
Biophysique cardiaque

Dr Olivier HUMBERT

MCU-PH Biophysique / Médecine Nucléaire

Centre Antoine-Lacassagne

Biophysique de la circulation: plan

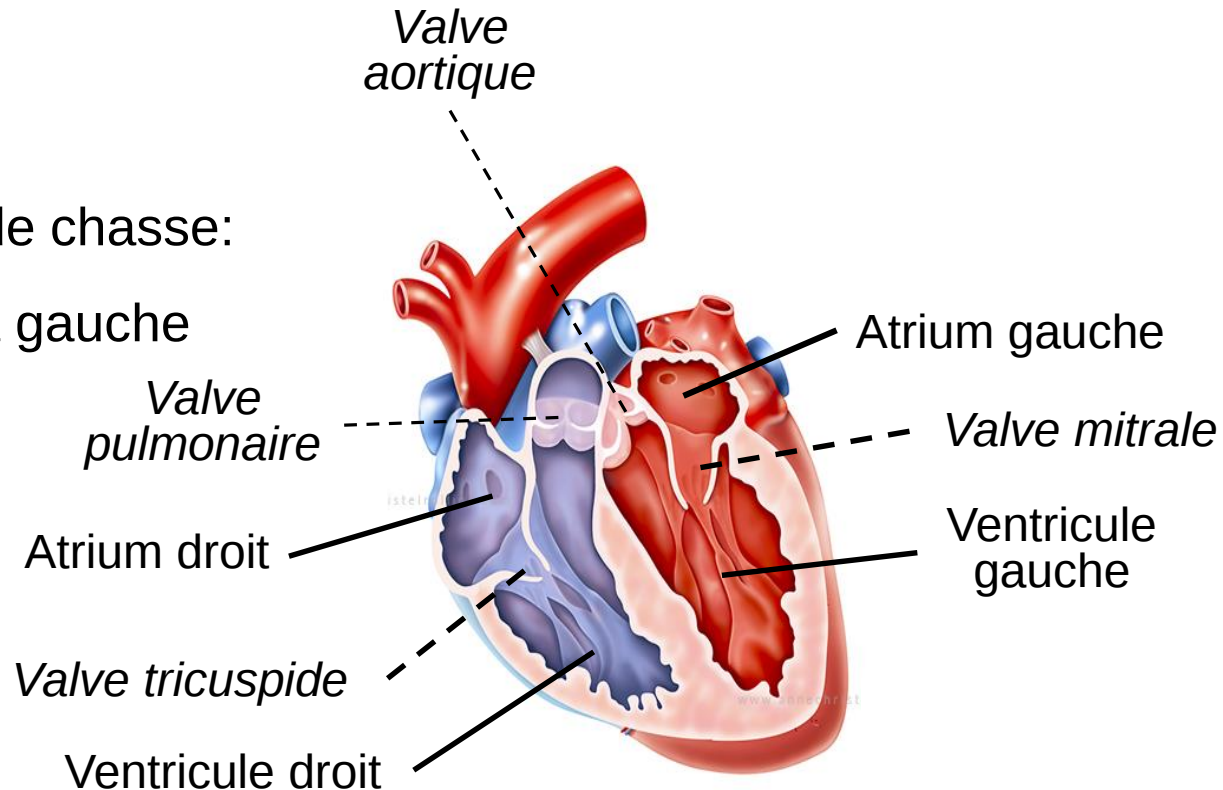
1. Physique et sang
2. Hémodynamique / parois et applications
3. Hémodynamique et applications en imagerie
4. Biophysique cardiaque

1. Anatomie cardiaque

2. Fonction cardiaque
3. Physiologie contractile du myocarde
4. Diagramme Pression - Volume du VG
5. Travail cardiaque
6. Anomalies de la contraction cardiaque
7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.1. Anatomie cardiaque

- Cœur = **muscle strié**, creux, séparé en **2 moitiés** indépendantes droite et gauche
- Chaque moitié = **un atrium** (= oreillette/auricules) et **un ventricule**
- Atriums et ventricules communiquent par une valve:
 - Tricuspide à droite
 - Mitrale à gauche
- Valve sur les chambre de chasse:
 - Valve pulmonaire à gauche
 - Valve aortique
- Parois de séparation
 - septum inter-auriculaire
 - septum inter-ventriculaire

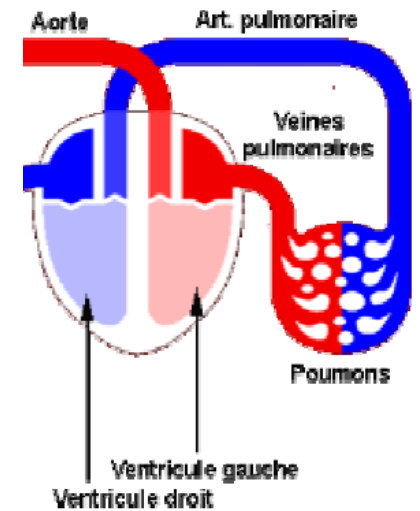
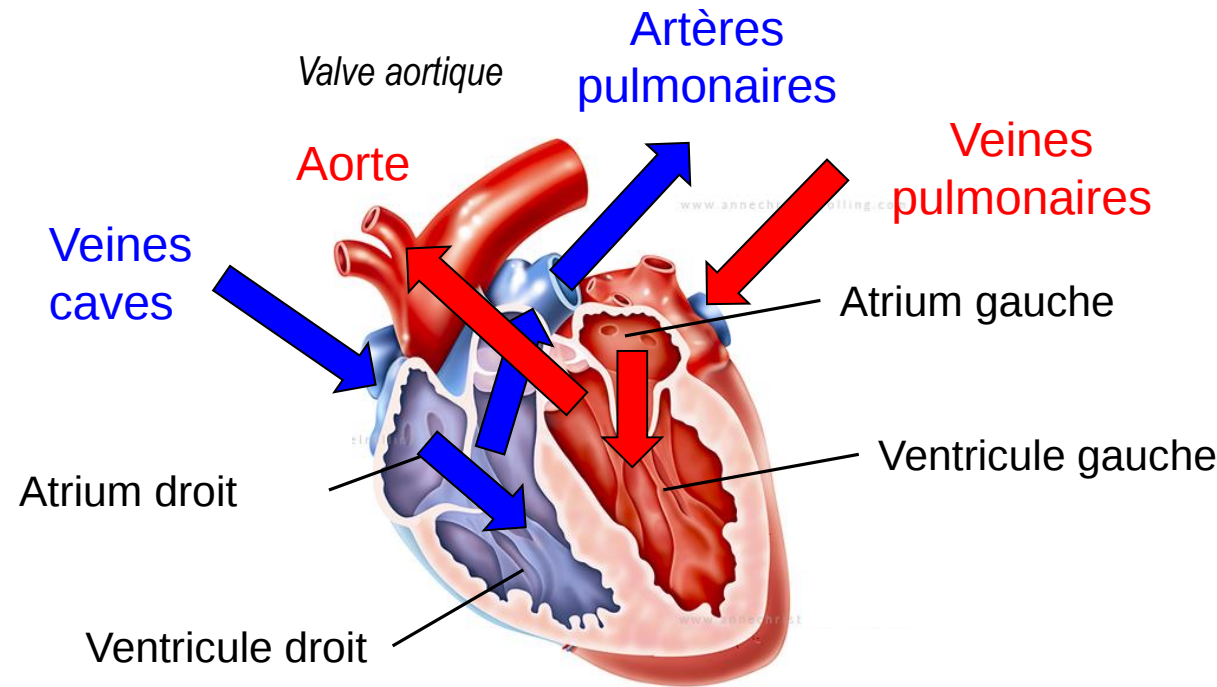


Biophysique de la circulation: plan

1. Physique et sang
2. Hémodynamique / parois et applications
3. Hémodynamique et applications en imagerie
4. Biophysique cardiaque
 1. Anatomie cardiaque
 - 2. Fonction cardiaque**
 3. Physiologie contractile du myocarde
 4. Diagramme Pression - Volume du VG
 5. Travail cardiaque
 6. Anomalies de la contraction cardiaque
 7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

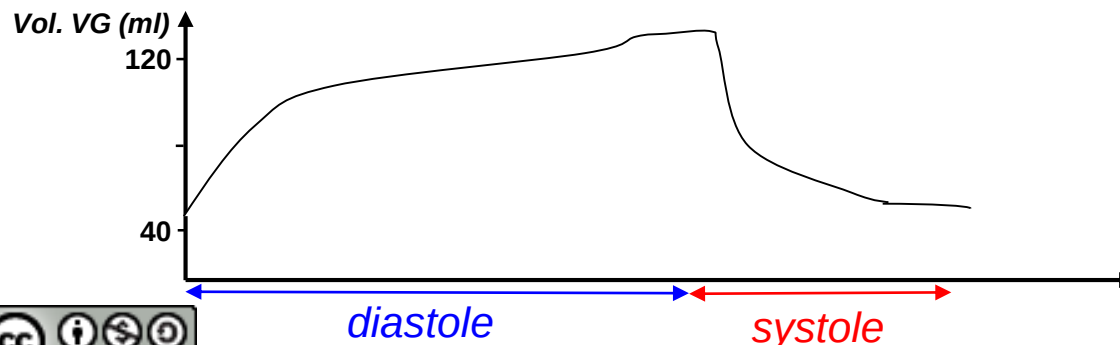
4.2. Fonction cardiaque 4.2.1 Généralités

- Fonction cardiaque principale = circulation sanguine de l'organisme.
- Rappels sur la circulation du sang dans les cavités cardiaques :



- Peut être assimilé à deux pompes en série (cœur droit / cœur gauche), **caractérisées par une modification de leurs volumes au cours de leurs cycles de contraction**

- Le fonctionnement de la pompe cardiaque est discontinu (pulsatile)
- Fréquence cardiaque (F_c) ≈ 70 bpm
- Cycle cardiaque =
 - systole (contraction/éjection) ; 1/3 du cycle
 - diastole (relaxation/remplissage) ; 2/3 du cycle
- Les volumes cardiaques passent par deux extrêmes:
 - Le volume télé-diastolique (VTD): correspond à la fin du remplissage du ventricule, lorsque son volume est maximal
 - Le volume télé-systolique (VTS): correspond à la fin de l'éjection ventriculaire, lorsque le volume est minimal



$VTD \cong 120 \text{ ml}$
 $VTS \cong 50 \text{ ml}$

- Différentes grandeurs peuvent être calculées :

- Le volume d'éjection systolique (VES) en mL:

$$VES = VTD - VTS$$

Le VES normal $\approx 70 - 80 \text{ mL}$.

- La fraction d'éjection (FE) (%):

$$FE = \frac{VES}{VTD} = \frac{(VTD - VTS)}{VTD}$$

*La FE du Ventricule gauche (**FEVG**) normale est $> 50\%$*

- Le débit cardiaque (Q) en $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$:

$$Q = VES \times FC = VTD \times FE \times FC$$

Avec FC = fréquence cardiaque

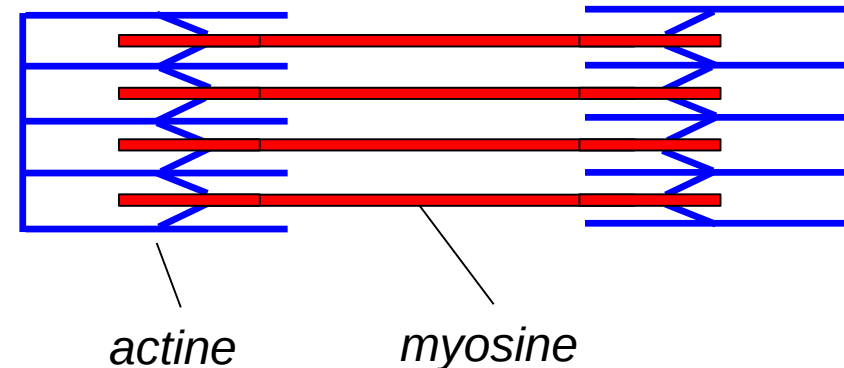
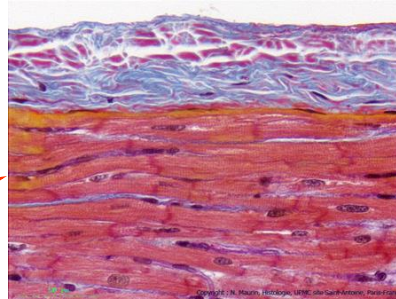
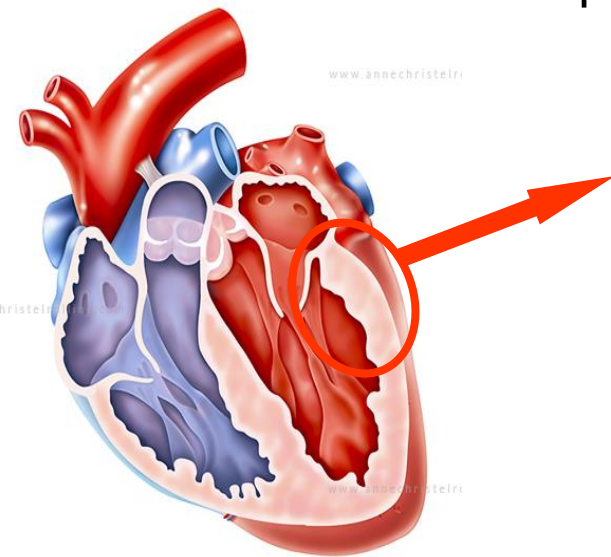
Le débit cardiaque normal $\approx 5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ au repos

