

Faculté *MED*

2.0 crédits	15.0 h
Master [120] en sciences biomédicales	SBIM2M
Master [180] en médecine	MD2M

Joelle Kefer

MD 1992; DES Cardiologie 1997; PhD 2007

Cardiologue interventionnelle depuis 2000 aux CUSL

Responsable Cathétérisme Cardiaque CUSL 2012

IREC : Institut de Recherche Expérimentale et Clinique



Cliniques universitaires
SAINT-LUC
UCL BRUXELLES

Objectif : familiariser les étudiants avec la méthodologie des différents examens complémentaires cardiologiques invasifs et non invasifs, et leur apport spécifique en fonction des pathologies.

Contenu : Les différentes techniques d'exploration fonctionnelle cardiaque vont être abordées de manière à placer les informations qu'elles fournissent de manière logique et séquentielle dans l'algorithme du diagnostic différentiel des principaux symptômes rencontrés en cardiologie.

Les techniques qui seront étudiées sont :

imagerie non invasive : échocardiographie transthoracique et transoesophagienne, CT-scanner et résonance magnétique nucléaire

stress test : épreuve d'effort (électrocardiogramme, capacité d'effort, analyse rythmique), scintigraphie, échographie et IRM de stress

exploration invasive : cathétérisme hémodynamique, coronarographie (analyse quantitative et fonctionnelle des sténoses coronaires, imagerie intracoronaire), étude électrophysiologique

Horaire : jeudi 13h-16h: 13 février, 27 février, 5 mars, 12 mars et 26 mars

Lieu : salle réunion en gastro, -2, route 609, sauf 05/03: salle radiologie, -2, route 621

Modes d'évaluation des acquis des étudiants : examen oral

Plan

- Cours 1 : symptôme 1 = dyspnée
 - A. Cardiopathie structurelle - Insuffisance cardiaque
 - I. échocardiographie transthoracique
 - théorie de base de l'échocardiographie
 - apport de la technique dans le diagnostic
 - II. épreuve d'effort
 - théorie de base de l'épreuve d'effort
 - VO2 max, capacité physique
 - III. cathétérisme cardiaque hémodynamique

- Cours 2: symptôme 1 = dyspnée
 - B. Cardiopathie valvulaire – congénitale
 - I. échocardiographie transoesophagienne (ETO)
 - théorie de base de l'ETO
 - apport de la technique dans le diagnostic
 - II. cathétérisme cardiaque hémodynamique
 - III. résonance magnétique nucléaire

Plan

- Cours 3 : symptôme 2 = douleur thoracique
 - C. Douleur thoracique non ischémique
 - échographie
 - scanner cardiaque
 - D. Cardiopathie ischémique
 - I. stress test
 - épreuve d'effort
 - scintigraphie myocardique
 - échographie de stress
 - IRM de stress

- Cours 4 : symptôme 2 = douleur thoracique
 - D. Cardiopathie ischémique (suite)
 - II. coronarographie
 - anatomie, évaluation quantitative
 - évaluation fonctionnelle (FFR)
 - imagerie intracoronaire

- Cours 5 : symptôme 3 = palpitation
 - I. apport de l'échocardiographie
 - II. apport de l'épreuve d'effort
 - III. étude électrophysiologique

