

U13-Système cardiovasculaire
Pr Jean-Jacques Mercadier
Le 15/02/2017 de 13h30 à 15h30
Ronéotypeur : Quentin LEDUC
Ronéolecteur : Slimane Yanir CHOUBANE

Cours n°8: La circulation: Principes généraux – Le cycle cardiaque

Le cours est très proche voir identique à celui dispensé en PACES.

Le professeur conseille fortement de revoir les cours « Transports membranaire- Excitabilité cellulaire » et « Excitation, contraction, relaxation musculaire » dispensés en PACES.

Il conseille également la lecture de « Les fondamentaux de la pathologie cardiovasculaire ».

Sommaire

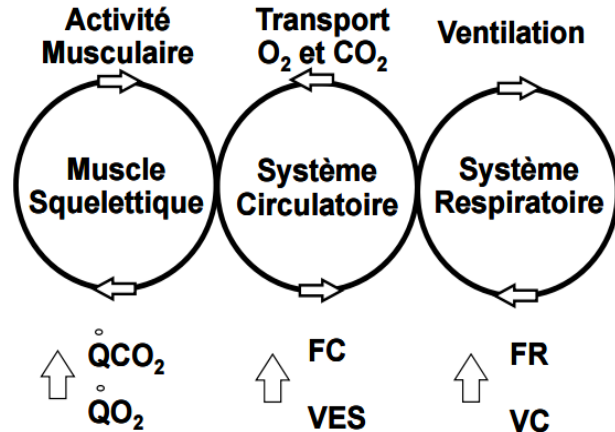
I. La fonction de la circulation.....	2
II. Organisation de la circulation.....	2
III. Le cœur et le cycle cardiaque.....	4
1.Activation :.....	4
2.Cycle cardiaque :.....	5
a. Décrivons maintenant les différentes étapes du cycle cardiaque :.....	6
b. Les pressions dans les oreillettes :.....	7
c. La boucle pression-volume (se lit dans le sens anti-horaire):.....	7
d.Les pressions cardiaques :.....	8
IV. Le remplissage des ventricules : notion de précharge.....	8
1.Le retour veineux:.....	8
2.La relaxation :	8
3.Les propriétés passives du ventricule :	9
4. Le contraction des oreillettes :	9
V. La contraction des ventricules :.....	9
1. Phase de contraction sans éjection ou contraction isovolumique.....	9
2. Phase d'éjection du volume d'éjection systolique (VES).....	10
VI. Résistances à l'éjection du VES par les ventricules, notion de postcharge	10
VII. Le débit cardiaque.....	11

I. La fonction de la circulation

La vie de la cellule nécessite de **l'énergie** produite par les mitochondries grâce à la respiration cellulaire qui consomme de l'O₂ et produit du CO₂.

Chez les êtres unicellulaires, les échanges se font par **diffusion passive** possible seulement pour de **très courtes distances** car la durée de transport est **inversement proportionnel à la distance** ainsi n'est pas viables pour les êtres pluricellulaires. C'est ici qu'intervient **la circulation** dont la fonction est **le transport de gaz et de nutriments** dans tout l'organisme, afin de produire de l'énergie.

En cas d'activité musculaire, le **besoin en ATP augmente**, ce qui nécessite une utilisation accrue d'O₂ qui entraîne une production d'une quantité supérieure de CO₂. Ce besoin est ressenti au niveau du tronc cérébral qui enverra des signaux augmentant la quantité de gaz transporté par l'intermédiaire d'une croissance de la fréquence cardiaque et du volume d'éjection systolique, et par conséquent la fréquence respiratoire et le volume courant croissent (le volume courant est le volume expiré lors de la respiration non forcée). Il faut noter que **l'insuffisance cardiaque correspond à l'incapacité d'assurer ce transport de gaz et de nutriments**.



II. Organisation de la circulation

Le système circulatoire est composée de **deux pompes** et de **deux systèmes de tuyaux** organisés en série :

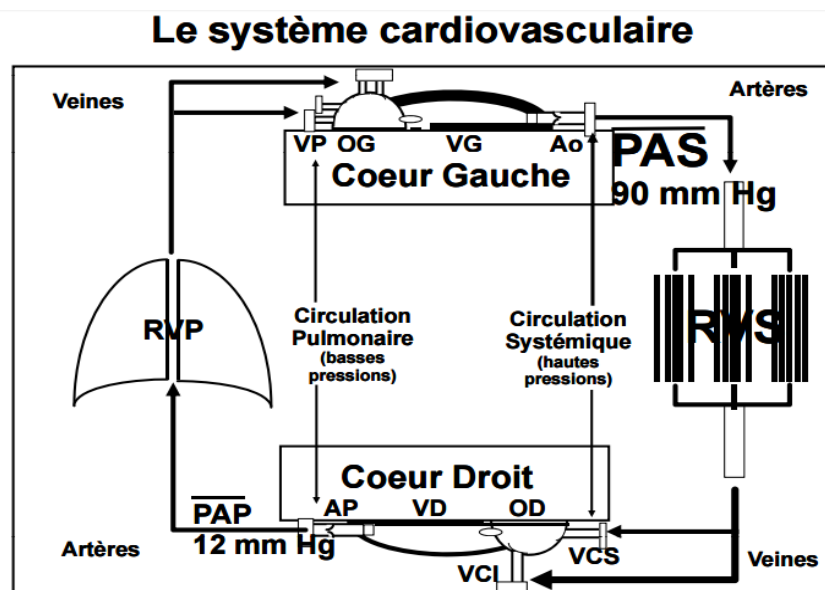
- La grande circulation** (ou circulation systémique) avec des pressions élevées, vascularise tous les organes. Les différents organes sont vascularisés en parallèles les uns par rapport aux autres.

