

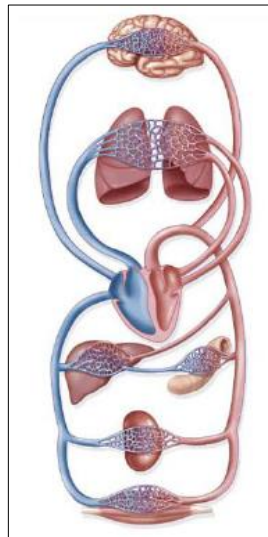
BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION 2

I. Particularités liées à l'anatomie

- ❖ Le système vasculaire est organisé de façon à optimiser la circulation sanguine (5L de sang chez l'adulte) et surtout les échanges++ avec les organes.

On distingue 2 types de circulation :

- ✓ Circulation Systémique : elle part du ventricule gauche et revient à l'oreillette droite par les veines caves sup et inf → Pression artérielle moyenne = 13KPa = 98 mmHg
- ✓ Circulation Pulmonaire : elle part du ventricule droit pour aller s'oxygéner dans les poumons (**hématose**) et revient à l'oreillette gauche par les veines pulmonaires → Pression artérielle moyenne = 2.6KPa = 20mmHg
- ✓ Il faut surtout retenir qu'il y a une **forte différence de pression** entre ses deux circulations (5x supérieure pour la circulation systémique).



On distingue 3 secteurs :

- ✓ Artériel
- ✓ Capillaire : lieu des échanges ++
- ✓ Veineux : volume sg + important (réserve)

Notion de section individuelle/globale

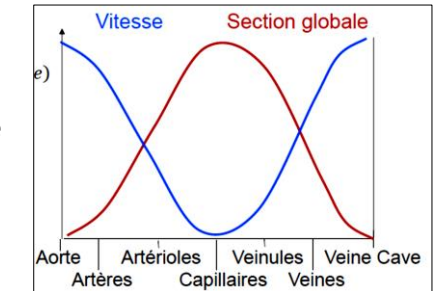
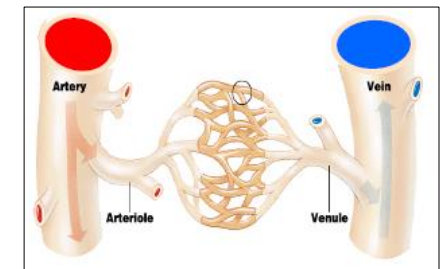
On part de l'aorte, vaisseau unique donc pas d'ambiguïté, sa **section globale = section individuelle**.

Plus on s'éloigne dans l'arbre vasculaire, plus on a de ramifications parallèles (les capillaires). Ici on devra distinguer la section individuelle (1capillaire) de la section globale du réseau (X capillaires).

Nb : Lorsqu'on parle de vitesse de circulation on résonne en section globale

On comprend bien que la section globale de l'arbre vasculaire varie.

La vitesse dans les capillaires sera donc **faible et favorise les échanges** étant donné que le débit est constant et que la section globale augmente ($Q=Sv$)



Conséquences sur la dynamique de circulation

- ❖ Il existe des variations de pressions directement liées à l'anatomie et à la loi de poiseuilles. Rappel :

$$\Delta P = Q \frac{8\eta L}{\pi r^4} = Q \times R$$

On peut s'intéresser à la **différence de pression ΔP entre une artère et une artériole** en utilisant la loi de Poiseuille.

