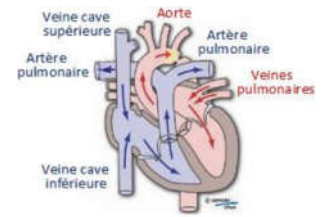


BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION SANGUINE

ORGANISATION GÉNÉRALE DU SYSTÈME CARDIOVASCULAIRE :

Les cavités du cœur :

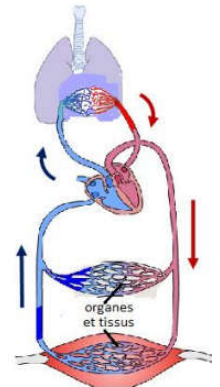
- Deux ventricules droit et gauche, VD et VG dont le rôle est d'éjecter le sang
- Deux oreillettes gauche et droite OD et OG dont le rôle est de remplir les ventricules
- **OG reçoit le sang oxygéné du poumon via les veines pulmonaires**
- **VG renvoie le sang oxygéné à l'ensemble du corps par l'aorte**
- OD reçoit le sang pauvre en O₂ du corps via les veines cave
- VD renvoie le sang pauvre en O₂ aux poumons par les artères pulmonaires



Réseau artériel, réseau veineux :

Le réseau sanguin de la circulation systémique se distribue en deux :

- **Réseau artériel :**
 - transporte le sang riche en oxygène provenant du ventricule gauche
 - Le sang arrive du poumon dans OG via les veines pulmonaires
 - Il repart du VG par l'aorte, avec une pression de 100 mm Hg
 - destination: les différents organes du corps
- **Réseau veineux, ou retour veineux :**
 - récupère le sang pauvre en O₂ de tous les organes du corps
 - Le sang arrive dans OD par les veines caves, 2 à 4 mm Hg
 - Il repart du VD par les artères pulmonaires
 - destination: les poumons pour se recharger en oxygène



ACTIVITÉ MÉCANIQUE DES VENTRICULES :

Les étapes d'un cycle de l'activité mécanique :

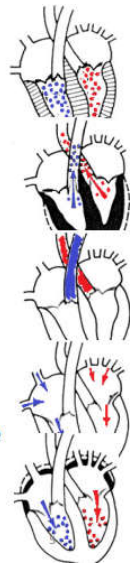
- La systole ventriculaire en deux phases
 - Contraction isovolumétrique des ventricules: toutes les valvules sont fermées, les ventricules sont pleins. La pression augmente dans les ventricules
 - Éjection brutale vers l'aorte et l'artère pulmonaire: les valvules sigmoïdes s'ouvrent dès que $P_v > P_{aorte}$ laissant passer le sang.
- Diastole ventriculaire en deux phases
 - Relaxation iso-volumétrique: la pression ventriculaire diminue et provoque la fermeture des valves sigmoïdes: FS dès que $P_v < P_{aorte}$ (bruit)
 - Phase de remplissage passif: dès que $P_o > P_v$ les VAV s'ouvrent, le sang s'écoule dans les ventricules.

La diastole ventriculaire se termine par une contraction auriculaire qui complète le remplissage (systole auriculaire).

PV devient $>$ à PO, les VAV se ferment: FVAV (bruit)

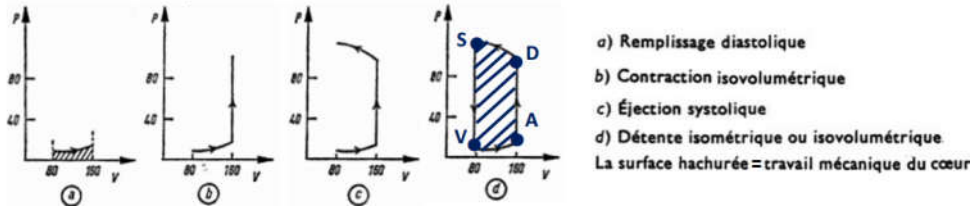
Régime discontinu-régime continu :

- Le cœur propulse le sang de façon discontinue
- or le flux sanguin dans le réseau artériel est continu.
- La continuité est assurée grâce à la compliance ou élasticité: v/P de l'aorte et des gros vaisseaux sanguins:
 - la paroi des vaisseaux se distend pendant la systole
 - se rétracte à la fin de la systole après la fermeture des valvules sigmoïdes.
 - elle restitue une partie de l'énergie emmagasinée, pour pulser le sang. (elle prend la relève de la systole ventriculaire.)
- La compliance permet :
 - la transformation d'un flux pulsé en flux continu
 - une économie de la puissance cardiaque



Relation pression/volume ventriculaire: travail du cœur :

- L'activité mécanique nécessite une dépense d'énergie.
- Travail cardiaque (W_c) = Pression · Volume
- Graphiquement, $W_c \rightarrow$ surface comprise entre les courbes pression-volume particulières:
 - contraction isovolumétrique
 - éjection systolique
 - relaxation isovolumétrique
 - remplissage diastolique
- Or, $W_c = W_o + W_{vD} + W_{vG} \approx W_{vG}$
- Nous allons donc décrire le travail du ventricule gauche.