➤ Cours 1 : symptôme 1 = **dyspnée**

- A. Cardiopathie structurelle - Insuffisance cardiaque

- I. échocardiographie transthoracique

- théorie de base de l'échocardiographie

- apport de la technique dans le diagnostic

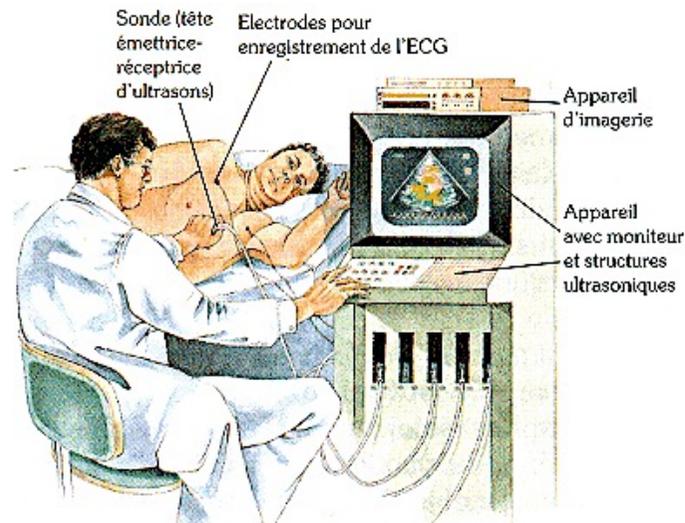
- II. épreuve d'effort

- théorie de base de l'épreuve d'effort

- VO2 max, capacité physique

- III. cathétérisme cardiaque hémodynamique

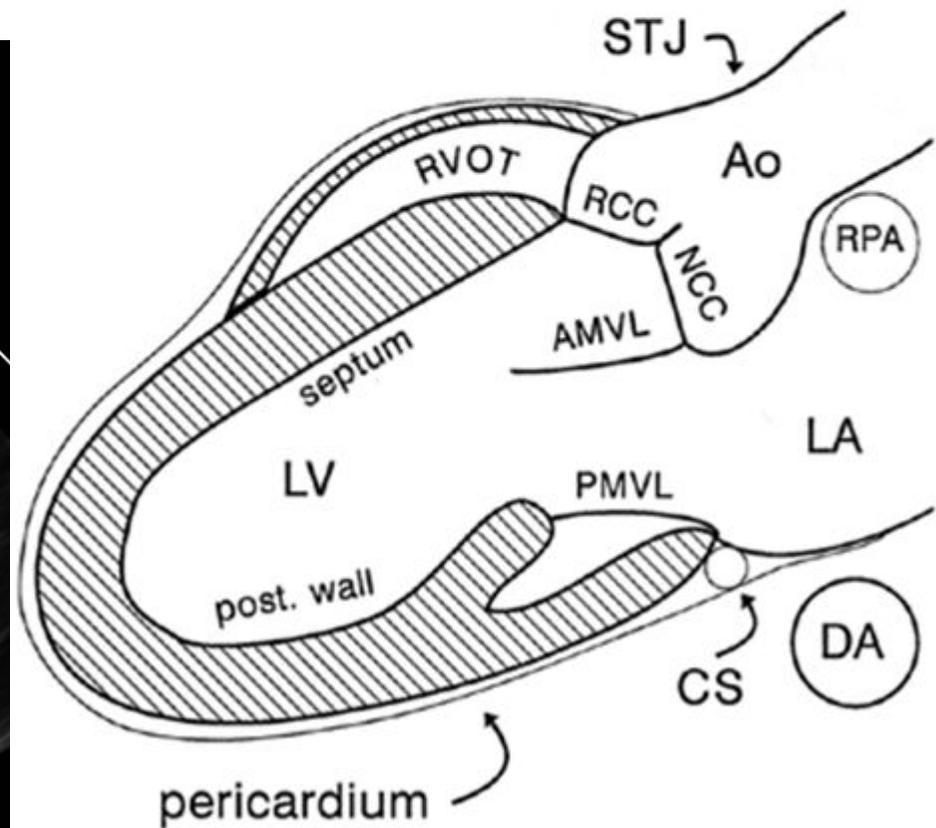
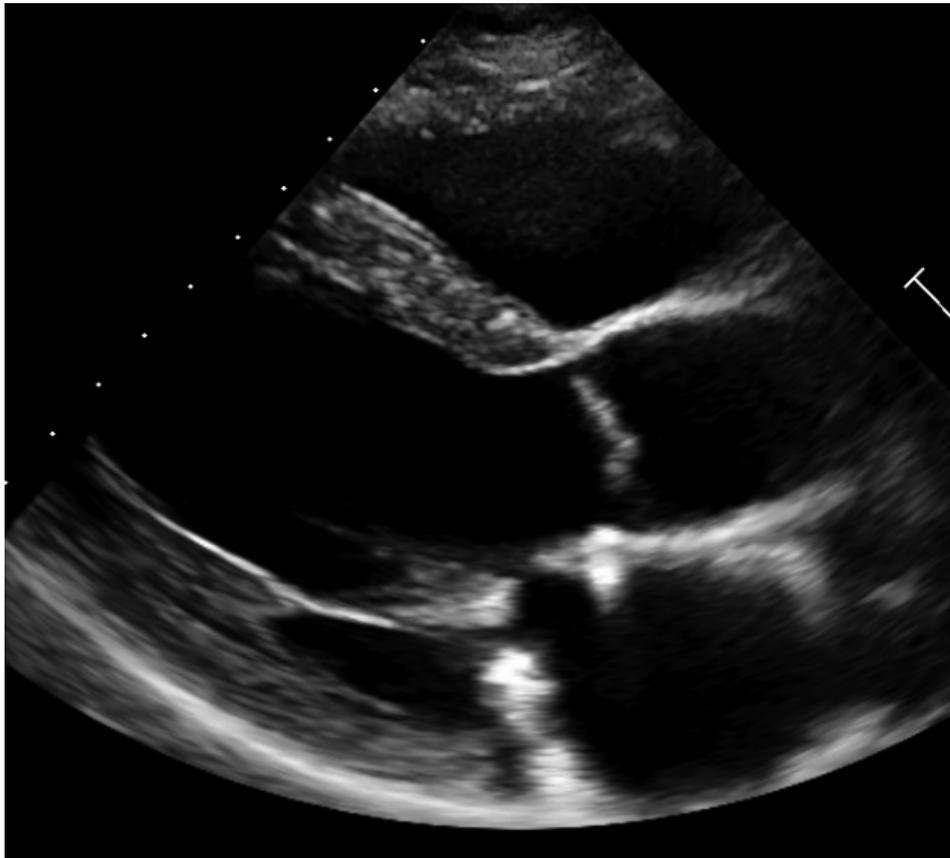
- ✓ L'échocardiographie est une technique non invasive d'exploration morphologique et dynamique du cœur par les ultrasons.
- ✓ Une sonde, positionnée sur le thorax du patient, émet des ultrasons.
- ✓ Chaque structure cardiaque rencontrée réfléchit un écho caractéristique en fonction de sa position et sa mobilité.
- ✓ La sonde reçoit ces échos réfléchis et les traduit en impulsions électriques amplifiées.



