

# BIOPHYSIQUE CARDIAQUE

Antoinezfront



# I. Anatomie cardiaque

**Le Cœur** est un muscle strié et un organe creux séparée en 2 moitiés INDEPENDANTES.

Chaque moitié =

- **1 ATRIUM**
- **1 VENTRICULE**

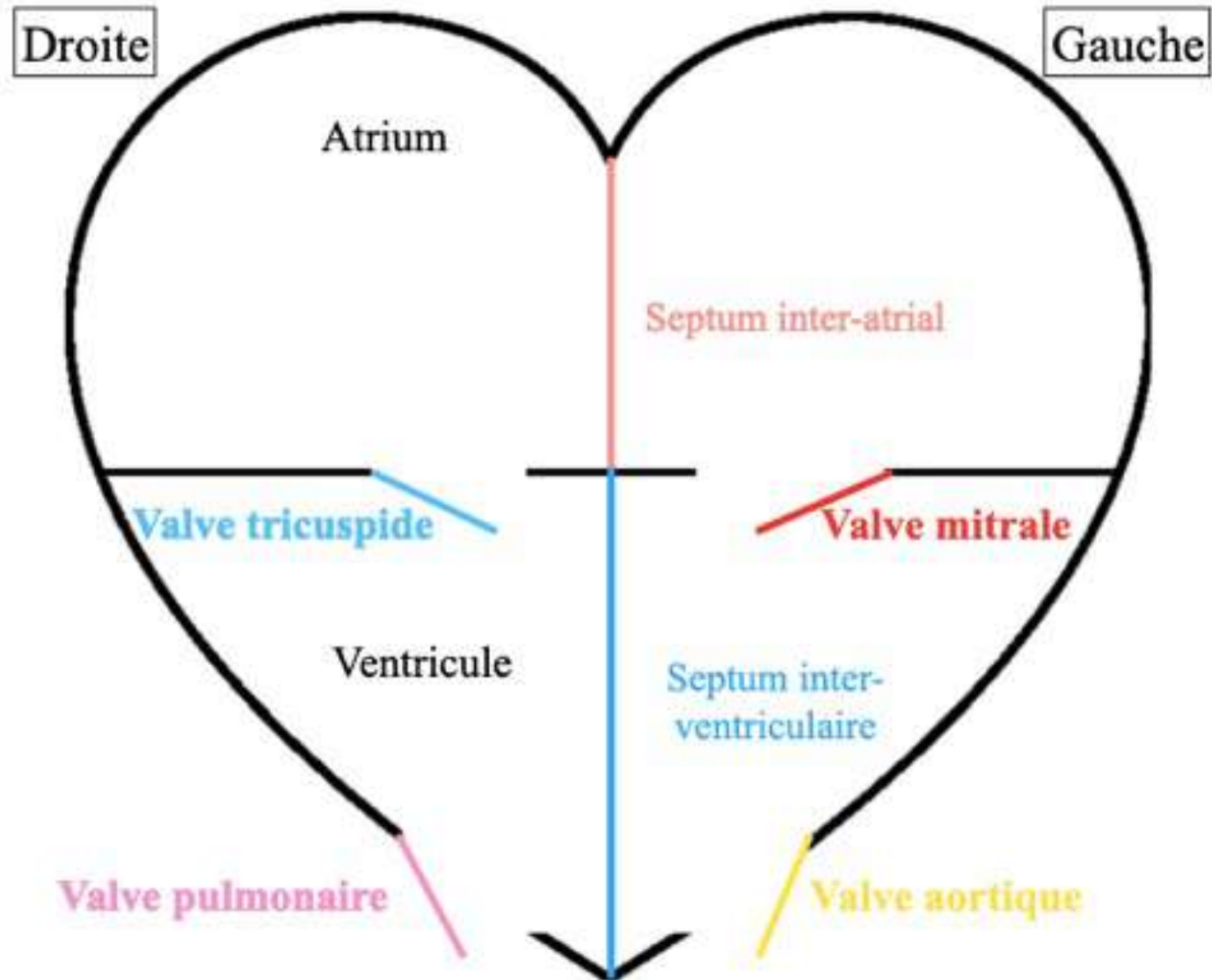
Ils communiquent entre eux par des VALVES =

- **Tricuspide** à Droite
- **Mitrale** à Gauche

Portes de sortie du cœur = les valves **Pulmonaire** et **Aortique**.

Et enfin les SEPTUMS :

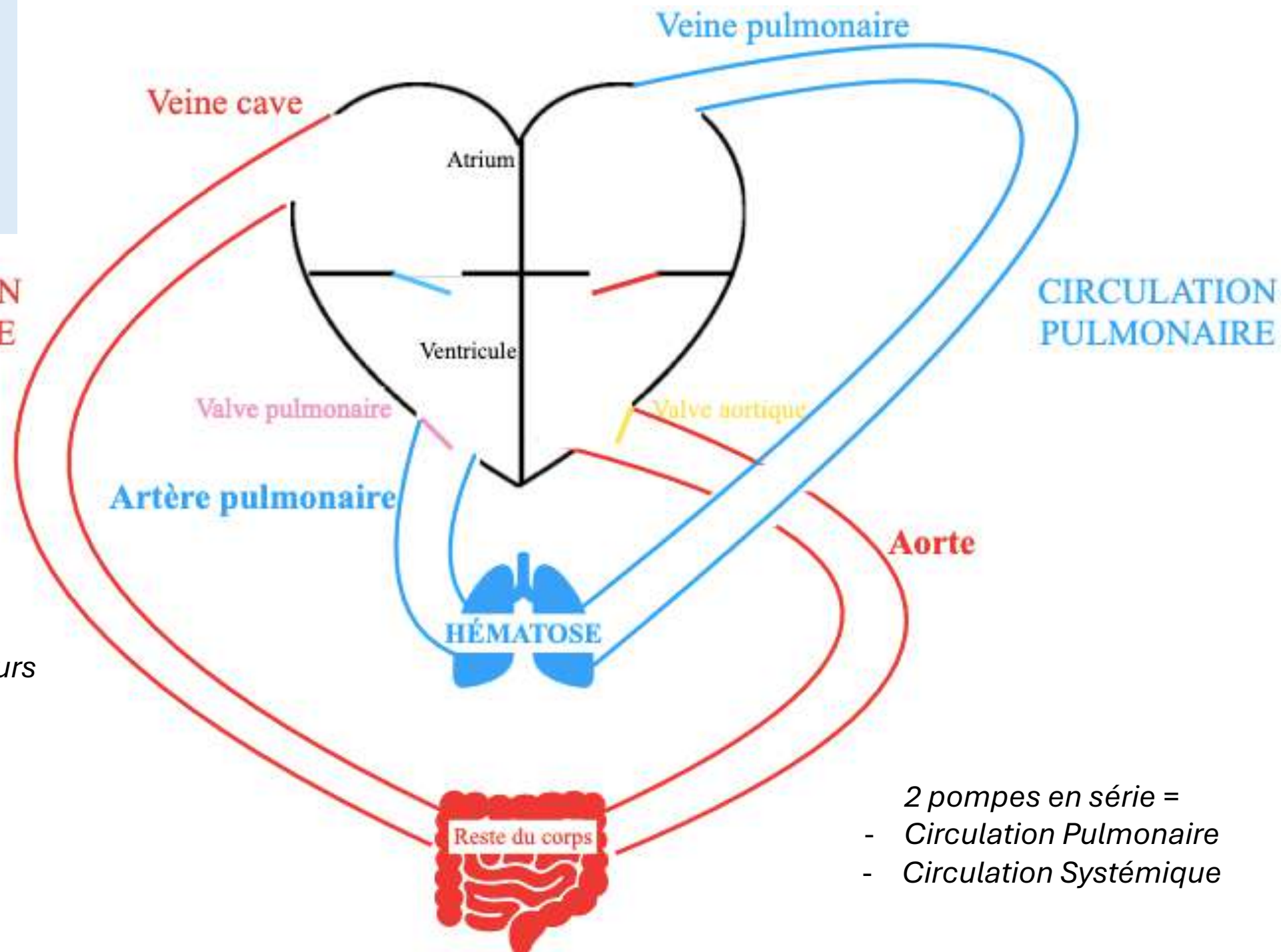
Le septum inter-atrial et inter-ventriculaire



## II. Fonction cardiaque

**CIRCULATION  
SYSTÉMIQUE**

**CIRCULATION  
PULMONAIRE**



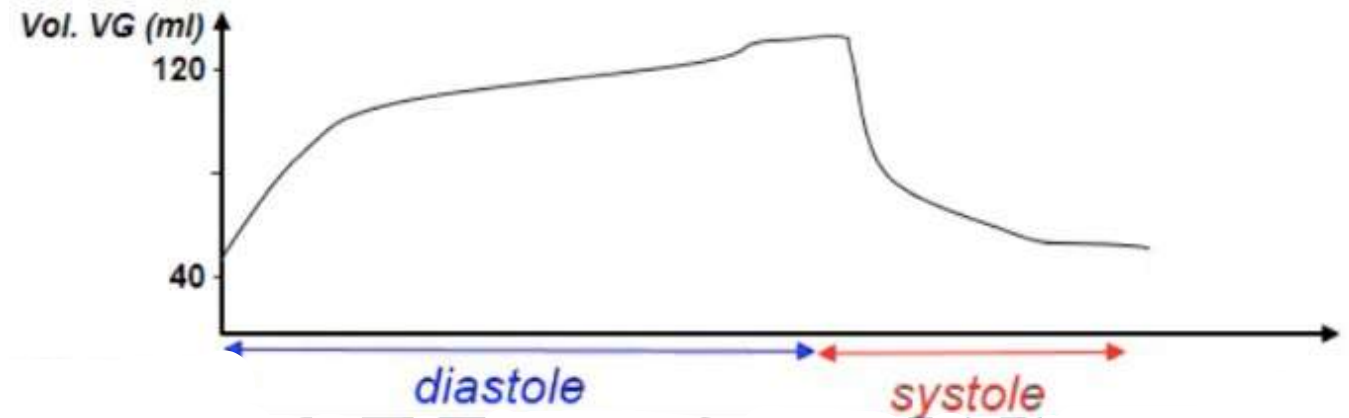
Caractéristique pompe  
cardiaque :

- 1) modifie son volume au cours du cycle de contraction.
- 2) adapte sa contraction.
- 3) s'adapte en force, en puissance et rapidité en fonction des besoins.