Biophysique de la circulation: plan

1. Physique et sang
2. Hémodynamique / parois et applications
3. Hémodynamique et applications en imagerie
4. Biophysique cardiaque
 1. Anatomie cardiaque
 2. Fonction cardiaque
 - 3. Physiologie contractile du myocarde**
 4. Diagramme Pression - Volume du VG
 5. Travail cardiaque
 6. Anomalies de la contraction cardiaque
 7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

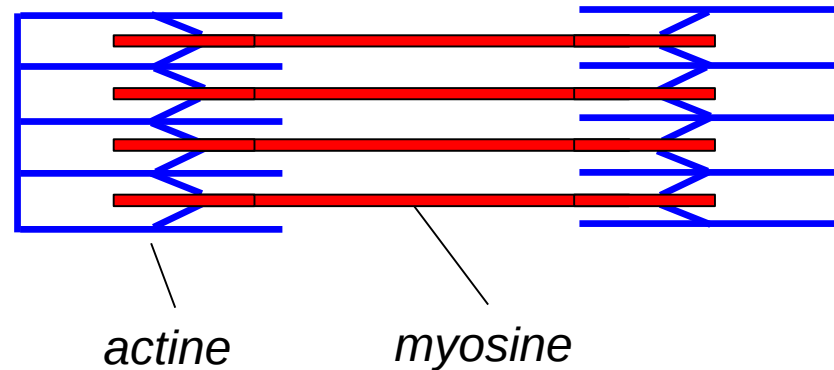
4.3. Physiologie contractile du myocarde 4.3.1 Généralités

- **Myocarde** = tissu musculaire cardiaque
- **Cardiomyocytes** = cellules contractiles du myocarde. Ils sont de forme allongés et associés en fibres parallèles anastomosées
- Chaque fibre musculaire peut être dissociée en **myofibrilles**
- Les myofibrilles sont composées d'unités motrices appelées **sarcomères** = assemblage de protéines (actine et myosine ++) capables de se contracter et de se raccourcir sous l'effet d'une stimulation électrique

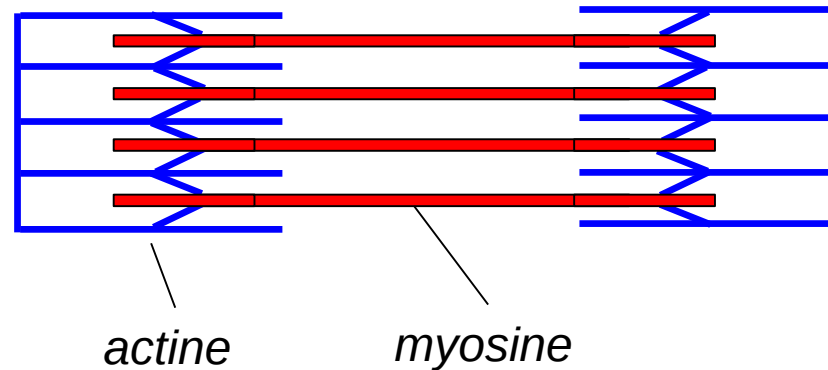


État relâché / contracté

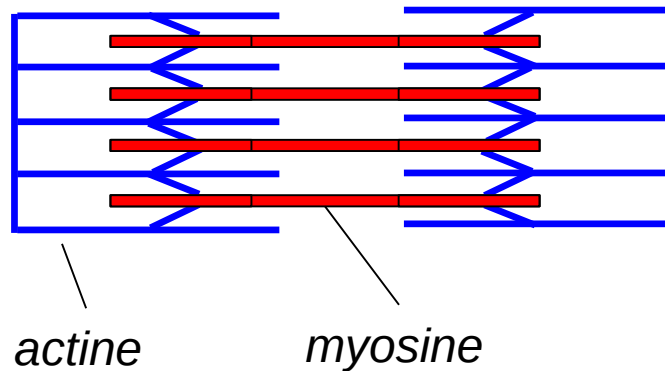
- Etude de la contraction d'une fibre musculaire isolée:
 - 1) **Contraction isométrique**: mise sous tension de la fibre mais sans mouvement de contraction (pas de W musculaire)



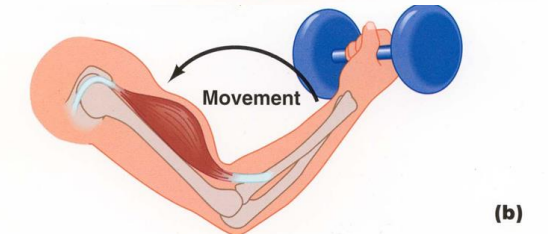
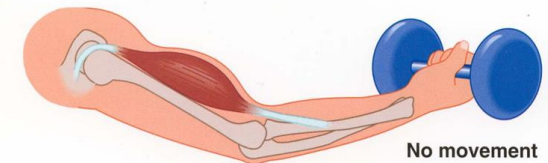
- Etude de la contraction d'une fibre musculaire isolée:
 - 1) Contraction isométrique: mise sous tension de la fibre mais sans mouvement de contraction (pas de W musculaire)
 - 2) **Contraction isotonique**: raccourcissement de la fibre qui fournit un mouvement et donc un W



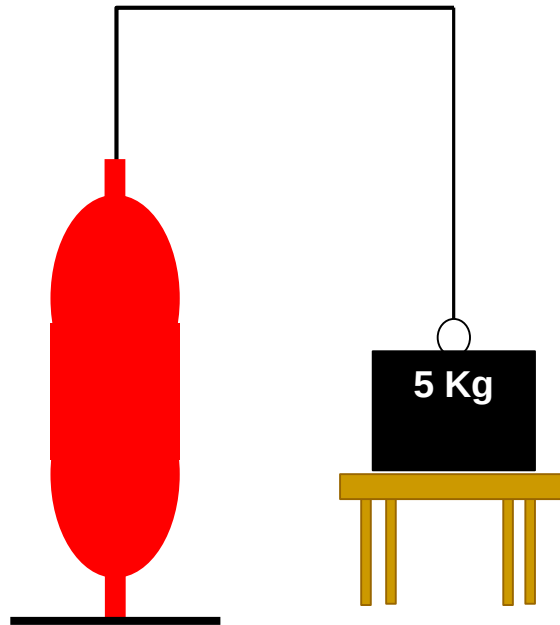
- Etude de la contraction d'une fibre musculaire isolée:
 - 1) Contraction isométrique: mise sous tension de la fibre mais sans mouvement de contraction (pas de W musculaire)
 - 2) Contraction isotonique: raccourcissement de la fibre qui fournit un mouvement et donc un W
 - 3) **Relaxation**: retour à sa longueur de repos + ↓ force de tension



Isometric contraction
Muscle contracts
but does not shorten

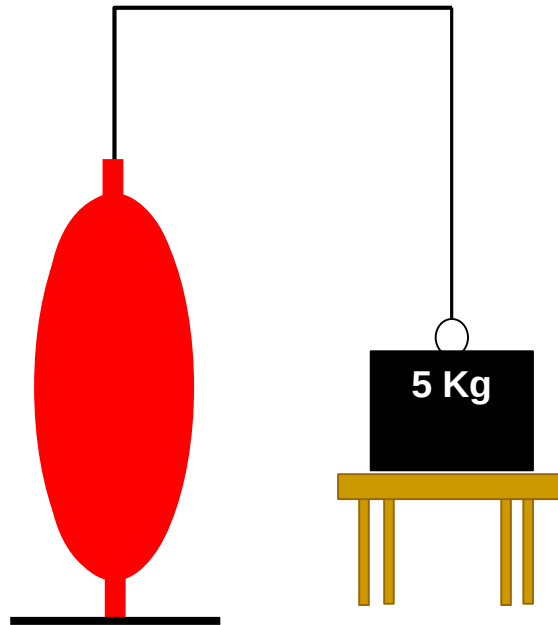


- La fibre musculaire appartient à un muscle, soumis à diverses contraintes extérieures lors de sa contraction. Différentes notions sont importantes à assimiler pour comprendre la contraction musculaire
- **La post-charge:** force contre laquelle travaille la fibre



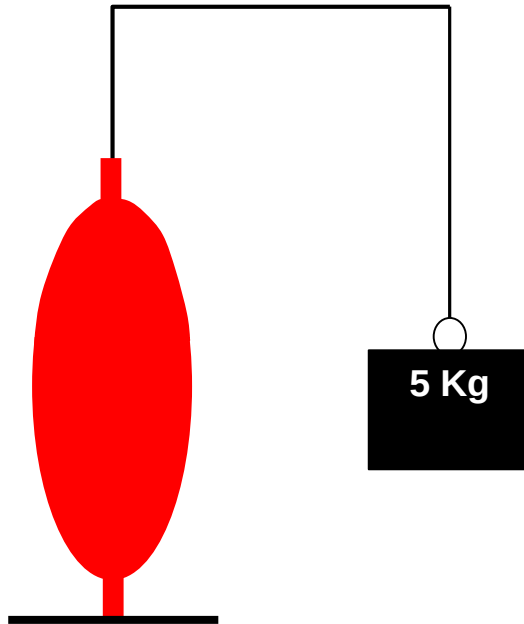
Au repos

- La fibre musculaire appartient à un muscle, soumis à diverses contraintes extérieures lors de sa contraction. Différentes notions sont importantes à assimiler pour comprendre la contraction musculaire
- **La post-charge:** force contre laquelle travaille la fibre



Contraction isométrique

- La fibre musculaire appartient à un muscle, soumis à diverses contraintes extérieures lors de sa contraction. Différentes notions sont importantes à assimiler pour comprendre la contraction musculaire
- **La post-charge:** force contre laquelle travaille la fibre



Contraction isotonique

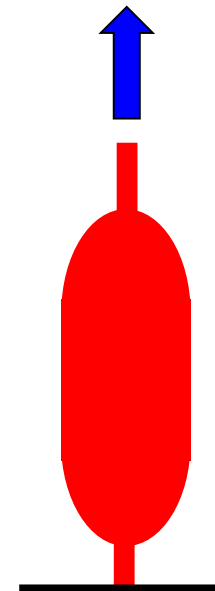
Force correspondant au poids à soulever = **post-charge**

- Pour le myocarde, post-charge = frein à l'éjection
dépend des résistances aortiques

- La **précharge**:
 - Une fibre cardiaque possède également une composante élastique
 - Il est donc possible d'étirer la fibre au delà de sa longueur de repos.

Force de cet étirement =
pré-charge

- Pour le myocarde, pré-charge est liée au VTD et
- Le VTD dépend du retour veineux + contraction auriculaire
- Le retour veineux est lié à 3 facteurs :
 - Facteur « pompe musculaire »
 - Facteur « pompe respiratoire »
 - Facteur « veinokonstriction »



- Chaque ventricule doit pouvoir s'adapter au volume sanguin qui arrive dans l'oreillette
- L'anglais Starling a confirmé en 1914, sur une préparation cœur-poumons de chien, ce que l'allemand Franck avait mis en évidence en 1880 sur un cœur de grenouille = loi de **Franck-Starling**

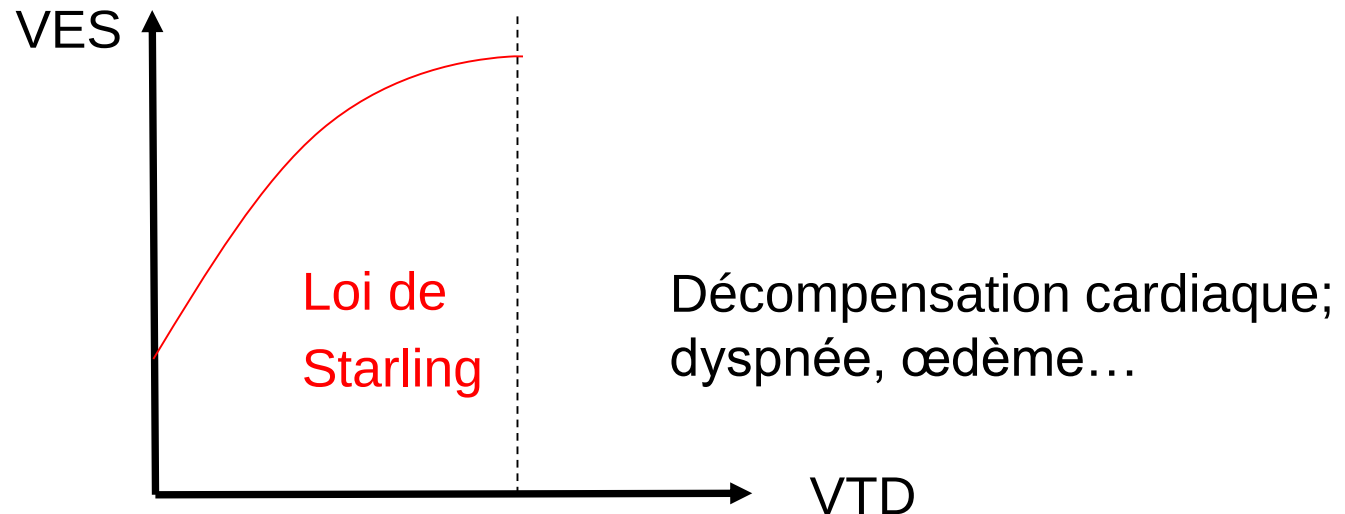
« La force de contraction des ventricules est d'autant plus grandes que les cellules myocardiques sont plus étirées avant leur contraction »