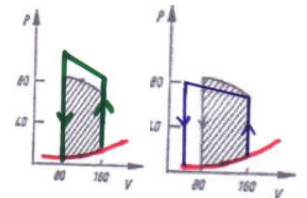
- **A** : fin de la diastole, remplissage maximal du ventricule volume télédiastolique $\approx 125\text{ml}$, pression est proche de 0
- **D** : fin de la contraction isovolumétrique pression proche de 90mmHg ouverture de la valve aortique
- **S** : fin de l'éjection volume éjecté 65 à 70 ml la valve aortique se ferme
- **V** : volume téléstolique $\approx 60\text{ml}$.

Dans les conditions physiologiques normales, l'énergie totale est composée de:

- travail mécanique de pression (W):
 - phases de remplissage diastolique et d'éjection systolique
 - utilise une puissance de 1,3 watt
- tension qui met sous pression le volume ventriculaire,
 - phases isovolumétriques
 - utilise une puissance de 11,7 watt
- Le rendement mécanique est assez faible mais augmente à l'effort ou en cas de pathologie

Exemple de situation d'augmentation de W_c :

- en cas d'hypertension artérielle
 - la postcharge se trouve augmentée (car PA élevée)
 - nécessite une augmentation de la contractilité
 - entraîne l'augmentation du travail cardiaque
- en cas d'augmentation de la contractilité (prise de médicament, effort)
 - les valves sigmoïdes s'ouvrent à PV élevée, mais volume normal
 - ou les valves sigmoïdes s'ouvrent à PV normale, mais volume élevé
 - dans les deux situations le travail cardiaque est augmenté



ÉCOULEMENT ET DÉBIT SANGUINS

Rappels sur les écoulements des fluides

Section d'un cylindre \rightarrow coupe \perp sa longueur

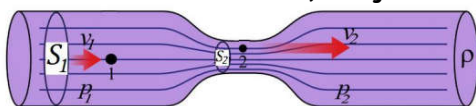
Vitesse d'écoulement = distance parcourue/temps: m/s

Débit (D) = volume de fluide qui passe à travers une canalisation/temps: m^3/s

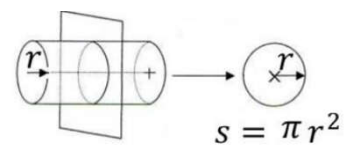
Relation entre débit et vitesse: $D = S \cdot V$

Dans un conduit avec ramifications en parallèle, circuit fermé : débit entrant = sommes des débits sortants

Dans une canalisation, s'il y a conservation de la matière: $D = \text{cte} \Rightarrow S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2$



$$S_1 = 10\text{cm}^2 \quad S_2 = 2\text{cm}^2 \quad D = 10\text{ml/s}$$



Liquide parfait: s'écoule sans frottement entre les particules pas de perte d'énergie durant l'écoulement entre deux points

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

(Théorème de Bernoulli)

Liquide réel: les particules se frottent entre elles → viscosité η

perte d'énergie pendant l'écoulement $[\eta] = \text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1} = \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{poiseuille (SI)}$

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 \neq p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

on pose $p_1 - p_2 = \Delta p$

la **loi de poiseuille** stipule que:

$$D = \Delta p \frac{\pi R^4}{8\eta l}$$

Δp : perte de charge = énergie que perd le système à cause de la viscosité η
canalisation horizontale:

$$\Delta p = D \left(\frac{8\eta l}{\pi R^4} \right)$$

$h = \text{cte} \rightarrow \rho gh = \text{cte}$
 $D = s \cdot v = \text{cte} \rightarrow \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{cte}$

$P \text{ varie}$
 $p_2 < p_1$

Dans un liquide **réel** les couches en contact avec le contenant s'accrochent → vitesses variables

Écoulement laminaire: vitesse d'écoulement relativement faible

- vecteurs vitesse parallèles avec profil parabolique

- vitesse maximale au centre et $V \approx 0$ pour une mince couche périphérique

écoulement turbulent: vitesse relativement élevée

- vecteurs vitesse désordonnés, pas de règles générales

Limite entre les 2 régimes: nombre de Reynolds $= (\rho d v)/\eta$

ou vitesse critique $V_c = 2400 \eta/(\rho d)$

< 2400: écoulement strictement laminaire.

