriculaires droites antérieures : 4 à 5, courtes et grêles.
 - * a. ventriculaires droites inférieures : région apicale du ventricule droit.
- Des artères ventriculaires gauches constantes, volumineuses et longues
 - * artères ventriculaires gauches antérieures : 4 à 8 avec
 - un groupe basal : les 2 ou 3 premières : artères diagonales la plus importante étant la première diagonale.
 - un groupe apical : 4 à 5 branches.

* artères ventriculaires gauches inférieures en nombre variable selon la longueur de l'I.V.A., habituellement courtes et grêles.

- Des artères septales ou perforantes qui pénètrent dans l'épaisseur du septum interventriculaire, ce sont les artères septales antérieures : les plus importantes, 12 à 15. La première septale irrigue la région sous aortique et le septum membraneux. La 2e septale irrigue le faisceau atrio-ventriculaire (de His).

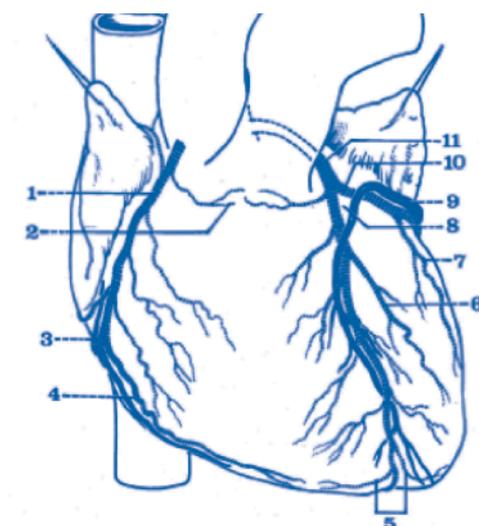
b- L'artère atrio-ventriculaire ou circonflexe gauche et ses collatérales.

Cette artère suit le sillon atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) gauche, puis le sillon interventriculaire inférieur où elle se termine à une hauteur variable.

L'artère circonflexe est destinée à l'atrium (oreillette) gauche et aux ventricules.

Elle donne dans son segment atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) :

- Des branches atriales (auriculaires)
 - * l'artère atriale gauche (auriculaire gauche supérieure), vascularise la face supérieure de l'atrium (oreillette) gauche, cloison inter-atriale (interaauriculaire), parois de l'aorte et de l'artère pulmonaire.
 - * l'artère atriale (auriculaire) gauche latérale vascularise la paroi latérale de l'atrium (oreillette) gauche.
 - * l'artère atriale (auriculaire) gauche inférieure.
 - * des rameaux s'enfonçant dans le sillon atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire).
 - Des branches ventriculaires :
 - * artère latérale du ventricule gauche qui chemine le long de la face latérale du ventricule gauche.
 - * artères ventriculaires gauches inférieures : 2 à 3.
- Le segment interventriculaire inférieur de la circonflexe donne :
- * des branches ventriculaires droites.
 - * des branches ventriculaires gauches
 - * et des branches septales.



- | | |
|---|---|
| 1. Artère coronaire droite. | 9. Grande veine coronaire. |
| 2. Artère graisseuse droite (de Vieussens). | 10. Artère circonflexe. |
| 3. Veine de Galien. | 11. Artère coronaire gauche. |
| 4. Artère du bord droit. | |
| 5. Branches de l'artère apexienne antérieure. | |
| 6. Artère diagonale. | |
| | 7. Artère marginale (ou du bord gauche). |
| | 8. Triangle vasculaire de Brocq et Mouchet. |

Figure n° 17 : Vue antérieure des vaisseaux coronaires.

3-1-2 L'ARTÈRE CORONAIRE DROITE OU ATRIO-VENTRICULAIRE (AURICULO-VENTRICULAIRE) DROITE.

Après sa naissance de l'ostium coronaire droit, elle part à droite de l'artère pulmonaire, se place dans le sillon atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) droit qu'elle contourne jusqu'au sillon interventriculaire inférieur où elle se divise en ses branches terminales dont l'une se place à la face postérieure du ventricule gauche c'est l'artère rétroventriculaire gauche.

Elle donne des branches atriales (auriculaires) et des branches ventriculaires.

a - Branches atriales (auriculaires) :

- Artère atriale (auriculaire) droite supérieure : pour l'auricule droit, la face supérieure de l'atrium (oreillette) droit et la cloison inter-atriale (interauriculaire), elle donne un rameau pour le nœud sinu-atrial (sinusal de Keith et Flack)
- Artère atriale (auriculaire) droite latérale pour la face latérale de l'atrium (oreillette) droit.
- Artère atriale (auriculaire) droite inférieure.

b- Branches ventriculaires :

- Artère ventriculaire droite antérieure au nombre de 3 branches.
- Artère marginale droite le long du bord droit du cœur.
- Artère ventriculaire droite inférieure au nombre de 1 à 2.
- Artères septales postérieures peu nombreuses et grêles à l'extrémité supérieure du sillon interventriculaire postérieur. La première irrigue le nœud atrio-ventriculaire (d'Aschoff-Tawara).

3-2 LES VEINES DU CŒUR.

Les veines du cœur sont représentées par la grande veine coronaire, le sinus coronaire, les petites veines cardiaques et les veines minimes du cœur (de Thébésius).

A- LA GRANDE VEINE CORONAIRE.

Elle naît dans le sillon interventriculaire antérieur près de la pointe. Elle monte dans le sillon interventriculaire antérieur à gauche de l'artère interventriculaire antérieure puis suit le sillon atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) gauche, elle se termine à la face inférieure du cœur en devenant le sinus coronaire. La grande veine coronaire reçoit des collatérales de la paroi antérieure du ventricule droit, du ventricule gauche, de l'atrium (oreillette) et de l'auricule gauches.

B- LE SINUS CORONAIRE : C'est une dilatation ampullaire de la terminaison de la grande veine coronaire de 3 cm de long sur 1 cm de diamètre, situé à la face inférieure du cœur dans la partie gauche du sillon atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire).

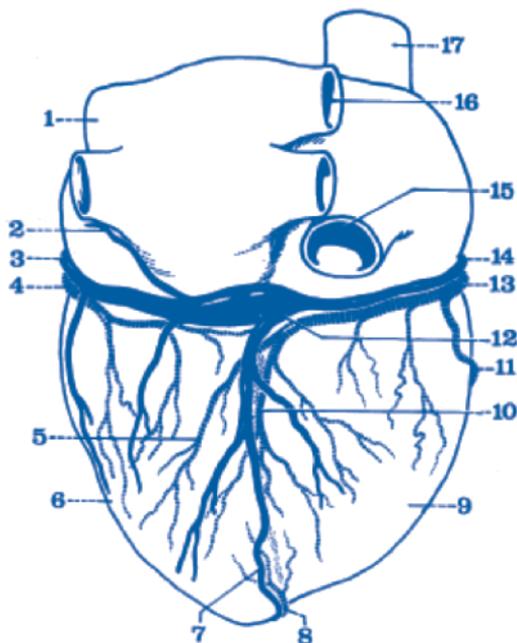
Le sinus coronaire se termine dans l'atrium (oreillette) droit au niveau de sa paroi inférieure, en avant et en dedans de l'orifice de la veine cave inférieure, l'orifice du sinus coronaire est muni d'un repli valvulaire : la valvule du sinus coronaire (de Thébésius).

Plusieurs collatérales aboutissent au sinus coronaire :

- 1- la veine oblique de l'atrium (oreillette) gauche ou veine de Marshall qui descend en arrière de l'atrium (oreillette) gauche, en dehors des veines pulmonaires gauches.
- 2- la veine interventriculaire inférieure (veine moyenne du cœur).
- 3- la petite veine coronaire qui suit le sillon atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) du bord droit du cœur jusqu'à se jeter dans le sinus coronaire.
- 4- la veine inférieure du ventricule gauche qui monte sur la face inférieure du ventricule.

C- LES PETITES VEINES CARDIAQUES : viennent de la paroi antérieure et droite du ventricule droit et se terminent directement dans l'atrium (oreillette) droit au-dessus du sillon atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) par des orifices appelés foramina.

La plus importante de ces veines est la veine du bord droit du cœur ou veine de Galien, elle longe le bord droit du ventricule droit et se termine à la base de l'auricule droit.



1. Veine pulmonaire supérieure gauche.
2. Veine oblique de l'atrium gauche.
3. Grande veine coronaire.
4. Artère circonflexe.
5. Artère rétro-ventriculaire gauche.
6. Ventricule gauche.
7. Veine inter-ventriculaire postérieure.
8. Portion postérieure de l'artère récurrente de la pointe.
9. Ventricule droit.
10. Artère inter-ventriculaire postérieure.
11. Artère marginale (ou du bord gauche).
12. Sinus coronaire.
13. Artère coronaire droite.
14. Veine coronaire droite.
15. Veine cave inférieure.
16. Veine pulmonaire supérieure droite.
17. Veine cave supérieure.

Figure n° 18 : Vue postérieure des vaisseaux coronaires.

D- LES VEINES MINIMES DU CŒUR (DE THÉBÉSIUS) : ce sont de petites veinules qui s'ouvrent directement dans les cavités cardiaques (surtout parois des oreillettes [atria]).

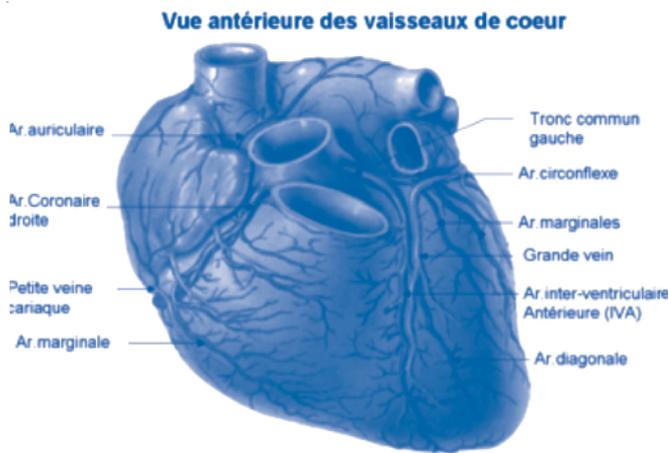


Figure n° 19 : Vue antérieure du cœur

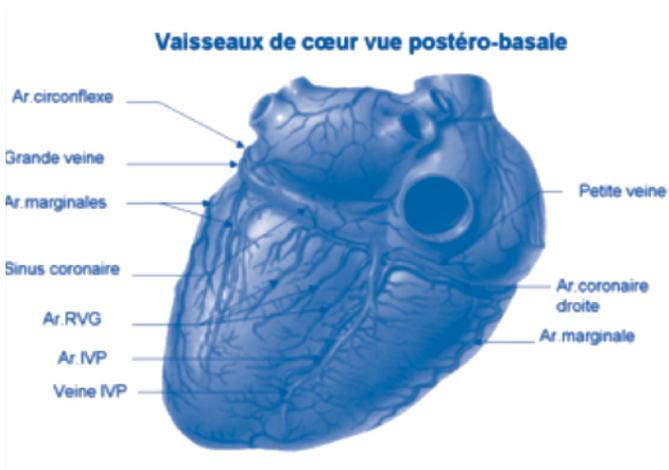


Figure n° 20 : Vue postérieure du cœur

3-3 LES LYMPHATIQUES DU CŒUR :

Un réseau sous péricardiaque reçoit la lymphe des réseaux myocardiques et endocardiques par des collecteurs périartériels.

Ce réseau se draine par deux collecteurs principaux :

- Un collecteur principal droit qui longe le sillon atrio-ventriculaire (auriculo-ventriculaire) à droite,

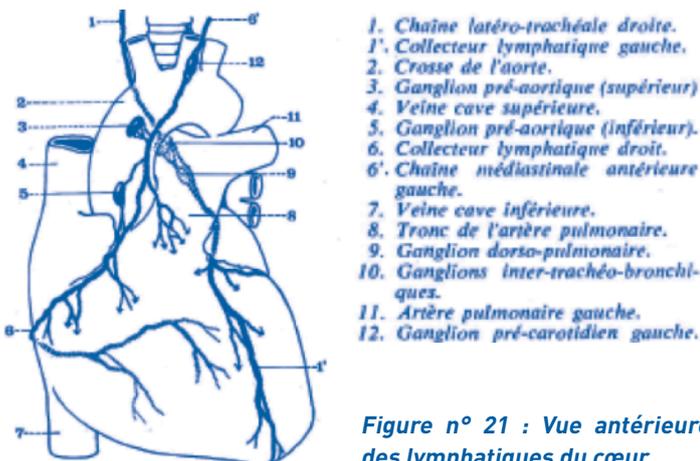


Figure n° 21 : Vue antérieure des lymphatiques du cœur.

monte sur la face antérieure de l'aorte et se jette dans un ganglion précarotidien de la chaîne médiastinale antérieure gauche.

- Un collecteur principal gauche qui suit le sillon inter-ventriculaire antérieur puis contourne les faces gauche et postérieure de l'artère pulmonaire et se termine dans un ganglion intertrachéo-bronchique.

4. INNERVATION DU CŒUR :

Le cœur se contracte automatiquement sous l'influence du tissu nodal qui constitue l'innervation intrinsèque du cœur

Cette innervation intrinsèque est sous le contrôle d'une innervation extrinsèque dépendant du système neuro-végétatif sympathique et parasympathique.

4-1 LE TISSU NODAL.

Il est constitué par :

4-1-1 LE NŒUD SINU-ATRIAL (SINUSAL OU DE KEITH ET FLACK) ou stimulateur cardiaque situé dans la paroi de l'atrium (oreillette) droit près de l'orifice de la veine cave supérieure.

4-1-2 LE NŒUD ATRIO-VENTRICULAIRE (D'ASCHOFF-TAWARA) situé dans l'atrium (oreillette) droit le long de la partie inférieure de la cloison inter-atriale.

4-1-3 LE FAISCEAU ATRIO-VENTRICULAIRE (DE HIS) prend son origine dans le nœud atrio-ventriculaire et se bifurque pour donner 2 branches droite et gauche, qui se placent sur les faces respectives de la cloison inter-ventriculaire :

- La **branche droite** du faisceau atrio-ventriculaire (de His) suit le trabécule septo-marginal (bandelette ansiforme) jusqu'au pilier antérieur de la valve atrio-ventriculaire droite (tricuspide) et donne un réseau de fibres nodales qui se distribuent à la paroi du ventricule droit c'est **le réseau de Purkinje**.
- La **branche gauche** se place sur la face gauche de la cloison puis se divise en **deux hémibranches antérieure et postérieure** qui se terminent au niveau des piliers correspondants de la valve atrio-ventriculaire gauche (mitrale) avant de se résoudre en un réseau de Purkinje.

Le tissu nodal est constitué par des cellules myocardiques qui possèdent un rythme intrinsèque de contraction, le rythme étant le plus rapide au niveau du nœud sinusal et se ralentit à mesure qu'on descend vers la pointe des ventricules.

L'impulsion naît donc au niveau du nœud sinusal elle atteint à travers la paroi de l'atrium (oreillette) droit le nœud atrio-ventriculaire puis se transmet le long du faisceau atrio-ventriculaire (de His) et de ses branches jusqu'au réseau de Purkinje pour provoquer la contraction ventriculaire.

La vascularisation artérielle du tissu nodal est fournie par :

- *une branche de l'artère atriale (auriculaire) supérieure droite pour le nœud sinusal.

- *la première branche septale de la coronaire droite pour le nœud atrio-ventriculaire.
- *la deuxième branche septale de la coronaire gauche pour le faisceau atrio-ventriculaire (de His).

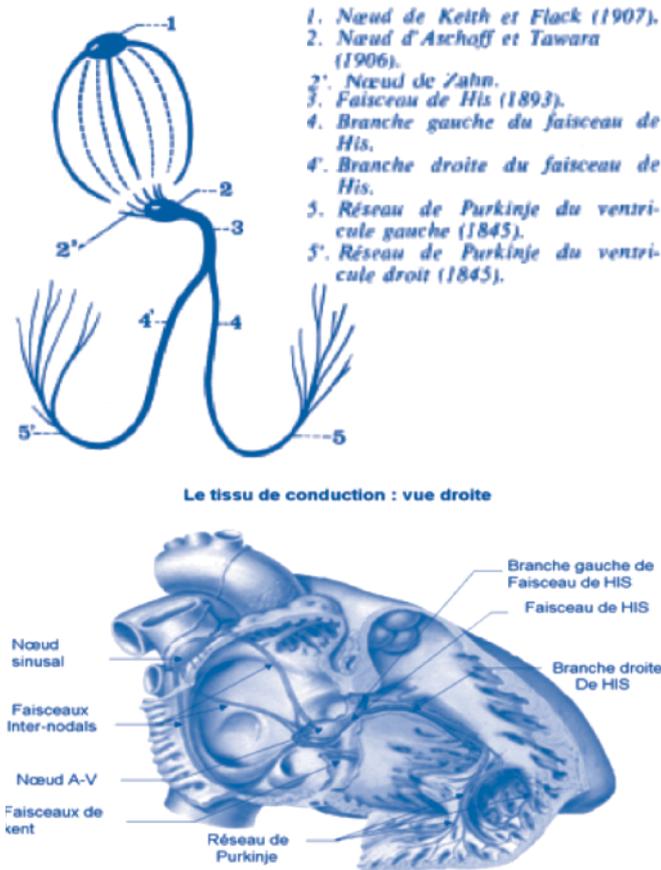


Figure n° 22 : système cardio-necteur

4-2 L'INNERVATION EXTRINSÈQUE DU CŒUR.

4-2-1 L'INNERVATION SYMPATHIQUE DU CŒUR :

Le sympathique cervical donne de chaque côté 3 rameaux nés des ganglions supérieur, moyen et inférieur.

4-2-2 L'INNERVATION PARASYMPATHIQUE : Le nerf vague (pneumogastrique) donne à droite et à gauche 3 rameaux supérieur, moyen et inférieur. Ces rameaux sympathiques et parasympathiques forment deux plexus.

- Un plexus artériel formé par les rameaux supérieurs du sympathique et du pneumogastrique (vague), il forme sous la crosse aortique **le ganglion cardiaque du sympathique (de Wrisberg)** qui donne des rameaux péri-artériels qui suivent les artères coronaires.
- Un plexus veineux formé par les rameaux moyens et inférieurs, il forme à la face postérieure de l'atrium (oreillette) droit **le plexus de Perman**.

Ces nerfs agissent sur le tissu nodal pour ralentir (parasympathique) ou accélérer (sympathique) le rythme cardiaque.

5. LE PÉRICARDE.

Le cœur est enveloppé par le péricarde double sac séreux et fibreux.

5-1 LE PÉRICARDE SÉREUX.

Il est formé par deux feuilletts viscéral et pariétal qui se continuent l'un dans l'autre au niveau d'une « ligne de réflexion ».

Le péricarde séreux enveloppe la totalité du cœur et se prolonge sur les pédicules vasculaires formant autour d'eux des gaines séreuses.

5-1-1 LA GAINÉ ARTÉRIELLE. Elle entoure le tronc de l'artère pulmonaire et la partie initiale de l'aorte.

La ligne de réflexion de la gaine artérielle en avant est oblique en haut et à droite partant du bord inférieur de l'origine de l'artère pulmonaire gauche à l'origine de l'artère brachio-céphalique (tronc artériel brachio-céphalique). En arrière, elle descend verticalement de l'origine de l'artère brachio-céphalique (tronc artériel brachio-céphalique) au bord inférieur de l'origine de la branche droite de l'artère pulmonaire puis devient horizontale entre le bord inférieur des origines des artères pulmonaires droite et gauche.

5-1-2 LA GAINÉ VEINEUSE : elle tapisse les 2/3 antérieurs de la veine cave supérieure selon une ligne oblique en bas et à droite, sur la face postérieure cette gaine descend obliquement entoure la veine cave inférieure puis les 4 veines pulmonaires.

5-1-3 LA CAVITÉ PÉRICARDIQUE : normalement virtuelle présente une grande cavité et des diverticules.

La grande cavité répond aux ventricules, à la face antérieure de l'atrium (oreillette) droit et du pédicule artériel. Les diverticules de la grande cavité sont postérieurs entre les vaisseaux et répondent à la base du cœur.

-Le sinus transverse du péricarde (de Theile) : en forme de tunnel situé entre le pédicule artériel et la veine cave supérieure. Il s'ouvre dans la grande cavité par ses deux extrémités :

- * à gauche : entre l'artère pulmonaire en avant, la veine pulmonaire supérieure gauche en arrière, l'origine de l'artère pulmonaire gauche en haut et l'atrium (oreillette) gauche en bas.
- * à droite : entre l'aorte à gauche, la veine cave supérieure à droite, le péricarde oblique en bas et à droite en haut et l'atrium (oreillette) et l'auricule droits en bas.

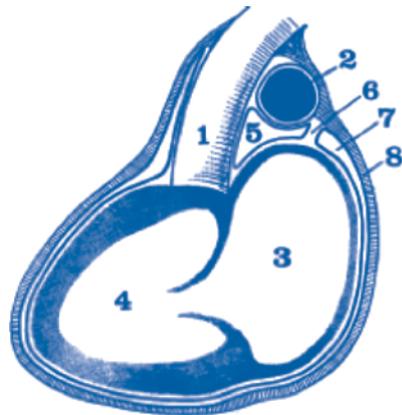
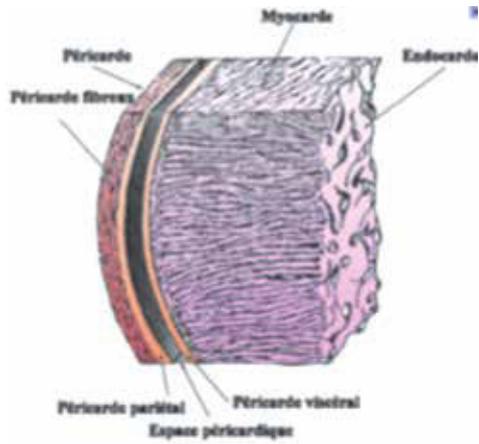
- Le sinus oblique du péricarde (cul-de-sac de Hal-ler) : situé à la face postérieure de l'atrium (oreillette) gauche entre les veines pulmonaires, il s'ouvre en bas dans la grande cavité entre la veine cave inférieure et la veine pulmonaire inférieure gauche.

5-2 LE PÉRICARDE FIBREUX.

C'est un sac fibreux résistant en forme de tronc de cône à base diaphragmatique. Il enveloppe complètement le péricarde séreux, adhérent au feuillet pariétal et le déborde pour se continuer avec les gaines vasculaires. Ce péricarde fibreux est uni aux parois et organes voisins par des ligaments.

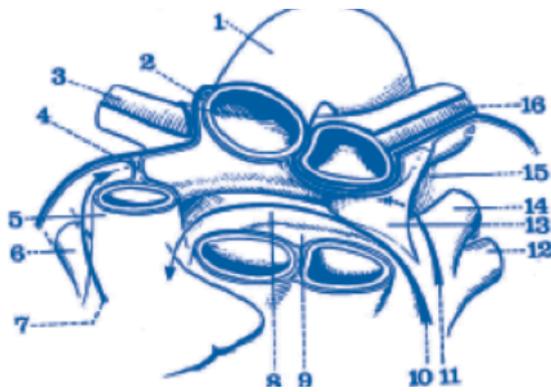
- Ligaments phréo-péricardiques : antérieur, droit et gauche qui le font adhérer au diaphragme
- Ligaments sterno-péricardiques : supérieur (manubrium) et inférieur (xiphôïde)

- Ligaments thyro-péricardiques
- Ligaments vertébro-péricardiques droit et gauche
- Ligaments viscéro-péricardiques : unissant le péricarde à l'aorte, la trachée, l'œsophage, les bronches.



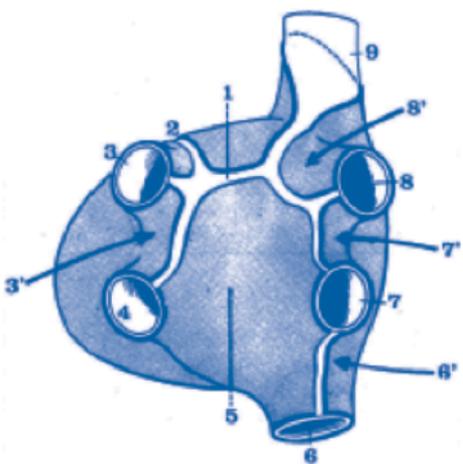
Coupe sagittale schématisée du péricarde.

1. Aorte ascendante.
2. Artère pulmonaire droite.
3. Atrium gauche.
4. Ventricule gauche.
5. Sinus transverse de Theile.
6. Mésos du cœur.
7. Cul-de-sac de Haller.
8. Péricarde fibreux.



Constitution du sinus transverse de Theile (d'après Milhiet)

1. Crosse de l'aorte.
2. Fosse sus-artérielle.
3. Artère pulmonaire droite.
4. Mésos de la veine cave supérieure.
5. Veine cave supérieure.
6. Veine pulmonaire supérieure droite.
7. Fosse rétro-cave d'Allison.
8. Atrium gauche.
9. Portion haute du ventricule gauche.
10. Orifice gauche du sinus transverse.
11. Récessus pulmonaire gauche.
12. Veine pulmonaire inférieure gauche.
13. Pli vestigial de Marshall.
14. Veine pulmonaire supérieure gauche.
15. Feuille pariétal du péricarde séreux.
16. Artère pulmonaire gauche.



Vue postérieure du cœur montrant la ligne de réflexion du péricarde séreux autour du pédicule veineux.

1. Mésos du cœur.
2. Pli vestigial de Marshall.
3. Veine pulmonaire supérieure gauche.
- 3'. Récessus inter-pulmonaire gauche.
4. Veine pulmonaire inférieure gauche.
5. Cul-de-sac de Haller.

6. Veine cave inférieure.
- 6'. Récessus cave inférieur.
7. Veine pulmonaire inférieure droite.
- 7'. Récessus inter-pulmonaire droit.
8. Veine pulmonaire supérieure droite.
- 8'. Fosse rétro-cave d'Allison.
9. Veine cave supérieure.

Figures 23 : Constituants et configuration du péricarde séreux

VAISSEAUX DE LA CIRCULATION SYSTÉMIQUE

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

- Décrire l'aorte ; naissance, trajet, terminaison et branches collatérales.
- Décrire le système veineux cave supérieur ; origine, trajet, terminaison.
- Décrire le système veineux cave inférieur : origine, trajet, terminaison.

1. L'AORTE.

1-1 ORIGINE, TRAJET ET TERMINAISON.

L'aorte naît de l'orifice aortique du ventricule gauche.

Elle a d'abord un trajet intrathoracique : **l'aorte thoracique** avec 2 segments :

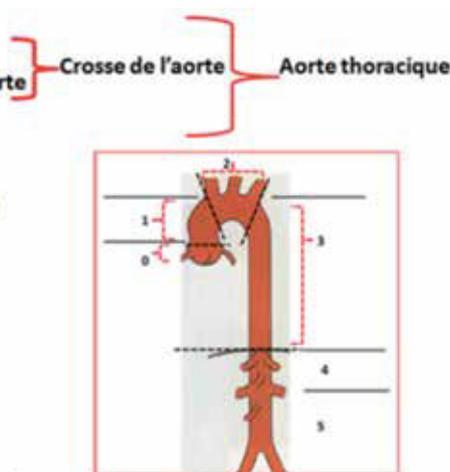
- **la crosse aortique** : segment d'abord ascendant puis horizontal en forme de crosse à concavité inférieure qui s'appuie sur le pédicule pulmonaire gauche elle arrive sur la face latérale gauche du corps de la quatrième vertèbre thoracique puis change de direction et devient descendante.
- **l'aorte thoracique descendante** : descend le long du rachis jusqu'à l'orifice aortique du diaphragme qu'elle traverse.

À l'aorte thoracique fait suite **l'aorte abdominale** qui descend jusqu'à la quatrième vertèbre lombale (lombaire) où elle se termine en donnant 3 branches terminales :

- les 2 artères iliaques primitives (communes)
- et l'artère sacrée médiane (sacrée moyenne).

- Segment 0 = orifice aortique + les sinus
- Segment 1 = aorte ascendante
- Segment 2 = aorte horizontale = arc de l'aorte
- Segment 3 = aorte descendante

- Segment 4 = aorte abdominale sus-rénale
- Segment 5 = aorte abdominale sous-rénale



❖ chambre d'éjection du VG + valves aortique + sinus aortique = racine de l'aorte

1-2 L'AORTE THORACIQUE :

1-2-1 LA CROSSE AORTIQUE.

Naît de l'orifice aortique et présente 2 segments : l'aorte ascendante et l'arc aortique (aorte horizontale).

- **L'aorte ascendante** : à partir de l'orifice aortique, elle a d'abord un trajet ascendant oblique en haut, en avant et à droite sur 3 à 4 cm puis monte verticalement sur une longueur de 3 cm jusqu'à la hauteur de la première articulation chondrosternale gauche.

Elle présente au niveau de son segment initial trois petites dilatations situées au-dessus des 3 cuspidés (valvules) sigmoïdes de l'orifice aortique ce sont : **les sinus aortiques (de Valsalva)**.

Une dernière dilatation située à la jonction entre aorte ascendante et aorte horizontale se développe avec l'âge : le grand sinus de l'aorte.

L'aorte ascendante est contenue dans la gaine artérielle du péricarde séreux avec l'artère pulmonaire qui est à son origine devant l'aorte puis se place sur son flanc gauche.

- **L'arc aortique (aorte horizontale)** : Fait suite à l'aorte ascendante, elle a un trajet oblique en arrière et à gauche jusqu'au flanc gauche de la quatrième vertèbre thoracique où l'aorte change de nouveau de direction pour se poursuivre par l'aorte thoracique descendante. L'arc aortique (aorte horizontale) est concave en arrière et à droite répondant en arrière à la trachée et à l'œsophage, elle est également concave en bas et répond au pédicule pulmonaire gauche.

- Branches collatérales de la crosse aortique :

a- Les artères coronaires : naissent de l'aorte ascendante juste au-dessus de l'orifice aortique par les ostia coronaires, l'ostium coronaire droit est au-dessus de la valvule sigmoïde aortique antéro-droite, le gauche au-dessus de la sigmoïde antéro-gauche.

b- Branches de l'aorte horizontale :

De la face convexe de l'aorte horizontale vont naître des artères à destinée brachio-céphalique :

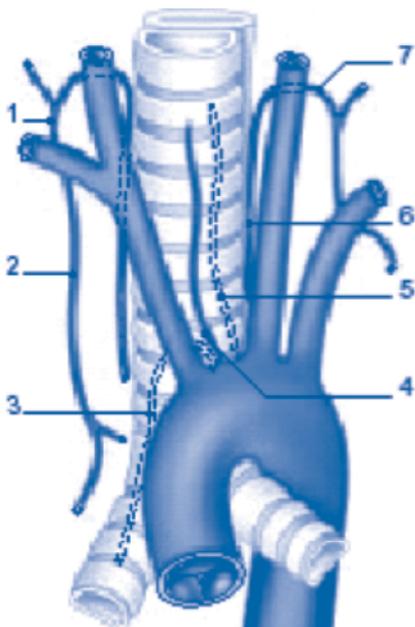
- L'artère brachio-céphalique (tronc artériel brachio-céphalique) : naît à

l'union de l'aorte ascendante et de l'aorte horizontale, il se dirige vers le haut légèrement oblique en dehors et en arrière et se divise après un trajet de 3 cm en ses 2 branches terminales :

- * artère carotide commune (primitive) droite
- * artère subclavière (sous-clavière) droite.
- L'artère carotide commune (primitive) gauche : naît de la face supérieure de la portion horizontale de la crosse aortique en arrière et à gauche de l'artère bra-

chiocéphalique (tronc brachio-céphalique), elle monte obliquement en haut et en dehors jusqu'à la base du cou sur un trajet de 3 cm de long se plaçant à gauche de la trachée.

- L'artère sous-clavière (sous-clavière) gauche : naît de la crosse aortique en arrière de la carotide commune (primitive) gauche, monte verticalement vers la base du cou le long du bord gauche de la trachée.
- L'artère thyroïdienne moyenne de Neubauer : c'est une branche inconstante de la crosse aortique qui naît de la portion horizontale entre l'artère brachio-céphalique (le tronc brachio-céphalique) et la carotide commune (primitive) gauche. Elle monte en avant de la trachée jusqu'à l'isthme du corps thyroïde à la face antérieure du cou.



A. 1. Artère thyroïdienne inférieure droite ; 2. artère thoracique interne ; 3. artère bronchique droite (rétrobronchique) ; 4. artère thyroïdienne moyenne de Neubauer ; 5. artère œsotrachéale ascendante de Demel ; 6. artère œsotrachéale descendante de Haller ; 7. artère thyroïdienne inférieure gauche.

Figure n° 24 : Branches collatérales de la crosse aortique

1-2-2 L'AORTE THORACIQUE DESCENDANTE

Fait suite à la crosse aortique au niveau du flanc gauche de la quatrième vertèbre thoracique, à la jonction de ses 2 portions horizontale et descendante l'aorte présente un petit rétrécissement : l'isthme aortique.

L'aorte descendante descend le long du rachis de la quatrième vertèbre thoracique à l'orifice aortique du diaphragme.

Au cours de son trajet l'aorte est en rapport avec l'œsophage, d'abord à sa gauche puis en arrière de l'œsophage puis en arrière et à droite de lui.

- **Branches collatérales de l'aorte descendante** : elle donne des branches viscérales bronchiques, œsophagiennes et médiastines et des branches pariétales : les artères intercostales.

a- Les artères bronchiques : au nombre de 2 ou 3, elles naissent soit de la face inférieure de la crosse aortique, soit de la partie supérieure de l'aorte descendante. Elles se placent à la face postérieure de la bronche qu'elles irriguent, pénètrent dans les poumons avec les bronches et se ramifient avec les bronches.

Les artères bronchiques donnent également des ramifications aux ganglions lymphatiques.

b- Les artères œsophagiennes : Ce sont des artères grêles au nombre de 2 à 4 qui naissent de la face antérieure de l'aorte et vont à l'œsophage.

c- Les artères médiastines : petites branches artérielles qui vont au péricarde, à la plèvre et aux ganglions médiastinaux.

d- Les artères intercostales : au nombre de huit ou neuf paires qui naissent de la face postérieure de l'aorte et sont destinées aux huit ou neuf derniers espaces intercostaux (les 3 premières artères intercostales proviennent de l'artère intercostale supérieure, branche de la sous-clavière [sous-clavière]).

Chaque artère intercostale gagne l'espace intercostal, donne à l'extrémité postérieure de cet espace une branche dorso-spinale (pour le canal rachidien et les muscles du dos) puis suit l'espace intercostal d'arrière en avant en étant située sous la veine intercostale et au-dessus du nerf intercostal. À l'extrémité antérieure de l'espace intercostal, elle s'anastomose avec une artère intercostale antérieure née de l'artère thoracique (mammaire) interne.

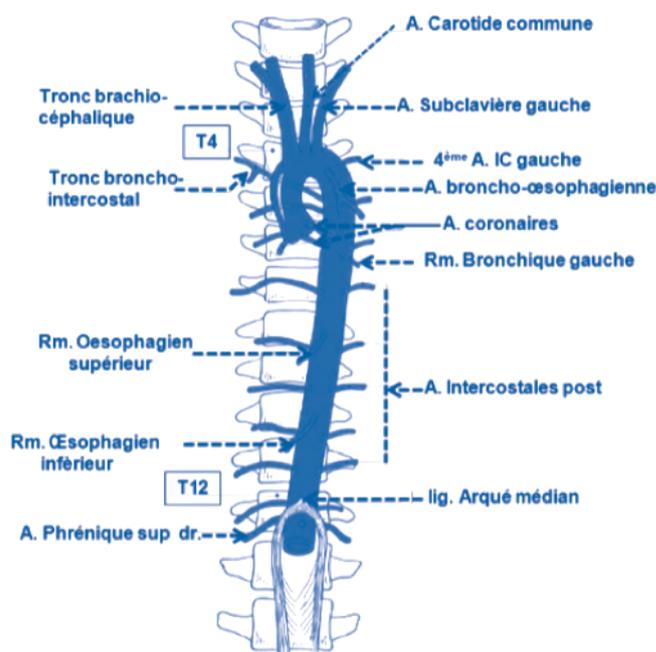


Figure n° 25 : Branches collatérales de l'aorte thoracique

1-3 L'AORTE ABDOMINALE :

L'aorte pénètre dans la cavité abdominale après avoir traversé l'orifice aortique du diaphragme (accompagnée par le conduit [canal] thoracique situé en arrière d'elle). L'aorte descend verticalement dans l'abdomen en avant du rachis à gauche de la ligne médiane et se termine au niveau de la quatrième vertèbre lombale (lombaire). L'aorte au cours de ce trajet est située en avant du rachis et en arrière de la cavité péritonéale avec ses organes.

1-3-1 BRANCHES COLLATÉRALES DE L'AORTE ABDOMINALE :

L'aorte abdominale donne :

- Des branches pariétales : artères lombales (lombaires) et artères phréniques (diaphragmatiques) inférieures,
- Des branches viscérales : tronc cœliaque, artères mé-

sentériques supérieure et inférieure (artères digestives), les artères surrenales (capsulaires), les artères rénales et les artères génitales.

a- Les artères lombales (lombaires) : quatre paires qui naissent de la face postérieure de l'aorte, la cinquième paire d'artères lombales (lombaires) naît de l'artère sacrale médiane (sacrée moyenne), ces artères lombales (lombaires) donnent une branche dorso-spinale et une branche antérieure ou abdominale qui se distribue à la paroi latérale de l'abdomen.

b- Les artères phréniques (diaphragmatiques) inférieures : au nombre de 2 (droite et gauche), naissent de la face antérieure de l'aorte au niveau de la douzième vertèbre thoracique sous l'orifice diaphragmatique, elles se dirigent vers le pilier correspondant du diaphragme puis se ramifient sur la face inférieure de ce muscle. Elles donnent une artère surrenale (capsulaire) supérieure à la glande surrenale.

c- Le tronc cœliaque : naît de la face antérieure de l'aorte en regard du bord inférieur de la douzième vertèbre thoracique, l'artère se dirige en avant sur 1 à 3 cm puis donne ses 3 branches terminales au niveau du bord supérieur du pancréas : artère coronaire stomacique, artère hépatique et artère splénique qui vont donner la vascularisation de l'estomac, du grand épiploon, du foie et de la rate.

d- L'artère mésentérique supérieure : naît de la face antérieure de l'aorte, au-dessous du tronc cœliaque, en regard du bord supérieur de la première vertèbre lombale (lombaire).

Cette artère descend en arrière du pancréas puis pénètre dans le mésentère. Elle irrigue en partie le pancréas, l'intestin grêle et le colon droit.

e- L'artère mésentérique inférieure : branche collatérale digestive de l'aorte abdominale elle naît de la face antérieure de l'aorte au niveau de la 3e vertèbre lombale (lombaire) descend en bas et à droite et pénètre dans le mésocôlon gauche elle vascularise le côlon gauche et le rectum.

f- Les artères capsulaires ou surrenales moyennes : droite et gauche, naissent des faces latérales de l'aorte au même niveau que la mésentérique supérieure. Elles se dirigent vers la glande surrenale (la droite passe en arrière de la veine cave inférieure).

g- Les artères rénales : droite et gauche, naissent des faces latérales de l'aorte au niveau de la première vertèbre lombale (lombaire) (un peu au-dessous de la mésentérique supérieure), elles se dirigent en dehors et en bas vers le hile du rein qu'elles vont irriguer. L'Artère rénale droite est plus longue et passe derrière la veine cave inférieure pour rejoindre le hile du rein droit.

h- Les artères génitales : spermaticques ou ovariennes elles naissent de la face antérieure de l'aorte entre les artères rénales et la mésentérique inférieure puis descendent obliquement en bas et en dehors pour irriguer les testicules (chez l'homme) ou les ovaires (chez la femme).

1-3-2 BRANCHES TERMINALES DE L'AORTE.

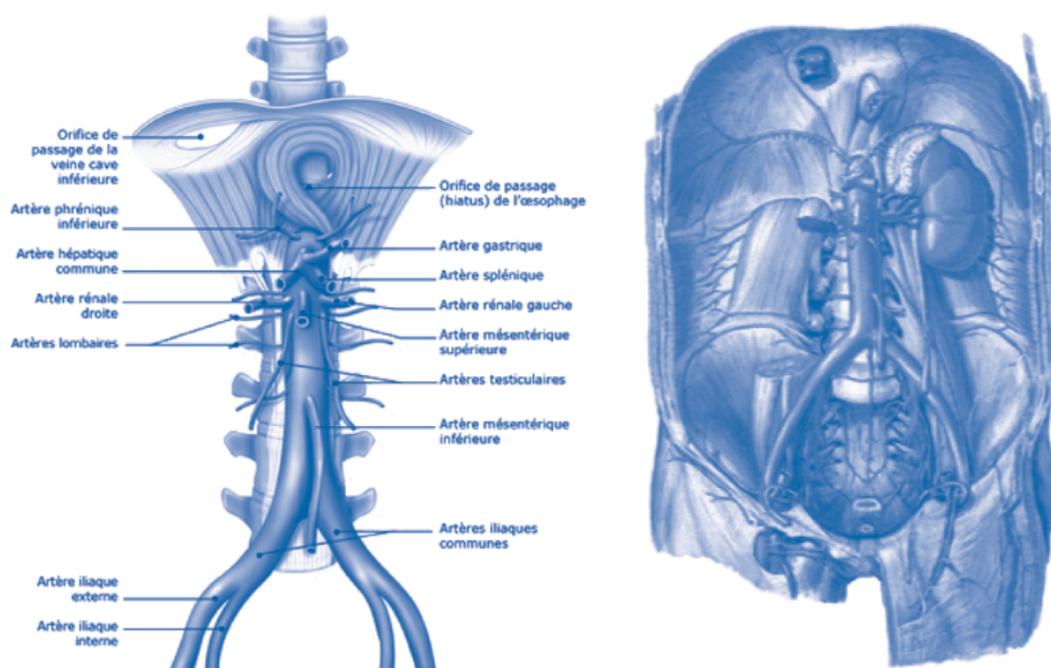
L'aorte se termine au niveau du bord inférieur de la quatrième vertèbre lombale (lombaire) en 3 branches terminales :

- une médiane : l'artère sacrée moyenne (sacrée médiane)
- deux latérales : les artères iliaques primitives (communes).

a- L'artère sacrée médiane (sacrée moyenne). Elle prolonge l'aorte dans le bassin, elle naît de la face postérieure de la terminaison aortique, elle descend à la face antérieure de la cinquième lombale (lombaire), du sacrum et du coccyx et se termine dans la glande coccygienne.

Elle donne la cinquième artère lombale (lombaire), des branches pariétales latérales et de petits rameaux pour le rectum.

b- Les artères iliaques primitives (communes) : se dirigent obliquement en bas et en dehors et se divisent après un trajet d'environ 6 cm en artère iliaque externe



Figures n° 26 : Aorte abdominale et ses branches

et artère iliaque interne ou hypogastrique, cette division se fait en regard du bord inférieur de la cinquième vertèbre lombale (lombaire).

- L'artère iliaque externe continue son trajet en bas et en dehors jusqu'à l'arcade crurale (ligament inguinal) où elle devient l'artère fémorale. L'iliaque externe donne deux collatérales près de l'arcade crurale (ligament inguinal).

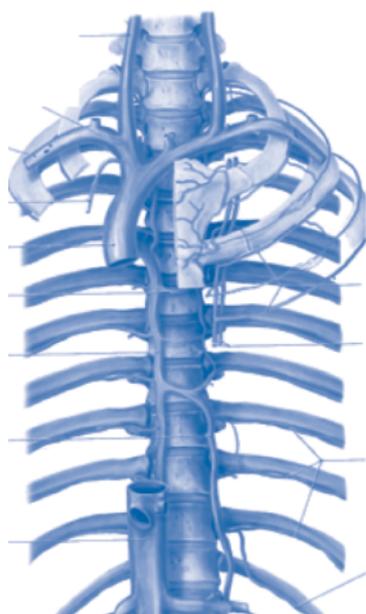
* L'artère épigastrique qui monte en arrière du muscle grand droit de l'abdomen.

* L'artère circonflexe iliaque profonde qui se dirige en dehors et donne une branche abdominale et une branche iliaque.

- L'artère hypogastrique (iliaque interne) : branche de bifurcation interne de l'iliaque commune (primitive), destinée aux organes intrapelviens et aux parois du bassin. Elle donne douze branches qui naissent de 2 troncs : l'artère obturatrice, l'ombilicale, l'ischiatique (glutéale inférieure), la honteuse interne, la vésicale inférieure, l'hémorroïdale moyenne, la prostatique et la vésiculo-déférentielle (artère du conduit déférent) (ou l'utérine et la vaginale chez la femme) naissent du tronc antérieur de l'hypogastrique (iliaque interne), l'ilio-lombale (ilio-lombale), la sacrée latérale supérieure, la sacrée latérale inférieure et la fessière (glutéale supérieure) naissent du tronc postérieur.

2. SYSTÈME VEINEUX CAVE.

Le sang veineux systémique est ramené au cœur par les deux veines caves supérieure et inférieure.



Figures n° 27 : système cave

2-1 SYSTÈME CAVE SUPÉRIEUR.

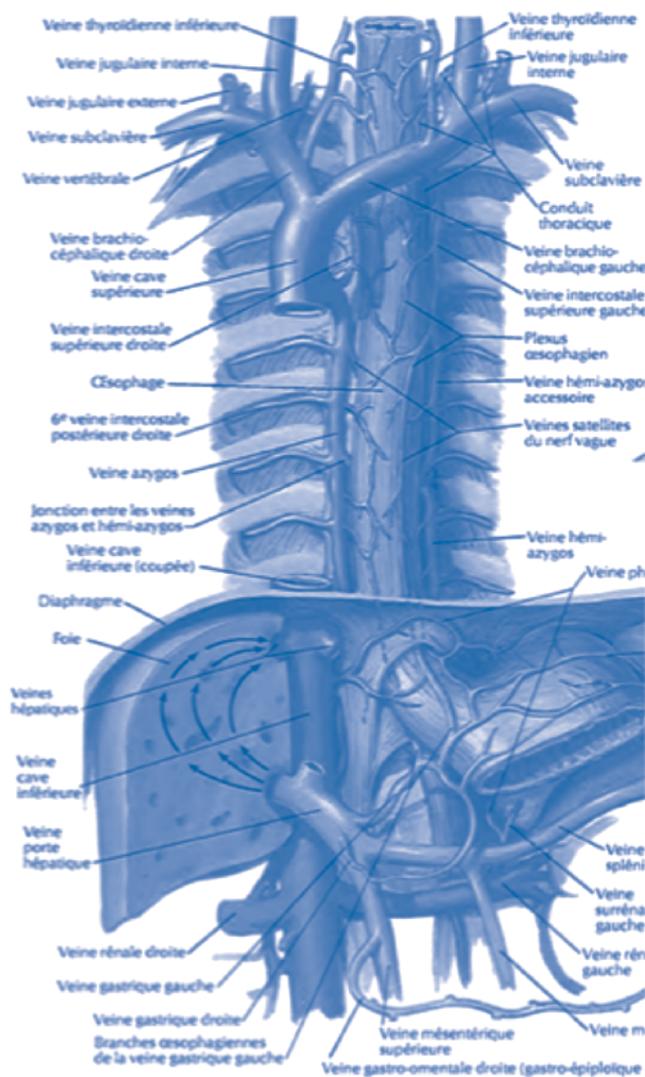
Il draine le sang veineux de la partie sus-diaphragmatique du corps.

La veine cave supérieure est constituée par la réunion des deux troncs veineux brachio-céphaliques (veines brachio-céphaliques).

2-1-1 LE TRONC VEINEUX BRACHIO-CÉPHALIQUE DROIT (VEINE BRACHIO-CÉPHALIQUE DROITE) :

Naît, en arrière de l'extrémité interne de la clavicule droite, de la réunion des veines jugulaires interne et subclavière (sous-clavière) droites au niveau du confluent veineux de Pirogoff droit (jugulo-subclavier).

Ce tronc veineux descend ensuite verticalement dans le médiastin antérieur, à droite de la ligne médiane sur un trajet de 2 à 3 centimètres et se termine au niveau du premier cartilage costal droit en se réunissant avec le tronc veineux brachio-céphalique gauche (veine brachio-céphalique).



Figures n° 28 : système cave

2-1-2 LE TRONC VEINEUX BRACHIOCÉPHALIQUE GAUCHE (VEINE BRACHIOCÉPHALIQUE GAUCHE) :

Comme le droit il naît de la réunion des veines jugulaires interne et sous-clavière (subclavière gauches en arrière de l'extrémité interne de la clavicule gauche - (confluent veineux de Pirogoff [jugulo-subclavier gauche]).

Ensuite il descend très obliquement en bas et à droite, traversant la ligne médiane sur un trajet de 6 cm environ pour rejoindre à droite de la ligne médiane le tronc veineux brachio-céphalique [veine brachio-céphalique] droit en arrière du premier cartilage costal droit.

Les troncs veineux brachio-céphaliques [veines brachio-céphaliques] reçoivent les veines vertébrales, jugulaire postérieure, mammaire interne [thoracique interne] et phrénique [diaphragmatique] supérieure. Les veines thyroïdiennes inférieures se jettent dans le tronc veineux brachio-céphalique gauche [veine brachio-céphalique].

2-1-3 LA VEINE CAVE SUPÉRIEURE : Naît de la réunion des 2 troncs veineux brachio-céphaliques [veines brachio-céphaliques] en arrière du premier cartilage costal droit. Elle descend légèrement oblique en arrière, avec une concavité gauche répondant à l'aorte ascendante et se termine au niveau de la paroi supérieure de l'atrium droit [oreillette droite] en regard du deuxième espace intercostal après un trajet d'environ 7 cm, ses deux derniers centimètres sont situés à l'intérieur du péricarde.

2-2 SYSTÈME CAVE INFÉRIEUR : La veine cave inférieure draine le sang veineux de la partie sous-diaphragmatique du corps. Elle est formée par la réunion des veines iliaques primitives [communes] droite et gauche.

2-2-1 LES VEINES ILIAQUES PRIMITIVES [COMMUNES] : Chacune des veines iliaques primitives [communes] naît de la réunion d'une veine iliaque externe et d'une veine iliaque interne ou hypogastrique.

* **La veine iliaque externe :** fait suite à la veine fémorale au niveau de l'arcade crurale [ligament inguinal], elle a un trajet ascendant oblique en dehors accompagnant l'artère iliaque externe, en étant placée en dedans d'elle, et en dedans du muscle psoas. L'artère et la veine sont contenues dans une même gaine fibreuse. La veine iliaque externe reçoit deux collatérales :

- La veine épigastrique
- La veine circonflexe iliaque profonde.

* **La veine hypogastrique [iliaque interne] :** accompagne l'artère hypogastrique [iliaque interne], et reçoit les veines satellites des branches de l'artère hypogastrique [iliaque interne] avec des branches viscérales [vésicales, hémorroïdales (rectale) moyennes, utérines et vaginales chez la femme] qui se réunissent pour former de véritables plexi veineux et des branches pariétales qui ont le même trajet que les artères correspondantes.

* **Les veines iliaques primitives [communes] :** nées de la réunion des veines hypogastrique [iliaque interne] et iliaque externe elles convergent par la suite l'une vers l'autre et se réunissent à droite du rachis au niveau de la cinquième vertèbre lombale [lombaire] pour former la veine cave inférieure.

La veine iliaque commune [primitive] droite est située en arrière puis en dehors de l'artère, la veine iliaque commune [primitive] gauche est située d'abord en dedans de l'artère iliaque commune [primitive] gauche puis croise la ligne médiane passant en avant de la cinquième vertèbre lombale [lombaire] et en arrière du premier segment de l'artère iliaque commune [primitive] droite.

La veine iliaque commune [primitive] gauche reçoit la veine sacrée moyenne [sacrée médiane].

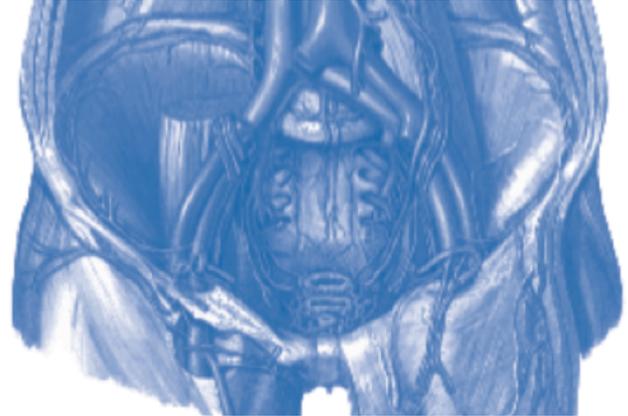


Figure n° 29 : Naissance de la VCI

2-2-2 LA VEINE CAVE INFÉRIEURE : Naît de la réunion des 2 veines iliaques primitives [communes] en avant et à droite de la cinquième vertèbre lombale [lombaire], juste au-dessous de la bifurcation aortique.

La veine cave inférieure monte verticalement jusqu'à la première vertèbre lombale [lombaire] puis s'incline à droite pour cheminer dans une gouttière qu'elle creuse sur la face postérieure du foie puis s'infléchit en avant et à gauche, traverse le diaphragme au niveau de l'orifice quadrilatère et se termine au niveau de la paroi inférieure de l'atrium droit [oreillette droite].

La veine cave inférieure a environ 22 centimètres de long pour un diamètre de 3 cm.

Au cours de son trajet ascendant, la veine cave inférieure suit la face antérieure du rachis lombaire [lombal], à droite de la ligne médiane et de l'aorte abdominale.

Le dernier segment intrathoracique de la veine cave inférieure près de sa terminaison est situé dans le péricarde séreux.

2-2-3 BRANCHES COLLATÉRALES DE LA VEINE CAVE INFÉRIEURE : La veine cave inférieure reçoit de nombreuses collatérales avec des branches pariétales : veines lombales [lombaires] et phréniques [diaphragmatiques] inférieures) et des branches viscérales : rénales, surrénales (capsulaires) moyennes, spermatiques ou ovariennes droites et sus-hépatiques (hépatiques).

a- Les veines lombales (lombaires) : satellites des artères lombales (lombaires) elles se jettent à la face postérieure de la veine cave.

Les veines lombales (lombaires) sont unies entre elles par des anastomoses verticales situées en avant des apophyses transverses qui constituent la veine lombale (lombaire) ascendante.

b- Les veines phréniques (diaphragmatiques) inférieures: accompagnent les artères phréniques (diaphragmatiques)

inférieures, au nombre de 2 par artère. Elles reçoivent la veine surrénale supérieure.

Ces veines phréniques (diaphragmatiques) s'abouchent par un tronc unique à la face antérieure de la veine cave au ras de l'orifice diaphragmatique.

c- Les veines rénales : les branches veineuses qui sortent du rein se réunissent au niveau du hile pour constituer la veine rénale.

Chaque veine rénale se dirige en dedans et un peu en haut, en avant de l'artère, pour rejoindre la veine cave.

La veine rénale gauche est plus longue que la droite, elle croise la face antérieure de l'aorte au-dessous de l'artère mésentérique supérieure.

Les veines rénales reçoivent la veine surrénale inférieure, des veines de la capsule rénale, une veine urétérique, la gauche reçoit en plus la veine capsulaire ou surrénale principale et la veine spermatique (ou ovarienne chez la femme) gauche.

d- Les veines surrénales (capsulaires) principales : venant de la glande surrénale, la droite se jette dans la veine cave directement, la gauche dans la veine rénale gauche.

e- Les veines génitales : spermatiques chez l'homme ou ovariennes chez la femme. Les veines spermatiques viennent du testicule et de l'épididyme, les veines ovariennes viennent de l'ovaire.

À droite ces veines se jettent dans la veine cave un peu au-dessous des veines rénales, à gauche elles se jettent dans la veine rénale.

f- Les veines hépatiques principales (sus-hépatiques) : viennent du foie et drainent dans la veine cave tout le sang provenant de la veine porte et de l'artère hépatique

qui traverse le foie. On distingue trois veines hépatiques principales (sus-hépatiques) droite, médiane et gauche (provenant des lobes droit et gauche du foie) qui se jettent dans la veine cave inférieure juste au-dessous du diaphragme. Les veines hépatiques accessoires (petites veines sus-hépatiques) sont nombreuses et se jettent dans la veine cave un peu au-dessous des précédentes.

2-3 LE SYSTÈME AZYGOS.

Les deux systèmes caves sont reliés par deux voies anastomotiques :

- les veines du rachis
- **et la veine azygos (grande veine azygos).** (figure n° 31)

2-3-1 LA VEINE AZYGOS (GRANDE VEINE AZYGOS) : naît au niveau du onzième espace intercostal de la réunion de deux racines :

- une racine externe : qui vient de la réunion de la veine lombale (lombaire) ascendante droite et de la douzième veine intercostale
- une racine interne : naît de la face postérieure de la veine cave inférieure.

La veine azygos (grande veine azygos) monte à la face antérieure du rachis thoracique à droite de la ligne médiane jusqu'au niveau de la quatrième vertèbre où elle décrit une crosse à concavité inférieure dirigée d'arrière en avant pour passer au-dessus du pédicule pulmonaire droit et rejoindre la face postérieure de la veine cave supérieure où elle se jette.

*** Branches collatérales :**

a- Les veines intercostales droites = les veines intercostales droites de la cinquième à la onzième se jettent directement dans la veine azygos (grande veine azygos).

