

Mécanique cardiaque

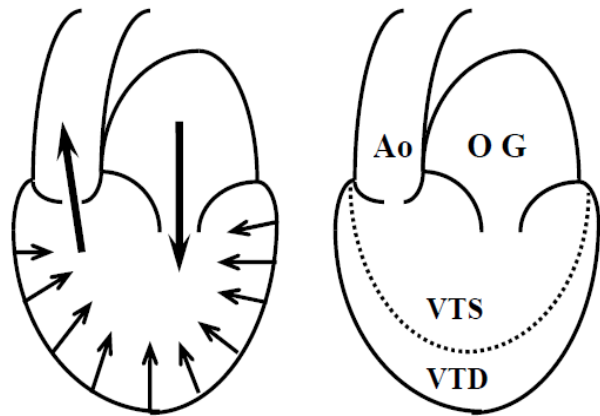
I. La fonction pompe du cœur

La fonction principale du cœur est d'assurer la mise en mouvement du sang à travers le corps. A ce titre, la pompe cardiaque est caractérisée par une modification du volume des cavités (ventricule gauche pour ce qui concerne la circulation systémique) au cours de son cycle de contraction :

1° Les volumes télé-diastolique et télé-systolique :

Ces volumes passent par des valeurs extrêmes : volume télé-diastolique (VTD) lorsque le ventricule est rempli au maximum et volume télé-systolique (VTS) lorsque au contraire il est à son volume minimal.

Lors de la diastole le sang pénètre dans le ventricule gauche en provenance de l'oreillette gauche à travers l'orifice mitral. Lors de la systole il est éjecté vers l'aorte et se passe les valves sigmoïdes aortiques.



2° Le débit cardiaque et la fraction d'éjection :

A partir de ces volumes il est possible de déterminer un certain nombre de grandeurs, qui permettent en fin de compte d'aboutir au débit cardiaque, donnée essentielle pour caractériser le fonctionnement mécanique du cœur :

- volume d'éjection systolique : $VES = VTD - VTS$
- fraction d'éjection : $FE = (VES / VTD = (VTD - VTS) / VTD$
- débit cardiaque, qui fait intervenir la fréquence cardiaque : FC
 $DC = VES \times FC = VTD \times FE \times FC$

II Travail cardiaque :

Sang = liquide visqueux → perte de charge.

2 pompes en séries pour compenser la perte de charge entre le retour veineux (pré charge) et le secteur artériel (post charge). Le cœur doit fournir un travail mécanique W_m pour compenser cette perte de charge

la pré charge : correspondent au volume télé diastolique du ventricule gauche

Frank starling : plus la pré charge augmente plus la force de contraction est grande donc du fait de la mise en tension plus importante des fibres myocardiques

- la pré charge dépend de la volémie ainsi que du tonus veineux

la poste charge : les forces s'opposent l'éjection du ventricule en systole

- c.-à-d. essentiellement la pression systémique pour le ventricule droit

Remarque la postcharge varie en fonction du ventricule

- Post charge systémique = 13 KPa
- Post charge pulmonaire = 2.6 KPa
- W_m de la pompe cardiaque peut être évalué en considérant le diagramme p-v à l'intérieure du ventricule

Le cycle cardiaque du ventricule gauche

1. Contraction iso volumétrique

- ✓ après fermeture de la valve d'admission (**FA**)= **TOUM**
- ✓ volume constant
- ✓ augmentation de la pression



2. Ejection

après ouverture de la valve d'éjection (**OE**), à partir du moment où la pression ventriculaire > pression aortique



3. Relaxation iso volumétrique

- ✓ après fermeture de la valve d'éjection (**FE**) = « **TA** »
- ✓ volume constante
- ✓ diminution de la pression



4. Remplissage

Après ouverture de la valve d'admission (**OA**) à partir du moment où la pression atriale > pression ventriculaire



Remarque

VTD= 120 ml est le volume maximal présent dans le ventricule en fin de remplissage

VTS= 80 ml est le volume minimal présent dans le ventricule en fin d'éjection

Travail mécanique W_m

On a $W=P.V$, $W_M = \int P.dV$

Ex : travail d'éjection du ventricule gauche

P d'éjection = 100mmhg = 13,3 kPa (N/m²)

Le volume d'éjection = 80 ml = $8.10^{-5}m^3$

$W= 1,06 N.m$ (j)

