

BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION BIOMECANIQUE CARDIAQUE

Formation Générale en Sciences
Médicales – 2° année

Module cardiovasculaire

Denis Mariano-Goulart
Faculté de médecine et CHRU de Montpellier
Ce diaporama et un polycopié sont disponibles sur l'ENT
de l'UM et sous le lien <http://scinti.edu.umontpellier.fr>

Introduction Vitesse Souffles Résistances Élasticité Puits Viscosité Echanges

BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION

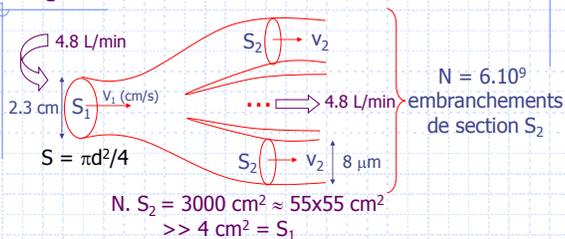
Etre capable de démontrer les principaux résultats de biophysique de la circulation importants en physiologie.

Etre capable de caractériser les paramètres physiologiques de la colonne de droite en raisonnant à partir des notions de biophysique de la colonne de gauche :

Equation de continuité	Vitesse du sang
Ecoulements turbulents ou laminaires	Souffles & mesure de la tension artérielle
Loi de Poiseuille	Résistances vasculaires
Loi de Laplace	Modulation des résistances et \otimes artériels
Elasticité des grosses artères	Puissance cardiaque & flux sanguin continu
Viscosité du sang non Newtonien	Effet Fahraeus-Lindqvist, embolies
Pression oncotique	Echanges capillaires, oedèmes

Introduction Vitesse Souffles Résistances Élasticité Puits Viscosité Echanges

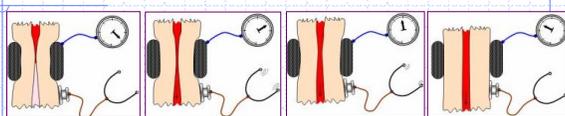
EQUATION DE CONTINUITÉ



$$D_1 = S_1 \cdot v_1 = D_2 = (N \cdot S_2) \cdot v_2$$

$$v_1 = 20 \text{ cm/s} \rightarrow v_2 = 0,3 \text{ mm/s}$$

SPHYGMOMANOMETRIE



écoulement empêché écoulement turbulent permanent écoulement turbulent en diastole écoulement laminaire

apparition du souffle $\Rightarrow P = TA_s$ persistance du souffle $TA_d < P < TA_s$ disparition du souffle $\Rightarrow P = TA_d$

Bruits de Korotkoff

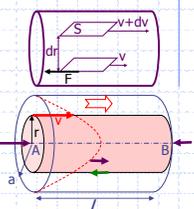
VITESSE DU SANG

Régime laminaire, $F_v = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dr}$

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

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{P_A - P_B}{2\eta l} \cdot r \Rightarrow v = \frac{P_A - P_B}{4\eta l} (a^2 - r^2)$$

en négligeant la variation de η avec dv/dr (le sang est non-newtonien)



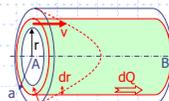
LOI DE POISEUILLE

Régime laminaire, viscosité η constante



J.M. Poiseuille (1797-1869)

$$v = \frac{P_A - P_B}{4\eta l} (a^2 - r^2)$$



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

$$Q = \frac{P_A - P_B}{2\eta l} \pi \int_0^a r (a^2 - r^2) dr$$

$$Q = \frac{P_A - P_B}{2\eta l} \pi \left[\frac{a^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^a \Rightarrow Q = \frac{\pi \cdot a^4}{8 \cdot l \cdot \eta} (P_A - P_B)$$

anneau de $S = 2\pi \cdot r \cdot dr$

$$\frac{P_A - P_B}{R} = R \cdot Q$$

$$R = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot a^4}$$

Loi de Poiseuille

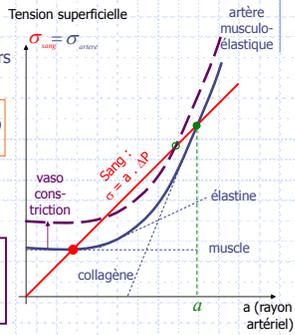
CONSEQUENCES (cf. PACES)