- 2 pompes en série =
- Circulation Pulmonaire
  - Circulation Systémique

Cycle cardiaque = 2 phases

- **SYSTOLE** = contraction =  
1/3 du cycle
- **DIASTOLE** = remplissage =  
2/3 du cycle



Volumes cardiaques : 2 extrêmes

- **VTD** = Volume télédiastolique  
(volume ventricule est au max en fin de diastole) = 120 ml

- **VTS** = Volume télésystolique  
(volume ventricule est au minimum en fin de systole) = 50 ml

Volume d'éjection systolique :  
**VES = VTD - VTS**

Fraction d'éjection :  
**FE = VES/VTD = (VTD-VTS)/VTD**

Débit cardiaque :  
**Q = VES x FC = VTD x FE x FC**

# III. Physiologie contractile du myocarde

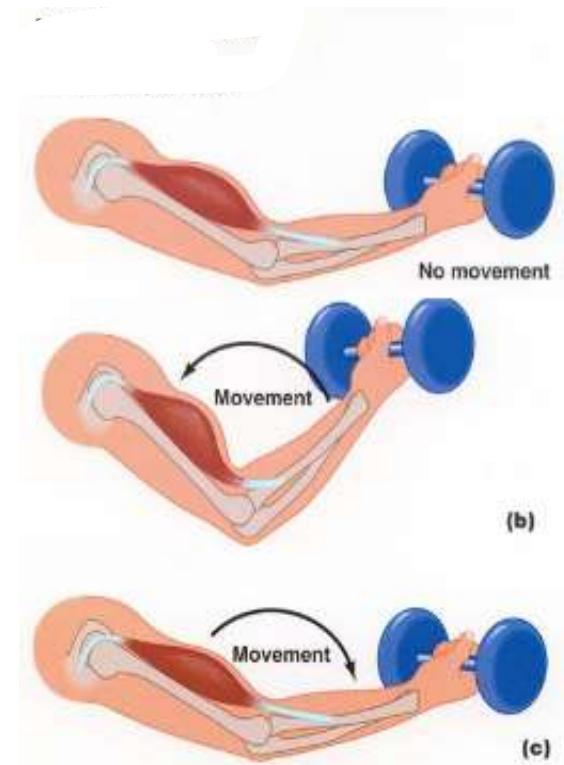
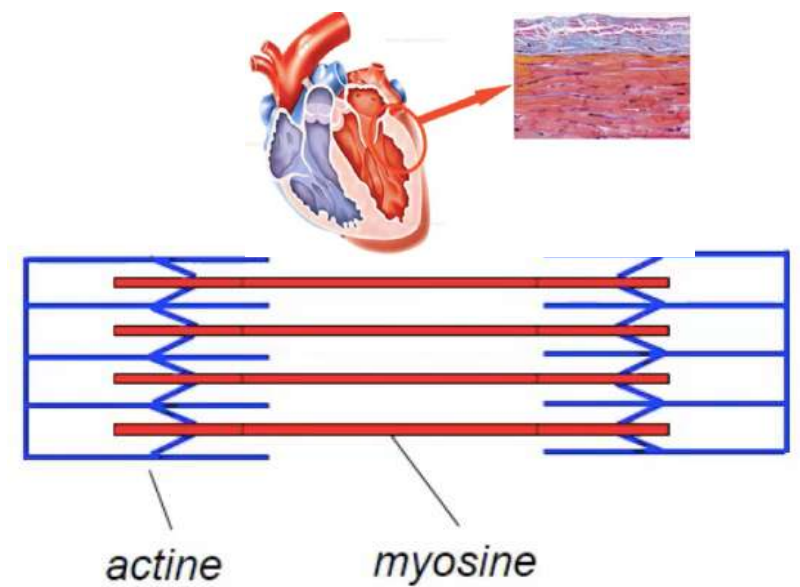
## Définitions

Un myocarde ? Un cardiomyocyte ?

Le sarcomère ?

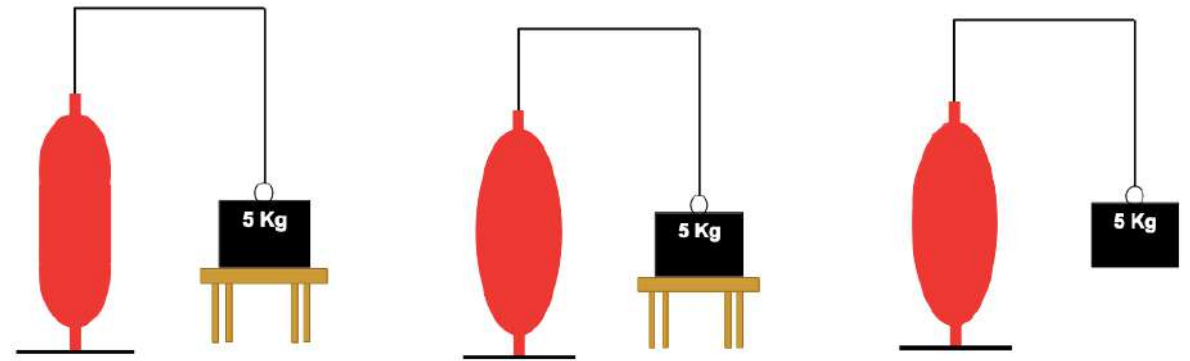
La contraction d'une fibre musculaire :

- 1) **Contraction isométrique** : sous tension, pas mouvement donc pas de travail musculaire.
- 2) **Contraction isotonique** : raccourcissement  $\Rightarrow$  mouvement donc travail.
- 3) **Relaxation** : retours à sa longueur de repos, diminution force.



## POST-CHARGE

C'est **une force** contre laquelle travaille la fibre musculaire



- 1) Au repos : **PAS** de contraction musculaire
- 2) Sans tabouret : **contraction isométrique**
- 3) Soulèvement poids : **contraction isotonique**

## PRE-CHARGE

Les fibres cardiaques ont aussi une **composante élastique** : elles ont donc la capacité de s'étirer lors du remplissage diastolique



liée au VTD et le VTD dépend du retour veineux et de la contraction auriculaire.

Retour veineux lié à 3 facteurs =

- 1) pompe musculaire
- 2) pompe respiratoire
- 3) veino constriction

# Loi de Franck-Starling

La force de contraction du ventricule est d'autant plus grande que les cellules myocardiques sont plus étirées avant leur contraction.

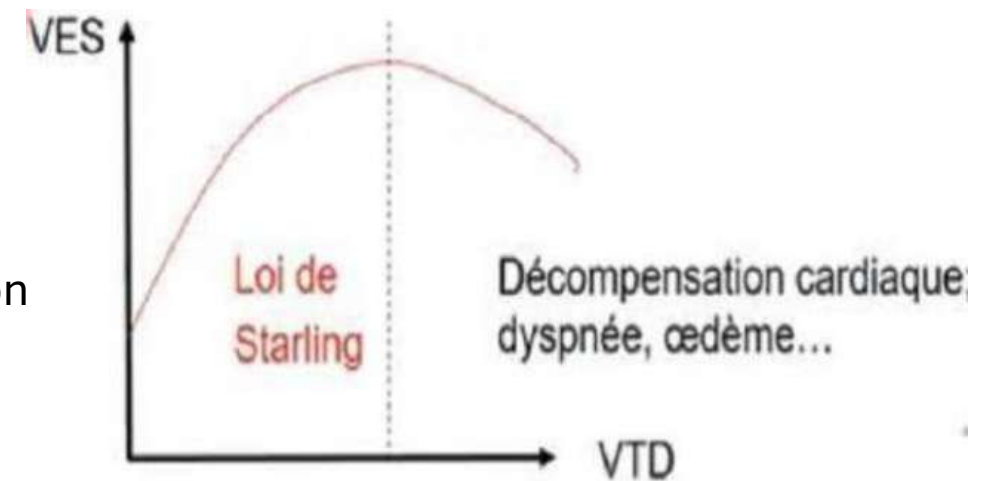
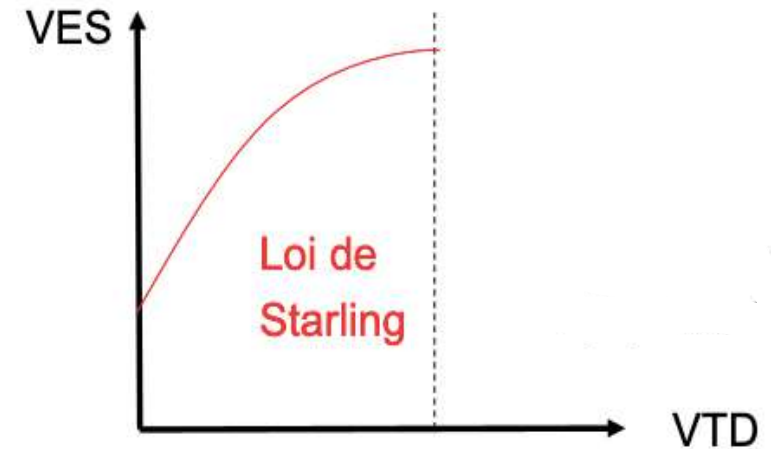
**Retour veineux  $\uparrow$ , VTD  $\uparrow$  donc VES  $\uparrow$**

La force d'étirement des fibres musculaires du ventricule correspond à la Pré-charge.

**=  $\uparrow$  Précharge (pression de remplissage du VG) =  $\uparrow$  force de contraction du VG contre la postcharge.**

Si augmentation VTD, on a une augmentation linéaire du VES (condition physiologique)

Puis plateau, avec décompensation cardiaque avec diminution VES.