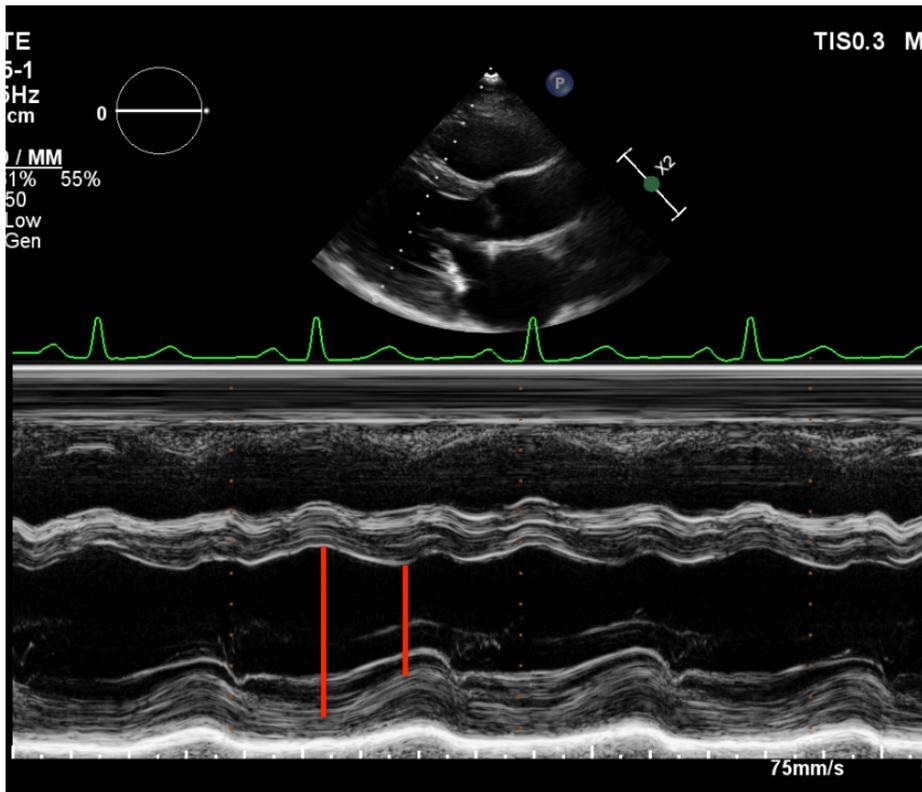
COURS 1. A-I. Echocardiographie transthoracique : théorie

- ✓ La technique d'enregistrement peut être TM (temps-mouvement) pour mesurer les dimensions des cavités cardiaques et l'épaisseur des parois.