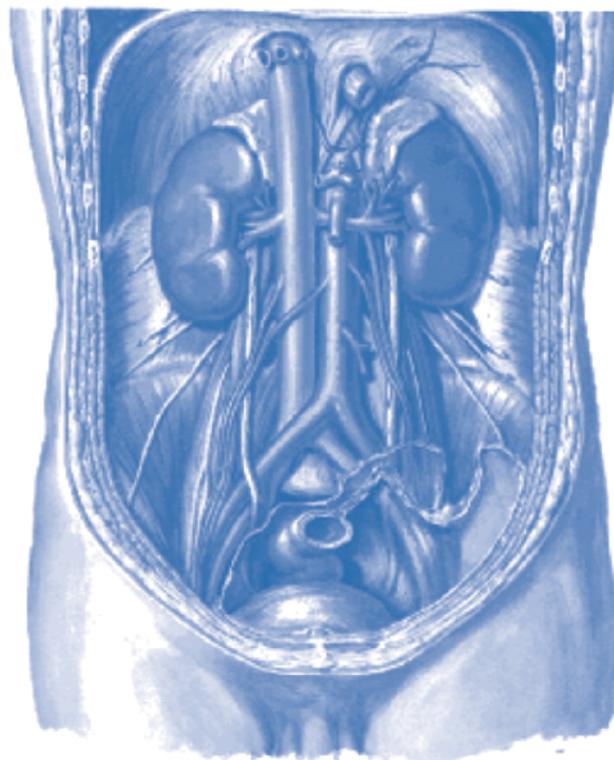
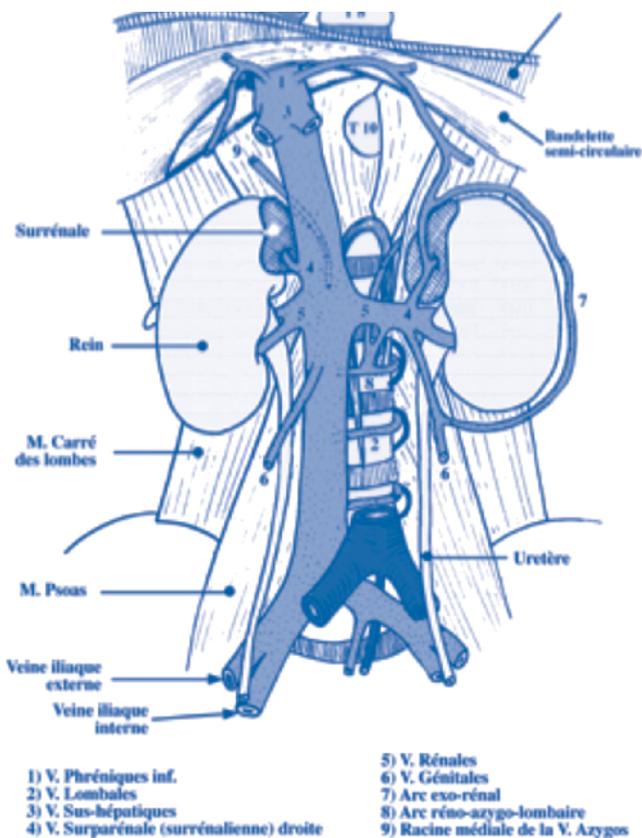


Figure n° 30 : branches de la veine cave inférieure

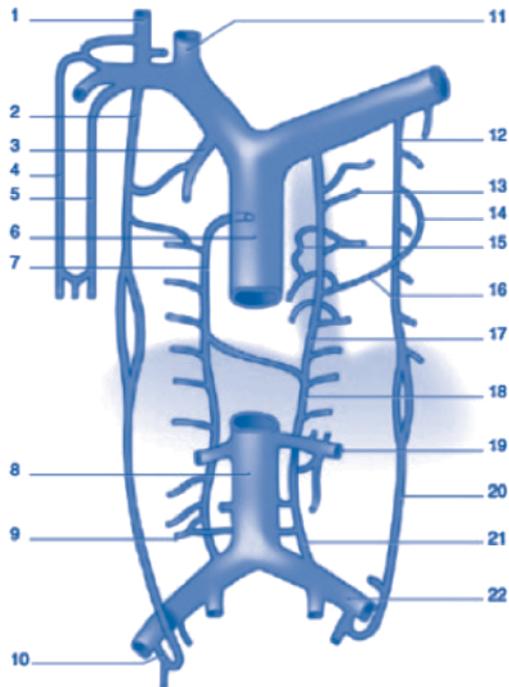


Figure n° 31. Système d'anastomose entre les réseaux cave supérieur et inférieur :

1.Veine jugulaire externe; 2.Veine thoracique interne droite; 3.Veine mammaire interne droite; 4.Veine céphalique; 5.Veine basilique; 6.Veine cave supérieure; 7.Veine grande azygos; 8.Veine cave inférieure; 9.Veine lymphatique; 10.Crosse de la veine saphène interne droite; 11.Veine jugulaire interne droite; 12.Veine thoracique interne gauche; 13.Veine intercostale postérieure; 14.Veine intercostale antérieure; 15.Veine œsophagienne; 16.Veine intercostale postérieure; 17.Veine hémiazygos accessoire; 18.Veine hémiazygos; 19.Veine rénale gauche; 20.veine épigastrique; 21.Veine lombaire ascendante; 22.Veine iliaque commune gauche.

b- La veine intercostale supérieure droite : c'est le tronc collecteur des 3 ou 4 premières veines intercostales droites, elle descend le long du rachis et se jette dans la crosse de l'azygos.

c- La veine azygos (grande veine azygos) reçoit par ailleurs des veines œsophagiennes et la veine bronchique postérieure.

2-3-2 LES VEINES HÉMIAZYGOS ET HÉMIAZYGOS ACCESSOIRE (PETITES VEINES AZYGOS) :

ce sont également des collatérales de la veine azygos (grande veine azygos) au nombre de 2 qui drainent les veines intercostales gauches.

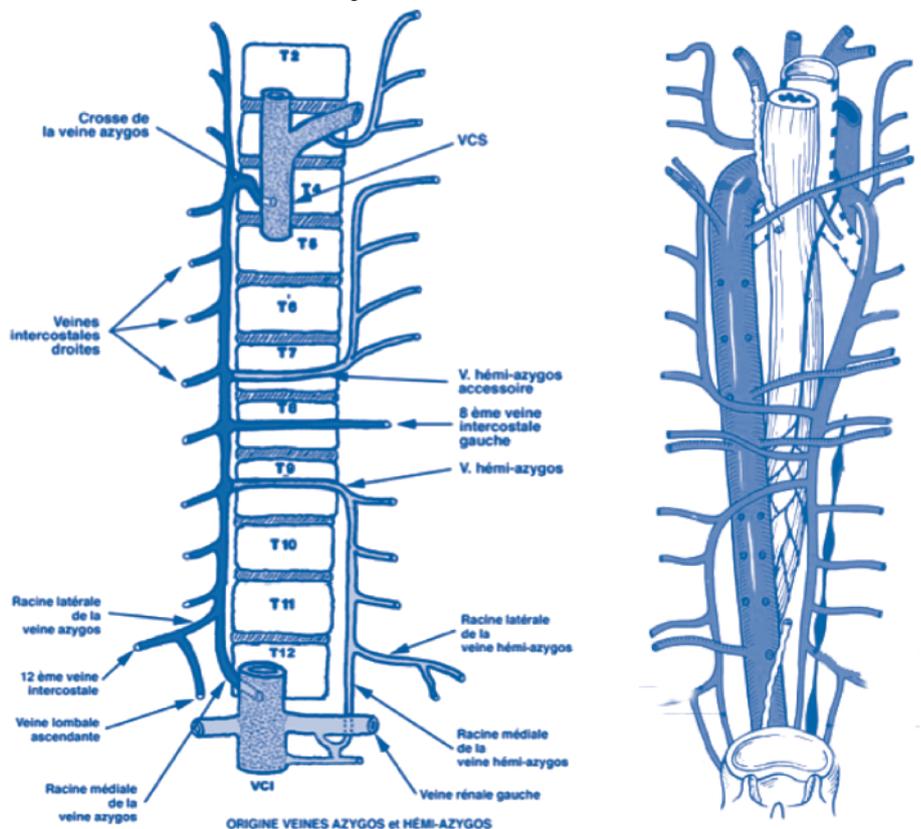
*** La veine hémiazygos (veine petite azygos inférieure) :** se forme comme l'azygos (grande azygos) au niveau du onzième espace intercostal gauche par la réunion de deux racines, l'interne venant de la veine cave inférieure et l'externe de la réunion de la veine lombale (lombaire) ascendante gauche avec la douzième veine intercostale (la racine interne peut venir de la veine rénale gauche).

La veine hémiazygos (petite azygos inférieure) monte sur le flanc gauche du rachis en dehors de l'aorte jusqu'à la huitième vertèbre thoracique où elle change de direction pour se porter transversalement à droite, passant en arrière de l'aorte pour aller se jeter dans la veine azygos (grande veine azygos).

Cette veine reçoit les 4 ou 5 dernières veines intercostales gauches.

*** L'hémiazygos accessoire (petite veine azygos supérieure) :** descend sur le flanc gauche du rachis jusqu'à la septième côte puis s'infléchit à droite passant en arrière de l'aorte pour aller se jeter dans la veine azygos (grande veine azygos). Cette veine reçoit les 6 ou 7 premières veines intercostales supérieures gauches (les trois premières veines peuvent être drainées dans le TVBC gauche).

Figure n° 32 : système azygos : vue antérieure et vue postérieure



VAISSEAUX DE LA CIRCULATION PULMONAIRE

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

- Décrire l'artère pulmonaire et ses branches.
- Décrire les veines pulmonaires droites ; origine ; trajet ; terminaison.
- Décrire les veines pulmonaires gauches : origine, trajet, terminaison

1. ARTÈRE PULMONAIRE :

Naît de l'orifice pulmonaire du ventricule droit. Après un trajet ascendant oblique en arrière et à gauche de 5 cm elle donne ses branches terminales = droite et gauche. Les artères auront un trajet satellite des bronches.

1-1 L'ARTÈRE PULMONAIRE DROITE :

Décrit un trajet horizontal de 5 cm qui l'amène dans le hile droit, elle passe en arrière de l'aorte ascendante et de la veine cave supérieure.

Elle passe en avant de la bronche principale (souche) droite, sous la naissance de la lobaire supérieure, croise la face antérieure du tronc intermédiaire au-dessus de l'origine de la lobaire moyenne se place sur la face latérale de la bronche lobaire inférieure puis à sa face postérieure au niveau de ses bronches segmentaires terminales

* Branches collatérales = elle donne avant sa pénétration dans le hile une artère médiastinale pour le lobe supérieur puis une artère scissurale pour le lobe supérieur (après sa pénétration dans le poumon). Elle donne 2 branches pour le lobe moyen, une artère supérieure et une artère externe et une branche pour chaque segment du lobe inférieur.

1-2 L'ARTÈRE PULMONAIRE GAUCHE :

Décrit une crosse croisant d'abord par un trajet ascendant à partir de son origine la face antérieure de la bronche principale (souche) gauche, puis contourne la face postérieure de la lobaire supérieure se plaçant sur la face latérale puis postérieure de la bronche lobaire inférieure.

* Branches collatérales : elle donne une artère médiastinale antérieure puis une artère médiastinale postérieure pour le culmen, une artère linguale scissurale et une branche pour chaque segment du lobe inférieur.

2. VEINES PULMONAIRES :

Naissent du réseau capillaire péri-alvéolaire qui rejoint les veines périlobulaires qui se drainent vers des veines péri segmentaires. Les veines ont un trajet périphérique par rapport au parenchyme pulmonaire, ce trajet est indépendant de celui des bronches.

Chaque poumon est drainé par deux veines pulmonaires :

* À droite la veine pulmonaire supérieure droite naît de la réunion de 2 racines

- supérieure : qui draine le lobe supérieur
- inférieure : qui draine le lobe moyen

Cette veine est située en avant du plan de l'artère et de la bronche.

* La veine pulmonaire inférieure droite naît de deux racines :

- supérieure : qui draine le segment apical du lobe inférieur (Fowler)
- inférieure : qui draine la pyramide basale.

Cette veine est située en bas et en arrière du plan bronchique.

* À gauche : la veine pulmonaire supérieure gauche : draine le lobe supérieur par 2 racines : supérieure venant du culmen et inférieure de la lingula.

Cette veine est antérieure par rapport à l'artère et la bronche.

* La veine pulmonaire inférieure gauche : draine le lobe inférieur avec une racine provenant du segment apical et une racine de la pyramide basale. Cette veine est de siège postérieur.

LE MÉDIASTIN

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

- Indiquer la situation du médiastin et sa division en différents étages.
- Situer les organes du médiastin en précisant leurs rapports respectifs.
- Décrire sur une vue de face, une vue postérieure, et les 2 vues latérales droite et gauche, les organes du médiastin et leurs rapports.
- Décrire sur 4 coupes horizontales aux 3 étages du médiastin les rapports entre les organes du médiastin.

DÉFINITION

Région centrale de la cavité thoracique située entre les 2 régions pleuropulmonaires.

Le médiastin est limité, en avant par le plastron sterno-costal, en arrière par le rachis thoracique, latéralement par les plèvres médiastines, en bas par le diaphragme et en haut par la base du cou.

Le médiastin est divisé par l'axe aérien en **médiastin antérieur** et **médiastin postérieur**.

Il est également divisé en 3 étages par les crosses de l'aorte et le bord inférieur du pédicule pulmonaire.

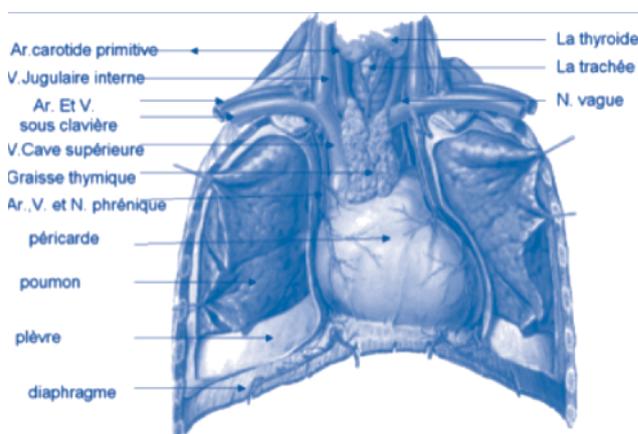
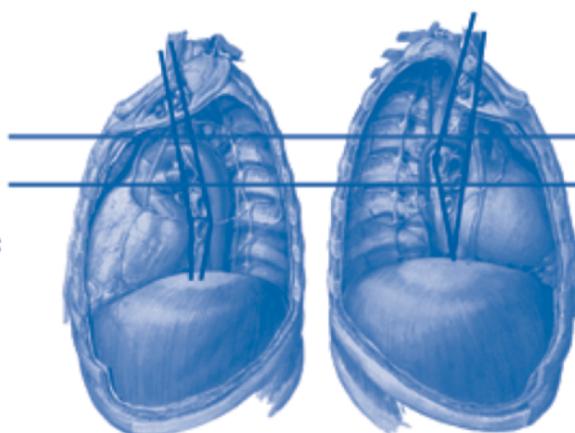


Figure n° 33 : vue antérieure du médiastin

• Le médiastin

Trois compartiments

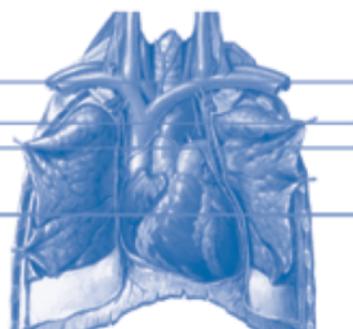
- **Médiastin ant** (face ant trachée)
 - Cœur et gros vaisseaux...
- **Médiastin post** (face post trachée)
 - Œsophage, canal thoracique et aorte desc
 - Système azygos....
- **Médiastin moyen**
 - Trachée, bifurcation trachéale,
 - Pédicules pulmonaires,
 - Les crosses...



Trois étages: sup, moyen et inf

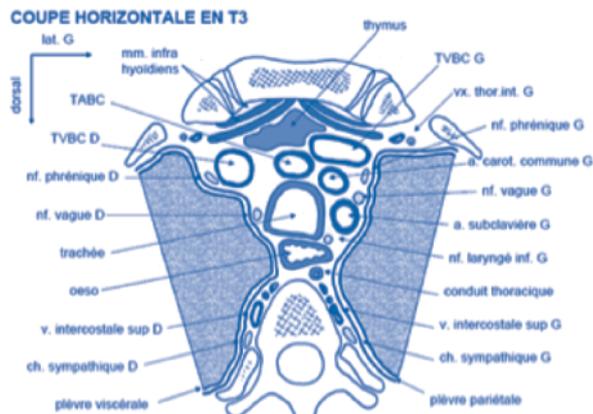
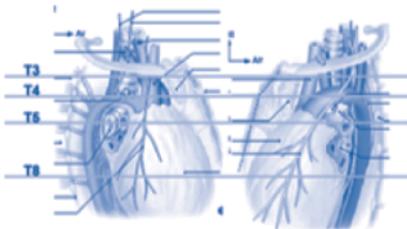
- 4 coupes transversales (Résumé le médiastin)

- Niveau T3 = médiastin sup
- Niveau T4= bifurcation trachéale = étages des crosses
- Niveau T5= bifurcation de l'artère pulmonaire
- Niveau T8 = médiastin inférieur



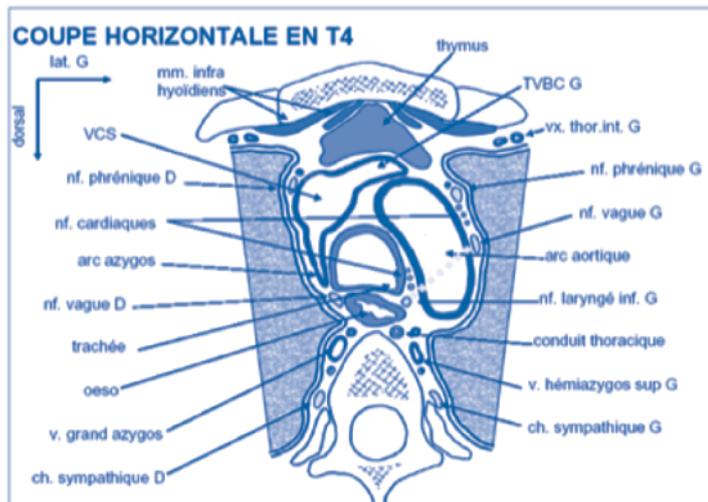
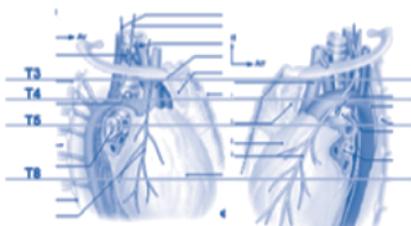
- **Coupe niveau T3:** d'avant en arrière

- Le thymus ou reliquat thymique
- Les troncs veineux (TVBC Ghe et dt)
- Le nerf phrénique gauche (longe la sub-clavière gche, derrière le TVBC gche)
- Le nerf phrénique droit est derrière (latéral) le TVBC droit
- Les troncs artériels
- Le nerf vague gauche (face externe de la carotide primitive gauche, derrière le TVBC gche)
- Le vague droit (derrière le TVBC droit)
- La trachée
- Laryngé inf gauche (angle œso-trachéal)
- L'œsophage
- Le canal thoracique
- Veines intercostales sup
- Chaines sympathiques



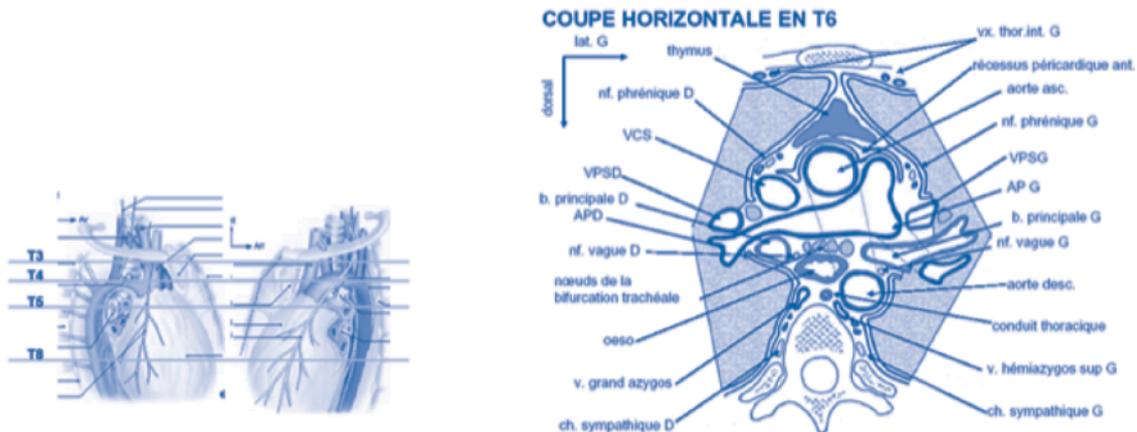
- **Coupe niveau T4:** niveau des deux crosses

- **Crosse de l'aorte** enjambe la bronche souche gauche ➔ aorte descendante (médiastin post)
- **Crosse de l'azygos** enjambe la bronche souche droite ➔ VCS (médiastin ant)
- Le phrénique gauche et le vague gauche en avant de l'aorte horizontale
- Le nerf phrénique droit: face latérale de la VCS
- Le nerf vague droit se rapproche de l'œsophage
- Le nerf récurrent gauche est au contact du bord postéro-gauche de la trachée
- Grande veine azygos à droite
- Hémiazygos sup à gauche



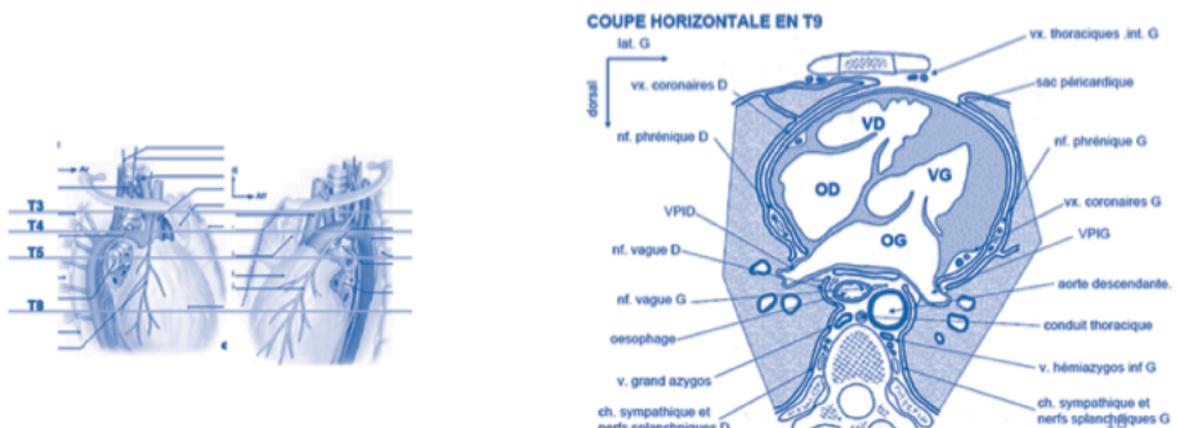
Coupes niveaux T5 et T6: passent par les hiles pulmonaires

- Médiastin ant: alignement des troncs vasculaires (AP, Aorte ascendante et VCS)
- Les pédicules pulmonaires amorcent leurs passage à travers les hiles
- La bifurcation de l'artère pulmonaire sous la voûte de la crose aortique
- L'aorte descendante dans le médiastin postérieur
- Le vague gauche en avant de l'**aorte descendante** (se rapproche de l'œsophage)



• Coupes niveaux T8, T9

- Le médiastin antérieur est occupé par la masse cardiaque
- L'œsophage va remplacer la trachée comme limite entre médiastin antérieur et médiastin postérieur
- L'œsophage est appliqué contre l'oreillette gauche recouverte par le cul de sac de Haller
- Le vague droit en arrière et à droite de l'œsophage
- Le vague gauche en avant et à gauche de l'œsophage
- Le canal thoracique entre la grande veine azygos et l'aorte descendante
- La veine hémiazygos inférieure dans le médiastin postérieur (l'hémiazygos sup s'infléchit à droite pour se jeter dans la grande veine azygos au niveau D7)



1. LE MÉDIASTIN ANTÉRIEUR

Il est vasculaire, plus étendu d'avant en arrière que le médiastin postérieur.

1.1 L'ÉTAGE SUPÉRIEUR.

Il est occupé par le thymus et les branches des gros vaisseaux de la base du cœur qui se disposent en 2 plans : antérieur veineux et postérieur artériel.

1-1-1- LE THYMUS.

C'est un organe lymphoïde fait de 2 lobes, il occupe la partie antérieure du médiastin antérieur, il est contenu dans une loge fibreuse appelée loge thymique.

Le thymus, volumineux chez l'enfant, involue avec l'âge et laisse place à des résidus graisseux. Le thymus est vascularisé par des artères venant du cou à partir des artères sous-clavières, les veines se jettent dans la veine brachio-céphalique (tronc veineux brachio-céphalique) gauche

1-1-2- LE PLAN ANTÉRIEUR VEINEUX : il est constitué par les veines brachio-céphaliques (tronc veineux brachio-céphaliques) qui se jettent dans la veine cave. Les ganglions lymphatiques des chaînes médiastinales antérieures se placent le long de ces veines.

1-1-3- LE PLAN POSTÉRIEUR ARTÉRIEL : placé en arrière du plan veineux, il comporte les deux premières branches qui naissent de l'arc aortique (portion horizontale de la crosse aortique) c'est-à-dire l'artère brachio-céphalique (tronc artériel brachio-céphalique) et la carotide commune (primitive) gauche. L'artère subclavière (sous-clavière) gauche étant située dans le médiastin postérieur ainsi que la terminaison de la crosse aortique).

1-2 L'ÉTAGE MOYEN.

Il est occupé par les gros vaisseaux de la base du cœur.

- La veine cave supérieure : née de la réunion des deux veines brachio-céphaliques (tronc veineux brachio-céphaliques), elle reçoit sur sa face postérieure la crosse de la veine azygos (grande veine azygos) et pénètre dans le péricarde avant de se jeter dans l'atrium (oreillette) droit.
- L'artère pulmonaire.
- La crosse aortique : l'aorte ascendante et le tronc de l'artère pulmonaire sont contenus dans le péricarde dans une gaine séreuse commune.

Les troncs vasculaires sont en rapport avec :

- La chaîne ganglionnaire médiastinale antérieure gauche située en avant et à gauche de l'aorte horizontale et de la carotide gauche.
- Les éléments nerveux du médiastin : vagues (pneumogastriques) droit et gauche, laryngé inférieur (récurrent) gauche, nerfs phréniques droit et gauche et plexus cardiaque. Ces nerfs seront détaillés plus loin.

1-3- L'ÉTAGE INFÉRIEUR.

Contient le cœur avec son enveloppe péricardique.

2. LE MÉDIASTIN MOYEN.

Il est occupé par :

- **La trachée thoracique**
- **La bifurcation trachéale**
- **Les pédicules pulmonaires**
- **Les éléments artériels:**
 - Le segment horizontal de la crosse aortique
 - Carotide primitive gauche ±
- **Les éléments veineux**
 - La crosse de la veine azygos
 - La veine intercostale sup gauche

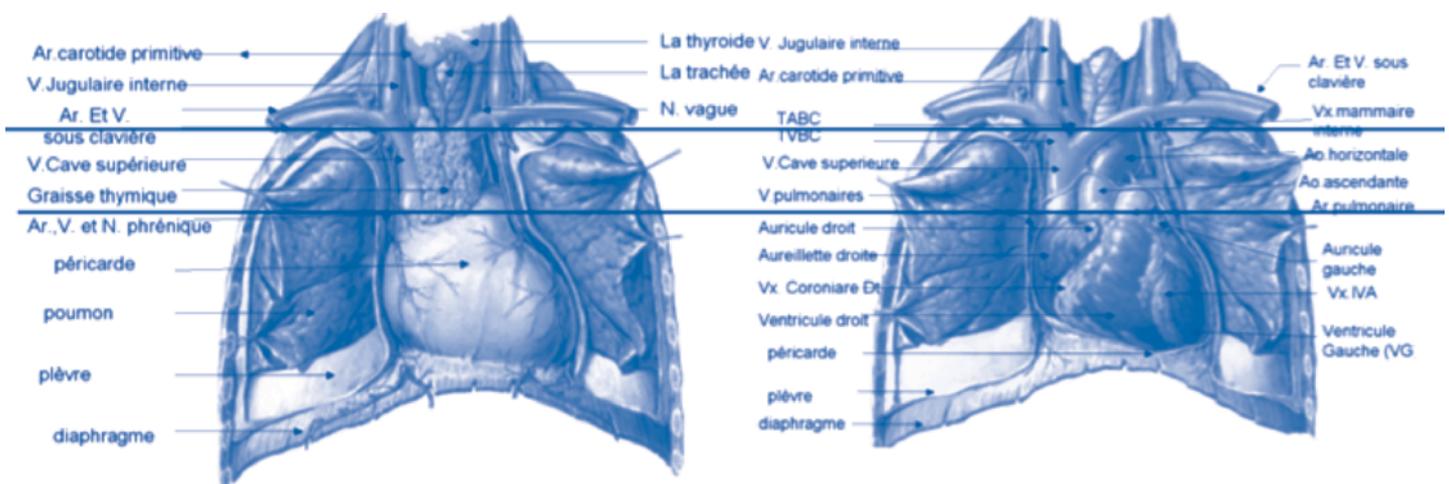
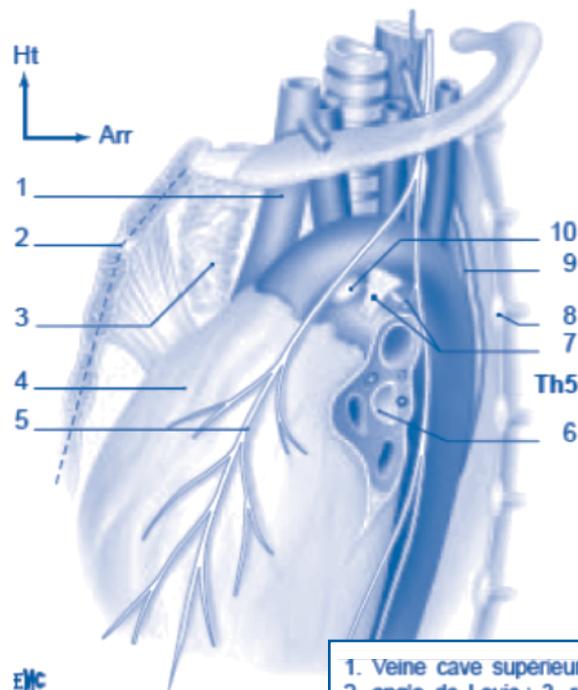
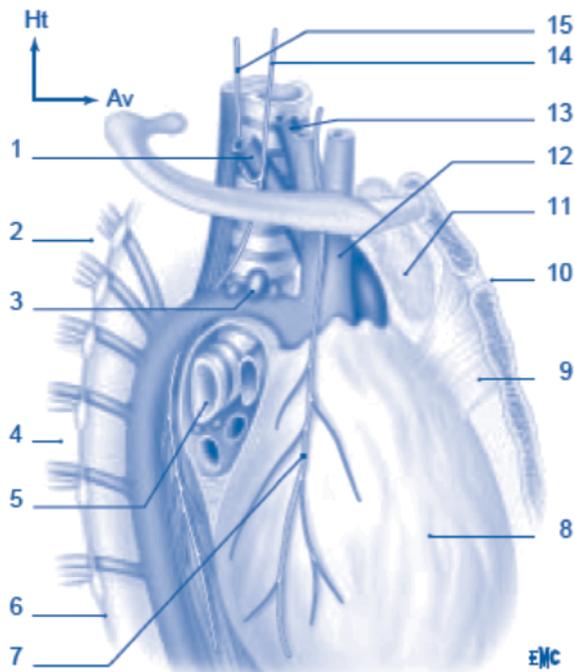


Figure n° 34 : Le médiastin antérieur (les 3 étages)



1. Artère subclavière droite ; 2. Th2 ; 3. nœuds lymphatiques ; 4. Th5 ; 5. bronche principale droite ; 6. chaîne sympathique latérovertébrale droite ; 7. nerf phrénique droit sur la face latérale de l'atrium droit ; 8. péricarde ; 9. ligament sternopéricardique supérieur ; 10. angle de Louis ; 11. reliquats thymiques ; 12. veine cave supérieure ; 13. artère carotide commune droite ; 14. nerf X droit ; 15. nerf laryngé inférieur droit.

Figure n° 35 : Vues latérales droite et gauche du médiastin

- Les lymphatiques
- Ganglions inter-trachéo-bronchiques
- Chaîne latéro-trachéale gauche
- Chaîne latéro-trachéale droite

3. LE MÉDIASTIN POSTÉRIEUR.

Il est moins étendu d'avant en arrière que le médiastin antérieur et est plus étendu de haut en bas. Il présente également 3 étages.

3-1 L'ÉTAGE SUPÉRIEUR.

Étage sus-azygo-aortique situé au-dessus des crosses aortiques et de l'azygos; il comprend l'œsophage situé en avant du rachis et en arrière de la trachée, la débordant légèrement à gauche, et le conduit (canal) thoracique situé en arrière et à gauche de l'œsophage. Le nerf laryngé inférieur (récurrent) gauche monte en avant de son bord gauche accompagné par la chaîne ganglionnaire récurrentielle gauche.

3-2 L'ÉTAGE MOYEN.

Étage inter-azygo-aortique situé entre les deux crosses vasculaires.

À ce niveau l'œsophage est situé entre la crosse aortique et celle de l'azygos, il est accompagné par le conduit (canal) thoracique qui est en arrière de lui. Il est rejoint à ce niveau par les deux nerfs vagues (pneumogastriques).

3-3 L'ÉTAGE INFÉRIEUR.

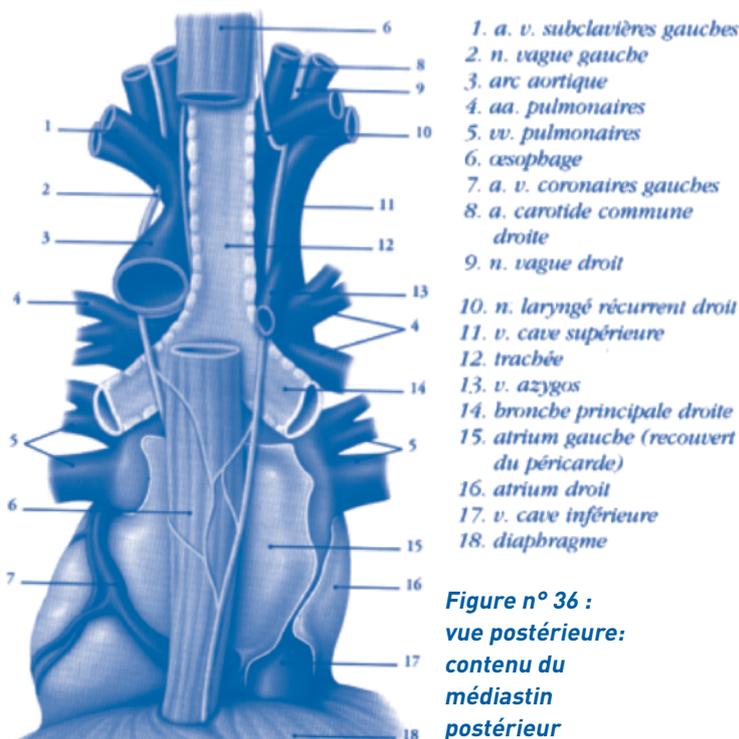
C'est l'étage sous-azygo-aortique : au-dessous des crosses les organes sont disposés en deux plans sépa-

rés par les recessus (culs-de-sac pleuraux) inter-azygo-œsophagien à droite et inter-aortico-œsophagien à gauche réunis par le ligament interpleural (de Morosow).

- Le plan antérieur est représenté par l'œsophage accompagné par les deux nerfs vagues (pneumogastriques).

- Le plan postérieur comprend l'aorte thoracique descendante et le conduit (canal) thoracique situé en arrière et à droite d'elle et en avant du rachis.

1. Veine cave supérieure ; 2. angle de Louis ; 3. reliquats thymiques ; 4. péricarde ; 5. nerf phrénique gauche ; 6. bronche principale gauche infra- et rétro-artérielle ; 7. ligament artériel de Botal et nerf laryngé inférieur gauche ; 8. chaîne sympathique latérovertébrale gauche ; 9. conduit thoracique ; 10. Ganglion de Wrisberg.



1. a. v. subclavières gauches
2. n. vague gauche
3. arc aortique
4. aa. pulmonaires
5. vv. pulmonaires
6. œsophage
7. a. v. coronaires gauches
8. a. carotide commune droite
9. n. vague droit
10. n. laryngé récurrent droit
11. v. cave supérieure
12. trachée
13. v. azygos
14. bronche principale droite
15. atrium gauche (recouvert du péricarde)
16. atrium droit
17. v. cave inférieure
18. diaphragme

Figure n° 36 : vue postérieure: contenu du médiastin postérieur

4. ORGANES CONTENUS DANS LE MÉDIASTIN.

4-1 LA TRACHÉE.

La trachée descend dans le médiastin dans un plan médian oblique en bas et en arrière jusqu'au niveau de la cinquième vertèbre thoracique pour se diviser en ses 2 bronches principales (souches).

Elle est située dans le médiastin moyen, en arrière des éléments vasculaires du médiastin antérieur et des ganglions de la chaîne latéro-trachéale droite.

4-2 L'AORTE THORACIQUE.

Déjà décrite avec la circulation systémique. La majeure partie de la crosse aortique est située dans le médiastin antérieur, seules la terminaison de l'aorte horizontale et la naissance de la sous-clavière gauche se trouvent dans le médiastin postérieur.

L'aorte descendante descend dans le médiastin postérieur jusqu'à l'orifice aortique du diaphragme (D12).

4-3 L'ARTÈRE PULMONAIRE.

Donne ses deux branches terminales droite et gauche après sa sortie du péricarde. Sa bifurcation se fait en regard de la bifurcation trachéale et de la concavité de la crosse aortique avec laquelle elle forme le quadrilatère de Wrisberg.

Le bord supérieur de la bifurcation de l'artère pulmonaire est relié à la concavité de la crosse aortique en regard de la naissance de l'artère subclavière (sous-clavière) gauche par le ligament artériel (vestige du canal artériel fœtal).

4-4 LES VEINES BRACHIO-CÉPHALIQUES (TRONCS VEINEUX BRACHIOCÉPHALIQUES). ET LA VEINE CAVE SUPÉRIEURE.

Déjà décrits avec les veines systémiques.

4-5 L'ŒSOPHAGE.

Segment du tube digestif qui relie le pharynx à l'estomac. Il fait suite au pharynx au niveau de la 6e vertèbre cervicale et après un court segment cervical, il pénètre dans le médiastin et descend en avant de la colonne vertébrale selon un trajet légèrement oblique vers la gauche jusqu'à l'orifice œsophagien du diaphragme situé au niveau de la 10e vertèbre thoracique, en avant de l'orifice aortique et légèrement à gauche de la ligne médiane, après un court trajet abdominal, il s'ouvre dans l'estomac au niveau du cardia.

L'œsophage est un conduit musculo-muqueux d'environ 25 cm de long sur 2 à 3 cm de diamètre.

Il occupe dans le thorax le médiastin postérieur, il est d'abord en arrière de la trachée, la débordant légèrement à gauche, la subclavière (sous-clavière) gauche est à sa gauche, puis descend en arrière de la bifurcation trachéale et de l'origine de la bronche principale (souche) gauche. À partir de la 4e vertèbre thoracique, l'œsophage s'éloigne du rachis, entrant en rapport avec l'aorte thoracique descendante qui est d'abord à sa gauche puis s'insinue progressivement en arrière de lui. La veine azygos (grande veine azygos) monte en avant du rachis, à droite de l'œsophage, sa crosse le croise à sa droite au niveau de la 4e vertèbre thoracique.

Le conduit (canal) thoracique est placé le long du bord droit de l'aorte descendante, en arrière et à gauche de l'œsophage.

Au niveau de l'étage inférieur du médiastin, l'œsophage est accompagné par les 2 nerfs vagues (pneumogastriques), le droit est en arrière et à droite de lui et le gauche en avant et à gauche.

L'œsophage est longé par les ligaments triangulaires du poumon qui constituent en arrière de lui les 2 recessus pleuraux (culs-de-sac) inter-aortico et inter-azygo-œsophagiens et le ligament interpleural.

4-6 LE CONDUIT (CANAL) THORACIQUE.

C'est le collecteur des lymphatiques sous-diaphragmatiques.

Le conduit (canal) thoracique naît au niveau d'une dilatation : la citerne du chyle (de Pecquet), qui reçoit les 2 troncs lombaires qui drainent les ganglions latéro-aortiques droit et gauche.

La citerne du chyle (de Pecquet) est située en avant du rachis entre la 2e lombale (lombaire) et la 11e vertèbre thoracique.

(La dilatation qui correspond à la citerne du chyle [de Pecquet] peut ne pas exister et le conduit [canal] thoracique naît alors directement des 2 troncs lombaires).

À partir de sa naissance le conduit (canal) thoracique monte le long du flanc droit de l'aorte thoracique descendante, en avant du rachis, puis suit la face postérieure de l'artère subclavière (sous-clavière) gauche, arrive à la base du cou et décrit à ce niveau une crosse concave en bas et se dirige en avant et à gauche pour se jeter dans le confluent veineux jugulo-subclavier (de Pirogoff) gauche (réunion de la jugulaire interne et de la sous-clavière).

4-7 LES ÉLÉMENTS NERVEUX DU MÉDIASTIN.

4-7-1 LES CHÂÎNES SYMPATHIQUES THORACIQUES.

Les chaînes sympathiques droite et gauche descendent le long du rachis en avant de l'interligne articulaire costo-vertébral.

La chaîne sympathique thoracique fait suite au sympathique cervical et se continue dans l'abdomen par le sympathique lombaire.

La chaîne sympathique thoracique présente 11 à 12 renflements ganglionnaires, elles donnent des rameaux communicant pour la moelle et des nerfs intercostaux, des rameaux aux organes du médiastin à partir des 4 ou 5 premiers ganglions (Œsophage, aorte et poumon), les 6 ou 7 derniers ganglions donnent les nerfs splanchniques.

4-7-2 LES NERFS VAGUES (PNEUMOGASTRIQUES).

Le nerf vague (pneumogastrique) droit : descend le long de l'artère brachio-céphalique (tronc artériel brachio-céphalique) après avoir donné au niveau de la base du cou le nerf laryngé inférieur (récurrent) droit qui contourne l'artère subclavière (sous-clavière) droite avant de remonter vers le larynx.

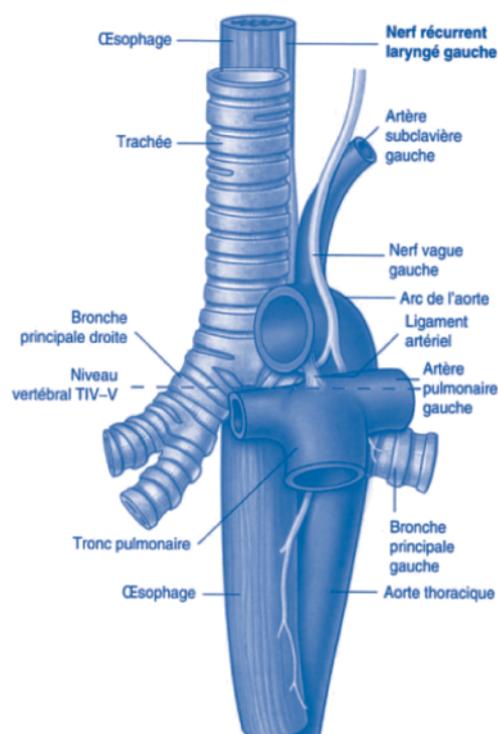
Ensuite le vague (pneumogastrique) droit se place à droite de la trachée, passe en dedans de la crosse de l'azygos, puis en arrière du pédicule pulmonaire (où il participe à la constitution du plexus pulmonaire) et rejoint le bord droit de l'œsophage qu'il accompagne en se plaçant en arrière et à droite de lui.

Le vague (pneumogastrique) gauche : descend d'abord latéralement à la carotide commune (primitive) gauche, croise la face antéro-gauche de l'arc aortique (aorte horizontale), se dirigeant en bas et en arrière et passe en arrière du pédicule pulmonaire gauche participant à la constitution du plexus pulmonaire gauche, passant en avant de l'aorte descendante puis longe le bord gauche de l'œsophage avant de se placer à sa face antérieure.

Au niveau du bord inférieur de la crosse aortique, il donne le nerf laryngé inférieur (récurrent) gauche qui passe au-dessous du ligament artériel, contourne la face inférieure puis postérieure de l'arc aortique (aorte horizontale) puis remonte le long du bord postéro-gauche de la trachée jusqu'au larynx, il est accompagné à ce niveau par la chaîne ganglionnaire récurrentielle (ou latéro-trachéale gauche).

4-7-3- LES NERFS PHRÉNIQUES.

- Le nerf phrénique droit : a un trajet vertical, en arrière de la veine brachio-céphalique (tronc veineux brachio-céphalique) droite puis longe la face latérale de la veine cave puis le péricarde en regard de l'atrium (oreillette) droit passant en avant des éléments du pédicule pulmonaire et rejoint la coupole diaphragmatique.
- Le nerf phrénique gauche : a un trajet très oblique en bas et en avant, longe d'abord l'artère subclavière (sous-clavière) gauche, croise la face antéro-gauche de l'arc aortique (aorte horizontale), passe en avant du pédicule pulmonaire puis longe le péricarde en regard du ventricule gauche jusqu'à atteindre le diaphragme.



Figures n° 37 : vue antérieure du médiastin

4-8 LES LYMPHATIQUES DU MÉDIASTIN.

4-8-1- LES GANGLIONS MÉDIASTINAUX ANTÉRIEURS OU PRÉVASCULAIRES :

Situés en avant des gros vaisseaux, constituant 3 chaînes :

- La chaîne médiastinale droite, préveineuse qui s'étend

le long des vaisseaux phréniques (diaphragmatiques) et de la veine cave supérieure du diaphragme jusqu'à la base du cou.

- La chaîne médiastinale antérieure gauche ou préaortico-carotidienne qui monte en avant de la crosse aortique et de la carotide commune (primitive) gauche depuis le pédicule pulmonaire jusqu'à la base du cou.
- La chaîne médiastinale antérieure transversale qui longe la veine brachio-céphalique (tronc veineux brachio-céphalique) gauche et joint les 2 chaînes médiastinales antérieures droite et gauche.

4-8-2 LES GANGLIONS MÉDIASTINAUX POSTÉRIEURS :

Le long de l'œsophage et de l'aorte thoracique.

4-8-3 LES GANGLIONS PÉRI-TRACHÉO-BRONCHIQUES :

Comprennent 3 groupes :

- Les ganglions péribronchiques ou pédiculaires sont situés au niveau des bifurcations bronchiques le long du pédicule pulmonaire.
- Les ganglions de la bifurcation ou inter-trachéo-bronchique : placés dans l'angle de la bifurcation trachéale, encore appelé ganglion sous-carénaire.
- Les ganglions latéro-trachéaux : avec une chaîne latéro-trachéale droite placée sur la face antéro-latérale droite de la trachée dans la loge paratrachéale droite (de Baréty), une chaîne latéro-trachéale gauche ou chaîne récurrentielle qui longe le nerf laryngé inférieur (récurrent) gauche le long du bord gauche de la trachée, et des ganglions rétrotrachéaux placés en arrière de la trachée.

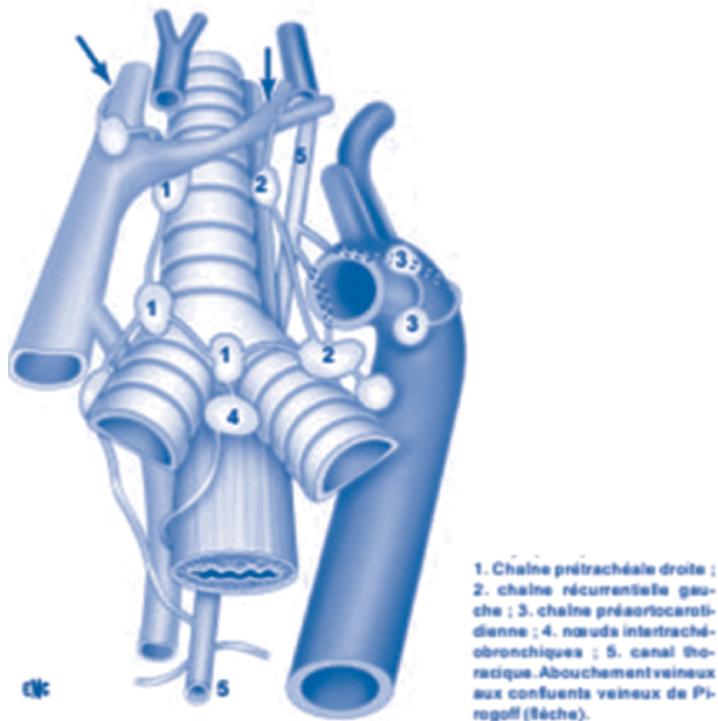


Figure n° 38 : Les différentes chaînes ganglionnaires du médiastin

PCEM1

THÈME IX LA CIRCULATION

BIOPHYSIQUE

ÉCOULEMENT DES FLUIDES

INTRODUCTION

Les fluides sont des milieux parfaitement déformables. Ils regroupent les milieux gazeux qui sont des fluides compressibles et les liquides qui sont des fluides peu compressibles.

Les fluides, qu'ils soient liquides ou gaz, peuvent donc s'écouler dans une canalisation et, dans leur mouvement, ils sont soumis à des frottements internes pouvant aboutir à un dégagement de chaleur : ce **frottement** s'appelle **viscosité**.

On admettra qu'il n'existe de frottement ni entre les molécules qui constituent le fluide, ni entre ses molécules et les parois du tuyau à travers lequel s'écoule le fluide « **idéal** » (ou parfait). Si ce n'est pas le cas, il s'agit au contraire d'un fluide **réel**.

L'étude d'un fluide en situation immobile « statique des fluides » est caractérisée par la notion de pression.

L'étude d'un fluide en mouvement et des lois correspondantes relève de la « dynamique des fluides » et est caractérisée par la notion de débit.

Le sang est un fluide qui constitue l'un des éléments internes les plus accessibles (exemple de la ponction veineuse). La circulation du sang revêt une importance primordiale pour assurer les échanges de gaz (O₂, CO₂), de métabolites, d'ions, d'hormones, de neurotransmetteurs.

En tant que liquide, le sang est soumis aux lois de

- l'hydrostatique, en raison des différences de hauteur entre la tête, le cœur et les membres inférieurs ;
- l'hydrodynamique, en raison de l'écoulement pulsé par le cœur.

Mais il s'agit d'un liquide particulier :

- qui contient des macromolécules (protéines) avec des propriétés spécifiques et des cellules déformables (Globules rouges et blancs)

- qui est contenu dans des vaisseaux dont les parois possèdent une tension, une élasticité et une inertie propre.

Le sang va donc présenter des propriétés de circulation particulières par rapport à l'ensemble des liquides.

Nous étudierons successivement les propriétés statiques et dynamiques des liquides, puis les particularités du sang et enfin les caractéristiques des parois vasculaires.

LES FLUIDES PARFAITS

I- STATIQUE D'UN LIQUIDE INCOMPRESSIBLE ET ISOTHERME

I.1 - NOTION DE PRESSION

Liquides incompressibles : C'est un liquide dont la masse volumique ρ est indépendante de la pression ($\rho = \text{Constante}$).

Liquides isothermes : C'est un liquide dont la température est constante et donc le volume est donc constant.

Pression : La pression est une grandeur **scalaire**. Considérons un fluide en contact avec une surface dS (Fig.1), il exerce globalement sur celle-ci une force $d\vec{f}$ que l'on peut décomposer en composantes normale $d\vec{N}$ et tangentielle $d\vec{T}_q$.

La pression est définie comme étant le coefficient de proportionnalité entre la norme de $d\vec{N}$ (composante normale de la force $d\vec{f}$ ou force pressante) et la norme du vecteur surface $d\vec{S}$ (Le vecteur $d\vec{S}$ est normal à la surface dS d'où la colinéarité entre $d\vec{N}$ et $d\vec{S}$).

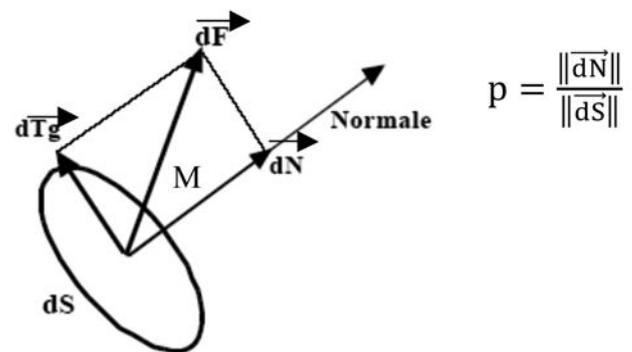


Fig.1 : Pression en un point M de la surface dS

I.2 - PRINCIPE FONDAMENTAL DE L'HYDROSTATIQUE

Considérons un cylindre fictif d'axe vertical, de surface de base S , et de hauteur h . M_1 et M_2 sont deux points sur l'axe du cylindre situés sur les deux bases du cylindre (Fig 2).

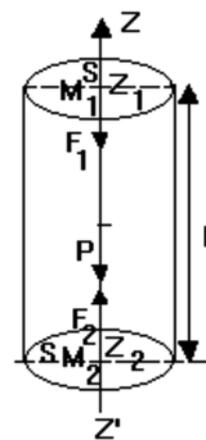


Fig.2 : Bilan des forces

Le liquide homogène est supposé immobile, incompressible et isotherme.

I.2.1- Bilan des forces : Il y a les forces pressantes et le poids du fluide.

- **Sur la surface latérale** : Les forces pressantes normales à cette surface sont situées dans un plan horizontal. Pour une raison de symétrie, leur résultante est nulle.

- **Sur les 2 surfaces de base** : \vec{F}_1 et \vec{F}_2 sont les forces pressantes qui s'exercent respectivement en M_1 en M_2 . Elles sont donc normales à ces surfaces et dirigées vers l'intérieur du cylindre.

- **Au centre du cylindre** : Le poids \vec{P} du fluide.

1.2.2 - Condition d'équilibre :

La condition d'équilibre s'écrit :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{P} = \vec{0} \quad \rightarrow \quad F_2 - F_1 = P$$

Soient : ρ la masse volumique du fluide, p_1 et p_2 les pressions respectivement en M_1 et en M_2 . On peut écrire : $F_1 = p_1 \cdot S$; $F_2 = p_2 \cdot S$ et $P = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot S \cdot h \cdot g$
 La différence de pressions sera donc : $p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot h$
 Si z_1 et z_2 sont les côtes respectives des points M_1 et M_2 sur l'axe Oz, on a $h = z_1 - z_2$
 et donc : $p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2)$ ou $p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2$

1.2.3 - Énoncé du principe fondamental de l'hydrostatique :

En tout point M d'un liquide homogène, immobile, incompressible et isotherme :

$$p + \rho \cdot g \cdot z = \text{Constante}$$

1.3 - APPLICATION :

Équivalent pression - Hauteur de liquide (Fig.3)

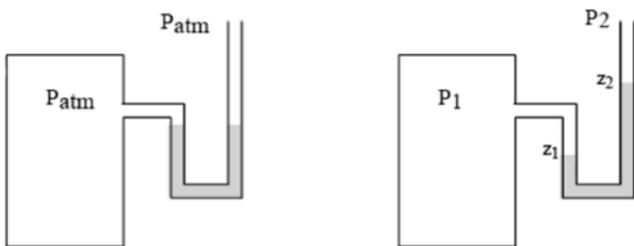


Fig. 3 : Hauteur de liquide Δz

$p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2$ et puisque ρ et g sont constants $(p_1 - p_2) = \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$ et donc

$$\Delta z = \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g}$$

Ainsi, la différence de pressions entre l'intérieur et l'extérieur peut être caractérisée soit par la différence de pression $p_1 - p_2$ soit par Δz d'où certaines unités de pression usuelles en mm Hg ou cm H₂O.

1.4 - UNITÉS DE PRESSION DU SYSTÈME INTERNATIONAL (S I)

L'unité de pression dans le système international est la Pascal (Pa). 1 Pa = 1N.m⁻².

1.5 - QUELQUES PRESSIONS PHYSIOLOGIQUES

1.5.1 - PRESSION ARTÉRIELLE

La pression artérielle est supérieure à la pression atmosphérique. Elle varie périodiquement à chaque pulsation cardiaque : la **maximale** est la **pression systolique** et vaut pour un adulte normal 130 mm Hg. La valeur minimale est la pression **diastolique** et vaut pour un adulte normal 80 mm Hg. Elle doit être mesurée sur le patient en position couchée sur un plan horizontal pour éliminer l'effet de l'altitude. Sinon il faut la mesurer à hauteur du cœur.

1.5.2 - PRESSION VEINEUSE

La pression capillaire pulmonaire et la pression veineuse centrale sont souvent mesurées en réanimation.

1.5.3 - PRESSION DU LIQUIDE CÉPHALO-RACHIDIEN (L.C.R)

Le L.C.R contenu dans l'espace sous-arachnoïdien est normalement soumis à une pression de 10 à 15 cmH₂O au niveau du cerveau.

1.5.4 - PRESSION INTRAOCULAIRE

Les liquides intraoculaires sont normalement soumis à une pression < à 20 mm Hg.

1.6 - PRESSIONS SANGUINES ET POSTURE

Cette variation est illustrée par les schémas de la figure 4. Les valeurs présentées sont celles de la pression artérielle moyenne, en supposant que la masse sanguine reste immobile. Ces chiffres sont donc approximatifs.

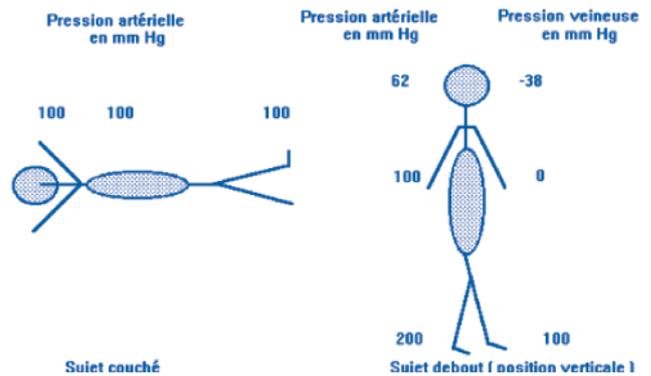


Fig 4 : Pression sanguine et posture

1.6.1 - SUJET COUCHÉ :

- z est constant pour tout le corps.
- La pression artérielle moyenne est égale à 100 mm Hg : c'est la surpression développée par le ventricule gauche par rapport à la pression atmosphérique.

1.6.2 - SUJET DEBOUT :

- au niveau du cœur, la pression artérielle est toujours à 100 mm Hg
 - au niveau de la tête (0,50 m plus haut), elle est de 62 mm Hg
 - au niveau de l'artère pédieuse (1,30 m plus bas), la pression vaut 200 mm Hg.
- Pour ce qui est de la pression veineuse, elle est à peu près nulle dans l'oreillette droite, négative et égale à -38 mm Hg au niveau de la tête et vaut 100 mm Hg au niveau du pied.

1.7 - MESURE DES PRESSIONS : MANOMÈTRE TYPE TUBE EN U

Soit un tube une forme en U rempli par exemple de mercure (Fig 5).