*On peut avoir certains symptômes comme des dyspnées ou des œdèmes pulmonaires et du membre inférieur.*

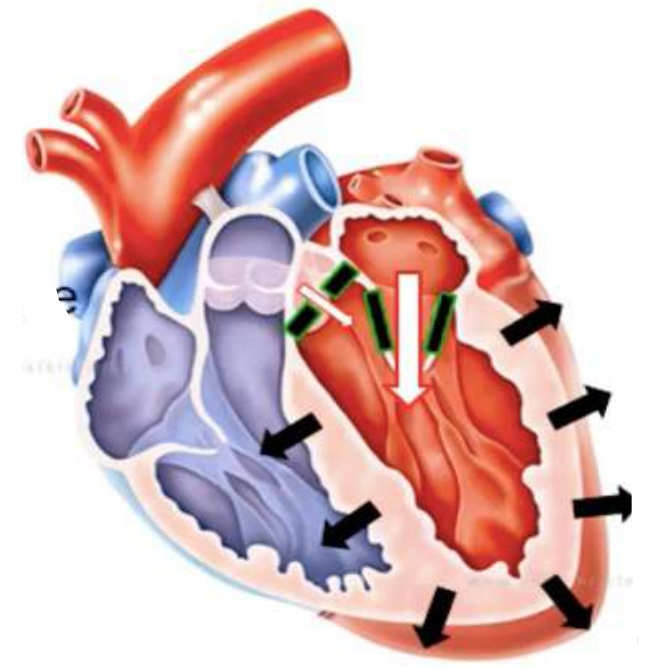
# Insuffisance aortique :

*Une fuite de la valve aortique lors de sa fermeture.*

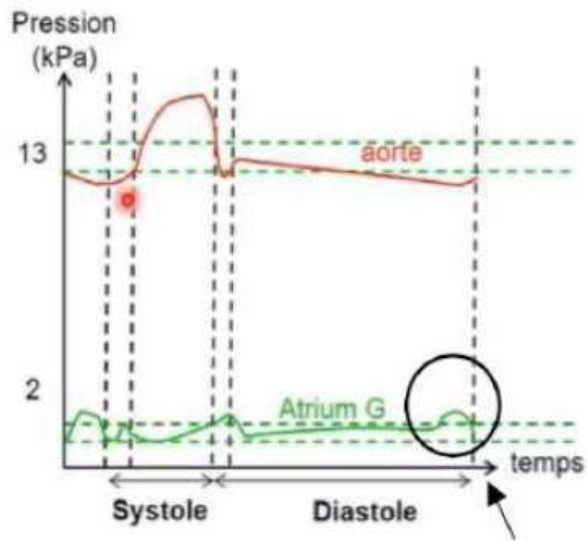
On a une **mauvaise fermeture de la valve aortique**, on a un peu de sang qui passe à travers elle, et là c'est pathologique, le sang ne doit pas faire reflux. Ce petit volume de sang venant de l'aorte, va s'ajouter au volume de sang principal provenant de l'atrium, et est pathologique car il **augmente le remplissage du ventricule**.

↑ **du volume de remplissage du VG** = ↑ des forces d'étirement du ventricule = ↑ Pré-charge = dilatation du VG. Loi de Franck Starling : ↑ de la force de contraction systolique liée à l'augmentation de la Pré-charge. ↑ **du VES**, cela permet de compenser le volume apporté par la fuite aortique. Cela est valable lorsque la fuite aortique est assez **peu abondante**.

Malheureusement, souvent la fuite va évoluer en **se majorant**. Le VTD continue à augmenter et devient tellement important que la relation n'est plus linéaire. Le VES ne s'adapte plus. On entre alors en **insuffisance cardiaque**. Nécessité prise en charge chirurgicale et remplacement de la valve aortique, pour supprimer la fuite et que votre ventricule ne soit pas trop dilaté et que vous soyez encore à un stade réversible.

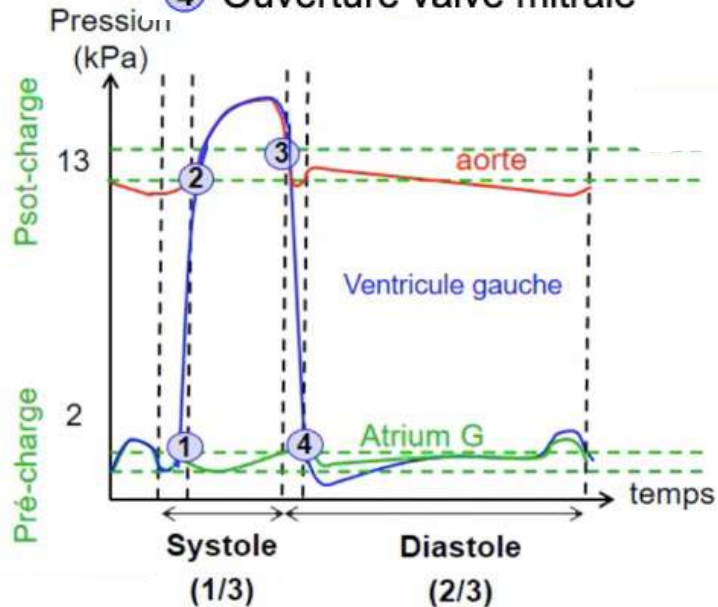


# Diagramme pression en fonction du temps du VG



## Systole auriculaire

- ① Fermeture valve mitrale
- ② Ouverture valve aortique
- ③ Fermeture valve aortique
- ④ Ouverture valve mitrale



On va étudier **l'évolution de la pression, on a besoin de 2 courbes =**

La courbe de pression dans l'atrium gauche lié au retour du sang de la circulation pulmonaire. Elle est assez faible **1kPa**

La courbe de pression aortique, augmente au moment de la phase d'éjection du sang, elle est à environ **13kPa**

La 3<sup>e</sup> courbe qui nous intéresse est la courbe de pression du ventricule gauche, qui évolue entre la précharge et la postcharge.

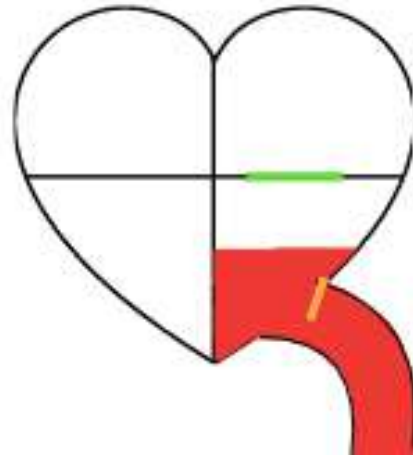
***A noté : La systole auriculaire** permet 10 à 20% du remplissage total du ventricule. Elle semble petite en termes de pression mais son rôle est quand même présent.*

# Cycle cardiaque = 4 phases principales



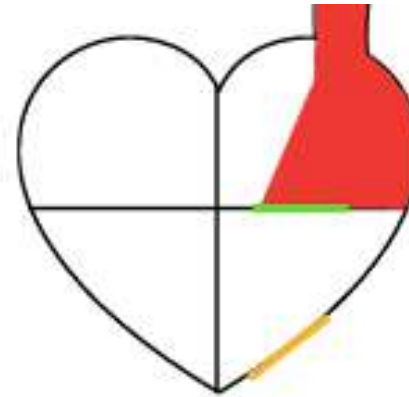
## 1. Contraction Isovolumétrique

- Valve mitrale fermée
- Valve aortique fermée



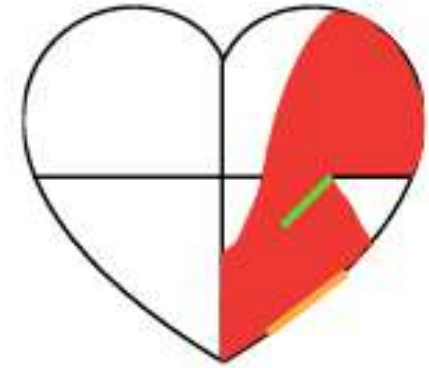
## 2. Éjection

- Valve mitrale fermée
- Valve aortique ouverte



## 3. Relaxation Isovolumétrique

- Valve mitrale fermée
- Valve aortique fermée



## 4. Phase de remplissage

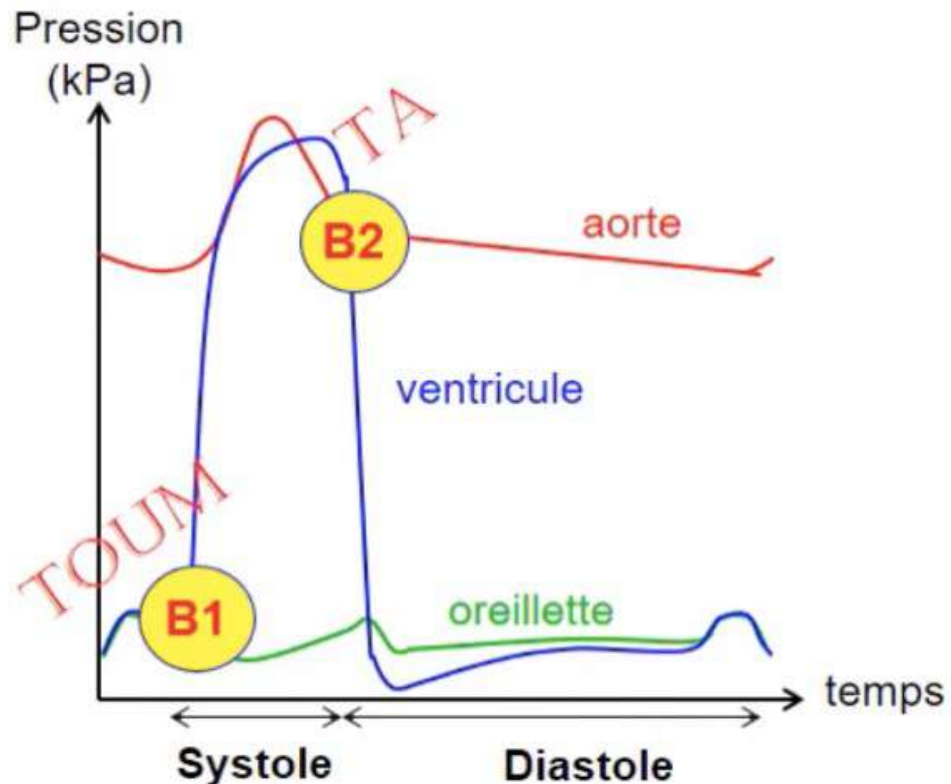
- Valve mitrale ouverte
- Valve aortique fermée

# Étude des bruits de cœur (=phonocardiographie)

**Bruits du cœur** s'expliquent par les mouvements d'ouverture et de fermeture des valves, mais c'est surtout la **fermeture** qui fait du bruit.

