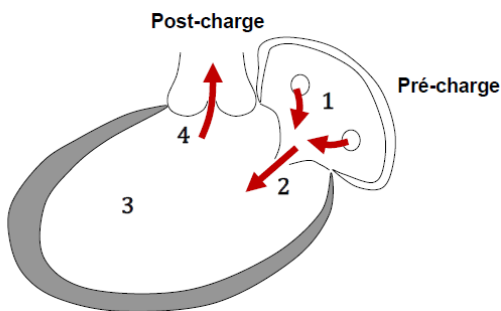
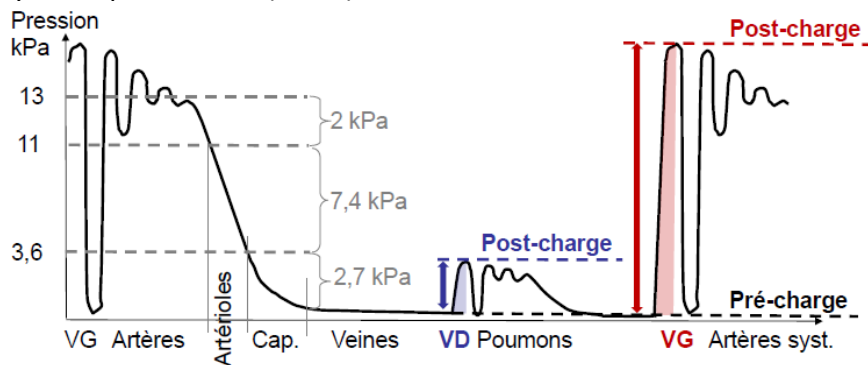


I – Hémodynamique intra-cardiaque

A – Principe de fonctionnement

- 2 systèmes de pompes en série
- Pour **compenser la perte de charge** (due à la résistance à l'écoulement) entre le retour veineux basse pression (**pré-charge**) et le secteur artériel haute pression (**post-charge**).
- Pré-charge = 1 kPa
- Post-charge pulmonaire = 2,6 kPa (artères pulmonaires)
- Post-charge systémique = 13 kPa (aorte)



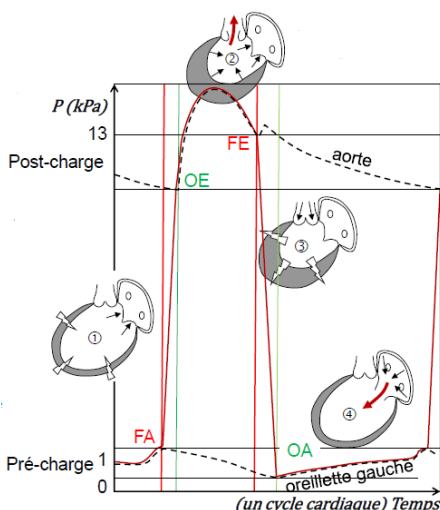
Pour chaque pompe :

- 1 : chambre d'**admission** basse pression (atrium)
- 2 : valve d'admission (droite : tricuspide ; gauche : mitrale)
- 3 : chambre de **chasse** (ventricule)
- 4 : valve d'éjection (droite : pulmonaire ; gauche : aortique)

Les valves sont normalement **unidirectionnelles**.

B – Courbes en fonction du temps ou du volume

1) Courbe pression/temps



- Jeu des valves :

FA : fermeture valve d'admission (mitrale)

OE : ouverture valve d'éjection (aortique)

FE : fermeture valve d'éjection

OA : ouverture valve d'admission

- Comportement du ventricule :

1 : Contraction **isovolumétrique** (entre FA et OE)

2 : Ejection (entre OE et FE)

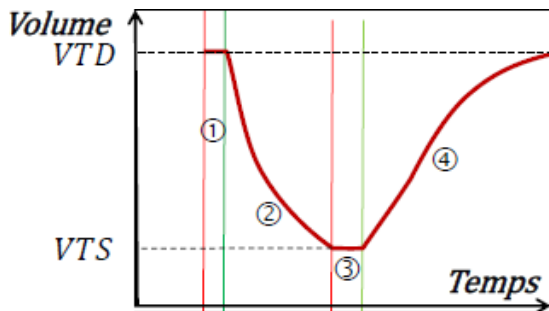
3 : Relaxation **isovolumétrique** (entre FE et OA)