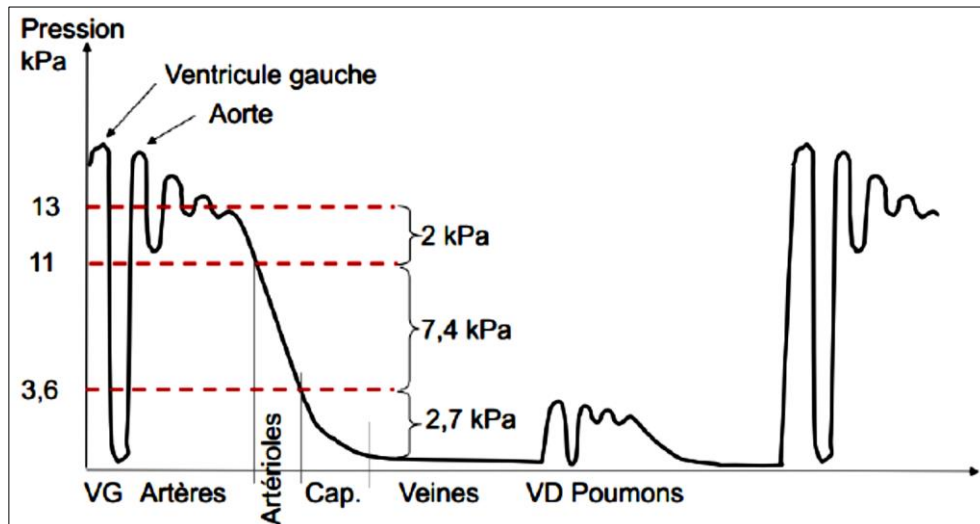
Exercice Diapo 9 :

$d = 0,002 \text{ cm}$
 $l = 3,5 \text{ mm}$
 $n = 4 \cdot 10^7$
 $Q = 5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$
 $\eta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

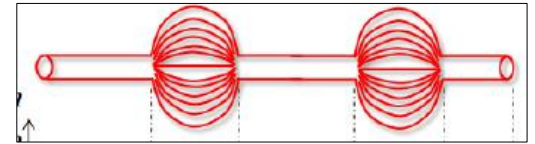
$r = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$
 $l = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
 $Q = 0,083 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} = 8,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

- $R_i = \frac{8\eta l}{\pi r^4} = \frac{8 \times 4 \cdot 10^{-3} \times 3,5 \cdot 10^{-3}}{\pi \times 10^{-20}} = 35,65 \cdot 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$
- $\frac{1}{R} = n \frac{1}{R_i}$
- $R = \frac{R_i}{n} = \frac{35,65 \cdot 10^{14}}{4 \cdot 10^7} = 8,9 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$
- $\Delta P = R \cdot Q = 8,9 \cdot 10^7 \times 8,3 \cdot 10^{-5} = 74 \cdot 10^2 = 7,4 \text{ kPa}$

Ici, l'architecture ramifiée du réseau sanguin module les pressions.



- Exemple du rein : C'est un organe qui est vascularisé par **2 réseaux artériels en série**. Il existe une différence de pression entre l'artériole afférente et l'artériole efférente due à la « perte de charge » dans les capillaires.



- On s'intéresse cette fois ci au nombre de capillaires qui entraînent cette chute de pression. Pour cela on isole d'abord « n » dans la loi de poiseuille.

➤ Diapo 13 :

- Nombre de capillaires
 $\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i} = \frac{n}{R_i} \Rightarrow n = \frac{R_i}{R}$
 Poiseuille: $\Delta P = R \cdot Q \Rightarrow R = \frac{\Delta P}{Q}$
 $n = \frac{R_i \cdot Q}{\Delta P}$
- Calcul de R_i :
 $Q = 1,2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} = 0,02 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 $r = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $l = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
 $R_i = \frac{8\eta l}{\pi r^4} = \frac{8 \times 4 \cdot 10^{-3} \times 10^{-3}}{\pi \times 4^4 \times 10^{-24}} = 4 \cdot 10^{16} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$
- Glomérule: $\Delta P_g = P_B - P_C = 7900 - 7235 = 665 \text{ Pa}$
 $n_g = \frac{R_i \cdot Q}{\Delta P_g} = \frac{4 \cdot 10^{16} \times 2 \cdot 10^{-5}}{665} = 12 \cdot 10^8$
- Tubule: $\Delta P_t = P_D - P_E = 2600 - 1270 = 1330 \text{ Pa}$
 $n_t = \frac{R_i \cdot Q}{\Delta P_t} = \frac{R_i \cdot Q}{\Delta P_g \times 2} = \frac{n_g}{2} = 6 \cdot 10^8$