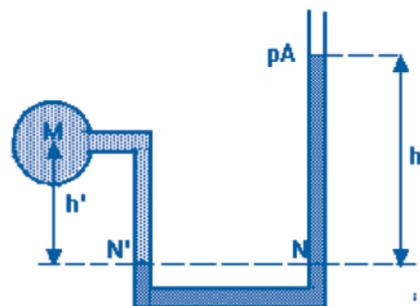


Fig.5 : Manomètre type tube en U

Appliquons le théorème fondamental de l'hydrostatique dans les branches du tube en U, aux points N et N'. En désignant par ρ et ρ' les masses volumiques respectives du liquide manométrique et du fluide étudié on a les relations suivantes :

$$P_A = p_a = \text{pression atmosphérique}$$

$$p_N = p_a + \rho gh$$

$$p_{N'} = p_M + \rho' gh' \quad \text{ou} \quad p_M = p_{N'} - \rho' gh'$$

$$\text{Comme } p_N = p_{N'} \text{ (} z_N = z_{N'} \text{), alors } p_M = p_a + \rho gh - \rho' gh'$$

Ainsi on obtient : $p_M = p_a + g.(\rho h - \rho' h')$
 Notons que ce manomètre mesure en fait la différence de pression entre le point M et la pression atmosphérique. La pression est lue sur le manomètre en hauteur de liquide. Le manomètre est rempli d'eau pour les mesures des faibles pressions et de mercure pour celles des pressions élevées.

I-8- APPLICATION MEDICALE : MESURE DE LA TENSION ARTÉRIELLE

Le sphygmomanomètre ou tensiomètre est utilisé pour la mesure clinique de la tension (ou pression) artérielle. Il comprend un manchon gonflable de tissu caoutchouté relié par un tube de caoutchouc :

- soit à un manomètre à mercure de type réservoir ou type en U, calibré en mm Hg.
- soit à une membrane qui en se déformant agit sur un ressort en spirale solidaire d'une aiguille. L'aiguille se déplace devant un cadran calibré en mm de Hg.
- Soit, dans les tensiomètres des générations récentes, à un écran d'affichage numérique.

II - DYNAMIQUE D'UN FLUIDE INCOMPRESSIBLE ($\rho = \text{CONSTANTE}$)

Nous supposons toujours le fluide incompressible et isotherme circulant dans un conduit indéformable ne subissant aucune force de frottement ni au sein du liquide lui-même ni au contact des parois.

II.1 - DÉFINITIONS

II.1.1- Écoulement à une dimension

L'écoulement est dit à une dimension dans un tube si la vitesse de l'écoulement à l'instant t est la même en tout point d'une section droite quelconque.

II.1.2 - Vitesse (Fig.6)

Si ds est l'abscisse curviligne parcourue par le fluide entre les instants t et (t + dt), le module v de la vitesse d'une particule fluide à l'instant t s'écrit :

$$v = \frac{ds}{dt} = \text{Constante}$$

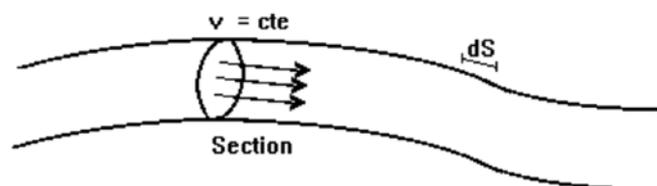


Fig.6 : vitesse de l'écoulement

II.1.3 - Débit

Le débit Q est le volume de liquide traversant une surface donnée en un temps donné. Si à l'instant t le fluide est au niveau de la section droite S' du conduit, à (t+dt) il aura atteint la section S. Q est le quotient par le temps dt, du volume dV de fluide compris entre S' et S (Fig.7)

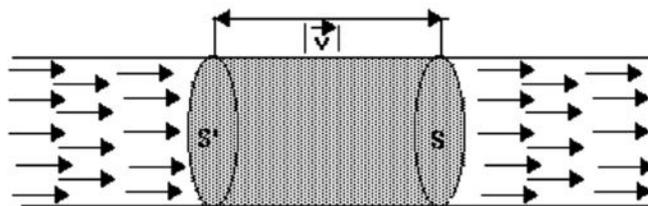


Fig.7 : Débit dans un conduit cylindrique

Si ds est la distance entre les deux sections droites S' et S, on peut écrire :

$$dV = S.ds \Rightarrow dV = S.v.dt \Rightarrow Q = \frac{dV}{dt} = S.v$$

II.2 - ÉQUATION DE CONTINUITÉ (Fig.8)

Considérons l'écoulement à une dimension d'un fluide incompressible ($\rho = \text{cste}$) dans un conduit indéformable de diamètre variable. Entre t et t+Δt le fluide passe de S₁ à S₂ (Fig.8).

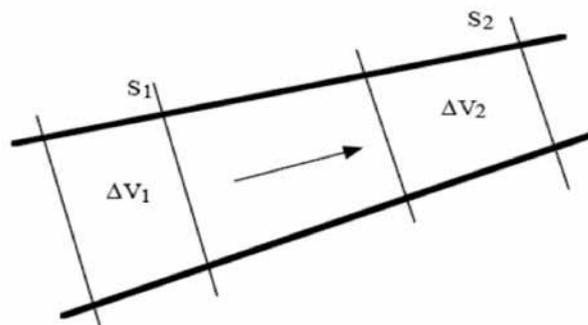


Fig. 8

Au niveau de chacune des sections droites, on peut écrire : $Q_1 = S_1.v_1$ et $Q_2 = S_2.v_2$

Or le caractère indéformable du tube et l'incompressibilité du liquide imposent que le volume ΔV₁ de liquide en 1, se retrouve entièrement après son déplacement en 2, soit ΔV₂. La loi de conservation de la matière impose donc que le volume entrant soit le même que le volume sortant par unité de temps :

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 \Rightarrow \frac{\Delta V_1}{\Delta t} = \frac{\Delta V_2}{\Delta t}$$

Comme $\Delta V = S.v.\Delta t$, on aura : $S_1.v_1 = S_2.v_2$
 D'où **l'équation de continuité** : $S.v = \text{constante}$

II.3 - CAS PARTICULIERS

On peut avoir un conduit qui se subdivise en plusieurs petits conduits ou la situation inverse à savoir plusieurs tubes qui se rassemblent en un seul (Fig. 10).

On admettra que cette équation de continuité demeure valable si le conduit se subdivise en une somme de petits tubes, **eux-mêmes indéformables**, ou bien, si à l'inverse, plusieurs tubes convergent en un seul.

L'équation de continuité s'écrit alors en 1 et en 2 (Fig.9) de la manière suivante :

$$S_1 \cdot v_1 = \sum_i S_i \cdot v_i \quad S_2 \cdot v_2 = \sum_j S_j \cdot v_j$$

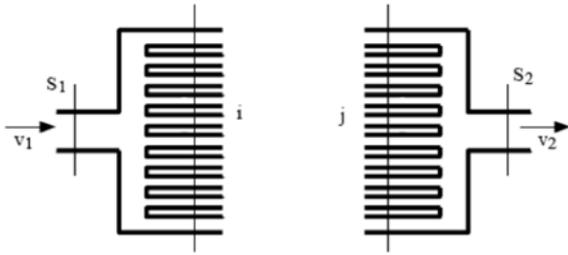


Fig. 9 : Conduit présentant une arborescence

III. THEOREME DE BERNOULLI (1738)

Il s'agit de chercher à établir l'équation reliant la pression et la vitesse d'écoulement.

III.1- HYPOTHÈSES :

- 1- L'écoulement est permanent c'est-à-dire que le débit de fluide est constant en fonction du temps.
- 2- Le fluide est parfait : pas de frottements contre les parois du conduit et entre les divers éléments de volume du liquide.
- 3- Le fluide est incompressible $\rho = \text{Constante}$.
Soit le conduit (Fig.10) :

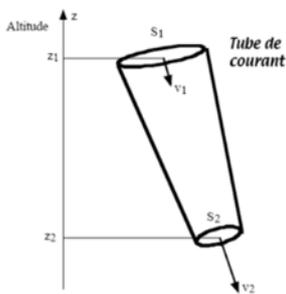


Fig. 10 : Écoulement d'un fluide parfait

Appliquons l'équation de continuité : $S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$. Si le fluide met un temps Δt pour passer de S_1 à S_2 , alors on peut écrire :

- La conservation du volume circulant entre S_1 et S_2 s'écrit : $S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$
- Liquide incompressible donc $\rho_1 S_1 \cdot v_1 = \rho_2 S_2 \cdot v_2 = \rho = \text{constante}$.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \Delta m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

- La conservation de la masse : $\Delta m = \rho \cdot \Delta V$ donc $\Delta m_1 = \Delta m_2$ d'où $\rho \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = \rho \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$

$$\Delta E_{\text{pes}} = \Delta m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$$

III.2- CONSERVATION DE L'ÉNERGIE GLOBALE :

L'énergie globale résulte de l'énergie cinétique liée au mouvement, de l'énergie potentielle liée à l'altitude et des travaux des forces de pression.

- **Énergie cinétique** : la variation d'énergie cinétique subie par un élément de volume ΔV , de masse Δm , passant de 1 en 2, est donnée par :
- **Énergie potentielle** : la variation d'énergie potentielle liée à l'altitude (pesanteur), par élément de masse, entre 1 et 2, est donnée par :

$$\frac{1}{2} \Delta m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \Delta m \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + (p_2 \cdot S_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot S_1 \cdot v_1) \cdot \Delta t = 0$$

$$\frac{1}{2} \rho \cdot \Delta m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \rho \cdot \Delta m \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + (p_2 \cdot \rho \cdot S_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot \rho \cdot S_1 \cdot v_1) \cdot \Delta t = 0$$

- **Travaux de pression** : les travaux de pression effectués sur les surfaces 1 et 2 qui provoquent, pendant Δt , des

$$\frac{1}{2} \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) = 0$$

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2$$

déplacements Δl_1 et Δl_2 des liquides sur les surfaces :

$$p + \rho \cdot g \cdot z + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = \text{Constante} = \text{Charge}$$

D'une façon générale, $W = F \times l$

$$\text{Ici : } \Delta W_{\text{pres}} = W_2 - W_1 = (P_2 \times S_2 \times \Delta l_2) - (P_1 \times S_1 \times \Delta l_1)$$

Comme $\Delta l_1 = v_1 \times \Delta t$ en 1 et en 2, on aura :

$$\Delta W_{\text{pres}} = (P_2 \times S_2 \times v_2 - P_1 \times S_1 \times v_1) \times \Delta t$$

La conservation de l'énergie globale s'écrit :

$$\Delta E_{\text{Tot}} = \Delta E_{\text{Cin}} + \Delta E_{\text{Pes}} + \Delta E_{\text{Press}} = 0$$

Sachant que $\rho \cdot S \cdot v \cdot \Delta t = \Delta m$ on obtient :

D'où l'expression du théorème de Bernoulli :

Cette constante, appelée aussi **charge du fluide**, à la dimension d'une **pression**.

REMARQUE :

En hydrostatique ($v=0$), l'expression du théorème de Bernoulli devient :

$p + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$. Donc le principe fondamental de l'hydrostatique est un cas particulier du théorème de Bernoulli.

III.3- APPLICATION : CAS D'UNE STÉNOSE (LE VENTURI)

III.3.1- Cas du fluide parfait

Soit un conduit qui présente un rétrécissement dans la zone B et dont le pourcentage de sténose est $\frac{S_A}{S_B}$ (Fig. 11).

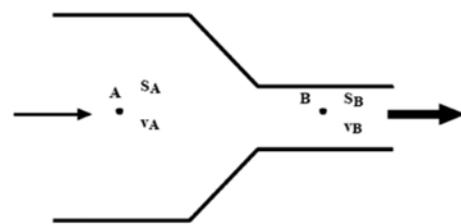


Fig. 11 : Le Venturi

La conservation de la charge s'écrit entre A et B :

$$p_A + \rho \cdot g \cdot z_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 = p_B + \rho \cdot g \cdot z_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v_B^2$$

À la même altitude ($z_A = z_B$), l'équation devient :

$$p_A - p_B = \frac{1}{2} \rho \cdot (v_B^2 - v_A^2)$$

$$p_A - p_B = \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 \left(\frac{S_A^2}{S_B^2} - 1 \right)$$

Comme $S_A > S_B$, alors $p_A > p_B$ et donc il existe :

- Une surpression en amont de la sténose, ce qui peut entraîner une dilatation.
- Une dépression en aval de la sténose, ce qui peut entraîner une baisse de la pression de remplissage des vaisseaux en aval en fonction du carré du pourcentage de sténose.

III.3.2- Application médicale : Cas du sang

1- Le sang n'est pas un fluide parfait. Lors du mouvement permanent d'un fluide réel incompressible, il y a toujours une dissipation de l'énergie sous forme de chaleur due aux frottements.

2- Il en résulte alors une perte de charge au cours de l'écoulement et

$$\left(p_A + \rho \cdot g \cdot z_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 \right) \text{ n'est plus conservée.}$$

3- La vitesse de l'écoulement est supposée constante dans tout ce qui précède.

En fait, plusieurs notions sont à prendre en considération et particulièrement :

- Le débit de sang dans nos vaisseaux est toujours pulsatile
- Il y a toujours une inertie de la colonne de sang qui est liée à l'accélération.
- Les artères présentent une compliance qui mesure leur élasticité et qui est variable avec l'âge.
- Le sang n'est pas un fluide homogène.

De ce fait, l'équation de base sera beaucoup plus complexe. C'est ce que nous verrons dans la partie B de ce chapitre consacrée aux fluides réels.

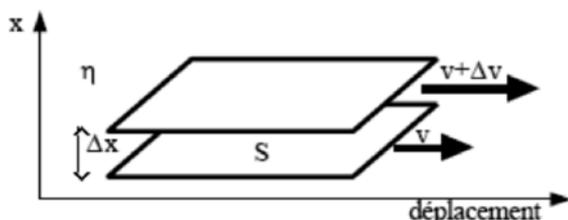
LES FLUIDES REELS

I. VISCOSITÉ ET FORCE DE VISCOSITÉ

Lorsqu'un fluide s'écoule dans un conduit, sa vitesse de déplacement est variable, elle s'affaiblit à cause des forces de frottements dues à la viscosité du fluide qui s'opposent au mouvement jusqu'à l'annuler.

Deux tubes de courant adjacents présenteront également des frottements. Ces forces s'opposent au déplacement : elles tendent à ralentir le tube le plus rapide et accélérer le tube le plus lent.

Soit un liquide en écoulement tel que les vitesses dans deux lames de liquide adjacentes sont parallèles entre elles (Fig.1).



La force de viscosité F qui s'applique sur une surface S en mouvement à une vitesse v s'exprime par :

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x}$$

- η est le coefficient de viscosité du milieu
- Δx est la distance des deux lames liquides
- Δv leur différence de vitesse.
- $\Delta v / \Delta x$ est un gradient de vitesse appelé aussi taux de cisaillement. Il est exprimé en valeur algébrique :
 - positif, il entraîne la surface S et l'accélère.
 - négatif, il s'oppose au mouvement de S et la ralentit.

I.1- COEFFICIENT DE VISCOSITÉ η

L'équation aux dimensions du coefficient de viscosité est : $[\eta] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$

L'unité du Système international (S.I) est le Poiseuille : symbole Pl

L'unité du système c. g. s est le poise : 1 Pl = 10 poises.

La viscosité du sang dépend :

- de l'Hématocrite
- de la déformabilité des hématies
- de la température

I.2- FLUIDES NEWTONIENS ET NON NEWTONIENS

Les fluides pour lesquels les paramètres η et $\Delta v / \Delta x$ sont indépendants sont appelés newtoniens. Par exemple, l'eau. Ceux pour lesquels η varie avec $\Delta v / \Delta x$ sont dits non-newtoniens. Par exemple les solutions macromoléculaires.

Le sang est une suspension de cellules dans le plasma. Il est non newtonien de par sa composant cellulaire. Le plasma a un comportement parfaitement newtonien, sa viscosité est de $1.6 \cdot 10^2$ Po à 37 °C.

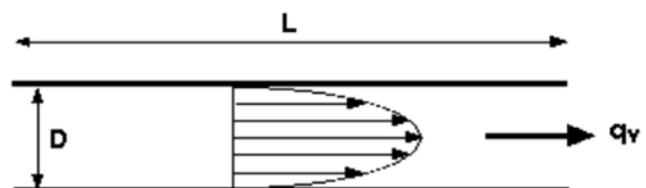
II. RÉGIMES D'ÉCOULEMENT- NOMBRE DE REYNOLDS

Considérons deux tubes de courant adjacents dans un liquide homogène. S'ils présentent des vitesses différentes, ils n'auront pas la même pression statique (Bernouilli). Ils vont nécessairement tendre à se mélanger et on ne peut plus appliquer le théorème de Bernouilli.

II.1 - ÉCOULEMENT LAMINAIRE

Quand $\Delta v / \Delta x$ est faible, à vitesse lente, les tubes de courant restent parallèles. Le profil des vitesses est parabolique avec le maximum sur l'axe du tube de courant de fluide.

Remarque : Quand un fluide est newtonien, la répartition des vitesses est parabolique dans une section droite et la loi de Poiseuille (voir paragraphe III) est applicable.



II.2 - ÉCOULEMENT TURBULENT

Quand $\Delta v / \Delta x$ est grand, à vitesse élevée, les tubes de courant ne restent plus parallèles. Il est difficile de pré-

voir comment ou quand passe-t-on d'un régime d'écoulement à un autre. Pour caractériser le type d'écoulement, on fait appel au nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta}$$

Avec : ρ la masse volumique du fluide, v la vitesse moyenne d'écoulement dans le tube de liquide de diamètre d .

On peut démontrer que Re est un nombre sans dimension.

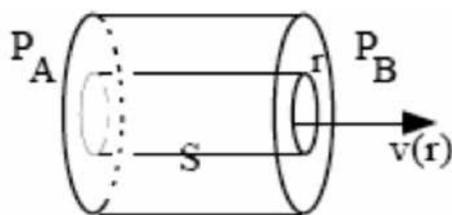
→ $Re < 2400$: le régime est toujours laminaire

→ $Re > 4000$: le régime est turbulent.

Entre ces deux valeurs se situe un régime intermédiaire pouvant varier selon les conditions géométriques d'environnement (qualité de la paroi) ou selon le temps (évolution d'une condition locale, ex : thrombus flottant attaché à la paroi vasculaire).

III. LOI DE POISEUILLE – PERTE DE CHARGE

Soient deux tubes de courant concentriques, soumis à la pression P_A au début et P_B à la fin.



III.1- BILAN DES FORCES

III.1.1- Forces de pression

Sur le tube intérieur, la force résultante F_p des forces de pression est :

$$F_p = (P_A \cdot \pi \cdot r^2) - (P_B \cdot \pi \cdot r^2) = (P_A - P_B) \cdot \pi \cdot r^2$$

III.1.2 - Forces de viscosité

Elles s'appliquent sur la surface latérale du tube :

$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$

$$F_v = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} = \eta \cdot 2 \pi \cdot r \cdot l \cdot \frac{dv}{dr}$$

En régime permanent, il y a équilibre des forces, donc pas d'accélération :

$$F_p + F_v = 0$$

Comme $S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$, on aura :

$$(P_A - P_B) \cdot \pi \cdot r^2 + \eta \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot \frac{dv}{dr} = 0$$

D'où

$$\frac{dv}{dr} = - \frac{P_A - P_B}{2 \cdot \eta \cdot l} \times r$$

Par intégration, il vient :

$$v(r) = - \left(\frac{P_A - P_B}{4 \cdot \eta \cdot l} \right) \cdot r^2 + \text{constante}$$

La vitesse s'annule au contact de la paroi : quand $r = R$, rayon du tube global, $v(R) = 0$

$$v(R) = 0 = - \left(\frac{P_A - P_B}{4 \cdot \eta \cdot l} \right) \cdot R^2 + \text{constante}$$

$$\text{constante} = \left(\frac{P_A - P_B}{4 \cdot \eta \cdot l} \right) \cdot R^2$$

$$v(r) = \left(\frac{P_A - P_B}{4 \cdot \eta \cdot l} \right) \cdot (R^2 - r^2)$$

C'est l'équation d'une parabole.

Dans le cas d'un écoulement laminaire, le profil des vitesses est une parabole, la vitesse axiale étant maximale et donnée par :

$$V_{\max} = \left(\frac{P_A - P_B}{4 \cdot \eta \cdot l} \right) \cdot R^2$$

$\left(\frac{P_A - P_B}{l} \right)$ est la perte de charge par unité de longueur.

On peut calculer le débit dans un petit tube de courant où la vitesse est la même partout.

La surface est : $dS = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$



Le débit étant $Q = S \cdot v$, on aura un débit élémentaire :

$dQ = v(r) \cdot dS = v(r) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$

En remplaçant $v(r)$ par sa fonction, la relation devient :

$$dQ = \frac{P_A - P_B}{4 \cdot \eta \cdot l} \cdot (R^2 - r^2) \cdot 2 \pi r \cdot dr$$

$$Q = \int_0^R dQ = \frac{\pi R^4}{8 \eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta l}$$

$$\text{Soit } Q = \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{P_A - P_B}{l} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot l}$$

C'est la **loi de Poiseuille**

En pratique, on cherchera à appliquer la loi de Poiseuille à des tubes de taille finie.

Application médicale :

- **Perfusion** : Le débit est proportionnel à R^4 donc quand R double le débit est multiplié par 16 et pour un volume donné ceci implique que le temps d'écoulement sera divisé par 16 : Y penser au moment où on installe une perfusion
- **Plaque d'athérome** : Si une plaque d'athérome réduit de moitié le diamètre d'un vaisseau, le débit est divisé par 16.

III-2- PERTE DE CHARGE DANS UN TUBE CYLINDRIQUE

L'écoulement en régime permanent d'un fluide parfait est donné par le théorème de Bernoulli :

$$p + \rho \cdot g \cdot z + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = \text{Constante} = E$$

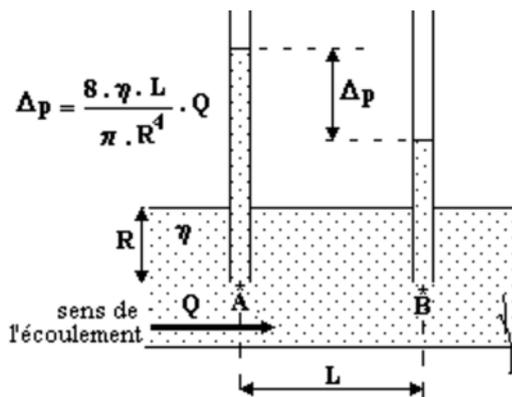
c'est la charge **E** du fluide.

Si ce fluide est réel, donc visqueux, il va être le siège de forces de **friction** (frottement dû à la viscosité) dont il faut tenir compte dans le bilan des forces appliquées et dans la conservation de l'énergie. La charge du fluide n'est plus constante lorsque ce fluide s'écoule d'un point A à un point B. Le théorème de Bernoulli n'est plus valable et il faut tenir compte de cette perte de charge comme le montre l'expression suivante :

$$p_A + \rho \cdot g \cdot z_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 = p_B + \rho \cdot g \cdot z_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v_B^2 + \Delta P$$

ΔP est la perte de charge (ou chute de pression) entre A et B due au seul effet de la viscosité. La charge d'un fluide n'est plus constante, elle diminue progressivement le long du conduit.

La perte de charge $\Delta E = E_A - E_B$, est égale à la quantité de chaleur dissipée par unité de volume du fluide entre ces points **A** et **B** (Fig 4).



Remarque : cette perte de charge peut être calculée à partir de la loi de Poiseuille, appliquée à un tuyau cylindrique en fonction de ses caractéristiques géométriques et des propriétés du liquide qui s'y écoule.

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot \Delta P \quad \text{ou} \quad \Delta P = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot R^4} \cdot Q$$

IV. ANALOGIES ÉLECTRIQUES

Il existe une analogie entre l'écoulement permanent d'un fluide réel dans un conduit et la circulation d'un courant continu dans un fil électrique (Fig 5).

La loi de Poiseuille nous permet d'écrire :

$$\Delta P = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot R^4} \cdot Q \quad ; \quad \Delta P = (P_A - P_B)$$

Cette loi qui exprime la proportionnalité entre la perte de charge et le débit est équivalente à la loi d'Ohm en électricité : $(V_A - V_B) = R \cdot I$ (**R** = résistance électrique)

Cette équivalence permet d'écrire :

$$\Delta P = (P_A - P_B) = R_m \cdot Q$$

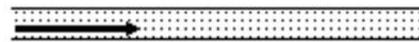
R_m est la résistance mécanique à l'écoulement en régime laminaire :

$$R_m = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot R^4}$$



Fil conducteur de longueur **L**, de rayon **R** et de résistivité **ρ** sa résistance s'écrit :

$$R_e = \frac{\rho \cdot L}{\pi \cdot R^2}$$



Conduite de longueur **L**, de rayon **R** contenant un fluide de viscosité **η** sa résistance s'écrit :

$$R_m = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot R^4}$$

Ceci nous permet de faire des analogies dites électriques pour les grandeurs rhéologiques :

Grandeur mécanique	Grandeur électrique
Différence de pression : Différence de potentiel :	
$(P_A - P_B)$	$(V_A - V_B)$
Débit du fluide : Q $\frac{\Delta q}{\Delta t} = \text{Intensité}$	
Résistance mécanique : Résistance électrique :	
$R_m = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot R^4}$	$R_e = \frac{\rho \cdot L}{\pi \cdot R^2}$

- **R_m** et **R_e** sont toutes les deux proportionnelles à la longueur **L**
- La résistivité **ρ** et la viscosité **η** semblent jouer un rôle similaire.
- La variation de **R_m** et **R_e** avec le rayon **R** n'est pas la même :
La résistance mécanique est proportionnelle à **R⁴**.
La résistance électrique est proportionnelle à **R²**

Par suite, on peut faire des associations avec des circuits hydrauliques de la même manière qu'avec des circuits électriques. On en déduit les relations suivantes :

Pour les conduits en série :	Pour les conduits en parallèle :
$R_{\text{Tot}} = \sum_i R_i$	$\frac{1}{R_{\text{Tot}}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$

- Les résistances mécaniques de deux tuyaux en série s'ajoutent. Le débit est le même et les différences de pression s'ajoutent.
- Quand un circuit hydraulique présente une dérivation,

ce sont les inverses des résistances qui s'ajoutent. La différence de pression est la même aux extrémités des deux branches, ce sont les débits qui s'ajoutent.

**APPLICATION MÉDICALE :
Régulation du débit coronaire**

Le myocarde est alimenté par un réseau d'artères coronaires. On peut modéliser l'ensemble par une suite de résistances en série et en parallèle.

Lorsqu'une pathologie s'installe (sténose progressive du réseau), on dispose d'examen pour l'évaluer. Ainsi, par la coronarographie, on visualise la présence des sténoses dans les artères coronaires à leur début.

La conclusion qui semble s'imposer est que la perturbation concerne la partie résistance en série.

Étudions ce cas sur le plan théorique :

Avec une seule résistance en série, en **maintenant constante la perte de charge** entre l'entrée (dictée par la pression du ventricule gauche) et la sortie (pression veineuse centrale du corps), le débit évolue comme le carré de la surface d'écoulement (d'après la loi de Poiseuille). En cas de sténose, la surface passe de S_0 à S ($S < S_0$) et le débit diminue :

$$Q = Q_0 \cdot \frac{S^2}{S_0^2}$$

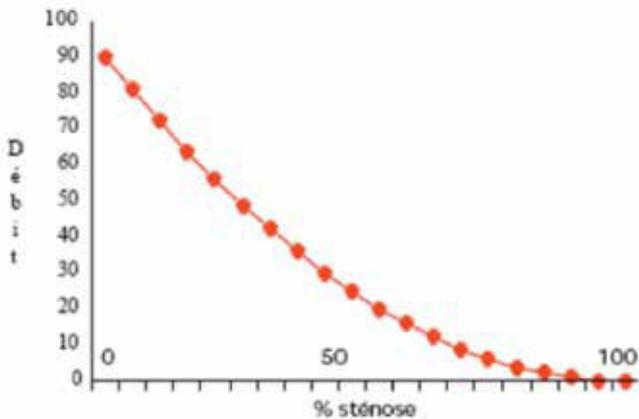
On voit déjà une différence avec le cas développé dans l'effet Venturi (où $Q = Q_0$) puisqu'ici, le sang peut passer par d'autres circuits que le réseau coronaire et que P_A et P_B restent inchangés.

Si $\Delta P = R \cdot Q$ est constant, alors Q diminue si R augmente. Pour un cardiologue, il est commun de parler en pourcentage de sténose :

$$x = \frac{(S_0 - S)}{S_0} = \frac{(\text{surface bouchée})}{(\text{surface initiale})} = 1 - \frac{S}{S_0}$$

D'où $\frac{S}{S_0} = 1 - x$ et par suite : $Q = Q_0 \cdot (1 - x)^2$

Le débit Q est une fonction parabolique du pourcentage de sténose :



Ceci ne correspond pas du tout aux observations au cours desquelles les sténoses sont découvertes à un stade avancé : il existe un phénomène compensateur destiné à maintenir la perfusion du myocarde.

En oubliant les résistances en parallèle, on a négligé leurs ordres de grandeur comparés à ceux des résistances en série. En effet, les résistances en série sont très petites devant celles en parallèle.

L'écriture détaillée de la loi de Poiseuille devient :

Sans sténose on peut écrire : $Q_0 = \frac{\Delta P}{R_{S_0} + R_p}$

Avec sténose, on a : $Q = \frac{\Delta P}{R_s + R_p}$

$$R_m = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot R^4}$$

$$R_{S_0} = \frac{8 \cdot \pi \cdot \eta \cdot L}{S_0^2} \quad \text{et} \quad R_s = \frac{8 \cdot \pi \cdot \eta \cdot L}{S_0^2 \cdot (1-x)^2} = \frac{R_{S_0}}{(1-x)^2}$$

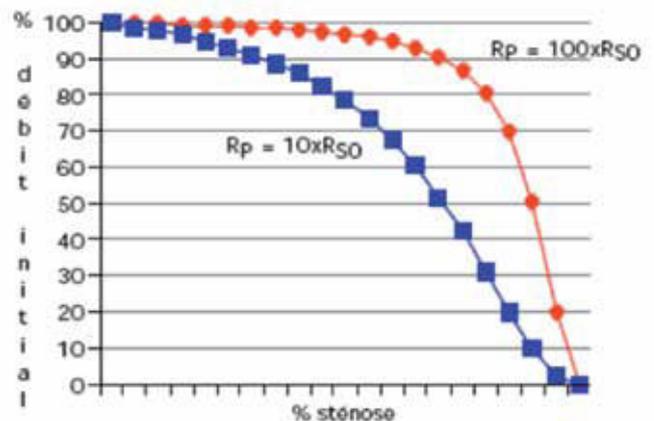
Tant que $R_s \ll R_p$, on aura : $Q \approx \frac{\Delta P}{R_p} \approx Q_0$

Lorsque $R_s \approx R_p$, on aura : $Q \approx \frac{\Delta P}{2 \cdot R_p} \approx \frac{Q_0}{2}$

On aura : $R_s = \frac{R_{S_0}}{(1-x)^2} \approx R_p$ et donc $(1-x)^2 = \frac{R_{S_0}}{R_p}$

Et enfin : $x = 1 - \sqrt{\frac{R_{S_0}}{R_p}}$

Si $R_{S_0} = 0,01 \cdot R_p$, on aura $x = 0,9$.



Par conséquent, une sténose des troncs artériels coronariens ne donne pas de signes cliniques avant un stade avancé.

HÉMODYNAMIQUE

- Le sang n'est pas une solution simple mais une **suspension** ; ce qui entraîne des comportements de fluide non Newtonien.
- Les vaisseaux ne sont pas de conduites rigides ; ils possèdent une certaine **élasticité**.

I- CIRCULATION DANS LES VAISSEAUX

I-1- LE SANG

I-1-1- VISCOSITÉ DU SANG

Le sang est une suspension de globules dans une solution macromoléculaire. À 37 °C, la viscosité de l'eau est de **0,7. 10⁻³ Poiseuille** et la viscosité relative du sang

$$\eta_r = \frac{\eta_{\text{sang}}}{\eta_{\text{eau}}} \text{ est de } \mathbf{3 \text{ à } 4} \text{ pour un hématoците de } \mathbf{45 \%}.$$

a- La viscosité relative η_r augmente avec l'hématocrite (Fig 1).

C'est ainsi que dans les affections où l'hématocrite est fortement augmenté, la viscosité du sang, et par suite la résistance à l'écoulement, est fortement accrue. Il peut en résulter des ralentissements circulatoires importants c'est le cas de la **polyglobulie**.

À cause de la présence de l'hémoglobine dans les hématies, cette viscosité est modifiée au cours des échanges respiratoires selon la teneur du sang en oxygène, en CO et en CO₂.

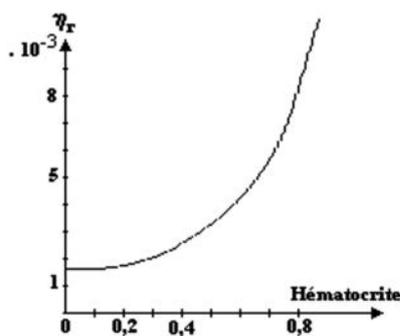


Fig 1

b- La viscosité relative η_r du sang dépend du diamètre du vaisseau. À hématoците constant, la viscosité du sang est pratiquement constante pour des vaisseaux de diamètre supérieur à 0,5 mm, mais diminue pour des vaisseaux plus fins.

c- La viscosité η du sang dépend du gradient de vitesse ou du taux de cisaillement. Elle décroît quand celui-ci augmente (Fig 2). Le sang n'est pas un fluide newtonien

I-1-2- ACCUMULATION AXIALE

On montre que, pour des valeurs importantes du gradient de vitesse, les hématies s'accumulent dans la par-

tie centrale du vaisseau et que, dans ces conditions, le profil des vitesses est aplati (Fig 3).

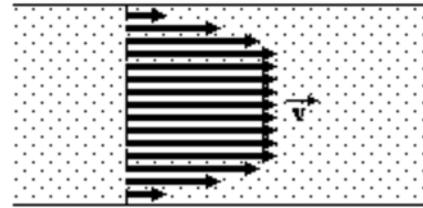


Fig. 3 : Profil aplati des vitesses

Cette **accumulation axiale** des hématies est d'autant plus marquée que la vitesse d'écoulement est plus grande. Il en résulte l'existence d'une région axiale très concentrée en hématies donc à hématoците élevé, bordée d'un manchon périphérique purement plasmatique (Fig 4).

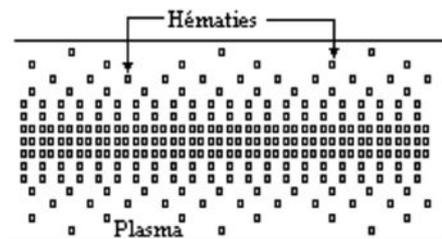


Fig. 4 : Accumulation axiale des hématies

Ceci a pour conséquences :

- l'abaissement de la viscosité près des bords des vaisseaux
- Si un vaisseau alimente une artériole ou un capillaire, l'hématocrite dans la dérivation peut être :
 - **diminué** si l'orifice d'entrée se trouve près de la paroi (Fig 5 a)
 - **accru** pour les petits vaisseaux dits à coussinet (fig 5b) ayant leur orifice d'entrée situé près de l'axe.

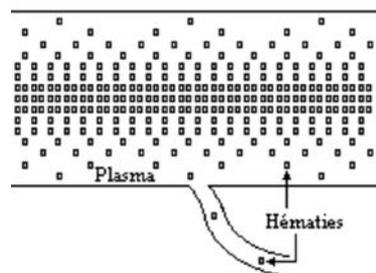


Fig. 5a

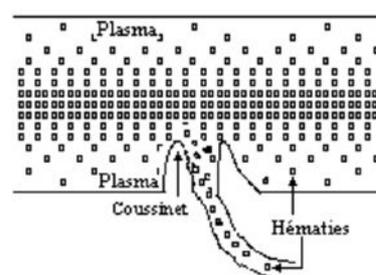


Fig. 5 b

I-2- ÉCOULEMENT DANS LES VAISSEAUX

I-2-1- CIRCULATION DANS LES GROS VAISSEAUX

Dans les conditions physiologiques de repos, le sang peut être considéré comme newtonien et l'écoulement est laminaire. L'**auscultation** des vaisseaux est dite **silencieuse**. En effet, au niveau de l'aorte, le nombre de Reynolds est de l'ordre de 1500 (donc < 2100) si on considère les données suivantes :

vitesse moyenne de l'écoulement ≈ 25 à 30 m.s^{-1} ; diamètre $\approx 2 \text{ cm}$

masse volumique : $\rho = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$;

viscosité du sang : $\eta = 4.10^{-3} \text{ Pl}$.

Dans les autres vaisseaux, où d'une part les diamètres sont plus petits et d'autre part, vitesses du sang sont plus faibles, le nombre de Reynolds est donc plus faible et l'écoulement est aussi laminaire.

Application médicale :

→ En cas d'anémie, la viscosité diminue, le nombre de Reynolds augmente et l'écoulement devient **turbulent** et par suite, il apparaît un **souffle systolique**.

→ En cas de **sténose vasculaire**, c'est à dire la présence d'un rétrécissement localisé d'un vaisseau, la vitesse d'écoulement à ce niveau augmente. Le nombre de Reynolds devient important, des **turbulences** naissent en aval de la sténose engendrant ainsi un **souffle systolique**. C'est ce qui se passe, par exemple, dans le cas d'une sténose des artères carotides, par dépôt d'athérome.

I-2-2- CIRCULATION DANS LES CAPILLAIRES

Le diamètre des capillaires systémiques (2 à 10 μm) est du même ordre de grandeur que celui des globules rouges (7 à 8 μm). Dans ces conditions, l'écoulement sanguin n'est plus considéré comme celui d'un fluide. Il ne peut se faire que par la déformation du globule rouge (Fig 6).



Fig. 6

La déformabilité des globules rouges dépend de la viscosité du liquide intracellulaire et des propriétés viscoélastiques de la membrane des globules rouges. Tous ces facteurs peuvent être l'objet d'altérations pathologiques. Tel est le cas de la « **drépanocytose** ». C'est une anomalie de l'hémoglobine qui existe dans le globule rouge qui fait qu'elle cristallise; elle devient donc solide et le globule ne peut plus se déformer. Les globules rouges qui ne se déforment plus bloquent la circulation ce qui entraîne une nécrose en aval.

I-2-3- CARACTÈRE DES VAISSEAUX

Nous avons considéré que :

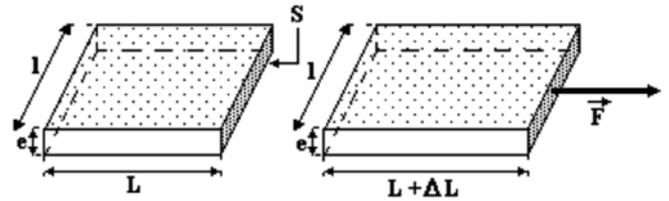
- les vaisseaux sont rigides
- l'écoulement dans les vaisseaux est permanent.

En réalité, les vaisseaux sont **extensibles** et **élastiques**.

Cette propriété permet de rendre **permanent** un écoulement qui, à l'origine, ne l'est pas.

a/ Notion d'élasticité

Si on applique une force de traction \vec{F} sur une lame solide de section S de longueur L , elle subit un allongement Δ tel que :



$$F = \|\vec{F}\| = \frac{E.S.\Delta L}{L} \text{ ou : } \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S} \quad \text{Loi de Hooke}$$

E est le module d'élasticité du matériau ou module d'**Young**. Il caractérise l'élasticité d'un corps. Plus E est grand, moins le corps est élastique. On voit par ailleurs que ΔL diminue quand E augmente.

b/ Notion d'élastance et de tension superficielle

Considérons une lame mince dont la surface de section est : $S = l.e$, l étant la largeur et e l'épaisseur (Fig 7). La loi de **Hooke** s'exprime par :

$$\|\vec{F}\| = E.e.l.\frac{\Delta L}{L} \text{ ou : } \frac{\|\vec{F}\|}{l} = E.e.\frac{\Delta L}{L}$$

→ Le rapport $\frac{\|\vec{F}\|}{l}$ définit la tension superficielle T_s .

C'est la force nécessaire pour rapprocher les deux extrémités d'une paroi élastique dans laquelle on aurait fait une incision d'une unité de longueur.

→ Le produit $(E.e)$ est l'élastance de la lame. Plus elle est grande, moins la lame est extensible. Sur le point dimensionnel, l'élastance est équivalente à une tension superficielle.

I-2-4- LOI DE LAPLACE

Si on considère une membrane quelconque tendue, il y a toujours un accroissement de pression quand on la traverse du côté convexe (extérieur) vers le côté concave (intérieur), on démontre que cet accroissement de pression est donné par la formule :

$$\Delta P = p_{\text{intérieur}} - p_{\text{extérieur}} = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

R_1 et R_2 sont les rayons de courbure principaux de la membrane au point considéré.

Dans le cas d'un tube cylindrique de rayon r , en un point de la paroi, les rayons de courbure sont :

$$R_1 = r \quad \text{et} \quad R_2 = \infty$$

La quantité ΔP est appelée pression transmurale. C'est la pression de part et d'autre de la paroi.

II- EFFET CAPACITIF DES GROSSES ARTÈRES

II-1- NOTION D'AMORTISSEUR DE WINDKESSEL - COMPLIANCE D'UNE ARTÈRE

Tout système physique, capable d'emmagasiner de l'énergie pendant un premier temps, puis de la restituer progressivement dans un second temps, joue le rôle d'**amortisseur de Windkessel**.

Exemples :

- compression et allongement d'un ressort
- charge et décharge d'un condensateur.

Une artère peut donc être considérée comme un amortisseur de Windkessel. Cet effet de réservoir d'énergie a pour effet de diminuer le travail du cœur.

Les grosses artères sont **élastiques**. Elles se distendent quand elles sont soumises à une augmentation de la pression qui s'exerce sur la paroi. La capacité de distension des parois est caractérisée par un coefficient **C** appelé **compliance** de l'artère. La compliance se définit par le rapport entre le volume de sang stocké par dilatation du vaisseau **dV** et la variation de pression correspondante **dP** soit :

$$C = \frac{dV}{dP}$$

- Pour un sujet de **20 ans**, la compliance est :
C = 0,82 ml / mm Hg.
 - La compliance diminue avec l'âge.
- Les conséquences de cette propriété sont :
- La régulation du débit.
 - La diminution du travail du cœur.

II-2- ÉTUDE DU DÉBIT À LA SORTIE D'UNE ARTÈRE

Entre les instants **t** et **(t + dt)**, la variation de volume **dV** d'un gros tronc artériel est égale à la différence entre le volume de sang **dV₁** qui entre et **dV₂** qui sort en direction des artéioles :

$$dV = (dV_1 - dV_2) \quad (1)$$

Si **Q₁** et **Q₂** sont respectivement les débits instantanés d'entrée et de sortie, on aura :

$$dV = Q_1 \cdot dt - Q_2 \cdot dt \quad (2)$$

Comme **dV = C \cdot dP**, C étant la compliance et dP la variation de pression dans l'artère, la relation (2) devient :

$$C \cdot dP = Q_1 \cdot dt - Q_2 \cdot dt \quad (3)$$

D'autre part, si R est la résistance d'aval, on peut écrire :

$$P(t) = R \cdot Q_2(t) \quad \text{ou} \quad dP = R \cdot Q_2$$

Finalement, on aura :

$$R \cdot C \frac{dQ_2}{dt} + Q_2 = Q_1$$

Cette équation définit **le débit Q₂ à la sortie** d'une artère en fonction du débit **Q₁ d'entrée**.

II-2-1- ANALOGIE

- 1- quand **Q₁** est maximal, **Q₂** est solution d'une équation analogue à l'équation de **charge d'un condensateur**.
La solution de cette équation est :

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right)$$

La représentation de cette fonction est donnée par la figure 8 a.

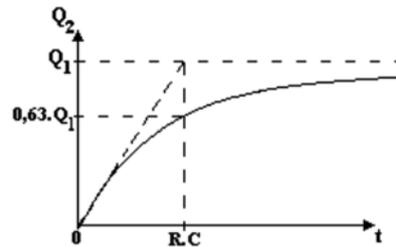


Fig. 8 a : Charge d'un condensateur

- 2- quand **Q₁** est nul, **Q₂** est solution d'une équation analogue à l'équation de **décharge d'un condensateur**.
La solution de cette équation est :

$$Q_2 = Q_1 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

La représentation de cette fonction est donnée par la figure 8 b.

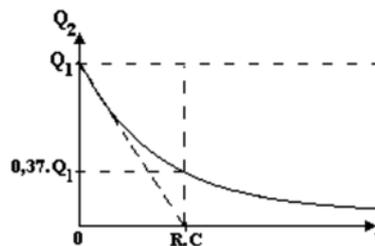


Fig. 8 a : Décharge d'un condensateur

- 3- Le produit **R.C** est, par définition, la constante de temps : c'est le temps au bout duquel le débit **Q₂** serait :
 - maximal si la variation était linéaire dans le cas de la figure 8a.
 - nul si la variation était linéaire dans le cas de la figure 8 b.
- 4- Si la compliance diminue, dans le cas de vieillissement, par exemple, le produit R.C varie dans le même sens, il devient de plus en plus petit et la variation de **Q₂** en fonction du temps atteint l'extremum au bout d'un temps plus court (Fig 9).

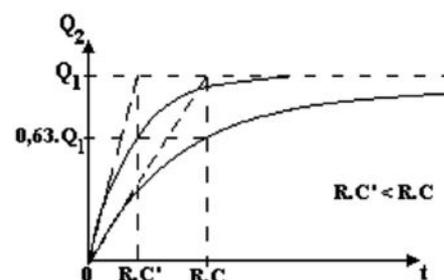


Fig. 9 : Si la compliance C diminue, le produit R.C diminue et le débit **Q₂** tend vers **Q₁** plus rapidement

II-2-2- APPLICATION À L'AOORTE

Dans le cas de l'aorte (Fig 10) :

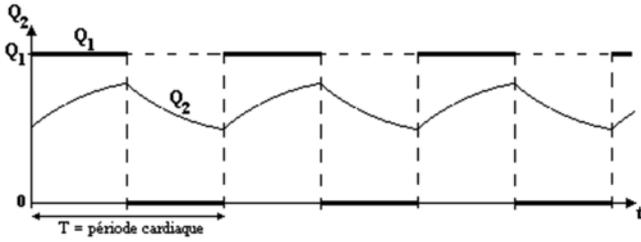


Fig. 10

- Le débit d'entrée Q_1 est pulsé, il peut être considéré en première approximation comme échelon rectangulaire, il est nul pendant la diastole et maximal pendant la systole.
- Le débit de sortie Q_2 est une fonction exponentielle de charge (systole) et de décharge (diastole). Le débit est donc plus régulier. Il n'est jamais nul et n'atteint pas la valeur maximale.

Tout se passe comme si à chaque pulsation (systole), l'artère accumulait une partie de l'énergie du cœur et la restituait progressivement pendant la diastole.

Cet effet de régulation dépend de la compliance C . Quand la compliance diminue, le débit devient moins régulier. Le vieillissement fait diminuer C , les artères deviennent donc de plus en plus rigides et le débit de moins en moins régulier.

II-2-3- EFFET DE L'INERTIE DU SANG

À chaque instant, la pression n'est pas la même dans tous les vaisseaux ; autrement dit, la pression n'est pas transmise de façon instantanée. Ceci est dû à l'inertie du sang. Cette difficulté de mise en mouvement de la masse sanguine est caractérisée par l'inertance L . C'est la chute de pression dP nécessaire pour accélérer le débit de $\frac{dQ}{dt}$.

$$\frac{dQ}{dt}$$

Si ρ est la masse volumique du fluide, S la section et L la longueur du vaisseau, on montre que :

$$L = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

CONCLUSION :

L'écoulement sanguin artériel est un écoulement **pulsatile**. Le débit total Q_T dans une artère est à chaque instant la somme d'un débit axial Q_A et d'un débit radial Q_R .

- Le débit axial Q_A s'effectue sous une différence de pression qui est la somme d'une chute de pression par résistance et par inertance.
- Le débit radial Q_R correspond à la variation de volume de l'artère sous l'effet d'une variation de pression.

III- LA POMPE CARDIAQUE

Le sang est un liquide visqueux, il est donc le siège de frottements et la circulation ne peut se faire sans perte de charge. C'est à la pompe cardiaque de fournir l'énergie nécessaire pour assurer la circulation. Cette énergie est finalement dissipée sous forme de chaleur.

III-1- DIAGRAMME PRESSION- VOLUME DES VENTRICULES

TRAVAIL MÉCANIQUE CARDIAQUE

Le travail mécanique de la pompe cardiaque peut être évalué en considérant le diagramme **pression-volume** à l'intérieur du ventricule. Le cycle peut être divisé en 4 phases (Fig 11).

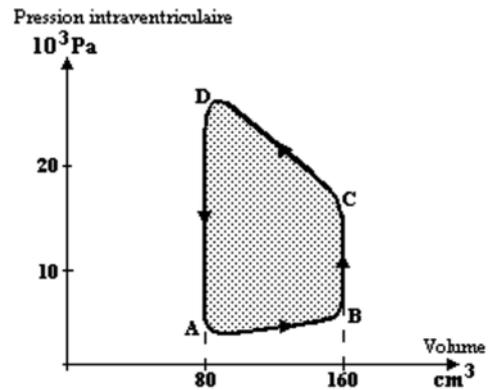


Fig. 11 : Diagramme pression-volume pour le ventricule gauche

- **AB** : phase de **remplissage diastolique** : le volume ventriculaire double alors que la pression est sensiblement constante.
- **BC** : phase de **compression** : la pression augmente à volume constant : c'est la mise sous tension.
- **CD** : phase d'**éjection** : Quand la pression dans le ventricule devient égale à la pression aortique, l'éjection commence.
- **DA** : phase de **relâchement isovolumique** : le muscle relâche sa tension, la pression diminue à volume constant.

Le travail fourni par le ventricule est :

$$\int_i^f P \cdot dV$$

Ce travail est représenté par la surface incluse dans la courbe fermée de l'intégrale de $P \cdot dV$

Dans les conditions normales de repos, la puissance (travail par unité de temps) ainsi fournie est de **1,1 Watt** pour le ventricule gauche et de **0,2 Watt** pour le ventricule droit. La puissance mécanique du cœur au repos vaut donc **1,3 Watt**. Elle est très faible.

Remarque :

En cas d'exercice musculaire le débit peut être multiplié par 4, la pression par **1,5** d'où la puissance du cœur sera multipliée par **4**. $1,5 = 6$, elle devient égale à **8 Watts**.

III-2- TRAVAIL DE MISE EN TENSION CARDIAQUE

Le travail mécanique du cœur n'est qu'une partie de l'énergie reçue pour son fonctionnement. En effet, tout muscle reçoit de l'énergie pour se contracter même s'il ne travaille pas.

Hill a montré qu'un muscle soumis à une force de tension T pendant un temps dt , consomme une énergie proportionnelle au produit ($T \cdot dt$). Au cours d'une contraction, le travail de mise en tension vaut donc :

$$W_2 = \alpha \cdot \int_i^f T \cdot dt$$

Ces notions s'appliquent aussi au cœur

III- 3- RENDEMENT MÉCANIQUE DU CŒUR

Au cours d'une contraction cardiaque, l'énergie totale reçue par le cœur est égale à la somme du travail fourni et du travail de mise en tension du cœur :

$$W = \int_i^f P.dV + \alpha.\int_i^f T.dt$$

Le rendement mécanique du cœur est égal au rapport du travail mécanique cardiaque sur l'énergie totale reçue :

$$\rho = \frac{\int_i^f P.dV}{\int_i^f P.dV + \alpha.\int_i^f T.dt}$$

Ce rendement est très faible. Il est de 3 % au repos et de 10 à 15 % à l'effort. La plus grande partie de l'énergie sert donc à mettre le cœur sous tension.

Les facteurs qui agissent sur la pression sanguine et la fréquence cardiaque agissent dans le même sens sur l'énergie cardiaque.

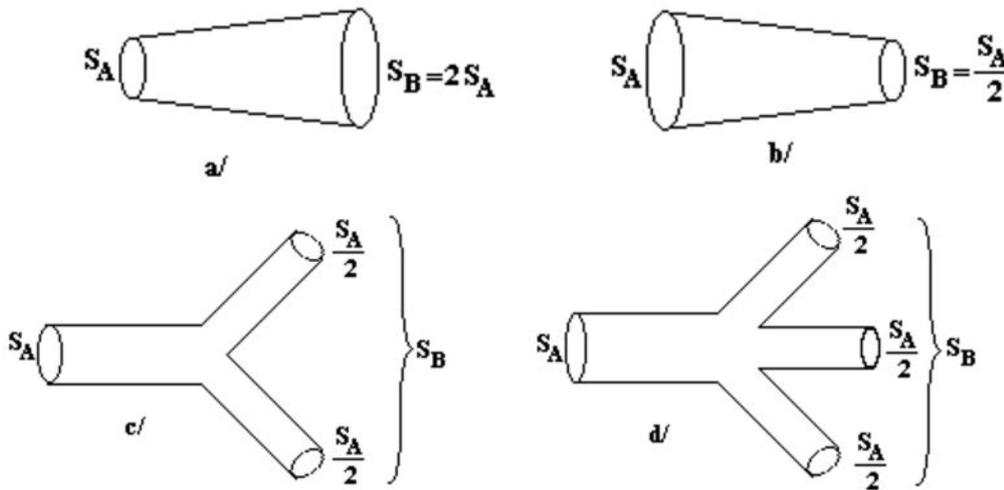
Exemple : l'hypertension, l'émotion, l'anxiété sollicitent le cœur de façon plus intense qu'un effort musculaire modéré et prolongé effectué dans le calme.

TESTS D'ÉVALUATION

CHAPITRE I : ÉCOULEMENT DES FLUIDES

À- FLUIDES PARFAITS

Test 1 : On considère l'écoulement dans les canalisations suivantes :



On appelle v_A la vitesse en S_A et v_B la vitesse en S_B .
1. Calculer le rapport $\frac{v_B}{v_A}$ dans les cas a/, b/, c/, et d/.

2. Sachant que le débit cardiaque d'un homme au repos est de **5 litres.mn⁻¹** ; en supposant que le sang est un liquide non visqueux, calculer la vitesse moyenne du sang dans :

- l'aorte de section **S = 3 cm²**.
- la veine cave de section **S = 4 cm²** environ.
- les capillaires de section totale **S = 2000 cm²** environ.

Test 2 : La vitesse d'écoulement de l'eau dans une canalisation horizontale est : $\|\vec{v}_A\| = 10 \text{ m.s}^{-1}$

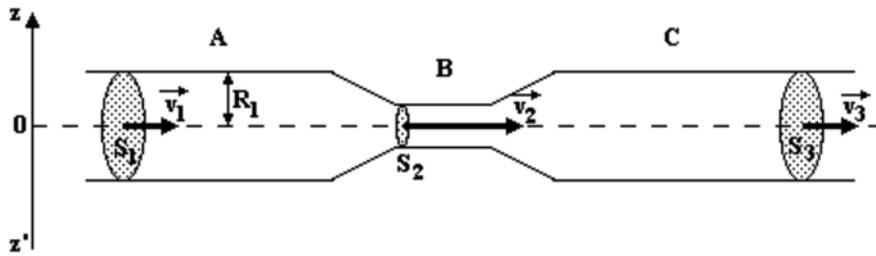
Calculer :



1. Le rayon de la canalisation à la sortie si on veut porter la vitesse de l'eau à 1000 m.s⁻¹.

2. La pression hydrostatique à l'intérieur de la canalisation si la pression à l'extérieur est 10⁵ Pa.

Test 3 : Soit un vaisseau horizontal comportant une partie sténosée **B** telle que : $R_2 = \frac{R_1}{3}$



- $p_1, S_1, R_1,$ et v_1 définissent respectivement la pression, la section, le rayon et la vitesse en amont de la zone sténosée (en A).
- $p_2, S_2, R_2,$ et v_2 définissent les mêmes paramètres dans la zone sténosée (en B).

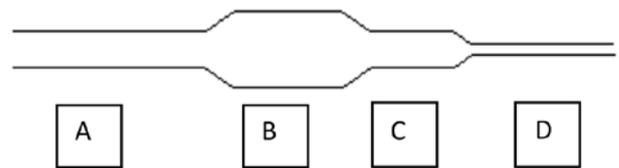
1. Sachant que le débit dans le vaisseau est supposé constant, calculer le rapport des vitesses du fluide dans les zones A et B

2. Sachant que la pression totale est 100 mm Hg et que la participation de l'énergie cinétique dans la zone A est de 1 mm Hg, calculer la pression due à l'énergie cinétique dans la zone sténosée B.

3. Calculer la pression hydrostatique en A et en B (Bernouilli).

4. Discuter les résultats.

Test 4 : On considère l'écoulement d'un liquide non visqueux dans la canalisation suivante :
Sachant que les sections sont telles que : $S_B > S_A = S_C > S_D$, comparer :



1. les vitesses en A, en B en C et en D.

2. les pressions en A, en B, en C et en D.

B- FLUIDES REELS

Test 1.

1- Donner l'équation aux dimensions du coefficient de viscosité.

2- En quelles unités s'exprime-t-il dans le système SI et dans le système c. g.s ?

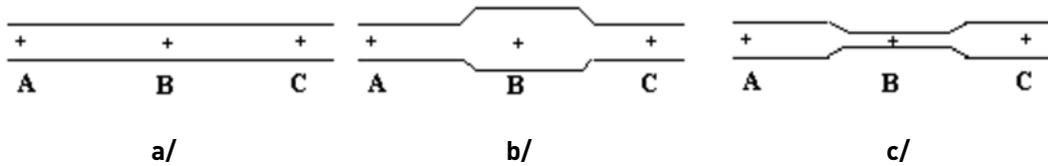
Test 2. Soit un liquide contenu dans un réservoir de volume **V** et de hauteur **h** qui s'écoule dans un tube capillaire vertical de longueur **l** et de rayon **r**. La section du tube est suffisamment grande pour pouvoir considérer **h** négligeable devant **l**.

1. Donner l'expression de la loi de Poiseuille en indiquant ce que représentent les différents termes.

2. Calculer le coefficient de viscosité d'un liquide de masse volumique $\rho = 0,8 \text{ g.cm}^{-3}$ placé dans le réservoir de volume 10 cm^3 qui se vide pendant **1 mn 40 s** à travers le tube capillaire dont le diamètre est **d = 2 mm**.

3. Le système précédant est utilisé pour calculer la viscosité relative ρ_l/ρ_{eau} d'un liquide de masse volumique ρ . Quelles sont les grandeurs à mesurer pour arriver au résultat ?