4 : Remplissage diastolique (entre OA et FA)

♥ **Systole** = contraction isovolumétrique + éjection (de FA à FE) = **1/3** de la durée d'une contraction

♥ **Diastole** = relaxation isovolumétrique + remplissage (de FE à FA) = **2/3**

2) Courbe volume/temps



1 : Contraction isovolumétrique

2 : Ejection

Le volume diminue jusqu'au **volume télé-systolique** VTS = 50 mL

3 : Relaxation isovolumétrique

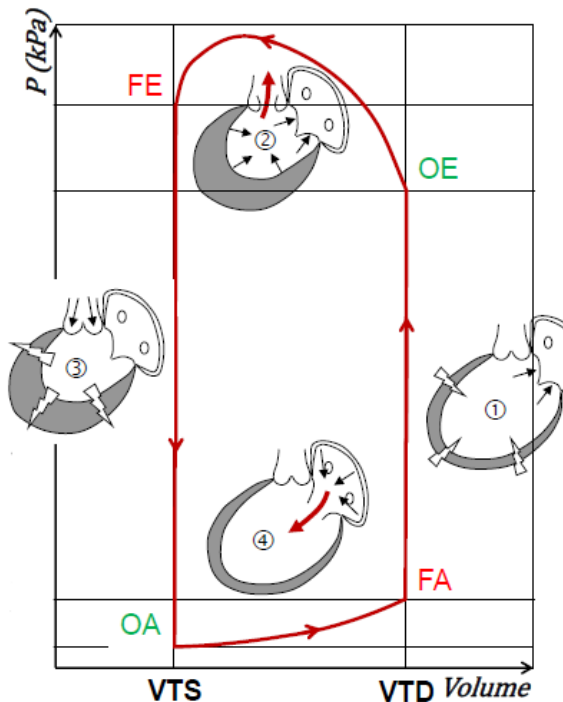
4 : Remplissage diastolique

Le volume augmente jusqu'au **volume télé-diastolique** VTD = 120mL

Volume d'éjection systolique VES = VTD – VTS = 70mL

Fraction d'éjection FE = VES/VTD = 60%

3) Courbe pression/volume



Au point **FE** : VTS en abscisse/PTS en ordonnée

Au point **FA** : VTD/PTD

Contraction/Relaxation

isovolumétriques (1 et 3) : partie verticale, le volume ne change pas.

Ejection (2) : le volume diminue et la pression augmente puis diminue (en haut).

Remplissage (4) : volume et pression augmentent (en bas).

Récap ♥ :

● CONTRACTION ISOVOLUMETRIQUE	
SYSTOLE (1/3)	→ après fermeture de la valve d'admission (FA) = « TOUM »
	→ volume constant
	→ augmentation de la pression
● EJECTION	
DIASTOLE (2/3)	→ après ouverture de la valve d'éjection (OE), à partir du moment où la pression ventriculaire > pression aortique
	→ après fermeture de la valve d'éjection (FE) = « TA »
	→ volume constante
● RELAXATION ISOVOLUMETRIQUE	
DIASTOLE (2/3)	→ diminution de la pression
	→ après ouverture de la valve d'admission (OA) à partir du moment où la pression atriale > pression ventriculaire
	→ remplissage

C – Méthodes d'exploration

➤ Auscultation physiologique :

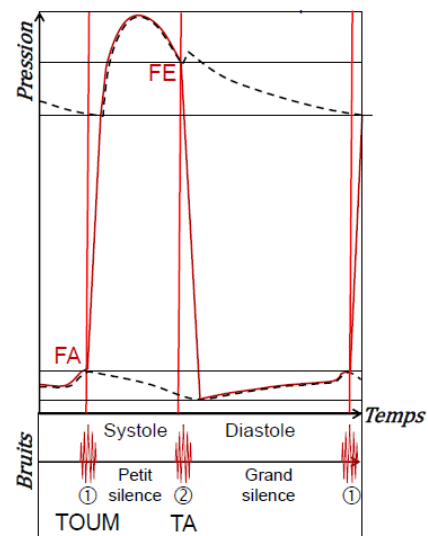
Bruits normaux du cœur = vibration des **valves qui se ferment** ++