- Plus le retour sanguin veineux $\uparrow$, plus le VTD du ventricule $\uparrow$, plus l'énergie produite par ce dernier pour éjecter le sang sera grande ($\uparrow$ du VES)
- Il s'agit d'une conséquence de l'élasticité des fibres musculaires cardiaques

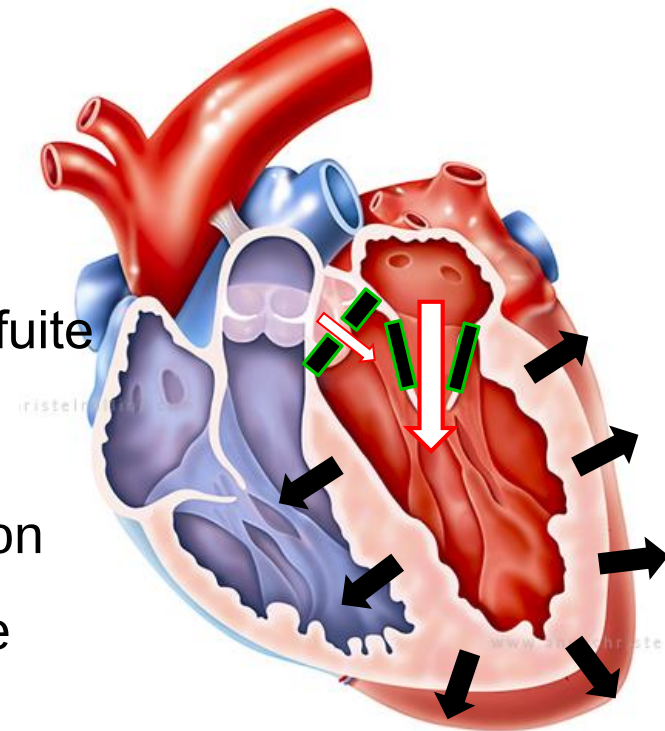
↑ de la pré-charge (Pression de remplissage du VG)
=
↑ de la force de contraction du VG contre la post-charge



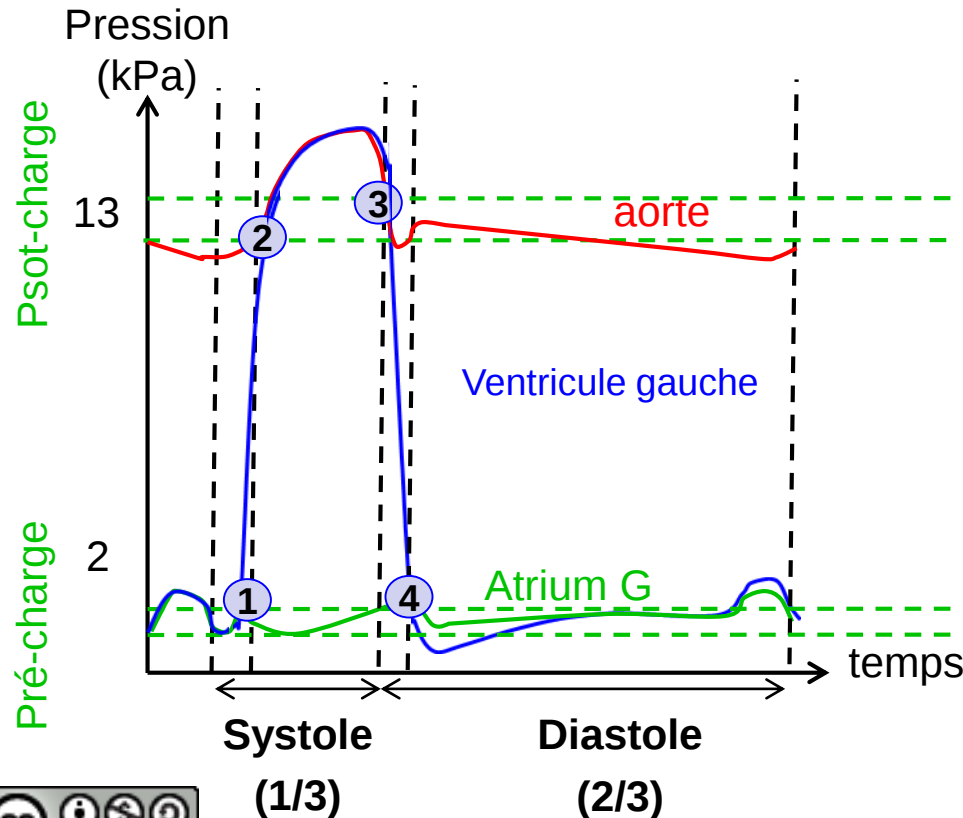
Au delà des conditions optimales de contraction du ventricule, la force de contraction va diminuer.



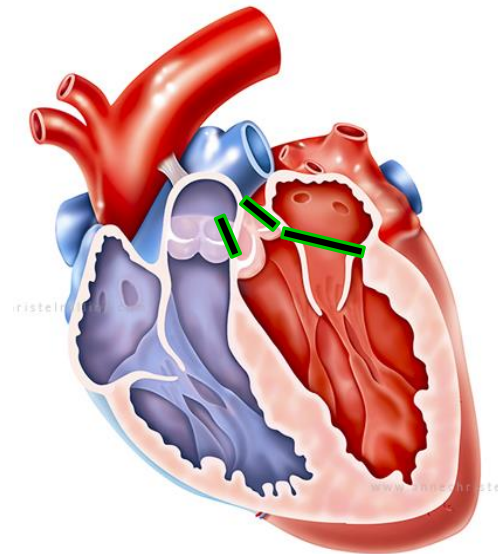
- Exemple de situation pathologique : l'insuffisance aortique
 - Insuffisance aortique = « fuite » de la valve lors de sa fermeture qui s'ajoute au remplissage physiologique du VG à partir de l'oreillette
 - ↑ de la précharge → dilatation du VG
 - Loi de Franck-Starling :
 - ✓ ↑ force de contraction systolique
 - ✓ ↑ du volume éjecté (compensation de la fuite aortique)
 - Au bout de quelques années: décompensation avec épuisement du myocarde = insuffisance cardiaque
 - Indication de remplacement de la valve aortique



- Pendant la diastole (remplissage du VG), la pression du sang dans l'oreillette provoque une légère distension du ventricule = pré-charge. Elle vaut environ 1kPa.
- Pendant la systole, l'éjection du sang doit s'effectuer contre la pression aortique = post-charge systémique. Elle vaut environ 13kPa.

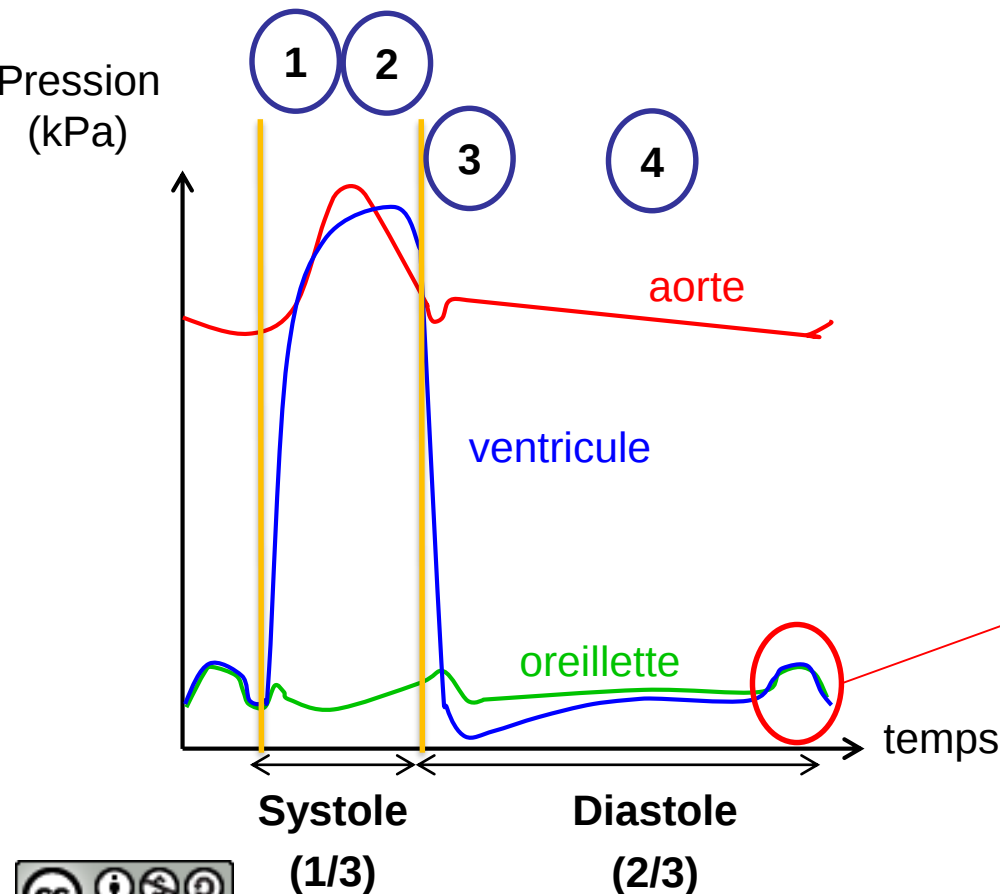


- ① Fermeture valve mitrale
- ② Ouverture valve aortique
- ③ Fermeture valve aortique
- ④ Ouverture valve mitrale



- Les 4 phases du ventricules

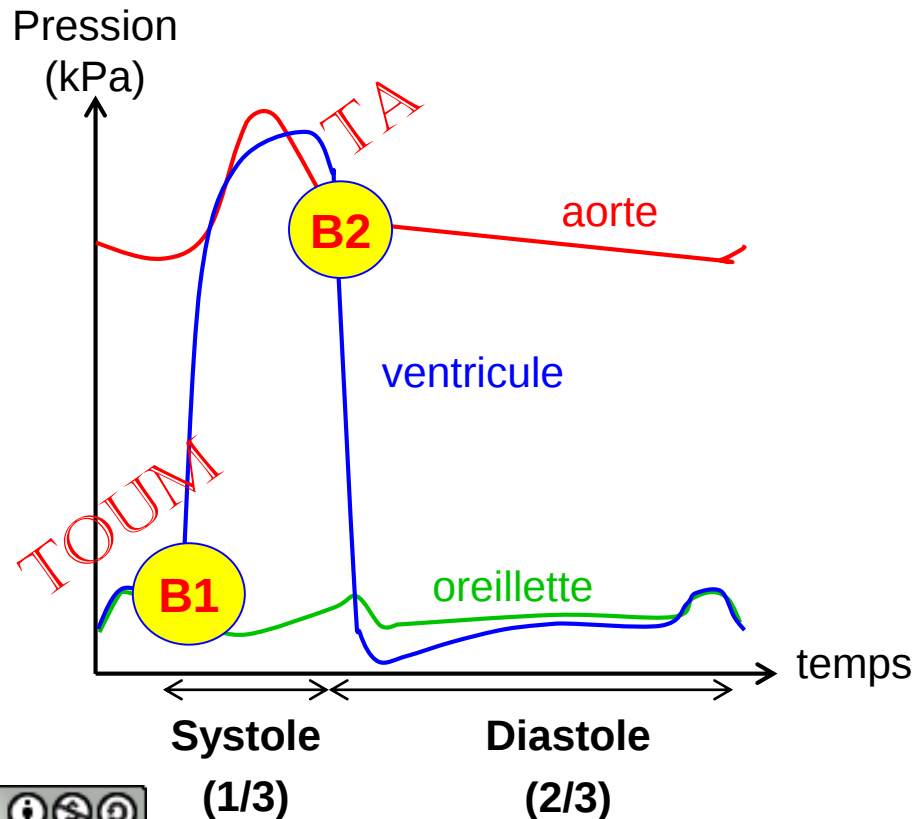
- Expliqués par les mouvements des valves et les turbulences du sang



1. Contraction isovolumétrique
2. Éjection (systolique)
3. Relaxation isovolumétrique
4. Remplissage (diastolique)

Systole auriculaire

- Etude des bruits du cœur (phonocardiographie)
 - Expliqués par les mouvements des valves et les turbulences du sang