- Le tonus des cellules musculaires lisses contrôle le rayon des artérioles, donc leurs résistances.

$$(P_A - P_B) = R \cdot Q = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot a^4} \cdot Q$$

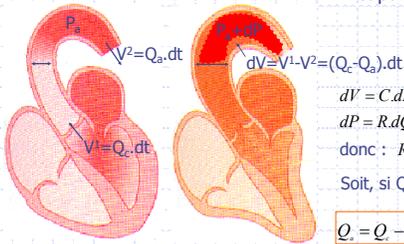
- Si le rayon est divisé par 2 à ΔP identique, le débit est /16

la vasomotricité permet une régulation fine de la perfusion en fonction des besoins des organes



EFFET CAPACITIF DE L'AORTE

L'aorte est élastique: $dV = C \cdot dP$ $C = 6 \text{ cm}^3/\text{kPa}$
capacitance



$$dV = C \cdot dP = (Q_c - Q_a) \cdot dt$$

$$dP = R \cdot dQ_a$$

donc : $RC \frac{dQ_a}{dt} + Q_a = Q_c$

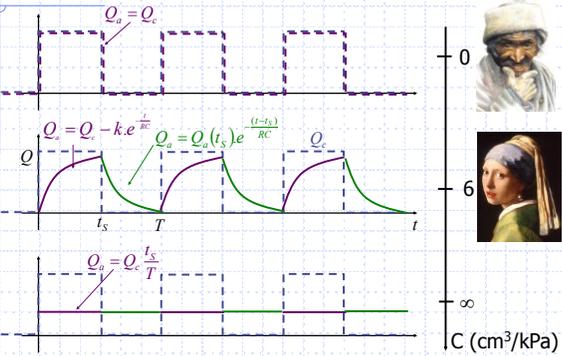
Soit, si Q_c est carré :

$$Q_a = Q_c - k \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{si } t < t_s$$

$$Q_a = Q_a(t_s) e^{-\frac{(t-t_s)}{RC}} \quad \text{si } t > t_s$$

Onde de pouls $c = 4 \text{ m/s}$

CONSEQUENCES: → débit continu



CONSEQUENCE: ECHANGES CAPILLAIRES

mm Hg

$P_a = 35$, $P_i = P_i = 5$, $P_v = 21$, $P_{i_s} = P_{i_v} = 28$

$\Phi_{a \rightarrow i} = k \cdot [(P - P_i) - (\Pi - \Pi_i)]$
 $\Phi_{a \rightarrow i} \approx \Phi_{i \rightarrow v} = 7 \cdot k$
 équilibre physiologique

Insuffisance cardiaque : $P_v \uparrow$
 $\Phi_{a \rightarrow i} = k \cdot [(P - P_i) - (\Pi - \Pi_i)]$

Insuffisance hépatique : $\Pi \downarrow$
 par déficit en protéines
 $\Phi_{a \rightarrow i} = k \cdot [(P - P_i) - (\Pi - \Pi_i)]$

Inflammation des capillaires:
 \uparrow perméabilité aux protéines
 $\Phi_{a \rightarrow i} = k \cdot [(P - P_i) - (\Pi - \Pi_i)]$
 oedèmes

*Un faible écart (10%, $\Phi_{a \rightarrow i} > \Phi_{i \rightarrow v}$) sera pris en charge par le système lymphatiques. Cf. cours de physiologie.

BIOMECHANIQUE CARDIAQUE

Etre capable de démontrer les principaux résultats de biomécanique cardiaque importants en physiologie.