Le débit : $Q = 1,2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$
 La viscosité : $\eta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$



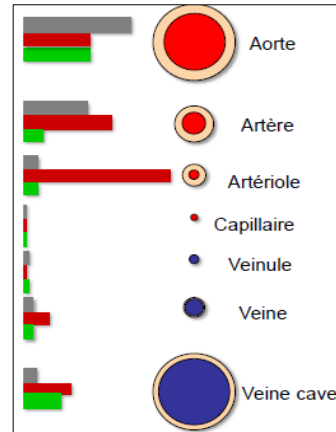
♥ Les calculs sont à savoir faire.. 1QCM chaque année au concours ♥

III. Particularités liées aux parois

A) Constitution des parois des vaisseaux

- ❖ 3 types de fibres constituent la paroi des vaisseaux en proportion variable suivant le vaisseau concerné :

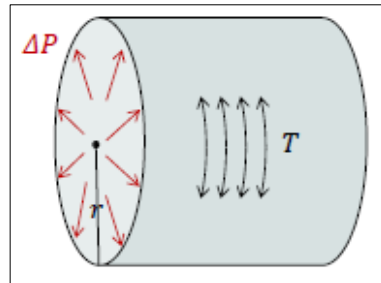
- ⇒ **Elastiques** : très élastiques.
Présentes ++ dans l'aorte
- ⇒ **Collagène** : peu élastiques.
- ⇒ **Musculaires** : modulent la tension et l'élasticité. Présentes ++ dans les artérioles.



B) Forces mises en jeu sur les parois élastiques

- ❖ 2 phénomènes s'appliquent sur les parois des vaisseaux :

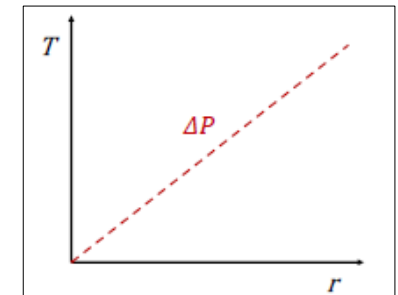
- ⇒ Le gradient de pression transmurale ΔP : il tend à dilater le vaisseau (\nearrow rayon).
- ⇒ Les propriétés élastiques de la paroi = Tension « T » : tend à rétracter le vaisseau (\searrow rayon)



- ❖ Il existe un équilibre entre ces deux phénomènes pour garder une taille de vaisseau + ou - constante qui est décrite par 2 lois → loi de LAPLACE et la loi de HOOKE.

1) Loi de LAPLACE = relation Tension/Pression

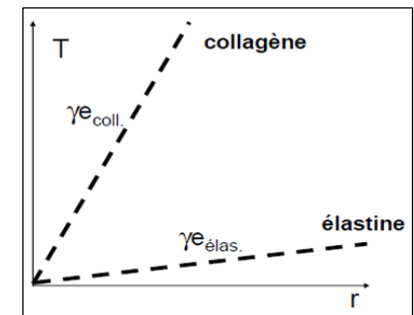
- Lorsque la pression sanguine devient supérieure à la pression extérieure, on a une tendance à la dilatation du vaisseau (\nearrow rayon du vaisseau élastique).
- Cette augmentation de rayon provoque une **augmentation de la Tension** jusqu'à équilibrer ΔP .
- La loi de LAPLACE s'exprime pour un cylindre :



$$\Delta P = \frac{T}{r} \Rightarrow T = \Delta P \times r$$

2) Loi de Hooke = relation Tension/élasticité

- L'élasticité caractérise la relation entre l'allongement relatif $\Delta L/L$ d'un corps et la force qui s'oppose à cet allongement.
- La loi de Hooke exprime la force qui s'oppose à cet étirement : la **tension**.



$$T = \gamma e \frac{\Delta L}{L}$$

γe = élastance = résistance à l'étirement (raideur)