- La surface de la boucle -v est directement proportionnelle au travail mécanique du cœur
- W_m est accompagné d un travail de mise en tension du myocarde

1- Travail de mise en tension du muscle cardiaque

W_m du cœur n'est qu'une partie de l'énergie requise par son fonctionnement

HILL a montré qu'un muscle soumis à une force de tension T pendant un temps Δt consomme une énergie proportionnelle au produit $T.\Delta T$

Plus généralement au cours d'une contraction le travail de mise en tension vaut

$$W_T = \alpha \int_{t_1}^{t_2} T dt$$

α = coefficient de proportionnalité

T = tension pariétale du ventricule

t = temps

Remarque : effet de la dilatation ventriculaire sur W_T :

loi de Laplace : $\Delta P = T (1/r_1 + 1/r_2)$

Dilatation ventriculaire $\nearrow r_1$ et r_2

\nearrow de T pour maintenir un même ΔP

$\nearrow W_T$

$$T = \frac{\text{pression du VG} \cdot \text{rayon du VG}}{\text{épaisseur de la paroi}}$$

Le travail total $W = W_M + W_T = \int P.dV + \alpha \int_{t_1}^{t_2} T dt$

Le rendement mécanique de cœur

$$\frac{W_m}{W_m + W_t} = \frac{\int P.dV}{\int P.dV + \alpha \int_{t_1}^{t_2} T dt}$$

Ce rendement mécanique est très faible de l'ordre de 3% au repos il peut atteindre 10 à 15 % à l'effort. Ceci signifie que l'essentiel de l'énergie est utilisé à mettre le cœur sous tension.

2-Déterminants biophysique de la performance ventriculaire

La performance ventriculaire : est la capacité à assurer un débit circulatoire et des conditions de pression suffisants pour répondre aux besoins de l'organisme avec un rendement maximum

Le débit : $D = VES \times FC$ (FC = fréquence cardiaque)

Les performances dépendent de 4 paramètres :

- 1- Contractilité et compliance myocardiques
- 2- Pré charge (loi de Starling)
- 3- Post charge
- 4- Fréquence cardiaque

3-Contractilité et compliance myocardiques

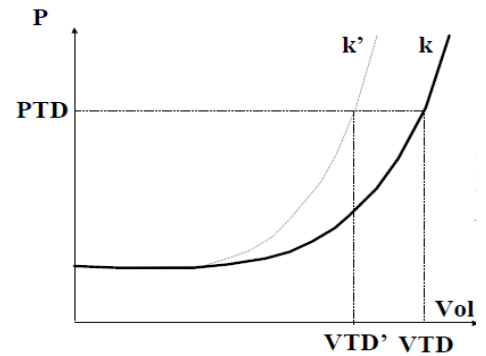
3.1- Compliance ou relations pression-volume en diastole(pour le ventricule) : Définit la façon dont le ventricule se laisse distendre passivement en diastole

Courbe de type: $P(v) = a \exp(k.v) + b$

Avec $k = \text{élastance} = 1/\text{compliance}$

Pour $k' > k$; Compliance' \searrow

$VTD \searrow \rightarrow VES \searrow$



3.2- Contractilité ou relations pression-volume en fin de systole (pour le ventricule)

Elle définit le point **FE** en fin de **systole** sur la courbe pression-volume.

Lorsque la contractilité augmente (courbe en rouge), le **VTS diminue donc le VES augmente** (car $VES = VTD - VTS$).

Courbes de type linéaire :

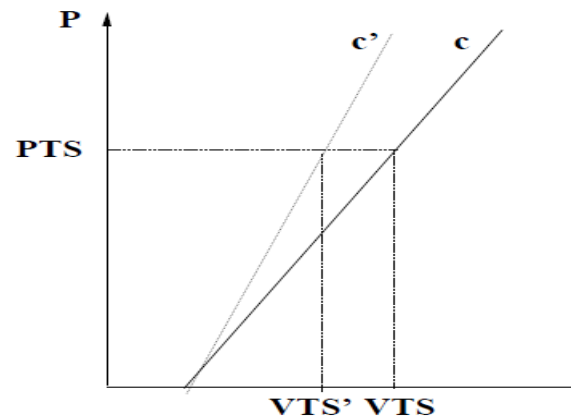
$P(v) = c.v - d$; avec $c = \text{contractilité}$