- La petite circulation** (ou circulation pulmonaire) avec des pressions basses, permet l'hématose au niveau des poumons.

Le système circulatoire est analogue à un système électrique, la **tension U** est assimilable à la **pression artérielle moyenne PA**, la **résistance R** aux **résistances vasculaires RV**, et l'**intensité I** au **débit vasculaire Q_c**. Ainsi :

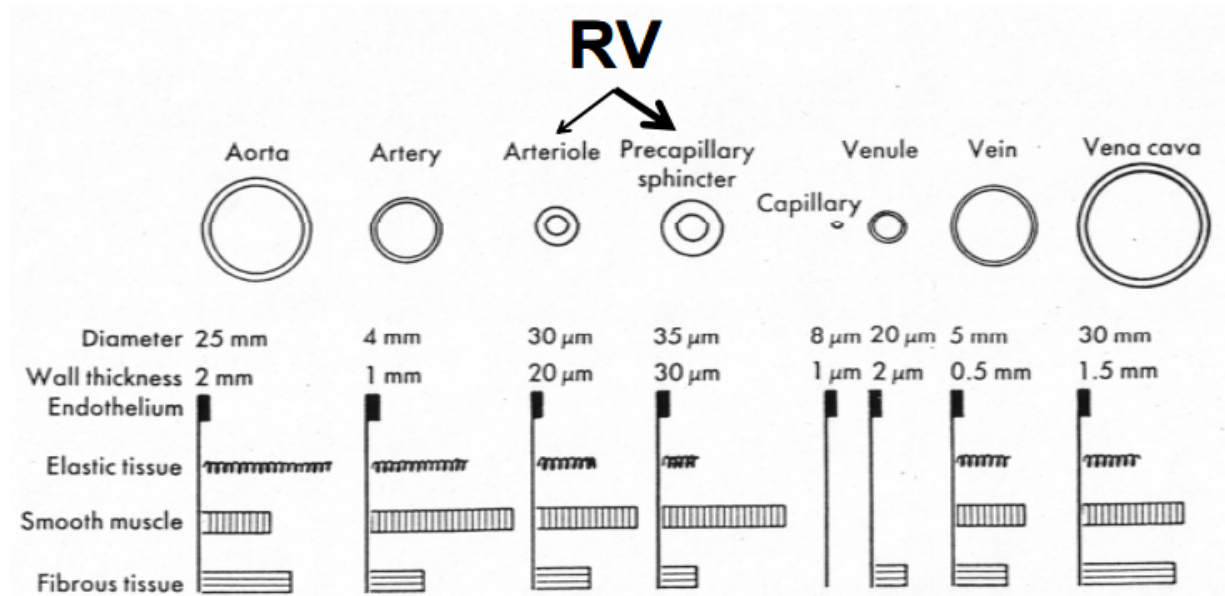
$$U = R \times I \Rightarrow \overline{PA} = R_V \times Q_c$$

$$\Leftrightarrow Q_c = \overline{PA} / R_V$$



(à noter : le débit est le même en tout point du circuit donc lorsque les résistances augmentent la pression artérielle moyenne doit également augmenter).

La **PAS (Pression artérielle systémique)** est de **90mmHg**, on peut en déduire qu'il existe des résistances vasculaires importantes, qui permettent un débit constant tout au long du circuit, par rapport aux résistances vasculaires, **plus faible**, de la circulation pulmonaire avec une **pression artérielle pulmonaire de 12 mmHg**.



Les différents vaisseaux n'ont pas tous la même composition histologique qui va faire varier leur **capacité de compliance** et leurs **résistances vasculaires**.

Décrivons les **compositions et propriétés** de chaque type de vaisseaux :

Tout d'abord, tous les vaisseaux sont composés d'un **couche interne d'endothélium** ;

→ **L'aorte** : le diamètre est important ; la paroi est peu épaisse ; il y a une composante élastique importante ; une composante musculaire plus faible ; l'aorte doit être **compliante afin de créer un flux laminaire**.

→ **Les artères** : le diamètre est moins important ; la paroi est peu épaisse ; la composante musculaire est plus importante ; les artères sont **moins compliantes que l'aorte**.

→ **Les artérioles et sphincters précapillaires** : le diamètre est petit ; la paroi est épaisse ; la composante musculaire est importante, ce qui permet une vasodilatation et vasoconstriction de ces vaisseaux ; ces deux types de vaisseaux sont **le siège des résistances vasculaires**.

→ **Les capillaires** : le diamètre est de 8 microns ; ils sont composés de cellules endothéliales exclusivement ; leur petit diamètre oblige à la déformabilité des globules rouges qui **permet des échanges gazeux** avec les tissus.

→ **Les veinules** : il n'y a pas de composantes musculaires.

→ **Les veines** : il existe une composante musculaire

Pour les veines et les veinules, on observe une **grande capacité de distension et de dilatation**.