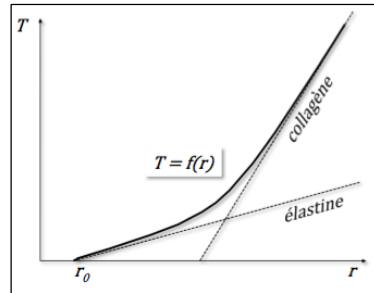
- Remarque : La tension s'exprime comme une force par unité de longueur ou une Energie par unité de surface.
- Le collagène possède une élastance supérieure à l'élastine

Comportement des vaisseaux élastiques

- ❖ La paroi des vaisseaux élastiques est constituée d'élastine et de collagène **d'élastance différente**.

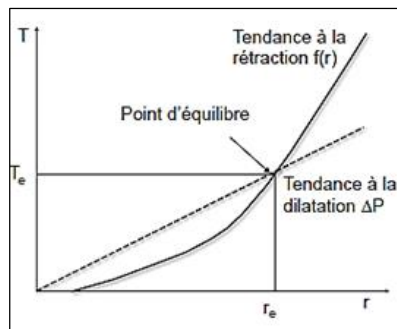
La loi de Hooke nous donne la relation caractéristique du vaisseau :

- **Les fibres d'élastine** : ce sont les premières mobilisées car elles ont une élastance plus faible
- **Les fibres de collagène** : d'élastance plus élevée prennent le relais pour un rayon plus important



1) Notion de rayon d'équilibre

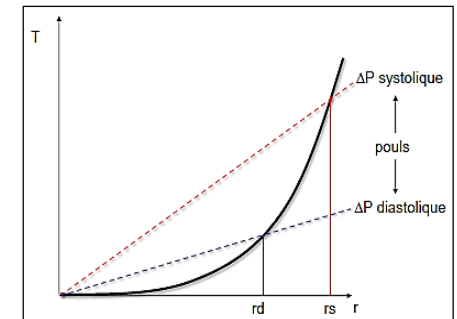
- ⇒ Le gradient transmural de pression ΔP , dicté par la loi de Laplace représente la **tendance à la dilatation du vaisseau**.
- ⇒ Les propriétés élastiques des parois des vaisseaux, dictées par la loi de Hooke représentent la **tendance à la rétraction du vaisseau**.
- ⇒ Dans un vaisseau, ces deux forces opposées s'équilibrent donnant lieu à un seul couple tension/rayon = Point d'équilibre.



2) Le pouls

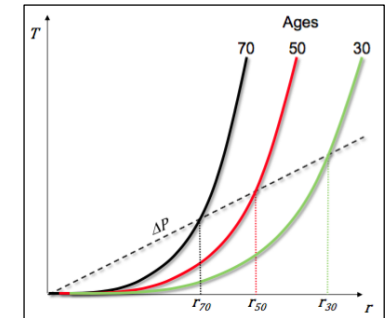
La pression transmural varie au cours du cycle cardiaque (enchaînement de systoles et de diastoles) ce qui va donner lieu à des rayons d'équilibre différents d'où la sensation de pouls.

On parle **d'artères pulsatiles**.



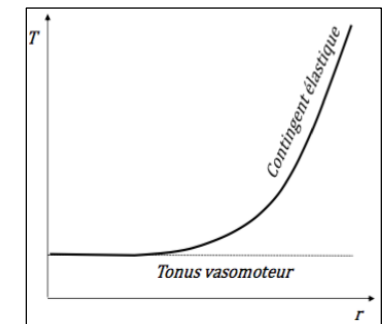
3) Le vieillissement des vaisseaux

Lors du vieillissement on a une diminution progressive des fibres d'élastine au profit des fibres de collagène **d'élastance plus importante**. On a donc une modification des propriétés de déformabilité du vaisseau qui tend vers un rayon d'équilibre plus petit pour un même gradient transmural.