Test 3. : On considère l'écoulement d'un liquide dans les trois canalisations suivantes :



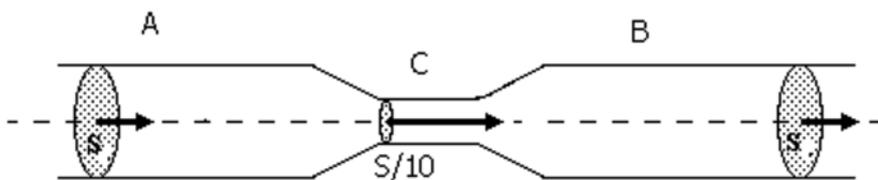
1. **Le liquide étant supposé parfait**, comparer, pour les cas a/, b/ et c/ :
 → les vitesses en A, B et C.

→ les pressions statiques en A, B et C.

2. **Le liquide est visqueux** : comparer pour le cas a/ seulement :
 → les vitesses en A, B et C.

→ les pressions statiques en A, B et C.

Test 4. : Soient deux vaisseaux A et B horizontaux de même section **S** reliés par un vaisseau de section **S / 10**.



1. En considérant le sang comme un liquide non visqueux, calculer les pressions hydrostatiques p_{iB} et p_{iC} ainsi que les pressions cinétiques p_{2B} et p_{2C} dans les vaisseaux B et C. On prendra : $p_{1A} = 100 \text{ mm Hg}$ et $p_{2A} = 1 \text{ mm Hg}$.

2. Interprétez les résultats expérimentaux obtenus et donnés dans le tableau suivant :

	A	B	C
P_1 (mm Hg)	100	50	70
P_2 (mm Hg)	1	36	1

Test 5 : Pour effectuer une transfusion sanguine à un sujet, on place le flacon à 1,3 m au-dessus de son bras. On utilise une aiguille de diamètre $d = 0,3$ mm et de longueur $AB = 2$ cm. En un temps $t = 1$ minute, le volume transfusé est $V = 3,5$ cm³.

Sachant que l'accélération de la pesanteur $g = 9,8$ m.s⁻² et que la masse volumique du sang est $\rho = 1$ g.cm⁻³.

1. Calculer la perte de charge Δp qui s'effectue dans l'aiguille.

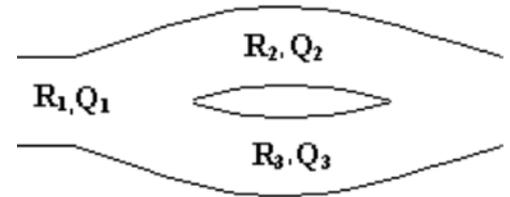
2. Énoncer la loi de Poiseuille.

3. Appliquer cette loi dans le cas de l'aiguille et calculer le coefficient de viscosité η du sang.

CHAPITRE II : HÉMODYNAMIQUE

Test 1 : On considère des vaisseaux formant un circuit tel que le débit d'arrivée Q_1 dans une branche de résistance R_1 se divise en deux branches de résistances R_2 et R_3 où les débits sont Q_2 et Q_3 .

1) Donner les expressions de Q_2 et Q_3 dans les résistances R_2 et R_3 en fonction du débit d'entrée Q_1 et des résistances R_2 et R_3 .



2) Quelle est la puissance P nécessaire pour maintenir ce débit ?

Test 2 : Quelle est la résistance mécanique d'un capillaire de longueur $l=1$ mm et de diamètre $d=8$ μm ? On prendra la viscosité du sang $\eta = 3,14 \cdot 10^{-3}$ Poiseuille.

Calculer le nombre total de capillaires, sachant que la section totale des capillaires est de 2000 cm². Quelle est leur résistance totale ?

Quelle chute de pression en résulte-t-il dans les capillaires ? Le débit cardiaque est de 5 L.mn⁻¹.

Test 3 Les équations de charge et de décharge d'un condensateur sont respectivement :

$$R.C \frac{dQ}{dt} + Q = Q_0 \quad (1); \text{ et } (2) \quad R.C \frac{dQ}{dt} + Q = 0$$

Les solutions de ces équations sont :

$$Q(t) = Q_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R.C}} \right) \text{ pour (1)} \qquad Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{R.C}} \text{ et pour (2)}$$

Q_0 est la charge maximale et C la capacité du condensateur. R est une résistance en série avec le condensateur.

1) Représenter l'allure de ces courbes.

2) Comparer ces deux équations à l'équation (établie au cours) qui définit $Q_2(t)$, le débit à la sortie d'une artère en fonction du débit d'entrée Q_1 .

On admettra que le débit d'entrée est un échelon rectangulaire défini par : $Q_1 = Q_0$ ou $Q_1 = 0$.

3) Représenter sur le même graphe $Q_1(t)$ et $Q_2(t)$ dans les cas suivants : $C_1 = 0 < C_2 < C_3 < C_4 = \infty$ Conclusions.

Test 4 : Chez un sujet en position couchée, la vitesse d'écoulement du sang dans un vaisseau AB de diamètre $d = 2$ cm et de longueur L , est $v = 26,53$ cm.s⁻¹.

1) Calculer le débit dans ce vaisseau.

2) Le sang est considéré comme un fluide visqueux de masse volumique $\rho = 10^3$ kg.m⁻³, de coefficient de viscosité $\eta = 4 \cdot 10^{-3}$ Poiseuille.

a. Comparer les vitesses et les pressions en A et en B. S'il y a variation, donner son expression.

b. Indiquer le type d'écoulement dans ces conditions. Pourquoi ?

3) Comment varie la viscosité en cas de forte anémie (diminution des globules rouges dans le sang). Comment agit cette variation sur le type d'écoulement ?

PCEM1

THÈME IX LA CIRCULATION

HISTOLOGIE- EMBRYOLOGIE

HISTOLOGIE DE L'APPAREIL CIRCULATOIRE

Prérequis

Les tissus épithéliaux de revêtement
Les tissus conjonctifs
Les tissus musculaires lisses

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Définir et décrire à l'échelle ultrastructurale les trois principaux types de capillaires sanguins en indiquant un exemple de chaque.
2. Décrire les éléments constitutifs du réseau microcirculatoire et indiquer les particularités histophysiologiques de ce réseau.
3. Décrire la structure des parois artériolaires et artérielles ; en déduire les rôles histophysiologiques.
4. Décrire la structure des veinules et des principales variétés de veines en indiquant les différences avec artères et veines
5. Reconnaître sur lames et images tous les types de vaisseaux
6. Décrire les différents types de dispositifs vasculaires spéciaux
7. Décrire les glomi neurovasculaires et indiquer leur site de prédilection
8. Décrire la structure des vaisseaux lymphatiques
9. Décrire la structure et la répartition de la composante conjonctive du cœur
10. Décrire les différents types de cellules cardiaques
11. Reconnaître sur lames et images les différentes structures histologiques du cœur

PLAN

1. INTRODUCTION

2. SYSTÈME VASCULAIRE SANGUIN

3. LES VAISSEAUX LYMPHATIQUES

4. LE CŒUR

1. INTRODUCTION

Le système circulatoire comprend : un système vasculaire sanguin et un système vasculaire lymphatique

*** LE SYSTÈME VASCULAIRE SANGUIN** COMPREND :

Le cœur qui est l'organe moteur.

Les artères, conduits efférents qui se ramifient, augmentent en nombre et diminuent de calibre au fur et à mesure qu'on s'éloigne du cœur. Elles conduisent le sang vers les capillaires.

Les capillaires forment un énorme réseau où ont lieu les échanges métaboliques, gazeux et humoraux entre le sang et les tissus.

Les veines reçoivent le sang des capillaires et le ramènent au cœur ; le nombre des veines diminue et leur taille augmente en se rapprochant du cœur.

Cet appareil est nécessaire pour les organismes pluricellulaires volumineux pour assurer la distribution des nutriments et messagers chimiques, la thermorégulation ainsi que pour l'épuration des déchets métaboliques.

*** LE SYSTÈME VASCULAIRE LYMPHATIQUE :**

est composé de capillaires et de conduits lymphatiques (collecteurs) qui drainent la lymphe (formée à partir des liquides interstitiels tissulaires) et la déversent dans la circulation veineuse. Les ganglions lymphatiques sont situés sur le trajet des vaisseaux lymphatiques collecteurs.

2. LE SYSTÈME VASCULAIRE SANGUIN :

Il comprend la macrocirculation (vaisseaux dont le diamètre est $>$ à 0,1 mm) et la microcirculation dont les vaisseaux sont visibles uniquement au microscope.

On étudiera successivement les capillaires, les artères, les artérioles, les veines et les veinules.

2.1. LES CAPILLAIRES SANGUINS

Ils sont définis comme le lieu d'échanges entre le sang et les tissus. Ce sont des « tubes » plus ou moins réguliers, anastomosés en réseau et dont le diamètre varie de 5 à 30 microns.

2.1.1. STRUCTURE DE BASE (Fig. 1)

La paroi capillaire comprend 3 éléments : un endothélium, une lame basale et éventuellement un périthélium (péricyte).

a. En microscopie optique : L'endothélium apparaît formé de cellules endothéliales plus ou moins aplaties, étirées dans le sens du courant sanguin et dont la région centrale renferme le noyau ovalaire et fait saillie sur le versant luminal.

La lame basale et les fibres de réticuline qui s'y accrochent peuvent être visualisées par la coloration au P.A.S. Les péricytes ne sont pas constants ; ce sont des cellules allongées situées du côté basal de l'endothélium. Lorsqu'ils sont présents, ils sont inclus dans un dédoublement de la lame basale.

b. En microscopie électronique

* On observe dans les cellules endothéliales les organites cytoplasmiques classiques en quantité modérée avec une répartition élective autour du noyau.

* Les cellules endothéliales possèdent des organites particuliers (sacs remplis de tubules) appelés corps de WEIBEL et PALADE qui sont considérés comme des marqueurs ultrastructuraux, et qui contiennent le facteur VIII de la coagulation.

Différents systèmes de jonction peuvent être observés entre les cellules endothéliales.

* Les cellules endothéliales comportent de nombreuses vésicules de micropinocytose. Ce sont souvent des vésicules qui transitent d'une face à l'autre de la cellule et qui peuvent fusionner en formant un canal.

* Le péricyte est situé dans un dédoublement de la lame basale ; il présente des similitudes ultrastructurales avec la cellule musculaire lisse, et le fibroblaste.

2.1.2. CLASSIFICATION DES CAPILLAIRES : On distingue plusieurs types de capillaires :

a. Les capillaires continus

* Ce sont les plus fréquents, on les retrouve dans de nombreux organes (les muscles squelettiques, le cœur, les poumons, la peau, les tissus conjonctifs...).

* L'endothélium est continu : les cellules endothéliales sont jointives (reliées par des systèmes de jonction) la lame basale est continue.

La plupart des capillaires continus sont pourvus de péricytes. Les capillaires du système nerveux sont de type continu, mais dépourvus de péricytes.

b. Les capillaires fenêtrés

* Le cytoplasme des cellules endothéliales est pourvu de perforations ou pores de 60 nm de diamètre, en moyenne. Ces pores peuvent être totalement perméables (sans diaphragme) ou obturés par un diaphragme. La lame basale est continue.

* Les capillaires fenêtrés se retrouvent principalement

au niveau de la plupart des glandes endocrines. Les capillaires glomérulaires du rein sont aussi fenêtrés.

c. Les capillaires discontinus

* On les retrouve dans le foie, la rate et la moelle osseuse. Leur lumière est large et leur trajet est souvent sinueux : ils sont aussi appelés capillaires sinusoides.

* Les cellules endothéliales ne forment pas une couche continue, mais sont séparées par des espaces qui permettent, en particulier, le passage d'éléments figurés du sang. La lame basale est également discontinue ou absente. Ces capillaires comportent, au niveau de leur paroi, des cellules qui présentent une activité phagocytaire (macrophages bordants).

* Les capillaires discontinus sont dépourvus de péricyte et sont entourés par un réseau réticulinique qui les rattache à la trame conjonctive des organes où ils siègent.

2.1.3. LE RÉSEAU CAPILLAIRE (Fig. 2)

* Il représente une très grande surface. Sa densité est très variable suivant les tissus : certains possèdent peu de capillaires (exemple : tendons) d'autres ont un réseau capillaire très dense (myocarde, alvéoles pulmonaires, glandes endocrines.....).

* L'architecture des réseaux capillaires est adaptée à la structure des organes ; 2 exemples illustrent cette notion :

- disposition préférentielle parallèle aux fibres musculaires striées squelettiques

- disposition radiale des capillaires sinusoides du foie, entre les travées d'hépatocytes.

* Le réseau capillaire est normalement situé entre l'arbre artériel et l'arbre veineux ; on observe cependant des exceptions (Fig. 3) :

- **système porte artériel** : le réseau capillaire est situé entre deux artères.

Exemple : le glomérule rénal (artériole afférente – capillaires glomérulaires – artériole efférente).

- **système porte veineux** : le réseau capillaire est situé entre deux veines.

Exemple : le foie : (branche de la veine porte – capillaires sinusoides – veine centrolobulaire).

2.2. LE SYSTÈME ARTÉRIEL :

Il unit le cœur au réseau capillaire

2.2.1. STRUCTURE GÉNÉRALE DE LA PAROI ARTÉRIELLE

a. Architecture : La paroi artérielle présente trois tuniques ; en partant de la lumière du vaisseau :

a1. L'intima : formée par :

* l'endothélium

* la couche conjonctive sous endothéliale ou endartère. C'est à ce niveau qu'apparaissent les premières surcharges lipidiques liées à l'athérome

a2. La média : constituée essentiellement de cellules musculaires lisses, assurant la vasomotricité, et de lames élastiques en proportion variable.

a3. L'adventice : constituée par un tissu conjonctivo-élastique

La périadventice est une gaine conjonctive commune au vaisseau et aux structures avoisinantes. Elle est formée de tissu conjonctif lâche et adipeux.

b. Vascularisation

* La paroi des petites artères est totalement dépourvue de capillaires. Elle se nourrit par imbibition à partir du sang contenu dans la lumière.

* Les artères de moyen et de gros calibre ont une triple nutrition :

- par imbibition de l'intima à partir du sang circulant
- par de petites branches nées de la lumière du vaisseau, en particulier au niveau des zones de bifurcation, destinées à la média dans sa partie interne.
- par une vascularisation propre, à partir des branches collatérales des vasa vasorum situés au niveau de l'adventice. Ce sont des vaisseaux nutritifs qui irriguent la partie externe de la média et l'adventice.

c. Innervation : Les fibres nerveuses se trouvent essentiellement au niveau de l'adventice.

* Les fibres vasomotrices : Il s'agit principalement de fibres nerveuses amyéliniques, appartenant au système nerveux autonome, en particulier sympathique destinées à la média. Les terminaisons nerveuses contiennent un médiateur chimique, notamment de la noradrénaline et de l'adrénaline, dont la diffusion entraîne une dépolarisation au niveau des fibres musculaires lisses de la média. La propagation de cette dépolarisation est assurée par les « nexus » qui unissent les cellules musculaires lisses voisines.

* Les fibres sensibles : Elles sont particulièrement localisées au niveau de zones sensorielles.

d. Les organes sensoriels : Il y a, dans la paroi des artères carotides, des organes sensoriels essentiels pour la régulation des fonctions cardio-vasculaires :

* Chémorécepteurs (**corpuscules carotidiens**) : sensibles aux variations sanguines en O_2 et CO_2 .

* Barorécepteurs (**sinus carotidiens**) : C'est une zone dilatée de la paroi de la carotide interne, riche en terminaisons nerveuses sensibles qui sont stimulées par la distension.

2.2.2. LES DIFFÉRENTS TYPES D'ARTÈRES

En fonction de leur structure, on distingue 2 types d'artères : les artères musculaires et les artères élastiques.

a. Les artères élastiques (Fig. 4) : Ce sont essentiellement de grosses artères proches du cœur véhiculant du sang sous forte pression (aorte, sous-clavière, carotide primitive, artère pulmonaire).

* L'intima est relativement épaisse et comporte un endothélium, une endartère avec une couche sous-endothéliale mince, pauvre en cellules et une couche profonde qui renferme des cellules plus nombreuses (histiocytes qui peuvent se charger de gouttelettes lipidiques).

La limitante élastique interne ne se distingue pas des lames élastiques de la média.

* La média, très épaisse, faite de lames élastiques fenêtrées et ondulées, disposées concentriquement et réunies par des fibres élastiques obliques. L'ensemble forme un réseau élastique à 3 dimensions. Le nombre de lames élastiques est très variable ; il peut atteindre 60 à 70 dans l'aorte de l'homme adulte.

Entre les lames élastiques, on trouve :

- des cellules musculaires lisses, orientées obliquement (cellules rameuses)

- du tissu conjonctif très peu abondant constitué de fibres de collagène et de fibroblastes

* L'adventice est mince. Elle est constituée d'un tissu conjonctivo-élastique et renferme des vasa vasorum et des fibres nerveuses.

b. Les artères musculaires (Fig. 5) : Les artères élastiques diminuent progressivement de calibre et donnent des branches à paroi plus riche en muscle lisse et appauvries en fibres élastiques.

Ce sont les plus nombreuses. Ce sont des artères de distribution à paroi relativement épaisse.

Elles sont représentées essentiellement par les petites artères (moins de 2 mm de diamètre) et par les artères de moyen calibre.

* L'intima devient plus mince en gardant la même structure histologique. Elle est sous-tendue par une limitante élastique interne (lame élastique épaisse, réfringente, généralement continue et sinueuse).

* La média est épaisse. Elle est formée de fibres musculaires lisses à disposition circulaire accompagnées d'une composante élastique modérée, de quelques fibres de collagène et de rares fibroblastes. Les myocytes sont entourés d'une lame basale et reliés par des jonctions « gap ».

Les cellules endothéliales sont aussi reliées aux myocytes les plus internes, par des jonctions communicantes, permettant un couplage métabolique.

* L'adventice est formée de fibres et de lames élastiques, qui peuvent constituer une limitante élastique externe au contact de la média, et surtout de faisceaux externes de collagène, longitudinaux ou spiralés. L'adventice est richement innervée et comporte des vasa vasorum, pour les artères de plus de 1 mm de calibre.

c. Les artérioles (Fig. 6)

Les artérioles se distinguent conventionnellement des petites artères par leur calibre inférieur à 0,2 mm et leur lumière réduite par rapport à l'épaisseur de la paroi.

* L'intima est mince. Il n'y a pas de limitante élastique interne. La limitante élastique interne, présente uniquement dans les plus grosses artérioles est fine.

* La média est formée d'une à deux couches de fibres musculaires à disposition circulaire.

* L'adventice, réduite à une mince couche de fibres de collagène comporte de nombreuses fibres nerveuses vasomotrices, amyéliniques.

Le passage de l'artériole au capillaire est progressif ; la couche de cellules musculaires lisses devient discontinue : c'est la métartériole.

2.2.3. MODE DE TERMINAISON DES ARTÈRES (Fig. 7)

a. Artères terminales : Dans certains cas, il n'existe pas d'anastomoses entre les artères qui irriguent des territoires voisins, dans ce cas, les artères sont dites terminales. En cas d'obstruction d'une artère terminale, aucune suppléance circulatoire n'est possible et le territoire normalement irrigué par cette artère se nécrose (meurt) réalisant un infarctus (exemples : myocarde, cerveau et rein).

b. Réseaux artériels anastomotiques : Au niveau de la peau et de la plupart des muqueuses, les artères for-

ment des réseaux ou plexus anastomotiques assurant ainsi des possibilités de suppléance lorsqu'une branche est obstruée.

2.2.4. HISTOPHYSIOLOGIE

a. Artères élastiques : Le flux sanguin est pulsatile à la sortie du cœur ; il est conditionné par l'activité rythmique du cœur. La paroi élastique de ces artères permet d'amortir, grâce à sa distension, l'onde de choc lors de l'éjection ventriculaire.

Lors de la diastole, le système élastique revient à l'état initial. L'énergie accumulée lors de sa distension est libérée permettant de faire progresser la colonne sanguine dans ces artères.

b. Artères musculaires et artérioles : La tonicité de leur paroi offre une résistance à la pression sanguine et permet d'amortir les ondes de choc.

Ces vaisseaux, riches en cellules musculaires lisses, sont susceptibles de se contracter (vasoconstriction) ou de se dilater (vasodilatation) et régulent par conséquent le débit sanguin au niveau des réseaux microcirculatoires.

Ces modifications sont sous la dépendance du système nerveux autonome et de facteurs vasomoteurs circulants.

L'épaisseur de la média musculaire s'adapte en augmentant si la pression est élevée.

c. L'endothélium : l'endothélium n'est pas une simple barrière inerte, mais un organe dynamique qui possède une grande variété de fonctions. Il réagit aux modifications chimiques, physiques et humorales qui surviennent dans son environnement par la synthèse et la libération de nombreux facteurs impliqués dans la modulation de l'angiogenèse, l'inflammation, l'hémostase, la vasomotricité et la perméabilité vasculaire.

2.3. LE SYSTÈME VEINEUX

Il draine le sang des capillaires vers le cœur, accompagnant souvent l'artère correspondante. Sur ce trajet, le diamètre augmente progressivement et la paroi s'épaissit.

2.3.1. PRINCIPALES DIFFÉRENCES AVEC LES ARTÈRES

(Fig. 8)

La paroi d'une veine est plus mince et souple que celle d'une artère de calibre équivalent.

À l'exception de certaines veines de gros calibre, il n'existe pas de limitante élastique interne au niveau de la paroi veineuse.

Les formations musculaires lisses à disposition circulaires sont peu développées.

L'adventice est la couche la plus épaisse

Les limites entre les 3 couches de la paroi ne sont pas nettes.

De l'ensemble de ces données, il en résulte que le tonus de la paroi veineuse est faible comparativement à l'équivalent artériel ; en effet, une veine vidée de son sang s'aplatit. Sur les coupes histologiques, la lumière est irrégulière alors que celle de l'artère est ronde.

2.3.2. STRUCTURE GÉNÉRALE DE LA PAROI VEINEUSE

a. Architecture : On retrouve les trois tuniques fondamentales :

* l'intima est mince, comportant un revêtement endothélial et un tissu conjonctif sous endothélial ou endo-veine. La limitante élastique interne est habituellement absente.

* la média est généralement peu développée, faite de couches musculaires lisses circulaires. Dans certains cas, la média peut manquer.

* L'adventice est la couche prépondérante. Elle est formée de faisceaux de fibres de collagène à orientation longitudinale prédominante, de fibres élastiques et même de fibres musculaires lisses. La limitante élastique externe est souvent inconstante et, quand elle existe, elle est formée de faisceaux de fibres élastiques irréguliers qui proviennent d'un renforcement du réseau élastique de l'adventice.

b. Vascularisation et innervation

Comparativement aux artères, les veines sont généralement plus riches en vasa vasorum adventiciels et les capillaires pénètrent plus profondément dans la paroi. Les vasa vasorum apportent un sang artériel plus riche en oxygène que celui qui circule dans la plupart des veines. La paroi veineuse contient des vaisseaux lymphatiques (alors que la paroi artérielle en est dépourvue).

L'innervation est représentée par des fibres amyéliniques qui pénètrent profondément jusqu'à proximité de l'intima, toutefois, l'innervation des veines n'est pas aussi importante que celle des artères.

2.3.3. PRINCIPAUX TYPES DE VEINES : Les veines peuvent être subdivisées en 2 groupes :

a. Veines réceptives : Ce sont des veines de topographie supra-cardiaque. À leur niveau le retour sanguin est « passif ». On peut décrire :

* Les veines fibreuses : dans ce cas, la subdivision de la paroi veineuse en 3 tuniques n'est pas réelle, leur paroi, revêtue par un endothélium est formée d'un tissu fibreux dense au sein duquel se trouvent de rares éléments élastiques. Exemple : les sinus veineux de la dure-mère.

* Les veines fibroélastiques : leur paroi, pauvre en composante musculaire, est particulièrement riche en composante fibroélastique au niveau de la média et de l'adventice. Exemples : les veines jugulaires et les veines axillaires.

b. Veines propulsives : Ce sont des veines de topographie sous-cardiaque qui assurent une circulation de retour gênée par la pesanteur ; elles présentent deux caractéristiques :

* des valvules (au niveau des veines des membres inférieurs) : (Fig. 9) elles sont généralement disposées par paires, chaque valvule est formée par un repli de l'intima, constitué par un axe conjonctivo-élastique mince, tapissé par un endothélium. Au-dessus des valvules, la veine est souvent légèrement dilatée. Les valvules s'opposent au reflux du courant sanguin.

* une couche musculaire surtout dans la média.

Dans la veine cave inférieure et dans d'autres veines de grand calibre, la média est relativement développée et l'on trouve des faisceaux musculaires longitudinaux dans l'adventice.

2.3.4. LES VEINULES ET LES VEINES DE PETIT

CALIBRE :

- * Les veinules assurent le raccordement des veines au réseau capillaire. Leur diamètre est supérieur à celui des capillaires.
- * Les veinules post-capillaires sont pourvues d'un endothélium entouré par une mince couche conjonctivo-élastique. Dans les organes lymphoïdes, les veinules post-capillaires présentent un endothélium à cellules cubiques et représentent un site privilégié pour le passage des lymphocytes (diapédèse).
- * Progressivement, au fur et à mesure que le calibre s'accroît, apparaissent quelques fibres musculaires lisses à disposition circulaire, d'abord discontinues puis formant une couche continue. À partir d'un diamètre de 0,2 mm, la veinule devient plutôt une petite veine.

2.4. LES DISPOSITIFS VASCULAIRES SPÉCIAUX

2.4.1. LES ANASTOMOSES ARTÉRIOVEINEUSES

a. L'anastomose simple : Cette variété d'anastomoses assure une communication directe entre artère et veine de petit calibre.

Le cas le plus simple est une anastomose en H. Sur la plus grande partie de sa longueur, le segment anastomotique rappelle la structure de la paroi artérielle et comporte souvent des formations sphinctériennes pour contrôler le débit sanguin.

b. Le glomus neurovasculaire (Fig. 10): Les glomi neurovasculaires s'observent au niveau des téguments, surtout dans les régions exposées aux variations de température. Ils sont particulièrement nombreux au niveau du lit de l'ongle.

Un glomus est une formation ovoïde mesurant 0,2 à 0,3 mm, entourée par une enveloppe fibreuse.

Il renferme un vaisseau anastomotique qui comporte :

- un segment artériel contourné, à lumière étroite et à paroi musculaire épaisse, faite de plusieurs assises de cellules globuleuses (glomiques); il n'y a pas de limite élastique interne. À l'origine de ce segment existent des sphincters développés au niveau de l'intima.
- un segment veineux très court à paroi mince et à lumière large.
- autour du segment artériel, on observe de nombreuses fibres nerveuses.
- au voisinage immédiat de ces glomi, on rencontre fréquemment des corpuscules sensitifs.

Les glomi neurovasculaires exercent une action régulatrice sur la circulation locale.

2.4.2. LE TISSU ÉRECTILE

Le tissu érectile retrouvé au niveau des corps caverneux et spongieux (organes génitaux externes) est formé par un ensemble de cavités vasculaires anastomosées, tapissées par un endothélium, à lumière irrégulière, séparées par des travées conjonctives comportant des fibres musculaires lisses.

La circulation est normalement réduite dans le tissu érectile. Les branches artérielles afférentes et veineuses efférentes sont pourvues de sphincters.

Lorsque les sphincters du versant artériel se relâchent, il y a afflux de sang dans le tissu érectile qui devient alors turgescent. Cette dilatation, associée à une contraction de la composante musculaire lisse des travées entre les cavités vasculaires, constitue le mécanisme de l'érection.

3. LES VAISSEAUX LYMPHATIQUES

Ils recueillent une partie de la lymphe interstitielle et la déversent dans le système veineux. Le système lymphatique débute par des capillaires fermés à leur extrémité. Ils se réunissent en troncs lymphatiques de calibre croissant qui aboutissent à 2 troncs collecteurs : le canal lymphatique droit et le canal thoracique.

3.1. LES CAPILLAIRES LYMPHATIQUES (Fig. 11)

Ils débutent par un cul-de-sac (extrémité borgne), de calibre très irrégulier, s'anastomosent et forment un réseau dans le tissu conjonctif. On les trouve dans de nombreux organes; ils sont cependant absents du système nerveux central, de la moelle osseuse et des glandes endocrines (sauf la thyroïde). Leur paroi est habituellement constituée par un simple endothélium sans lame basale. Les jonctions entre les cellules endothéliales sont inconstantes.

Les lymphatiques des villosités intestinales sont nommés chylifères.

3.2. LES LYMPHATIQUES COLLECTEURS

- * Ils sont caractérisés par l'existence de nombreuses valvules (replis de l'intima disposés par paires) et d'une lumière large et irrégulière, dilatée au-dessus des valvules. Leur paroi est comparable à celle des veines d'un calibre équivalent.

l'intima comprend un endothélium recouvrant une mince couche de tissu conjonctif fibroélastique

la média est conjonctivo-musculaire, constituée par des cellules musculaires lisses, à disposition circulaire, entremêlées de quelques fibres élastiques.

- * Au niveau des troncs lymphatiques principaux, la média est la couche la plus épaisse (fibres musculaires à disposition longitudinale et circulaire); les valvules sont nombreuses et l'adventice comporte des cellules musculaires lisses à disposition longitudinale.

3.3. HISTOPHYSIOLOGIE

- * La forte pression sanguine, destinée à assurer une oxygénation suffisante des tissus, favorise la transsudation (sortie) de liquide interstitiel à travers la paroi des capillaires sanguins contribuant ainsi à former la lymphe interstitielle.
- * Les protéines extravasées à partir des capillaires sanguins se retrouvent dans le tissu interstitiel; ces protéines ne peuvent être reprises directement par les capillaires sanguins, mais pénètrent dans les capillaires lymphatiques dont la paroi est perméable aux macromolécules. Les lymphatiques drainent la lymphe

interstitielle et assurent le maintien d'une pression adéquate dans les espaces interstitiels et d'un volume plasmatique normal.

- * La lymphe contribue aussi aux défenses immunitaires en transportant les leucocytes vers les ganglions lymphatiques

4. LE CŒUR (FIG. 12 ET 13)

La paroi cardiaque est organisée en 3 tuniques : L'endocarde (couche interne), le myocarde (couche moyenne, musculaire, très développée) et le péricarde (couche externe).

4.1. L'ENDOCARDE

- * Il tapisse toutes les cavités cardiaques, y compris les reliefs internes, les valvules, les piliers et les cordages tendineux. Il est plus épais dans les oreillettes que dans les ventricules. Il comprend deux couches :
 - a- l'endothélium (en continuité avec l'endothélium des vaisseaux connectés au cœur)
 - b- la couche sous endothéliale, riche en fibres élastiques.
- * L'endocarde est relié au myocarde par du tissu conjonctif sous endocardique qui comporte, au niveau des ventricules, les cellules de Purkinje du tissu nodal.

4.2. LES VALVULES

Les valvules auriculo-ventriculaires et sigmoïdes (aortique et pulmonaire) sont des replis de l'endocarde autour d'un axe conjonctif dense. Il peut exister quelques cellules myocardiques dans la racine des valvules. L'axe conjonctif des valvules auriculo-ventriculaires est en continuité avec celui des cordages et avec les anneaux fibreux. Chaque orifice auriculo-ventriculaire, aortique et pulmonaire est entouré par un anneau fibreux conjonctif très dense.

4.3. LE MYOCARDE

Le myocarde est constitué essentiellement par un réseau tridimensionnel de cellules musculaires cardiaques (cf tissu musculaires du thème 5). Les cellules musculaires striées cardiaques sont prédominantes. Les muscles papillaires ou piliers du cœur sont des projections coniques du myocarde qui sont reliées à un ou plusieurs cordages tendineux. La trame conjonctive du myocarde comprend des travées fibroélastiques qui entourent les vaisseaux et les nerfs, et se divisent en cloisons conjonctives minces séparant les faisceaux musculaires. Ces cloisons se ramifient en un réseau conjonctif très fin accompagnant les capillaires.

4.4. LE PÉRICARDE

- Il comprend 2 feuillets : l'épicarde et le feuillet pariétal.
- * L'épicarde est le feuillet viscéral du péricarde ; il comporte un mésothélium et une couche conjonctive sous mésothéliale. L'épicarde se réfléchit, à l'endroit où prennent naissance les gros troncs artériels, pour se continuer avec le feuillet pariétal du péricarde.
- L'épicarde est séparé du myocarde par une couche sous-épicardique de tissu conjonctif contenant des cellules adipeuses, des vaisseaux coronaires et des fibres nerveuses.

* Le feuillet pariétal comprend les mêmes éléments que le feuillet viscéral, mais il est renforcé, dans sa partie superficielle, par d'épais faisceaux collagènes constituant le sac fibreux péricardique.

- * Entre l'épicarde et le feuillet pariétal du péricarde se trouve une cavité virtuelle, la cavité péricardique.

4.5. VASCULARISATION

Artères et veines coronaires forment un important réseau qui chemine dans la composante conjonctive. Le myocarde est un des organes les mieux irrigués du corps ; son réseau capillaire est deux fois plus dense que celui du muscle strié squelettique. Les anastomoses coronaires sont peu nombreuses (vascularisation de type terminal).

4.6. L'INNERVATION

- * Elle est essentiellement assurée par le système nerveux autonome et est double, ortho- et parasymphatique. Elle intéresse le myocarde, le tissu nodal et les coronaires. Les fibres parasymphatiques sont nombreuses au niveau des nœuds. Les fibres nerveuses myéliniques et amyéliniques forment trois plexus : sous-péricardique, myocardique et sous-endocardique.
- * Il existe également des fibres sensibles intéressant surtout le péricarde.

Tissu nodal : Le tissu nodal ou cardionecteur du cœur est constitué de cellules myocardiques particulières d'aspect « embryonnaire » (Cf. thème 5). Il comprend un nœud sinusal (de Keith et Flack), un nœud atrio-ventriculaire (d'Aschoff Tawara), un faisceau de His et un réseau de Purkinje.

- * Le nœud sino-atrial est situé dans le tissu conjonctif sous épicaudique de la paroi de l'oreillette droite près de l'abouchement de la veine cave supérieure.
- * Le nœud atrioventriculaire est situé dans le tissu conjonctif sous endocardique de l'oreillette droite près de l'ouverture du sinus coronaire.
- * Le faisceau de His (tronc commun et les 2 branches droite et gauche) est constitué de cellules nodales groupées en faisceaux. Une gaine fibroélastique isole les nœuds et le faisceau de His du myocarde environnant.
- * Les cellules nodales du réseau de Purkinje sont situées dans la couche sous endocardique et sont au contact des cellules myocardiques des deux ventricules.

4.7. LE CŒUR EST UNE GLANDE ENDOCRINE

La paroi des oreillettes droite et gauche comporte des cellules musculaires cardiaques particulières, remarquables par la présence de granules à contenu dense situées dans la région juxtanucléaire. Ces cardiomyocytes élaborent des polypeptides appelés « Facteur Atrial Natriurétique » (type A et B) à action hormonale.

« L'étirement » de l'appareil contractile des cellules musculaires cardiaques stimule la libération de ces hormones. Elles agissent sur le système rénine-angiotensine en inhibant directement la sécrétion de rénine ou en inhibant la sécrétion d'aldostérone par les glandes corticosurrénales.

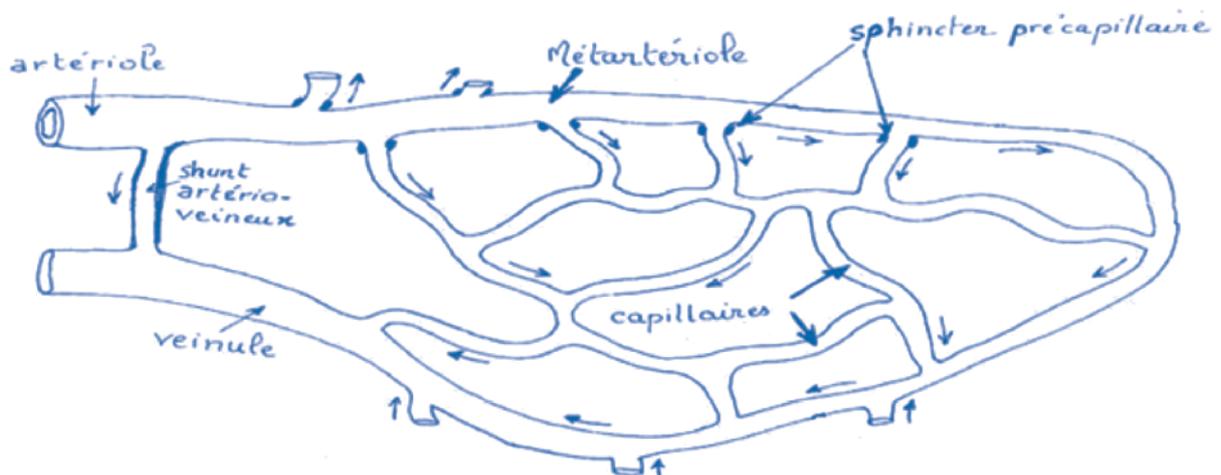
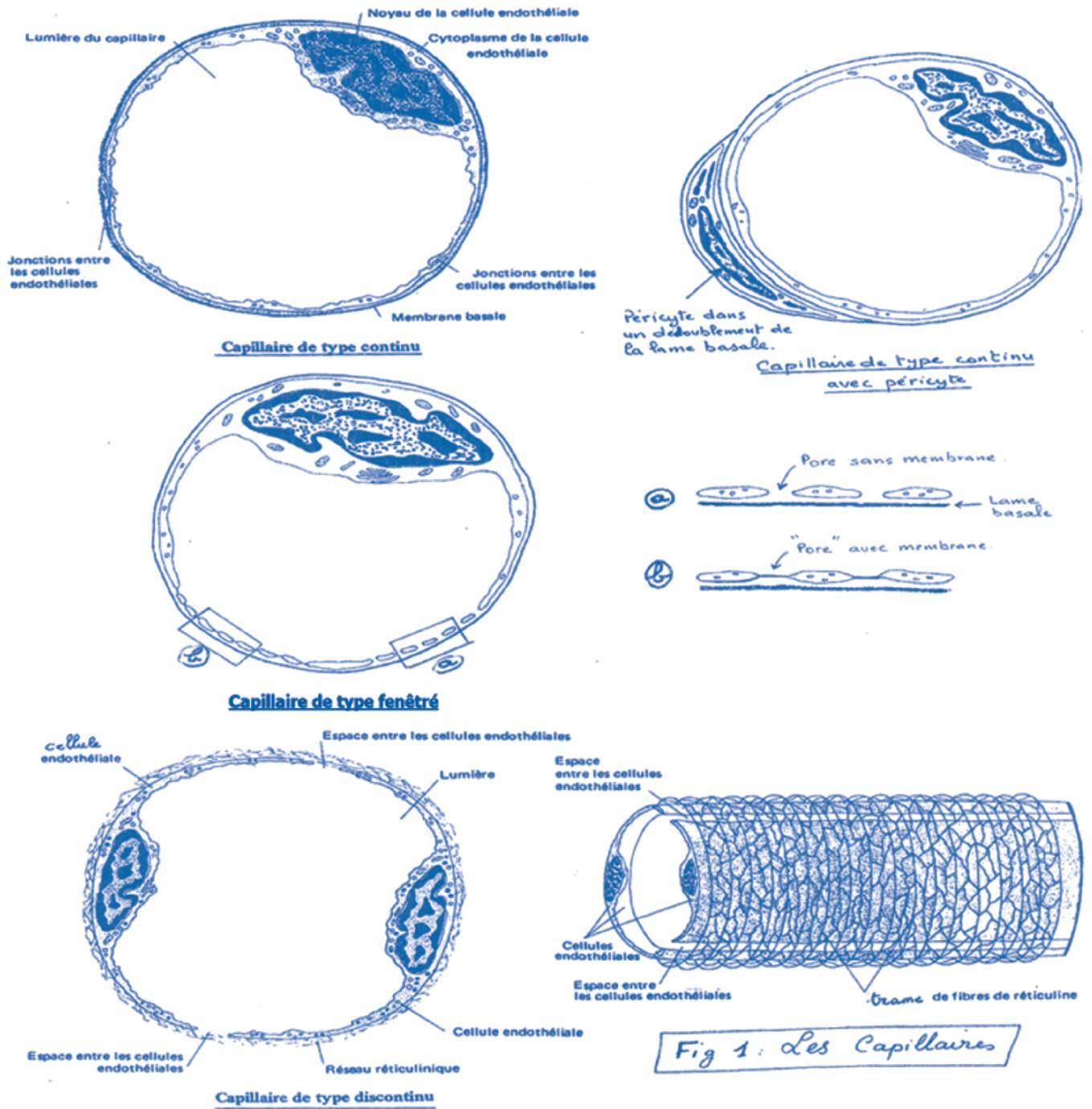


Fig 2 : Schéma de la microcirculation

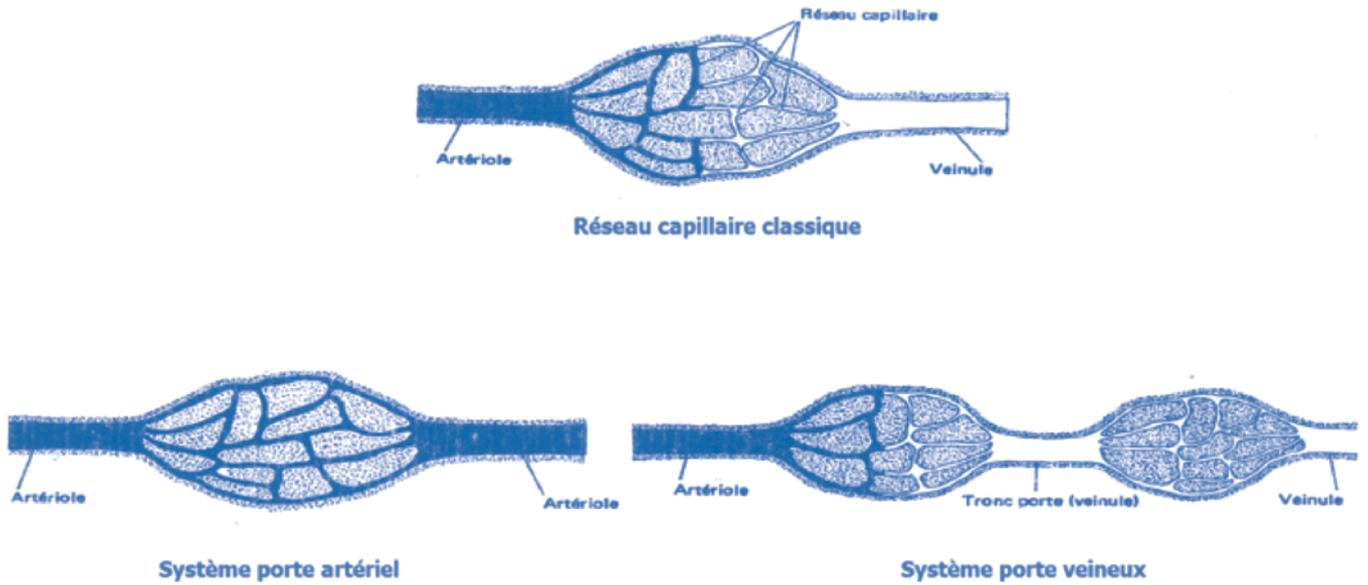


Fig 3 Réseaux capillaires classiques et portes

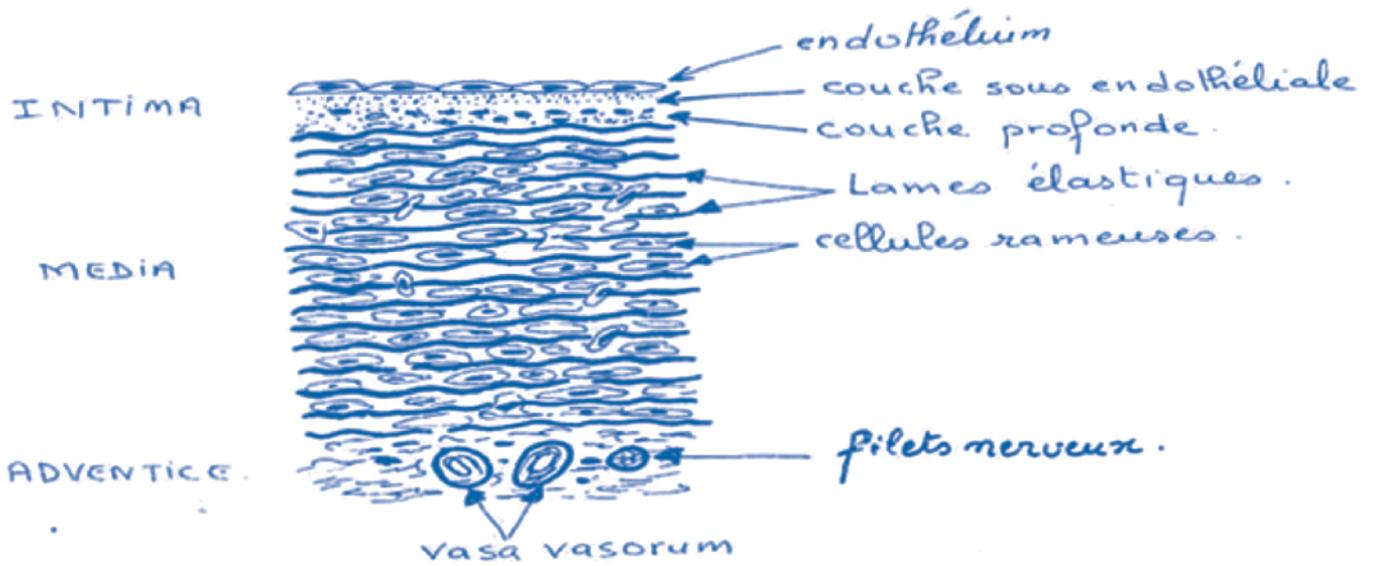


Fig 4 L'artère élastique

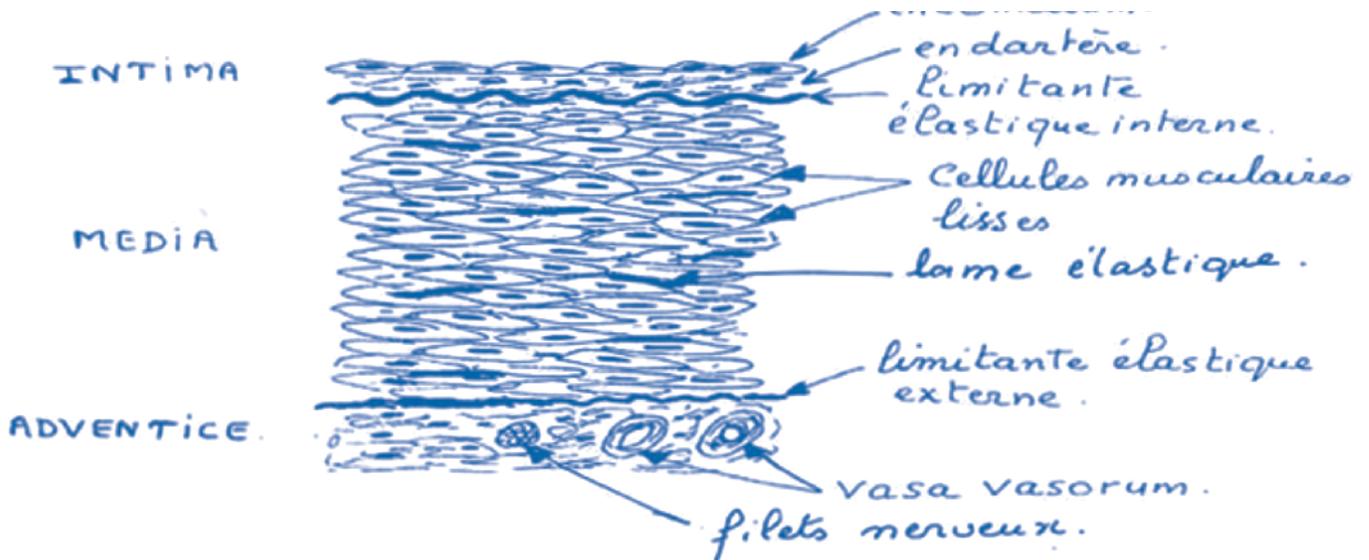


Fig 5 L'artère musculaire

Fig 6 L'artériole

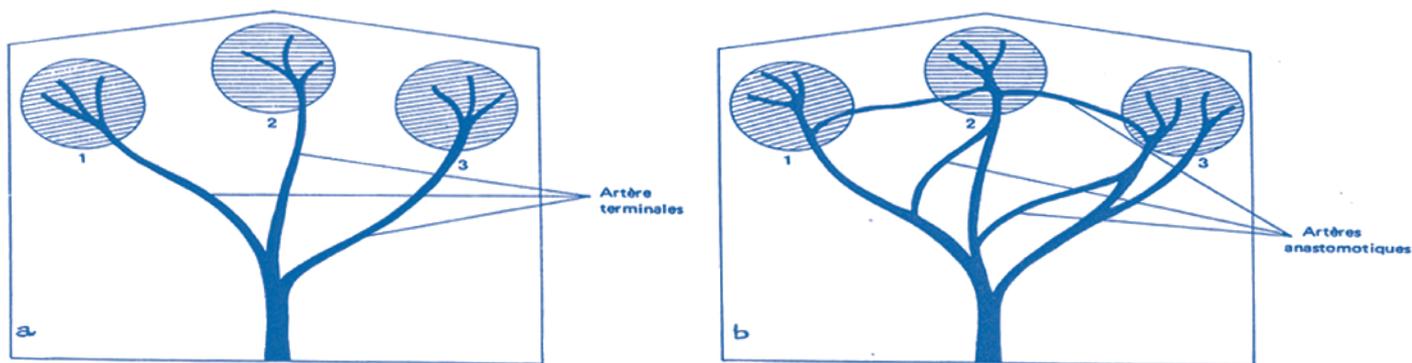


Fig 7 Mode de terminaison des artères
a. Artères terminales. **b.** Réseau anastomotique.
 1, 2 et 3 représentent des territoires vascularisés par des artères

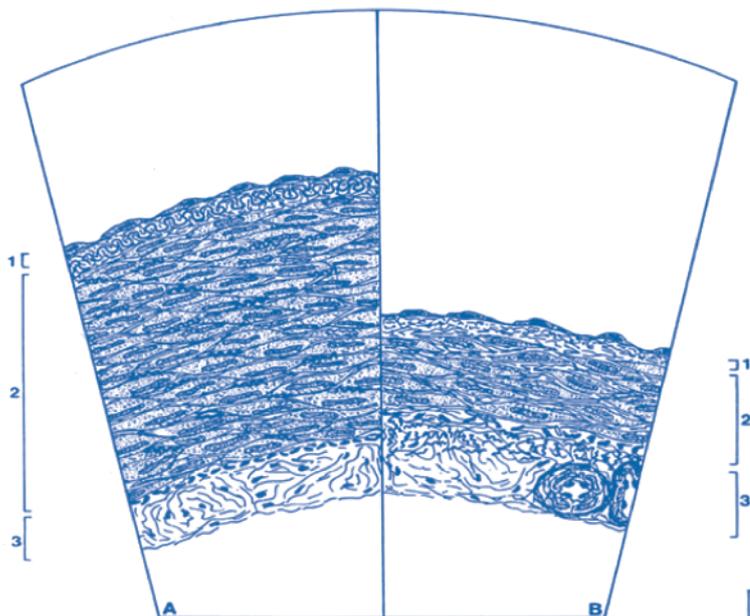


Fig. 8 Différences entre la structure d'une artère de type musculaire et celle d'une veine
 (A. Artère de type musculaire, B. Veine)
 1. Intima, 2. Média, 3. Adventice

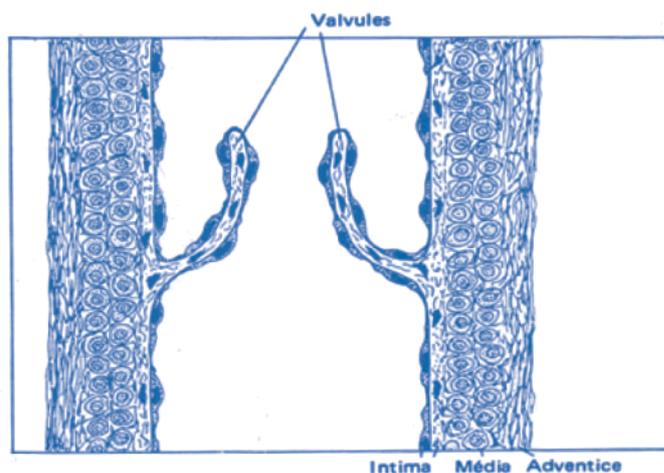


Fig. 9 Paroi d'une veine avec valvules
 (vue longitudinale)

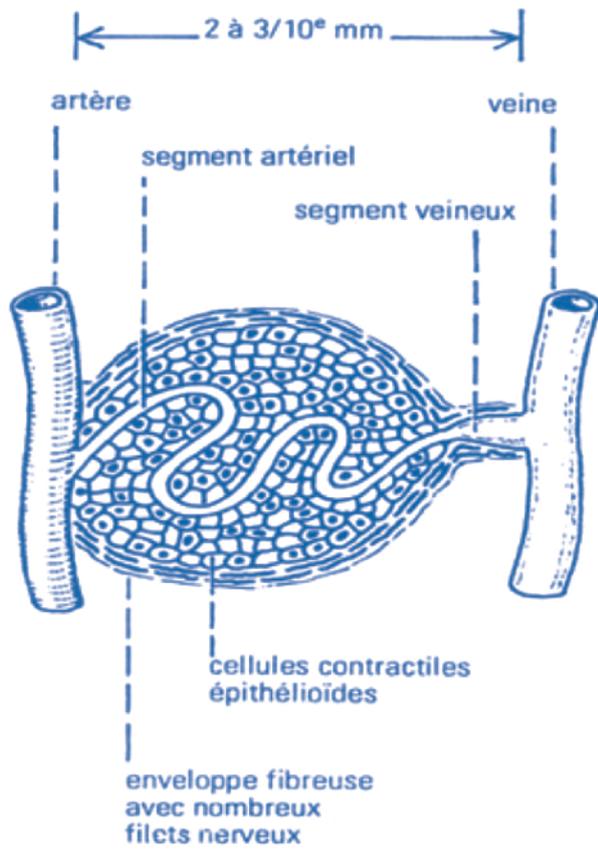


Fig. 10 Glomus neuro-vasculaire.

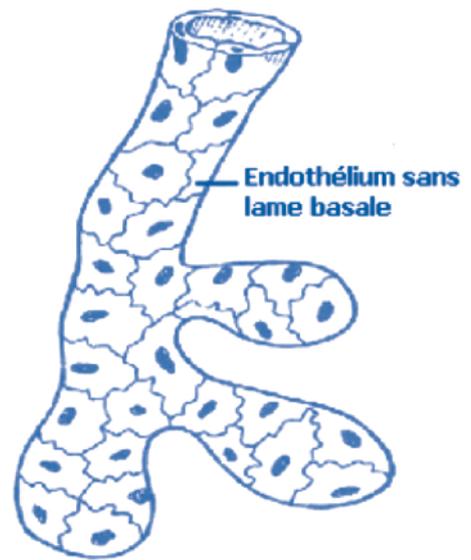


Fig. 11 Capillaire Lymphatique

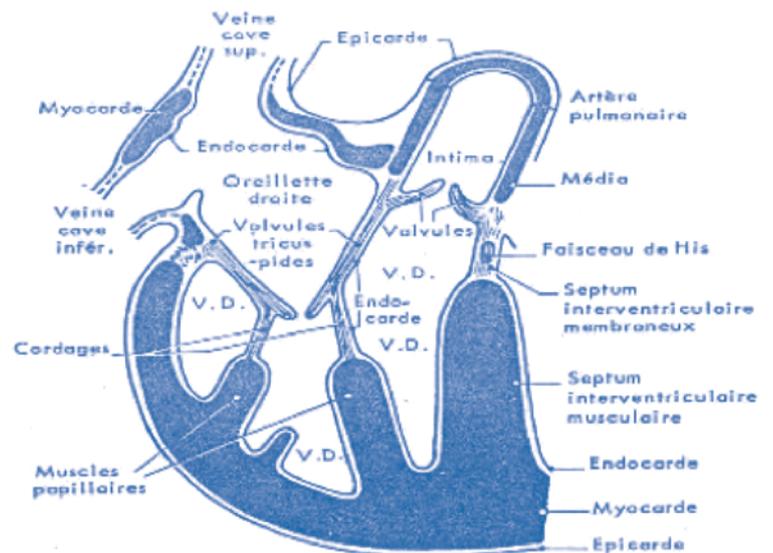
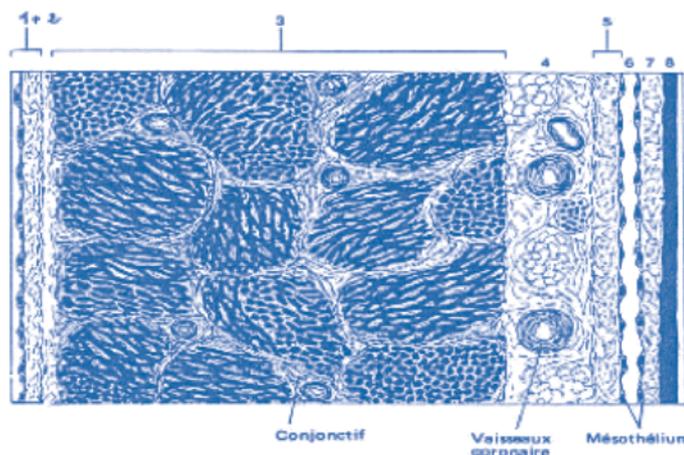


Fig. 12 Schéma du coeur (cavités droites)



1+2: Endocarde + Couche sous-endocardique, 3. Myocarde, 4. Couche sous-épicardique, 5. Epicarde (feuillet viscéral du péricarde), 6. Cavité péricardique, 7 Feuillet pariétal du péricarde, 8. Sac fibreux péricardique

Fig. 13 Paroi cardiaque

EMBRYOLOGIE DE L'APPAREIL CARDIO-VASCULAIRE

Prérequis

- embryologie générale : thème 3
- anatomie et histologie du cœur et des vaisseaux

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Décrire les différentes étapes embryologiques qui aboutissent à la mise en place des vaisseaux et du tube cardiaque primitif
2. Décrire ou représenter à l'aide d'un schéma annoté les différentes parties qui constituent le tube cardiaque primitif en indiquant les extrémités caudale et céphalique et le sens du courant sanguin
3. Décrire la plicature du tube cardiaque primitif et en indiquer les résultats
4. Indiquer le devenir du sinus veineux
5. Décrire les différentes étapes du développement des veines pulmonaires et de l'oreillette gauche
6. Décrire les différentes étapes du cloisonnement de l'oreillette primitive
7. Décrire les étapes du cloisonnement du ventricule primitif.
8. Décrire les étapes embryologiques de l'évolution du canal atrioventriculaire
9. Décrire le cloisonnement du conus et du truncus
10. Décrire ou représenter à l'aide de 2 schémas comparatifs la circulation fœtale et la circulation néonatale en indiquant les modifications qui interviennent à la naissance
11. Décrire les mécanismes embryologiques des malformations suivantes :
 - Communications interventriculaires et interauriculaires
 - Tétralogie de Fallot
 - Transposition des gros vaisseaux

PLAN

1. **LE SYSTÈME VASCULAIRE EXTRA-EMBRYONNAIRE**
2. **LE TUBE CARDIAQUE**
3. **LE SYSTÈME VASCULAIRE INTRA-EMBRYONNAIRE**
4. **LA CIRCULATION FŒTALE ET SES MODIFICATIONS A LA NAISSANCE**
5. **LES MALFORMATIONS**

INTRODUCTION

C'est le premier appareil qui commence à fonctionner chez l'embryon humain. En effet le sang commence à circuler vers la fin de la quatrième semaine.