→ **Les veines caves** : elles sont **plus compliantes que les veines et veinules** ; elles sont plus grandes que l'aorte.

A noter : les veines sont **un réservoir de sang de l'organisme** grâce à leur **compliance**. Dans le domaine pharmaceutique, on utilise des donneurs de NO qui favorise la vasodilatation des veines et permet ainsi d'augmenter la quantité de sang stocker.

Concernant les résistances vasculaires, elles suivent la **loi de Poiseuille** défini par :

$$R = \frac{8 \mu L}{\pi r^4}$$

Si le **rayon augmente**, les **résistances vasculaires diminuent** fortement à cause de l'exposant 4. La viscosité μ ainsi que la longueur L augmentent directement avec les résistances vasculaires.

Pour des résistances en série, les résistances totales sont égales à la somme des résistances.

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Raisonnons par l'absurde : si les résistances vasculaires fonctionnaient en série alors le dernier organe vascularisé ne recevrait que les restes de nutriments et les déchets produits en amont.

Le système vasculaire se doit donc de fonctionner en parallèle optimiser les résistances. Ainsi la somme des résistances se formule par :

$$1/R_{tot} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$$

Important: **La vascularisation des organes « en parallèle »** permet :

-Que chacun reçoive un **sang riche en O2** et en **nutriments** et pauvre en CO2 et produits de déchets.

-Une **régulation indépendante de chaque lit vasculaire** en débit et éventuellement en pression (exemple du rein : au niveau de glomérule, nous avons deux artéioles, une afférente et une efférente, cela permet le maintien d'une pression de perfusion ; alors que lors d'un effort physique, la vascularisation de certains organes est diminuée pour favoriser les muscles).

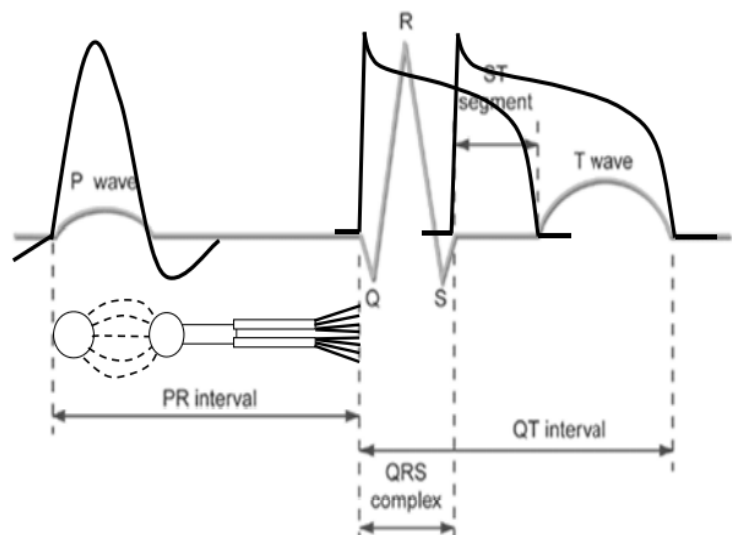
III. Le cœur et le cycle cardiaque

Le cœur est une **pompe pulsatile** (donc non continue). Son cycle est décomposable en **deux phases** : une phase de remplissage pendant la diastole puis une phase de vidange/éjection pendant la systole.

Conduction de la dépolarisation du noeud sinusal aux myocytes ventriculaires

1. Activation :

La dépolarisation commence au niveau du **noeud sinusal** dans l'**oreillette droite**, puis est transmis de **proche en proche** à tous les myocytes de l'oreillette droite pour ensuite atteindre les myocytes de l'oreillette gauche. Cela permet la contraction des oreillettes entraînant le **remplissage des ventricules**. Ensuite la dépolarisation atteint le **noeud atrio-**



ventriculaire puis le **tronc de faisceau de His**, les **branches du faisceau de His**, le **réseau de Purkinje** puis atteint **la pointe de ventricules**. Cela engendre la dépolarisation des myocytes du ventricule de **la pointe vers la base**. Ainsi, les ventricules et oreillettes se contractent de façon non simultanée c'est à dire en **opposition de phase**, cela est dut au délai de conduction.