Comportement des vaisseaux musculo-élastiques

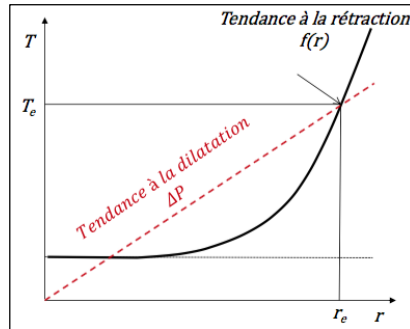
- ❖ Certains vaisseaux (artérioles++) possèdent de nombreuses fibres musculaires responsables d'une tension musculaire (=tonus vasomoteur) qui permettent une régulation vasomotrice notamment lors de la régulation des débits de perfusion sanguine des différents tissus.



1) Rayon d'équilibre

Contrairement à un vaisseau purement élastique, il existe 2 rayons d'équilibre car les fibres musculaires exercent en permanence une tension non nulle sur les parois du vaisseau.

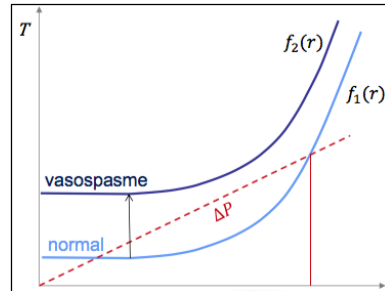
Seul le rayon le plus important est un point d'équilibre stable.



2) Applications

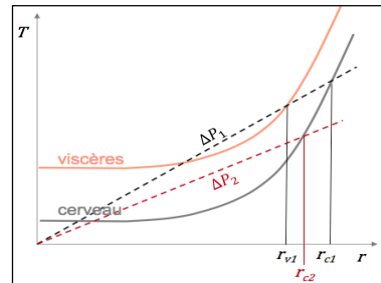
➤ Vasospasme (à pression fixe) :

- ✓ En cas de rupture d'anévrisme, on observe une augmentation du tonus vasomoteur du vaisseau pour arrêter le saignement.
- ✓ Il n'y a plus de rayon d'équilibre !
- ✓ Arrêt du saignement mais ischémie régionale car arrêt du flux sanguin.



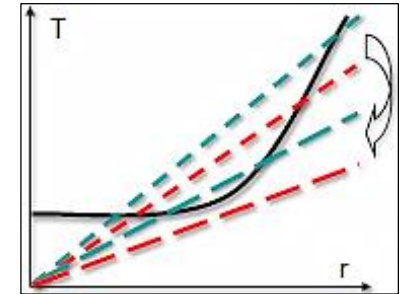
➤ Protection hiérarchisée des organes :

- ✓ On observe un tonus vasomoteur plus élevé pour les vaisseaux qui irriguent les viscères.
- ✓ Lors d'une baisse de pression, les vaisseaux des viscères se collabent en premier laissant le sang aux organes prioritaires (cerveau++)



➤ Cas particulier du rein :

- ✓ Il existe un système porte artériel au niveau du rein avec une artériole afférente et une artériole efférente.
- ✓ Ces deux artérioles possèdent le même tonus vasomoteur mais un ΔP différent.
- ✓ En cas de baisse de ΔP , seul l'artériole efférente se collabte et entraîne une ischémie de la zone en aval.
- ✓ Pathologie : tubulonéphrite aiguë ischémique



III. Mesures de pressions

- En médecine, les unités de pressions sont liées à l'utilisation de manomètres à colonne de liquide et à l'application de la Loi de Pascal.

Pression artérielle	<ul style="list-style-type: none"> • Pression du sang dans les artères grâce au travail cardiaque • Possède une valeur diastolique et systolique • Mesure en millimètre de mercure ($PA_{\text{moy}} = 13\text{KPa} = 97\text{mmHg}$) \Rightarrow unité adaptée aux fortes pressions.
Pression veineuse	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure en cm d'H₂O • $PVC < 1\text{ kPa}$ ou $PVC < 10\text{ cmH}_2\text{O}$
Pression LCR	<ul style="list-style-type: none"> • Exprimée en cmH₂O • Valeur proche de la pression veineuse centrale

$$1\text{mmHg} = 133 \text{ Pascal}$$

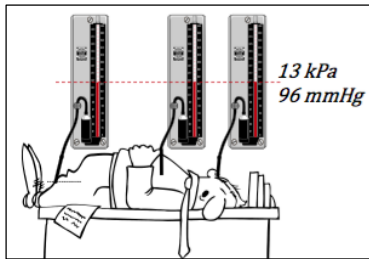
$$1\text{cmH}_2\text{O} = 100 \text{ Pascal}$$