Admission (mitrale et tricuspide) : premier bruit
« **TOUM** »

Ejection (pulmonaire et aortique) : deuxième
bruit « **TA** »

Séquence :

TOUM – Systole – TA - Diastole



➤ Auscultation pathologique :

Bruits anormaux liés à un écoulement turbulent pathologique (rétrécissement ou fuite des valves)

	Rétrécissement = sténose	Fuite = insuffisance
Souffle systolique (entre le TOUM et le TA)	<p>rétrécissement aortique</p>	<p>fuite mitrale</p>
Souffle diastolique (entre le TA et le TOUM)	<p>rétrécissement mitral</p>	<p>fuite aortique</p>

➤ Mesure des pressions par cathétérisme cardiaque :

Mise en place des sondes manométriques dans le cœur via le cathétérisme d'une artère.

→ mesure des **courbes pression/temps**

➤ Mesure des volumes :

Imageries cardiaques : échographie, radio rayons X, médecine nucléaire, IRM

Mesure des volumes **VTD et VTS**

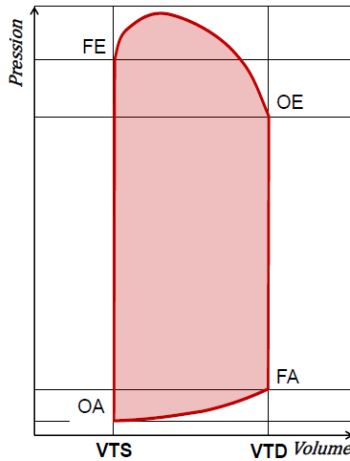
Calcul du **VES** et de la fraction d'éjection **FE**

II – Travail cardiaque

Le cœur doit fournir un travail mécanique pour **compenser les pertes de charges**.

Ce travail mécanique est la conséquence d'un **travail de mise en tension** des tissus myocardiques.

A) Travail mécanique



Il est lié à l'énergie de montée en pression :

$$W_M = P \cdot V$$

La pression et le volume varient :

$$W_M = \int P \cdot dV$$

Le travail mécanique est proportionnel à l'aire de la boucle pression/volume.

B) Travail de mise en tension des fibres myocardiques

$$W_T = \alpha \int T \cdot dt$$

T = tension pariétale

t = temps

α = coefficient de proportionnalité

Remarque : loi de Laplace appliquée au myocarde :

$$T = \frac{\Delta P \times r}{e} \quad e = \text{épaisseur}$$

Les variations du travail de mise en tension dépendent des variations de r et de e.

Lorsque la pression augmente :

→ l'augmentation de l'**épaisseur** (hypertrophie myocardique) peut compenser

→ l'augmentation du **rayon** (dilatation) qui survient ensuite aggrave (augmente T)

C) Travail total et rendement

$$\text{Travail total: } W = W_M + W_T = \int P \cdot dV + \alpha \int T \cdot dt$$

$$\text{Rendement: } R = \frac{W_M}{W_M + W_T} \approx 5\% \text{ à } 10\% \text{ au repos (augmente à l'effort)}$$

III – Déterminants de la performance ventriculaire

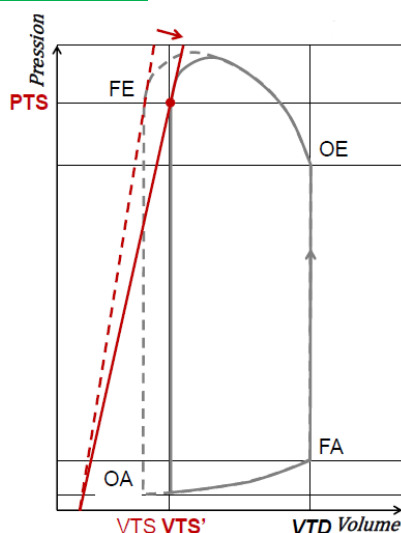
Définition : Capacité à assurer un **débit** circulatoire et des conditions de **pression** suffisantes pour répondre aux besoins de l'organisme avec un **travail minimum**.