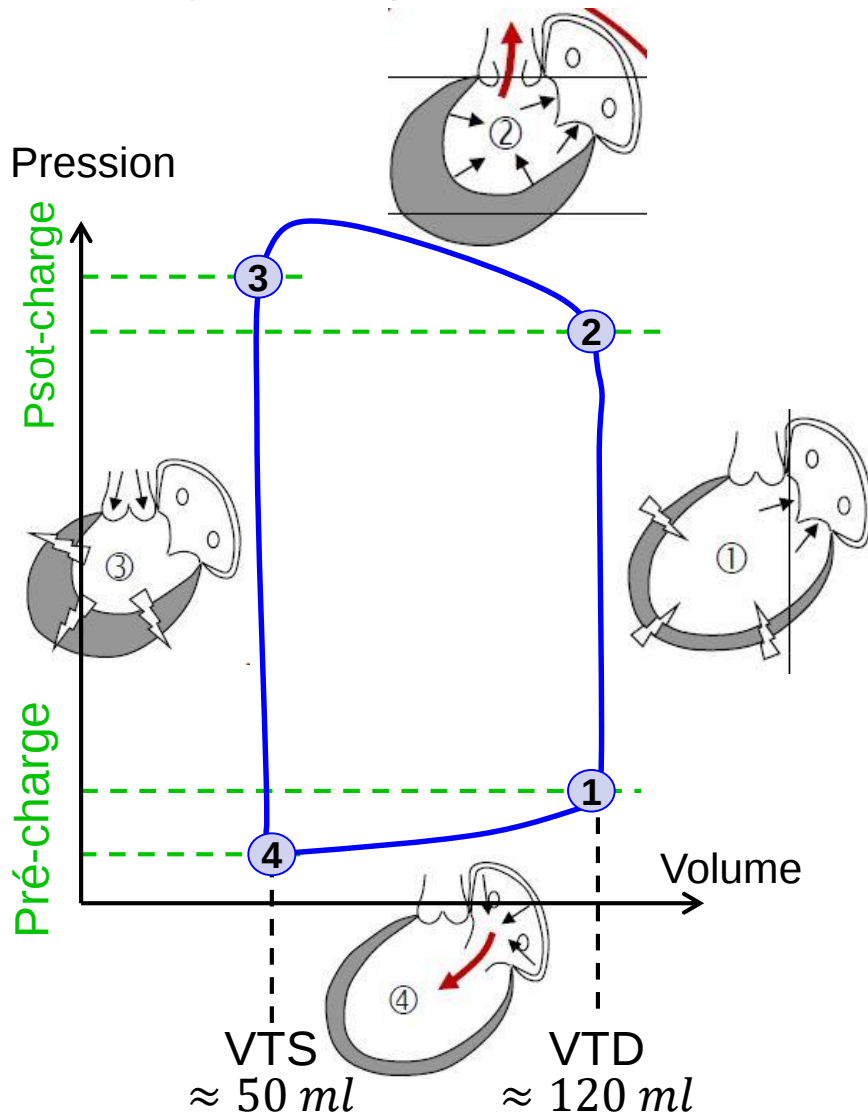


- B1 = fermeture des valves auriculo-ventriculaires
- B2 = fermeture des valves aortique et pulmonaire
- Souffles cardiaques: augmentation des turbulences suite à la modification de l'écoulement du sang dans le cœur. Il est pathologique (fuite d'une valve, rétrécissement...)

Biophysique de la circulation: plan

1. Physique et sang
2. Hémodynamique / parois et applications
3. Hémodynamique et applications en imagerie
4. Biophysique cardiaque
 1. Anatomie cardiaque
 2. Fonction cardiaque
 3. Physiologie contractile du myocarde
 4. **Diagramme Pression - Volume du VG**
 5. Travail cardiaque
 6. Anomalies de la contraction cardiaque
 7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

■ Diagramme pression-volume du ventricule gauche



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

**SYSTOLE
(1/3)**

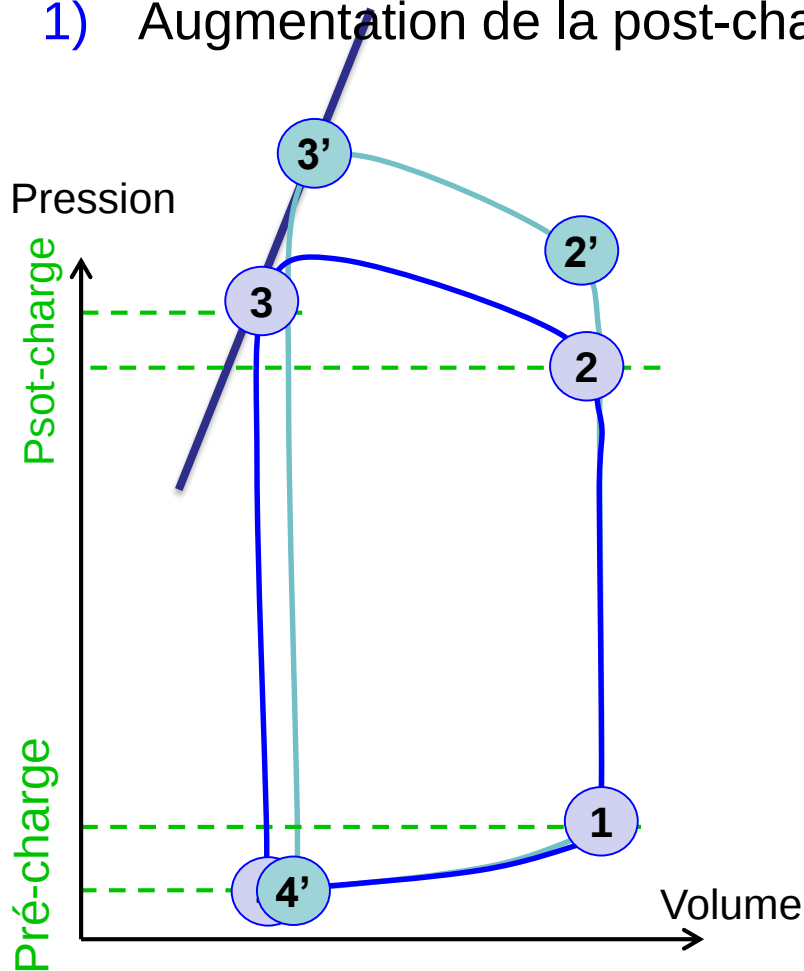
Contraction iso-volumétrique

- Entre ① et ②
- Volume constant et ↑ pression

Ejection

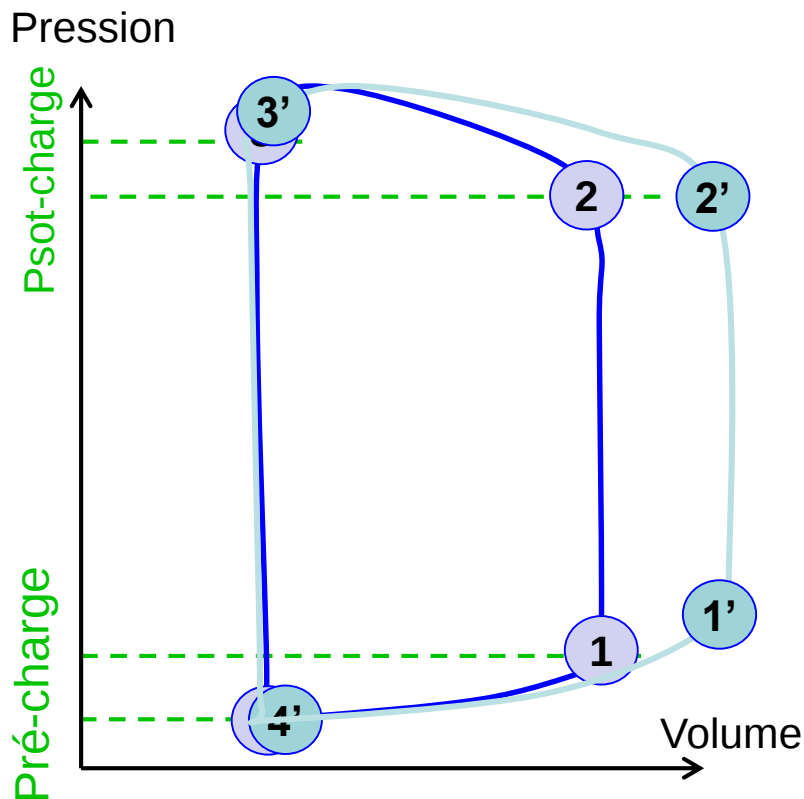
- Entre ② et ③

1) Augmentation de la post-charge

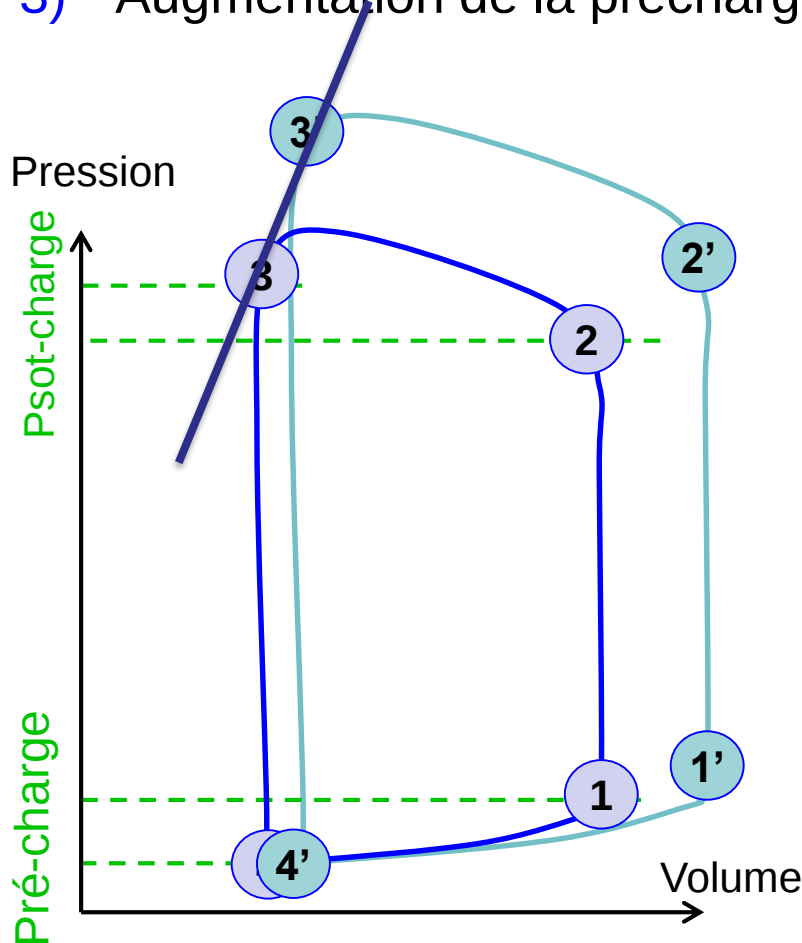


- C'est la conséquence d'une $\uparrow$ de résistance périphérique
- La pression aortique moyenne et la pression intra-ventriculaire $\uparrow$: 2 et 3 se déplacent vers le haut
- mais le volume d'éjection $\downarrow$ et donc le débit aortique $\downarrow$

2) Augmentation de la précharge

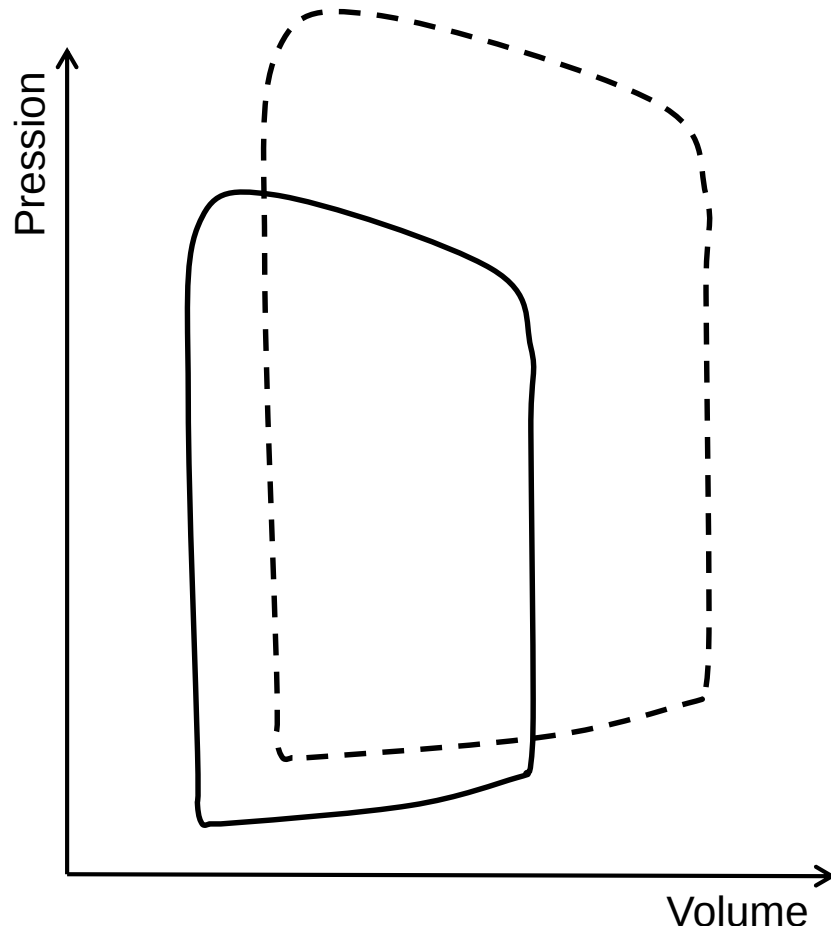


- C'est la conséquence d'une $\uparrow$ de la pression télé-diastolique du VG et donc du volume de remplissage: **1** va à droite et un peu en haut
- **2** se déplace vers la droite
- **3** et **4** ne bougent quasi pas : le volume d'éjection est augmenté (loi de Franck-Starling)