A) Mesure de la pression en fonction de la position

Remarque : Dans le langage courant on parle de tension artérielle alors qu'il faudrait plutôt parler de « pression artérielle »

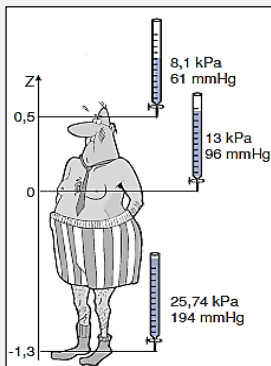
La pression moyenne est l'équivalent de la **pression statique** selon Bernoulli (on considère la pression moyenne et le sang immobile)

Position allongée



- La pression est **identique** à celle qui règne au niveau **du cœur** quel que soit l'endroit du corps.

Position debout / assis



- On prend la pression au niveau du cœur et on mesure la **distance (x)** entre le cœur et l'endroit de la mesure
- ♥ **$PA(x) = PA_{\text{cœur}} - \rho gh$** ♥
- Ex : Si la mesure est faite sous le cœur, $h < 0$ donc $PA \nearrow$

• Calcul des pressions en position debout :

$$\rho gh + PA = 13\text{kPa} = 96\text{ mmHg}$$

$$PA = 13 \cdot 10^3 - \rho gh$$

$$\rho_{\text{sang}} = \rho_{\text{eau}} = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

• Tête:

$$PA(+0,5) = 13 \cdot 10^3 - (10^3 \times 9,8 \times 0,5)$$

$$= 13 \cdot 10^3 - 4,9 \cdot 10^3 = 8,1 \text{ kPa}$$

$$= \frac{8,1 \cdot 10^3}{133} = 61 \text{ mmHg}$$

• Pieds:

$$PA(-1,3) = 13 \cdot 10^3 + (10^3 \times 9,8 \times 1,3)$$

$$= 13 \cdot 10^3 + 12,74 \cdot 10^3 = 25,74 \text{ kPa}$$

$$= \frac{25,74 \cdot 10^3}{133} = 194 \text{ mmHg}$$

B) L'auscultation

❖ C'est la mesure indirecte et **NON invasive** de la pression par création d'une sténose sur l'artère humérale par compression : on ausculte en **aval de la sténose**

- **SILENCE** = écoulement laminaire ou pas de flux
- **BRUIT** = écoulement turbulent (souffle) => **BRUIT DE KOROTKOV**

Rappel : on peut calculer le nombre de Reynolds pour savoir s'il y a un souffle.

Réécriture du nombre de Reynolds en fonction du débit pour un **vaisseau circulaire** :

$$\mathcal{R} = \frac{\rho 4Q}{\eta \pi d}$$

$$Q = \frac{\pi d^2 v}{4} \Rightarrow dv = \frac{4Q}{\pi d}$$

Les souffles peuvent avoir plusieurs causes :

- **Causes lésionnelles** : Diminution du diamètre du vaisseau
 - Sténose vasculaire (Patho : arthérosclérose)
 - Sténose ou fuite valvulaire cardiaque (Patho : insuffisance aortique/mitrale ou rétrécissement mitral/aortique)
- **Causes fonctionnelles** : Augmentation du débit ou diminution de viscosité
 - Souffle d'effort => Q augmente (Exercice physique)
 - Souffle lié à l'anémie => η diminue et Q augmente

Exercice diapo 40 :

Exercice

Résultats de l'auscultation au niveau d'une sténose aortique dans les 2 situations suivantes ?