Débit : $Q = \text{VES} \times \text{Fréquence cardiaque (FC)}$

Pression : $\Delta P = Q \times R$

5 paramètres : contractilité, compliance, pré-charge, post-charge, fréquence cardiaque.

A) Contractilité



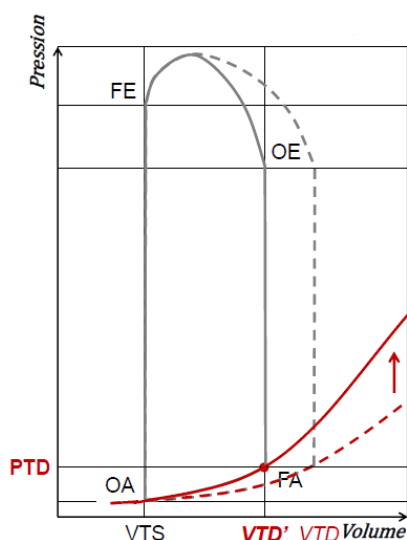
→ Relation pression/volume **télésystolique** en fin d'éjection (FE).

- Le **couple PTS/VTS** est défini par la contractilité du ventricule.
- Selon les variations de pression et de volume, ce point se déplace sur une droite.
- La contractilité c est la pente de cette droite :
 $PTS(VTS) = c \times VTS - b$

La **diminution de la contractilité** c' induit un nouveau couple PTS/VTS' et une modification de la boucle pression/volume.

La pente **diminue** et la PTS reste inchangée donc le VTS augmente et donc le **VES diminue**.

B) Compliance



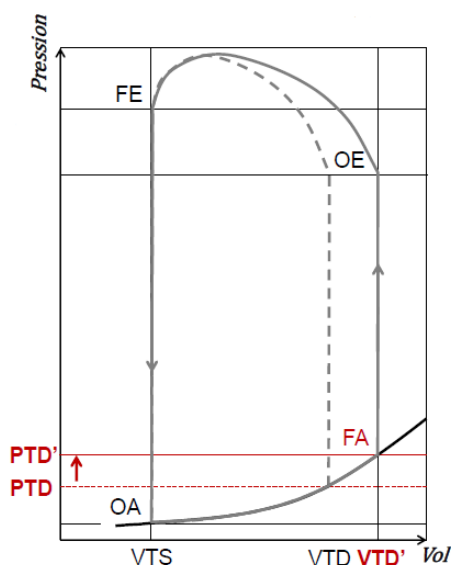
→ Relation pression/volume **télédiastolique** en fin de remplissage (FA).

- Le **couple PTD/VTD** est défini par la compliance du ventricule.
- Selon les variations de pression et de volume, ce point se déplace sur une courbe : c'est la **courbe de compliance** du ventricule.

La **diminution de la compliance** produit un nouveau couple PTD/VTD' et modifie la boucle pression/volume.

La courbe **monte** et la PTD ne change pas donc le VTD diminue et le **VES diminue**.

C) Pré-charge ventriculaire



→ Pression du retour veineux = **PTD**

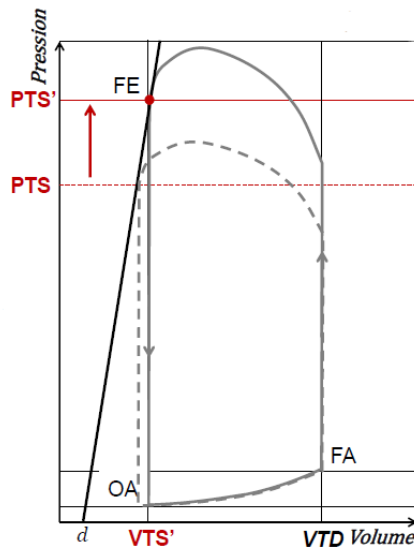
Si **PTD augmente**, la boucle se modifie suivant la **courbe de compliance**.