Ce développement rapide et précoce est nécessaire pour assurer la nutrition de l'embryon.

Les éléments vasculaires et sanguins apparaissent à l'extérieur de l'embryon et constituent ainsi les vaisseaux extraembryonnaires, par la suite se développent les vaisseaux intraembryonnaires et se raccordent aux précédents. Les différentes structures vasculaires, le cœur et les cellules sanguines souches se développent à partir du mésoderme, du mésenchyme extraembryonnaire avec une participation des crêtes neurales.

1. LE SYSTÈME VASCULAIRE EXTRA-EMBRYONNAIRE

Les premières ébauches vasculaires se différencient vers le 18^e jour à partir des cellules mésenchymateuses situées dans la paroi de la vésicule vitelline et dans le pé-

dicule embryonnaire (Fig. 1). Ces cellules se multiplient et se différencient pour constituer des **îlots angio-sanguino-formateurs de Wolff et Pander** (formation des vaisseaux et des cellules souches sanguines Fig.2).

Dans un 1er temps, les amas de cellules mésenchymateuses sont pleins. Secondairement, des espaces apparaissent entre les cellules et ces îlots, confluent et forment une lumière :

- Les cellules situées au centre deviennent libres et donnent des **cellules sanguines souches**
- Les cellules situées à la périphérie s'aplatissent et forment le **revêtement endothélial** du vaisseau sanguin primitif. Ce processus est nommé vasculo-genèse.
- Les différents îlots vasculo-sanguins confluent par prolifération des cellules endothéliales et donnent 2 réseaux, l'un vitellin autour de la vésicule vitelline, l'autre ombilical au niveau du pédicule embryonnaire, en connexion avec les villosités placentaires. Le bourgeonnement de nouveaux vaisseaux à partir d'autres vaisseaux est appelé **angiogenèse**.
- Les vaisseaux sanguins extraembryonnaires vitellins et ombilicaux ne tarderont pas à se raccorder au réseau intraembryonnaire qui s'est formé selon des étapes similaires.
- À partir des cellules sanguines souches se différencie, dans un premier temps, une lignée érythroblastique qui donne lieu à des hématies nucléées.

À la fin du 2e mois, les vaisseaux situés dans la paroi de la vésicule vitelline involuent avec la régression de la vésicule vitelline, par contre les vaisseaux ombilicaux (du pédicule embryonnaire) persistent et continuent à se développer (cf. cours embryologie du thème3).

2. LE TUBE CARDIAQUE

2.1. FORMATION DU TUBE CARDIAQUE PRIMITIF (Fig. 3)

L'ébauche du tube cardiaque apparaît vers le 19e jour de la vie intra-utérine sous forme d'amas de cellules mésodermiques, dans la splanchnopleure, au niveau de la région céphalique de l'embryon, ces amas cellulaires sont répartis symétriquement à droite et à gauche et du côté cranial de la membrane pharyngienne, ils forment le premier champ cardiaque.

Par la suite, ces amas confluent et se creusent pour constituer les tubes endocardiques droit et gauche en forme d'arc.

Un deuxième groupe de cellules mésenchymateuses constitue un amas dorsal au premier champ, le second champ cardiaque, et les deux fusionnent formant une structure en fer à cheval.

Au cours de la délimitation, ces tubes basculent de 180°, se retrouvant du côté caudal de la membrane pharyngienne, intégrant la future cage thoracique. Les deux tubes endocardiques se rapprochent et fusionnent pour former le tube cardiaque primitif impair et médian à J22. Le tube cardiaque primitif n'est pas la seule ébauche à former le cœur. Des cellules provenant des crêtes neurales participent essentiellement à la voie d'éjection du cœur.

Les cellules mésenchymateuses bordant la cavité du tube cardiaque constituent l'endocarde et les valves ; le

myocarde, le tissu nodal, le squelette fibreux et le muscle lisse des gros vaisseaux, tandis que le péricarde et les vaisseaux coronaires se développent à partir des lames mésodermiques du cœlome intraembryonnaire (splanchnopleure et somatopleure) ; à ce niveau, le cœlome interne forme la cavité péricardique.

Vers le 23e jour apparaissent les premières contractions cardiaques, mais c'est entre le 27e et le 29e jour que s'établit la circulation embryonnaire. Les contractions cardiaques poussent le sang du pôle caudal (veineux en provenance des villosités chorales) au pôle cranial (artériel en direction des tissus embryonnaires).

2.2. DESCRIPTION DU TUBE CARDIAQUE PRIMITIF

Le tube cardiaque, allongé suivant un axe craniocaudal est constitué de différentes cavités séparées par des étranglements (zones de transition). On décrit de l'extrémité caudale vers l'extrémité céphalique :

- * Le sinus veineux au niveau duquel arrivent toutes les veines drainant le sang veineux embryonnaire et extraembryonnaire, c'est la voie d'admission.
- * L'oreillette primitive séparée du sinus veineux par le sillon sinoauriculaire.
- * Le ventricule primitif séparé de l'oreillette par le sillon auriculo-ventriculaire.
- * Une zone annulaire. Le conus (cône artériel).
- * Le truncus (tronc artériel), court, qui se continue par les 2 aortes ventrales, les deux premiers arcs aortiques et les aortes dorsales. Conus et truncus forment la voie d'éjection.

2.3. ÉVOLUTION DU TUBE CARDIAQUE PRIMITIF

Après la mise en place des cavités et des vaisseaux primitifs, il faut les orienter dans le bon sens, séparer les chambres droites et gauches (cloisonnement) et assurer le sens unique de la circulation par le système valvulaire. En parallèle, il y a un remaniement important des réseaux artériels et veineux. Ces phases sont très complexes expliquant l'incidence des cardiopathies congénitales et leur grande variété.

2.3.1. PLICATURE DU TUBE CARDIAQUE PRIMITIF (Fig.4)

- * Au début, le cœur est un tube rectiligne à l'intérieur de la cavité péricardique. Ce tube se développe rapidement ; ses 2 extrémités restent fixées aux réseaux artériel et veineux, il va subir une courbure à convexité droite puis se couder en S (phénomène de **looping**). La croissance du tube cardiaque se fait essentiellement au niveau de la paroi droite du ventricule primitif et de la paroi gauche de l'oreillette primitive. Ces changements de forme sont intrinsèques, ils se voient même sur un cœur embryonnaire isolé, en l'absence de circulation sanguine. L'oreillette primitive se dispose en arrière et au-dessus du ventricule primitif. Les pôles artériel et veineux, initialement opposés, se retrouvent au même niveau (phénomène de **convergence**).
- * En même temps s'effectue la latéralisation du cœur, qui commence à s'orienter vers la gauche. C'est le premier organe qui rompt la symétrie bilatérale de l'embryon.

2.3.2. ÉVOLUTION DU SINUS VEINEUX (Fig. 5)

* Le sinus veineux est constitué d'une portion transversale et de deux cornes droite et gauche. Chaque corne reçoit le sang provenant :

- d'une veine vitelline
- d'une veine ombilicale
- d'un canal de Cuvier formé par la réunion de 2 veines cardinales (antérieure et postérieure).

À droite

- le canal de Cuvier et la veine cardinale antérieure donnent la veine cave supérieure
- la veine cardinale postérieure donne la veine Azygos
- la veine ombilicale régresse
- la veine vitelline donne une partie de la veine cave inférieure.

À gauche

- le canal de Cuvier devient le sinus coronaire,
- la veine cardinale antérieure s'atrophie et devient la veine de Marshall,
- la partie proximale de la veine vitelline régresse
- la partie proximale de la veine ombilicale régresse

Au final, le sinus veineux s'abouche dans la future oreillette droite et s'y incorpore progressivement constituant sa partie lisse, tandis que l'oreillette droite embryonnaire formera l'auricule droit.

Il donne la veine cave supérieure, la veine cave inférieure et le sinus coronaire qui s'abouchent directement dans l'oreillette droite.

2.3.3. DÉVELOPPEMENT DES VEINES PULMONAIRES ET DE L'OREILLETTE GAUCHE (Fig. 6)

* La paroi postérieure de la partie gauche de l'oreillette primitive émet une veine pulmonaire embryonnaire primitive. Celle-ci donnera naissance à 4 branches qui se développent en direction des ébauches pulmonaires.

* Au cours du développement ultérieur, la veine pulmonaire primitive et une partie de ses branches s'incorporent dans la partie gauche de l'oreillette primitive en cours de cloisonnement ; les 4 veines pulmonaires s'ouvrent ainsi séparément dans la cavité de la future oreillette gauche. La zone incorporée forme la partie lisse de la paroi de l'oreillette gauche, tandis que l'oreillette gauche embryonnaire donnera uniquement l'auricule gauche.

2.3.4. CLOISONNEMENT DES CAVITÉS CARDIAQUES

2.3.4.1. Mécanismes généraux de cloisonnement

* Un premier mécanisme, le plus fréquent, est réalisé par la croissance active de masses tissulaires (bourrelets ou bourgeons endocardiques) qui s'accroissent. Ex. : formation des valves auriculo-ventriculaires et sigmoïdes.

* Le deuxième est la formation d'un septum : par exemple dans la paroi de l'oreillette ou du ventricule : une étroite bande de tissu divise une chambre primitive en deux, de manière incomplète pour devenir secondairement étanche, avant ou après la naissance. La croissance différentielle des cavités participe à ce mécanisme. Ex. : cloisonnement des oreillettes et des ventricules.

Le cloisonnement s'étend de la fin de la 4e semaine à la

fin de la 7e semaine. Il y a interaction entre le développement des parois, celui des cloisons et les forces hémodynamiques.

2.3.4.2. Cloisonnement de l'orifice auriculo-ventriculaire (Fig. 7)

* Dans la paroi de l'orifice apparaissent 5 bourgeons endocardiques (BE) 2 médians (antérieur et postérieur) et 3 latéraux (2 droits et un gauche).

* Les bourgeons médians sont les plus précoces (ils apparaissent à la 4e semaine de la vie intra-utérine) et les plus développés.

En fusionnant entre eux, ils forment le **septum intermedium** qui partage la lumière du canal auriculo-ventriculaire en 2 orifices : un droit ou orifice tricuspide (OT) l'autre gauche ou orifice mitral (OM).

Le septum intermedium « envoie » 4 expansions de « tissu membraneux » :

- une latérale droite qui forme la valve septale de la tricuspide
- une latérale gauche qui forme la grande valve mitrale
- une vers le haut qui rejoint le septum primum et participe au cloisonnement de l'oreillette.
- Une vers le bas qui va contribuer à fermer en arrière le foramen interventriculaire.

Il est à noter que la grande valve mitrale est décalée vers le haut par rapport à l'orifice tricuspide et que la cloison interventriculaire est décalée vers la droite par rapport à la cloison interauriculaire, si bien que le septum intermedium sépare, sur une petite surface, le ventricule gauche de l'oreillette droite.

* Les bourgeons latéraux droits forment les valves antérieure et postérieure de la tricuspide ; le bourgeon latéral gauche forme la petite valve mitrale.

Des lacunes ou cavités vont se creuser au niveau du versant interne de la paroi ventriculaire par apoptose de cellules myocardiques. Des « travées » sont conservées et amarrent les valves à la paroi ventriculaire au niveau des **piliers** (muscles papillaires). Les « travées » perdent leurs cellules musculaires et forment les **cordages** tendineux qui restent revêtus d'endocarde (Fig. 8).

2.3.4.3. Cloisonnement de l'oreillette primitive (Fig. 9)

a- Le septum primum

* Sur la face interne postéro-supérieure de l'oreillette primitive apparaît une crête en forme de faucille dont les extrémités convergent en bas et en avant vers l'orifice auriculo-ventriculaire, c'est le septum primum (de faible épaisseur). Il délimite avec le septum intermedium un orifice, l'**ostium primum** qui sera fermé ultérieurement par une expansion du septum intermedium.

* De petites perforations apparaissent à la partie supérieure du septum primum, elles confluent et constituent un deuxième orifice, l'**ostium secundum**.

b- Le septum secundum

* À la droite du septum primum apparaît, sur la paroi entérosupérieure, une épaisse cloison dont les pointes convergent en bas et en arrière vers l'orifice de la veine cave inférieure : le **septum secundum**.

- * Ce septum recouvre l'ostium secundum, mais reste lui-même incomplet au niveau d'un orifice : le foramen ovale. Il ménage dans la cloison interauriculaire un passage en chicane qui fait communiquer l'oreillette droite avec l'oreillette gauche : **le canal de Botal**. Ce passage est situé dans l'axe du courant sanguin provenant de la veine cave inférieure. Il est nécessaire pour le développement de la circulation dans le cœur gauche, la circulation pulmonaire étant très peu développée.
- * Le reste de septum primum (sa partie inférieure), plus mince que le septum secundum se comporte comme une valve, la valvule de Vieussens, qui laisse passer le sang de l'oreillette droite vers l'oreillette gauche.
- * À la naissance, la pression sanguine augmente dans l'oreillette gauche, suite à l'arrivée brutale du retour veineux pulmonaire secondaire à la respiration, et la **valvule de Vieussens** se plaque contre le septum secundum fermant ainsi le canal de Botal.

2.3.4.4. Cloisonnement du ventricule primitif (Fig. 9)

- * Le ventricule primitif est situé entre le sillon auriculo-ventriculaire et le conus.
- * À la quatrième semaine de la vie intra-utérine, un sillon apparaît à la surface du ventricule primitif, c'est le sillon interampullaire divisant le ventricule primitif en **ampoule droite** et en **ampoule gauche**.

Les ampoules communiquent largement entre elles par le foramen interampullaire.

- Le cloisonnement interventriculaire est réalisé par deux éléments :
- Le septum inferius qui formera le septum musculaire
- Le septum membraneux constitué en avant par un prolongement inférieur du septum conal (voir plus loin, paragraphe 2.3.4.5) et en arrière par un prolongement du septum intermedium.

Le premier élément du cloisonnement ventriculaire est le septum inferius ; il a une forme en croissant avec une corne dorsale et une corne ventrale.

Les 2 cavités ventriculaires se développent de part et d'autre du septum inferius ; elles communiquent dans leur partie haute par le **foramen interventriculaire** (F.I.V.) qui sera comblé par la suite par le septum membraneux. L'orientation du septum inferius par rapport à l'orifice auriculo-ventriculaire (O.A.V.) et à l'orifice proximal du conus (O.P.C.) va changer du fait de la rotation de l'ampoule droite autour de l'ampoule gauche.

Le septum inferius, situé primitivement en regard du niveau du futur orifice tricuspidé se retrouve à gauche de cet orifice (OT). Ainsi, grâce à la migration du septum inferius, la cavité ventriculaire droite est alignée avec l'orifice auriculo-ventriculaire droit.

L'OPC suit passivement la rotation de l'ampoule droite et le septum conal se retrouve aligné sur le septum inferius.

2.3.4.5. Le conus et le truncus (Fig. 10, 11, 12)

- * Le conus communique primitivement avec l'ampoule droite par l'orifice proximal du conus (OPC) et avec le truncus par l'orifice distal (ODC).
- * Le truncus est primitivement très réduit ; il se confond avec la partie initiale de l'aorte ventrale d'où naissent les arcs aortiques. Il va se développer et se cloisonner « longitudinalement » en aorte et artère pulmonaire par le **septum aor-**

tico-pulmonaire. L'ébauche aortique est initialement antérieure, et l'ébauche du tronc artériel pulmonaire est postérieure. Cette disposition va s'inverser, car le truncus va suivre le mouvement de rotation de l'ODC.

- * Le conus et le truncus subissent un cloisonnement longitudinal par le **septum conal**. C'est une cloison hélicoïdale issue de la fusion :
 - au niveau de l'OPC, de bourgeons antéro-postérieurs (les crêtes A et B) et
 - au niveau de l'ODC de bourgeons frontaux (les crêtes 1 et 3).
 Les crêtes se rejoignent selon un arrangement A1/B3. Les crêtes 1 et 3 sont en continuité avec le septum aortico-pulmonaire (non représenté sur le schéma). Les crêtes proximales et distales s'étendent vers la partie moyenne du conus tout en subissant des torsions, elles se rejoignent en formant une cloison spiralée.
- * La torsion du conus est due aux mouvements de rotation en sens inverse de l'OPC et de l'ODC.

Pendant la torsion et le cloisonnement du conus, la portion sous-aortique du conus se « résorbe » totalement tandis que la portion sous pulmonaire s'agrandit et formera l'infundibulum pulmonaire ou chambre de chasse du ventricule droit.

Ainsi, l'orifice aortique se retrouve au même niveau que l'orifice mitral, et l'orifice pulmonaire est situé plus haut que l'orifice tricuspidien.

- * Au niveau du conus, des bourrelets secondaires apparaissent et formeront avec les crêtes 1 et 3 de l'ODC les valvules sigmoïdes de l'orifice pulmonaire et de l'orifice aortique (Fig. 12). Il est à noter que seul l'ODC assure un rôle valvulaire.

- * L'OPC suit le mouvement de rotation de l'ampoule droite ; « il migre » vers la gauche et se retrouve placé entre, et légèrement en avant des orifices auriculo-ventriculaires alors qu'il était primitivement à droite de l'orifice auriculo-ventriculaire (phénomène d'encastrement ou **wedging**).

Ainsi, le septum conal se retrouve aligné sur le septum inferius et contribuera à fermer la communication interventriculaire dans sa partie antérieure. D'autre part, grâce à cette migration de l'OPC, le ventricule gauche « capture » la partie gauche de l'OPC ; ainsi, l'aorte « naît » du ventricule gauche.

Tous ces phénomènes dynamiques sont difficiles à décrire par un texte. Leur visualisation par les schémas et, mieux encore, par des vidéos permet de comprendre la séquence évolutive du développement cardiaque.

Voir : <http://www.chups.jussieu.fr/polys/embryo/organogenese/coeur.html>
<https://embryology.med.unsw.edu.au/embryology/index.php/Movies#Cardiovascular>

3. LE SYSTÈME VASCULAIRE INTRA-EMBRYONNAIRE

- * Les vaisseaux de l'embryon apparaissent dans le mésenchyme peu de temps après l'apparition du système vasculaire extraembryonnaire, se développent selon les mêmes modalités et se raccordent aux vaisseaux extraembryonnaires.

- * Vers la 4e semaine s'établit la circulation. Le cœur commence à battre le 23e jour.
- * Le système vasculaire intraembryonnaire comprend :
 - un système artériel constitué par l'ensemble des vaisseaux efférents qui partent du tronc artériel.
 - un système veineux constitué des vaisseaux afférents qui arrivent au sinus veineux.

3.1. LE SYSTÈME ARTÉRIEL (Fig. 13)

- * Les premiers vaisseaux individualisés sont représentés par les **2 aortes dorsales** qui cheminent le long de l'axe de l'embryon. Initialement, ces artères sont des prolongements des tubes cardiaques.
- * Au cours de la délimitation qui entraîne la rotation de l'ébauche cardiaque, les aortes dorsales se réfléchissent ventralement et donnent naissance aux 1ers arcs aortiques qui croisent latéralement l'intestin pharyngien.
- * Faisant suite au tronc artériel les aortes ventrales fusionnent formant le sac aortique relié aux aortes dorsales par les arcs aortiques.
- * Dans la région céphalique, on trouve plusieurs paires d'arcs aortiques qui relient de chaque côté l'aorte ventrale à l'aorte dorsale ; ces arcs aortiques contournent latéralement l'intestin pharyngien.
- * Dans la région moyenne, les 2 aortes dorsales vont fusionner pour donner une **aorte dorsale médiane** qui émet trois séries d'artères segmentaires.

3.1.1. LES ARTÈRES SEGMENTAIRES (Fig. 14)

Il existe 3 séries d'artères segmentaires issues de l'aorte dorsale :

- * Les artères segmentaires dorsales qui vascularisent le tube neural. Dans la région moyenne, les artères segmentaires dorsales restent paires et vascularisent la moelle épinière et les espaces intercostaux.
- * Les artères segmentaires ventrales vascularisent le tube digestif et font jonction avec les artères vitellines et les artères ombilicales.
- * Les artères segmentaires latérales vascularisent le mésonéphros et les gonades.

3.1.2. LES ARCS AORTIQUES (Fig. 15, 16)

- * Ces arcs n'existent jamais tous simultanément, les premiers régressent lorsque les suivants apparaissent.
- * L'évolution des arcs aortiques, des 2 aortes ventrales et de la portion initiale des 2 aortes dorsales est complexe ; certains arcs aortiques vont se développer, d'autres vont régresser. Au terme de cette évolution sont mis en place la crosse aortique, les branches artérielles destinées à la tête et aux membres supérieurs, les 2 branches de l'artère pulmonaire et le canal artériel.
- * La crosse de l'aorte se développe à partir de la portion gauche du 4e arc.
- * Les artères pulmonaires dérivent des parties proximales des 6es arcs aortiques.
- * Le canal artériel naît de la partie distale du 6e arc aortique gauche.

3.1.3. LES ARTÈRES VITELLINES ET OMBILICALES

- * Les artères vitellines sont constituées par des vaisseaux pairs irriguant la vésicule vitelline. Ces artères sont représentées chez l'adulte par le tronc cœliaque,

l'artère mésentérique supérieure et l'artère mésentérique inférieure.

- * Ces 2 artères ombilicales se différencient dans le mésenchyme du pédicule de fixation. Elles prolongent les artères segmentaires nées de l'aorte dorsale. Ces artères ramènent le sang chargé en CO₂ de l'embryon vers le placenta.

3.2. LE SYSTÈME VEINEUX (Fig. 17, 18)

- * Le réseau veineux primitif se met en place dès la 4e semaine. Il comporte :
 - * Le réseau formé de chaque côté par les veines cardinales antérieure et postérieure qui ramènent tout le sang intraembryonnaire vers le sinus veineux par le canal de cuvier.
 - * un double réseau extraembryonnaire formé par :
 - 2 veines vitellines qui drainent vers le cœur le sang de la vésicule vitelline
 - et 2 veines ombilicales qui prennent origine dans les villosités choriales et ramènent à l'embryon le sang oxygéné.

Avec le temps, différents « systèmes » veineux vont se dégager de ce réseau primitif :

- * **Le système porte** dérive des veines vitellines. Celle-ci pénètrent dans le foie où elles constituent les sinusoides hépatiques. Les veines vitellines vont fusionner au-dessous du foie pour donner le tronc porte définitif.
- * **Le système cave inférieur** dont l'évolution est complexe ; plusieurs réseaux successifs vont participer à sa constitution **le système veineux sous cardinal**, lié au développement considérable du mésonéphros, et **le système veineux supra-cardinal**.
- * La veine ombilicale droite disparaît au cours du développement. Par la suite, une anastomose s'établit entre la veine ombilicale gauche et la veine cave inférieure : **le canal veineux d'Arantius**.
- * **Le système cave supérieur** apparaît à la 8e semaine. La veine cave supérieure se forme aux dépens du canal de cuvier droit et du segment proximal de la veine cardinale antérieure droite.

4. LA CIRCULATION FŒTALE ET SES MODIFICATIONS A LA NAISSANCE

4.1. CIRCULATION FŒTALE (Fig. 19)

- * Avant la naissance, le sang oxygéné au niveau du placenta, retourne au fœtus par la veine ombilicale gauche.
- * Au niveau du foie, la plus grande partie de ce sang passe dans le canal d'Arantius ; une petite partie pénètre dans les sinusoides hépatiques où elle se mélange avec le sang venant de la circulation porte.
- * Du canal d'Arantius, le sang passe dans la veine cave inférieure, puis dans l'oreillette droite ; la majeure partie franchit le canal de Botal et se retrouve dans l'oreillette gauche. Une petite quantité est arrêtée par le bord inférieur du septum secundum et reste dans l'oreillette droite où elle se mélange avec du sang désaturé en O₂ arrivant par la veine cave supérieure qui draine la partie céphalique et les membres supérieures de l'embryon.
- * De l'oreillette gauche, le sang passe dans le ventricule gauche, puis dans l'aorte ascendante d'où partent les artères coronaires et les carotides qui irriguent respec-

tivement le muscle cardiaque et le cerveau. De l'aorte ascendante, le sang pénètre dans l'aorte descendante.

- * De l'oreillette droite, le sang arrive dans le ventricule droit, passe dans le tronc de l'artère pulmonaire, le canal artériel et l'aorte descendante (une petite partie passe dans les poumons).

Le courant sanguin retourne au placenta par les artères ombilicales.

Au cours de son trajet, le sang riche en oxygène provenant du placenta s'appauvrit progressivement à différents niveaux :

- * au niveau du foie, en se mélangeant avec une petite quantité de sang venant du système porte.
- * dans la veine cave inférieure qui draine le sang des membres inférieurs, du pelvis et des reins.
- * dans l'oreillette droite, par mélange avec le sang venant de la veine cave supérieure.
- * dans l'oreillette gauche, par mélange avec le sang venant des poumons.
- * à l'abouchement du canal artériel dans l'aorte.

4.2. MODIFICATIONS À LA NAISSANCE

- * La circulation placentaire est interrompue. La brusque dépression intrathoracique, engendrée par la première inspiration, contribue à mettre en route la circulation pulmonaire.
- * La pression sanguine diminue dans l'artère pulmonaire ; son débit augmente, mais il alimente un réseau capillaire considérablement élargi par l'expansion du parenchyme pulmonaire. Le courant sanguin passant préférentiellement dans les artères pulmonaires, le canal artériel va s'oblitérer.
- * L'afflux du sang pulmonaire dans l'oreillette gauche y augmente la pression, ce qui plaque le septum primum sur le foramen ovale, entraînant la fermeture fonctionnelle du canal de Botal.
- * La fermeture postnatale du canal artériel se fait normalement en deux temps : une occlusion fonctionnelle rapide (par contraction des cellules musculaires lisses), suivie par la formation lente et progressive d'un tissu fibreux obstruant la lumière du canal artériel qui se transforme ainsi en « ligament artériel » au bout d'une semaine habituellement.

5. LES MALFORMATIONS

Les cardiopathies congénitales ont une fréquence de 4 à 9 pour mille naissances (% sous-estimé, car toutes les malformations ne sont pas détectées) et représentent à elles seules 10 % de toutes les malformations congénitales.

5.1. LES HÉTÉROTAXIES :

peu fréquentes, ce sont des anomalies de l'orientation du cœur et/ou des autres organes. D'autres malformations du cœur peuvent s'y associer.

Dans le situs inversus complet, tous les organes sont en miroir, inversés. Elle se voit dans le syndrome de Kartagener qui a comme base une anomalie des cils (et des flagelles) au niveau de toutes les cellules qui en possèdent, empêchant leur battement normal.

5.2. LES ANOMALIES DU RETOUR VEINEUX :

elles sont rares. Nous n'allons pas les détailler

5.3. ANOMALIES DE OREILLETES ET COMMUNICATION INTERAURICULAIRES (CIA)

Si le foramen ovale est trop large, ou si l'ostium secundum est trop grand, le septum primum ne recouvre pas complètement le foramen ovale et donc, après la naissance, il va rester un orifice et c'est ce que l'on appellera une CIA type « ostium secundum ». C'est l'anomalie la plus connue, pas grave si elle est isolée.

5.4. ANOMALIES DE LA JONCTION ATRIO-VENTRICULAIRE ET DES VALVES AURICULO-VENTRICULAIRES

En présence d'une anomalie du septum intermedium, plusieurs malformations s'associent :

- * Une CIA par absence de fermeture de l'ostium primum
- * Communication interventriculaire (CIV)
- * Anomalies des valves mitrale et tricuspide

Ce type de malformation est fréquent chez les enfants porteurs de trisomie 21.

5.5. ANOMALIES COMPLEXES DES CONNEXIONS ATRIO-VENTRICULAIRES (NON TRAITÉES)

5.6. CŒUR FONCTIONNELLEMENT UNIVENTRICULAIRE :

C'est une insuffisance de développement majeure de l'un des ventricules. C'est une anomalie très grave, incompatible avec la vie après la naissance.

5.7. LES COMMUNICATIONS INTERVENTRICULAIRES (CIV)

La CIV. est la plus fréquente des cardiopathies congénitales. Isolée elle est souvent bénigne. Parfois c'est un élément d'un complexe malformatif, comme dans la tétralogie de Fallot.

Classification embryologique des CIV

- * CIV localisées au septum membraneux, hautes et postérieures. Ce sont les plus fréquentes ; elles sont dues à un défaut de développement de l'expansion du septum intermedium vers le bas (CIV membraneuses).
- * CIV musculaires : CIV basses dues à un défaut de développement du septum inferius.
- * CIV infundibulaire : hautes et antérieures, elles sont exceptionnelles et sont dues à un défaut du septum conal.

5.8. ANOMALIES DES VOIES D'ÉJECTION VENTRICULAIRES

Elles concernent le cloisonnement trunco-conal.

A- LA TRANSPOSITION DES GROS VAISSEAUX : Cette malformation provient d'une anomalie de l'appariement des crêtes conales. L'aorte sort du ventricule droit alors que l'artère pulmonaire sort du ventricule gauche.

B- LE TRONC ARTÉRIEL COMMUN : C'est l'absence complète du développement du septum cono-troncal. Donc on n'a pas de séparation des deux troncs (artère

pulmonaire et aorte) et une CIV par absence de cloisonnement conal.

C- LA TÉTRALOGIE DE FALLOT : due à une déviation droite du septum conal, elle associe 4 anomalies :

- * un rétrécissement de l'infundibulum et de l'artère pulmonaire
- * une hypertrophie ventriculaire droite (secondaire à la précédente).
- * une « dextroposition » aortique : aorte à cheval sur le ventricule gauche et le ventricule droit.
- * une CIV haute

5.9. ANOMALIES DES ARCS AORTIQUES :

A. LA PERSISTANCE DU CANAL ARTÉRIEL : Elle est isolée ou associée à d'autres anomalies, souvent bénigne et facile à traiter médicalement ou par chirurgie.

B. LA COARCTATION DE L'AORTE

C'est la plus fréquente des anomalies touchant les arcs aortiques. C'est un rétrécissement du calibre de l'aorte. La coarctation se présente de façons diverses :

- * soit comme un diaphragme, situé au voisinage immédiat de l'insertion du canal artériel sur l'aorte.
- * soit comme une hypoplasie plus ou moins étendue de l'aorte située en amont ou en aval de l'insertion du canal.

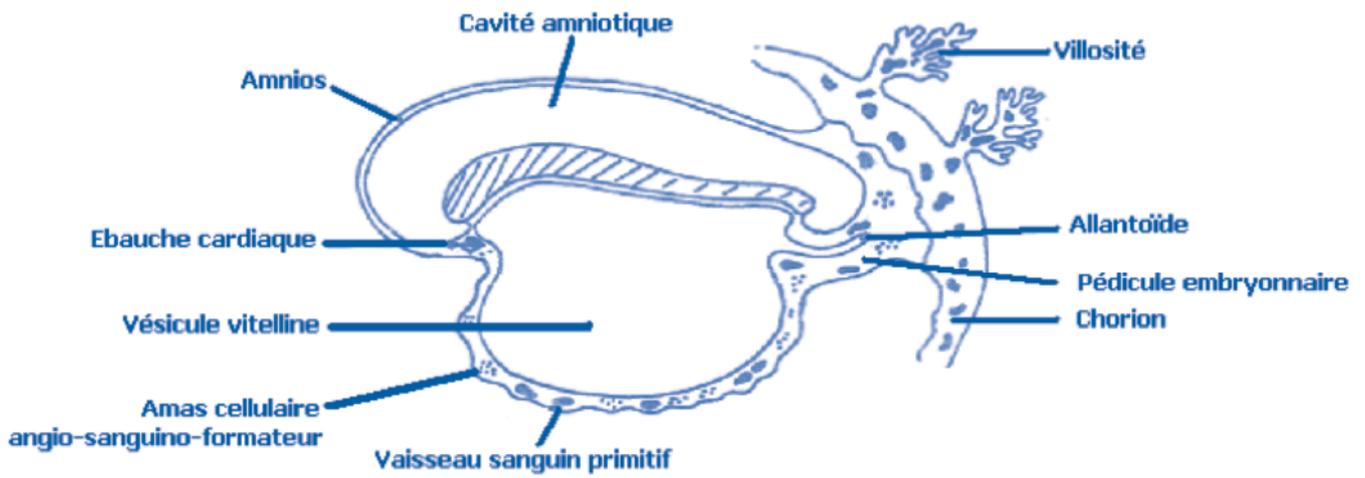


Fig 1. Vaisseaux sanguins extra-embryonnaires

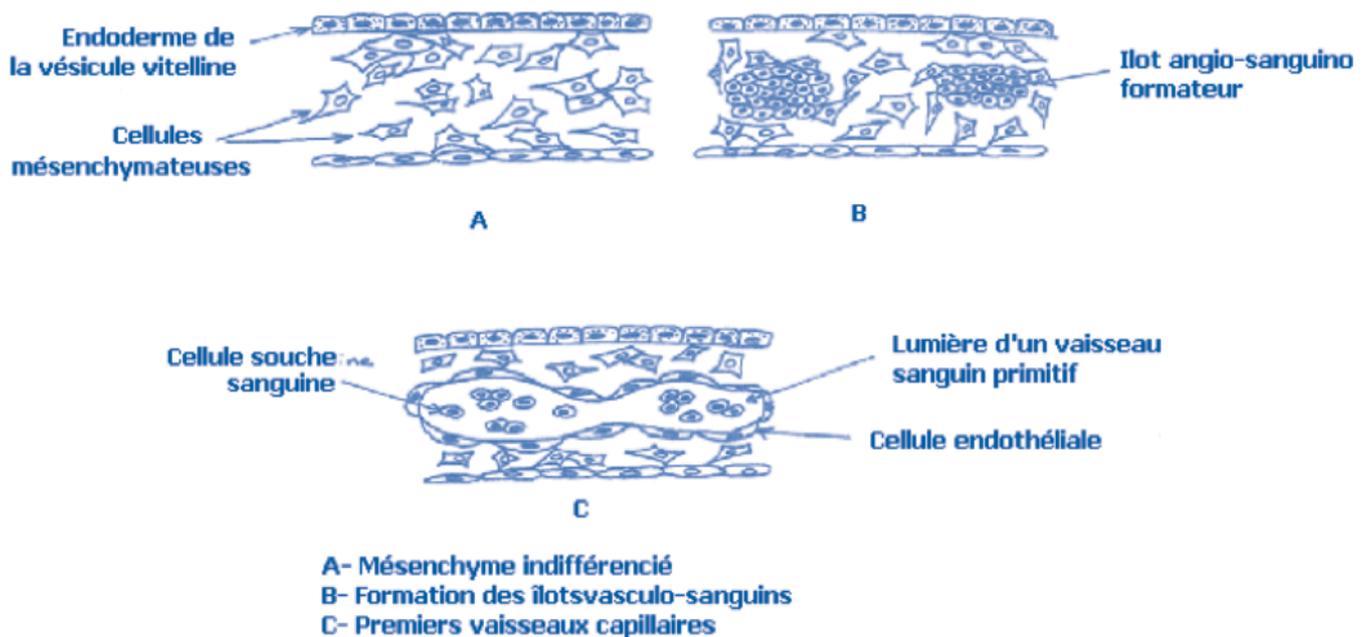


Fig. 2 Stades successifs de la formation des vaisseaux sanguins de la paroi de la vésicule vitelline



Fig. 3 Mise en place du tube cardiaque primitif

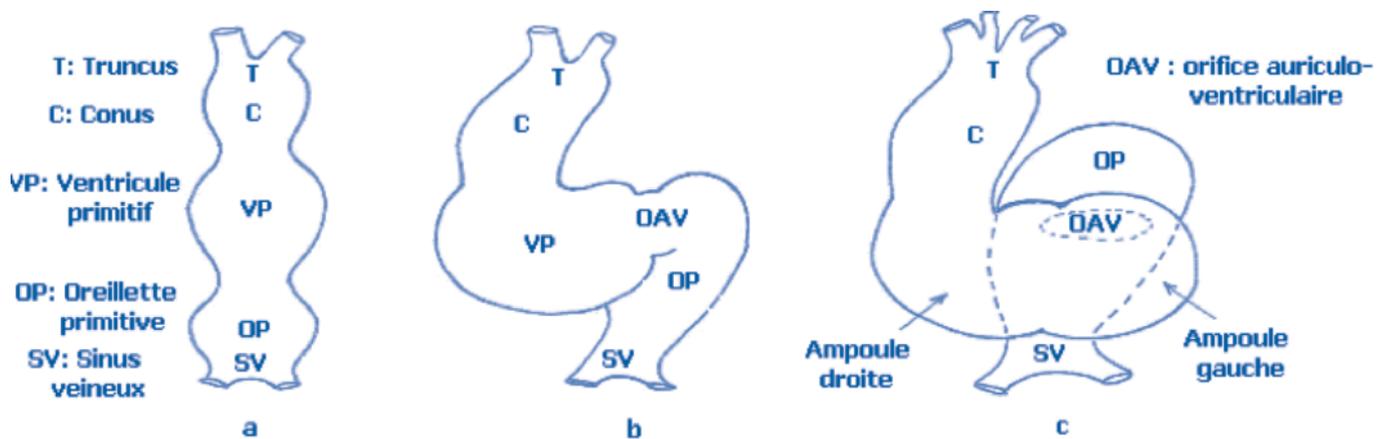


Fig. 4 Plicature du tube cardiaque

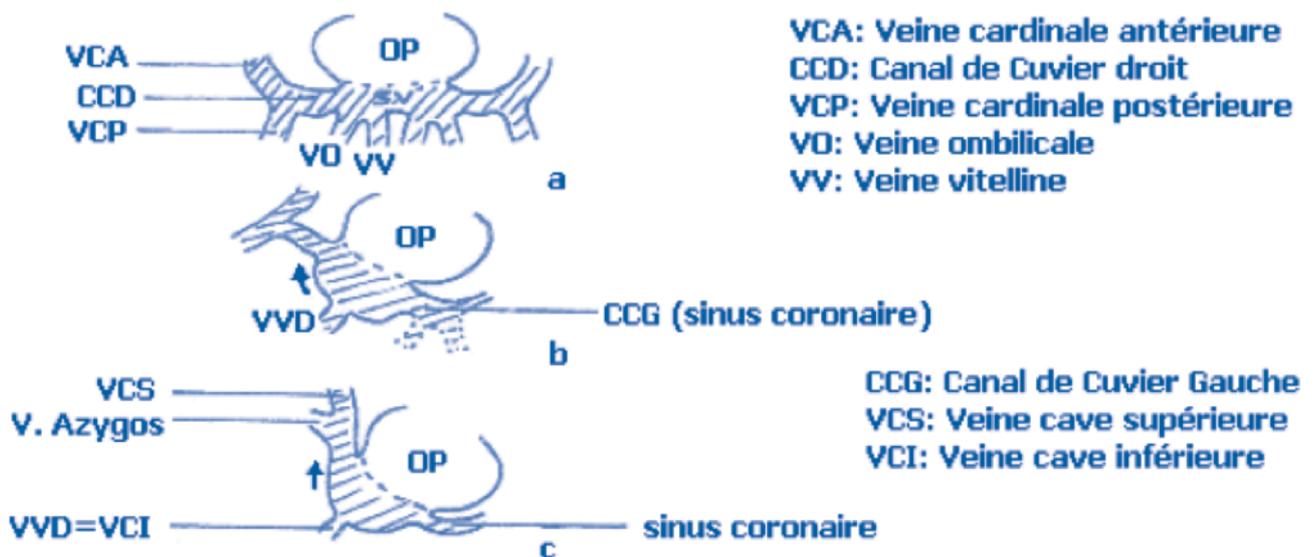


Fig. 5 Evolution du sinus veineux

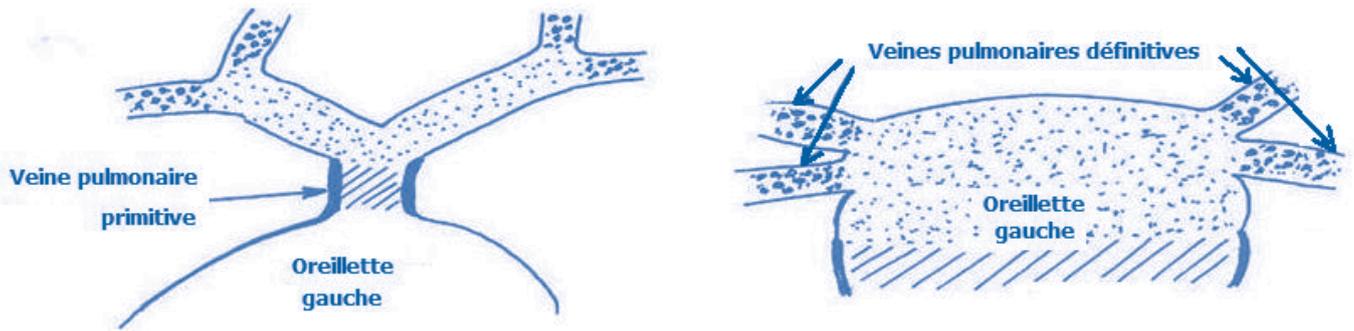


Fig. 6 Développement des veines pulmonaires et de l'oreillette gauche

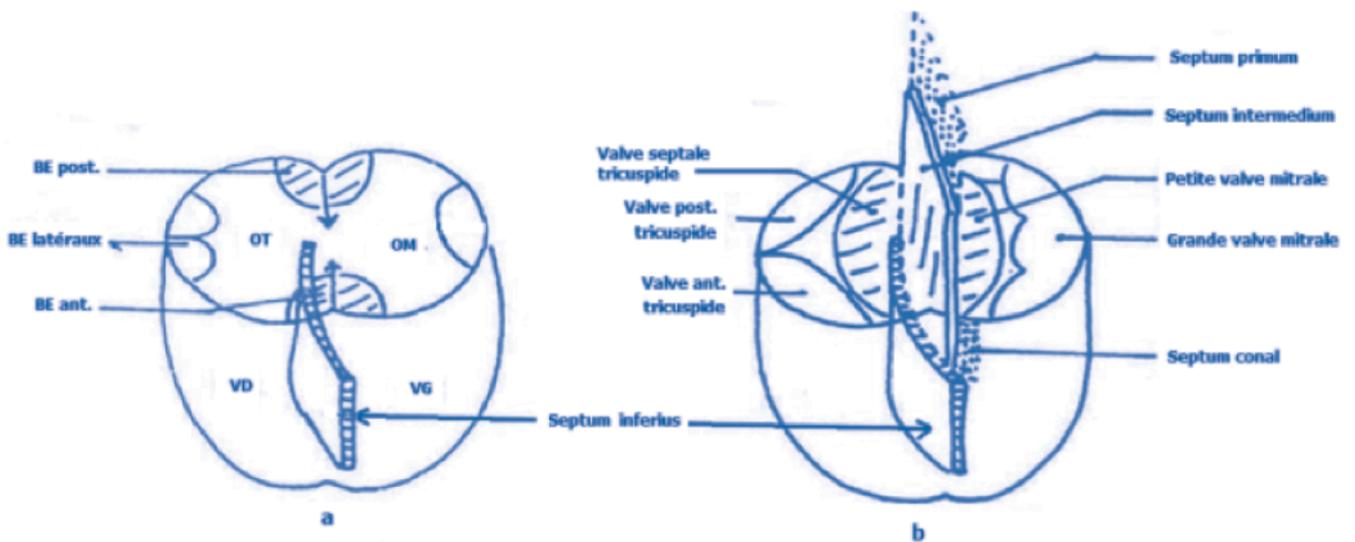


Fig.7 Cloisonnement de l'orifice auriculo-ventriculaire

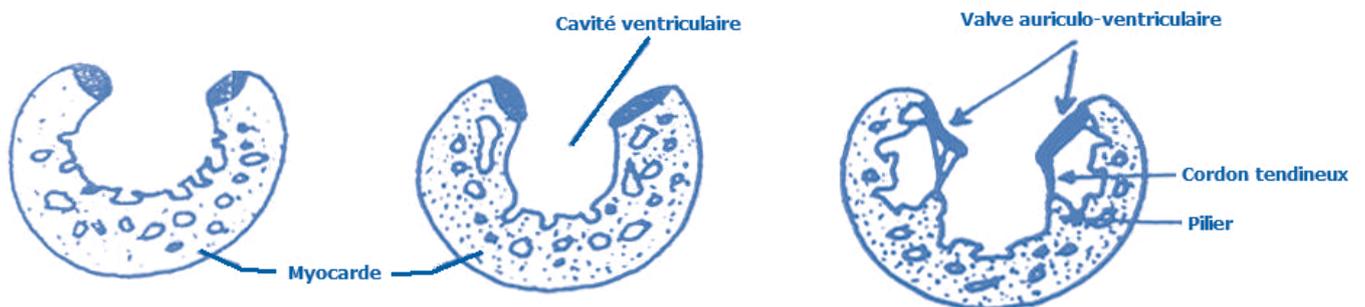


Fig. 8 Formation des piliers et cordons tendineux

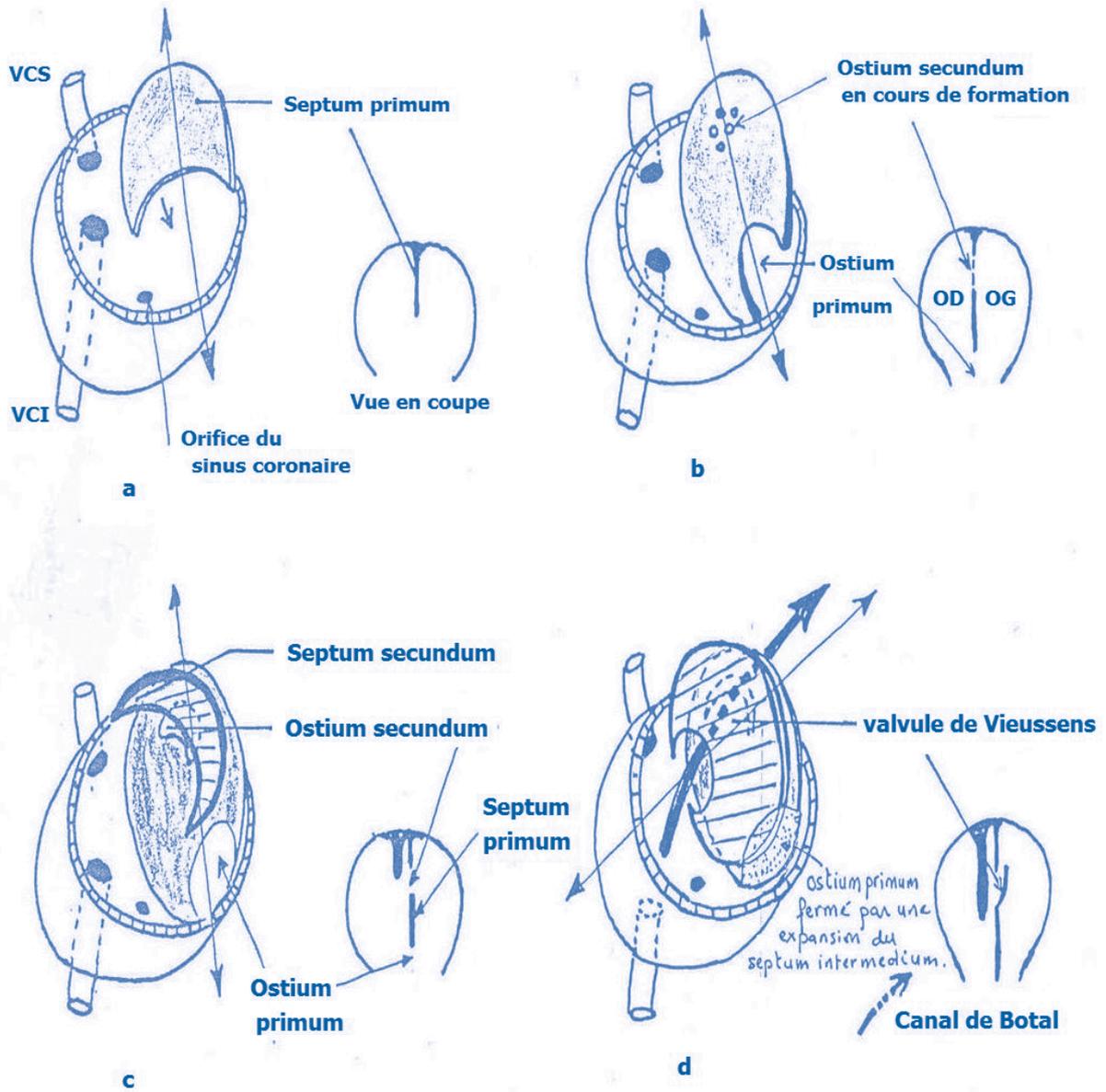


Fig. 9 Cloisonnement des oreillettes

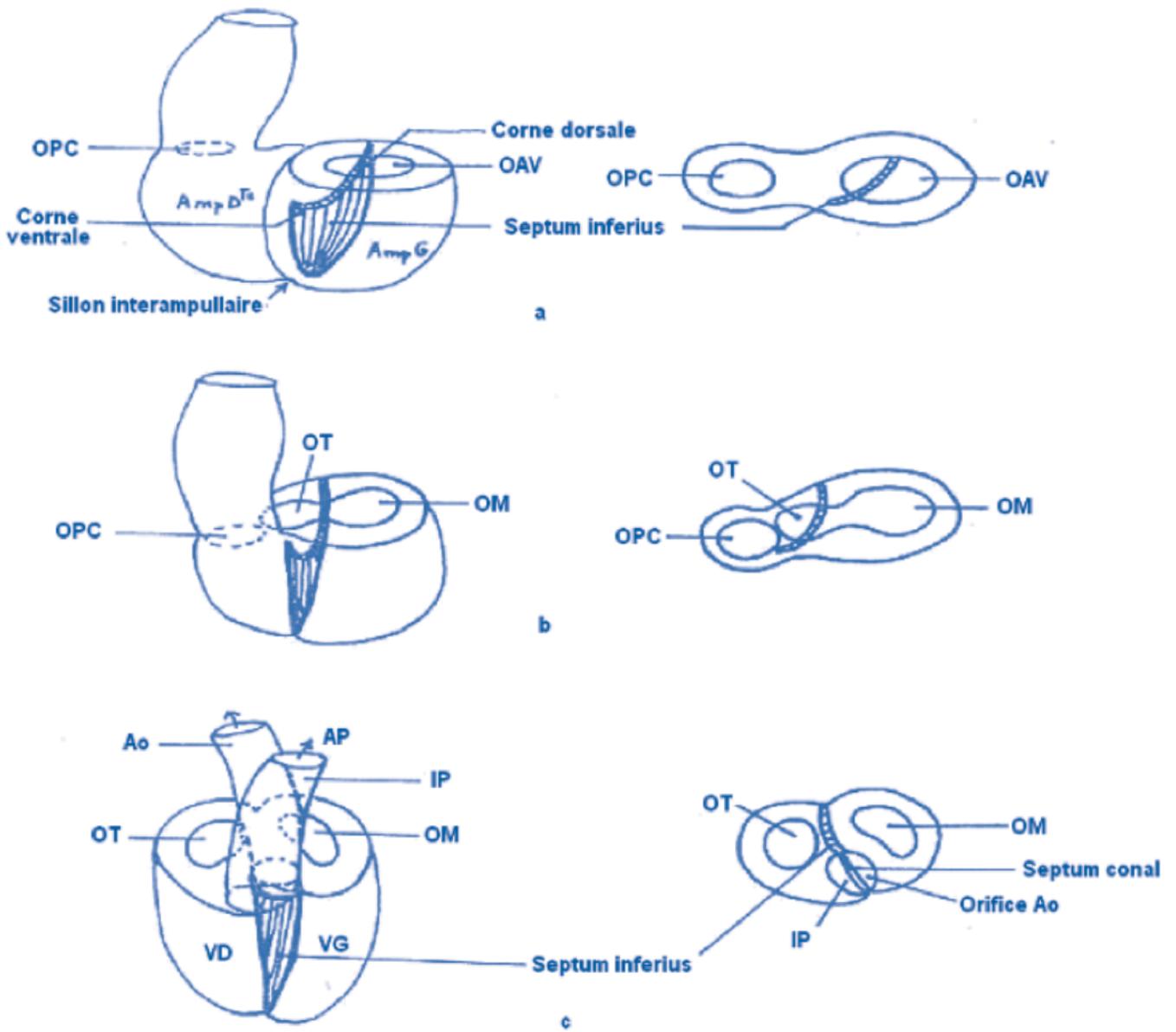


Fig. 10 Cloisonnement du ventricule primitif

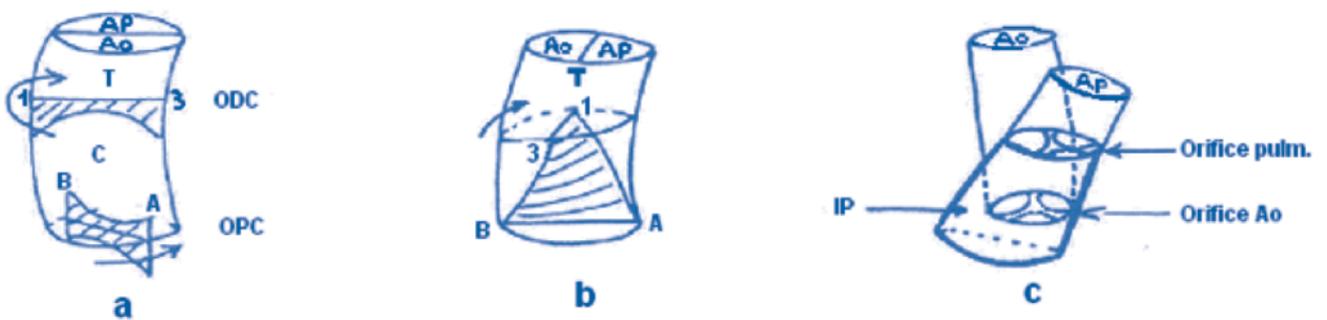


Fig. 11 Evolution du conus

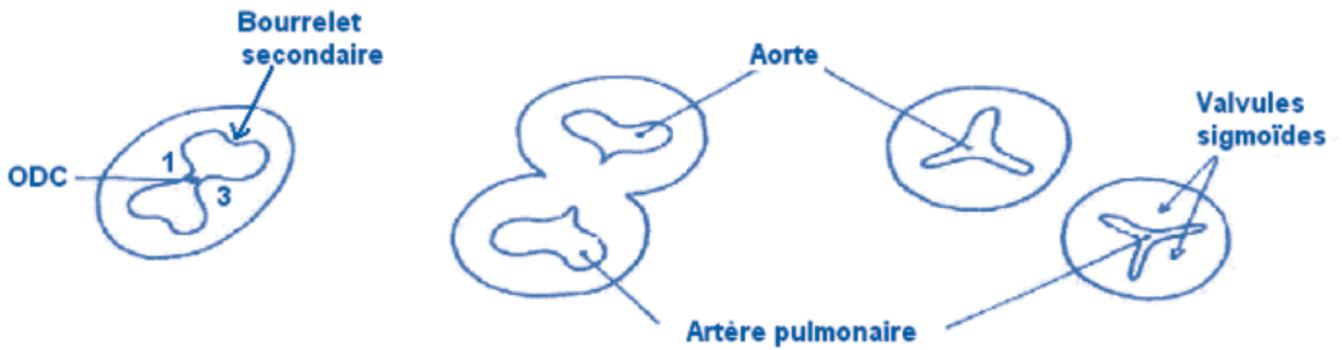


Fig. 12 Formation des valvules sigmoïdes

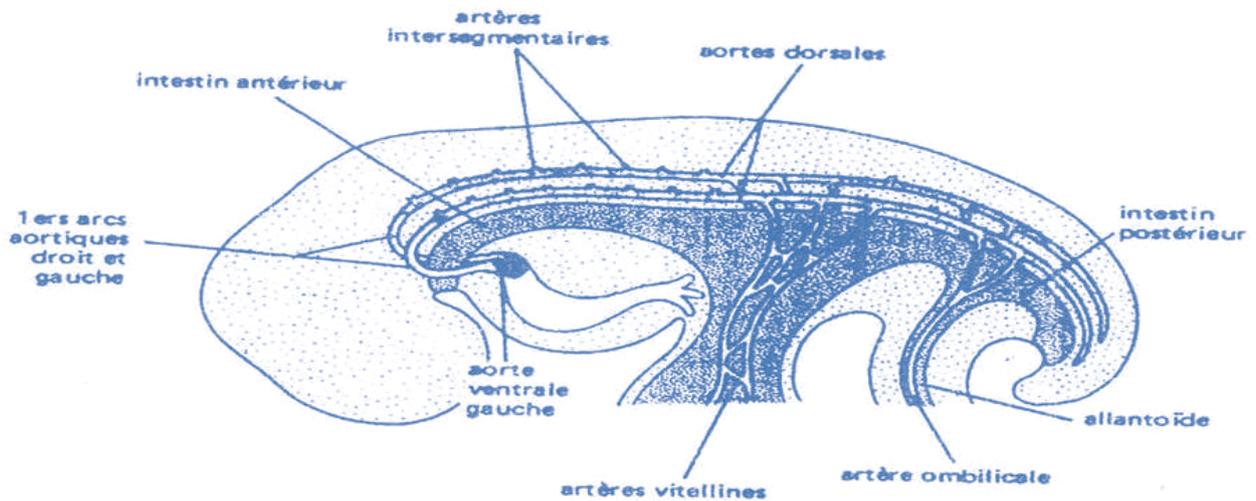


Fig. 13 Schéma de la circulation artérielle chez l'embryon de 3 semaines

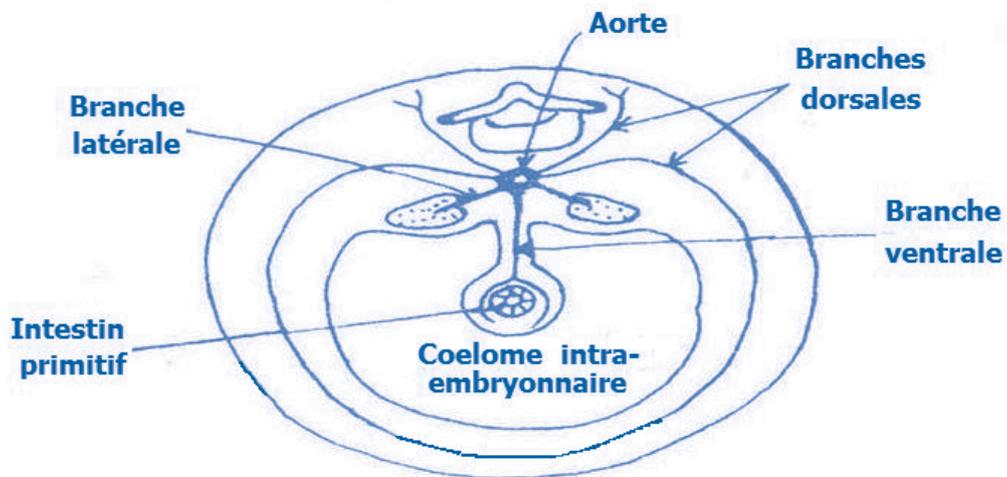


Fig. 14 Les artères segmentaires

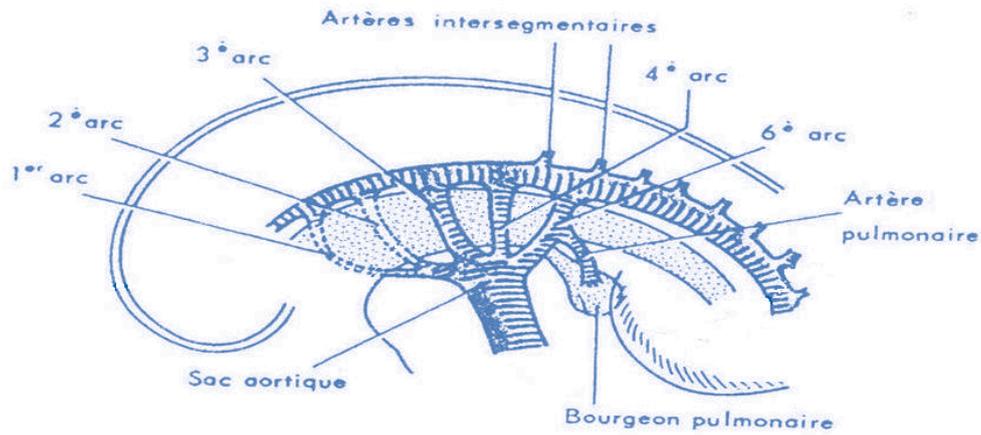


Fig. 15 Les arcs aortiques (Vue de profil)