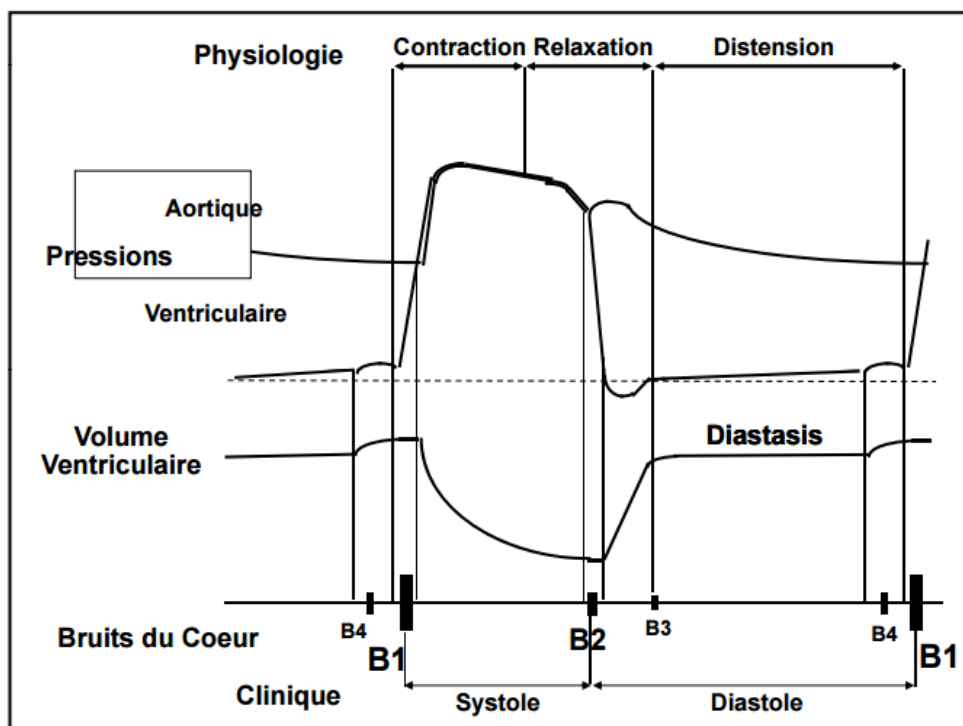
L'onde P est dut à la dépolarisation des oreillettes. L'onde Q correspond à la première négativité, l'onde P à la première positivité, l'onde S à la deuxième négativité. La repolarisation du dernier myocyte de la base correspond à la fin de l'onde T. La **somme des dépolarisations correspond au tracé d'un ECG**.

L'intervalle PR, c'est à dire l'intervalle correspondant à la dépolarisation diastolique lente de chaque cellule du système cardionecteur est d'une **durée** de 100 à 200ms. Le complexe QRS est d'une durée de 8 centièmes de seconde. Enfin, l'intervalle QT a une durée qui varie entre chaque battements et selon la fréquence cardiaque. Sa limite supérieure au delà de laquelle cette durée devient pathologique est de 450ms.

2.Cycle cardiaque :

Tout d'abord la définition clinique de **la systole** correspond à l'espace (court) entre le **bruit B1** (fermeture de la valve mitrale) et **B2** (fermeture de la valve aortique). La diastole est l'espace (long) **entre B2 et B1**.

Ces courbes sont à maîtriser et à savoir redessiner. L'abscisse correspond au temps. Décrivons-les du bas vers le haut.



Le volume ventriculaire :

A la fin de la diastole, le **volume ventriculaire est maximum** puis par l'éjection le volume diminue jusqu'à un **minimum en fin de systole**. Pendant la diastole, le ventricule se remplit rapidement au début, puis continue de croître de façon moins importante jusqu'à la fin de la diastole.

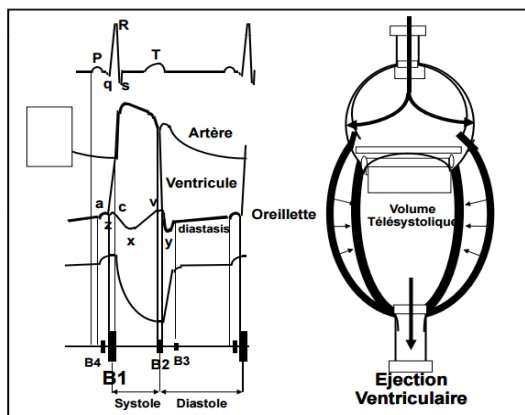
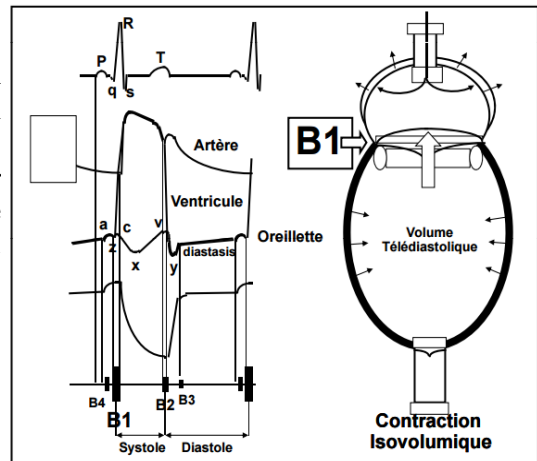
Les pressions ventriculaire et aortique :

Dans le ventricule, en fin de diastole, la pression est faible. La contraction isovolumique en début de systole entraîne **une augmentation importante de pression** pour atteindre une pression de **70mmHg** qui est la pression de l'aorte, à ce moment **la valve aortique s'ouvre** et les **courbes de pressions ventriculaire et aortique se superposent**. Les deux pressions augmentent pour atteindre **un pic à 120mmHg**. On a ensuite une diminution des deux pressions qui sera **plus rapide pour le ventricule**. Enfin, pendant la diastole, il y a une **très faible augmentation de pression** dans le ventricule. Il faut noter que contrairement à ce qui est représenté dans ce schéma, la **contraction et la relaxation ne sont pas réellement dissociées** mais elles se superposent avec une composante qui prend plus ou moins le pas sur l'autre en fonction du moment.

a. Décrivons maintenant les différentes étapes du cycle cardiaque :

- **Contraction isovolumique :**

Au **début de la systole**, on a une contraction du myocarde **sans modification du volume** (le sang est un fluide et n'est donc pas compressible). Ainsi, la pression dans les ventricules va augmenter jusqu'à atteindre **70mmHg** pour le ventricule gauche qui permet **l'ouverture de la valve aortique**. Le volume dans les ventricules correspond au **volume télédiastolique**.