Vue parasternale gauche grand axe



COURS 1. A-I. Echocardiographie transthoracique : théorie : le mode TM



Paramètre en écho TM :	Valeur normale	unité
Diamètre télédiastolique du VD	7 – 23	mm
Diamètre télédiastolique du VG	38 – 56	mm
Diamètre télésystolique du VG	22 – 40	mm
Epaisseur télédiastolique du SIV	6 – 11	mm
Diamètre télédiastolique de l'aorte	20 – 37	mm
Diamètre télésystolique de l'OG	18 – 40	mm
Fraction de raccourcissement du VG	28 – 42	%
Fraction d'éjection VG (Teichholz)	55 – 70	%
Masse ventriculaire gauche	H<110; F<90	gr / m2

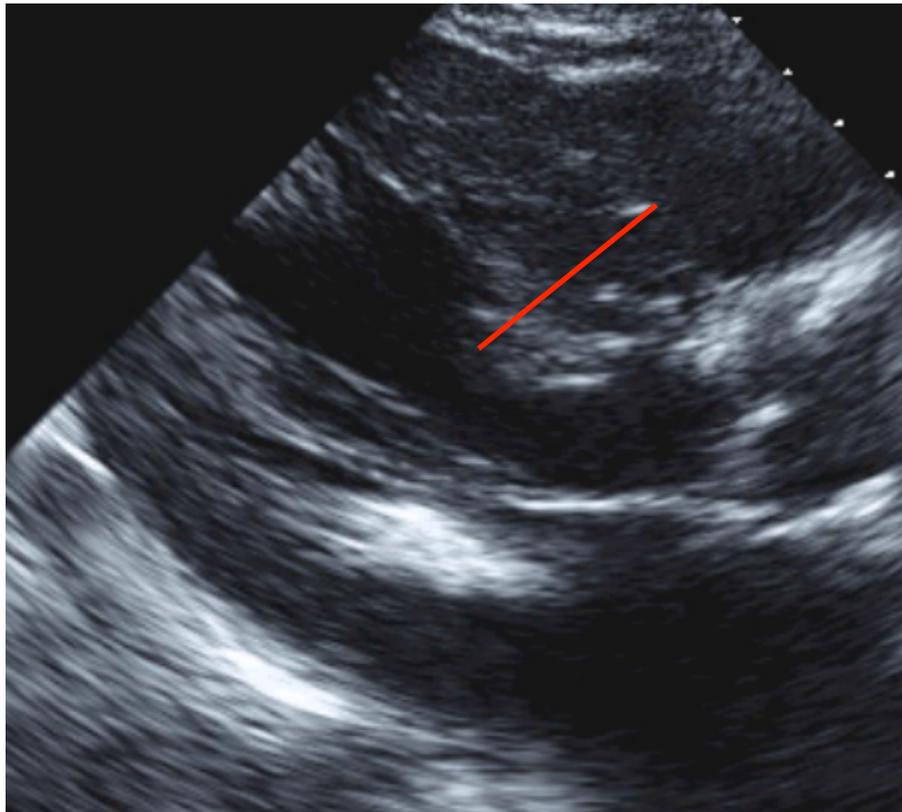
VD=Ventricule Droit; VG=Ventricule Gauche;
 SIV=Septum InterVentriculaire; OG=Oreillette Gauche
 H=Homme; F=Femme
 Fraction de raccourcissement : (Dtd - Dts) / Dtd

La fraction d'éjection du ventricule gauche est un paramètre essentiel pour l'évaluation de sa fonction systolique. Elle est calculée par la différentielle des volumes diastoliques et systoliques.