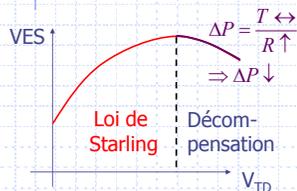
Etre capable de caractériser les paramètres physiologiques de la colonne de droite en raisonnant à partir des notions de biophysique de la colonne de gauche :

Contraction cardiaque, loi de Laplace	Rétrocontrôle des débits (Loi de Starling)
Compliance ventriculaire	Cardiomégalie de l'insuffisance cardiaque
Compliance & contractilité ventriculaire	Courbe Pression – Volume d'un cycle
Travail cardiaque	Facteurs $\uparrow Q_c$, Effets d'une cardiomégalie
Turbulence	Souffles cardiaques normaux ou pas



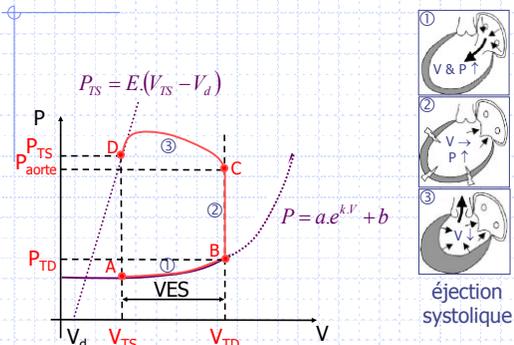
LOI DE FRANK-STARLING (1914)

- Elongation du sarcomère
 - $\leftarrow \uparrow$ Volume de Remplissage Diastolique = V_{TD}
- \uparrow Contractilité
 - $\Rightarrow \uparrow$ Volume d'éjection systolique

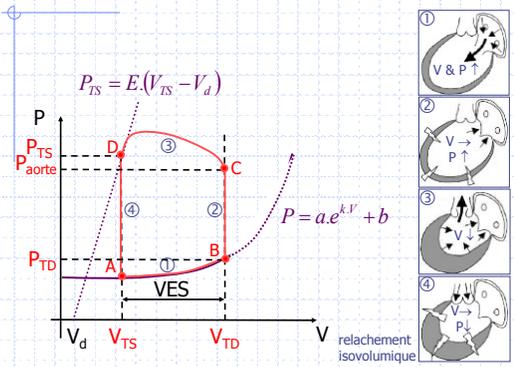


Volume d'Ejection Systolique \uparrow
 si
 le Volume de Remplissage Diastolique \uparrow

COURBE P-V VENTRICULAIRE

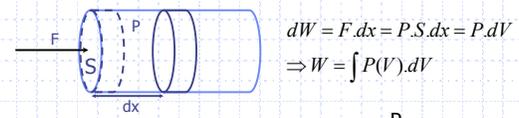


COURBE P-V VENTRICULAIRE



TRAVAIL CARDIAQUE

- Travail d'une force de pression

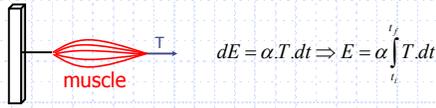


- Travail mécanique du coeur

$W_{coeur}^{mécannique} = \int_{A,B,C,D} P(V).dV$
 $W_{coeur}^{mécannique} = Aire(A, B, C, D)$
 $W_{coeur}^{mécannique} \approx \bar{P}_{systole} . VES \approx 10 \frac{cmHg}{76} . 80 . mL . 10^{-6} = 1 J$

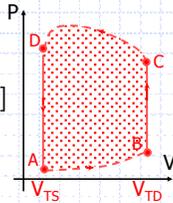
TRAVAIL CARDIAQUE

- Energie d'une force de tension superficielle



- Energie de tension du cœur

$E_{VG}^{tension} \approx 19 \text{ J}$ sur les intervalles [B, C] et [D, A]



TRAVAIL ET RENDEMENT CARDIAQUE

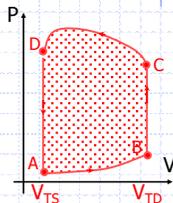
- Energie consommée par le cœur

$E_{VG} = W_{VG}^{m\u00e9canique} + E_{VG}^{tension} = 1 \text{ J} + 19 \text{ J} = 20 \text{ J}$