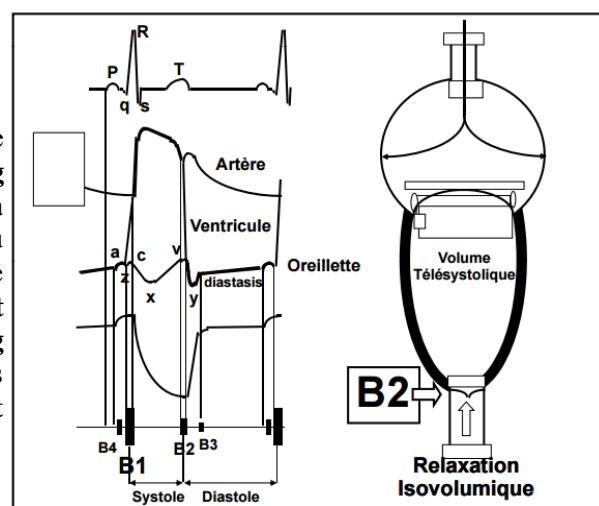


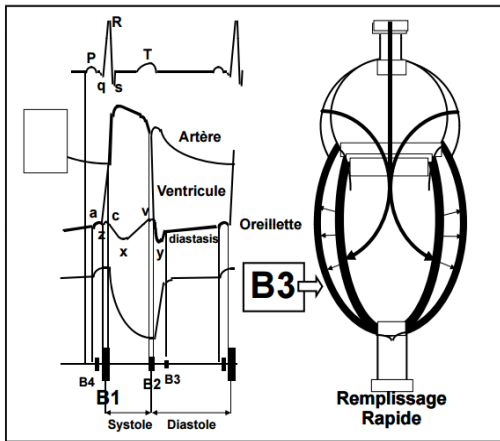
- **La phase d'éjection :**

L'ouverture de la valve aortique dut à **l'équilibration des pressions ventricule-aorte ou ventricule-artère pulmonaire** permet **l'éjection du sang dans l'aorte** ou dans l'artère pulmonaire. On a donc une **diminution importante du volume ventriculaire**. Pour les pressions, elles augmentent jusqu'à une certaine valeurs (120mmHg pour le ventricule gauche) puis diminue doucement.

- **La relaxation isovolumique :**

On a une **baisse de pression** dans le ventricule qui **devient inférieure à celle de l'aorte**, ainsi le **sang revient en arrière ce qui provoque la fermeture de la valve aortique**. C'est cette fermeture qui correspond au **bruit B2** et donc la fin de la systole. Le volume ne change pas car **les valves aortique et mitrale sont fermées**. Cette étape est très importante car **le sang retourne en arrière** ce qui lui permet de rentrer dans les artères coronaires qui naissent de la racine de l'aorte et rend possible la **vascularisation du myocarde**.



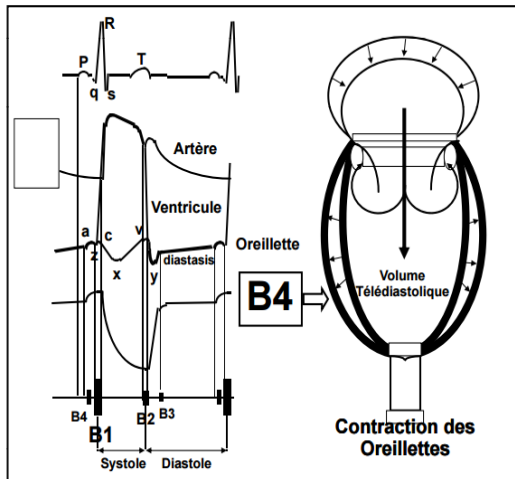
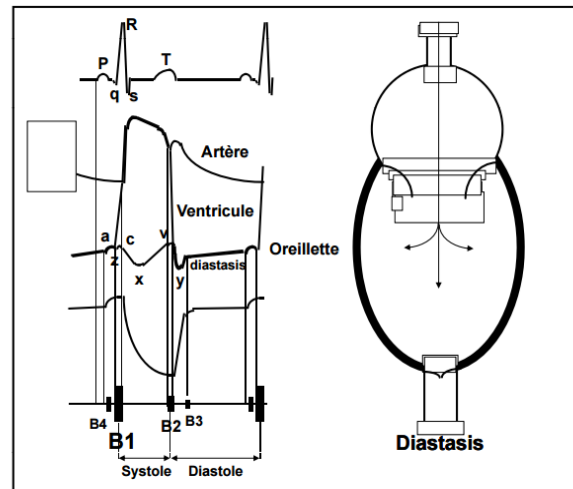


- **Le remplissage rapide :**

On a l'ouverture de la valvule mitrale, ce qui provoque une entrée importante de sang de l'oreillette vers le ventricule qui se distend rapidement. Le bruit B3 correspond à l'entrée brutale du sang. Il ne s'entend pas physiologiquement grâce à la distension du ventricule. Il faut noter que le **remplissage rapide ne correspond pas à la fin de la relaxation du ventricule**, car celle-ci permet une diminution de pression par l'augmentation de volume qui offre un **phénomène d'aspiration du sang**. A ce moment là, les pressions dans le ventricule sont presque négatives.