**B1** = fermeture des valves auriculoventriculaires = **TOUM**

**B2** = fermeture des valves sigmoïdes = **TA**



*La systole est entre B1 et B2, contrairement à la diastole entre B2 et B1. Fermeture des valves droites et gauches sont simultanées donc B1 et B2 valves des deux côtés en simultanées.*

**Les souffles cardiaques** correspondent à une augmentation des turbulences du sang à la suite d'une modification de l'écoulement sanguin (tel qu'une fuite, ou un rétrécissement des valves). Les souffles vont avoir différentes tonalités.



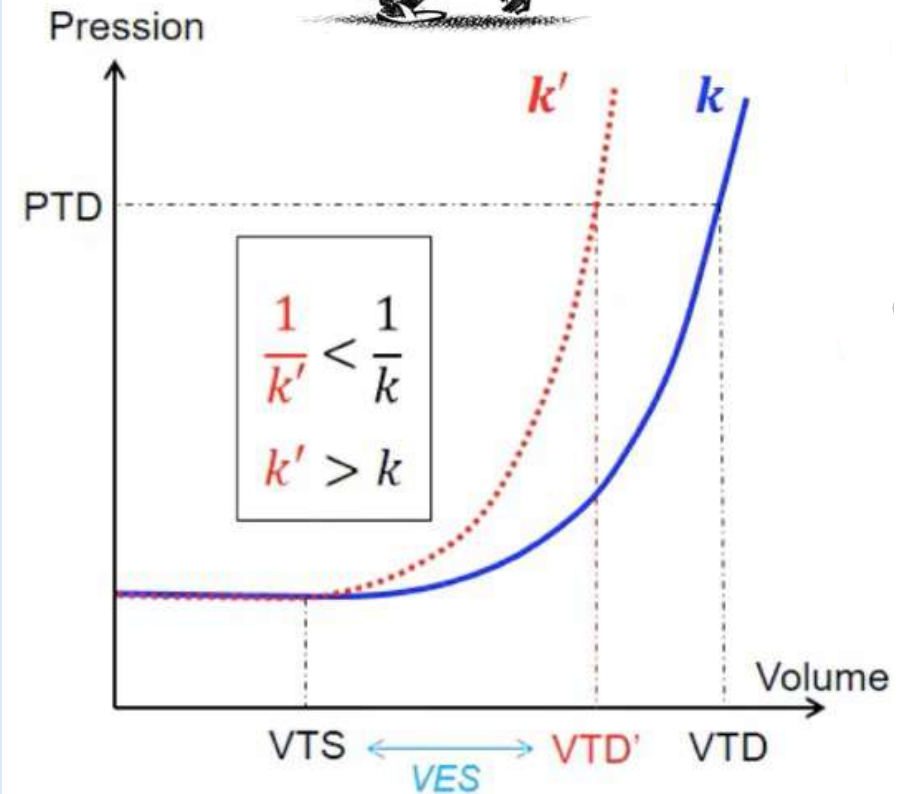
# Compliance cardiaque

La compliance définit la **capacité de distension passive** des fibres musculaires du ventricule lors de la **diastole**.

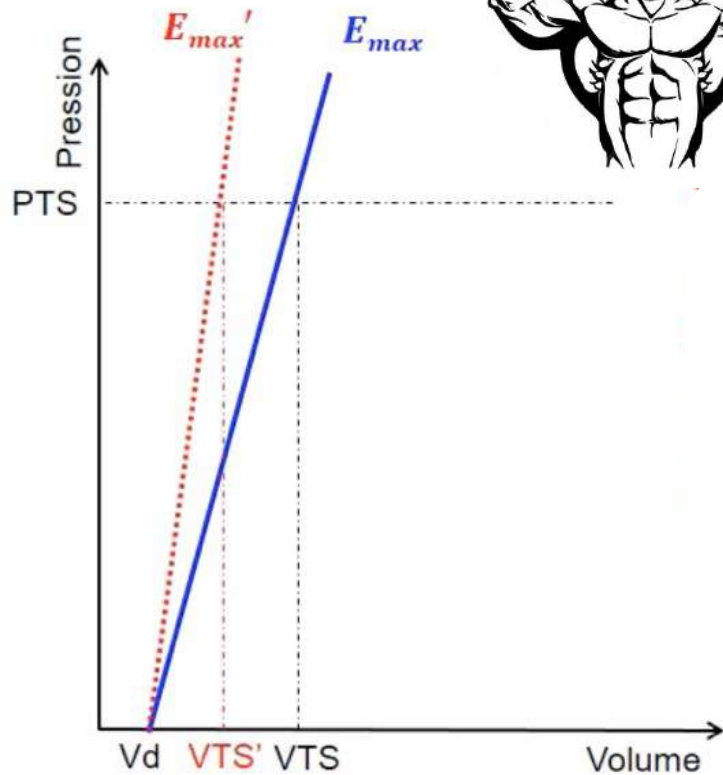
Lors du remplissage diastolique, la pression et le volume ventriculaire évolue le long de la **courbe exponentielle**. Cette courbe commence depuis le VTS jusqu'au VTD

**Si la compliance ou  $1/k \downarrow$  = on a moins d'élasticité ventriculaire**

Donc  $k \uparrow$  car  $k$  est l'inverse de  $1/k$ , on passe de la courbe **bleue** à la courbe **rouge**



- Si la **compliance ( $1/k \uparrow$ )**, alors  $k \downarrow$ , le VTD  $\uparrow$ , le VES  $\uparrow$ .
- Si la **compliance ( $1/k \downarrow$ )**, alors  $k \uparrow$ , le VTD  $\downarrow$ , et le VES  $\downarrow$



# Contractilité cardiaque

Définit la vigueur, **la force de contraction** des fibres musculaires cardiaques lors de la **systole**.

La PTS et le VTS sont reliés par une relation **LINEAIRE**.

$$PTS = E_{max} \cdot (VTS - V_d)$$

avec  **$E_{max}$**  la pente de cette droite, appelée élastance maximale.

- Si la **contractilité**  $\uparrow$ , donc  **$E_{max}$**   $\uparrow$ , alors la **pente** de la droite **augmente** (on passe de la **droite bleue** à la **droite rouge**) : PTS est inchangée, VTS diminue, VES augmente.
- À l'inverse, si la **contractilité**  $\downarrow$ , on passe de la **courbe rouge** à la **courbe bleue** : VTS augmente, donc le VES diminue.

**$E_{max}$**  = très bon indice de la contractilité ventriculaire, mais en réalité, c'est **l'élastance** qui **reflète la contractilité ventriculaire** ( $\neq$ élasticité).

**$E_{max}$**  est **INDÉPENDANTE** de la précharge et de la postcharge

## IV. Diagramme pression-volume du VG

Représente le cycle cardiaque en enlevant la notion du temps. Le cycle est sous forme d'une **boucle**. Les côtes **verticales** représentent les valeurs max et min du **volume**, et en **horizontal** on retrouve les **pressions** max et min.

On distingue les 4 phases du cycle cardiaque :