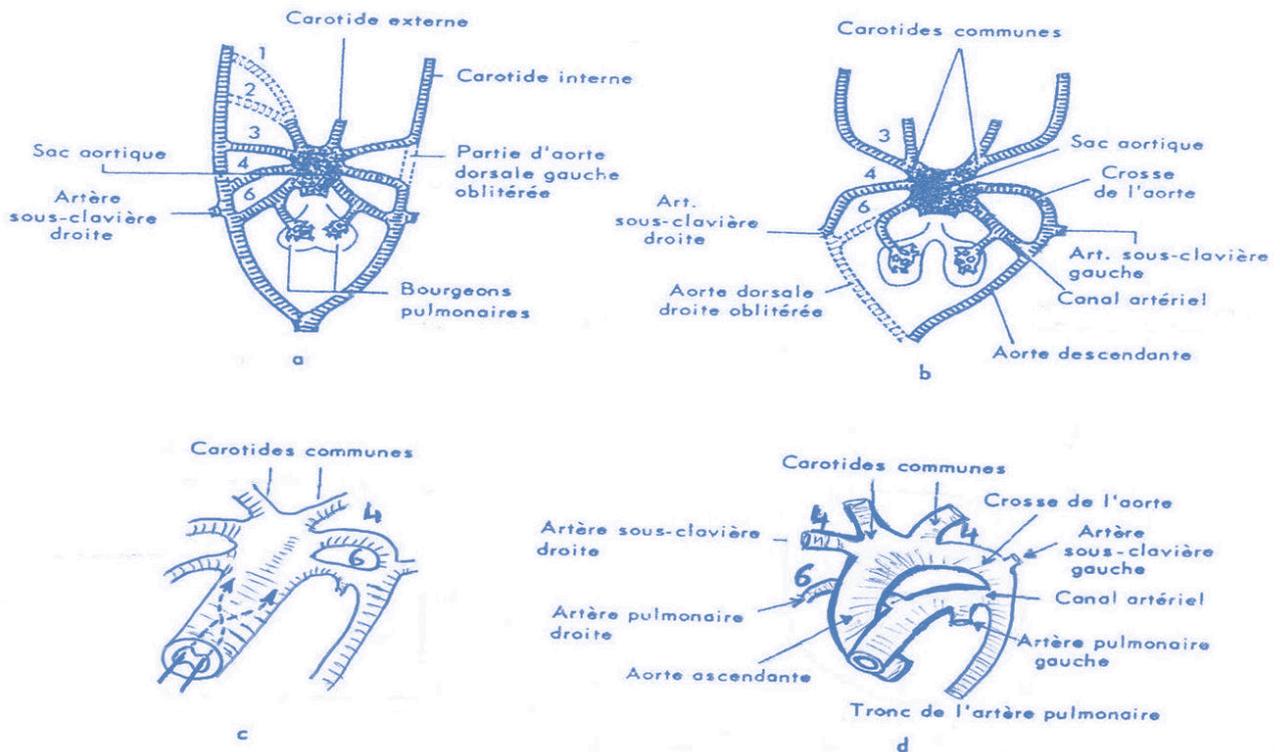


Fig. 16 Evolution des arcs aortiques

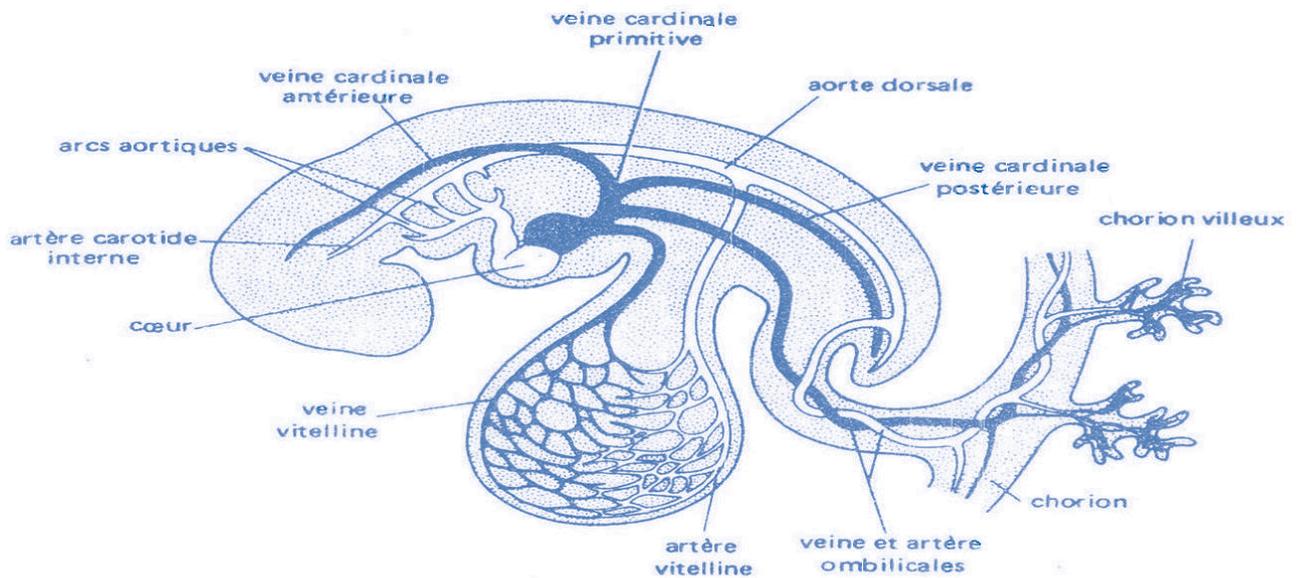


Fig. 17 Schéma de la circulation veineuse chez un embryon de 1 mois

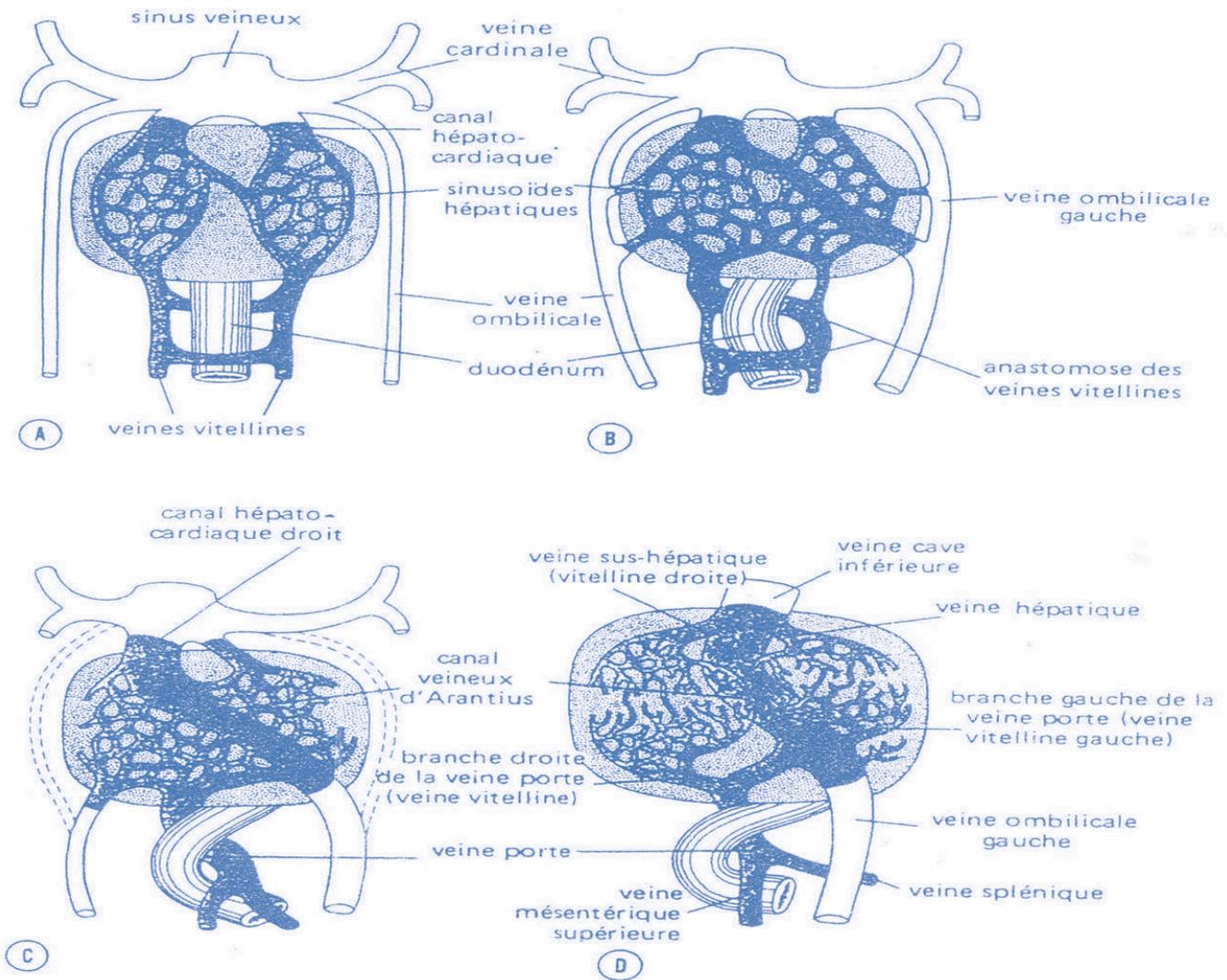
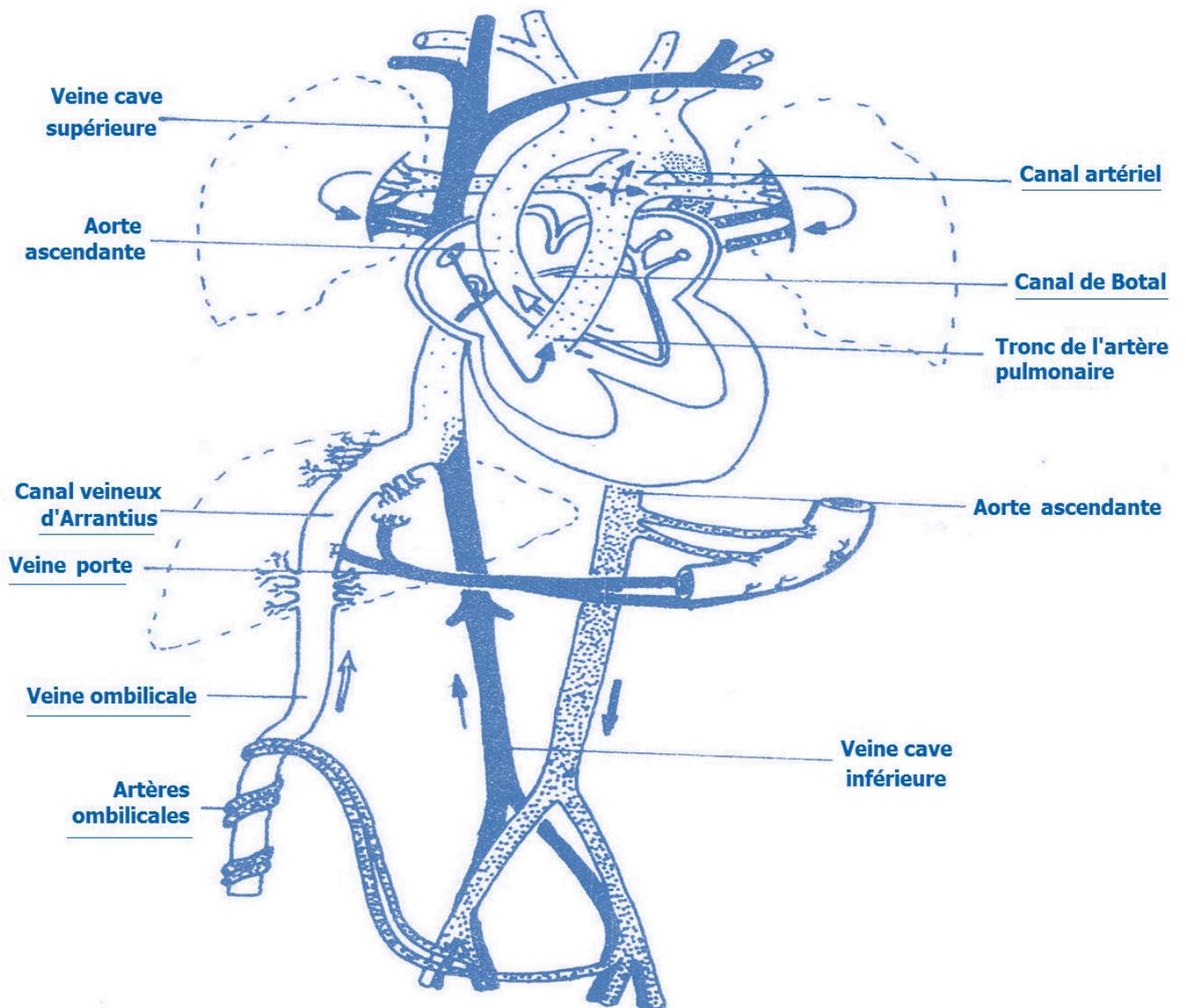


Fig. 18 Evolution des veines ombilicales et vitellines



Les structures soulignées s'oblitèrent à la naissance

Fig. 19 CIRCULATION FOETALE

PCEM1

THÈME IX LA CIRCULATION

PHYSIOLOGIE

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

CŒUR

1. Définir une cellule excitable
2. Définir un potentiel membranaire de repos et décrire les phénomènes ioniques à l'origine de ce potentiel.
3. Définir un seuil d'excitabilité
4. Définir un potentiel d'action
5. Associer les variations de conductances ioniques aux phénomènes de dépolarisation et de repolarisation
6. Décrire les phénomènes électriques observés lors de l'excitation des cellules nodales et myocardiques
7. Mettre en évidence l'automatisme cardiaque et décrire son origine
8. Mettre en évidence expérimentalement le pacemaker cardiaque
9. Définir l'électrocardiogramme
10. Décrire les différentes dérivations de l'électrocardiogramme
11. Décrire l'électrocardiogramme normal
12. Définir l'axe électrique du cœur et décrire la méthode de mesure de cet axe
13. Décrire la technique du cathétérisme cardiaque
14. Décrire les différentes phases du cycle cardiaque
15. Décrire les différents bruits de cœur
16. Indiquer les zones d'auscultation
17. Définir le travail cardiaque
18. Établir la courbe pression-volume qui détermine le travail cardiaque
19. Décrire les méthodes de mesure du débit cardiaque
20. Indiquer les variations physiologiques du débit cardiaque
21. Décrire la régulation du débit cardiaque

CIRCULATION

- 1 - Énumérer les caractéristiques générales du lit vasculaire
- 2 - Définir le système à haute pression
- 3- Citer les caractéristiques du système à haute pression
- 4- Décrire l'expérience de Marey et déduire le rôle de l'élasticité des vaisseaux
- 5- Indiquer le rôle des vaisseaux résistifs
- 6- Définir la vasomotricité
- 7 - Expliquer l'autorégulation locale
- 8- Expliquer la régulation nerveuse de la vasomotricité
- 9- Définir la pression artérielle
- 10- Décrire la boucle de régulation nerveuse de la pression artérielle
- 11- Citer les méthodes de mesure de la pression artérielle
- 12- Analyser la courbe de pression : sphygmogramme

- 13- Décrire le rôle de la circulation capillaire
- 14- Expliquer la loi de Starling
- 15- Citer les facteurs intervenant dans le contrôle de la circulation capillaire
- 16- Citer les fonctions du système veineux
- 17 - Énumérer les principales forces régissant le retour veineux
- 18- Décrire la circulation lymphatique
- 19- Citer les particularités de la circulation pulmonaire
- 20- Représenter les différentes courbes : pression volume, pression débit, pression résistance permettant d'expliquer les conditions hémodynamiques de la circulation pulmonaire
- 21 - Expliquer la régulation de la circulation pulmonaire
- 22- Décrire les caractéristiques hémodynamiques de la circulation coronaire
- 23- Expliquer la régulation de la circulation coronaire.

PLAN

CŒUR

INTRODUCTION
 PROPRIETES ELECTRIQUES DU CŒUR
 ÉLECTROCARDIOGRAMME
 PHÉNOMÈNES MÉCANIQUES DU CŒUR
 LE DÉBIT CARDIAQUE

CIRCULATION

INTRODUCTION
 LE SYSTÈME A HAUTE PRESSION (SHP)
 LE SYSTÈME A BASSE PRESSION (SBP)
 LA CIRCULATION CORONAIRE
 ADAPTATION CARDIO-VASCULAIRE A L'EXERCICE

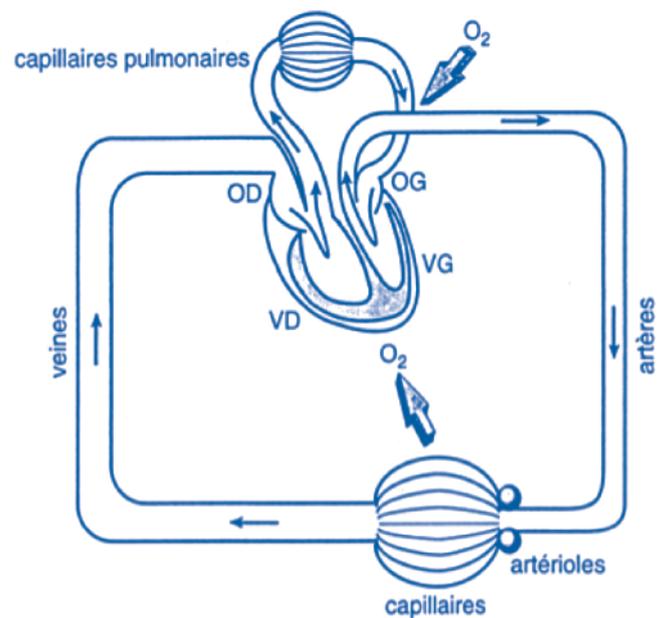


Figure 1 : La circulation générale

INTRODUCTION

L'homéostasie du milieu intérieur repose sur le prélèvement continu de matériaux essentiels, oxygène et nutriments dans l'environnement et sur l'apport de ces nutriments aux cellules ainsi que sur l'élimination continue des déchets. Cette homéostasie dépend aussi du transport des hormones, qui sont des messagers chimiques régulateurs, de leur lieu de production à celui de leur action.

L'APPAREIL CIRCULATOIRE, qui est le système de transport et d'échange de matière dans l'organisme, contribue ainsi à l'homéostasie.

Cet appareil comporte (Figure 1) :

- Une pompe : le cœur
- Un système de conduits : les vaisseaux qui sont subdivisés en :
 - o Un système de transport : système artériel et veineux
 - o Un système d'échange : les capillaires

L'écoulement du liquide dans ce système fermé n'est possible que s'il existe une **FORCE MOTRICE** : celle-ci

est représentée par la différence de pression entre le système artériel et le système veineux. Son maintien est la condition majeure pour assurer, d'une part un mouvement de liquide et d'autre part un débit sanguin adéquat dans les différents organes permettant ainsi des échanges efficaces entre le sang et les tissus.

On peut diviser ce système circulatoire en :

- **LA GRANDE CIRCULATION OU LA CIRCULATION SYSTÉMIQUE** : c'est l'ensemble circulatoire allant du ventricule gauche jusqu'à l'oreillette droite.
- **LA PETITE CIRCULATION OU LA CIRCULATION PULMONAIRE** : c'est l'ensemble circulatoire allant du ventricule droit jusqu'à l'oreillette gauche.

Cet appareil cardio-vasculaire a pour fonction principale le maintien d'une circulation nourricière adéquate pour les différents organes et donc le maintien d'une pression artérielle moyenne (PAM) dans des limites physiologiques normales. En effet, la PAM dépend de la fonction cardiaque représentée par le débit cardiaque (D_c) et par l'état des vaisseaux représenté par les résistances périphériques totales (RPT).

$$\Delta P = D_c \times RPT$$

INTRODUCTION :

Le cœur est un seul organe composé de deux pompes distinctes : droite et gauche formée chacune par deux cavités, oreillette et ventricule. Les deux côtés du cœur sont séparés par une cloison musculaire continue ou **septum** qui empêche le mélange de sang oxygéné du cœur gauche et du sang pauvre en oxygène du cœur droit.

Par ailleurs, l'étage auriculaire est séparé de l'étage ventriculaire par une **cloison fibreuse** qui empêche le passage direct de l'activité électrique.

L'écoulement du sang dans le cœur se fait uniquement des oreillettes vers les ventricules et de ceux-ci vers les grosses artères. Le sens de l'écoulement est imposé par quatre valves unidirectionnelles. Ces valves s'ouvrent et se ferment de façon passive sous l'influence de la différence de pression entre les deux cavités.

Il existe deux types de valves :

- Des valves à l'entrée du ventricule : valves auriculo-ventriculaires ou valves d'admission
- Des valves à la sortie du ventricule : valves sigmoïdes ou valves d'échappement.

Le tissu cardiaque est composé de trois tuniques : endocarde, myocarde et péricarde. Le myocarde, composé de cellules musculaires striées, constitue la **partie contractile** du cœur. Parmi ces cellules, on distingue des cellules musculaires particulières formant le tissu nodal et qui est à l'origine de **l'automatisme cardiaque**.

Le tissu nodal est formé par : (Figure 2)

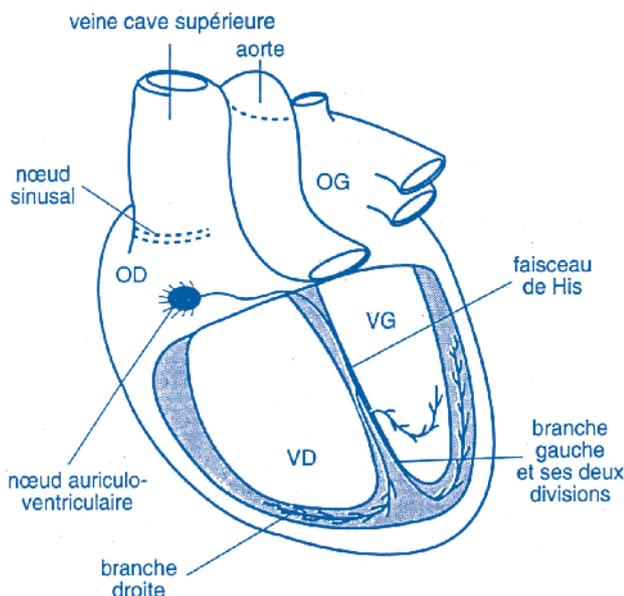


Figure 2 : Le tissu nodal

- Le nœud sinusal = nœud auriculaire = nœud de Keith et Flack : C'est un amas cellulaire au niveau de l'oreillette droite près de l'abouchement de la veine cave supérieure
- Le nœud auriculo-ventriculaire = nœud d'Aschoff Tawara : c'est un amas cellulaire qui existe au niveau du septum interauriculaire

- Le faisceau de His : c'est un ensemble de cellules allongées qui s'engage dans le noyau fibreux qui sépare le septum interauriculaire du septum interventriculaire. En effet, ce faisceau constitue le seul pont musculaire entre le myocarde auriculaire et le myocarde ventriculaire. Par la suite, il se divise en deux branches, une branche droite qui chemine sous l'endocarde septal droit en s'étalant progressivement et une branche gauche qui s'étale sous l'endocarde ventriculaire gauche.

- Le réseau de Purkinje : c'est les prolongements des branches du faisceau de His qui s'enfoncent de l'endocarde vers l'épicarde. Ces éléments terminaux s'arrêtent contre l'anneau fibreux tricuspide et mitral.

Outre sa fonction de pompe, le cœur est doté d'une fonction endocrine. En effet, les myocytes auriculaires synthétisent et libèrent dans le milieu intérieur un peptide à action natriurétique (ANP).

L'ensemble des cellules myocardiques sont reliées entre elles par des structures spécialisées : les disques intercalaires (Cf Histologie) qui permettent de relier les cellules entre elles et donc la transmission de la dépolarisation à toutes les cellules, faisant du tissu cardiaque un véritable **syncytium**.

LES PROPRIETES ELECTRIQUES DU CŒUR

EXCITABILITÉ :

Pour les cellules excitables, il existe deux types de potentiel : le potentiel de repos et le potentiel d'action. Dans le cas des cardiomyocytes, potentiel de repos et potentiel d'action alternent au cours du cycle cardiaque.

LE POTENTIEL MEMBRANAIRE DE REPOS (PMR) :

Ce potentiel membranaire de repos tire son origine d'une répartition inégale des ions entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule. Le PMR d'une cellule myocardique a une valeur toujours négative comprise entre -60 et -90 mv. Le PMR des cellules myocardiques banales est **stable** ; en revanche, celui des cellules du tissu nodal est **instable**. Ce qui se traduit sur le tracé du potentiel en fonction du temps par une pente progressivement croissante appelée : **pente de dépolarisation diastolique**.

NB : en raison de son instabilité, on évite d'employer le terme de potentiel de repos pour les cellules douées d'automatisme, on préfère celui de dépolarisation diastolique.

Les phénomènes qui contribuent au maintien du PMR sont :

- Transport actif : représenté par la pompe Na^+/K^+ AT-Pase qui repousse continuellement le Na^+ hors de la cellule alors qu'elle pompe le K^+ à l'intérieur de la cellule.
- Transport passif : Il existe des canaux à Na^+ qui font entrer le Na^+ dans la cellule et des canaux à K^+ qui font sortir le K^+ à l'extérieur de la cellule. Cependant, la

perméabilité de la membrane cellulaire est très faible au Na^+ , celui-ci ne peut donc entrer facilement à l'intérieur de la cellule. Alors que la perméabilité membranaire au K^+ est importante, cet ion peut donc diffuser facilement à l'extérieur de la cellule.

- La perméabilité membranaire aux protéines chargées négativement et aux phosphates est très faible. Ces anions restent donc à l'intérieur de la cellule.

LE POTENTIEL D'ACTION (PA) D'UNE CELLULE MYOCARDIQUE BANALE

Le PA se caractérise par une inversion transitoire du PMR, le milieu intra cellulaire devient positif par rapport au milieu extra cellulaire. Son amplitude totale est de l'ordre de 80 à 130 mV et sa durée est généralement comprise entre 100 - 200 ms pour un PA auriculaire et entre 200 - 400 ms pour un PA ventriculaire.

Pour décrire plus facilement le décours d'un PA et le PMR au cours du temps, on distingue cinq phases (Figure 3) :

- Phase 0 : Phase de dépolarisation
- Phase 1 : Phase de repolarisation précoce
- Phase 2 : Phase de plateau
- Phase 3 : Phase de repolarisation
- Phase 4 : PMR

Les mouvements ioniques principaux qui sont à l'origine de ces différentes phases sont :

- Phase 0 : c'est une phase ascendante brusque du PA due à l'ouverture de canaux sodiques rapides voltage-dépendants.
- Phase 1 - 2 : c'est une phase avec un début de repolarisation puis un plateau de dépolarisation. Elle est due à une diminution de la perméabilité au Na^+ , une perméabilité au K^+ qui reste inférieure à la valeur de repos et aussi à l'ouverture de canaux calcium lents permettant l'entrée de charges positives à l'intérieur de la cellule d'où maintien de la dépolarisation.
- Phase 3 : c'est une phase descendante. Elle est due à l'inactivation des canaux calciques lents et une augmentation de l'activité des canaux potassium.
- Phase 4 : c'est le retour au PMR.

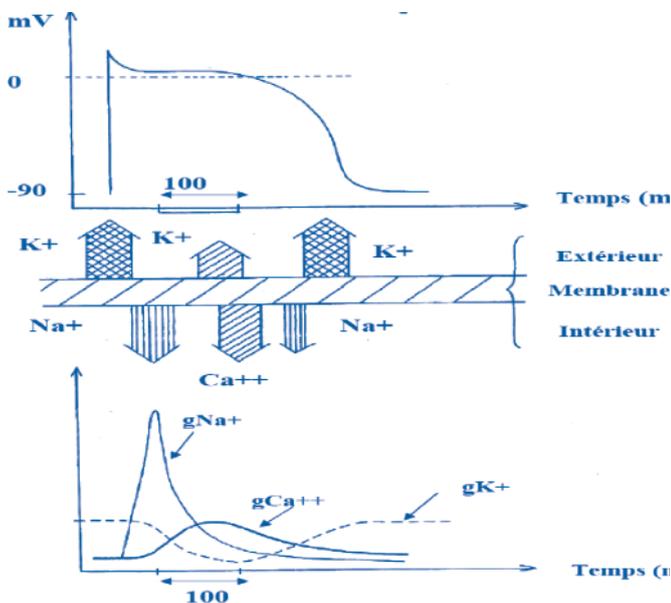


Figure 3 : Potentiel d'action d'une cellule myocardique ventriculaire

LE POTENTIEL D'ACTION (PA) D'UNE CELLULE NODALE :

Les différentes phases du PA diffèrent selon le siège de la cellule nodale :

1.1.1 AU NIVEAU DU NŒUD SINUSAL ET DU NŒUD AURICULO-VENTRICULAIRE :

La valeur du potentiel la plus électronégative est appelée : potentiel diastolique maximal (PDM). Au niveau du nœud sinusal et du nœud auriculo-ventriculaire, le PA présente : (Figure 4)

- Phase 0 : Phase de dépolarisation à pente lente
- Phases 1 et 2 : confondues
- Phase 3 : Phase de repolarisation
- Phase 4 : Dépolarisation diastolique

Les mouvements ioniques principaux qui sont à l'origine de ces différentes phases sont :

- Phase 0 : due à l'activation des canaux Ca^{++} lents : ICaL
- Phase 1- 2 : début d'inactivation des canaux Ca^{++} lents
- Phase 3 : activation des canaux K^+
- Phase 4 : cette dépolarisation diastolique spontanée est due à l'ouverture de deux types de canaux voltage-dépendants : un canal sodique/ potassique (I_f) et un canal calcique transitoire (ICa_{T})

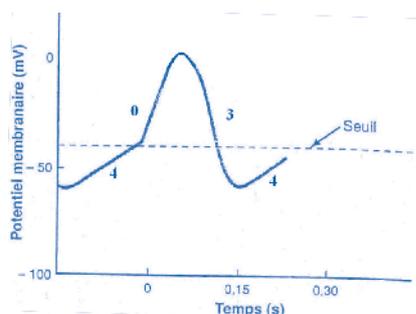


Figure 4 : Potentiel d'action d'une cellule nodale

1.1.2 AU NIVEAU DU FAISCEAU DE HIS ET DU RÉSEAU DE PURKINJE :

Les phases du PA sont identiques à celles d'une cellule myocardique banale ventriculaire sauf au cours de la phase 4 qui présente une pente de dépolarisation diastolique spontanée.

LES PÉRIODES RÉFRACTAIRES :

Il existe un intervalle de temps compris entre le début du PA et à peu près de la moitié de la phase 3, pendant lequel il est impossible d'obtenir un nouveau PA même anormal : c'est la **période réfractaire absolue** : PRA. Cette période est suivie par la **période réfractaire relative** : PRR pendant laquelle un début de réponse commence progressivement à apparaître avec des intensités de stimulations très élevées, mais qui se rapproche peu à peu de la valeur normale. On appelle **période réfractaire effective** : PRE l'intervalle de temps au bout duquel on obtient un PA propagé. Sa durée correspond à celle de la PRA plus environ la moitié de la PRR. Les périodes réfractaires sont dues aux états d'inactivation par lesquelles passent les canaux sodiques et calciques avant de retrouver les uns après les autres leur état de disponibilité initial. L'existence de longues périodes réfractaires empêche la fusion des contractions successives : **tétanos** qui serait impropre au bon fonctionnement de la pompe cardiaque.

AUTOMATISME :

L'automatisme est défini comme la propriété que possède le cœur de se contracter rythmiquement en dehors de toute stimulation. En effet, séparé du reste de l'organisme, le cœur continue à battre, mettant en évidence l'automatisme de cet organe.

L'automatisme est l'apanage des cellules nodales encore que ces dernières soient fortement hiérarchisées quant à leur fonction : les unes étant véritablement automatiques, les autres ne fonctionnent que comme transmetteurs de la dépolarisation. Cette spécialisation à l'intérieur même des cellules nodales dépend :

- De la capacité des cellules à se dépolariser spontanément.
- De leur distribution anatomique dans le myocarde.

Tout se passe comme si les cellules qui spontanément se dépolarisent le plus rapidement étaient les seules automatiques, les autres n'ayant comme seul rôle que la transmission de la dépolarisation.

ORIGINE DE L'AUTOMATISME :

C'est le phénomène de dépolarisation diastolique spontané ou potentiel générateur qui est à l'origine de l'automatisme des cellules nodales. En effet, ces cellules déclenchent spontanément un PA du fait de l'instabilité de leur PMR.

HIÉRARCHIE DE L'AUTOMATISME :

Le nœud sinusal semble être la seule structure véritablement automatique. C'est le pacemaker, car sa fréquence de dépolarisation est la plus élevée.

- Inactivation du nœud sinusal :
C'est le nœud auriculo-ventriculaire qui prend le relais, mais avec un rythme plus lent (de 40 coups/min à 60 coups /min). Dans ce cas, la dépolarisation ventriculaire se fait dans un sens normal alors que la dépolarisation auriculaire se fait dans un sens rétrograde. La contraction auriculaire se fait alors en même temps que celle des ventricules.
- Inactivation du nœud auriculo-ventriculaire :
Interruption de la liaison électrique entre les oreillettes et les ventricules. Les oreillettes sont dépolarisées à partir du nœud sinusal et donc continuent à battre normalement. Les ventricules prennent le rythme du faisceau de His qui est encore plus lent.
- Inactivation du faisceau de His :
La dépolarisation à partir du nœud sinusal envahit les oreillettes puis s'arrête au niveau du noyau auriculo-ventriculaire. Les ventricules prennent le rythme du réseau de Purkinje = rythme idioventriculaire (30 à 40 coups / min).
- Inactivation d'une branche du faisceau de His :
La dépolarisation se transmet au ventricule correspondant à partir de la branche normale. Par conséquent, le ventricule dont la branche est lésée a une dépolarisation un peu retardée par rapport à celle du ventricule sain : c'est le bloc de branche. Par contre, lors de l'inactivation du nœud auriculo-ventriculaire ou du faisceau de His, il y a indépendance totale du fonctionnement des oreillettes et des ventricules : c'est le bloc complet.

CONDUCTION :

C'est dans le nœud sinusal que se crée la dépolarisation. En effet, le nœud sinusal détermine la fréquence de contraction de l'ensemble du cœur.

Ce poly a été téléchargé depuis med-tmss.blogspot.com/2016/08/cours.html | Page Fb : www.facebook.com/Faculte.de.Medecine.TMSS

À L'ÉTAGE AURICULAIRE :

Du nœud sinusal, la dépolarisation se transmet à tout le myocarde auriculaire. La dépolarisation se propage dans toutes les directions par les cellules myocardiques banales (0,3 m/s) et par les faisceaux inter auriculaires et internodaux (1 m/s). Le point le plus éloigné du nœud sinusal est atteint en 50 à 90 ms. Parvenue aux anneaux fibreux qui séparent le myocarde auriculaire du myocarde ventriculaire, la dépolarisation s'arrête sauf au niveau du nœud auriculo-ventriculaire où la transmission de la dépolarisation est freinée. Ce ralentissement de la vitesse de conduction de la dépolarisation permet aux oreillettes de se vider dans les ventricules avant que ces derniers ne se contractent. La dépolarisation et la repolarisation se font de l'endocarde vers l'épicarde.

À L'ÉTAGE VENTRICULAIRE :

La dépolarisation s'engage dans le faisceau de His puis dans ses branches. La branche gauche transmet la dépolarisation dans le septum, la pointe puis les parois latérales et basales. À droite, la dépolarisation atteint la pointe puis remonte vers la base. La durée totale de la dépolarisation de la masse ventriculaire est de 60 à 80 ms. La dépolarisation se fait toujours de l'endocarde vers l'épicarde alors que la repolarisation se fait de l'épicarde vers l'endocarde.

L'ÉLECTROCARDIOGRAMME : ECG

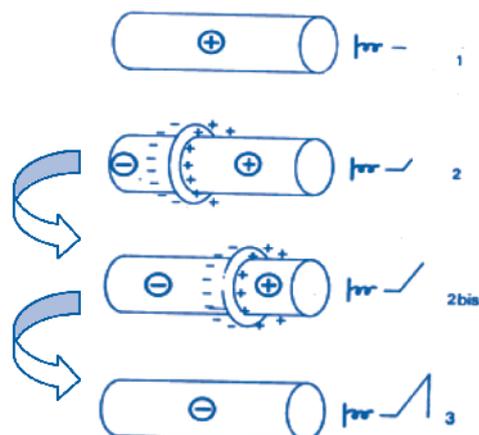
L'électrocardiogramme enregistre l'activité électrique du cœur ; l'activité électrique de l'ensemble des cellules cardiaques peut être assimilée à celle d'une seule cellule.

1 RAPPEL PHYSIOLOGIQUE

La stimulation d'une cellule musculaire détermine l'apparition d'une activité électrique et mécanique. La cellule musculaire est polarisée à l'état de repos. La polarisation est représentée par une charge électrique positive à la surface de la cellule.

Sous l'effet de la stimulation, la surface cellulaire se dépolarise, ce qui donne lieu à un courant électrique qui détermine la contraction de la cellule.

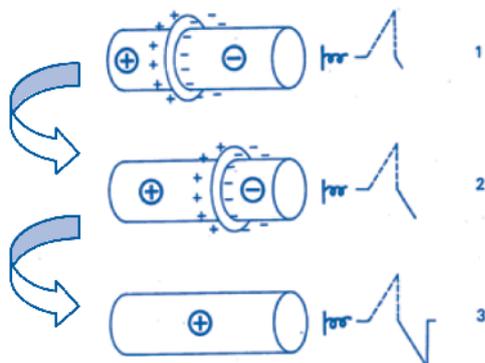
Ce courant électrique est composé d'une succession de dipôles avec un pôle (-) et un pôle (+), qui parcourent toute la longueur de la cellule. Celle-ci, une fois dépola-



Dépolarisation d'une cellule musculaire

- 1/ Cellule au repos
- 2- 2bis/ Propagation de la stimulation
- 3/ Cellule entièrement

risée récupère progressivement sa charge électrique positive initiale : c'est la repolarisation (la fin de cette repolarisation correspond à la fin de la contraction cellulaire) Ce sont habituellement les régions qui ont été les premières dépolarisées qui se repolarisent les premières, cette repolarisation se fait donc dans le même sens que la dépoliarisation ; mais le dipôle de repolarisation est (+) (-), c'est-à-dire de sens opposé au dipôle de dépoliarisation qui est (-) (+).

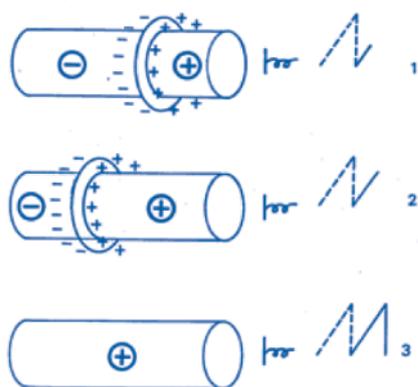


Repolarisation d'une cellule musculaire

- 1/ Début de la repolarisation
- 2/ Propagation de la repolarisation
- 3/ Cellule entièrement repolarisée

LA CELLULE CARDIAQUE À UNE REPOLARISATION DIFFÉRENTE :

en effet la dépoliarisation naît dans l'endocarde et se termine dans l'épicarde, alors que la repolarisation commence dans l'épicarde et se termine dans l'endocarde. Les dipôles de dépoliarisation et de repolarisation ont ainsi toujours le même sens (-) (+). Cette particularité est expliquée par l'inégalité de la vitesse de dépoliarisation et de repolarisation entre les couches sous épicardiques et sous endocardiques. La durée de la dépoliarisation serait plus longue dans les couches sous endocardiques. Ainsi l'épicarde ayant terminé le premier sa dépoliarisation, commence plus tôt sa repolarisation.

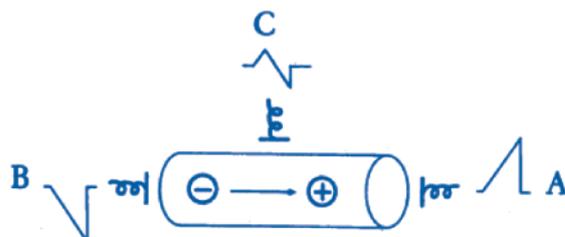


Repolarisation d'une cellule cardiaque

- 1/ Début de la repolarisation.
- 2/ Propagation de la repolarisation
- 3/ Fin de la repolarisation

Le dipôle est représenté par un vecteur dont l'orientation est celle du dipôle : par exemple si le pôle (+) est en avant, et le pôle (-) en arrière, l'électrode placée en avant recueillera une positivité, et l'électrode placée en arrière, une négativité.

Si l'on place une électrode à la partie moyenne de la cellule, l'électrode captera d'abord la positivité du dipôle qui vient vers elle et ensuite la négativité du dipôle qui la fuit. L'inscription graphique des forces électriques enregistre conventionnellement une déflexion vers le haut, dite positive, quand le pôle (+) du dipôle se dirige vers l'électrode exploratrice et une déflexion vers le bas, dite négative, quand l'électrode exploratrice fait face au pôle (-) du dipôle. Après avoir enregistré la force électromotrice du dipôle, la déflexion retourne à la ligne de base.

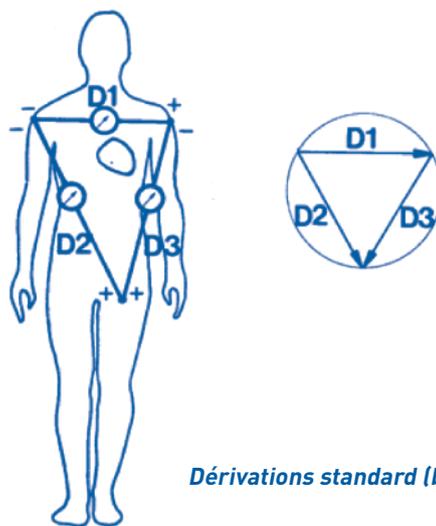


Inscription graphique de dipôle selon la position de l'électrode

L'activité électrique du cœur, comme il a déjà été dit, peut être assimilée à celle d'une seule cellule et l'enregistrement des forces électromotrices peut se faire à distance, le corps étant considéré comme un conducteur homogène et isotropique.

Les électrodes exploratrices peuvent donc être situées dans n'importe quelle région du corps sans que soient modifiés les potentiels enregistrés. Einthoven eut le premier l'idée d'enregistrer les forces électromotrices du cœur par une série d'électrodes réalisant entre elles un triangle équilatéral.

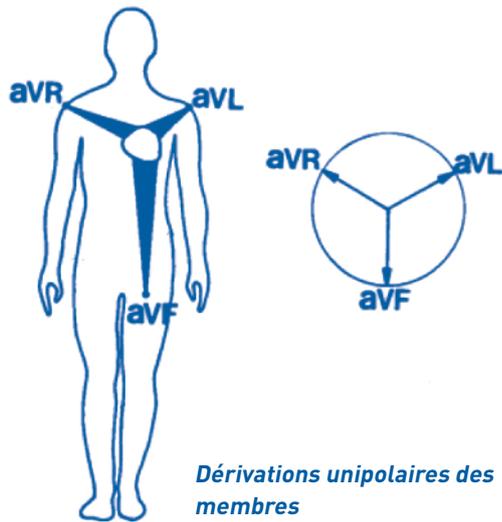
Ce triangle est basé sur la loi électrique de Kirchoff, et le cœur est situé théoriquement au centre de ce triangle. Les électrodes sont placées sur 3 membres en montage bipolaire de manière à enregistrer une différence de potentiel entre deux points opposés. Chacun de ces montages bipolaires correspond à une dérivation dite STANDARD dont la polarité est orientée de la manière suivante :



Dérivations standard (bipolaires)

- Dérivation I (D1) : bras gauche (+) et bras droit (-)
- Dérivation II (D2) : jambe gauche (+) et bras droit (-)
- Dérivation III (D3) : jambe gauche (+) et bras gauche (-)

Dans le but d'objectiver directement le potentiel électrique du cœur au moyen d'une seule électrode, Wilson a inventé les dériviatives unipolaires. Celles-ci comprennent une électrode (+) qui est exploratrice, et enregistre les variations de potentiel qui lui font faire face, et une électrode indifférente (dite négative) où le potentiel est toujours égal à zéro. Ces dériviatives unipolaires utilisent comme électrodes exploratrices l'électrode mise sur le bras droit, celle mise sur le bras gauche et celle mise sur la jambe gauche. Ces dériviatives sont respectivement appelées VR : Vector of Right arm, VL: Vector of Left arm et VF: Vector of Foot:



Leur pôle positif fait face au dipôle cardiaque alors que leur pôle négatif, par un artifice technique, est toujours égal à zéro. Les déflexions ainsi obtenues, étant trop petites, sont amplifiées, et ces dériviatives modifiées sont désignées par la lettre a (augmentée) : **aVR, aVL, aVF**.

Des dériviatives **unipolaires**, dont la topographie sera détaillée plus loin, peuvent être placées suivant le même principe sur le thorax, ce sont les dériviatives **précordiales**.

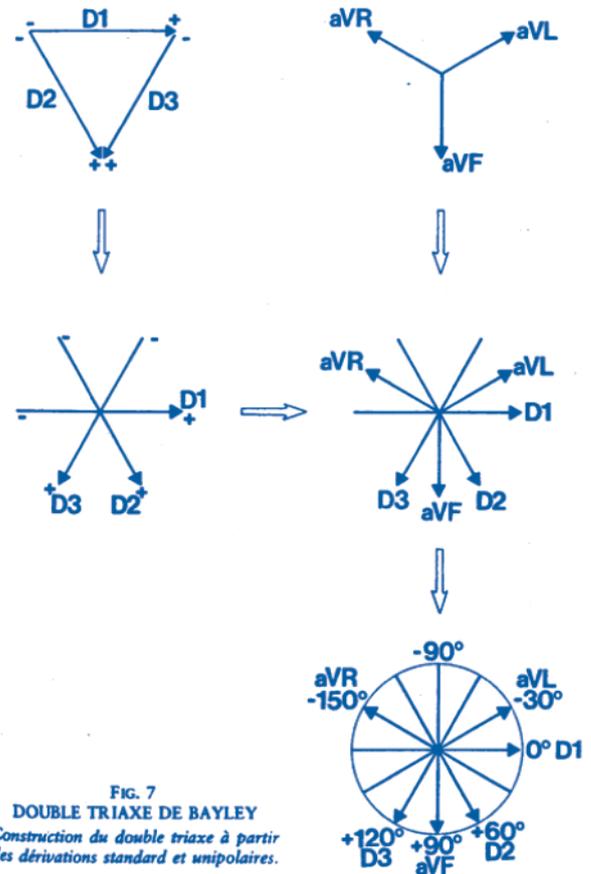
De la sorte les dériviatives unipolaires des **membres** explorent l'activité électrique du cœur dans un plan **frontal** et les dériviatives **précordiales** dans un plan **horizontal**. Bayley eut l'idée d'incorporer les dériviatives unipolaires des membres aux dériviatives bipolaires qui forment le triangle équilatéral au centre duquel se trouve le cœur, de manière à réaliser un système de 6 axes équidistants de 30° situés dans le plan frontal passant par un même point central (correspondant au centre du cœur).

L'axe des trois dériviatives bipolaires des membres est donc conservé et subit simplement une translation pour être rapporté au point central.

La position des six axes est facilement repérée sur un cercle. Cette position est définie par l'angle que fait l'axe avec l'horizontale, cet angle étant mesuré dans le sens horaire de 0° à + 180°, et de 0° à -180° dans le sens antihoraire.

Ainsi défini, l'axe des différentes dériviatives est le suivant :

- **D1 = 0°**
- **D2 = + 60°**
- **D3 = + 120°**
- **aVR = - 150°**
- **aVL = - 30°**
- **aVF = + 90°**



Double triaxe de Bayley

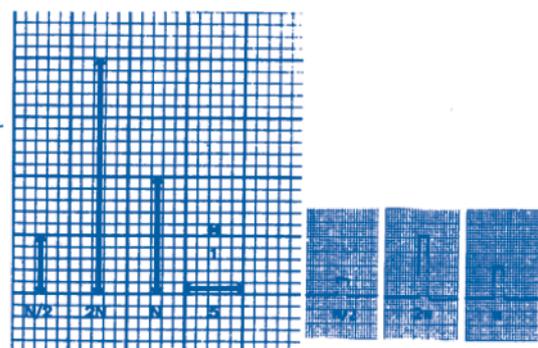
Ce système appelé double triaxe de Bayley permet de calculer l'axe électrique du cœur qui sera détaillé plus loin.

2- TECHNIQUE D'ENREGISTREMENT DE L'ECG : L'ELECTROCARDIOGRAPHE

L'électrocardiographe est un appareil permettant d'enregistrer l'activité électrique du cœur par l'intermédiaire des différentes électrodes exploratrices précédemment décrites.

L'enregistrement se fait sur un papier millimétré qui se déroule à une vitesse constante.

Le papier millimétré est composé de carrés de 5 mm de côté. Ces carrés sont subdivisés en carrés plus petits de 1 mm de côté. Les traits qui cernent les grands carrés sont plus épais que ceux qui encadrent les petits carrés.



Déflexions tests.

- Le papier se déroule à 25 mm/s : 1 mm = 0.04 s et 5 mm = 0.20 s
- Étalonnage normal (N) de l'électrocardiographe enregistre une déflexion de 1cm de hauteur pour un courant électrique

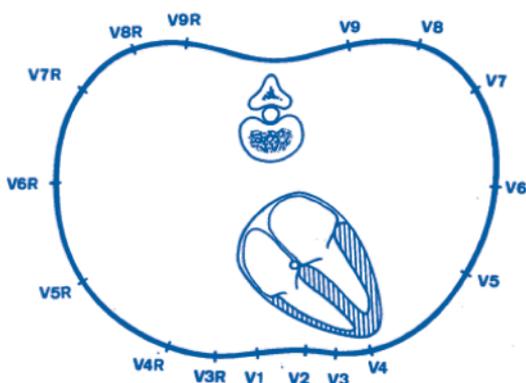
Dans les conditions standard, le papier se déroule à une vitesse de 25 mm à la seconde, de sorte qu'en abscisses : **1 mm = 0.04 seconde.**

De même, l'étalonnage standard de l'électrocardiogramme enregistre en ordonnées une déflexion de **10 mm pour un voltage de 1 millivolt.**

LA MISE EN PLACE DES ÉLECTRODES

Les électrodes sont appliquées sur la peau habituellement enduite préalablement par une pâte conductrice. Quatre électrodes sont placées sur les membres habituellement à la face interne des avant-bras, et la face externe des jambes ce qui permet d'enregistrer les 3 dérives bipolaires, dites aussi **dérivations standard** (D1, D2, D3) et les 3 **dérivations unipolaires des membres** (aVR, aVL, aVF).

Une ou plusieurs électrodes sont appliquées sur le thorax, et enregistrent des **dérivations dites précordiales** selon la disposition suivante (V signifiant : vecteur).



Coupe horizontale du thorax

- **V1** = 4^e espace intercostal (EIC) droit au ras du sternum.
- **V2** = symétriques de V1 par rapport au sternum.
- **V3** = à mi-distance entre V2 et V4
- **V4** = à l'intersection de la ligne horizontale passant par le 5^e EIC gauche, et la ligne médio-claviculaire.
- **V5** = à l'intersection de la même ligne horizontale et la ligne axillaire antérieure.
- **V6** = à l'intersection de la même ligne horizontale et la ligne axillaire moyenne.

Telles sont les dérives usuelles systématiquement enregistrées.

D'autres dérives précordiales s'avèrent parfois indispensables. Ce sont en particulier :

- **V7** = à l'intersection de la ligne horizontale passant par le 5^e EIC gauche et la ligne axillaire postérieure.
- **V8** = à l'intersection de la même ligne horizontale et la verticale passant par la pointe de l'omoplate.
- **V9** = sur cette même ligne horizontale au bord gauche du rachis.
- **V3R** = à droite du sternum à mi-distance entre V1 et **V4R** (symétrique de V3)
- **V4R** = à l'intersection de la ligne horizontale passant par le 5^e EIC droit et la ligne médio-claviculaire (symétrique de V4)
- **V5R, V6R, V7R, V8R, V9R** sont de même les symétriques droites des dérives précordiales gauches.
- **VE** (épigastrique) = placée sous la xiphôide sur le côté gauche.

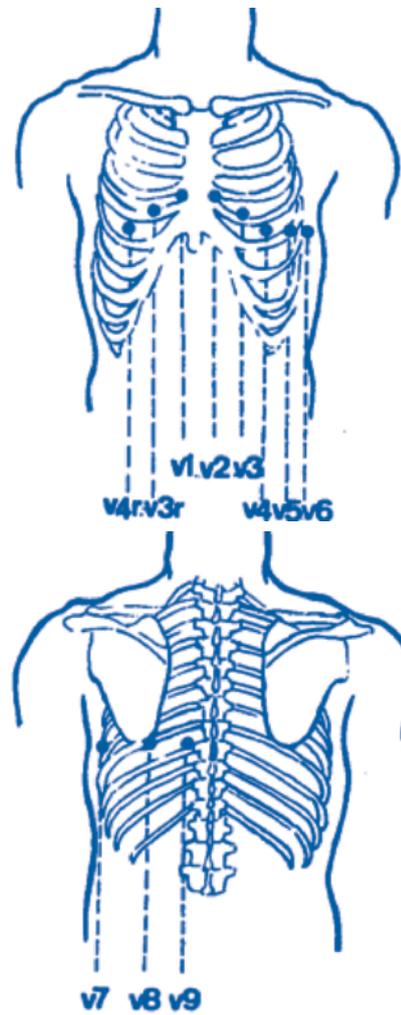
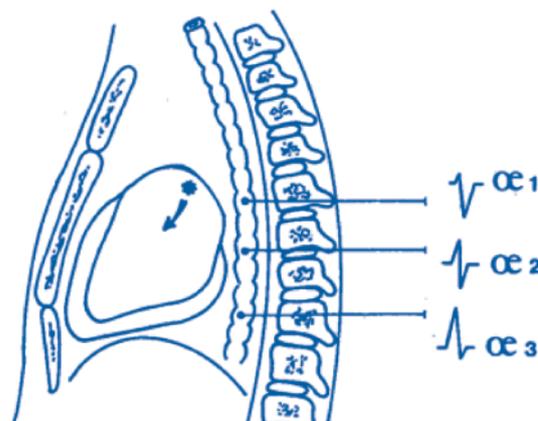


Schéma du gril costal

Emplacement des différentes électrodes

- Uniquement pour mémoire est citée la dérivation œsophagienne qui est enregistrée par une sonde portant une petite électrode à son extrémité, introduite dans l'œsophage grâce à de simples mouvements de déglutition. Le tracé est variable suivant le point d'enregistrement.