3) Augmentation de la précharge associée à une $\uparrow$ de la pression aortique

- Comme le volume d'éjection $\uparrow$ (loi de Franck-Starling), la pression aortique moyenne $\uparrow$ également : il faut une plus grande pression ventriculaire pour ouvrir la valve aortique et 2 se déplace vers le haut
- à contractilité égale, la pression ventriculaire téléstolique $\uparrow$ (3 va vers le haut)
- le volume résiduel est un peu plus grand mais le volume d'éjection est néanmoins augmenté

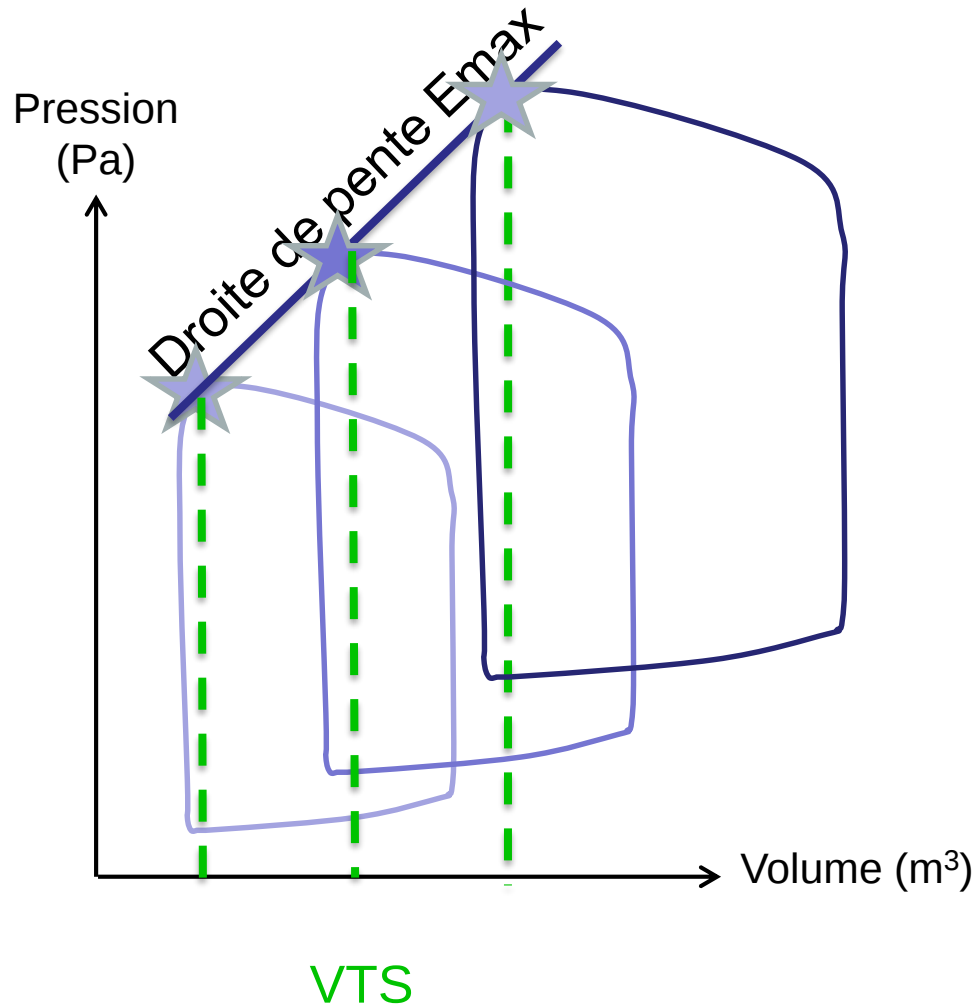
3) Augmentation de la précharge associée à une $\uparrow$ de la pression aortique



- Comme le volume d'éjection $\uparrow$ (loi de Franck-Starling), la pression aortique moyenne $\uparrow$ également : il faut une plus grande pression ventriculaire pour ouvrir la valve aortique et **2** se déplace vers le haut
- a contractilité égale, la pression ventriculaire télésystolique $\uparrow$ (**3** va vers le haut)
- le volume résiduel est un peu plus grand mais le volume d'éjection est néanmoins augmenté

- L'éjection cardiaque dépend de :
 - Pré-charge
 - Post-charge

} Influence les pressions et les volumes du VG
- La FEVG rend compte de la variation de volume du VG pour une pré et post-charges donnée
- La FEVG ne rend pas compte des performances du VG pour différentes pré et post-charges.
- On introduit donc la notion de **contractilité** cardiaque qui, contrairement à la **contraction** cardiaque, est indépendante de la charge du VG



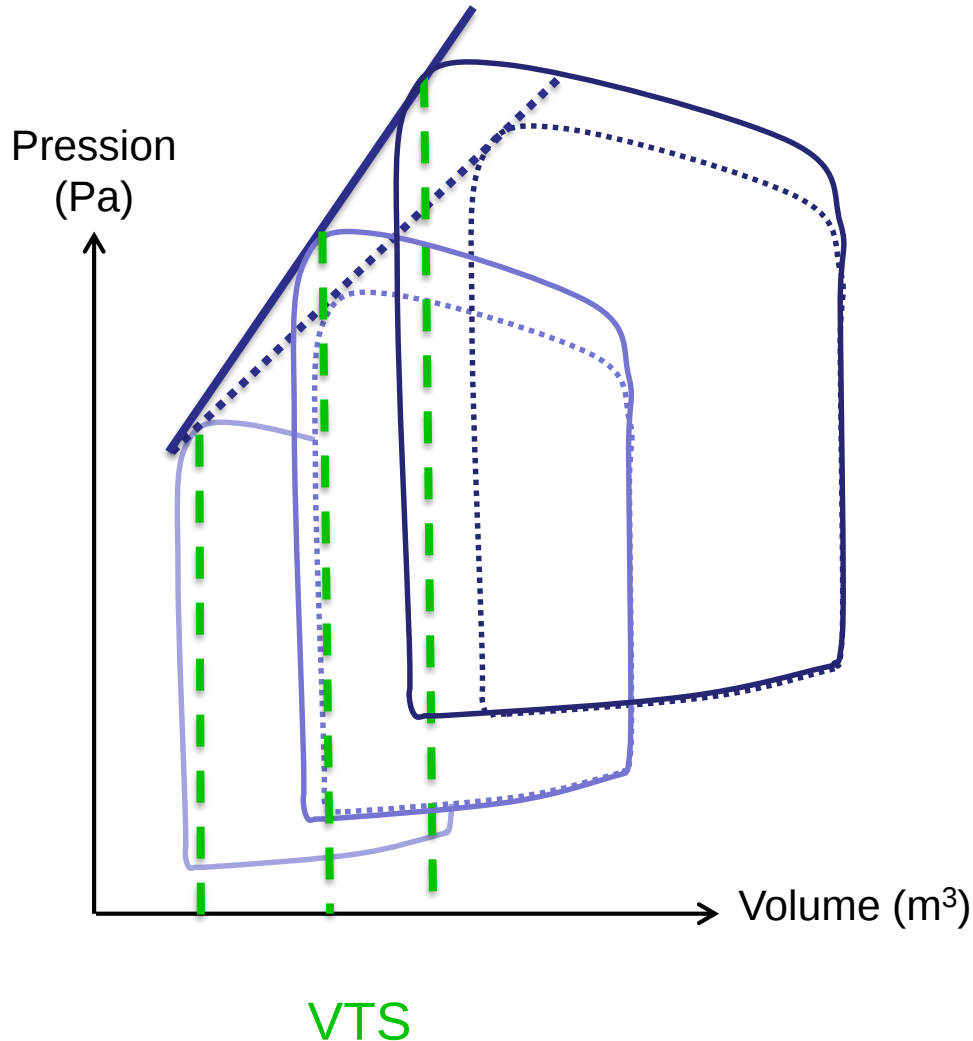
pente E_{max} = élastance du VG

Pour un même patient:

1. Repos
2. Effort modéré
3. Effort intense

VTS

Augmentation de la contractilité



pente E_{max} = élastance du VG

Pour un même patient:

1. Repos
2. Effort modéré
3. Effort intense

- Une $\uparrow$ de la contractilité (effet inotrope +) entraîne une $\uparrow$ de la pente de la droite
- Le VTD reste similaire et le VTS $\downarrow$ un peu
- Donc le volume d'éjection $\uparrow$
- Ce qui entraîne une $\uparrow$ de la pr. Aortique moyenne (2 se déplace vers le haut)

Biophysique de la circulation: plan

1. Physique et sang
2. Hémodynamique / parois et applications
3. Hémodynamique et applications en imagerie
4. Biophysique cardiaque
 1. Anatomie cardiaque
 2. Fonction cardiaque
 3. Physiologie contractile du myocarde
 4. Diagramme Pression - Volume du VG
 - 5. Travail cardiaque**
 6. Anomalies de la contraction cardiaque
 7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.5. Travail cardiaque

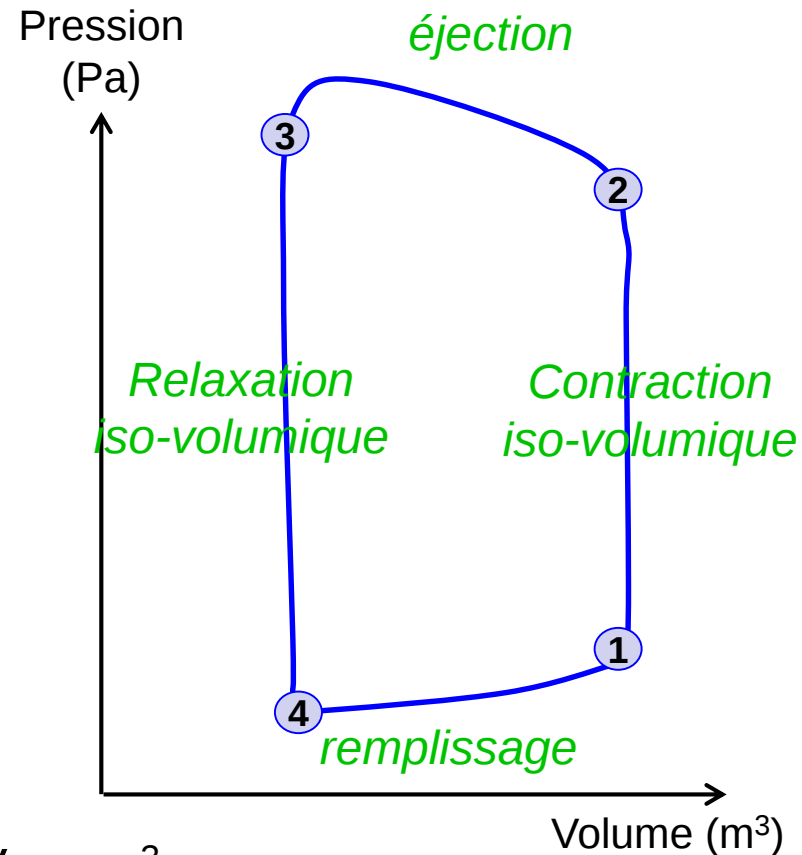
■ Calcul du travail du coeur

- D'une manière générale, le travail W est égal au produit de la F par le déplacement d
- Au cours d'un cycle, le muscle cardiaque fournit un travail W , que l'on peut calculer avec l'équation suivante :

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

- Dans le SI, P est en pascal ($=\text{Nm}^{-2}$) et V en m^3
donc le produit est en N.m , ou encore en joules J