$$FE = (Vtd - Vts) / Vtd$$

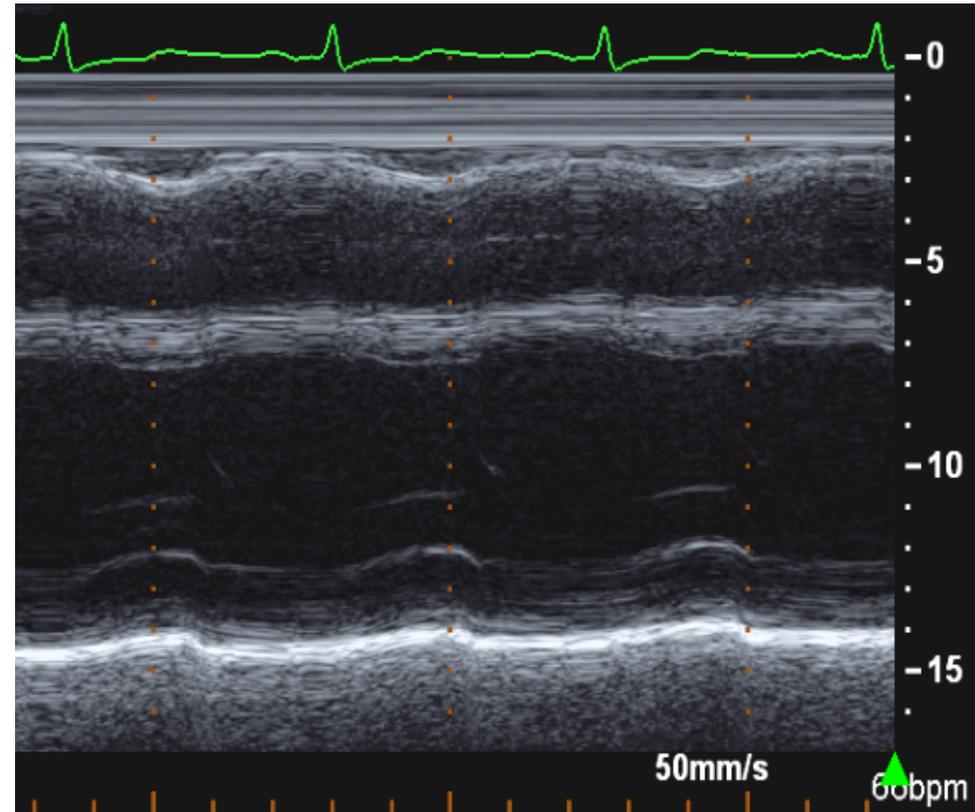
La formule de Teichholz reconstitue le volume du VG en lui attribuant une forme ellipsoïde régulière et suppose que la contraction est homogène. Elle permet le calcul simple du volume à partir du diamètre de la cavité ventriculaire gauche : $V=7 D^3/(2.4+D)$.

Bouffret septal hypertrophié



Cardiopathie hypertrophique obstructive

Dimensions ventriculaires gauches augmentées
Faible variation systolo-diastolique



Cardiopathie dilatée avec altération de la fonction systolique du VG

COURS 1. A-I. Echocardiographie transthoracique : théorie

- ✓ La technique d'enregistrement peut être BD (bi-dimensionnel ou 2D) qui permet en temps réel d'analyser les structures cardiaques en deux dimensions en fournissant une coupe anatomique du cœur en mouvement dans un plan donné.