Dérivations œsophagiennes

3 ÉLECTROCARDIOGRAMME NORMAL

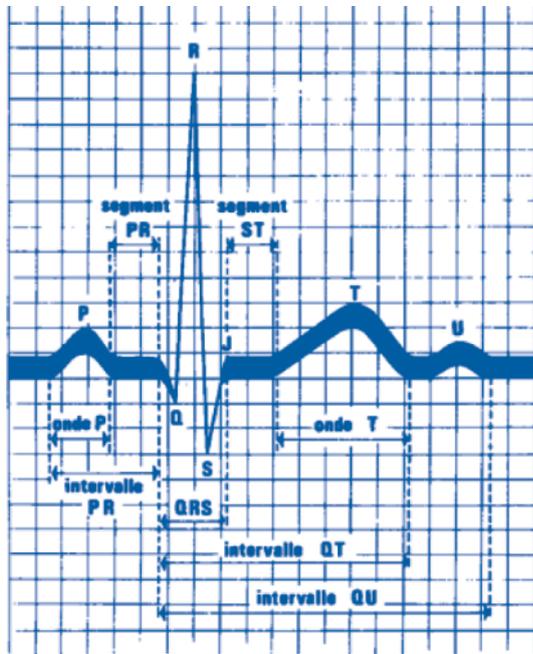
3.1 NOMENCLATURE

L'électrocardiogramme enregistre successivement la dépolarisation et la repolarisation auriculaire qui correspond à la contraction auriculaire, puis la dépolarisa-

tion et la repolarisation ventriculaire qui correspond à la contraction ventriculaire.

Ces phénomènes sont suivis d'un « repos » électrique qui correspond à la ligne de base isoélectrique. Il apparaît alors une succession de déflexions, séparées par des intervalles.

Ces déflexions et ces intervalles ont une terminologie précise.



Nomenclature des déflexions, segments et intervalles du tracé ECG

3.1.1 Les différentes déflexions :

Elles sont désignées, depuis Einthoven, par les lettres de l'alphabet à partir de P :

- **Onde P** : traduit la dépolarisation auriculaire
- **Onde Ta** : correspond à la repolarisation auriculaire, habituellement non visible, contemporaine du complexe QRS et masquée par lui.
- **Complexes QRS** : ensemble des déflexions correspondant à la dépolarisation des ventricules.
 - Les lettres capitales Q.R.S. désignent les déflexions amples, supérieures ou égales à 5 mm.
 - Les petites lettres q.r. s. désignent les déflexions plus petites, inférieures à 5 mm.

Onde Q ou **q** : déflexion négative initiale précédant la 1^{re} déflexion positive.

Onde R ou **r** : 1^{re} déflexion positive.
R' ou r' : 2^e déflexion positive.

Onde S ou **s** : 1^{re} déflexion négative, succédant à la déflexion positive R ou r.
S'ou s' : 2^e déflexion négative, succédant à la déflexion (+) R' ou r'.

Onde QS : déflexion négative exclusive (sans onde positive)

MONOPHASIQUE	 R	 R croché	 M	 r	 QS	 QS croché	 W	 qs
DIPHASIQUE	 qR	 QR	 Qr	 qr	 Rs	 RS	 rS	 rs
TRIPHASIQUE	 qRs	 qRS	 qrs	 qrS	 rSr'	 rSR'	 rsr'	 rsR'
POLYPHASIQUE	 rsR's'	 rSRs'r'	etc...					

Notation du complexe QRS en fonction de sa morphologie et de l'amplitude des ondes qui le composent

- **Point J** : correspond à la fin de la dépolarisation ventriculaire (point de raccordement entre la fin de QRS et le début du segment ST), il est normalement situé sur la ligne isoélectrique.
- **Onde T** : correspond à la repolarisation ventriculaire.
- **Onde U** : déflexion de signification discutée.

3.1.2 Les différents intervalles :

La position respective de l'onde P, du complexe QRS et de l'onde T permet de définir un certain nombre d'intervalles ou de segment

- **L'intervalle PR** : correspond au temps de conduction auriculo-ventriculaire.
- **Le segment PR** : sépare la fin de l'onde P du début du complexe QRS.
- **Le segment ST** : débute au point J, reste normalement isoélectrique jusqu'au pied de l'onde T. Cet intervalle sépare la fin de la dépolarisation et le début de la repolarisation ventriculaire.
- **L'intervalle QT** : intervalle entre le début de la dépolarisation ventriculaire (début de l'onde Q) et la fin de la repolarisation ventriculaire (fin de l'onde T), l'espace QT représente donc la systole électrique.
- **L'intervalle QU** : s'étend du début du complexe QRS à la fin de l'onde U.

3.2 MENSURATIONS

Les mesures d'amplitude ou de durée des ondes et des intervalles s'effectuent aisément grâce aux coordonnées millimétriques que portent la plupart des papiers d'enregistrement en se référant aux étalonnages de voltage et de vitesse de déroulement du papier.

3.2.1 Fréquence du rythme

Lorsque le rythme cardiaque est régulier, sa fréquence peut être déduite de la durée de l'intervalle séparant deux ondes de même nature, par exemple deux ondes P successives dans un rythme sinusal.

Il est commode de retenir qu'avec un déroulement standard de 2.5 cm/s :

- Un intervalle de 1 cm indique une fréquence de 150bpm
- Un intervalle de 1.5 cm : 100bpm
- Un intervalle de 2 cm : 75bpm
- Un intervalle de 2.5 cm : 60bpm
- Un intervalle de 3 cm : 50bpm
- Un intervalle de 3.5 cm : 43bpm
- Un intervalle de 4 cm : 38bpm

Lorsque le rythme cardiaque est irrégulier, par exemple dans une arythmie complète par fibrillation auriculaire, on peut avoir une idée approximative de sa fréquence moyenne en comptant le nombre de complexes QRS inscrits pendant 6 secondes (15 cm de papier se déroulant à 2.5/s) et en multipliant par 10 le chiffre obtenu.

3.2.2 Durée des déflexions et intervalles

Si le tracé est enregistré à vitesse standard de 25 mm/s, 1 mm en abscisse correspond à une durée de 0.04 s.

La valeur normale de la durée des déflexions et des intervalles est la suivante :

- **P** : inférieure ou égale à 0.12 seconde.
- **Q** : inférieure à 0.04 seconde.
- **QRS** : inférieure à 0.10 seconde (0.09 seconde avant 15 ans). Habituellement entre 0.06 s et 0.08 s.
- **PR** : entre 0.12 et 0.20 seconde (entre 0.10 et 0.17 seconde avant 10 ans).
- **QT** : sa durée varie selon la fréquence cardiaque (elle s'allonge quand la fréquence se ralentit, et se raccourcit quand la fréquence s'accélère).

3.3 AMPLITUDE ET MORPHOLOGIE DES COMPLEXES

3.3.1 Amplitude :

L'amplitude d'une onde positive est la distance séparant le sommet de l'onde du bord supérieur de la ligne isoélectrique. L'amplitude d'une onde négative est la distance séparant le nadir de l'onde du bord inférieur de la ligne isoélectrique.

Cette amplitude peut être exprimée en millimètres, ou en termes de voltage qu'elle est destinée à mesurer. Étalement normal : 1 mm = 0.1 mV.

- Onde P : Dans le plan frontal < 2.5 mm en D2, Dans le plan horizontal < 2 mm en V1.V2

• QRS:

Dans le plan frontal :

- R en D1 \leq 15 mm
- R en D2 \leq 23 mm
- R en aVL \leq 12 mm
- R en D3 \leq 18 mm
- R en aVF \leq 21 mm

Dans le plan horizontal :

- R en V1 \leq 5 mm
- S en V1 \leq 20mm
- S en V2 \leq 25 mm
- R en V6 \leq 25 mm

Le rapport R/S doit rester :

- < 1 en V1
- > 1 en V5
- > 2 en V6

Onde Q: < 3 mm en précordiales gauches, < 25 % de l'onde R qui la suit, quelle que soit la dérivation

- Onde T: < 5 mm en V6

3.3.2 Morphologie :

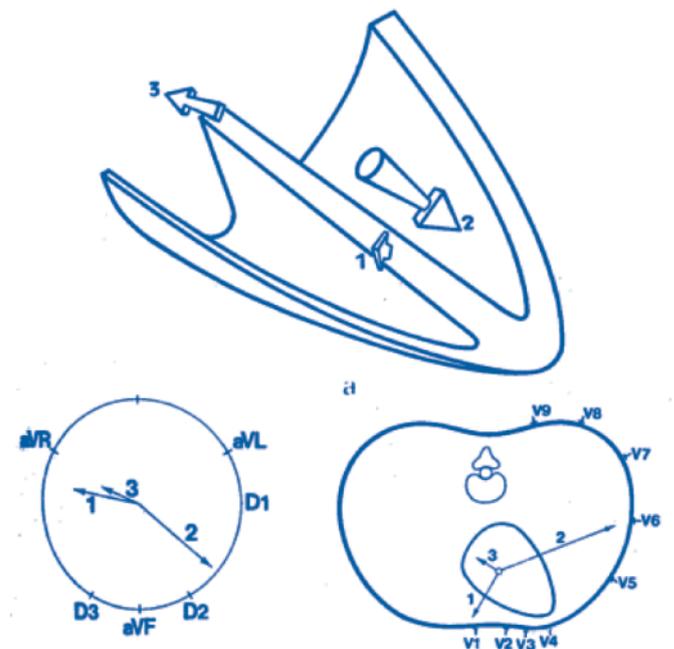
- Onde P : elle est normalement positive en D1. D2 et négative en aVR..

• QRS : correspond à la dépolarisation ventriculaire et représente donc schématiquement les différents temps de l'activation ventriculaire. Dans son aspect classique, le QRS correspond à 3 vecteurs successifs qui représentent :

- l'activation de la région moyenne du septum toujours de gauche à droite (**vecteur initial : *q*** orienté de gauche à droite, vers l'avant et un peu en haut)
- l'activation de l'ensemble de la portion restante du septum et des ventricules à l'exception de la région basale (**vecteur principal : *R*** dirigé en bas, à gauche et en arrière). Cette orientation du vecteur principal est due à l'importance du ventricule gauche dont la masse est double de celle du ventricule droit. Ce sont donc les vecteurs d'activation du VG qui vont prédominer sur ceux du VD, et être responsables de l'orientation du vecteur global d'activation ventriculaire, lequel adopte donc la direction anatomique du VG, situé en bas, à gauche et en arrière.
- Enfin l'activation des régions basales des ventricules et du septum ainsi que le toit de l'infundibulum pulmonaire (**vecteur terminal : *s*** orienté un peu à droite, en haut et en arrière).

Selon la position électrique du cœur, l'aspect morphologique de QRS peut varier en fonction de la variation de l'orientation et ainsi la projection de ces différents vecteurs dans le plan frontal et horizontal.

En position intermédiaire : position prise comme référence pour la description de l'ECG normal :



Orientation des principaux vecteurs d'activation :

À gauche : leur projection dans le plan frontal

À droite : leur projection dans le plan horizontal

- Le 1er vecteur d'activation septale détermine une onde **q** en D1. D2. D3 et dans les précordiales gauches V5. V6; et détermine une onde **r** dans les précordiales droites V1. V2. V3.
 - Le 2e vecteur d'activation de la grande partie des ventricules détermine une onde **R** en D1. D2. D3. aVF, un aspect \pm diphasique en aVL et D3, une onde **R** en V5. V6. et une onde **S** en V1. V2. V3.
 - Le 3e et dernier vecteur d'activation de la partie basale des ventricules détermine une onde **s** en D1. D2. D3. aVL et aVF, une onde r en aVR et une onde **s** en V5. V6.
- Segment ST : habituellement isoélectrique.
 - Onde T : en règle positive et asymétrique avec une pente ascendante lente, un sommet \pm arrondi et une pente descendante rapide. Elle est normalement positive en D1. D2. D3. aVF et de V2 à V6. (elle peut être cependant négative en D3, aVF et V1 sans signification pathologique). Elle peut être aussi normalement négative de V1 à V4 chez l'enfant, l'obèse et le sujet de race noire.

4 CALCUL DE L'AXE ÉLECTRIQUE DES PRINCIPALES DÉFLEXIONS :

4.1 QU'EST-CE QUE L'AXE ÉLECTRIQUE ?

- l'axe électrique est la résultante des différents vecteurs électriques correspondant à l'excitation de chaque fibre.
- il s'exprime par la mesure en degré de l'angle que fait ce vecteur avec l'axe horizontal. L'axe électrique est normalement compris normalement entre 0° et 90°.

4.2 MESURE DE L'AXE ÉLECTRIQUE :

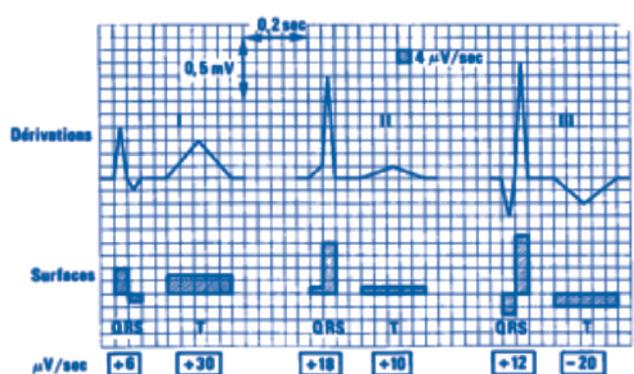
La projection du vecteur représentant l'axe électrique moyen sur les côtés et les médianes du triangle d'Einthoven (ou sur les droites du double triaxe de Bailey) est proportionnelle à la surface de l'accident QRS enregistré en dérivations standard ou unipolaires des membres.

La détermination précise de la direction et de l'amplitude du vecteur moyen nécessite la mesure préalable de la surface de l'onde considérée (QRS) dans plusieurs dérivations et c'est donc un processus long et délicat.

Pour l'analyse pratique en électrocardiographie clinique usuelle, l'appréciation de la direction du vecteur est suffisante et il est licite d'utiliser des procédés simplifiés.

La construction exacte du vecteur moyen se fait comme il est indiqué sur l'exemple suivant :

On mesure la surface de l'accident considéré (QRS) égale



Exemple de détermination des vecteurs moyens de QRS et de T

à la somme algébrique des surfaces positives situées au-dessus de la ligne isoélectrique et des surfaces négatives situées au-dessous de la ligne isoélectrique. Cette mesure doit être effectuée dans au moins deux dérivations standards, ou mieux dans les trois.

Les chiffres de surface sont portés pour chaque dérivation sur le côté correspondant du triangle d'Einthoven ou sur la droite correspondante du triaxe de Bailey, pourvus d'une échelle convenable ayant son origine au milieu du côté du triangle ou au centre du triaxe. Les surfaces positives sont portées en direction de l'extrémité positive de la ligne de dérivation, les surfaces négatives en direction de son extrémité négative.

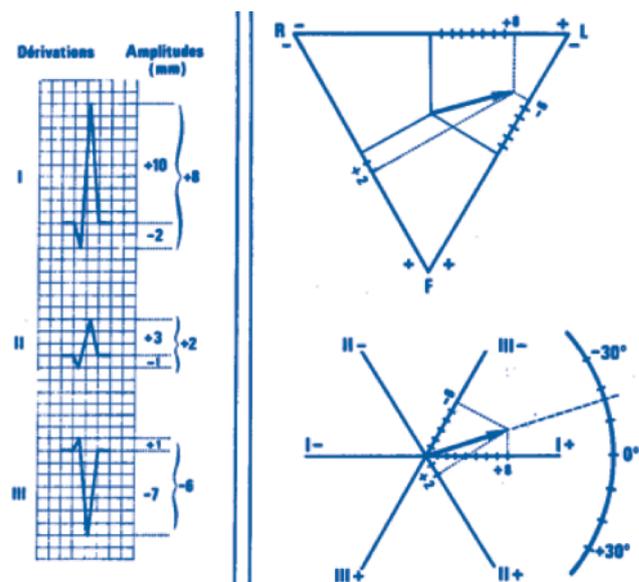
Des perpendiculaires aux lignes de dérivations abaissées des points ainsi déterminés se rencontrent en un point qui est l'extrémité du vecteur moyen. Il n'y a plus qu'à joindre celle-ci au centre du triangle ou du triaxe.

Le vecteur ou axe moyen ainsi construit est caractérisé par son amplitude (**microvolts/s ou unités Ashman**) et sa direction exprimée par (l'angle qu'il fait avec l'horizontale).

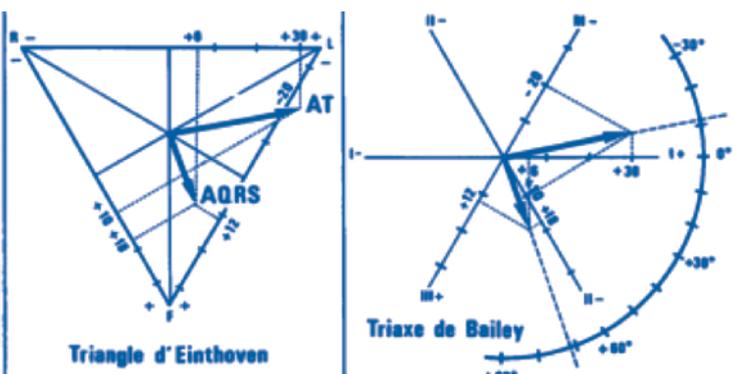
La méthode simplifiée :

Elle consiste à substituer à la surface des ondes leur amplitude, aisément mesurée sur le papier à coordonnées millimétriques.

Cet exemple montre la détermination de la direction de



Exemple de détermination simplifiée du vecteur moyen de QRS dans le plan frontal



ÂQRS, soit à l'aide du triangle d'Einthoven, soit à l'aide du triaxe de Bailey, par le même procédé décrit dans la figure précédente, mais à partir des sommes algébriques des amplitudes de QRS aisément mesurées dans les trois dérivations standards.

Détermination mentale :

Les méthodes précédentes exigent une construction graphique sur papier, qui fournit une direction angulaire précise des axes électriques. Avec une certaine habitude, on arrive à une détermination mentale de cette direction à la simple vue des dérivations. Il est commode d'utiliser dans ce but les six dérivations du plan frontal (standards et unipolaires des membres).

On part des principes suivants :

- Lorsque les déflexions enregistrées dans une dérivation ont une somme algébrique nulle, l'axe électrique moyen est perpendiculaire à la ligne de la dérivation.
- Lorsque les déflexions enregistrées dans une dérivation ont une amplitude plus grande que dans toutes les autres (positive ou négative), l'axe électrique moyen a une direction proche de celle de la ligne de dérivation.

On arrive ainsi très vite à situer grossièrement l'axe électrique moyen dans un des secteurs de 30° délimités par deux lignes de dérivations consécutives sur le double triaxe de Bailey.

PHENOMENES MECANQUES DE LA REVOLUTION CARDIAQUE

1 COUPLAGE EXCITATION CONTRACTION :

(Figure5)

La contraction des cellules du myocarde est provoquée, comme pour toute cellule musculaire, par une onde d'excitation. Lorsque les cellules sont nombreuses, comme c'est le cas pour le cœur, l'onde d'excitation se transmet tel un 'bâton de relais' d'une cellule à l'autre. Donc le déclenchement de la contraction cardiaque est

lié au développement du potentiel d'action qui permet, une pénétration de calcium à l'intérieur des cellules. Cet ion joue un rôle fondamental dans la mise en tension des myofibrilles, en empêchant une protéine, la troponine (associée à la tropomyosine), d'inhiber la formation des ponts entre l'actine et la myosine.

Le couplage entre les phénomènes électriques et mécaniques est assuré par les variations de concentration intracellulaire de calcium ionisé. L'entrée de Ca^{++} dans le sarcoplasme contemporaine au plateau de dépolarisation, induit l'ouverture des canaux Ca^{++} en particulier au niveau des tubules. La fixation du Ca^{++} sur la troponine lève l'inhibition de la réaction actine-myosine et permet la formation de ponts permettant aux fibrilles de se raccourcir.

Lors de la repolarisation (suivi de relâchement), le Ca^{++} est évacué vers l'extérieur par un système d'échangeur $3 Na^+/1 Ca^{++}$, et sa recapture par le réticulum sarcoplasmique grâce à la pompe primaire $Ca^{++} - ATPase$.

2 LE CYCLE CARDIAQUE :

L'activité cardiaque est cyclique. La séquence de tous les événements qui se succèdent pour constituer une révolution-cardiaque ne dure environ qu'une seconde. Elle se répétera durant toute la vie, assurant la progression incessante de la colonne sanguine et le maintien de la pression intravasculaire. Au cours d'un cycle donné, chaque partie du myocarde passe par une phase de contraction ou systole, suivie d'une phase de relâchement ou diastole.

Ces phases de contraction et de relâchement se déroulent dans un ordre bien précis.

- Elles sont contemporaines dans le sens transversal, les cavités homologues droite et gauche se contractent et se relâchent de façon synchrone.
- Elles sont successives dans le sens longitudinal : la contraction auriculaire précède la contraction ventriculaire.
- La contraction des ventricules est séparée de celle des oreillettes par une période de relâchement général.
- Elles se répètent indéfiniment dans un ordre invariable. La durée de la systole auriculaire représente le cinquième de la durée du cycle, celle de la systole ventriculaire les 2 cinquièmes suivants et celle de relâchement général, les deux cinquièmes restants.
- Cette répétition se fait avec une certaine fréquence qui est la même que celle observée pour d'autres phénomènes liés à l'activité cardiaque : le pouls artériel, le pouls jugulaire, les bruits du cœur.

2.1 FRÉQUENCE CARDIAQUE (FC)

Chez l'homme, au repos, la F.C est de 60 à 80 coups par minutes chez les sédentaires, plus basse chez les sportifs entraînés. La durée d'un cycle est en relation inverse avec la F.C.

2.2 MODIFICATIONS DU CŒUR PENDANT SA RÉVOLUTION

Certains phénomènes apparaissent au niveau du cœur lors des différentes phases de sa révolution.

- la consistance change : molle pendant la diastole, chaque cavité se durcit au cours de sa systole.

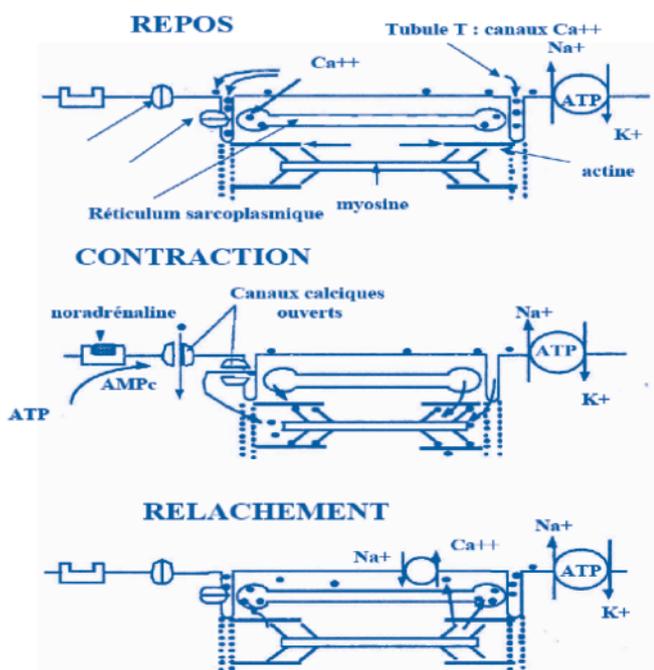


Figure 5 : Couplage excitation-contraction

- On observe aussi des changements de volume : chaque cavité se rétrécit au cours de sa systole et se dilate au cours de la diastole.
- Lors, de leur contraction, les ventricules deviennent globuleux, leur base elliptique au repos, s'arrondit, et se rapproche de sa pointe ce qui diminue leur diamètre longitudinal.
- La pointe du cœur se déplace peu, mais sa dureté systolique est perceptible à travers la paroi du thorax, qu'elle peut éventuellement soulever. C'est le durcissement systolique de la paroi antérieure du VG qui provoque le choc 'apexien' que l'on perçoit chez l'homme au niveau du cinquième espace intercostal sur la ligne mammaire.

3 HÉMODYNAMIQUE INTRACARDIAQUE :

La contraction des différentes cavités détermine à leur niveau une augmentation de la pression qui assure la circulation du sang depuis les oreillettes jusqu'aux ventricules et des ventricules vers le système artériel.

L'évolution des pressions intracavitaires au cours de la révolution cardiaque fut décrite pour la première fois en 1861 par Chaveau et Marey qui travaillaient chez le cheval, en introduisant dans le cœur de cet animal une sonde dont l'extrémité était déformable sous l'action de la pression, l'autre extrémité de la sonde était reliée à un tambour inscripteur de Marey permettant d'inscrire le cardiogramme manométrique.

3.1 TECHNIQUE CHEZ L'HOMME

Le cathétérisme se pratique avec des sondes souples opaques aux rayons X dont la progression est suivie sur écran radioscopique.

Les cavités droites sont explorées à l'aide de sondes qui, après avoir été introduites dans une veine fémorale (rarement au pli du coude), sont poussées dans les troncs veineux en direction du cœur. Il est possible de faire passer l'extrémité de la sonde du ventricule droit à l'artère pulmonaire. Ceci nécessite un peu d'habileté technique, parce qu'il est nécessaire de contourner la valve tricuspide.

En passant par l'artère fémorale et en remontant le courant sanguin, le ventricule gauche est atteint, mais il est ensuite impossible de remonter dans l'oreillette gauche. Cette cavité peut être atteinte en faisant passer la sonde à travers le septum inter auriculaire à partir d'un cathétérisme droit. Une fois la sonde introduite dans l'oreillette gauche il est possible de la pousser dans le ventricule gauche et même dans l'aorte.

En reliant la sonde à un manomètre correctement amorti, on peut mesurer les pressions intracavitaires ou intra-artérielles. Il est également possible de prélever des échantillons sanguins.

3.2 RÉSULTATS

Les tracés obtenus en enregistrant les pressions au niveau des cavités droites et gauches sont schématisés sur la figure 6 leur description est réalisée chez un sujet dont la fréquence cardiaque est de 75 coups /min ce qui équivaut à une période de 0,8 sec. Par convention, nous admettons que la révolution cardiaque commence avec la systole auriculaire.

3.2.1 Au niveau des oreillettes :

Lorsque commence la révolution cardiaque, la pression est particulièrement nulle au niveau des deux oreillettes. La systole auriculaire détermine une élévation de la pression (**onde a** du tracé), d'environ 5 mmHg à droite et 8 mmHg à gauche. Cette élévation transitoire de la pression chasse vers les ventricules le sang qui se retrouvait dans les oreillettes.

La diastole auriculaire commence alors ; elle va se poursuivre jusqu'à la fin de la révolution ; les accidents (**c, x, v, y**) du tracé qui apparaissent sont la conséquence de l'activité ventriculaire.

3.2.2 Au niveau des ventricules :

a. La systole ventriculaire débute au moment de la fermeture des valvules auriculo-ventriculaires ; elle dure 0,30 sec. On y distingue deux phases :

- *la phase isométrique* (isovolumétrique) : pendant 0,05 sec. la pression qui règne dans chacun des deux ventricules reste inférieure à celle qui règne dans l'artère correspondante ; les valvules sigmoïdes restent donc closes. La tension augmente au niveau des parois ventriculaires sans que le volume des cavités diminue ; la pression ventriculaire augmente donc très rapidement.
- *la phase isotonique ou phase d'éjection* : dès que la pression ventriculaire atteint une valeur au moins égale à celle qui règne à ce moment dans l'artère correspondante (80 mmHg dans l'aorte et 9 mmHg dans l'artère pulmonaire), les valvules sigmoïdes s'ouvrent et le sang est éjecté. Cette éjection comporte deux phases :
 - Phase d'éjection rapide, qui dure 0,10sec et pendant laquelle 80 % du volume systolique est éjecté. C'est à la fin de cette phase que la pression ventriculaire atteint son maximum : 120 mmHg dans le ventricule gauche et 25 mmHg dans le ventricule droit.
 - Phase d'éjection lente, qui dure 0,15 sec au cours de laquelle la pression ventriculaire s'abaisse progressivement.

Chez un sujet normal, on considère que 80 ml de sang ont été éjectés par chaque ventricule : **volume d'éjection systolique (VES)**, alors qu'il contenait 150 ml à la fin de la diastole : **volume télédiastolique (VTD)** ; à la fin de l'éjection, il reste donc à peu près 70 ml de sang dans les ventricules, on donne à ce volume le nom de **volume téléstolique (VTS)**.

b. La diastole ventriculaire dure 0,50sec. Son début coïncide avec la fermeture des valvules sigmoïdes. On y distingue plusieurs phases :

- Le relâchement isovolumétrique, dure 0,05sec. Pendant cette phase, les ventricules, qui ne contiennent plus que le volume tétésystolique, se relâchent alors que les valvules sigmoïdes et auriculo-ventriculaires sont fermées ; la pression s'abaisse extrêmement rapidement à leur niveau.
- La phase de remplissage commence avec l'ouverture des valvules auriculo-ventriculaires ; celle-ci se produit lorsque la pression ventriculaire s'est abaissée au niveau de celle qui règne dans les oreillettes.

Ce remplissage est d'abord rapide : en 0,10 sec. 70 % du remplissage ventriculaire est effectué. Puis ce remplissage se poursuit de plus en plus lentement pendant 0,25 à 0,3 sec.

La systole auriculaire, qui survient 0,30 à 0,35 sec après l'ouverture des valvules auriculo-ventriculaires apporte aux ventricules dans les conditions de repos, environ 10 % du volume systolique. Elle complète le remplissage ventriculaire.

L'augmentation de la fréquence cardiaque s'accompagne d'un raccourcissement de la phase de remplissage diastolique ; ceci augmente l'importance relative de la systole auriculaire qui lorsque la fréquence cardiaque atteint sa valeur maximale, peut assurer 35 à 40 % du remplissage ventriculaire qui dans ces conditions reste normal.

Valeurs des pressions intracavitaires mesurées chez l'homme en position couchée.

		Pression systolique (mmHg)	Pression diastolique (mmHg)	Pression moyenne (mmHg)
Cavités gauches	OG	10 à 12	0 à 5	8
	VG	110 à 140	Proto Télé 0 8	-
	Aorte	120	60	90
Cavités droites	OD	2 à 5	-3 à 0	4
	VD	25 à 30	0 5	-
	A.pulm	25	10	15

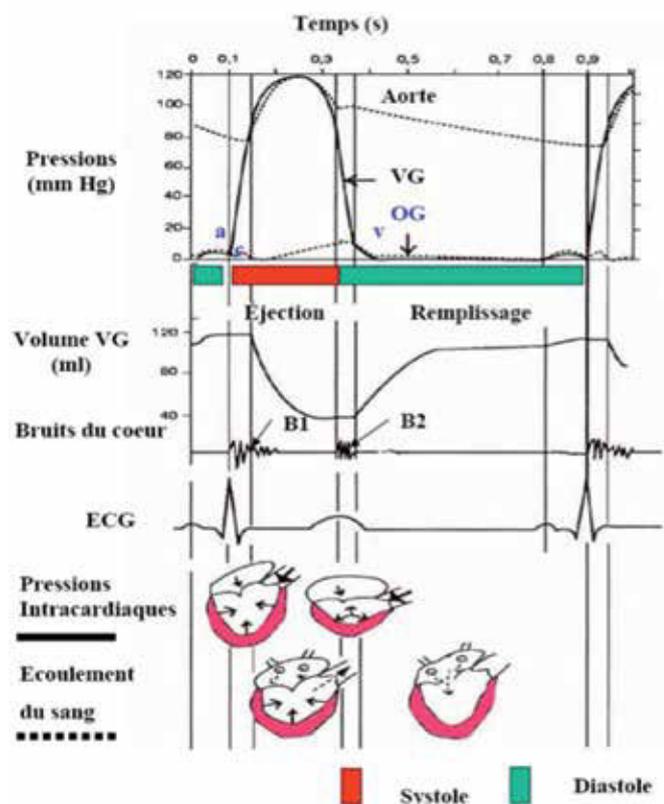


Figure 6 : différentes phases hémodynamiques de la révolution cardiaque

4 LES BRUITS DE CŒUR, LA PHONOCARDIOGRAPHIE :

Certaines phases de l'activité cardiaque déterminent l'apparition de vibrations. Parmi celles-ci certaines (5 %)

ont une fréquence suffisamment élevée pour être audibles. Les autres vibrations sont trop faibles ou de fréquence trop basse.

Depuis très longtemps l'étude de ces vibrations est utilisée en clinique : elles sont captées soit à l'oreille nue soit à l'aide d'un stéthoscope. Dans quelques cas on les enregistre dans un tracé optique après les avoir captées soit dans les cavités cardiaques (grâce à une sonde) soit à la surface du thorax. Cette technique qui permet l'enregistrement de vibrations non audibles peut apporter des renseignements plus nombreux et plus précis que ne le fait la simple auscultation.

4.1 BRUITS NORMAUX :

Lorsqu'on applique l'oreille sur le thorax d'un individu normal, on entend deux bruits successifs qui apparaissent régulièrement, toujours identiques à eux-mêmes.

- **Le premier bruit** est sourd, grave et prolongé. Il est contemporain du complexe QRS rapide de l'électrocardiogramme. Son analyse phonocardiographique permet d'y distinguer quatre composantes parmi lesquelles seules la seconde et la troisième sont audibles. Ce bruit est **contemporain de la fermeture** des valvules auriculo-ventriculaires, de la contraction des ventricules et de l'ouverture des valvules sigmoïdes. Il semble que les deux composantes audibles de ce bruit soient liées à la mobilisation des valvules A-V. À l'appui de cette interprétation existe un certain nombre d'arguments ; ainsi tout retard dans la fermeture des valvules auriculo-ventriculaires détermine un retard dans l'apparition du premier bruit. Sur les enregistrements phonocardiographiques, il est possible de discerner deux composantes M1 et T1 contemporaines de la fermeture des valves mitrale et tricuspide séparées d'un intervalle de 0,03sec.

- **Le deuxième bruit** succède au premier après un intervalle appelé petit silence. Il est suivi d'un grand silence à l'issue duquel le premier bruit réapparaît. Ce deuxième bruit est plus sec et plus claquant que le premier.

On lui distingue quatre composantes dont seule la deuxième est toujours audible. Ce deuxième bruit est **contemporain** de la fermeture des **valvules sigmoïdes**. Le bruit B2 est dédoublé au cours de l'inspiration en deux composantes : une aortique et une pulmonaire. Le phonocardiogramme permet de déceler deux autres phénomènes vibratoires.

- **Un troisième bruit**, d'ailleurs parfois audible à la fin du remplissage ventriculaire rapide. Il est rapporté à la tension soudaine des cordages et des anneaux auriculo-ventriculaires lorsque le ventricule en relaxation tire sur ses structures à la fin de son remplissage rapide.

- **Un quatrième bruit** ou présystolique qui n'est jamais audible normalement, se manifeste sur le tracé par des oscillations peu amples et de basses fréquences. Il est dû à l'arrivée des ondes systoliques auriculaires dans la cavité ventriculaire

4.2 LES ZONES D'AUSCULTATIONS :

Il existe des zones de la région précordiale où le bruit d'une valvule peut être entendu mieux que celui des autres. La figure 7 montre ces points d'intensité où les zones aortiques et pulmonaires se situent tout près des

valvules correspondantes. En effet, les vibrations qui apparaissent au niveau de ces valvules cheminent le long de l'artère correspondante et celle-ci arrive au contact de la paroi thoracique après un trajet très court. C'est la direction des artères, aorte et pulmonaire, qui expliquent que les zones d'auscultations des valvules artérielles se trouvent sur les côtés controlatéraux du thorax.

Les bruits qui prennent naissance dans les valvules auriculo-ventriculaires mitrale et tricuspide sont conduits le long des ventricules jusqu'au point où ceux-ci sont en contact étroit avec la paroi thoracique : ces points ne correspondent pas aux régions de la surface précordiale les plus proches des valvules.

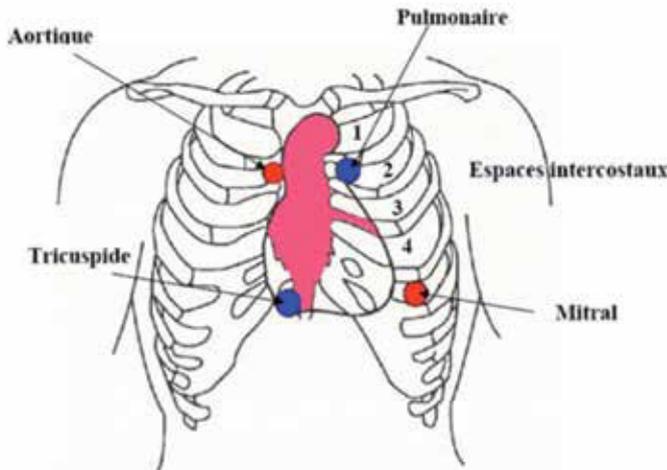


Figure 7 : Les foyers d'auscultation

5 LE TRAVAIL CARDIAQUE

La propulsion du sang dans les vaisseaux résulte du travail utile par le cœur ; ce travail apparaît sous deux formes :

- le travail cinétique : accélération des particules du sang à la sortie des ventricules
- le travail de pression : apport d'énergie de pression au sang qui est éjecté des ventricules ; il s'agit d'une énergie potentielle qui est emmagasinée sous forme d'énergie mécanique par les parois des artères aorte et pulmonaire, lorsqu'elles se distendent et qui est restituée au sang sous forme d'énergie cinétique.

Dans les conditions de repos, on considère le travail cinétique comme négligeable et on tient compte uniquement du travail de pression.

Les variations de la pression et du volume ventriculaire peuvent être utilisées pour le calcul du travail mécanique (w) (Figure 8a). w est défini par le produit d'une force (F) par le déplacement de son point d'application (l). Dans le cas de la paroi du ventricule, la force de contraction se traduit par une pression ($P = F/S$) où S est la surface d'application de la force) et un déplacement de volume de sang égal au volume d'éjection systolique ($V = l \times S$). Au total :

$$W = F \times l = (P \times S) \times (V/S) = P \times V$$

L'intégration des variations de pression (dP) en fonction des modifications de volume (dV) aboutit à l'aire (S) comprise dans la boucle pression-volume elle-même égale au travail mécanique fourni par le ventricule.

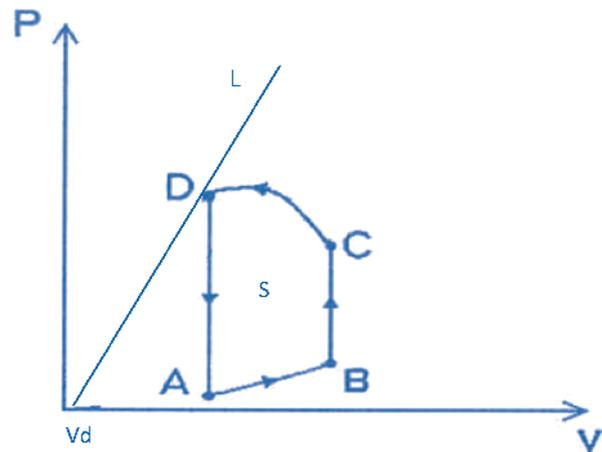


Figure 8a : Diagramme pression-volume

La droite L représente la fonction ventriculaire (voir plus loin : loi du cœur)

LE DÉBIT CARDIAQUE

Le débit cardiaque (D_c) est le volume de sang expulsé par chaque ventricule par unité de temps. Il est généralement exprimé en litres par minute. Le terme de débit cardiaque utilisé sans autre précision signifie donc aussi bien le débit ventriculaire droit que le débit ventriculaire gauche. En régime stationnaire, les débits des deux ventricules sont sensiblement égaux ; par ailleurs les valeurs du débit ventriculaire et du retour veineux sont égales.

1 MESURE DU DÉBIT CARDIAQUE

Ce débit est égal au produit du volume de sang mobilisé lors de chaque systole ventriculaire par la fréquence cardiaque.

$$D_c \text{ (ml.min}^{-1}\text{)} = \text{VES (ml)} \times f_c \text{ (coups/min)}$$

Toutes les méthodes utilisées sont des méthodes indirectes qui ne permettent qu'une approximation du débit, mais qui rendent compte assez fidèlement des changements de celui-ci. Toutes les méthodes habituellement utilisées font appel à un indicateur circulant.

1.1 METHODE DE FICK:

L'indicateur est constitué par un gaz normalement présent dans le sang.

-Principe de FICK : en raison des échanges gazeux qui se déroulent au niveau des poumons, il apparaît que la quantité d'oxygène transportée par le sang provenant des capillaires pulmonaires est égale à la somme de l'oxygène véhiculé par le sang veineux mêlé de l'artère pulmonaire et de la quantité d'oxygène prélevée dans les alvéoles.

En 1870, FICK a proposé de tirer parti de ces éléments pour mesurer le débit cardiaque : si on admet que le débit capillaire pulmonaire est égal au débit de chacun des ventricules, c'est-à-dire au débit cardiaque, si on admet aussi que la teneur en oxygène du sang artériel périphé-

rique est la même que celle du sang veineux pulmonaire il est possible d'écrire :

$$Dc = VO_2 / CaO_2 - Cv O_2$$

CaO₂ (ml %) = teneur en O₂ du sang artériel

CvO₂ (ml %) = teneur en O₂ du sang veineux mêlé

VO₂ (ml.min⁻¹) = consommation d'oxygène.

1.2 MÉTHODE DE STEWART- HAMILTON

Le principe est simple : si on injecte une quantité P d'une substance non toxique en amont du cœur droit et qu'on recueille le sang au niveau de l'artère pulmonaire ou d'une artère périphérique (où le mélange est encore plus homogène) à raison d'un échantillon par seconde ou par fraction de seconde, on voit après un délai de 5 à 6 sec qui est le temps de circulation, la concentration du colorant s'élève puis s'abaisse.

On a alors la relation : $P/p = V/v$ (1) d'où $P/V = p/v$ (1')

p : quantité de colorant recueilli dans les échantillons

v : volume de sang dans lequel a été recueillie cette quantité.

V : la quantité de sang débitée par le cœur pendant le temps de recueil (t sec)

C : la concentration moyenne du colorant

Donc : $Dc = V \times 60/t$ (2)

Par ailleurs, d'après (1'), $V = P/C$

$$Dc = V/t = P/C \times t$$
 (3)

1.3 THERMO DILUTION

Cette méthode est actuellement utilisée couramment. Du sérum dont la température est inférieure à 37 °C est injecté dans l'oreillette droite par l'ouverture latérale d'un cathéter introduit dans une veine périphérique. L'extrémité du cathéter, muni d'une thermistance, est poussée jusqu'à l'artère pulmonaire. Lors de l'injection du sérum, l'embolie froide atteint la thermistance au niveau de laquelle la variation de température est enregistrée en continu. Le refroidissement puis le réchauffement progressif décrit une évolution équivalente (au signe près) à celle obtenue avec un colorant. L'équation permettant le calcul du débit repose sur la conservation de chaleur et non plus sur la conservation de masse. Cette méthode offre l'avantage d'une voie d'abord facilitée, et la possibilité de reproduire la mesure un grand nombre de fois du fait du caractère négligeable de la recirculation (réchauffement total rapide) et de l'innocuité du sérum utilisé.

1.4 ECHOGRAPHIE-DOPPLER

La connaissance de la surface de section (S) d'un conduit et de la vitesse (V) du fluide dans ce conduit permet le calcul du débit de fluide ($Q = S \times V$).

Au niveau de la portion ascendante de l'aorte, un capteur à effet Doppler est installé au niveau sus sternal et la surface de l'orifice aortique est mesurée par échographie. La fiabilité de cette méthode varie d'un sujet à l'autre, en particulier en raison des difficultés parfois rencontrées dans la mesure échographique au niveau de l'anneau aortique.

2 VARIATIONS PHYSIOLOGIQUES DU DÉBIT CARDIAQUE

Pour rendre comparable des mesures effectuées chez des sujets différents, il est courant d'utiliser l'index cardiaque c'est-à-dire le débit cardiaque par m² de surface corporelle qui est égal à :

$$IC = 6 \text{ (l/min)} / 1,73 \text{ (m}^2\text{)} = 3,2 \text{ l/min/m}^2$$

2.1 AGE ET SEXE

L'index cardiaque diminue régulièrement avec l'âge de 0.25 l mn/m² par décennie,

À âge égal l'index cardiaque est supérieur chez l'homme.

2.2 GROSSESSE

L'index cardiaque augmente dès la 12e semaine. Il est de 30 à 40 % supérieur à la normal vers la 25 à la 30e semaine.

2.3 POSITION

L'IC est plus bas en position assise ou debout qu'en décubitus. Lors du passage de la position couchée à la position debout, la consommation d'O₂ augmente d'environ de 30 % alors que paradoxalement IC diminue d'environ 15 %. Cette diminution est expliquée par la baisse du retour veineux.

2.4 L'EFFORT

Au cours de l'exercice physique, le débit cardiaque augmente de façon linéaire avec la prise d'O₂. L'augmentation du débit cardiaque va de pair avec celle de la fréquence cardiaque (voir adaptation à l'effort).

2.5 LA TEMPÉRATURE

Le froid ralentit le cœur et augmente le volume systolique moyen sans changer notablement le débit : celui-ci n'augmente que lorsque le sujet frissonne.

Par contre l'exposition au chaud est susceptible d'accroître le débit cardiaque de façon importante; la consommation d'oxygène ne varie pas sensiblement, mais la différence artérioveineuse se réduit, témoin de l'ouverture des courts circuits artérioveineux cutanés. L'exposition à la chaleur permet d'obtenir des chiffres de débits cardiaques très élevés (jusqu'à 4 fois la valeur basale) qui cependant n'atteignent pas ceux estimés au cours de l'exercice musculaire. Sans doute parce que si le sujet reste immobile. Le retour veineux ne se fait pas dans d'aussi bonnes conditions.

2.6 L'ÉMOTION

Le stress et l'émotion, par effet du système sympathique, augmentent l'IC.

3 RÉGULATION DU DÉBIT CARDIAQUE :

Le cœur n'éjecte au repos que 5 à 6 litres de sang par minute alors qu'au cours d'un exercice physique important, le cœur peut éjecter 4 à 5 fois ce volume. Les moyens dont dispose le cœur pour s'adapter à de telles augmentations du débit cardiaque sont au nombre de deux :

- Une régulation intrinsèque ou Loi du cœur
- Une régulation extrinsèque (nerveuse et humorale)

3.1 RÉGULATION NERVEUSE :

La fréquence cardiaque et la force de contraction sont en permanence modulées par le système nerveux végétatif (SNV). Le SNV du cœur comporte :

- Des fibres parasympathiques vagales (nerf vague droit et gauche qui constitue la X^{ème} paire des nerfs crâniens) qui innervent le nœud sinusal, le nœud auriculo-ventriculaire et les oreillettes.
- Des nerfs sympathiques qui innervent la totalité du muscle cardiaque.

Leur action s'exerce par l'intermédiaire de neurotransmetteur de leurs fibres post ganglionnaire cardiaque à savoir l'acétylcholine (ACh) pour le système parasympathique et la noradrénaline (NAd) pour le système sympathique.

Les récepteurs à l'ACh sont de type muscarinique, la NAd réagit avec des récepteurs β adrénergiques (β_1).

L'ACh déprime les courants I_f et calciques avec pour conséquence une diminution de la pente de dépolarisation diastolique donc diminution de la fréquence cardiaque.

De plus, l'ACh déclenche l'ouverture d'un courant I_K entraînant ainsi une hyperpolarisation membranaire.

La NAd augmente au contraire les courants I_f et calciques, ce qui accélère le rythme cardiaque et augmente la force de contraction cardiaque.

Les catécholamines circulantes NAd et Adrénaline (Ad) sécrétées par la médullosurrénale ont les mêmes effets que le système sympathique.

Conclusion :

Le parasympathique est cardiomodérateur, sa stimulation prolongée entraîne l'arrêt du cœur en diastole, mais on assiste après à un phénomène d'échappement.

Le sympathique est cardioaccélérateur, il provoque non seulement des effets chronotrope et inotrope positifs, mais aussi une augmentation du tonus cardiaque et vasculaire (effet tonotrope positif), de la vitesse de relaxation du muscle cardiaque (effet lusitrope positif), de la vitesse de conduction de la dépolarisation (effet dromotrope positif) et de l'excitabilité myocardique (effet bathmotrope positif).

3.2 RÉGULATION HUMORALE :

Certains paramètres humoraux influencent la fréquence cardiaque et le volume d'éjection systolique tels :

- L'acidose diminue la fréquence cardiaque et la force de contraction
- L'augmentation de la température augmente la fréquence cardiaque et déprime la force de contraction
- Le sodium et le potassium provoquent un arrêt cardiaque en diastole quand ils sont en excès (ils sont diastolisants).
- Le calcium, en excès, provoque un arrêt cardiaque en systole (il est systolisant).

3.3 RÉGULATION INTRINSÈQUE

Le cœur est capable d'engendrer sa propre contraction sans le recours d'aucun facteur nerveux ou humoral, mais il peut aussi adapter la force de sa contraction à la charge qui lui est imposée grâce à des mécanismes qui lui sont propres, c'est-à-dire intrinsèques. Le mécanisme de régulation intrinsèque qui a suscité le plus de travaux est celui qui fait intervenir la variation de longueur initiale (ou de repos) de la fibre myocardique et qui est connu sous le nom de mécanisme de Frank Starling ou loi du cœur.

Autorégulation hétérométrique = Mécanisme de Starling

On appelle régulation hétérométrique des mécanismes d'adaptation intrinsèque qui font intervenir une variation de la longueur de repos de la fibre myocardique.

Des travaux de Fick sur le muscle squelettique s'est dégagée la relation fondamentale : la longueur du muscle avant la contraction détermine la force de la réponse contractile : $F = k \Delta l$

Frank, puis Starling ont étendu cette notion au cœur, mais l'anatomie complexe de cet organe ne facilite pas la transposition. Starling ne pouvant mesurer la longueur de la fibre myocardique, mesurait le volume ventriculaire à la télédiastole et utilisant comme index de la force contractile, le volume d'éjection systolique, ou de la pression systolique.

Ainsi la force contractile libérée à la systole est fonction directe du degré d'étirement de sa fibre myocardique à la diastole jusqu'à un point critique qui correspond à une longueur fixe du sarcomère du muscle cardiaque.

3.3.1 Expériences : préparation cœur-poumons

Les variations de la longueur initiale étaient provoquées soit par une :

- augmentation du retour veineux :

En réponse à une augmentation du retour veineux, le ventricule se dilate et éjecte un volume de sang plus grand jusqu'à obtention d'un nouvel état d'équilibre et rétrocede lorsqu'on revient aux conditions antérieures.

- augmentation de la résistance à l'éjection (addition d'une résistance)

De même face à une augmentation soudaine de la résistance à l'éjection, le ventricule est d'abord incapable d'éjecter un volume normal de sang, mais le retour veineux étant constant, le volume résiduel s'accroît, le volume télédiastolique augmente à son tour et le ventricule devient alors capable d'éjecter contre une résistance plus forte un volume de sang normal.

Conclusion :

Starling déduit qu'il existe une relation entre la force contractile libérée à la systole et le degré d'étirement des fibres myocardiques. La tension développée à la systole est fonction directe du degré d'étirement des fibres myocardiques jusqu'à un point critique qui correspond à une longueur du sarcomère du muscle cardiaque de 2,2 microns (il est bien établi que la longueur du sarcomère est proportionnelle à la longueur du muscle). Au-delà de ce point, toute élongation supplémentaire correspond à une diminution de la force contractile.

3.3.2 Application de la loi du cœur à l'homme (figure 8 b)

Le mécanisme de Starling est représenté graphiquement avec en abscisse un index de longueur (volume ou pression télédiastolique) et en ordonnée un index de fonction ventriculaire (débit cardiaque, volume systolique, travail systolique).

Sarnoff a montré que le mécanisme de Starling ne doit pas être représenté par une seule courbe, mais par une famille de courbes, chacune correspondant à un degré de contractilité. Le déplacement de la courbe de la fonction ventriculaire vers la gauche témoigne d'une augmentation de la contractilité, puisque pour une même longueur

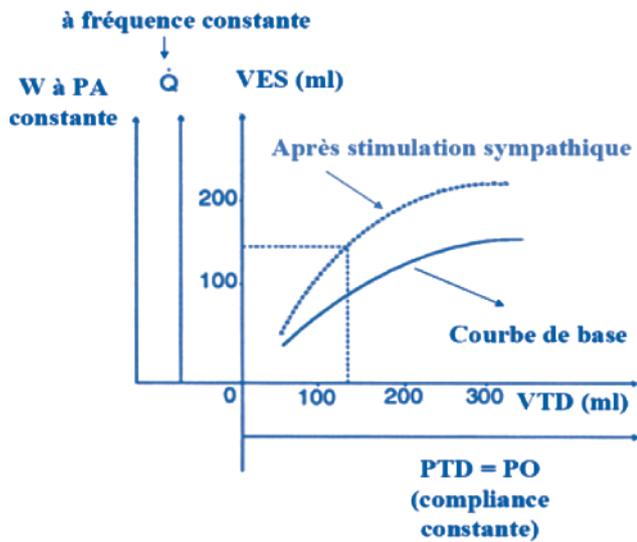


Figure 8 b : Courbes de la fonction ventriculaire : Loi du cœur

télédiastolique (ou pression) le ventricule fournit plus de travail. Inversement, le déplacement de la courbe de fonction vers la droite est l'indice d'une diminution de la contractilité.

3.3.3 Limites d'application de la loi du cœur

Au fait, la loi de Starling ne s'applique pleinement que sur un cœur énérvé. C'est d'ailleurs sur une préparation cœur-poumon que Starling la décrit pour la première fois. En effet physiologiquement, le débit ventriculaire ne dépend pas uniquement du retour veineux. L'activité cardiaque est essentiellement sous le contrôle des systèmes sympathique et parasympathique qui représentent le mode physiologique d'adaptation du débit cardiaque aux besoins tissulaires. C'est seulement lorsque la régulation extrinsèque est débordée que la loi de Starling joue un rôle dans la régulation du débit cardiaque, c'est ce qui se passe au cours de l'insuffisance cardiaque : dans un premier temps le cœur assure un débit cardiaque correct malgré la diminution de la contractilité grâce à l'activation du système sympathique. Lorsque le débit ventriculaire tend à devenir insuffisant, le ventricule se dilate et étant donné la loi de Starling maintient un débit proche de la normale.

3.3.4 Signification physiologique de la Loi du cœur

D'une manière générale, le mécanisme de Starling permet d'expliquer comment le ventricule tend à maintenir identiques ses débits d'entrée et de sortie.

INTRODUCTION

La circulation est destinée à permettre **les échanges** entre les différentes parties de l'organisme à l'aide d'un transporteur. Ce transporteur est le sang, qui circule rapidement dans un circuit fermé. La circulation sanguine est organisée pour permettre les échanges entre le sang et les liquides interstitiels, afin d'assurer en toute circonstance un métabolisme tissulaire normal. Ces échanges ont lieu **dans les réseaux capillaires**. Par ailleurs, la circulation du sang permet la dissémination dans l'organisme de divers types d'informations hormonales et immunitaires.

La paroi de tous les vaisseaux sanguins est constituée des mêmes éléments, mais leur importance relative varie suivant le type de vaisseaux. Une paroi vasculaire comprend trois tuniques concentriques et solidement réunies : l'intima, la média et l'adventice.

- *L'intima* est la tunique la plus interne. Elle est constituée d'un endothélium limitant la lumière vasculaire et reposant sur une couche sous-endothéliale de soutien.
- *La média* est la couche la plus développée dans la plupart des vaisseaux. On y distingue des **fibres musculaires lisses responsables de la vasomotricité**, des fibres élastiques qui permettent des déformations transitoires de la paroi et des fibres collagènes qui, à l'inverse, s'opposent à des augmentations de volume importantes.
- *L'adventice* reçoit les terminaisons nerveuses contrôlant la vasomotricité et les petits vaisseaux qui irriguent la paroi.

Les parois artérielles et veineuses et, à un moindre degré celles des collecteurs lymphatiques, comportent l'ensemble de ces éléments : en revanche, les capillaires sont réduits à la seule couche endothéliale.

Pour la grande circulation, à partir du cœur gauche, on peut individualiser successivement (Figure 9a) :

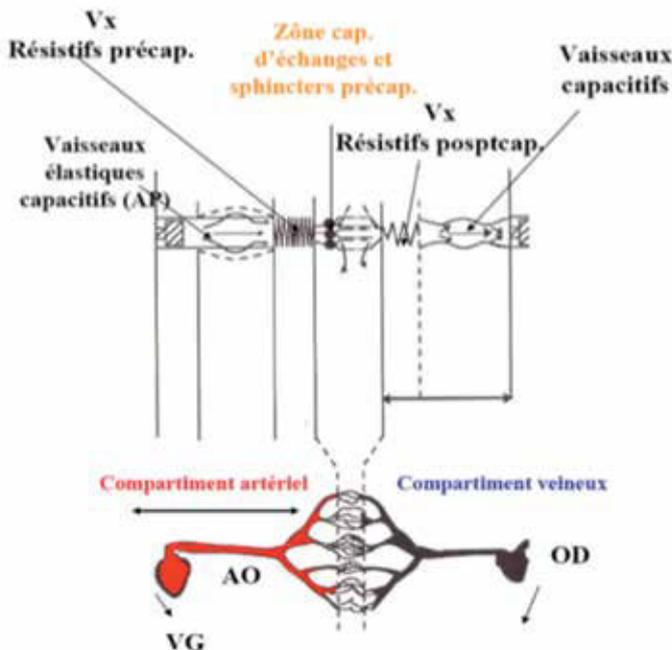


Figure 9a : Différenciation fonctionnelle des vaisseaux sanguins : Grande circulation

- **des vaisseaux élastiques**, réservoir à haute pression correspondant à l'aorte et à ses branches de division. La média contient ici de nombreuses fibres élastiques et de collagène.
- **des vaisseaux résistifs précapillaires**, petites artères et artérioles (vaisseaux de distribution) dans lesquelles **la pression hémodynamique chute brutalement**. La composante musculaire lisse est ici importante.
- **des capillaires**, dans lesquels ont lieu les échanges entre secteur vasculaire et secteur interstitiel. Leur paroi est limitée au seul endothélium et à la membrane basale.
- **des vaisseaux résistifs post-capillaires**, les veinules, à composante musculaire lisse également importante, et dont les modifications de calibre influencent largement l'importance des échanges capillaires.
- **des vaisseaux capacitifs**, les veines systémiques, riches en fibres élastiques, et dont la capacité est importante et variable selon les circonstances hémodynamiques. Elles ont une fonction de réservoir de sang.

Pour la petite circulation (Figure 9b)

On ne distingue que deux secteurs :

- **des vaisseaux capacitifs**, regroupant les vaisseaux artériels et veineux pulmonaires. **Ces deux lits, à basse pression**, participent également à la fonction de **réservoir**.
- **des vaisseaux d'échanges**, les capillaires pulmonaires qui, du fait des conditions hémodynamiques, ne donnent normalement passage qu'aux gaz respiratoires.