**2 Phases systoliques =**

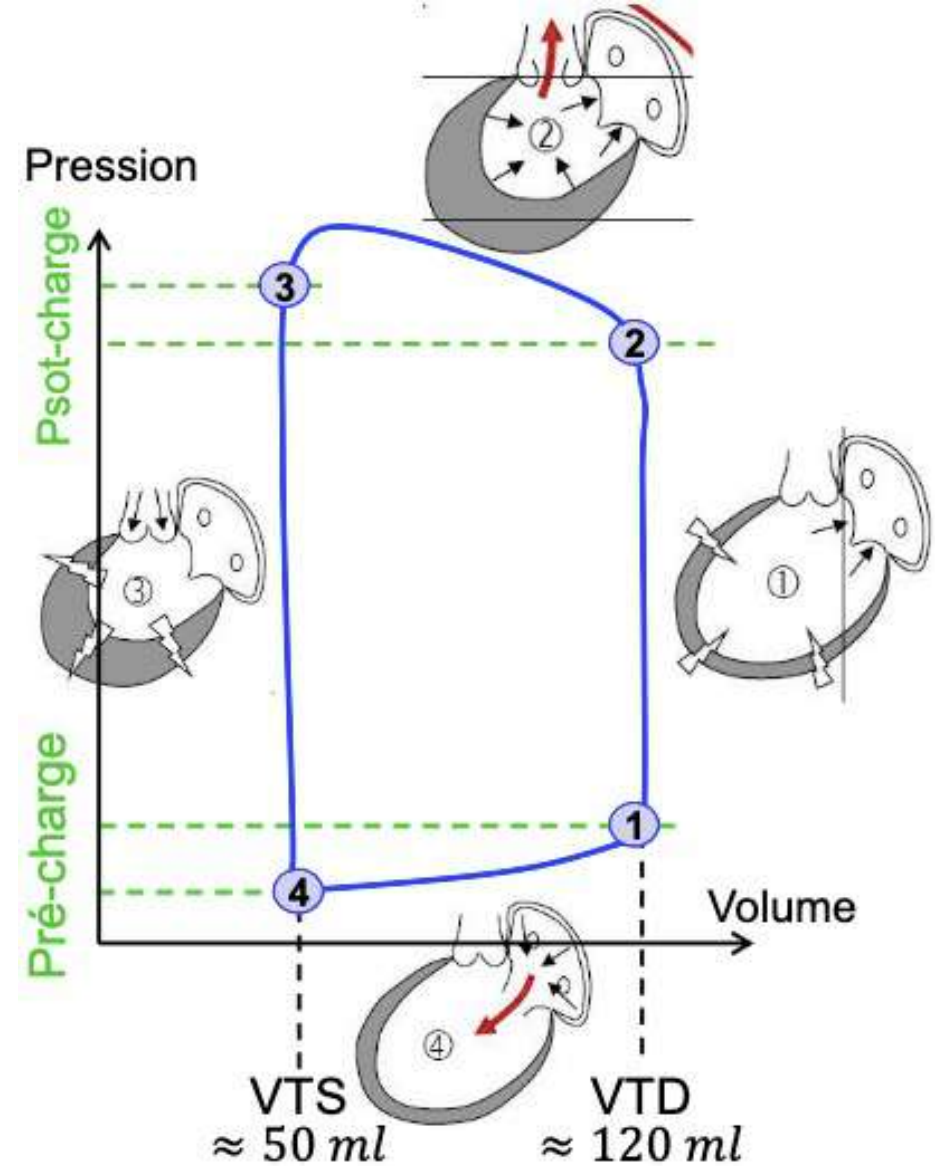
Contraction isovolumétrique : 1 à 2

Ejection : 2 à 3

**2 Phases diastoliques =**

Relaxation isovolumétrique : 3 à 4

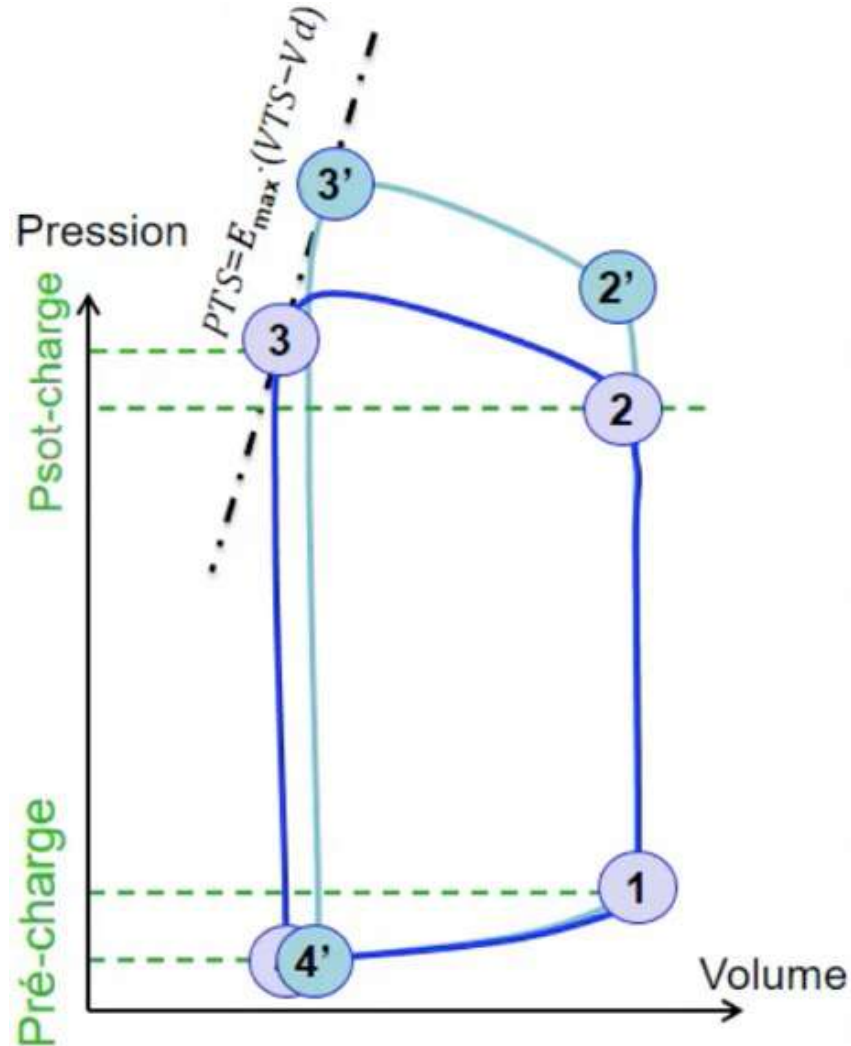
Remplissage : 4 à 1



- ① Fermeture valve mitrale
- ② Ouverture valve aortique
- ③ Fermeture valve aortique
- ④ Ouverture valve mitrale

# Influence de la Post-charge sur le diagramme

## Augmentation Post-charge



Si la pression aortique augmente, la pression systolique dans le VG doit augmenter pour dépasser la pression aortique et rouvrir la valve aortique (2). Le point (2) se déplace donc vers le haut puisque la pression dans le ventricule est supérieure.

**La pression maximale augmente** et le point (3) qui correspond à la fermeture de la valve aortique se déplace également vers le haut. La pression en fin de systole (PTS) est augmentée si la post charge est augmentée. Le point (3) se décale aussi un peu vers la droite car ce point doit rester sur **la ligne de la contractilité** pour respecter la linéarité entre PTS et VTS.

**Le PTS ↑ donc le VTS ↑, le VES ↓ (VES = VTD - VTS) Donc le débit aortique diminue**

**↑ Post-charge = Conséquences = diminution du volume d'éjection cardiaque et donc du débit cardiaque.**

# Influence de la Pré-charge sur le diagramme

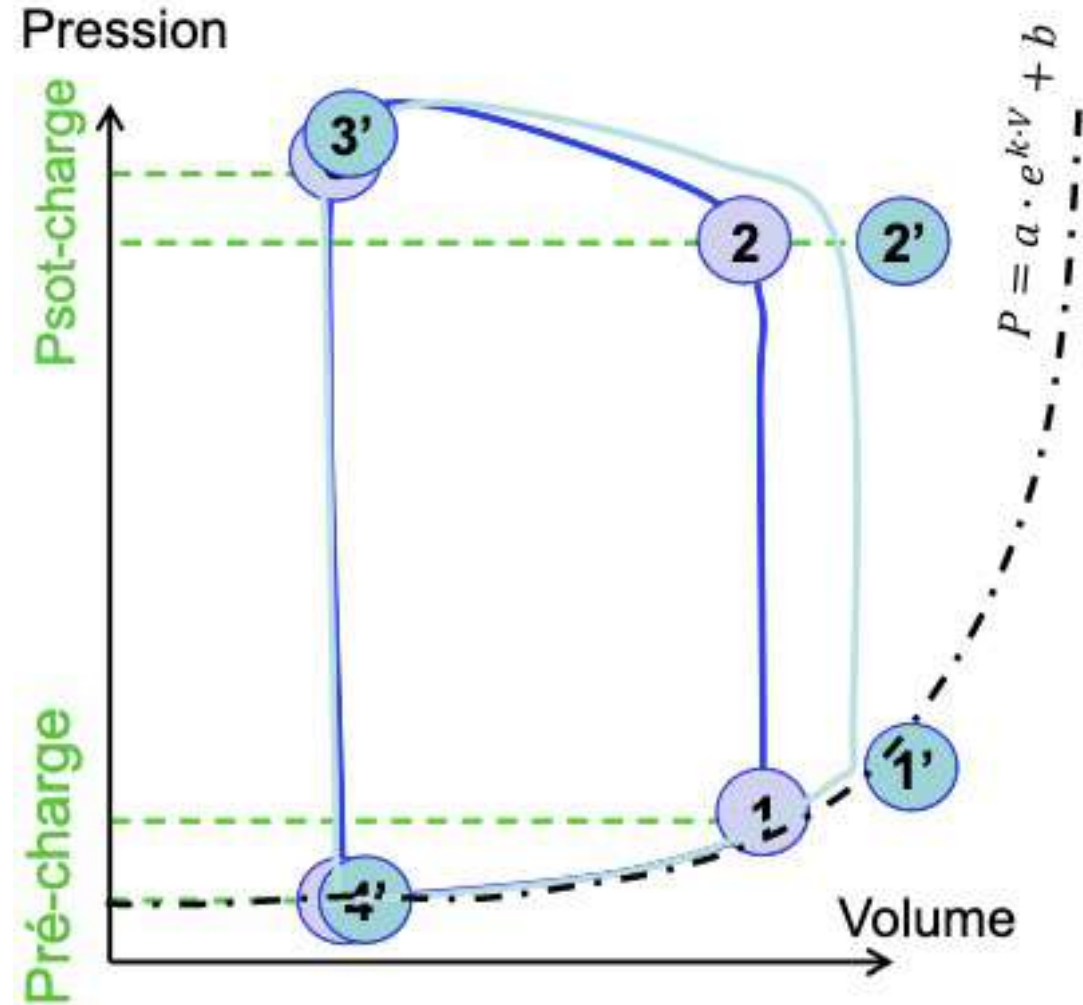
## Augmentation Pré-charge

Une augmentation de la précharge est la conséquence d'une **augmentation de la PTD** du VG.