Situation 1 : $d = 20 \text{ mm}$ et vitesse d'éjection $v = 0,4 \text{ m.s}^{-1}$

Situation 2 : $d = 15 \text{ mm}$ et vitesse d'éjection $v = 4 \text{ m.s}^{-1}$

On donne : $\eta = 4.10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ $\rho = 1.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

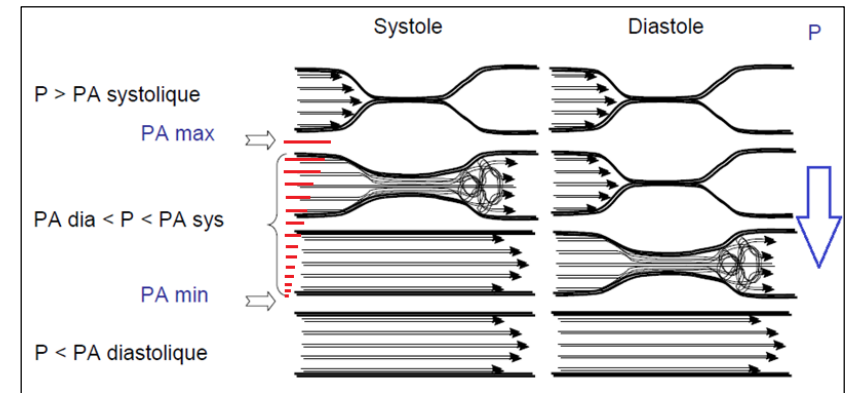
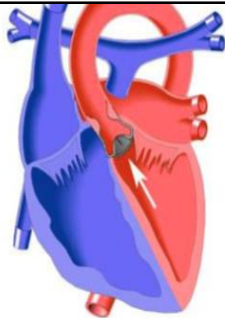
- Résultats de l'auscultation = régime d'écoulement = calcul de $Re = \frac{\rho dv}{\eta}$

Rappel

si $Re \leq 2000 \Rightarrow$ régime laminaire

si $Re > 10000 \Rightarrow$ régime turbulent

- Situation 1: $Re = \frac{\rho dv}{\eta} = \frac{1.10^3 \times 2.10^{-2} \times 0,4}{4.10^{-3}} = \frac{8.10^3}{4} = 2000 \Rightarrow$ laminaire = pas de souffle
- Situation 2: $Re = \frac{\rho dv}{\eta} = \frac{1.10^3 \times 15.10^{-3} \times 4}{4.10^{-3}} = \frac{60.10^3}{4} = 15000 \Rightarrow$ turbulent souffle



1. On gonfle le brassard jusqu'à une $P_{\text{brassard}} > P_{\text{systolique}}$: on entend aucun bruit.
2. On dégonfle doucement le brassard jusqu'à entendre un bruit : P_{brassard} environ égal à $P_{\text{systolique}}$: Cela correspond à un écoulement turbulent uniquement en systole
3. On continue de dégonfler, les bruits s'allongent.
4. On dégonfle encore et les bruits disparaissent : $P_{\text{brassard}} < P_{\text{diastolique}}$: Fin de l'écoulement turbulent

La PA systolique obtenue est correcte mais la PA diastolique est surestimée (PA diastolique = PA mesurée – 2mmHg)

$$\text{Pression Artérielle « moyenne »: } P_{\text{Amoy}} = \frac{P_{\text{Asys}} + 2P_{\text{Adiast}}}{3} = 13 \text{ kPa (98 mmHg)}$$

Remarque : Les valeurs normales de la PA sont de $P_{\text{Amax}} \leq 140 \text{ mmHg}$ et $P_{\text{Amin}} \leq 90 \text{ mmHg}$

INTERPRETATION DES BRUITS DE KOROTKOV :

Les bruits de Korotkov correspondent aux limites entre écoulement laminaire et écoulement turbulent.

Grâce à leur interprétation on va mesurer la pression artérielle qui est comprise entre un minimum diastolique et un maximum systolique.