On s'intéresse surtout au point

$PTS = c.VTS - d$

Pour $c' > c$

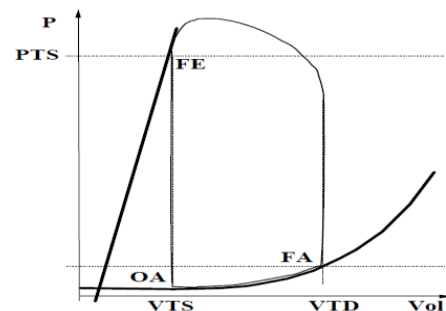
Contractilité \nearrow



3.3- Relations de la compliance et de la contractilité avec la boucle pression volume:

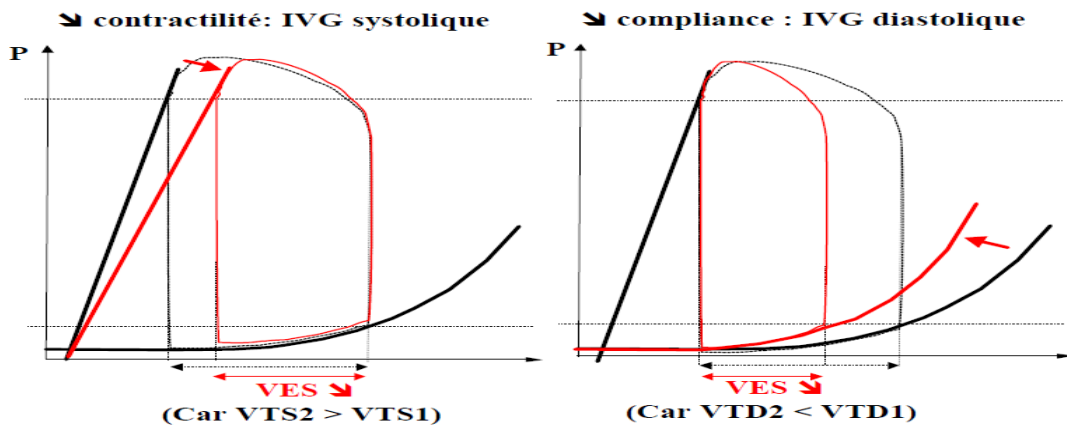
La contractilité définit le point **FE**: point (PTS,VTS) entre la phase d'éjection et celle de relaxation iso volumétrique.

La compliance est responsable de la forme de la courbe P/V lors du remplissage diastolique



4- Exemple pathologique:

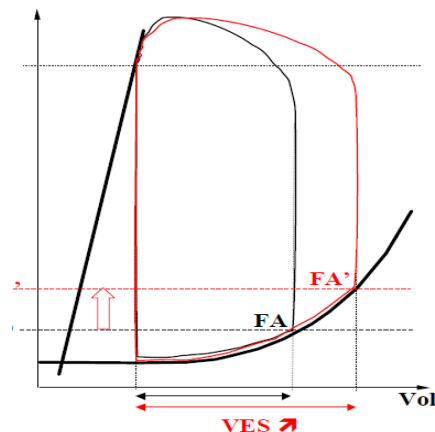
L'insuffisance ventriculaire gauche (IVG) = $VES \searrow$ - Deux origines possibles.



4.2 - Pré charge

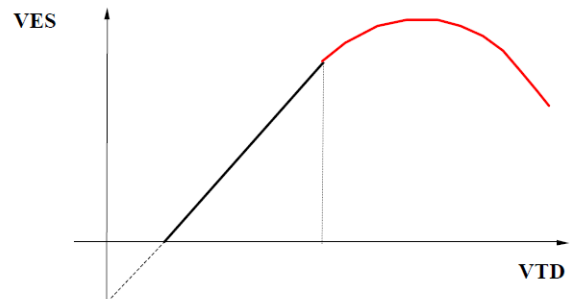
Une ↗ de la pré charge se traduit par une ↗ de PTD (la courbe rouge) ainsi la fermeture de la valve d'admission se fait tardivement et permet une augmentation du VTD → ↗VES et → ↗ débit Mais W_M ↗ aussi (augmentation de la surface de la courbe)

Remarque : au delà d'un certain étirement le VES ↘ c'est ce que explique la loi de Starling qui définit le VES en systole en fonction de l'étirement des fibres myocardique en diastole (qui dépend de PDT et VTD)



Loi de Starling : rappel $VES = VTD - VTS$

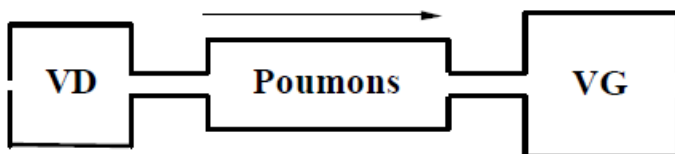
Le volume d'éjection en systole (VES) est une fonction directe de l'étirement des fibres myocardiques en diastole jusqu'à une distension maximale.