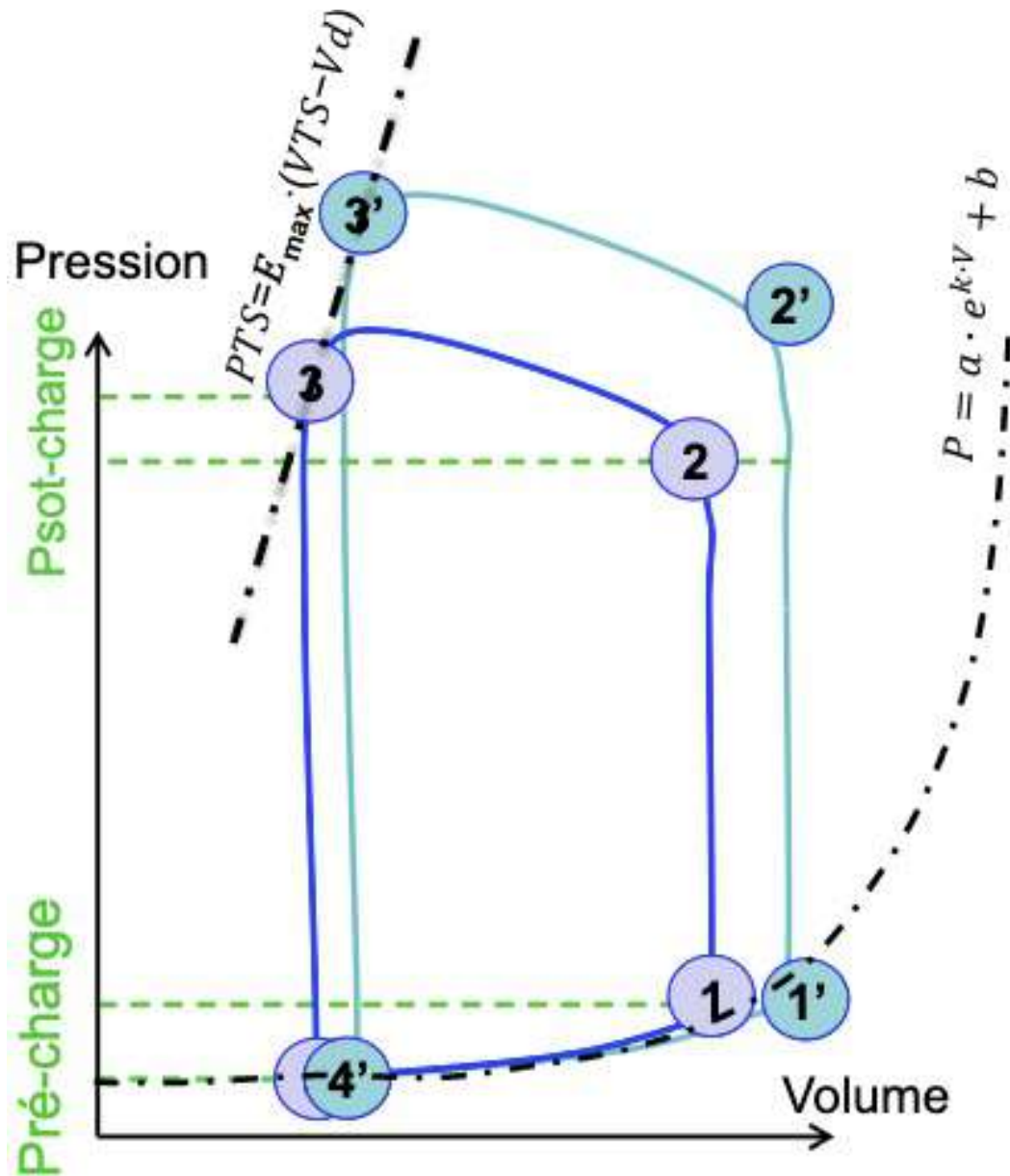
En fin de diastole, lorsque la valve mitrale se ferme (1), le VTD est plus important, le point (1) se déplace **vers la droite** et une légère augmentation de la PTD donc le point (1) se déplace également **légèrement vers le haut** et doit rester sur **la courbe de compliance**.

Ensuite on a la contraction isovolumétrique dans le point (2) qui marque la fin de cette contraction par l'ouverture de la valve aortique se déplace aussi **vers la droite**.

↑ **Pré-charge** entraîne **VTD** ↑, VTS = (inchangé) donc un **VES** ↑ et la PTS n'augmente pas car ici la **Post-charge est inchangé**.



# Augmentation Pré-charge et Post-charge



A contractilité égale du ventricule, la **PTS augmente** liée à une augmentation de la Post-charge.

Le point (3) se décale toujours un peu vers la droite et le haut pour rester sur **la droite de contractilité E<sub>max</sub>**.

↑ Pré-charge et ↑ Post-charge = Conséquences = **VTD ↑ > VTS ↑** donc **VES globalement augmenté**

# Impact de la contractilité cardiaque

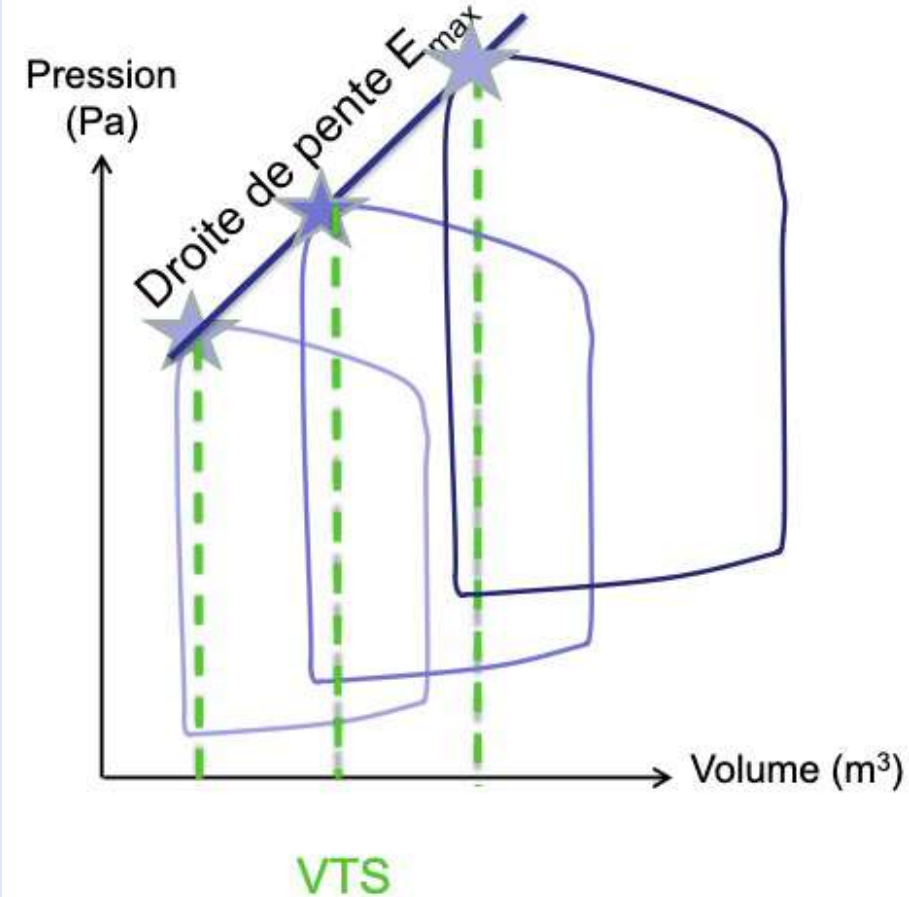
La FEVG est très dépendante des volumes liés à la modification de pré et post charges.

A l'inverse, la contractilité cardiaque est INDÉPENDANTE de la précharge et de la postcharge du ventricule, c'est donc un bon reflet des performances globales du cœur

L'évolution de ces boucles est caractérisée par la droite de la contractilité qui rejoint les bords supérieurs gauches des boucles.

La pente  $E_{max}$  correspond à l'élastance ou encore à la contractilité du ventricule.  $E_{max}$  donne la capacité d'adaptation du cœur à différentes conditions

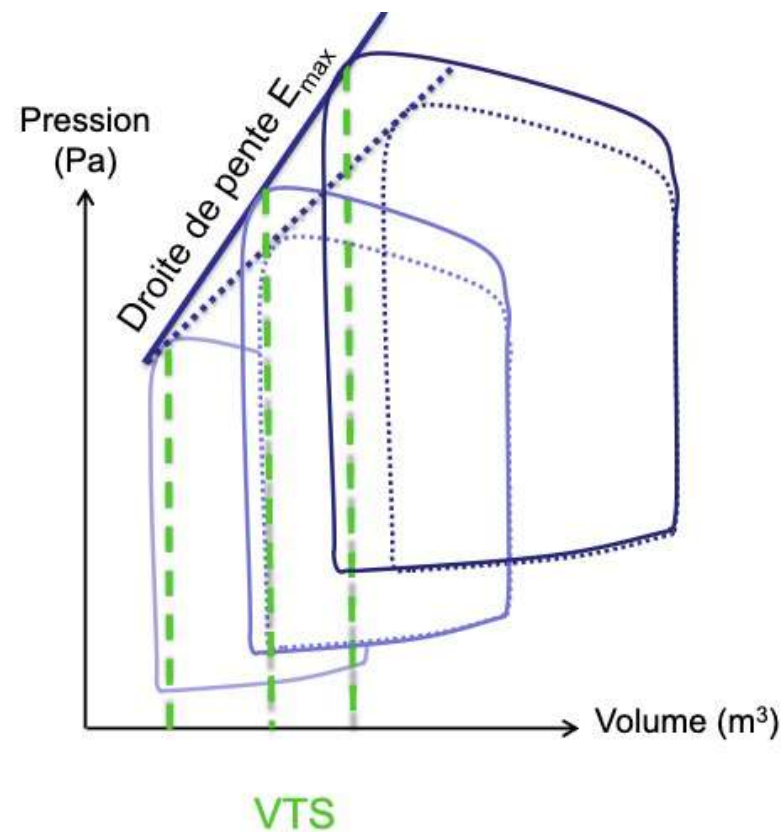
La contractilité cardiaque est donc définie par la pente  $E_{max}$ , et permet d'appréhender la capacité de contraction et d'adaptation du cœur selon les conditions physiologiques.



On a des modifications du débit sanguin, des pressions intraventriculaires mais également de la pression artérielle.



# Augmentation de la contractilité cardiaque



Grâce à des médicaments : **inotrope**. Ceux-ci vont modifier la contractilité, l'élastance  $E_{max}$  et donc entraîne une **augmentation de la pente de la droite** de la contractilité du ventricule.

Les médicaments inotropes **ne modifient PAS le VTD** qui reste similaire pour les différents types d'efforts.