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



4.5. Travail cardiaque

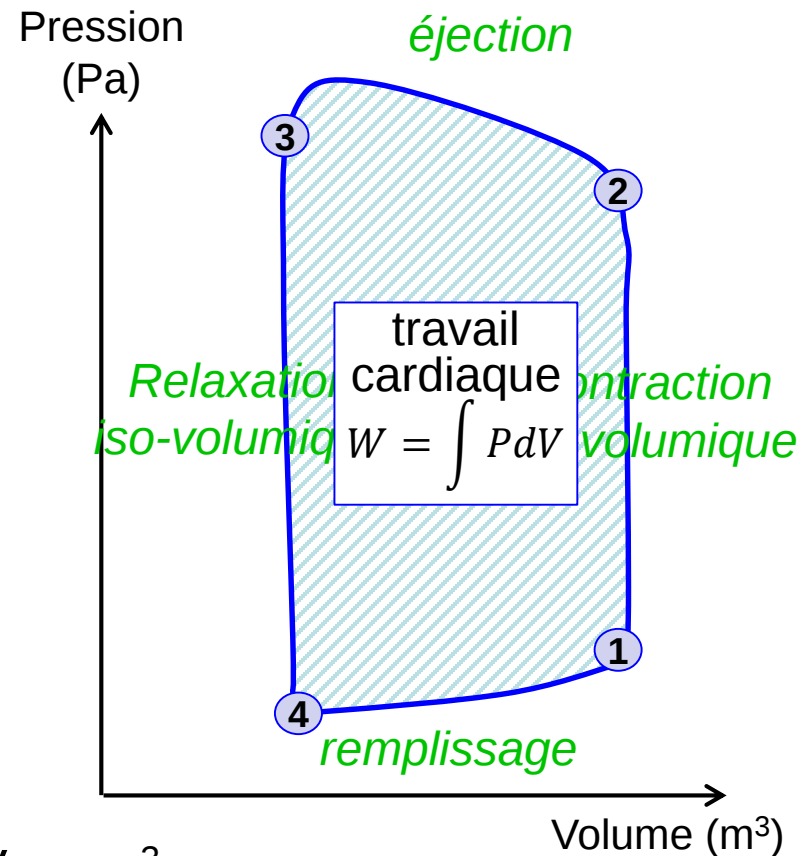
■ Calcul du travail du coeur

- D'une manière générale, le travail W est égal au produit de la F par le déplacement d
- Au cours d'un cycle, le muscle cardiaque fournit un travail W , que l'on peut calculer avec l'équation suivante :

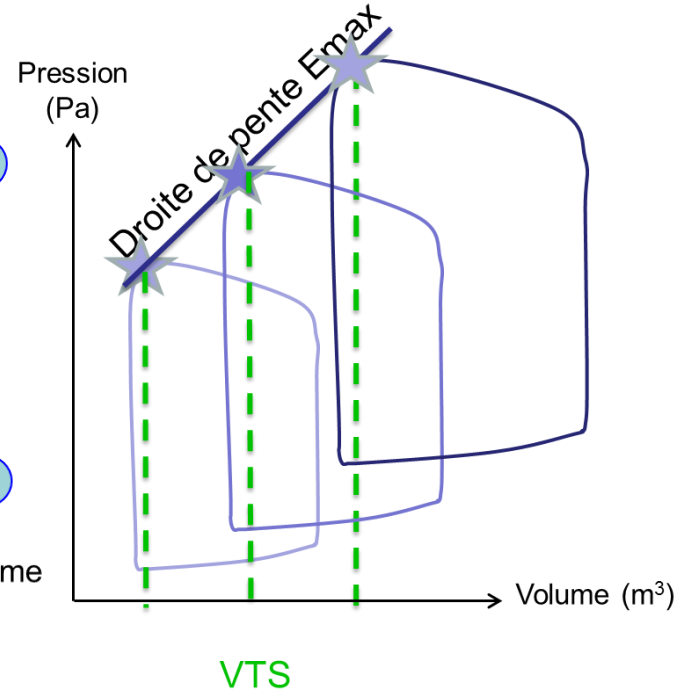
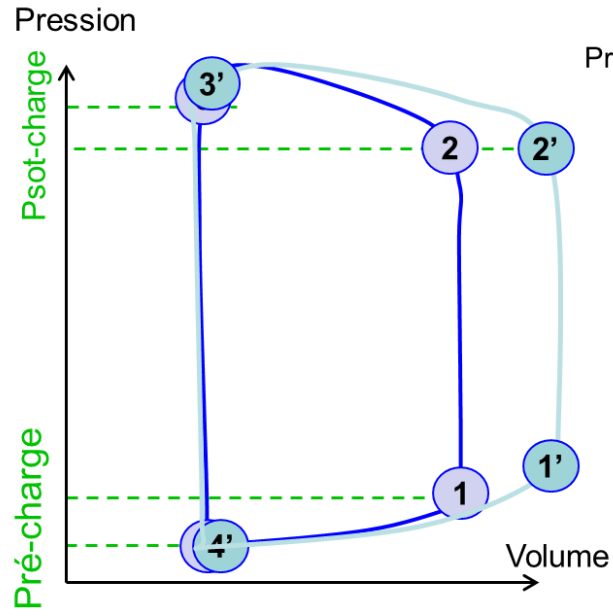
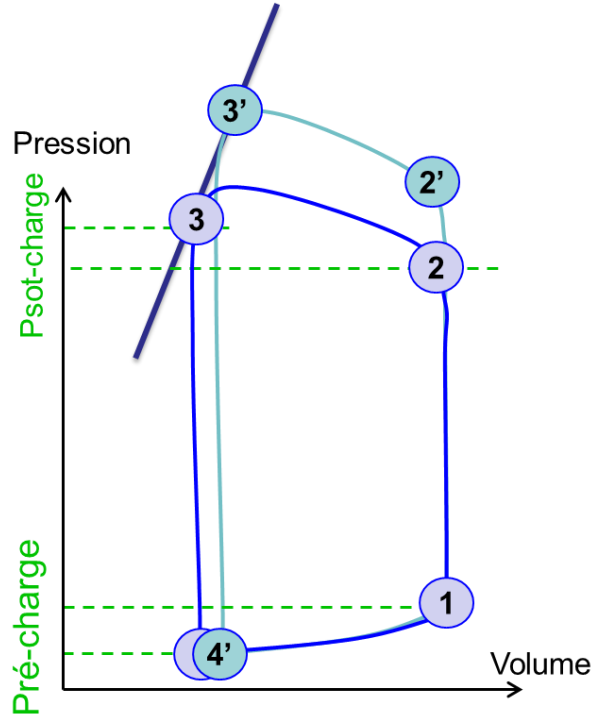
$$W = P \cdot V$$
$$W = \int P \cdot dV$$

- Dans le SI, P est en pascal ($=\text{Nm}^{-2}$) et V en m^3
donc le produit est en N m , ou encore en joules J

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



4.5. Travail cardiaque



4.5. Travail cardiaque

- En pratique, pour évaluer le travail du cœur on prend:

$$W = VES \cdot \overline{P}$$

Ou VES = *volume d'éjection systolique*

$\overline{P}$ = *pression ventriculaire moyenne pendant l'éjection.*

Vs en m³ et P en pascal (=Nm⁻²), et W en joules J

- Pour une FC moyenne de 60 bpm :
 - volume d'éjection du VG $\cong 8 \cdot 10^{-5} m^3$
 - *pression moyenne du VG $\cong 13330$ Pascals (100mmHg)*
- On obtient:

$$W \cong 8 \times 10^{-5} \times 13330 = 1,06 \text{ Joule}$$

- la travail mécanique pour 1 cycle du VG est d'environ 1 J
- La puissance du VG est environ 1Watt ce qui est relativement faible
- Le travail du VD est environ 1/6 de celui du VG

4.5. Travail cardiaque

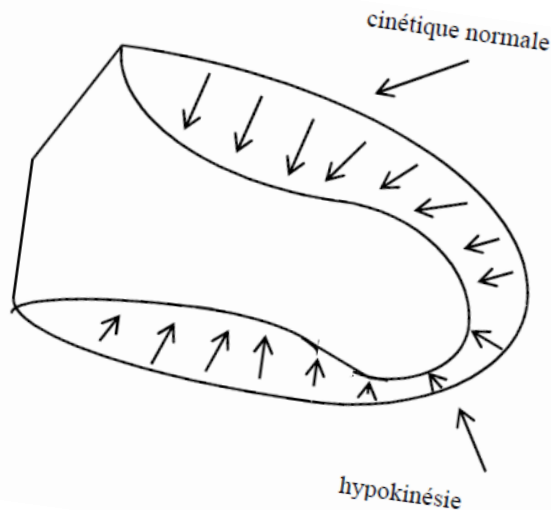
- Au repos, l'énergie consommée pour un cycle cardiaque est proche de 10 Joules.
- Calcul du rendement cardiaque:
 - $\text{Rendement mécanique cardiaque} = \frac{W \text{ mécanique fourni}}{\text{Energie consommée}}$
 - Il est d'environ 10% au repos (1 Joule fourni pour 10 Joules consommés)
- A l'effort, :
 - Le débit du VG augmente et peut atteindre les 30 voire 40 L·min⁻¹ chez des individus bien entraînés.
 - le travail cardiaque (VG) fourni peut être multiplié par 6 !
 - Le rendement mécanique peut s'élever à 15%

Biophysique de la circulation: plan

1. Physique et sang
2. Hémodynamique / parois et applications
3. Hémodynamique et applications en imagerie
4. Biophysique cardiaque
 1. Anatomie cardiaque
 2. Fonction cardiaque
 3. Physiologie contractile du myocarde
 4. Diagramme Pression - Volume du VG
 5. Travail cardiaque
 6. **Anomalies de la contraction cardiaque**
 7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

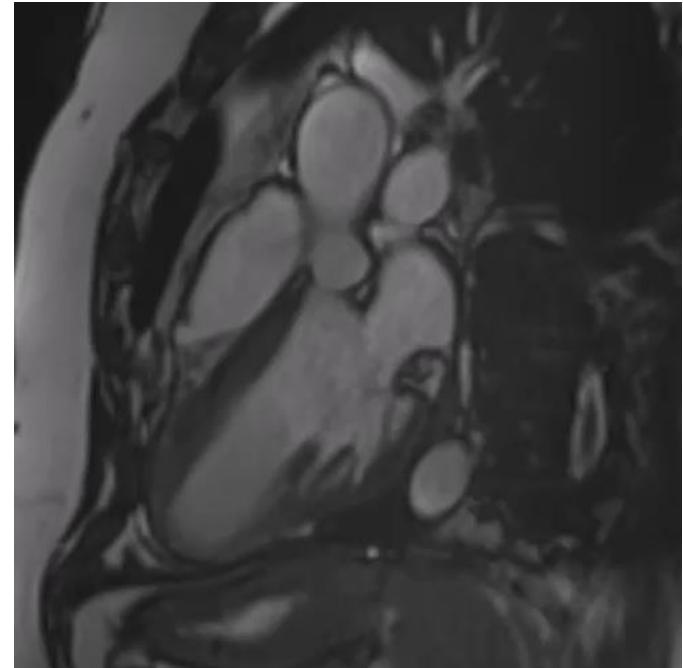
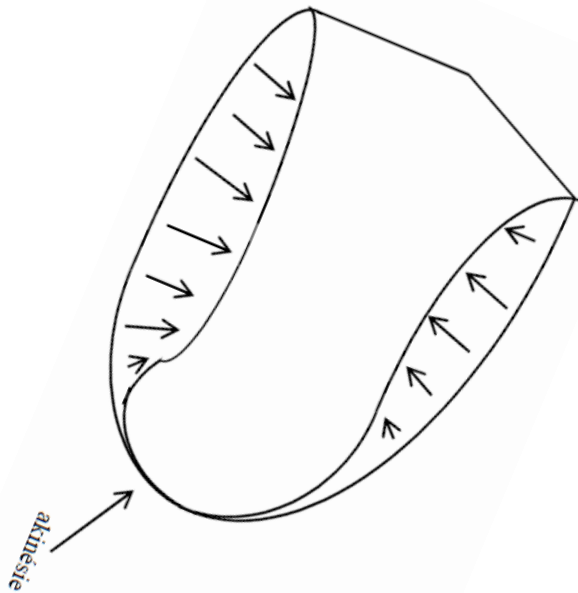
4.6. Anomalies de la contraction cardiaque

- Il existe 3 anomalies principales de la cinétique du myocarde:
 - L'hypokinésie : altération partielle de la contraction du myocarde (diminution de l'amplitude de la contraction). L'hypokinésie peut être localisée ou globale. Elle entraîne une baisse de la FEVG.