Nouvelle pression de fermeture de la valve d'admission **FA**.

VTD augmente donc **VES augmente**.

W_M augmente car la surface sous la boucle a augmenté.

D) Post-charge ventriculaire



→ Pression en sortie du ventricule = **PTS**, liée aux résistances ($\Delta P = RQ$)

Si **PTS augmente**, la boucle pression/volume se modifie en suivant la **droite de contractilité**. Nouvelle pression de fermeture de valve d'éjection **FE**.

VTS augmente donc **VES diminue**.

W_M augmente.

E) Fréquence cardiaque

→ Nombre de contractions ventriculaires par seconde.

- Agit directement sur le débit : $Q = FC \times VES$
- Permet une adaptation rapide
- Fréquence maximale théorique : $FC_{max} = 220 - \text{âge}$
- Quand FC augmente, le travail cardiaque par unité de temps augmente.

Récap ♥♥ :

CONTRACTILITE	<p>Elle définit le point FE en fin de systole sur la courbe pression-volume. Le couple PTS/VTS est défini par la contractilité du ventricule dans une situation donnée.</p> $PTS = c \cdot VTS - b$ <p>Lorsque la contractilité augmente (courbe en rouge), le VTS diminue donc le VES augmente (car $VES = VTD - VTS$). La contractilité diminue en cas d'insuffisance systolique.</p>	
COMPLIANCE	<p>Elle définit la façon dont le ventricule se laisse distendre passivement (par simple entrée de sang) en diastole.</p> <p>Le couple PTD/VTD est défini par la contractilité du ventricule dans une situation donnée. La courbe est donnée par :</p> $P(v) = a \cdot e^{kv} + b$ <p>avec $k = \text{élastance} = \frac{1}{\text{compliance}}$</p> <p>ATTENTION : lorsque la compliance diminue, k augmente donc la courbe obtenue est celle en rouge.</p> <p>Lorsque la compliance diminue (courbe en rouge) lors d'une insuffisance diastolique, le VTD diminue donc VES également.</p>	
PRE-CHARGE VENTRICULAIRE	<p>Une augmentation de la pré-charge ventriculaire se traduit par une augmentation du PTD (courbe en rouge). Ainsi, la fermeture de la valve d'admission se fait plus tardivement (tout en restant sur la courbe k) et permet une augmentation du VTD donc du VES.</p> <p>Au final, le débit cardiaque augmente mais le travail mécanique également (\nearrow de la surface)</p> <p>ATTENTION : au-delà d'un certain étirement, le VES diminue. C'est ce qu'explique la loi de Starling qui définit le volume d'éjection en systole (VES) en fonction de l'étirement des fibres myocardiques en diastole (qui dépend de VTD et PTD donc de la pré-charge).</p> <ul style="list-style-type: none"> - partie linéaire (physiologique) : $\nearrow VTD$ entraîne $\nearrow VES$ - partie non linéaire (décompensation) : $\nearrow VTD$ entraîne $\searrow VES$ 	
POST-CHARGE VENTRICULAIRE	<p>Elle est liée aux résistances à l'éjection du ventricule : c'est la pression en sortie de ventricule</p> <p>Une augmentation de la post-charge entraîne une augmentation du VTS donc une diminution du VES. Au final, le débit est plus faible mais le cœur doit mettre plus de force pour lutter contre les résistances périphériques donc le travail mécanique augmente.</p>	
FREQUENCE CARDIAQUE	<p>Elle agit directement et rapidement sur le débit : $D = FC \times VES$</p> <p>La fréquence cardiaque maximale théorique est donnée par : $FC_{max} = 220 - \text{âge}$</p> <p>Rq : plus il y a de contractions par unité de temps et plus la consommation d'énergie augmente ($W_M + W_r \nearrow$) donc moins bon est le rendement.</p>	