En revanche, on voit qu'il y a une **diminution du VTS** à l'effort modéré comme à l'effort intense ce qui entraîne une **augmentation de VES**

# V. Travail cardiaque

De manière générale, le **travail** est noté **W** (pour work en anglais) et il est égal au produit de la **force F** par le **déplacement d** de l'objet.

$$W = F \cdot d$$

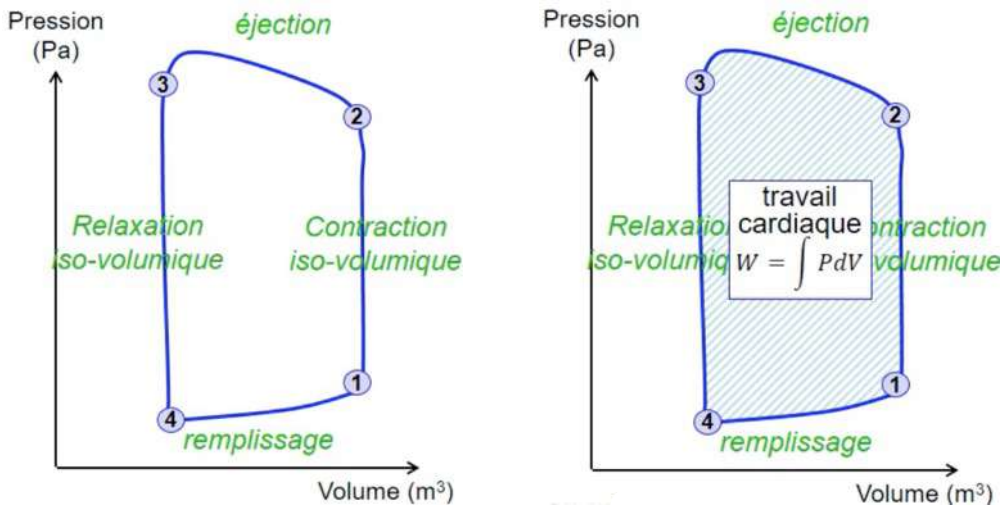


Au niveau de la contraction cardiaque, La force F correspond à la **pression intraventriculaire P** Le déplacement d correspond au **volume** de sang éjecté **V**.

$$W = P \cdot V$$

Comme nous sommes au niveau d'un cycle, pendant lequel le volume et la pression évoluent, le travail est en fait égal à **l'intégrale des différentes valeurs** que peuvent prendre V et P.

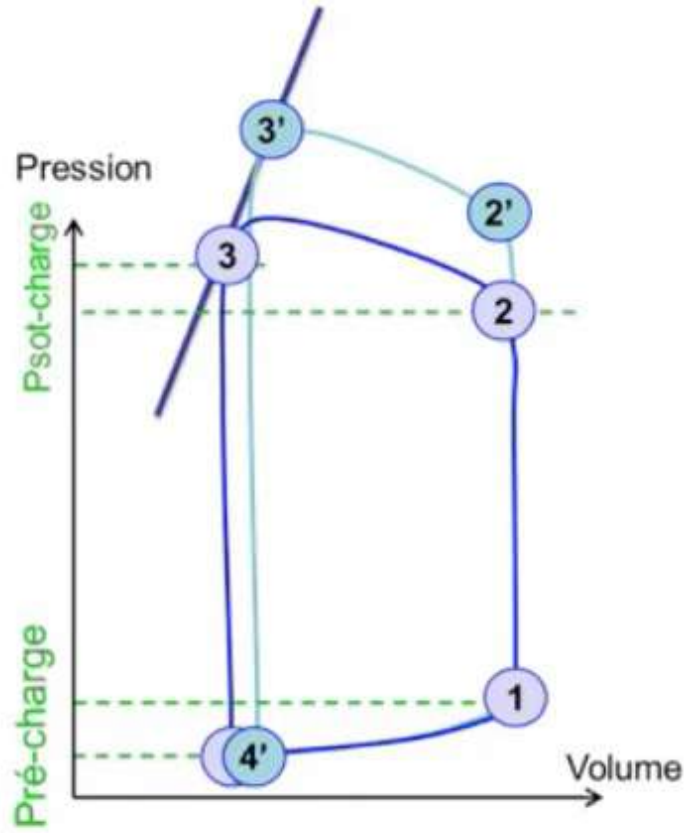
$$W = \int P \cdot dV$$



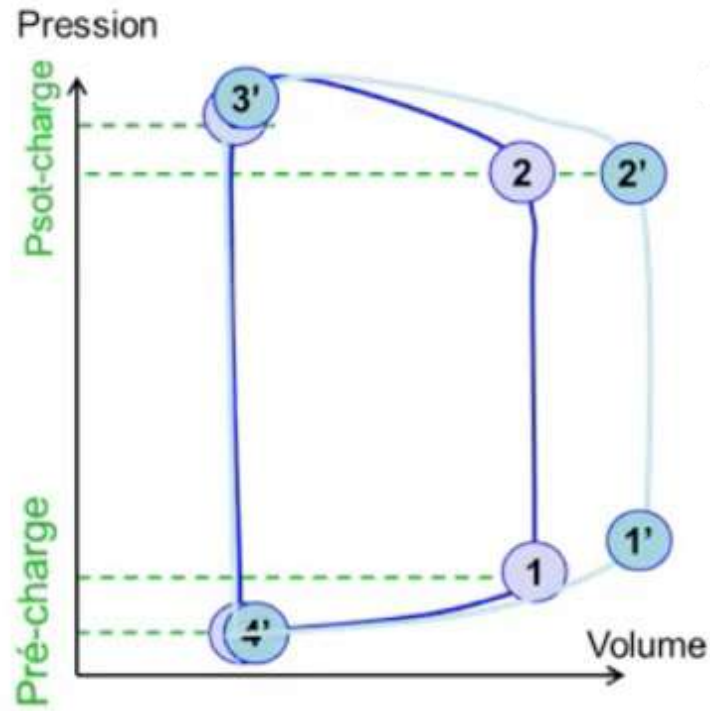
**Le travail est représenté par l'aire de la boucle pression/volume.**

- Si l'aire de la boucle  $\uparrow$ , le travail  $\uparrow$  aussi.
- Si l'aire de la boucle  $\downarrow$ , le travail  $\downarrow$

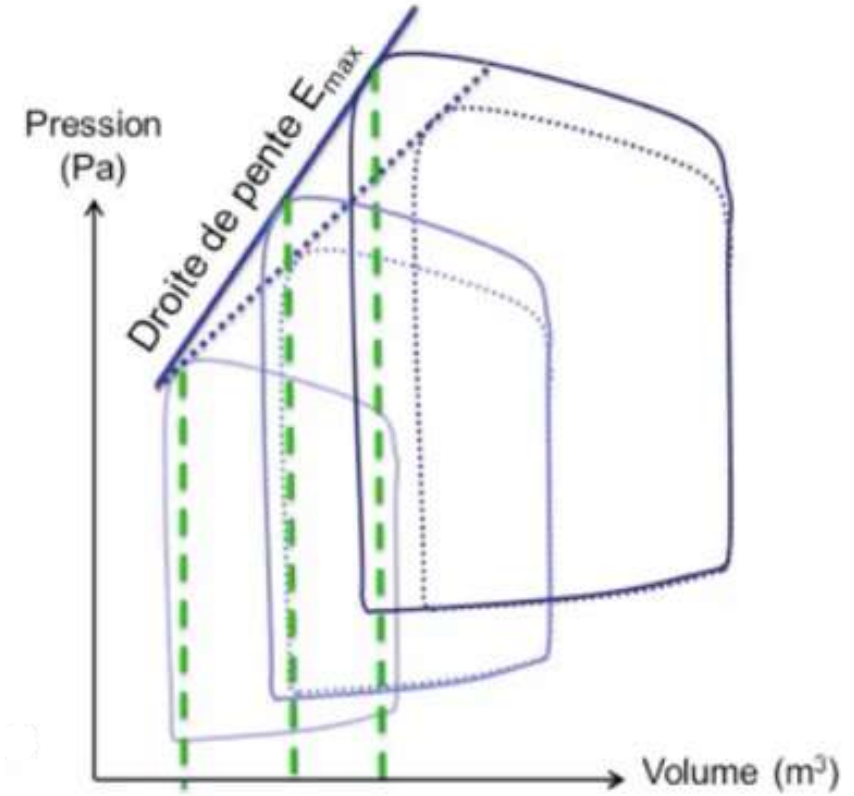
# Différents cas : Travail cardiaque



$\uparrow$  *post-charge* =  $\uparrow$  *W*



$\uparrow$  *pré-charge* =  $\uparrow$  *W*



$\uparrow$  *contractilité* =  $\uparrow$  *W*

Pour calculer le **travail cardiaque** on avait vu juste au-dessus :

Mais en pratique, nous utiliserons cette formule plus simple :

$$W = \int P \cdot dV$$

$$W = VES \cdot P$$



Pour une fréquence cardiaque moyenne de 60bpm, le VES = 80mL soit  **$8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$** . La pression moyenne du VG est de **13 330 Pa**. Donc **le travail cardiaque**  $W = VES \times P = 8 \times 10^{-5} \times 13\,330 = \mathbf{1,06 \text{ J}}$ .

**La puissance** en watt (W).  $1W = 1 \text{ J/s}$  on peut dire que la puissance du VG est d'environ **1W**, c'est relativement faible.

Le travail du **ventricule droit** est beaucoup **moins important** que celui du VG, **1/6 de celui du VG**.