- **Le diastasis :**

C'est la phase pendant laquelle il **ne se passe quasiment rien**. On observe une très faible augmentation de volume et de pression. A ce moment là les pressions entre les oreillettes et les ventricules sont superposables. **Si la fréquence cardiaque augmente, on a une diminution du diastasis.**



- **La contraction des oreillettes :**

La diastole se termine par la contraction des oreillettes. Le volume du ventricule augmente pour atteindre le volume télédiastolique. La valvule mitrale est ouverte donc la pression entre l'oreillette et le ventricule sont les mêmes.

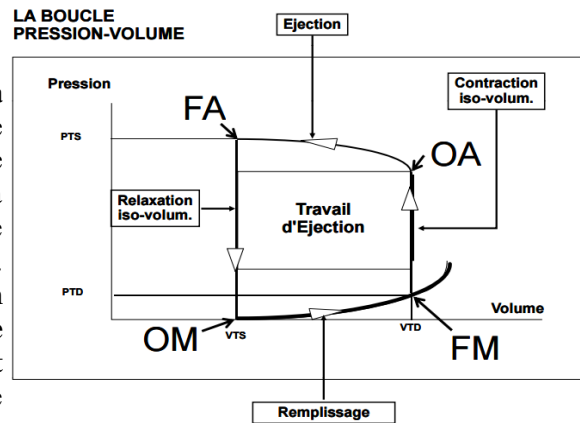
b. Les pressions dans les oreillettes :

On observe plusieurs pressions dans les oreillettes (a,z,c,x,v,y). Les deux qui sont nécessaires à retenir sont l'**onde a** correspondant à la contraction des oreillettes qui est la pression la plus importante dans l'oreillette et le **creux y** qui correspond à la pression la plus faible par la vidange de l'oreillette au moment de l'ouverture de la valvule mitrale. Les autres variations de pressions correspondent entre autres à l'arrivée du sang

dans l'oreillette depuis les poumons et à un contre-coup du ventricule droit lors de l'éjection ventriculaire.

c. La boucle pression-volume (se lit dans le sens anti-horaire):

On commence à partir de l'ouverture de la **valvule mitrale**, c'est à dire au volume télédiastolique avec des pressions presque nulles. Les ventricules se remplissent par le remplissage rapide, le diastasis et la contraction des oreillettes pour atteindre le volume télédiastolique avec une pression légèrement augmentée. La **valvule mitrale se ferme**, on a la contraction isovolumique jusqu'à l'ouverture de la **valve aortique** quand la pression a atteint 70mmHg. Le sang se fait éjecté du ventricule, le volume diminue pour atteindre le volume téléystolique. La pression, elle, augmente jusqu'à un pic puis rediminue (cette diminution n'apparaît pas sur la boucle ci-dessus). Enfin, on a la **fermeture de valve aortique** et donc le début de la relaxation isovolumique qui termine la boucle.



L'aire de cette boucle correspond au **travail d'éjection** car la pression par un volume correspond à un travail, il nécessite une consommation d'énergie.

d. Les pressions cardiaques :

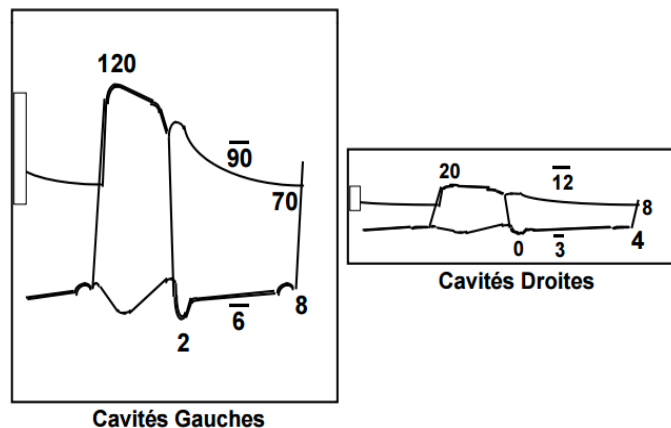
Les valeurs de pressions sont à connaître.

- **Les pressions au remplissage :**

La pression du pic est de 120mmHg ; la pression minimum est de 70mmHg ; la pressions moyenne est de 90mmHg

- **Les pressions d'éjection :**

Les pression du creux y est de 2mmHg ; le point télédiastolique est de 8mmHg ; la pression moyenne est de 6mmHg.



Pour la cavité droite les valeurs sont plus faibles.

Il faut noter que la baisse de pression artérielle suivant la fermeture de la valvule aortique correspond à l'**incisure catacrote** et la légère remontée de pression suivante se nomme l'**onde dicrote**.

La valeur de 8mmHg pour la pression télédiastolique est importante car si elle est augmentée, cela signifie que le myocarde n'est plus capable de fournir le travail nécessaire à l'éjection du sang, le sujet est en insuffisance cardiaque dont le symptôme principal est la dyspnée qui est relative à l'état d'effort.

IV. Le remplissage des ventricules : notion de précharge.

Le remplissage des ventricules dépend de 4 facteurs :

1. Le retour veineux:

C'est la **quantité de sang qui revient au cœur droit par les veines caves puis au cœur gauche par les veines pulmonaires**. Par exemple : en cas d'exercice physique, on a une augmentation de la ventilation et de la contraction, ce qui permet une augmentation du retour veineux.