Vue 4 cavités

Vue 2 cavités



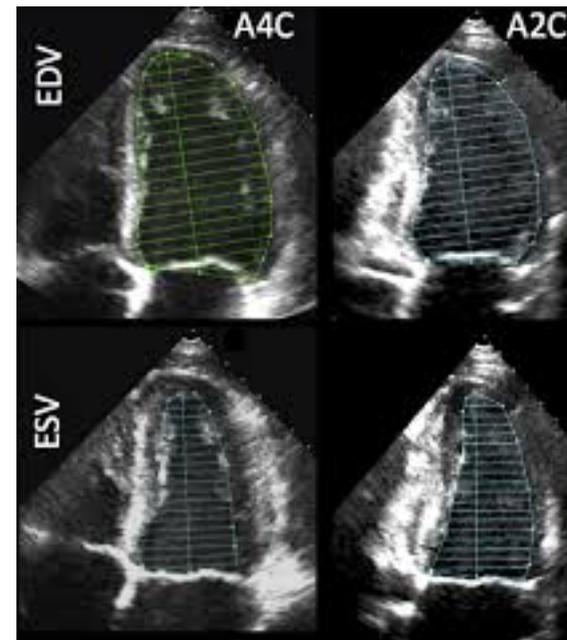
Vue parasternale long axe

Vue parasternale petit axe

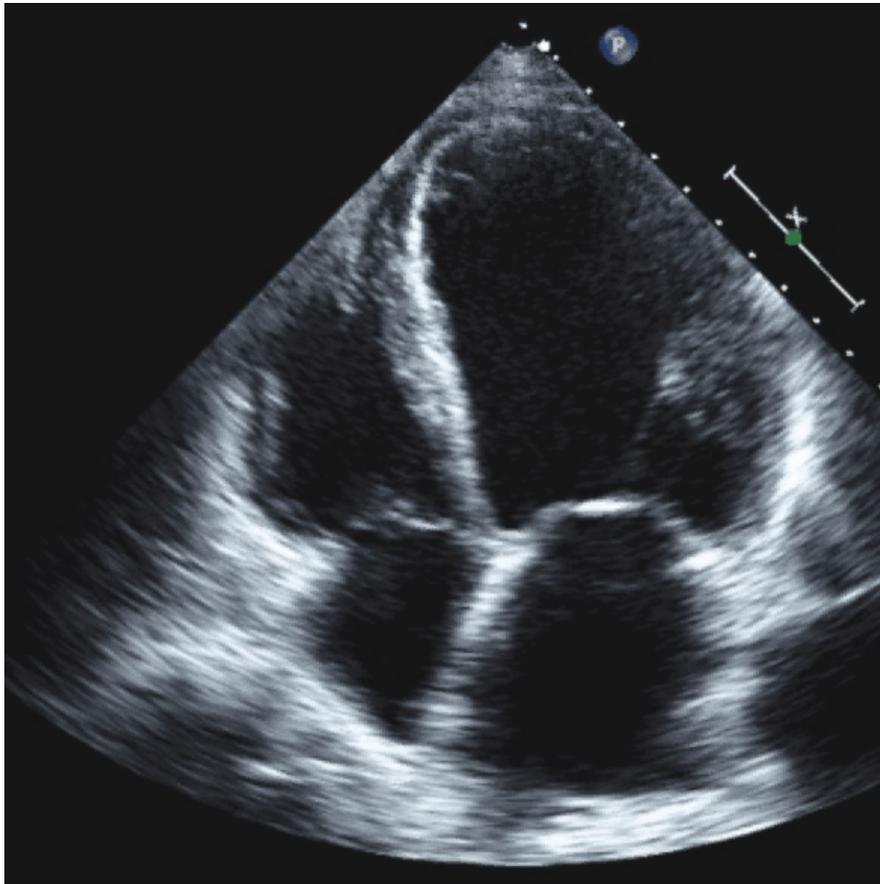
COURS 1. A-I. Echocardiographie transthoracique : théorie mode 2D

- ✓ Le mode 2D permet d'apprécier visuellement la dynamique du ventricule gauche, du ventricule droit, les dimensions en différents plans de coupe des différentes cavités (ventricules, oreillettes, émergence de l'artère pulmonaire, chambre de chasse, aorte).
- ✓ La vue 4 cavités permet de calculer la fraction d'éjection du ventricule gauche par la méthode de Simpson: on dessine le pourtour de l'endocarde, le système découpe la surface en 20 tranches dont il calcule le volume en supposant qu'il s'agit de 20 disques circulaires; le volume du VG est la somme de celui des disques. Les mesures doivent être réalisées en systole et diastole ainsi qu'en 2 et 4 cavités pour tenir compte des asymétries de contraction.