Au repos, **l'énergie consommée** pour un cycle cardiaque est d'environ **10J**. On a donc **une différence** entre **l'énergie consommée** et **l'énergie produite**. On va pouvoir calculer **le rendement mécanique cardiaque** (Rdt) :

$$Rdt = \frac{W \text{ mecanique fourni}}{\text{Energie consommée}}$$

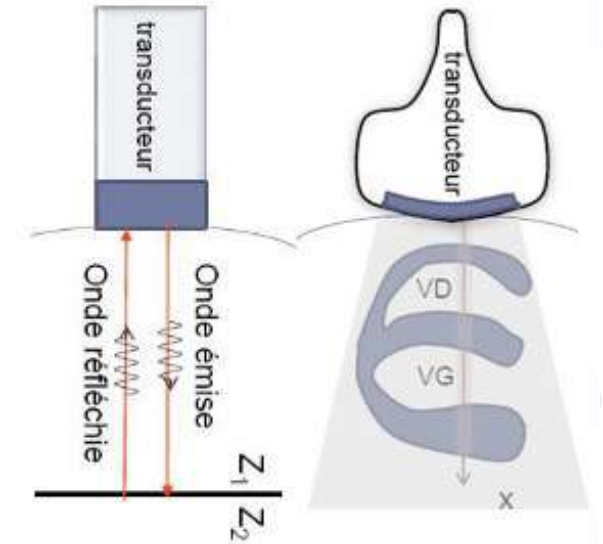
Le cœur a une **forte adaptation mécanique** à l'effort et son débit peut être multiplié fortement. Le travail cardiaque fourni peut s'adapter et peut être multiplié par 6 ! Le rendement mécanique va passer de 10 à 15% lors d'un l'effort.

# VII. Techniques d'exploration de la fonction mécanique

## Echographie

C'est une technique **non invasive** et **non ionisante**. Utilisation d'un échographe avec **Ultrasons** (entre 20 000 et 100 000 Hz)

Les US envoyés dans le corps se propagent dans les tissus et vont être **réfractés** et **réfléchis** au contact avec les différents milieux, ils vont alors être renvoyé vers la sonde. Le temps de retour des US va permettre de **calculer la distance** entre la sonde et l'interface des tissus cardiaques



### Avantages :

**Innocuité** (non invasive et non ionisante)

**Réalisation rapide** (très utilisée aux urgences car facile et rapide).

### Inconvénients :

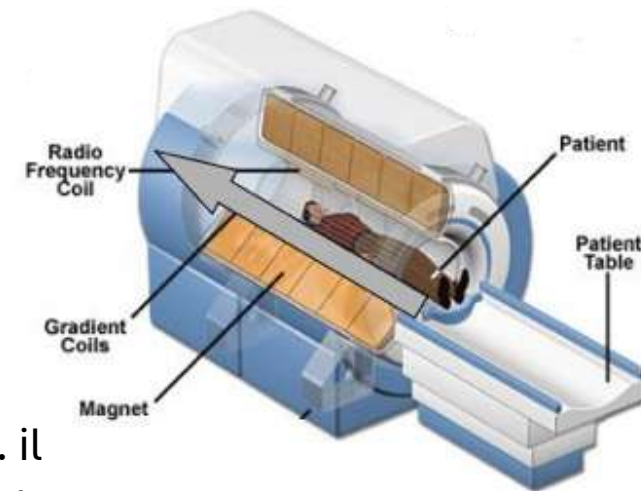
**Mauvaise pénétration** dans certains milieux (**os/air**), visualisation des structures cardiaques qui peut être incomplète.

# IRM (Imagerie par Résonance Magnétique)

C'est aussi une technique **non invasive** et **non ionisante**. Le patient est installé dans un grand tube contenant un aimant avec des ondes **radiofréquences**.

L'IRM repose sur les propriétés **magnétiques** des **protons** : L'aimant de l'IRM crée un champ magnétique puissant, qui fait que tous les protons du patient vont s'aligner en effectuant un mouvement de précession.

On envoie une onde de radiofréquence qui va venir perturber le mouvement des protons. Il va y avoir émission d'un signal magnétique qui va pouvoir être détecté par l'IRM, donnant une **image**.



## Avantages :

Imagerie **morphologique et fonctionnelle** en **3D**.

**Meilleure visualisation** des ensemble cavités qu'avec l'échographie.

**Très bon contraste** de l'image entre sang et muscle.

Mesure **fiable** et **reproductible** de la FEVG.

## Inconvénients :

Beaucoup **d'artefact** en IRM donc **complexe** à réaliser.

**Long** (peu prendre plus de 30 minutes)

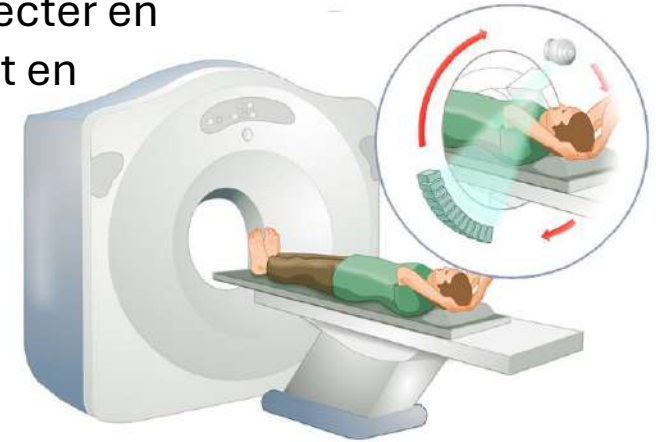
**Peu de disponibilité**, donc accessibilité réduite (difficile d'obtenir le matériel en urgence, besoin d'organisation)

# Tomodensitométrie (Scanner)

C'est une **imagerie morphologique** et une technique **peu invasive** mais **ionisante** (car Rayon X)

Pas de différence de densité entre sang et muscle cardiaque donc il est nécessaire d'injecter en intra-veineuse (IV) un **produit de contraste iodé** qui rend le sang **radio-opaque** (apparaît en blanc). On pourra ainsi distinguer le sang du muscle.

Il est très utilisé pour étudier les **coronaires**, petits vaisseaux qui perfusent la paroi des ventricules et atriums pour les irriguer. On les étudie grâce à un **coro-scan**, car elles peuvent se boucher.



## Avantages :

**Rapide** (peut être réalisé en urgence)

Image **3D**.

**Contraste très bon.**

**Bonne visualisation** des ensemble cavités du cœur (les rayons X pénètrent bien)

Bonne **résolution spatiale.**

## Inconvénients :

Dose significative de **rayons X** qui sont assez **irradiants.**

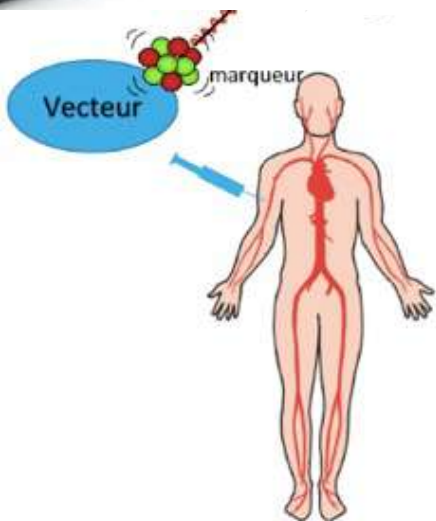
# Méthodes radio-isotopiques : Angio-scintigraphie



Qui est **peu invasive** et utilise des **rayons gamma ionisant**

Injection en IV nécessaire d'une faible quantité de **traceur** radioactif qui va aller se fixer sur les **hématies** (*Globule Rouge = GR*) du patient. On a donc un marquage « **in vivo** » des hématies du patient, par du technétium 99 métastable ( **$^{99m}\text{Tc}$** ).

On obtient grâce à une **gamma-caméra** un enregistrement de l'évolution de la radioactivité intracardiaque au cours du temps.



**L'intérêt de cet examen** est de calculer précisément la **FEVG**. Car la radioactivité mesurée dans VG est directement proportionnelle au volume sanguin intra-ventriculaire

# QCM 1 : À propos de la biophysique cardiaque, indiquez-la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Le VTS correspond au volume cardiaque minimal.
- B) Le VTD correspond au volume cardiaque au début de la diastole
- C) En contraction isométrique, la fibre musculaire se raccourcit, il y a donc un travail musculaire
- D) La précharge correspond aux forces d'étirement
- E) Toutes les réponses sont fausses

# QCM 1 : À propos de la biophysique cardiaque, indiquez-la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Le VTS correspond au volume cardiaque minimale
- B) Le VTD correspond au volume cardiaque **en fin** de la diastole
- C) En contraction isométrique, **SANS raccourcissement** , il y a donc un travail musculaire
- D) La précharge correspond aux forces d'étirement
- E) Toutes les réponses sont fausses

## QCM 2 : Un patient à un VTS de 70ml et un VTD de 100ml :

- A) Les VES du patient est égale à 70ml
- B) Le patient à un VES normal
- C) La fraction d'éjection du patient est égale à 30%
- D) Le patient est en insuffisance cardiaque
- E) Toutes les réponses sont fausses

## QCM 2 : Un patient à un VTS de 70ml et un VTD de 100ml :

A) Les VES du patient est égale à 70ml

→  $VES = VTD - VTS = 100 - 70 = 30\text{ml}$

B) Le patient à un VES normal car **VES normal entre 70-80 mL**

C) La fraction d'éjection du patient est égale à 30%

→  $FE = VES/VTD = 30/100 = 0,3 = 30\%$

D) Le patient est en insuffisance cardiaque car inferieur a 50%

E) Toutes les réponses sont fausses

### **QCM 3 : À propos de la biophysique cardiaque, indiquez-la (les) proposition(s) exacte(s) :**

- A) La loi de Franck Starling indique que la force de contraction du ventricule est d'autant plus grande que les cellules myocardite sont plus étirées avant leur contraction.
- B) Lors de la contraction isovolumétrique, la pression intraventriculaire diminue
- C) Lors de la relaxation isovolumétrique, la pression du ventricule augmente
- D) La systole auriculaire contribue de 10 à 20% au remplissage du ventricule
- E) Toutes les réponses sont fausses

## QCM 3 : À propos de la biophysique cardiaque, indiquez-la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) La loi de Franck Starling indique que la force de contraction du ventricule est d'autant plus grande que les cellules myocardite sont plus étirées avant leur contraction
- B) Lors de la contraction isovolumétrique, la pression intraventriculaire **augmente très rapidement**
- C) Lors de la relaxation isovolumétrique, le volume du ventricule **diminue**
- D) La systole auriculaire contribue de 10 à 20% au remplissage du ventricule
- E) Toutes les réponses sont fausses