2. La relaxation :

Il y a un **repompage du calcium dans les réticulum sarcoplasmique permit par Serca2**. C'est la **relaxation active**.

La **relaxation passive**, quant à elle est permise, par la **décompression des éléments élastique** des sarcomères en parallèle (effet analogue à un ressort qui se détend après avoir été comprimé pendant la contraction) et à **l'effet érectile du remplissage de la circulation coronaire**. Cela permet une **aspiration de sang par le ventricule**.

3. Les propriétés passives du ventricule :

Cela concerne la **composition intrinsèque du myocarde** qui peut faire varier la compliance/rigidité du myocarde.

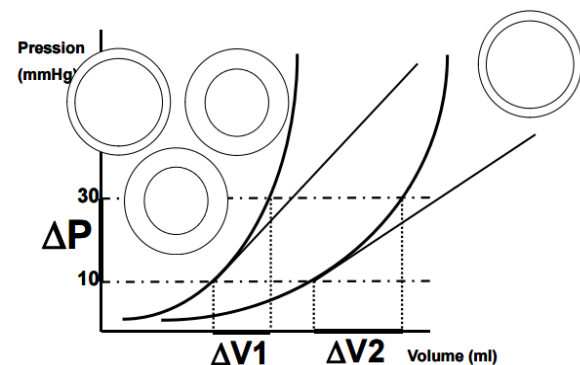
On observe que pour **une même variation de pression** dans le myocarde, le volume varie en fonction de plusieurs facteurs :

-Si la paroi est plus épaisse sans modification de la composition, on a une augmentation de la rigidité et donc une diminution de la variation de volume des ventricules

-Si la composition change (par exemple apparition de fibrose) sans modification de l'épaisseur de la paroi, on observe une augmentation de la rigidité et donc une diminution de la variation de volume des ventricules.

-Le plus souvent en pathologie c'est à la fois la composition et l'épaisseur qui varient pour diminuer la variation de volume. On retrouve cela dans des hypertensions et des valvulopathies.

PROPRIÉTÉS PASSIVES DU VENTRICULE : Compliance/Rigidité ventriculaire



$$R = \Delta P / \Delta V = 1 / C$$

Compliance = Capacitance ; Rigidité = Elastance

4. La contraction des oreillettes :

Elle concerne la fin du remplissage pour atteindre la pression télédiastolique du ventricule gauche (PTDVG)

V. La contraction des ventricules :

1. Phase de contraction sans éjection ou contraction isovolumentique

La contraction isovolumentique va varier **en fonction de l'état de remplissage du ventricule**. C'est à une pression de 8mmHg que le point optimal est atteint.

Expérience de Frank :

En 1895, Frank a démontré que la contraction isovolumique **dépendait directement du taux de remplissage**. En effet, en ligaturant l'aorte d'une grenouille, il empêche l'éjection de sang. Donc, pour la première contraction on observe des pressions et volumes qui sont physiologique mais sans éjection. Pour la deuxième, on a une augmentation du volume et de pression donc de la contraction dut au fait que le ventricule ne se vide pas et qu'il existe encore un retour veineux. On a encore une augmentation de pression et de volume pour la 3ème contraction. Enfin pour la 4ème contraction, on observe une augmentation du volume mais avec une diminution de pression. La contraction diminue car la superposition actine-myosine disparaît à cause de l'importance de l'étirement. En physiologie, ceci est impossible car il y a une addition de sarcomère.

1. Contraction sans éjection : expérience de Frank

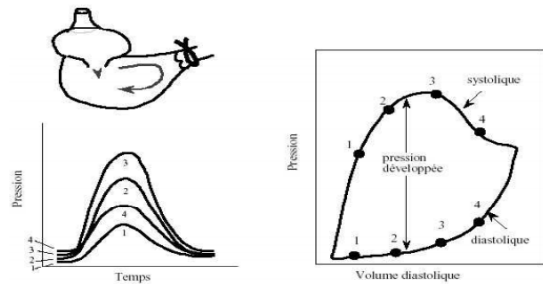


Figure IV. 8 :
Expérience de Frank (1895) sur cœur de grenouille clampé à l'aorte alors que le remplissage ventriculaire est libre. Les cycles cardiaques 1, 2, 3, 4 se déroulent avec des volumes télédiastoliques croissants. Jusqu'au 3e cycle, la pression produite par le ventricule augmente. Cependant au 4e cycle, la pression systolique décroît.

Pour conclure, plus la précharge est importante, ce qui correspond à un remplissage important du ventricule, plus la contraction sera importante.

2. Phase d'éjection du volume d'éjection systolique (VES)

Ce VES est dépendant de la précharge. En effet, plus la précharge est grande, plus VES est augmenté. Cela s'observe dans le cas de la fibrillation atriale (l'oreillette ne se contracte pas de façon forte et régulière, elle « tremblote »), la précharge n'est donc pas optimale ce qui diminue le VES.

Si on augmente le retour veineux et la pression de remplissage, le VES augmentera. C'est ce que l'on observe lors d'un effort physique et qui provoque une augmentation importante du débit. Si le VES n'augmentait pas, la pression artérielle pulmonaire serait trop importante, ce qui provoquerait des oedemes du poumon.