$E_{VD} \approx \frac{1}{6} E_{VG} \approx 3 \text{ J}$

- Rendement cardiaque VG

$\rho = \frac{W_{m\u00e9canique}}{W_{m\u00e9canique} + E^{tension}} \approx \frac{1}{20} = 5\% \text{ au repos}$
 jusqu'à 10-15% à l'effort



CONSEQUENCES

- La consommation énergétique du cœur dépend surtout de sa mise sous tension

- Influence modérée du travail mécanique
- Influence importante de la postcharge (âge)
- Influence majeure de la fréquence cardiaque

- Effet d'une dilatation cardiaque :

• Loi de Laplace : $\Delta P = T \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$
 $(R_1, R_2) \uparrow \leftrightarrow \Delta P \Rightarrow T \text{ et } E_{VG} \uparrow$



La courbe P-V permet de comprendre pourquoi :

- ↑ précharge ($\uparrow V_{TD}$) \Rightarrow $\uparrow W_c$ et $\uparrow Q$
- ↑ postcharge ($\uparrow P_{aorte}$) \Rightarrow $\uparrow W_c$ et $\downarrow Q$
- ↓ contractilité E \Rightarrow $\downarrow W_c$ et $\downarrow Q$
- ↓ compliance $1/k \Rightarrow \downarrow W_c$ et $\downarrow Q$
- HTA $\Rightarrow \uparrow W_c$ si Q est maintenu normal

Essayer par vous même de comprendre ces points est un excellent exercice. Je vous y invite chaleureusement !
La solution sera donnée en cours de physiologie.

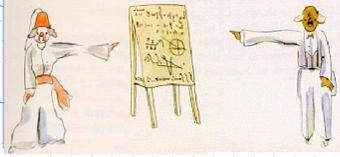
SOUFFLES CARDIAQUES

- bruits du cœur normaux : « Toum-Ta » :
 - B₁ = Fermeture des valves d'admission (tricuspide et mitrale)
 - B₂ = Fermeture des valves d'éjection (aortique et pulmonaire)
 - Systole = [B₁,B₂]; diastole = [B₂,B_{1+T}]
- Souffles pathologiques :
 - turbulences : ↑ vitesse au passage d'un rétrécissement
 - Fuite sur valve close ou rétrécissement de valve ouverte
 - $\varnothing \propto 2 \Rightarrow$ vitesse x 4 car $D = (\pi d^2/4) \cdot v = cste \Rightarrow v \propto \frac{D \cdot d}{\eta}$ double
 - En systole, entre B₁ et B₂ :
 - fuite sur valve d'admission (normalement close)
 - rétrécissement sur valve d'éjection (normalement ouverte après C)
 - En diastole, entre B₂ et B_{1+T} :
 - rétrécissement sur valve d'admission (normalement ouverte)
 - fuite sur valve d'éjection (normalement fermée)

CONCLUSION

Equation de continuité : $v=D/S \downarrow \uparrow$	Vitesse _{sang} ↓ de l'aorte aux capillaires
R→Ecoulements normaux laminaires	Anémie ou sténose \Rightarrow turbulent \Rightarrow souffle
Loi de Poiseuille $\Delta P=R(1/a^4) \cdot Q$	Résist. vasculaires \leftrightarrow rayons (artérioles)
Lois de Laplace $\Delta P= \sigma/a$	Vasomotricité artérielle
Elasticité des grosses artères	↓ P. cardiaque & flux sanguin continu
η (MM linéaires, Ht, T, dv/dr)	Mécanismes des embolies par stase
Pression oncotique et hydrostatique	Mécanismes des oedèmes
Contraction cardiaque, loi de Laplace	FES $\propto V_{TD} \Rightarrow Q_D = Q_C$
Compliance ventriculaire	Cardiomégalie de l'insuffisance cardiaque
Compliance & contractilité ventriculaire	Courbe Pression - Volume d'un cycle
Travail cardiaque	Facteurs $\uparrow Q_C$, Effets d'une cardiomégalie
Synthèse	HTA $\Rightarrow \uparrow W_c$ et $\leftrightarrow Q_C$
Turbulence	Souffles sur fuites ou rétrécissements

MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Conseil bibliographique, pour aller plus loin :
Comprendre la physiologie cardio-vasculaire
P. d'Alché. Médecine Sciences Flammarion, 1999

<http://scinti.edu.umontpellier.fr/enseignements/cours/>

COMPLEMENTS

Ces points (à l'exception de l'onde de pouls) seront traités en détail à l'occasion du cours de physiologie.