Conséquences de la loi de Starling :

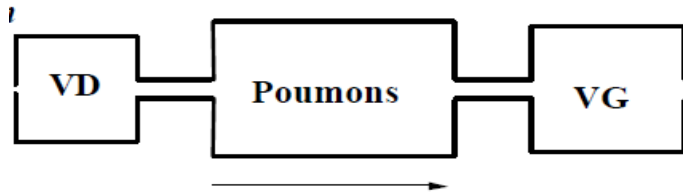
Partie linéaire (conséquence physiologique) :

La loi de Starling assure en permanence un débit identique entre les ventricules droits et gauches. Débit VD ↗ → ↗ pré charge VG → ↗ débit VG



Partie non linéaire (conséquence pathologique) :

Dans l'insuffisance ventriculaire gauche, à partir du point critique de la courbe, si le débit du VD augmente, le VES du VG ne peut pas augmenter autant et il y a engorgement entre les deux : l'œdème aigu du poumon



Dans l'insuffisance ventriculaire gauche, on se retrouve dans la partie non linéaire de la Loi de Starling. Au-delà d'une certaine pré-charge, le VG perd de sa contractilité et son VES diminue.

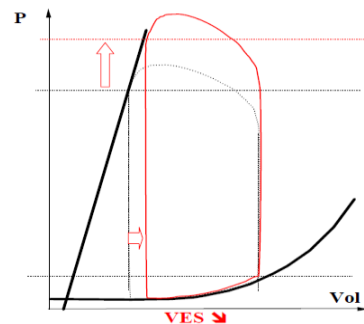
Le sang va s'accumuler dans le VG (puisqu'il ne sera plus correctement expulsé) puis progressivement dans les poumons. L'engorgement de sang au niveau pulmonaire entraîne un « œdème aigu du poumon » (passage de sang/plasma des capillaires vers les alvéoles pulmonaires).

4.3 - Post charge

Liée aux résistances à l'éjection du ventricule (Poiseuille $\Delta P = RD$) ; Post charge \nearrow ; VTS \nearrow ; VES \searrow ; débit \searrow ; W_M et W_T \nearrow

La post charge est le frein de l'éjection en simplifiant ça correspond à la P_a (pression artérielle)

Post charge $\nearrow \rightarrow V$ de remplissage $\nearrow \rightarrow$ pression développée par le v \nearrow selon Sterling



4.4 - Fréquence Agit directement et rapidement sur le débit :

$$D = FC \times VES$$

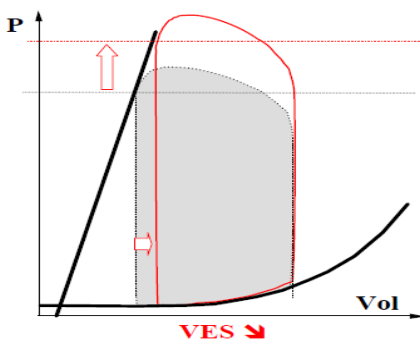
Remarque :

Plus il y a de contractions par unité de temps, plus il y a de consommation d'énergie (mécanique W_M et de mise en tension W_T) et moins bon est le rendement.

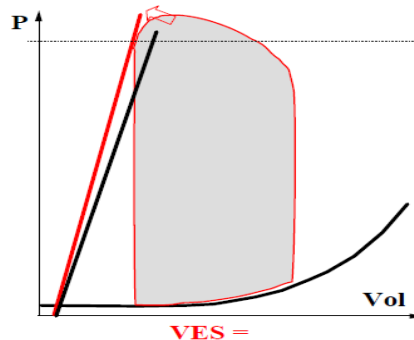
Conclusion :

Exemple de mise en jeu combinée de ces déterminants biophysiques: L'hypertension artérielle \nearrow augmentation de la post charge

Effet initial :



Réaction: \nearrow contractilité



Rétablissement des conditions hémodynamiques mais au prix d'une $\nearrow W_m$