L'augmentation de la contraction lorsque le volume télédiastolique est un phénomène de feed-forward appelé également phénomène de Frank-Starling

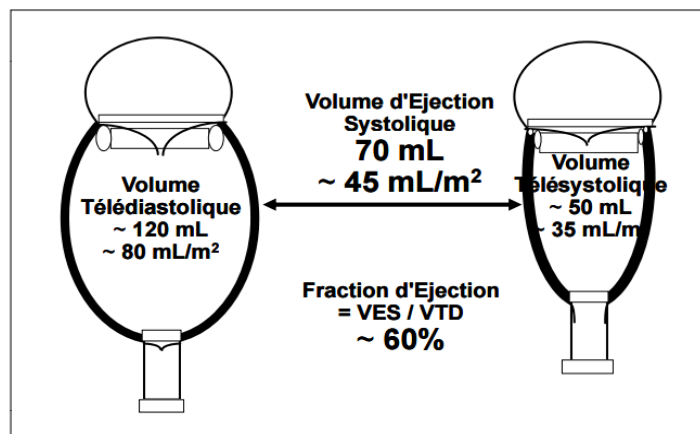
Le VES se calcule facilement : **VES=VTD-VTS.**

Avec VTD : volume télédiastolique (le volume à la fin du remplissage) et VTS : volume télésystolique (le volume à la fin de l'éjection).

Les valeurs de volume cardiaque sont à connaître (schéma ci-contre):

La fraction d'éjection correspond à la proportion du VTD éjecté lors la contraction. Elle représente la performance contractile du ventricule. Elle n'est pas une évaluation de la contractilité car celle-ci dépend de la précharge et de la postcharge.

Les volumes cardiaques



VI. Résistances à l'éjection du VES par les ventricules, notion de postcharge

La postcharge correspond à **tout ce qui s'oppose à l'éjection du volume d'éjection systolique**. C'est une notion complexe et plus difficile à définir précisément que la précharge. Elle dépend de trois facteurs :

-**La pression** : La première résistance que rencontre le sang et celle relative à l'ouverture de la valve aortique, et donc dépend étroitement de la pression régnant dans le ventricule.

-**La rigidité vasculaire** : cela concerne l'aorte et les artères, plus la rigidité sera importante, plus la postcharge sera grande. Cette rigidité augmente avec l'âge à cause de la calcification et de l'athérome des gros vaisseaux.

-**Les résistances vasculaires** : celle-ci se retrouve, comme dit précédemment, dans les artérioles et sphincters pré-capillaires.

La postcharge est donc un mix de ces 3 facteurs qui tient compte de la pression à un temps t.

L'hypertension artérielle dépend de ces facteurs mais **est variable selon l'âge** :

Un **sujet jeune** aura des **résistance périphériques importantes** qui auront des répercussions sur **la diastole** provoquant l'hypertension artérielle.

Chez un **sujet âgé**, ce sont **les gros troncs** qui sont touchés par les calcifications ce qui se répercute sur **la systole** entraînant l'hypertension artérielle.

VII. Le débit cardiaque

• Formules du débit cardiaque (Q_c) :

$$Q_c = \overline{PA} / RV$$

$$Q_c = VES \times FC$$

$$Q_c = VO_2 / DA_{VO_2}$$

Pour un VES de 70ml et une fréquence cardiaque de 70 battements par minutes, obtient un débit d'environ **5L/min ± 1** (ce sont les valeurs normales de débit).

On utilise **l'index cardiaque**, qui correspond au quotient du débit cardiaque par la surface corporelle, pour comparer des sujets de taille et poids différents. **La valeur normale est 3,3 L/min/m² ± 0,3.**

Les distributions du débit représentés ci-dessous sont à apprendre.

Myocarde: 250 mL/min (5%)	Répartition du débit cardiaque au repos :
Muscles Squelettiques: 850 mL/min (16%)	
Cerveau: 750 mL/min (15%)	
Peau: 450 mL/min (8%)	
Rein: 1200 mL/min (22%)	
Circulation Hépat-Splanchnique: 1500 mL/min (28%)	
Reste: 350 mL/min (6%)	

Environ
5 000 mL/min

50%

Dédicace :

A Slimane, mon cher Ronéoficheur

A Boimare, mon collègue de pause, de travail, de rien foutre, de siège du local...

A Adrien dont les histoires se terminent toutes de la même façon, un peu de continuité dans ce monde de surprise, ça fait du bien.

A Marie-Aude, le meilleur journal intime malgré le pire auteur (ça c'est un vrai poulet!!)

A la meilleure marraine Elo', qui m'apprend la vie : « Comment ne pas faire le ménage ? »

A Sixtine, glorieuse inventrice du KKKar !

Au tuto', où mon cul est gravé sur leur canap', et à vous qui me supportez chaque aprem de squat.

A Armand qui doute.

A Mich, mon futur Papa

A tout ceux que je vais oublier parce qu'il est déjà 17h14 et j'ai toujours pas envoyer cette putain de ronéo : entre autres Julie, Marion, Dina, Guillaume, Christelle, Madalin.... et j'en rate !! Coeur sur vous !!

A toi qui lit cette dédicace, retourne travailler sinon on manquera de place à la BU cet été !!

Et enfin, le meilleur pour la fin, à Juliette qui ose me supporter.

Zoubi les enfants !!