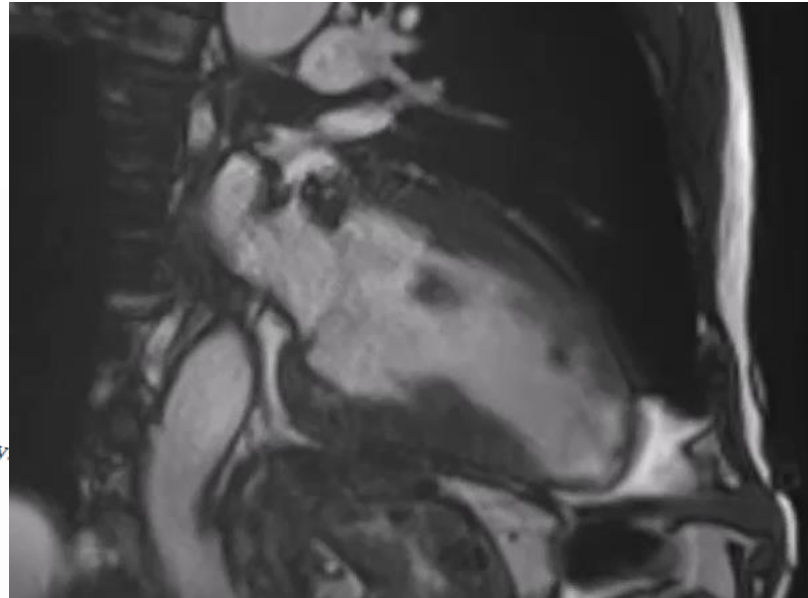
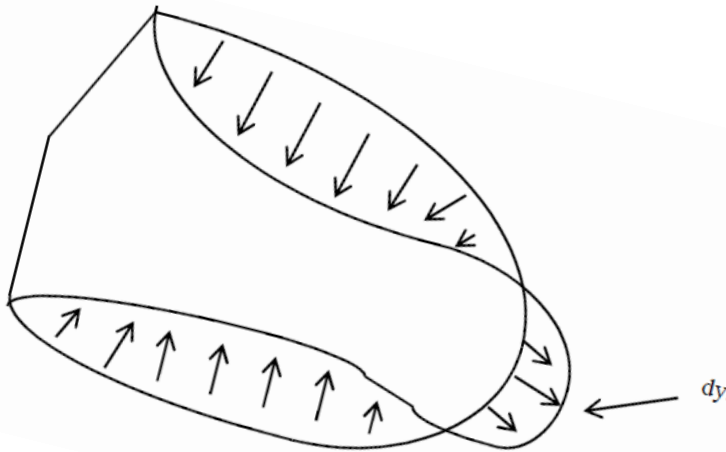
4.6. Anomalies de la contraction cardiaque

- Il existe 3 anomalies principales de la cinétique du myocarde:
 - L'akinésie: absence totale de contraction du myocarde. Elle est localisée à un territoire du myocarde



4.6. Anomalies de la contraction cardiaque

- Il existe 3 anomalies principales de la cinétique du myocarde:
 - La dyskinesie correspond à un mouvement paradoxal du myocarde, qui se dilate au cours de la systole, sous l'effet de l'augmentation de la pression intra-VG au cours de la systole.



4.6. Anomalies de la contraction cardiaque

- Plusieurs pathologies cardiaques peuvent donner une anomalie de contraction:
 - infarctus du myocarde
 - Myocardite
 - Nombreuses autres étiologie (maladies cardiaques d'origine génétique...)
- Ces anomalies sont responsables:
 - D'une augmentation du VTS
 - D'une baisse du VES
 - D'une baisse de la FEVG
- Il existe plusieurs techniques d'imagerie pour l'étude des anomalies de la contraction des ventricules et le calcul de la FEVG:
 - L'échographie
 - L'IRM
 - La tomodensitométrie
 - La scintigraphie

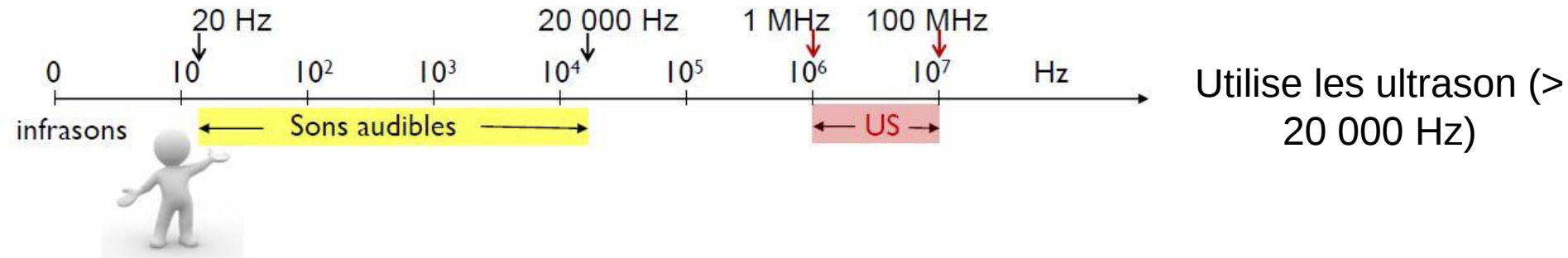
Biophysique de la circulation: plan

1. Physique et sang
2. Hémodynamique / parois et applications
3. Hémodynamique et applications en imagerie
4. Biophysique cardiaque
 1. Anatomie cardiaque
 2. Fonction cardiaque
 3. Physiologie contractile du myocarde
 4. Diagramme Pression - Volume du VG
 5. Travail cardiaque
 6. Anomalies de la contraction cardiaque
 7. **Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur**

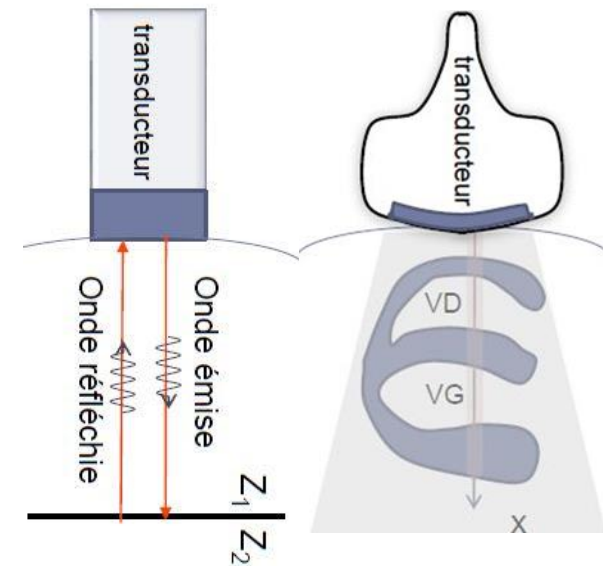
4.7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.7.1. L'échographie cardiaque

- Technique non invasive / non-ionisant



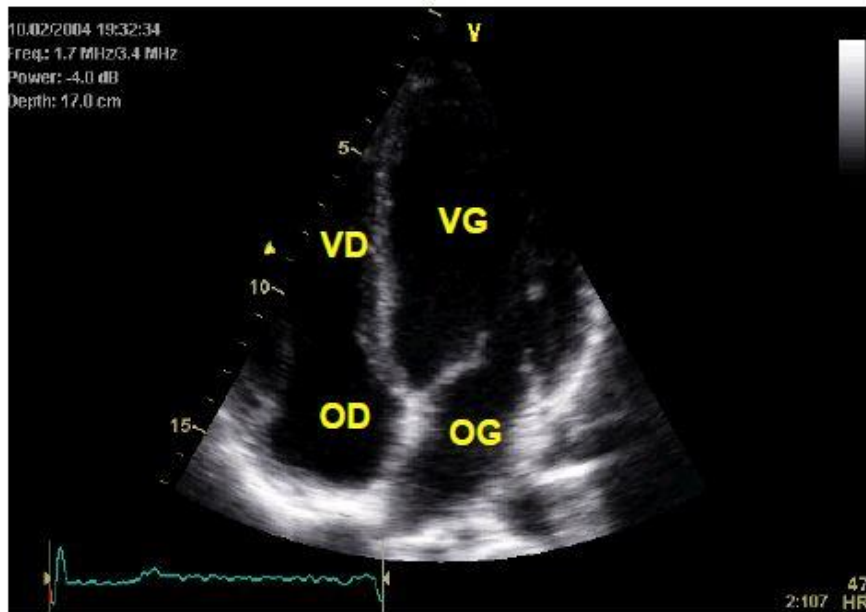
- Échographie = sonde émettant des « trains » d'ultrasons
- Les US se propagent dans les tissus mous et subissent une réfraction et réflexion à l'interface des milieux
- Le temps entre l'émission et le retour des US permet de calculer les distances entre la sonde et les interfaces tissulaires cardiaque



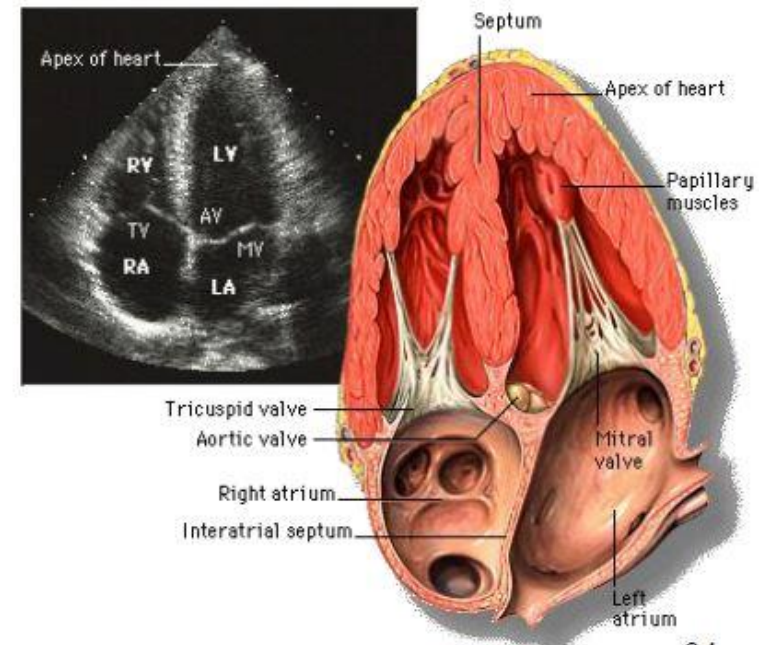
4.7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.7.1. L'échographie cardiaque

- Anatomie du cœur / contraction
- Calcul des volumes cardiaques
- Calcul de la FEVG



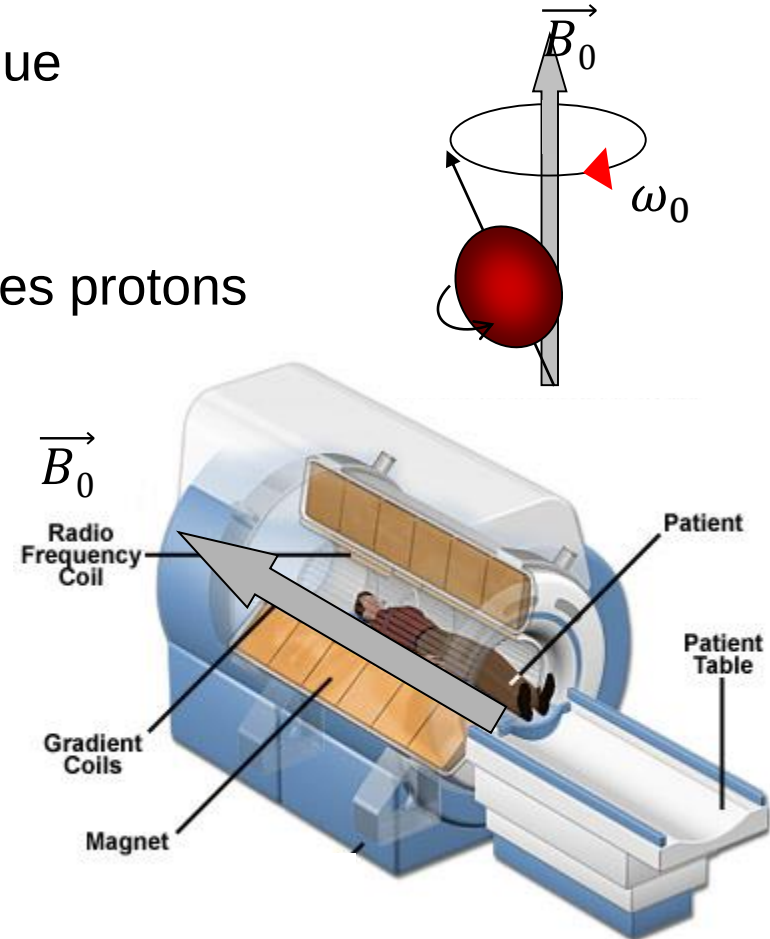
VG : ventricule gauche
VD : ventricule droit
OG : oreillette gauche
OD : oreillette droite



4.7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.7.2. L'IRM cardiaque

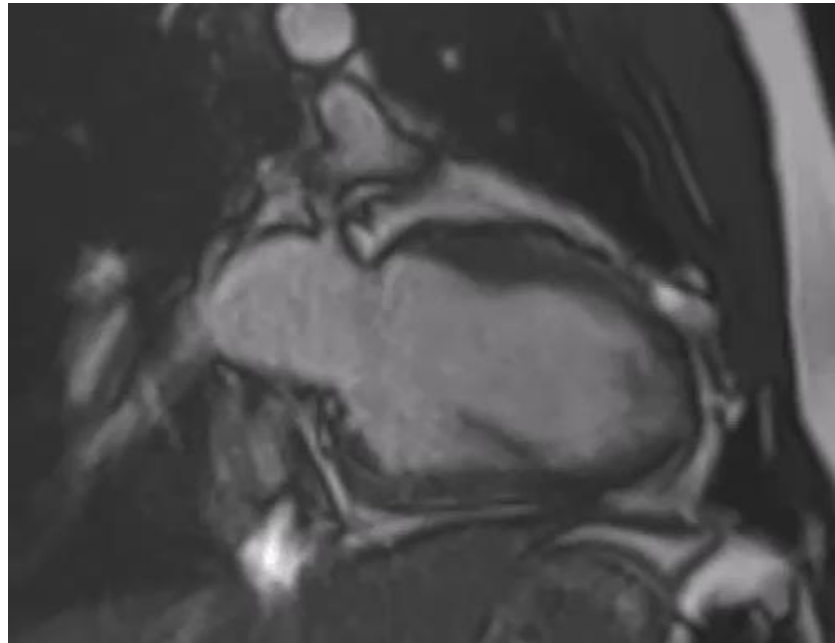
- IRM = Imagerie par résonance magnétique
- Technique non invasive / non-ionisante
- Fait appel aux propriétés magnétiques des protons
- Aimant de l'IRM = champ magnétique puissant (0,5 à 3 T) → tous les protons s'aligne sur ce champ magnétique en effectuant un mouvement de précession (toupie)
- Une impulsion de radiofréquences est émise par une antenne vient perturber cette précession: émission d'un signal magnétique détectable,