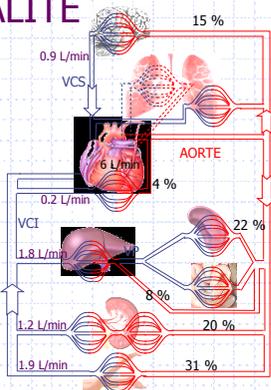
Introduction Vitesse Souffles Résistances Élastique Pouls Viscosité Échanges

MOYENS & FINALITE

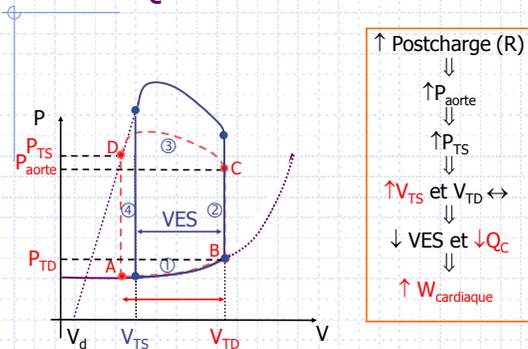
Deux pompes en série :
- Syst : 70 % vol. ; 10 cm Hg
- Pulm: 30 % vol. ; 2 cm Hg

3 secteurs ramifiés :
- Artériel : 17% vol.; 10 cm Hg
- Capillaire : 3% vol.; 2 cm Hg
- Veineux : 80% vol.; 1 cm Hg

Logistique du métabolisme :
Apport d'O₂ et de nutriments
Équilibre thermique
Évacuation des déchets

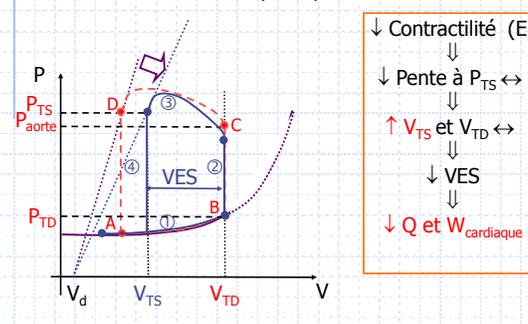


CONSEQUENCE: ↑ POSTCHARGE



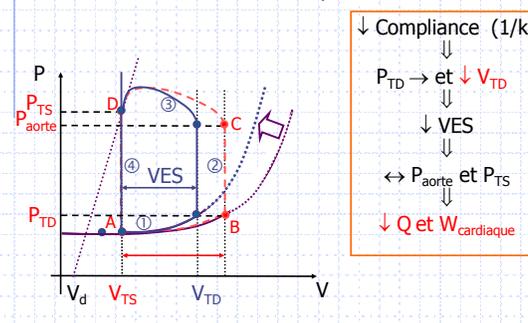
CONSEQUENCE: ↓ CONTRACTILITE

Modèle d'insuffisance VG systolique



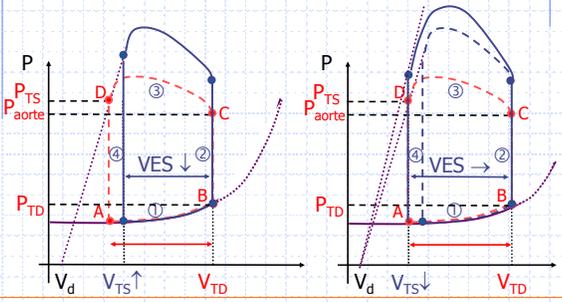
CONSEQUENCE: ↓ COMPLIANCE

Modèle d'insuffisance VG diastolique



CONSEQUENCE : HTA

↑ POSTCHARGE PUIS ↑ CONTRACTILITE



Rétablissement du débit cardiaque au prix d'une ↑ du travail du coeur