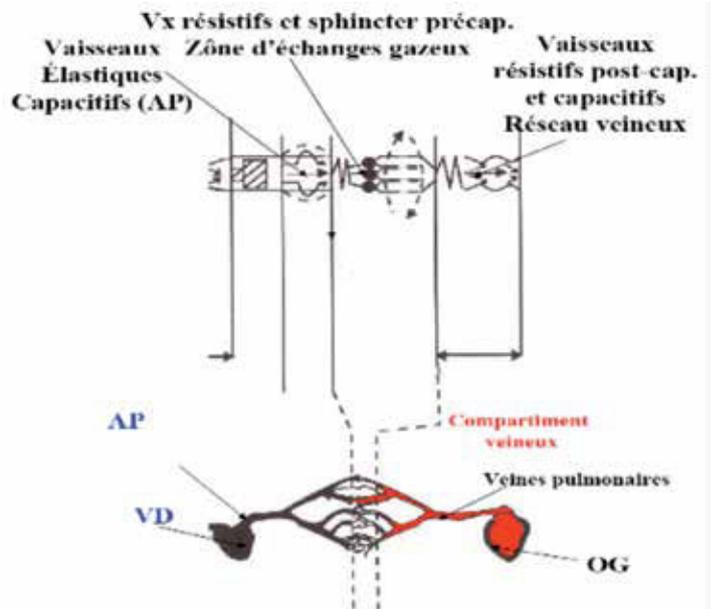


Figure 9b : Différenciation fonctionnelle des vaisseaux sanguins : Petite circulation

D'un point de vue hémodynamique, on sépare un secteur à **haute pression** qui ne contient **que 12 % du volume sanguin total** et qui s'étend du ventricule gauche en systole jusqu'aux artérioles incluses. Un **secteur à basse pression** qui comprend le système veineux, le cœur droit, les vaisseaux pulmonaires, l'oreillette gauche et le ventri-

cule gauche en diastole, et dans lequel on retrouve environ **80 %** du sang circulant. Le reste, **8 %**, correspond au sang contenu dans les capillaires périphériques.

LE SYSTÈME A HAUTE PRESSION

Il est constitué d'un réseau de conduits élastiques (aorte et grosses artères) et d'un réseau de résistances (artérioles terminales) qui répartit le débit entre les différents territoires vasculaires.

1 LES CARACTÉRISTIQUES DU S.H.P :

La circulation dans cette portion du système vasculaire est caractérisée par les faits suivants :

- La pression qui existe au sein de ce compartiment vasculaire est essentiellement d'ordre dynamique (rôle de la pompe cardiaque $P=Dc \times R$).
- Elle varie à cause du fonctionnement discontinu du cœur :
 - Maximale au moment de la systole cardiaque c'est la pression systolique : 120 mmHg
 - Minimale au moment de la diastole cardiaque c'est la pression diastolique : 70 mmHg

La pression moyenne, au cours d'un cycle cardiaque, représente donc la somme

des pressions instantanées, divisée par la période. Elle est d'environ 100 mm Hg au niveau des gros vaisseaux chez le sujet jeune et en bonne santé. La pression moyenne élevée est maintenue à un niveau relativement stable malgré la grande amplitude des changements périodiques de la pression instantanée (systolique et diastolique).

- Les courbes de pression et de débit instantanés sont fortement modifiées de l'aorte aux petites artères.
- La perte de charge est négligeable jusqu'aux artérioles. Il existe une résistance hémodynamique importante à la sortie de ce système (artérioles). L'ensemble de la circulation artérielle joue le rôle d'un conduit à faible résistance, alors que les artérioles constituent un système de distribution constitué de forte résistance en parallèle permettant grâce à leur vasomotricité une distribution préférentielle du débit cardiaque.
- Bien que de capacité faible, l'aorte, grâce à sa partie élastique constitue un réservoir à court terme (le temps d'une révolution cardiaque) permettant la transformation du débit ventriculaire discontinu en débit continu (expérience de Marey)
- Le rôle des forces extravasculaires et de la pression hydrostatique sont accessoires et négligeables dans ce système

2 PROPRIÉTÉS DU S.H.P

2.1 LES VAISSEAUX ÉLASTIQUES

Ils sont représentés par l'aorte et ses grosses branches. Du fait de la distensibilité de leurs parois, l'aorte et les grosses artères jouent le rôle d'un réservoir dont les parois emmagasinent de l'énergie potentielle en se laissant distendre pendant l'éjection du volume systolique et la restituent une fois la valve aortique fermée. Le retour sur eux-mêmes de ces vaisseaux maintient la pression et le sang s'écoule vers la périphérie de façon à peu près continue. C'est **l'effet Wind-Kessel** ou « de bouteille à

air ». L'énergie stockée au cours de la contraction cardiaque par les tissus élastiques de l'aorte et de ses branches est convertie en énergie cinétique qui assure la circulation pendant la diastole.

- Expérience de Marey.

Soit un réservoir à pression constante se vidant en même temps par 2 tubes de même calibre : l'un rigide, l'autre élastique. Tant que le liquide s'écoule en régime permanent, le débit par les 2 tuyaux reste le même, mais si par l'intermédiaire d'un interrupteur, on crée simultanément des variations discontinues de pression, le débit devient moins abondant par le tube rigide dont l'écoulement est irrégulier que par le tube élastique dont l'écoulement est plus régulier, et cela bien que la charge, à l'origine des deux tubes reste la même.

Conclusion : Ainsi grâce à sa distensibilité ou compliance ($\Delta V / \Delta P$), les vaisseaux élastiques absorbent une plus grande quantité de liquide et assurent par conséquent un plus grand débit.

Ce rôle d'accumulateur de pression est dû aux fibres élastiques. On définit un facteur $\Delta P / \Delta V$, appelé Elastance qui augmente avec l'âge.

NB : Le processus de vieillissement normal s'accompagne d'une diminution de l'élasticité de l'aorte et des grosses artères (Figure 10). Chez les sujets âgés, les artères principales deviennent rigides (au cours de l'artériosclérose) et se comporte exactement comme le tube rigide de l'expérience de Marey. En effet le diagramme tension-longueur obtenu à partir de pièces d'autopsie de sujets d'âges différents montre que la distensibilité artérielle diminue avec l'âge et que ce phénomène est en rapport avec la fibrose, c'est à dire avec l'augmentation de la teneur de la paroi artérielle en fibres de collagène. À 85 ans, le module d'élasticité de cette paroi est pratiquement égal au module d'élasticité des fibres collagènes.

La diminution de l'extensibilité artérielle est également manifeste. Toutefois jusqu'à 60 ans environ, cette diminution est compensée par une augmentation du volume aortique. Au-delà, l'accroissement du volume devrait être trop important pour compenser la rigidité aortique.

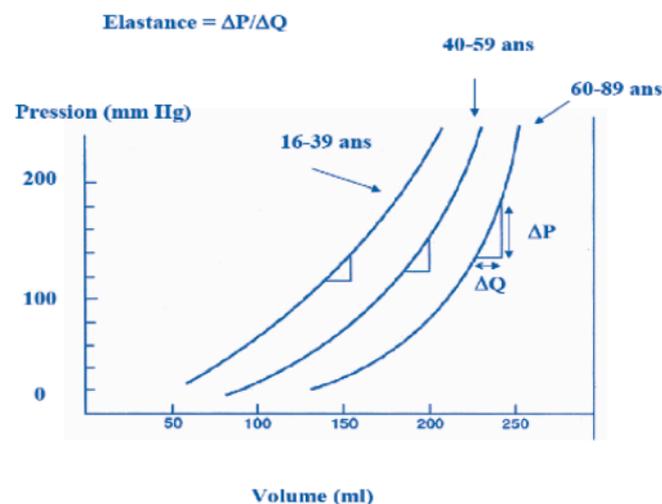


Figure 10 : Relation Pression - volume selon l'âge.

2.2. LES VAISSEAUX RÉSISTIFS : ARTÉRIOLES

Au niveau de certains organes, le débit ne varie pratiquement pas c'est le cas du cerveau. Dans d'autres, au contraire, il peut augmenter pour s'adapter, comme au niveau de la peau, à l'activité fonctionnelle de l'organe, ou à son activité métabolique c'est -le cas du muscle. Or, on peut se rappeler que le débit au niveau d'un organe est égal au rapport :

$$D = \frac{\text{Pression artérielle} - \text{Pression veineuse}}{\text{Résistances}}$$

Le numérateur étant constant, le seul facteur de variation du débit au niveau d'un organe est donc la résistance à l'écoulement du sang.

Or, d'après la loi de Poiseuille : $R = 8 \mu l / \pi r^4$ avec $8 \mu l / \pi$ constant, ce qui donne $R = K/r^4$

C'est donc en faisant varier leur calibre que les artérioles contrôlent le débit au niveau des organes qu'elles irriguent ; le rayon intervient en quatrième puissance il suffit donc d'une faible variation du rayon des vaisseaux pour que le débit augmente énormément : ainsi lorsque le rayon double, le débit est multiplié par 16. C'est grâce à l'existence des fibres musculaires lisses qui entrent dans la constitution de leur paroi que les artérioles sont susceptibles de faire varier activement leur calibre. Ces changements actifs, c'est à dire liés aux caractéristiques mécaniques des parois des vaisseaux constituent la vasomotricité.

2.3 VASOMOTRICITÉ

2.3.1 Définition :

C'est le changement actif du calibre des vaisseaux. Il y a un certain degré de vasoconstriction permanente des artérioles et sphincters précapillaires qui sont les principaux responsables de la résistance vasculaire : c'est le tonus vasomoteur de base. Ce tonus est soumis à une double régulation : locale et extrinsèque (nerveuse et hormonale).

2.3.2 Régulation locale

L'élément contrôlé est le flux sanguin d'un organe ou d'un tissu donné. Plusieurs théories ont été avancées afin d'expliquer cette régulation :

- Théorie myogène : le muscle lisse artériolaire se contracte spontanément en réponse à un flux sanguin exagéré qui distend la paroi artériolaire.
- Théorie métabolique : fait intervenir des substances chimiques véhiculées par le sang ou produites localement. Un apport métabolique insuffisant engendrerait une vasodilatation locale afin d'améliorer l'apport nutritif et inversement, une vasoconstriction en cas de débit sanguin excessif. La stimulation dépend, semble-t-il, d'une ou de plusieurs substances spécifiques à chaque tissu.

Le but de l'autorégulation est de prévenir un afflux sanguin non justifié par les besoins locaux et potentiellement dangereux pour le réseau capillaire.

Cette régulation locale est aveugle : les besoins d'un lit vasculaire déterminent en effet les variations du débit cardiaque et de la pression artérielle qui ne tiennent pas compte de l'état des autres territoires vasculaires.

Un exemple suffit à le montrer : durant l'anoxie tissulaire provoquée par une hémorragie aiguë, l'autorégulation non contrôlée entraînerait une vasodilatation réflexe qui aggraverait la chute tensionnelle. De même un besoin métabolique coexistant avec une hypovolémie induirait une vasodilatation qui ne pourrait pas être compensée par une élévation du débit cardiaque ; certains lits vasculaires recevraient donc une fraction disproportionnée de ce débit aux dépens de régions vitales.

2.3.3 Régulation nerveuse :

L'organisation générale des voies afférentes, des centres, des connexions intercentrales et des voies efférentes de cette partie du système nerveux qui influence le fonctionnement du cœur et des vaisseaux est décrite dans le chapitre « Régulation de la pression artérielle ». Les paragraphes ci-dessous sont consacrés seulement aux voies efférentes de la vasomotricité. Une des particularités du muscle lisse vasculaire est de recevoir uniquement des fibres post-ganglionnaires sympathiques sauf dans certains territoires localisés où existe une innervation parasymphatique.

L'innervation par des fibres post-ganglionnaires sympathiques varie le long du réseau artériel. Celle des grosses artères est peu importante alors que celle des artérioles et des sphincters pré capillaires est très dense. Cette innervation est responsable d'un fond de vasoconstriction permanente appelé tonus vasomoteur de repos.

- **Les fibres post-ganglionnaires du sympathique** : ces fibres naissent des ganglions sympathiques et suivent les nerfs périphériques formant autour des vaisseaux des plexus périovasculaires. Ces plexus sont plus ou moins fournis selon les territoires et selon la nature des vaisseaux par exemple les vaisseaux du cerveau sont peu innervés, de même que les vaisseaux coronaires, alors que les vaisseaux cutanés sont très richement innervés. Le système sympathique agit par l'intermédiaire d'un neurotransmetteur:La NAd qui agit sur deux types de récepteurs : α (α_1 , α_2) et β (β_1 , β_2). La réponse du muscle lisse dans un territoire donné dépend de la nature, du nombre et de l'affinité des récepteurs adrénergiques. La stimulation des récepteurs α_1 entraîne la vasoconstriction, celle des récepteurs β_2 la vasodilatation. Les artérioles ont en règle générale les deux types de récepteurs, mais à prédominance différente. Par exemple, une prédominance β_2 existe dans les réseaux coronaires et du muscle squelettique. Par contre, dans les réseaux de la peau et rénal, seuls existent des récepteurs α .

Les catécholamines circulantes ont les mêmes effets que la NAd libérée par le système sympathique. À noter que l'adrénaline a des effets β_2 nettement plus marqués que la noradrénaline alors que la NAd a une affinité plus grande pour les récepteurs α_1 .

- **Les fibres parasymphatiques** : les fibres parasymphatiques cholinergiques sont très localisées. La stimulation de ces fibres entraîne une vasodilatation. L'acétylcholine entraîne la libération de monoxyde d'azote (NO) qui est responsable de la vasodilatation.

3 LA PRESSION ARTÉRIELLE

La pression artérielle (PA) maintient les parois du système artériel distendues et assure l'écoulement du sang.

C'est la pression la plus élevée de l'organisme. Le maintien d'une pression élevée permet d'assurer une perfusion des tissus en toute circonstance hémodynamiques (orthostatisme, activité physique, etc.). Le cerveau et le cœur dits « organes nobles » doivent recevoir un débit sanguin suffisant, quelles que soient les conditions, pour la survie à court terme de l'organisme.

La PA moyenne est la pression théorique qui existerait dans l'arbre artériel s'il n'y avait pas d'oscillations systolique et diastolique (en d'autres termes si le régime était continu). Elle est quasi constante dans tout le système artériel, et elle ne chute qu'à sa sortie. Les enregistrements de vitesse du sang et de pression dans le système à haute pression montrent deux faits essentiels :

- * La pression moyenne reste à peu près constante jusqu'aux artérioles, elle baisse tout au plus de quelques mmHg. Ceci est dû à l'augmentation progressive de la surface de section du réseau artériel.
- * Par contre les courbes de pression et de débit instantanés sont fortement modifiées de l'Aorte aux petites artères, la pression maximale dite systolique augmente et la pression minimale dite diastolique baisse. L'incisure sur la branche descendante de la pression dans l'aorte marque la fermeture de la valve aortique. Quant au versant qui lui fait suite, il est expliqué par les réflexions de l'onde de pression sur les bifurcations et sur les artérioles périphériques.

3.1 METHODES DE MESURE DE LA PA :

On peut avoir des méthodes directes ou indirectes :

3.1.1 Méthode directe :

Elle est basée sur la technique du cathétérisme cardiaque, donc une méthode sanglante. On obtient une courbe de pression présentant des fluctuations cycliques en rapport avec l'activité cardiaque : Le Sphygmogramme (Figure 11). Cette pression commence par s'élever rapidement (BRANCHE ANACROTE du tracé) jusqu'à un maximum correspondant à la pression systolique (P_s) et puis redescend (BRANCHE DICROTE du tracé). Cette diminution est interrompue par L'ENCOCHE DICROTE suivie par une oscillation vers le haut appelée ONDE DICROTE puis la pression passe par un minimum en diastole correspondant à la pression diastolique (P_D).

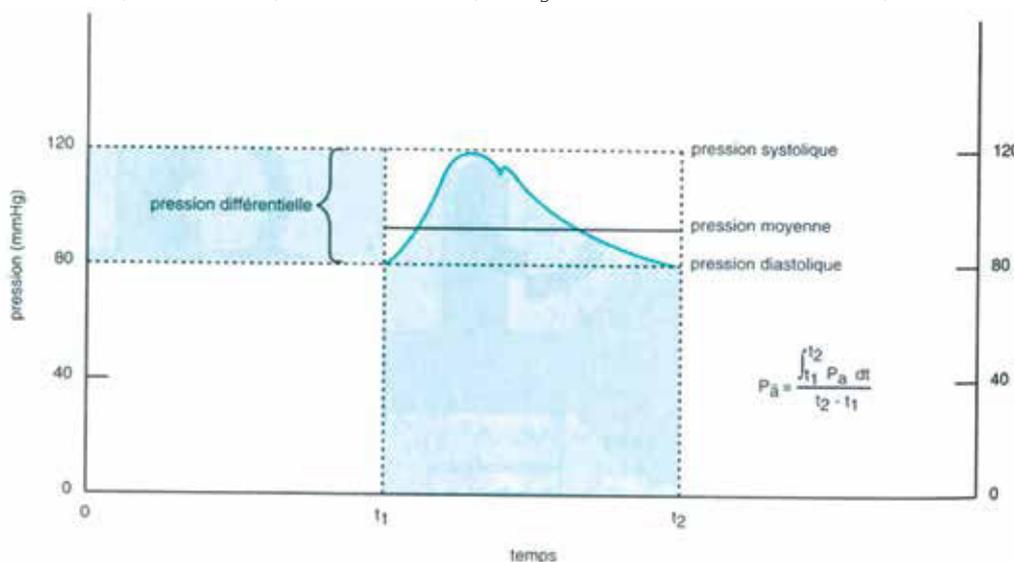


Figure 11 : Le sphygmogramme

Cette courbe de pression artérielle est superposable à la courbe ventriculaire gauche en systole et s'en dissocie durant la diastole lui restant très supérieure. Cette PD n'atteint pas une valeur nulle en dépit de la pause cardiaque, car les vaisseaux de petit calibre (artérioles et capillaires) opposent une résistance à l'écoulement du sang et parce que les gros troncs artériels sont élastiques et légèrement extensibles.

Ainsi, les valeurs normales de la PA chez un adulte jeune au repos et en position couchée sont :

→ P_s = entre 110 et 140 mmHg

→ P_D = entre 60 et 80 mmHg

On définit :

→ Pression différentielle ou pression pulsée (PP) : $PP = P_s - P_D$

→ Pression moyenne (PAM) : $PAM = 1/T \times \int_0^T P dt$;
T = Période du cycle cardiaque

En pratique, la PAM est approximativement donnée par la formule :

$PAM = PD + 1/3 (P_s - P_D)$: → PAM = entre 70 et 95 mmHg

Dans certains cas pathologiques, des anomalies du sphygmogramme peuvent apparaître faisant intervenir la relation directe entre cette morphologie d'une part et le débit cardiaque, la distensibilité artérielle et les résistances artériolaires d'autre part ($P = Q \times R$ avec k / r^4).

En effet, la vitesse d'élévation de pression de la branche ANACROTE donne une indication sur la liberté avec laquelle le sang est éjecté dans l'aorte : en cas de rétrécissement de l'orifice aortique, la résistance élevée au niveau de la valvule aortique ralentit la vitesse de l'élévation des pressions dans les artères situées au-delà.

La rapidité de la chute de pression depuis le pic maximum jusqu'à l'encoche dicrote est considérée comme un index de la distensibilité artérielle : au cours de l'athérosclérose, où les artères perdent de leur élasticité, on observe une augmentation de la pression différentielle par élévation du pic avec une pression diastolique normale (ce pic est caractérisé par sa fugacité, en effet il est éphémère).

La chute de pression dans la diastole est considérée comme un index de la résistance périphérique totale : au cours de l'insuffisance aortique, on observe une pression diastolique très réduite, mais n'atteignant jamais zéro.

Au cours de l'hypertension artérielle, les artères, bien que souples, sont distendues par une pression plus élevée que normalement. Leur distensibilité se trouve ainsi réduite, non par artériosclérose (fibrose des fibres élastiques), mais parce qu'elles sont déjà trop étirées.

3.1.2 Méthodes indirectes :

Ce sont les méthodes les plus utilisées. Elles permettent d'évaluer et d'apprécier la tension artérielle (T.A.). Il s'agit de méthodes non sanglantes et largement suffisantes pour les mesures de routine en médecine.

Leur principe est basé sur la réalisation d'une contre-pression au niveau de l'artère où l'on veut mesurer la T.A., par l'intermédiaire d'un brassard pneumatique gonflable placé autour du segment de membre par où passe l'artère explorée. L'artère souvent utilisée est l'artère humérale, l'appareil est le tensiomètre qui comporte un manomètre gradué en mmHg.

Lors de la systole ventriculaire gauche, on assiste à une distension passive de l'aorte, et à la fin de la systole, les fibres élastiques reviennent à leur état initial et l'onde pulsatile va se propager en déformant la paroi vasculaire, phénomène palpable par le pouls artériel périphérique.

- Quand la pression du brassard (P_B) > pression systolique, l'artère est collabée et le sang ne passe pas.
- Quand la $P_B < P_D$ l'artère est en permanence ouverte, l'écoulement du sang devient continu laminaire.
- Quand $P_D < P_B < P_s$, le sang va pouvoir passer lors de la systole, l'artère s'ouvre en systole et se ferme en diastole, l'écoulement du sang est alors discontinu turbulent et donc bruyant.

Il existe 3 méthodes indirectes de mesure de la PA :

- La méthode auscultatoire : utilisant un stéthoscope, elle permet d'apprécier la P_s et la P_D
- La méthode palpatoire : par la recherche du pouls (radial), elle ne permet d'apprécier que la P_s
- La méthode oscillométrique : utilise l'oscillomètre de « Pachon », est de nos jours délaissée.

La mesure de la PA doit se faire en prenant certaines précautions pour qu'elle soit fiable : sujet doit être couché depuis au moins 10 à 15 minutes, dans des conditions confortables (pour éviter le stress psychologique), et la TA doit être mesurée au moins deux fois.

3.2 VARIATIONS PHYSIOLOGIQUES DE LA PA :

La PAM varie en fonction d'un certain nombre de paramètres :

- **l'âge** : la PAM tend à augmenter (bien que le Dc diminue) avec l'âge.
- **le sexe** : la PAM est plus élevée chez l'homme que chez la femme. Après la ménopause, elle est plus élevée chez la femme, car n'est plus protégée par ses hormones sexuelles.
- **l'exercice musculaire** : la PAM augmente, mais moins que le débit cardiaque.
- **en post prandial** : on a une légère augmentation de la PAM
- **le stress psychique** : tend à augmenter les chiffres tensionnels par effet du système sympathique.
- **le sommeil** : la P.A. baisse lors du sommeil lent, mais elle augmente en sommeil paradoxal (risque d'AVC augmenté chez le sujet âgé en sommeil paradoxal).

3.3 RÉGULATION DE LA PRESSION ARTÉRIELLE :

La PAM, est une grandeur hémodynamique maintenue dans des limites physiologiques. Elle est étroitement régulée par des mécanismes efficaces.

D'après la loi de Poiseuille : $\Delta P = R \times Dc$

où ΔP = pression aortique moyenne - pression veineuse centrale

R = Résistance vasculaire périphérique = $8 \mu / \pi r^4$

Dc = Débit cardiaque - volume systolique (V_s) x fréquence (fc)

Il résulte que la pression artérielle moyenne dépend du

niveau des résistances périphériques et de la valeur du débit cardiaque.

C'est sur ces 2 facteurs (Dc et R) que vont agir 2 types de régulation de la pression artérielle.

- Autorégulation locale (voir S.H.P)
- Régulation élaborée : la servorégulation.

3.3.1. Régulation nerveuse :

À la différence de l'autorégulation qui adapte le débit sanguin de chaque organe à ses besoins, la régulation nerveuse veille à la compatibilité de ces besoins avec l'équilibre de l'organisme.

a- Arc réflexe :

- **Les récepteurs périphériques** : (barorécepteurs) sont des zones cellulaires sensibles situées à l'origine de chaque artère carotide interne dans une formation spécialisée : le sinus carotidien. D'autres récepteurs sont situés sur la crosse de l'aorte (barorécepteurs aortiques). Les chémorécepteurs sont mis en jeu dans des situations d'urgence (hypoxie importante).
- **Les voies afférentes principales** : sont représentées de chaque côté par le nerf sinusal de Hering et par le nerf aortique de Cyon qui empruntent respectivement le trajet du glosso-pharyngien (IX) et celui du vague (X).

- Les centres intérateurs :

- Centres bulbaires : sont le noyau du tractus solitaire (NTS), le centre vasomoteur (CVM) et le noyau du vague (NV). C'est à ce niveau qu'arrivent les voies afférentes et c'est de là que partent les voies efférentes se dirigeant vers, le cœur, les vaisseaux périphériques et la glande médullosurrénale.
- Formations supra-bulbaires : De toutes les formations supra-bulbaires susceptibles de faire varier la pression artérielle, les principales à citer sont l'hypothalamus et le cortex cérébral
- **Les voies efférentes** sont doubles : représentées par les systèmes sympathique et parasympathique et par la médullosurrénale.
Les fibres vagales sont cardiomodératrices alors que les fibres sympathiques sont cardioaccélérateuses et vasoconstrictrices.

b- Fonctionnement de l'arc réflexe :

- Nature du stimulus : La P.A. n'agit pas directement. Les barorécepteurs sont en fait des tensio ou mécanorécepteurs activés par une distension pariétale localisée dont le degré dépend du niveau de pression artérielle et de l'état de la paroi vasculaire.
- Mise en jeu : L'élévation de la pression artérielle entraîne le renforcement de l'activité centripète des neurones déjà actifs et un recrutement des neurones inactifs. La réponse observée témoigne :
 - a) d'une réduction du tonus sympathique qui abaisse la résistance totale périphérique.
 - b) d'une augmentation du tonus vagal qui s'exprime par un net ralentissement cardiaque. Le résultat global est une diminution de la P.A.; qui est liée à la réduction de la résistance artériolaire plus que du débit cardiaque.

La réduction de la pression carotidienne, par clampage par exemple, provoque des modifications inverses. Une

élévation tensionnelle est constatée chez l'homme, elle est liée pour environ 2/3 à l'élévation de la résistance périphérique et pour 1/3 à celle du débit cardiaque.

3.3.2. Régulation hormonale :

Cette partie sera étudiée en 2e Année Médecine.

LE SYSTÈME A BASSE PRESSION :

Il est constitué essentiellement d'un réseau d'échange (capillaires) et d'un système compliant assurant le retour sanguin vers le cœur (veines).

1. LA CIRCULATION CAPILLAIRE

1.1 GÉNÉRALITÉS :

Placée en aval des dernières branches artérielles, la circulation capillaire appartient à la microcirculation c'est-à-dire à l'ensemble des vaisseaux artériels, capillaires et veineux dont le diamètre est du même ordre de grandeur que celui des globules rouges.

À tout instant, il n'y a que 5 % de sang circulant qui est dans les capillaires, et pourtant cette fraction est la plus importante, car c'est à travers de la paroi des capillaires systémiques que l'oxygène et les nutriments passent du sang au liquide interstitiel et que le CO₂ et les déchets du métabolisme passent dans le sang.

Les capillaires ont un diamètre allant de 5 à 15 µm et leur paroi est réduite à une simple couche de cellules endothéliales aplaties entourée, sur sa face externe, par une fine membrane basale. Ils n'ont aucune vasomotricité, car dépourvus de couche musculaire dans leur paroi, et leur accès est contrôlé par des sphincters précapillaires. Les échanges à travers la paroi des capillaires sont possibles parce que celle-ci comprend des pores de 8 à 9 nm de diamètre dans la zone de jonction entre deux cellules endothéliales laissant passer l'eau, les électrolytes et les substances de faible poids moléculaire ; et des fenestrations intracellulaires de diamètre plus important permettant le passage de molécules d'un plus grand poids moléculaire voire, dans certains capillaires de certains tissus, de grosses protéines et de cellules sanguines.

Ces échanges sont favorisés par :

- **La surface** de contact qui varie en fonction des conditions métaboliques du territoire, mais pourrait atteindre jusqu'à 6000 m².
- **La lenteur** de la circulation (1 m/sec). Ce fait a été vérifié en observant au microscope la progression des globules rouges au niveau d'un lit mésentérique.
- **La différence de pression** entre le côté artériolaire et le côté veinulaire du lit capillaire $\Delta P = 30$ mm Hg.

La surface de contact et la lenteur de la circulation favorisent les processus de diffusion qui sont à l'origine de 99 % des échanges qui se produisent entre milieu intravasculaire et milieu interstitiel.

1.2 ÉCHANGE ET PERMÉABILITÉ CAPILLAIRE :

Le principal moyen de transport des substances dissoutes à travers la paroi des capillaires est la diffusion. C'est un processus passif qui est lié aux gradients de concentration des substances en question entre le plasma et le liquide interstitiel. Les substances liposolubles peuvent diffuser

à travers la membrane des cellules endothéliales. Les substances hydrosolubles ne peuvent diffuser qu'à travers les pores et les fenestrations intracellulaires. C'est le cas du glucose, des acides aminés et des peptides qui passeront moins facilement que les ions.

Pour certaines substances, un transport actif consommant de l'énergie peut être surajouté au transport passif. Ce transport est limité par le nombre de molécules de transporteur disponibles.

Le transfert des grosses molécules fait intervenir le processus de pinocytose. C'est l'incorporation de la molécule dans une vésicule intracellulaire qui migre dans la cellule jusqu'à la face opposée de la membrane où elle va s'ouvrir et la molécule transportée sera rejetée de ce côté de la cellule.

Pour les liquides, un autre type de transport à travers la membrane capillaire existe et qui est régi par les **forces de Starling**. Les mouvements de l'eau et des électrolytes dépendent de la pression efficace de filtration (PEF) qui correspond à la somme algébrique des pressions suivantes de part et d'autre de la membrane :

- pression hydrostatique intracapillaire (P_c)
- pression hydrostatique interstitielle (P_i)
- pression oncotique intracapillaire (Π_c)
- pression oncotique interstitielle (Π_i)

$$PEF = (P_c - P_i) - (\Pi_c - \Pi_i);$$

$$D'où (J_v) = K_f [(P_c - P_i) - (\Pi_c - \Pi_i)]$$

Avec :

J_v = Flux liquidien

K_f = coefficient de filtration capillaire.

Si la pression oncotique efficace est inférieure à la pression transmurale, on assiste à une sortie de liquide (côté artériolaire). Si la pression oncotique efficace est supérieure à la transmurale, on obtient une entrée de liquide vers le capillaire (côté veinulaire). Cet énoncé est connu sous le nom des forces Starling.

Les parois capillaires sont dépourvues de muscle lisse, mais il existe des sphincters précapillaires qui commandent l'entrée du sang à leur niveau. Quand un tissu est en activité métabolique, les sphincters précapillaires se relâchent et le débit est alors très élevé avec d'importants échanges transpariétaux. Au repos, le débit est bas, les capillaires sont vides et collabés. Dans ce dernier cas, la plus grande partie du sang passe directement des artérioles aux veinules par des anastomoses artérioveineuses.

1.3. CONTRÔLE DE LA CIRCULATION CAPILLAIRE :

La circulation capillaire est susceptible de variations importantes, les conséquences vont être :

- augmentation de la surface d'échange
- augmentation du volume du sang au contact des tissus
- diminution de la distance sang-tissu
- maintien de la concentration ou de la pression partielle capillaire moyenne des différents métabolites et gaz malgré l'accroissement et la production de la consommation tissulaire.

Un certain nombre de facteurs influe sur cette circulation au niveau de laquelle on observe des phases amples de capillaro-dilatation ou de capillaro-constriction.

1.3. 1- Contrôle nerveux et hormonal :

Les phases de constriction sont abolies par la section des nerfs sympathiques et seule subsiste une vasodilatation dans le territoire considéré. Ce tonus sympathique est le résultat d'un facteur nerveux et hormonal (Adrénaline) dont l'action se situe au niveau des fibres musculaires lisses métartériolaires et des sphincters précapillaires.

1.3. 2- Contrôle physico-chimique :

Au niveau de tout territoire en activité (muscle par exemple), on observe une accentuation des échanges telle que la consommation d'oxygène (V_{O_2}) locale, de même que la production de CO_2 . La baisse de la pression partielle d'oxygène (P_{O_2}) et du pH tissulaire entraîne une dilatation capillaire ce qui aboutit à une redistribution de la masse sanguine en fonction des besoins.

2. LE SYSTÈME VEINEUX

Les veines assurent le retour sanguin vers le cœur et participent à l'équilibre hémodynamique en modifiant, selon les circonstances, le volume du sang qu'elles contiennent, réalisant une véritable réserve volumique. L'endothélium veineux est caractérisé par l'existence, à intervalles réguliers, sur les vaisseaux de moyen et petit calibre, de replis à concavité tournée vers le cœur, **les valvules, dont la fonction est d'orienter le courant sanguin**. Leur fonctionnement est entièrement passif, selon les différences de pression intravasculaire. La média contient différentes structures : fibres élastiques, abondantes dans les veines de petit et moyen calibre, les rendant distensibles ; fibres collagènes, surtout dans les veines thoracoabdominales et des membres inférieurs, les rendant peu déformables ; fibres musculaires lisses, abondantes dans les veinules et les veines de moyen calibre, leur conférant des propriétés de **veinomotricité** particulièrement importantes. Dans l'adventice, se trouvent, en particulier, les terminaisons nerveuses sympathiques qui contrôlent cette veinomotricité.

Dans l'ensemble, ces éléments donnent aux veines une capacité et une compliance qui leur permettent d'assurer au mieux la double fonction de drainage du sang capillaire et de stockage sanguin.

Le volume de sang présent dans les veines systémiques est d'environ 3,5 l chez un adulte, soit **65 % du volume sanguin total** : ceci représente une réserve potentielle. Toutefois, sa mobilisation éventuelle se fait différemment selon le territoire veineux impliqué.

2.1 LES PRESSIONS VEINEUSES : (Figure 12)

2.1. 1- La pression hydrodynamique

Elle est faible dans ce compartiment vasculaire : à la sortie des capillaires, elle est d'environ 15 mmHg, au niveau de la veine cave, elle est de 6 mmHg. Au niveau de l'oreillette droite, elle représente la pression veineuse centrale.

2.1. 2- La pression hydrostatique

Elle est due à la pesanteur, elle prend toute son importance lorsque le sujet est debout : dans ce cas, elle peut atteindre 100 mm Hg au niveau des chevilles. Cette pression ne joue aucun rôle dans la progression du sang, mais permet, dans ces conditions, que soit assurée la béance des veines.

En effet, le degré d'ouverture des vaisseaux dépend de la pression transmurale, représentée par la différence entre la pression tissulaire (ou interstitielle) égale à 5 mm Hg environ et la pression intra vasculaire. Étant donné la grande distensibilité des veines, toute petite augmentation de pression va entraîner le stockage d'un grand volume de sang au niveau des territoires veineux où la pression hydrostatique est la plus élevée. Ce fait prend toute son importance dans les situations suivantes.

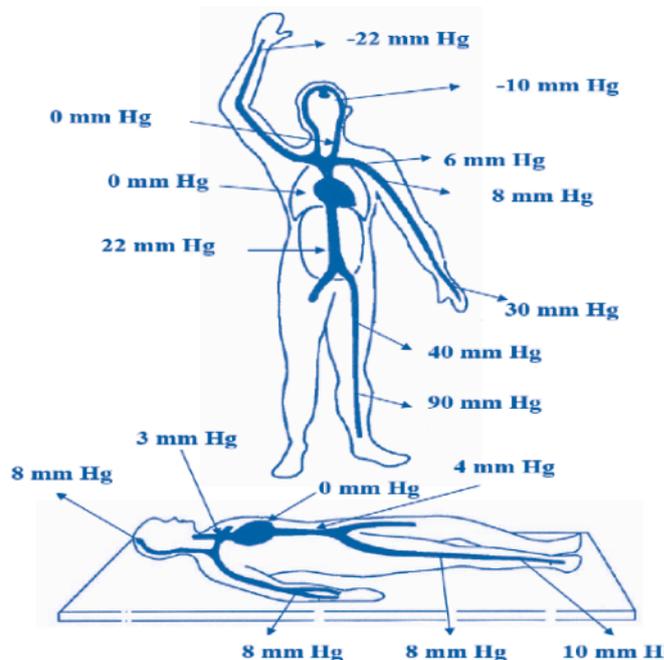


Figure 12 : Pressions dans l'oreillette droite et dans les veines systémiques en position debout et couchée

• L'orthostatisme :

Lorsque le sujet passe brutalement de la position couchée à la position debout, la pression hydrostatique sanguine augmente au niveau des membres inférieurs.

Si les mécanismes régulateurs de la pression artérielle n'interviennent pas immédiatement, on observe une diminution du retour veineux, un désamorçage de la pompe cardiaque et un défaut d'irrigation des territoires cérébraux pouvant aller jusqu'à la 'perte de conscience. N.B. On définit le point hydrostatique indifférent (PHI) comme le point où la pression reste la même, quelle que soit la position du corps, situé dans l'oreillette droite et placé environ aux 2/5 de la longueur du corps.

• Modification de G :

La pression hydrostatique varie en fonction de l'accélération :

G positif » : dans le cas d'un mouvement accéléré descendant, le sang s'accumule dans les territoires vasculaires sus-jacents au niveau cardiaque et essentiellement cérébral (voile rouge des aviateurs).

G négatif : on observe les effets inverses dans le cas d'un mouvement accéléré ascendant (voile noir des aviateurs assurant une montée) « en flèche » de leur machine.

2.2. FACTEURS DU RETOUR VEINEUX

La pression hydrodynamique résiduelle paraît trop faible pour assurer en toute circonstance un débit sanguin de

retour suffisant et ainsi toute gêne de la circulation de retour entraîne une stagnation du sang dans les territoires sous-jacents avec une inflation volumique, une augmentation de la pression veineuse et l'apparition d'œdème. Un certain nombre d'éléments entrent en jeu pour faciliter la progression du sang vers le cœur.

2.2. 1- L'activité musculaire :

La contraction musculaire entraîne une augmentation importante de la pression tissulaire et par suite une chasse sanguine.

2.2. 2-L'activité respiratoire à l'inspiration :

L'abaissement du diaphragme augmente la pression intra-abdominale et participe ainsi au phénomène de chasse sanguine au niveau du territoire mésentérique et cave inférieure. La dépression intra thoracique provoque un appel de sang vers le cœur qui accentue l'efficacité du retour veineux (l'inversion se produit au moment de l'expiration)

2.2. 3- L'activité ventriculaire droite :

Au moment de la phase d'éjection systolique, elle crée une dépression dans l'oreillette et un appel sanguin par abaissement du plancher du ventricule.

2.2. 4- Le système valvulaire :

Les valvules assurent au courant veineux un sens centripète. Du fait de leur orientation, elles évitent tout reflux : une inversion du courant dans le sens centrifuge provoque leur fermeture. Normalement les valvules sont ouvertes en permanence, puisque le courant veineux est toujours dirigé dans le sens centripète.

* Au niveau des territoires situés au-dessus du plan cardiaque, la pesanteur joue un rôle essentiel dans le retour veineux.

* La caractéristique fondamentale du système veineux est d'être un système capacitif. En effet, 70 % du volume sanguin s'y trouve contenu.

2.3. DISTENSIBILITE DES VEINES :

2.3. 1- Pression transmurale et volume de la veine :

C'est la pression que les structures avoisinantes exercent sur les veines est supérieure à la poussée exercée par le sang sur la paroi interne de la veine, la veine est aplatie et il ne persiste que 2 petits canaux latéraux. Le volume de la veine par unité de longueur est donc très petit.

À de faibles augmentations de la pression transmurale correspond le changement de forme de la veine dont la surface de section prend 1 sans augmentation de périmètre 1 la forme d'une ellipse de moins en moins allongée puis d'un cercle. La surface de section, et par conséquent le volume par unité de longueur augmente jusqu'à ce que la section soit devenue circulaire. Cette phase initiale de déformation de la veine correspond au segment plat de la courbe pression-volume.

2.3. 2- Rigidité des parois aux fortes pressions :

Une fois la section devenue circulaire, l'augmentation de section et donc de volume, ne peut être due qu'à celle du rayon, c'est-à-dire à l'éirement des structures pariétales. La relation tension intrapariétale -rayon - pression est alors décrite par la loi de Laplace. L'expérience prouve que

la veine est devenue très rigide : le volume augmente peu, même pour de très fortes augmentations de la pression transmurale. La zone de transition entre les 2 segments plat et abrupt de la courbe pression volume correspond à une pression transmurale proche de 10 cm H₂O, c'est-à-dire proche de la pression veineuse centrale normale (pression de l'oreillette droite). Les fortes variations de sections et donc de volume sont seulement le fait des veines dont la pression transmurale varie beaucoup.

3. LA CIRCULATION LYMPHATIQUE

La circulation lymphatique, voie accessoire de retour vers le cœur droit, est placée en parallèle de la grande circulation. Les lymphatiques, directement reliés aux espaces interstitiels, développent un réseau ayant beaucoup d'analogies avec le circuit veineux. Ils ont, de ce fait, une fonction de transfert de liquides et de substances dissoutes complémentaire de celle des veines, en particulier pour les protéines qui ne peuvent pratiquement pas être réabsorbées par les capillaires systémiques.

À côté de cette **fonction strictement circulatoire**, le système lymphatique joue un rôle de premier plan dans **les processus de défense immunitaire** contre les agressions bactériennes, par l'intermédiaire d'un tissu lymphoïde particulier, les ganglions lymphatiques.

3.1 RAPPEL ANATOMIQUE ET PARTICULARITES :

Nés d'un réseau de capillaires en cul-de-sac largement anastomosés entre eux les collecteurs lymphatiques vont, par convergences successives, former deux grands troncs terminaux qui se terminent dans les confluent veineux des veines sous-clavières et jugulaires internes. Son volume est évalué à 5 litres environ.

La progression de cette lymphe de la périphérie vers le canal thoracique est assurée par des forces extérieures, essentiellement des contractions musculaires, la pression abdominale, les mouvements respiratoires et les battements de l'artère satellite (comme le retour veineux). Tout ceci conférant à la lymphe un débit discontinu.

La lymphe a une composition voisine de celle du liquide interstitiel du tissu dont elle provient. Elle est donc variable. La différence la plus importante concerne la teneur en protéides : pour la plupart des tissus, la concentration protéique de la lymphe est basse.

3.2. FONCTION :

Du fait de son hémodynamique très particulière, la circulation lymphatique possède une faculté d'adaptation aux conditions locales plus grandes que la circulation systémique, rétablissant l'équilibre des échanges liquidiens locaux. Ce système joue un rôle dans le processus d'immunodéfense de l'organisme, dans l'absorption des composés liposolubles de la digestion intestinale et dans la réabsorption du liquide que les séreuses secrètent dans les cavités qu'elles limitent.

La circulation lymphatique dont le rôle quantitatif peut être considéré comme minime possède un rôle qualitatif important.

5 LA CIRCULATION CORONAIRE

5. 1. GÉNÉRALITÉS :

C'est la circulation nutritive du myocarde, placée en parallèle (comme toutes les autres circulations locales)

entre l'aorte et l'oreillette droite. Cette circulation est à la fois la condition et la conséquence du fonctionnement cardiaque.

Elle s'accomplit dans un organe musculaire sans cesse actif, dont les contractions réalisent un obstacle à l'écoulement sanguin dans les vaisseaux situés dans l'épaisseur même du myocarde.

La caractéristique fonctionnelle la plus importante de la circulation myocardique est l'importance du prélèvement en oxygène, même dans les conditions basales. Le coefficient d'utilisation de l'oxygène ($Da VO_2 / CaO_2$) est de l'ordre de 70 %, valeur trois fois plus élevée que celle de la plupart des organes. Il est donc évident que les besoins en oxygène ne peuvent être satisfaits que par une augmentation du débit.

5.2. HÉMODYNAMIQUE CORONARIENNE : (Figure 13)

La pression de perfusion du cœur est proportionnelle à la pression aortique moyenne au niveau de la racine de l'aorte. Le débit coronaire est d'environ 80 ml/min pour 100 g de myocarde, soit pour un poids de 300 g un débit de l'ordre de 250 ml/min (soit près de 5 % du débit cardiaque global, alors que le cœur ne représente que 0,5 % du poids du corps).

Le débit dans les coronaires est irrégulier : il subit des fluctuations en rapport avec la révolution cardiaque.

L'évolution du débit de la coronaire gauche présente son maximum au début de la diastole, la phase systolique commençant par une annulation du débit synchrone de la mise en tension de la masse ventriculaire. Les $\frac{3}{4}$ du débit sont diastoliques, le $\frac{1}{4}$ restant appartient à la systole.

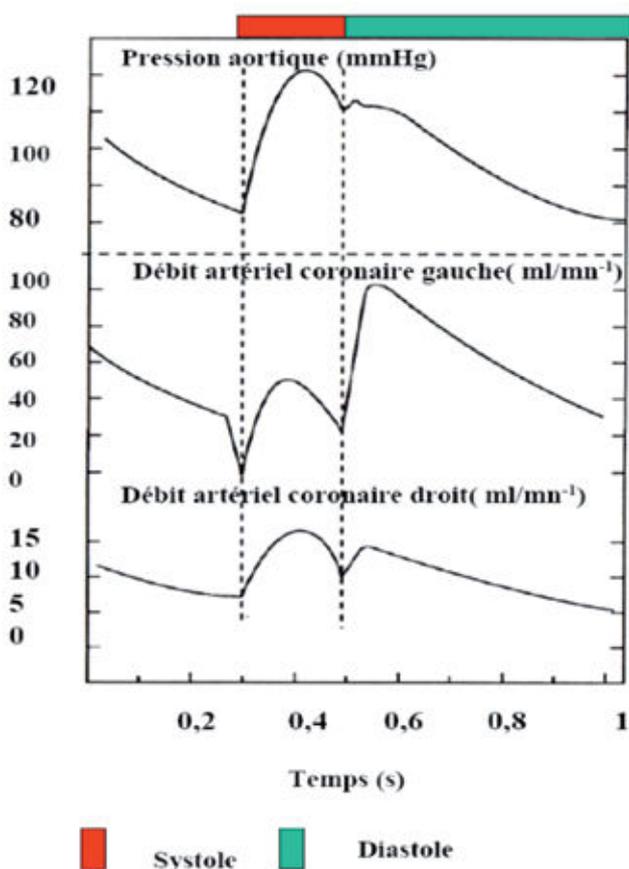


Figure 13 : Comparaison du débit sanguin coronaire dans les artères coronaires droite et gauche

Ce poly a été téléchargé depuis med-tmss.blogspot.com/2016/08/cours.html | Page Fb : www.facebook.com/Faculte.de.Medecine.TMSS

L'évolution du débit de la coronaire droite est à peu près calquée sur la pression aortique.

Le débit de retour par le sinus coronaire présente un maximum systolique et une valeur très faible pendant la diastole. Il n'y a donc aucun rapport entre le débit artériel et le débit veineux.

L'évolution du débit coronarien reflète assez bien l'état de tension du myocarde. Cette dernière est plus forte au niveau des couches profondes endocardiques qu'au niveau des couches superficielles péricardiques.

5.3. RÉGULATION DE LA CIRCULATION CORONAIRE

5.3.1. Facteurs humoraux

Les vaisseaux coronaires répondent par une vasodilatation à une hypoxie locale et ce phénomène constitue la base du mécanisme d'autorégulation du débit coronaire. De nombreux métabolites (H^+ , K^+ , adénosine...) jouent un rôle important dans la régulation du débit coronaire

5.3.2. Facteurs nerveux

La stimulation sympathique augmente le débit coronaire par vasodilatation via des récepteurs β_2 adrénergiques. La stimulation vagale aboutit à une très faible augmentation du débit coronaire, probablement de façon indirecte par ralentissement de la fréquence cardiaque.

ADAPTATION CARDIO-VASCULAIRE A L'EXERCICE

À l'exercice, les muscles actifs consomment beaucoup plus d'oxygène et de substrats énergétiques. Les processus métaboliques sont activés et génèrent des sous-produits qu'il faut éliminer. Lors d'un exercice prolongé ou réalisé à la chaleur, la température centrale s'élève. Si l'exercice est intense, les ions H^+ apparaissent dans le muscle et dans le sang, ce qui diminue le pH.

L'exercice nécessite alors que le système cardio-vasculaire soit l'objet d'adaptations diverses et spécifiques. Toutes n'ont qu'un seul but : permettre au système cardio-vasculaire de répondre à l'augmentation des besoins, en optimisant les conditions de transport. Ces adaptations vont concerner la fréquence cardiaque, le volume d'éjection systolique, le débit cardiaque, le débit sanguin, la pression artérielle et le sang.

LA FRÉQUENCE CARDIAQUE (FC)

- La Fc reflète le travail qui doit être fourni par le cœur pour répondre à l'augmentation des besoins imposés par l'exercice.
- La Fc de repos est d'environ 60 à 80 bpm. Chez les athlètes très indurant elle peut être de l'ordre de 28 à 40 bpm.
- La Fc de repos diminue avec l'âge et varie avec les conditions environnementales = elle augmente avec la température ambiante et avec l'altitude.
- Souvent, elle augmente même avant le début de l'exercice. Il s'agit d'une réponse anticipée liée à la libération d'un neurotransmetteur, la noradrénaline par le système nerveux sympathique, et d'une hormone, l'adrénaline par la médullosurrénale. À l'inverse, toute stimulation vagale (d'origine émotive) la diminue.

- Les valeurs de fréquence cardiaque, mesurées avant l'exercice ne peuvent refléter la fréquence cardiaque de repos.
- À l'exercice, la Fc augmente rapidement en fonction de l'intensité, sauf à proximité du maximum où elle se stabilise.

La Fc maximale est la valeur la plus élevée qui peut être atteinte lors d'un exercice maximal. Il est possible de l'estimer à partir de l'âge à l'aide de la formule suivante : $Fc_{max} = 220 - \text{âge (en années)}$

Il ne s'agit que d'une approximation autour de laquelle les valeurs réelles individuelles peuvent varier.

A 40 ans par exemple, 68 % des individus ont une fréquence cardiaque maximale comprise entre 168 et 192 bpm \pm 1 erreur standard, et 95 % entre 156 et 204 bpm \pm erreur standard.

- Lors d'un exercice d'intensité constante, la Fc augmente rapidement puis stagne en plateau. Ce plateau constitue la Fc d'équilibre. C'est le niveau optimal pour lequel la fréquence cardiaque satisfait exactement aux besoins de l'exercice.
- Pour chaque augmentation successive du niveau d'exercice, la Fc atteint un nouveau plateau en 1 à 2 min.
- Plus l'exercice est, plus long est de délai nécessaire à la stabilisation de la Fc.
- La Fc d'équilibre constitue un indicateur précieux de l'activité cardiaque. Une fréquence cardiaque plus faible, pour un même niveau d'exercice, reflète un cœur plus efficace.

2. LE VOLUME D'ÉJECTION SYSTOLIQUE

- Le volume d'éjection systolique (VES) augmente également avec l'exercice.
- Il est fonction de 4 facteurs : le retour veineux, la capacité de remplissage ventriculaire qui conditionnent le volume maximum de sang qui peut être contenu dans les ventricules, la pression sanguine dans l'aorte et le tronc artériel pulmonaire qui conditionnent l'aptitude des ventricules à résider et donc la force avec laquelle le sang va être éjecté et la pression qui sera exercée dans le système artériel.
- Le VES augmente jusqu'à une intensité d'exercice correspondant à 40-60 % des possibilités maximales, même si l'exercice est poursuivi jusqu'au maximum.
- Le VES de repos est plus élevé en position allongée qu'en position debout.
- En position allongée, comme en natation, le VES augmente à l'exercice.

Le sang ne s'accumule pas dans les extrémités en position allongée. Le retour du sang veineux vers le cœur est aussi facilité.

Les mécanismes responsables de l'augmentation du VES à l'exercice font intervenir la loi du cœur qui stipule que le VES est fonction du degré d'étirement des parois ventriculaires qui fait que plus le ventricule est étiré, plus celui-ci est capable de développer une force importante, lors de la contraction suivante. Ceci ne peut se produire que si le retour veineux augmente. La stimulation sympathique des systèmes artériels et veineux, la contraction des muscles actifs, l'augmentation de la respiration et les variations de la pression intra thoracique et intra abdominale contribuent à faciliter le retour veineux.

Une augmentation de la contractilité des fibres ventriculaires même en l'absence d'augmentation du volume est aussi évoquée. Comme la fréquence cardiaque augmente avec l'intensité de l'exercice, le volume peut diminuer légèrement en raison d'une diminution du temps de remplissage ventriculaire.

3. LE DÉBIT CARDIAQUE

Le débit cardiaque est le produit de la fréquence cardiaque par le volume d'éjection systolique.

Connaissant les variations de chacun de ces facteurs à l'exercice, il est possible de prévoir celle du débit cardiaque.

Au repos, le débit cardiaque est d'environ 5l/min. Il augmente linéairement avec l'intensité de l'exercice pour atteindre 20 à 40l/min. Cette relation linéaire entre le débit cardiaque et l'intensité de l'exercice permet de satisfaire l'augmentation des besoins des muscles en oxygène.

4. LES ADAPTATIONS GÉNÉRALES DE LA FONCTION CARDIAQUE

Pour des niveaux faibles d'exercice, l'augmentation du débit cardiaque est due à la fois à l'augmentation de la fréquence cardiaque et à celle du VES. Mais dès que l'exercice dépasse 40 % à 60 % des possibilités maximales, le VES augmente moins et l'élévation du débit cardiaque s'explique alors essentiellement par l'accélération de la fréquence cardiaque.

5. LE DÉBIT SANGUIN

L'élévation du débit sanguin à l'exercice permet d'expulser une plus grande quantité de sang dans le système artériel. Ce volume supplémentaire se destine aux organes qui en ont le plus besoin c'est-à-dire les muscles actifs. C'est l'objectif de la redistribution sanguine ou balancement circulatoire.

Grâce à la vasomotricité artériolaire, le sang est dérivé des territoires inactifs vers les territoires actifs dont les besoins sont accrus. Les muscles qui ne reçoivent au repos que 15 % à 20 % du débit sanguin total peuvent ainsi percevoir jusqu'à 80 % à 85 % de celui-ci, lors d'un exercice épuisant. Ceci n'est possible que par la diminution du débit sanguin à destination des visières, reins, foie, estomac et intestins.

Plusieurs mécanismes y contribuent et tout d'abord la mise en jeu de l'ensemble du système nerveux sympathique. Au niveau des viscères, territoires peu actifs pendant l'exercice, la stimulation des fibres sympathiques déclenche une vasoconstriction qui favorise la redistribution du sang au profit des territoires actifs.

À l'inverse, au niveau des muscles squelettiques, les fibres sympathiques ont un effet vasodilatateur.

Si la température centrale du corps s'élève en réponse à l'exercice ou par exposition à la chaleur, le sang doit être dérivé vers la peau pour aider à l'élimination de la chaleur. Ceci diminue d'autant le volume de sang disponible pour les muscles en activité et donc les performances, lors de compétitions réalisées en ambiance chaude.

À ce mécanisme s'ajoute l'effet vasodilatateur induit par les modifications physico-chimiques dans les territoires en activité, en réponse à l'exercice.

À l'effort, l'activité métabolique des muscles augmente et entraîne l'accumulation de sous-produits, une acidose

locale, la production de CO_2 et l'augmentation de la température musculaire. Tous ces facteurs ont un effet direct vasodilatateur sur les artéioles correspondantes, augmentant à leur niveau le débit sanguin par un phénomène d'autorégulation. Y participe également la diminution de la pression partielle locale en oxygène (par augmentation de la consommation d'oxygène du muscle) et éventuellement la libération d'autres substances vasodilatatrices.

6. LA PRESSION ARTÉRIELLE

Pour satisfaire efficacement l'augmentation des besoins des tissus les plus actifs, il faut que les échanges entre le sang et les tissus s'effectuent tout à fait correctement. Il faut donc que le sang soit délivré à un débit suffisant et régulier. Un des déterminants de celui-ci est la pression du sang dans les artères.

La régulation de la pression artérielle à l'exercice apparaît donc comme un phénomène prioritaire.

Dans les activités d'endurance les plus courantes, sollicitant une grande masse musculaire, la pression artérielle systolique augmente proportionnellement à l'intensité de l'exercice, de 120 mmHg environ, au repos, à plus de 200 mmHg, à l'effort maximal. Il est très rare d'observer des valeurs de 240 à 250 mmHg chez des athlètes très entraînés non hypertendus.

L'augmentation de la pression artérielle systolique s'explique essentiellement par l'augmentation du débit cardiaque. Elle permet d'assurer un débit suffisamment rapide dans tout le système vasculaire, jusque dans les capillaires les plus périphériques, et par là même d'approvisionner les tissus.

À l'inverse, la pression artérielle diastolique change peu dans ce type d'activité, même si l'intensité d'exercice augmente.

La pression artérielle diastolique correspondant à la pression résiduelle qui règne dans le système vasculaire lorsque le cœur est en diastole. Elle évolue donc peu à l'effort.

Les exercices de force s'accompagnent d'une augmentation beaucoup plus marquée de la pression artérielle (qui peut dépasser 350 mmHg).

7. LE SANG

Les multiples fonctions du milieu circulant participent à améliorer les échanges entre les 2 secteurs sanguin et musculaire et par là même contribue à une meilleure performance.

Au repos, le contenu du sang en oxygène est de 20 ml pour 100 ml dans le système artériel et de 14 ml pour 100 ml dans le système veineux.

La différence entre ces 2 valeurs ($20\text{ml}-14\text{ml}=6\text{ml}$) constitue la différence artérioveineuse ($\text{CaO}_2-\text{CvO}_2$).

Cette valeur représente la quantité d'oxygène prélevée dans le sang par l'ensemble des tissus.

À l'exercice, $\text{CaO}_2-\text{CvO}_2$ augmente progressivement avec l'intensité.

À l'effort maximal, la valeur de repos peut être multipliée par 3. Ceci témoigne d'une diminution en oxygène du sang veineux qui peut approcher de 0. Cependant, dans le sang veineux et dans droite, le contenu baisse rarement en dessous de 2 à 4 ml pour 100 ml de sang. En effet, le sang veineux provenant des muscles en suite au sang veineux provenant des territoires mi actifs qui utilisent peu d'oxygène.

Dès le début de l'exercice, il existe une fuite du liquide plasmatique vers les espaces interstitiels en raison de l'augmentation de la pression artérielle et de la pression hydrostatique qui s'exerce contre la paroi des capillaires et de l'augmentation de la pression osmotique (par accumulation des sous-produits métaboliques dans les muscles actifs).

Toute réduction du volume plasmatique entraîne une hémococoncentration, une élévation de l'hématocrite et améliore la capacité de transport de l'oxygène.

À l'exercice le pH du sang peut être l'objet de variations. Tant que l'exercice ne dépasse pas 50 % des possibilités maximales, le pH varie peu. Au-delà de cette intensité, il diminue et le sang devient plus acide (mise en jeu du système anaérobie). Modérée au début, l'acidose peut apparaître très rapidement à l'approche de l'effort maximal.