> 10000: écoulement strictement turbulent.

Entre les deux: régime instable, mélange des deux régimes.

Quand la vitesse d'écoulement > la **vitesse critique** le régime cesse d'être laminaire.

(VOIR APPLICATION DIAPO PAGE 14)

Particularités du réseau vasculaire

• Architecture du réseau vasculaire

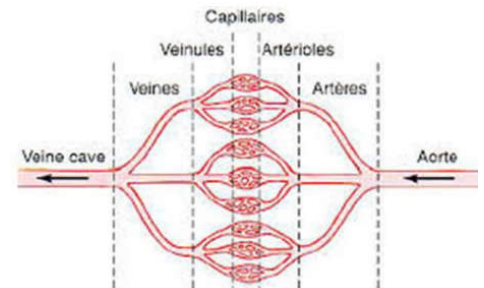
- réseau parallèle
- section → somme des sections de tous les vaisseaux de la catégorie concernée

• Le nombre des vaisseaux:

- augmente de l'aorte (1) aux capillaires (5.109)
- décroît des capillaires à la veine cave

• La vitesse d'écoulement ($D = s \cdot v = \text{cte}$):

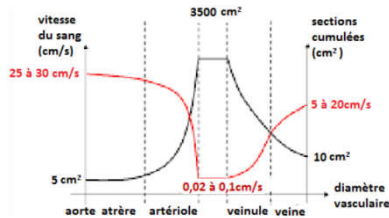
- Décroît de l'aorte (30cm/s) aux capillaires (<0,1cm/s) (échanges)
- augmente des capillaires aux veines cave (5 à 20cm/s)



Valeurs approximatives des diamètres, épaisseurs de paroi et section des vaisseaux

	Aorte	Artère	Artériole	Capillaire	Veinule	Veine	Veines cave
Diamètre	25 mm	4 mm	30 µm	8 µm	20 µm	5 mm	30 mm
Epaisseur	2 mm	1 mm	20 µm	1 µm	2 µm	0.5 mm	1.5 mm
section par secteur	5 cm ²	20 cm ²	500 cm ²	3500 cm ²	2700 cm ²	30 à 100 cm ²	7 cm ²

Représentation de la vitesse d'écoulement/section :



- La vitesse est élevée à l'éjection: **écoulement turbulent**
 \Rightarrow bruyant \Rightarrow profitable à l'auscultation des vaisseaux.
- Dans le reste de la circulation l'écoulement est laminaire
 - Dans les artérioles et les veines, la circulation du sang n'est jamais turbulente.
 - Sauf dans les cas de rétrécissement \Rightarrow Thrill à la palpation et souffle à l'auscultation

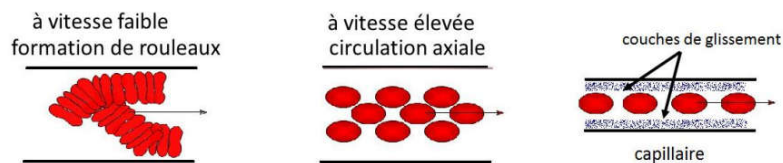
Souffles liés à des turbulences

- Les turbulences sont rencontrées quand la vitesse d'écoulement $>$ la vitesse critique
- Situations non physiologique où l'écoulement devient turbulent:
 - anémie \Rightarrow baisse de l'hématocrite $\Rightarrow \eta \downarrow$ et $V_c \downarrow$
 - Sténose vasculaire. $D = S \cdot V$ si $S \downarrow$ $V \uparrow$ et V peut devenir $> V_c$
 - En systole: fuite dans la valve mitrale (normalement fermée) ou rétrécissement de la valve aortique.
 - En diastole: rétrécissement de la valve mitrale (normalement ouverte) ou fuite dans la valve aortique.

(VOIR APPLICATION PAGE 19)

- Composition du sang
 - Plasma= solution macromoléculaire \rightarrow fluide newtonien de viscosité $\eta = 10^{-3}$ poiseuille
 - Cellules en suspension
- Viscosité du sang: $4 \cdot 10^{-3}$ poiseuille
 - η varie en fonction de dv/dx : à vitesse élevée la viscosité diminue (rhéofluidification)
 - à hématocrite (Volume de cellules / volume total) élevé, viscosité élevée
 - si la concentration de macromolécules linéaires augmente dans le sang, η augmente
 - si calibre des vaisseaux diminue, la viscosité diminue (couche de glissement)
 - quand la température augmente, η diminue quand

Le sang est un fluide non newtonien et anormalement visqueux



Application de la Loi de Poiseuille pour la circulation sanguine

- Pressions moyennes (mm Hg) le long du réseau vasculaire:
 VG: 120-130 Aorte: 100 Artères: 40 Capillaires: 25 Veine cave: 2-4
- Importance de la différence de pression: existence et maintien d'un débit

$$D = \Delta p \frac{\pi r^4}{8 \eta l} \text{ loi de Poiseuille}$$

- le débit peut varier dans des situations physiologiques exceptionnelles ou dans des situations pathologiques quand l'une de ces composantes varie.
- Dans des conditions de fonctionnement normales ces composantes ont des valeurs précises qui permettent un débit constant.