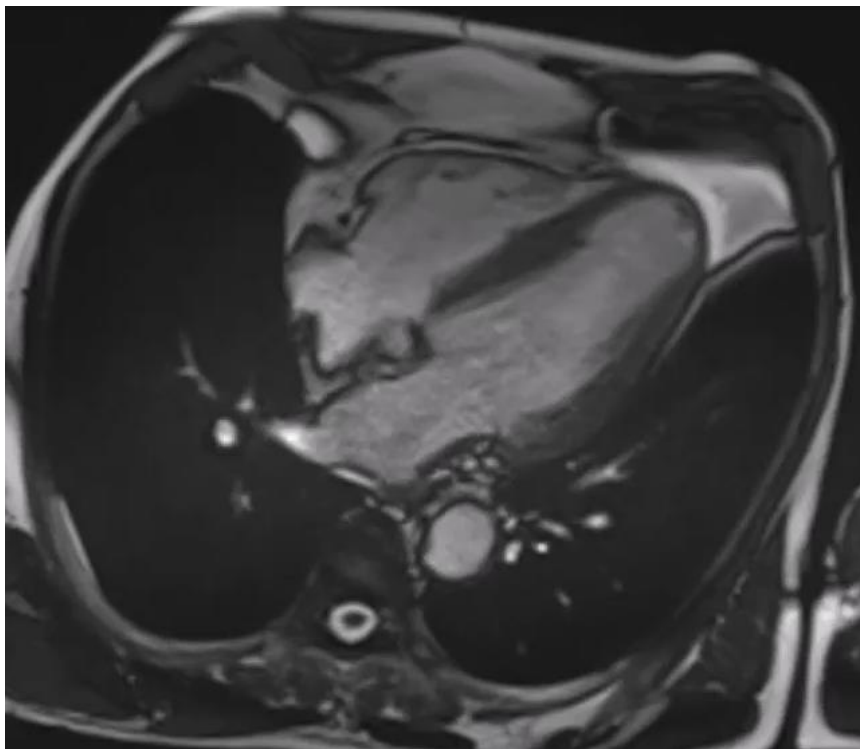


4.7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.7.2 L'IRM cardiaque

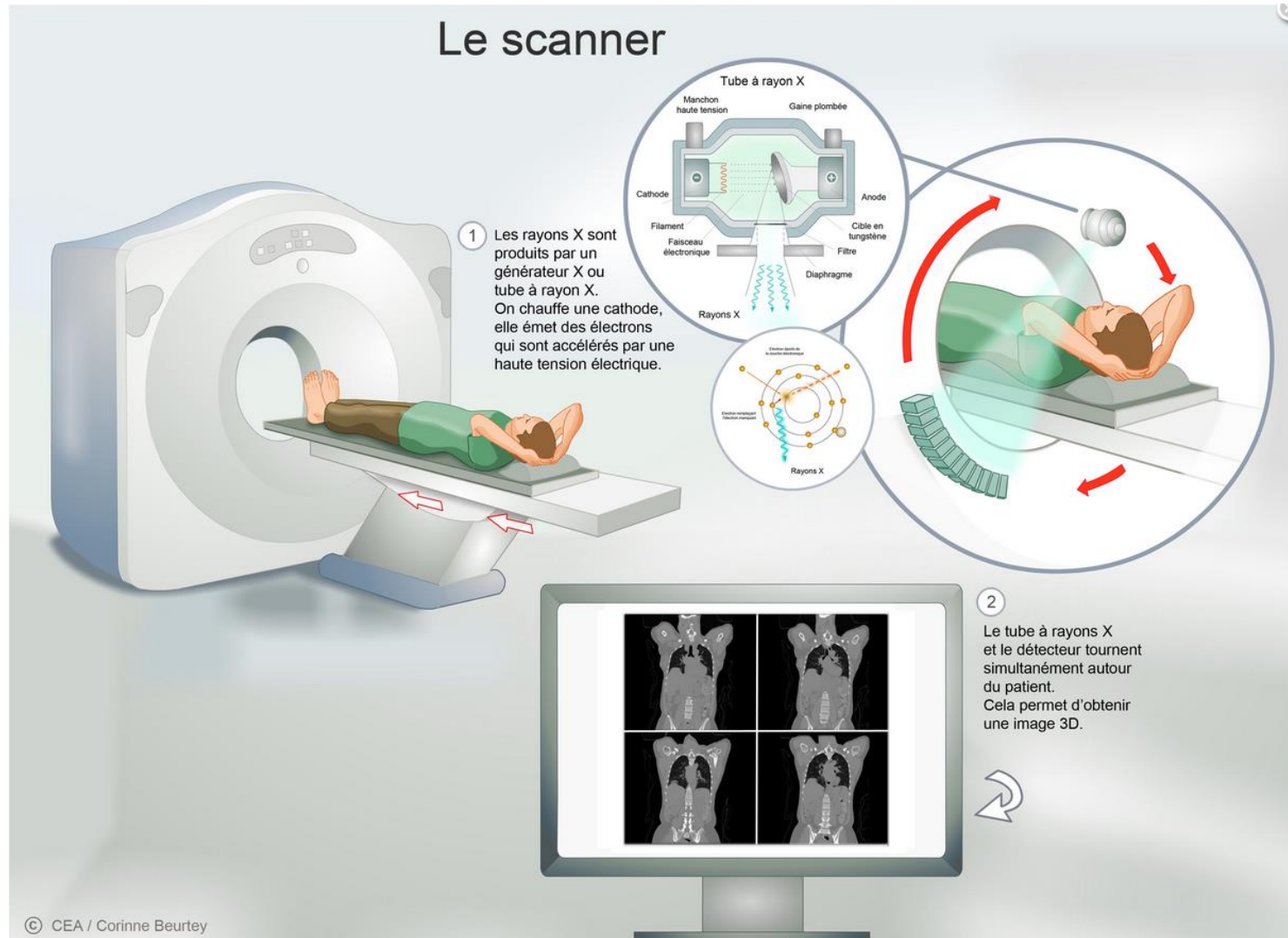
- De plus en plus utilisée grâce à l'amélioration des séquences d'acquisition :
 - synchronisation de l'acquisition au cycle cardiaque +++
 - séquences d'acquisitions ultra-rapides (séquences en écho de gradient multiphases)





4.7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

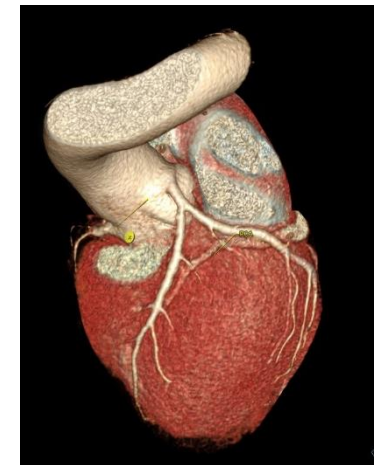
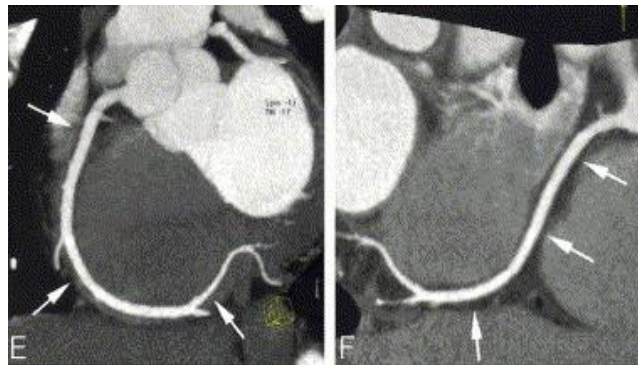
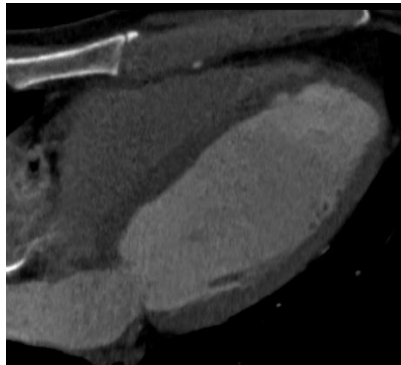
4.7.3. La tomodensitométrie (= le scanner)



4.7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.7.3. La tomodensitométrie (= le scanner)

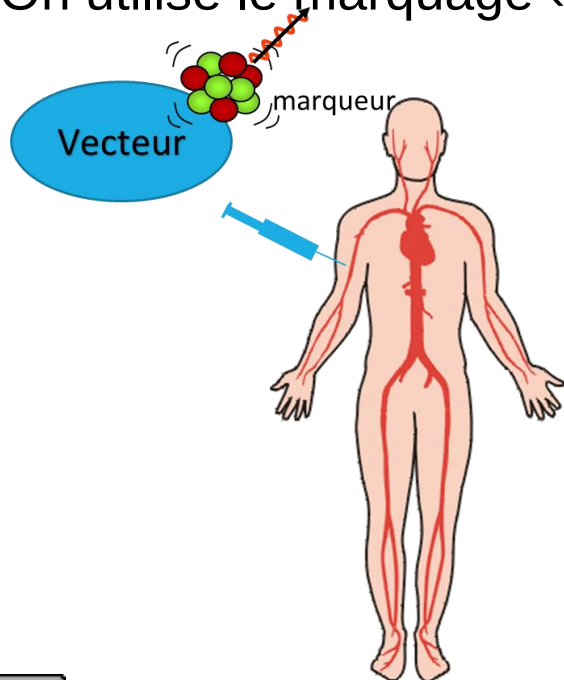
- Technique peu invasive / rayonnement ionisant
- Opacification du sang par injection intraveineuse, d'un produit de contraste iodé, radio-opaque
- Synchronisation ECG obligatoire pour visualisation en mode ciné
- Analyse de la contraction des parois cardiaques
- Utiliser pour visualiser coronaires (coro-scan)



4.7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.7.4. Méthodes radio-isotopiques

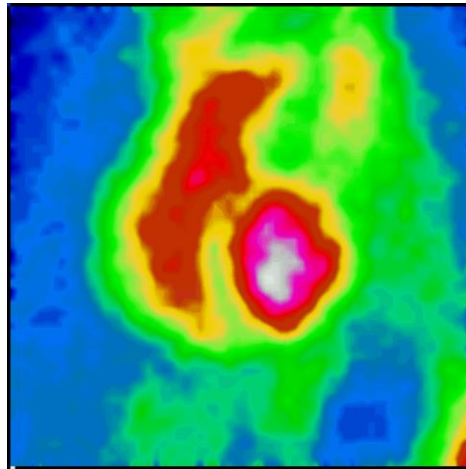
- Principale méthode = angio-scintigraphie isotopique
- Technique peu invasive / rayonnement gamma ionisant
- Injection, par voie intraveineuse, d'une très faible quantité de traceur radioactif
- On utilise le marquage « in vivo » des hématies du patient par le ^{99m}Tc



4.7. Techniques d'exploration de la fonction mécanique du cœur

4.7.4. Méthodes radio-isotopiques

- Enregistrement de l'évolution de la radioactivité intracardiaque au cours du temps par une gamma-caméra
- Synchronisation de l'acquisition à l'ECG



- Intérêt pour le calcul de la FEVG car la radioactivité mesurée dans le ventricule gauche est directement proportionnel au volume sanguin intra-VG

$$FEVG (\%) = \frac{Radioact^{té} VG \text{ fin de diastole} - Radioact^{té} VG \text{ fin de systole}}{Radioact^{té} VG \text{ fin de diastole}}$$

Mentions légales

- *L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle.*
- *Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.*
- *Ce document est interdit à la vente ou à la location par un tiers autre que l'Université de Nice-Sophia Antipolis.*
- *La diffusion, la duplication, la mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), la mise en réseau, de tout ou partie de ce document, sont strictement réservés à l'Université de Nice-Sophia Antipolis.*
- *L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits aux cours et au tutorat organisés par l'UFR de Médecine de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, et non destinée à toute autre utilisation privée ou collective, gratuite ou payante.*