Résistance à l'écoulement :

- La résistance d'un vaisseau dépend donc de

- calibre du vaisseau: $r \uparrow, \downarrow$
- longueur: $L \uparrow$ frictions \uparrow et \uparrow
- viscosité: $\eta \uparrow \uparrow$

- Dans des canalisations en // on additionne les $1/g$

Pour n canalisations parallèles: $1/g = \sum 1/g_i$

Résistance globale d'un secteur: $g = i/n$

- La conséquence de cette architecture: réseau //, $r \downarrow$, $nb \uparrow$, $L \downarrow$

\Rightarrow **une diminution progressive de la pression**

la perte de charge au niveau d'un secteur $\rightarrow p = g \cdot D$

Exemple de calcul de la perte de charge le long d'un secteur vasculaire

Pour le secteur artériel, on suppose:

- r d'une artère = 0,05cm / l d'une artère = 0,09m / $n = 600$ / $D = 5l/min$ / $\eta = 4 \cdot 10^{-3}$ kPa

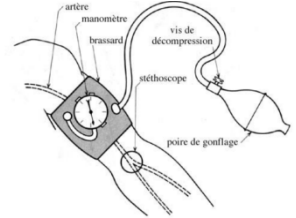
$$R_i = \frac{8 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{-2}}{3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-4})^4} = 0,146 \cdot 10^{11} \text{ or } R_g = \frac{R_i}{n} = 2,44 \cdot 10^7$$

$$\text{et } \Delta p = R_g \cdot D = 2,44 \cdot 10^7 \cdot 8,3 \cdot 10^{-5} = 20,25 \cdot 10^2 \text{ Pa}$$

Pression artérielle :

Définitions:

- Pression artérielle ou pression sanguine
- pression du sang dans les artères de la circulation systémique
- Mesure de la pression artérielle
- utilisation d'un sphygmomanomètre → pression élevée sur artère humérale
- dégonfler progressivement → apparition d'un bruit : pression systolique
- continuer à dégonfler, le bruit augmente puis s'estampe: pression diastolique



Variation de la pression sanguine en fonction de la position :

En station debout PA varie en fonction de la hauteur

- En considérant que la vitesse d'écoulement du sang est lente et cte le long d'une artère, on pourra appliquer le théorème de Bernoulli:

$$\text{• La relation de conservation d'énergie } p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$\text{devient } p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2$$

$$\Rightarrow p_1 - p_2 = \rho g (z_2 - z_1)$$

- En prenant le cœur comme référence on notera: $p_c - p_i = \rho g (z_i - z_c)$

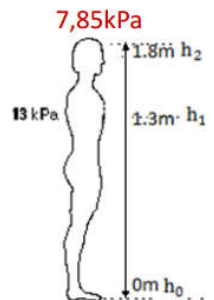
- Estimation, par le calcul, de PA au point i: $PA_i = P_c - \rho g (z_i - z_c)$

- Exemple pour la tête $z_t = 1,8m$ et le cœur étant à une hauteur $z_c = 1,3m$

$$PA_t = P_c - \rho g (z_t - z_c)$$

$$\text{donc } PA_t = 13kPa - \rho g (1,8 - 1,3) = 13kPa - (1050 \cdot 9,81 \cdot 0,5)$$

$$PA_t = 13kPa - 5,15kPa = 7,85kPa$$



Variation de la pression sanguine en fonction de la position

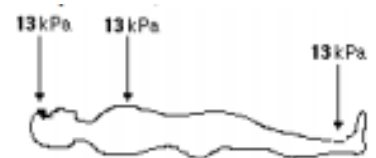
- Autre exemple, les pieds se trouvent au sol, donc à une hauteur

$$z_p = 0m$$

$$PA_p = 13kPa - \rho g (0 - 1,3) = 13kPa + (1050 \cdot 9,81 \cdot 1,3)$$

$$\text{donc } PA_p = 13kPa + 13,39kPa = 26,39kPa$$

En station allongée PA est globalement identique en tous points, tous les points du corps étant à la même hauteur



Conclusion: la PA doit toujours être mesurée à la hauteur du cœur ou en position allongée

Ressources : Diapos du professeur de Biophysique Hjiyej

Mise en page : Filali Mohamed (étudiant de la promo médecine 2022)