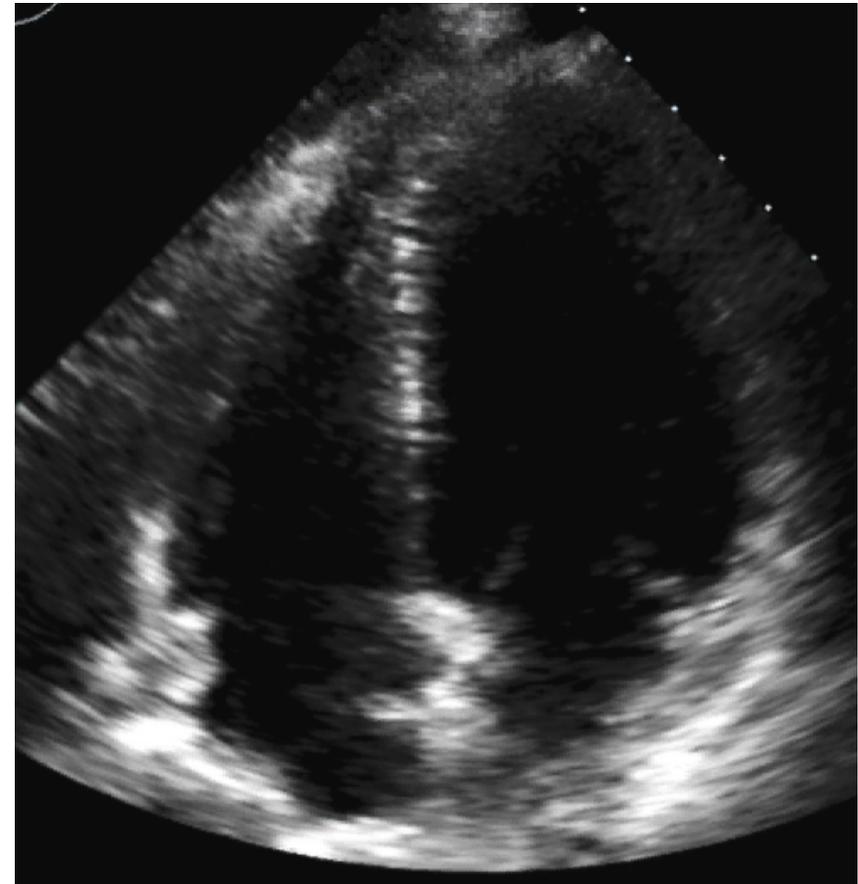
$$FE = (Vtd - Vts) / Vtd$$



Vue 4 cavités en mode bidimensionnel



Cardiopathie dilatée avec altération de la fonction systolique du VG



Cœur normal

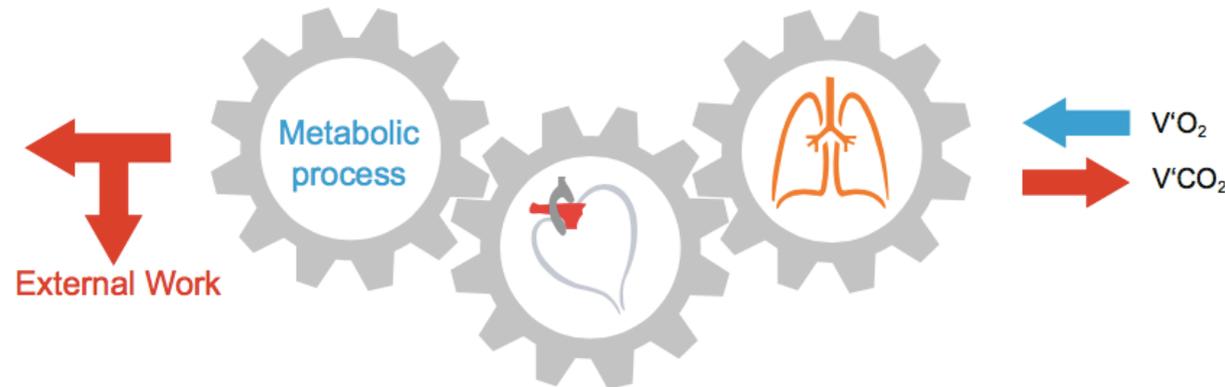
L'échocardiographie transthoracique de repos est un examen simple et rapide qui permet de détecter l'insuffisance cardiaque en appréciant la fonction systolique du ventricule gauche et de la quantifier en mode TM et 2D.

COURS 1. A-II. Epreuve d'effort : théorie

- ✓ Le but de l'épreuve d'effort est d'augmenter par un exercice standardisé, la consommation d'oxygène et le débit cardiaque.
- ✓ Il va induire une augmentation progressive et mesurée de la fréquence cardiaque, de la pression artérielle, de la consommation d'oxygène.
- ✓ Il peut être réalisé sur tapis roulant ou sur cyclo-ergomètre

Echanges gazeux pendant l'épreuve d'effort:

- ✓ L'air ambiant est inhalé par les poumons; l'oxygène (O₂) présent dans l'air diffuse des poumons vers le sang circulant où il est absorbé par l'hémoglobine et délivré aux muscles via le système cardio-circulatoire. Une fois dans le muscle, l'O₂ fournit au muscle l'énergie nécessaire pour la réalisation de l'effort. Le CO₂ produit pendant le processus est à son tour absorbé dans le sang, transporté aux poumons puis expiré. La mesure de ces paramètres est essentielle pour évaluer la capacité physique d'une personne



Causes of impaired oxygen transport and utilisation

Cohen-Sohal, Practical guide to cardiopulmonary exercise

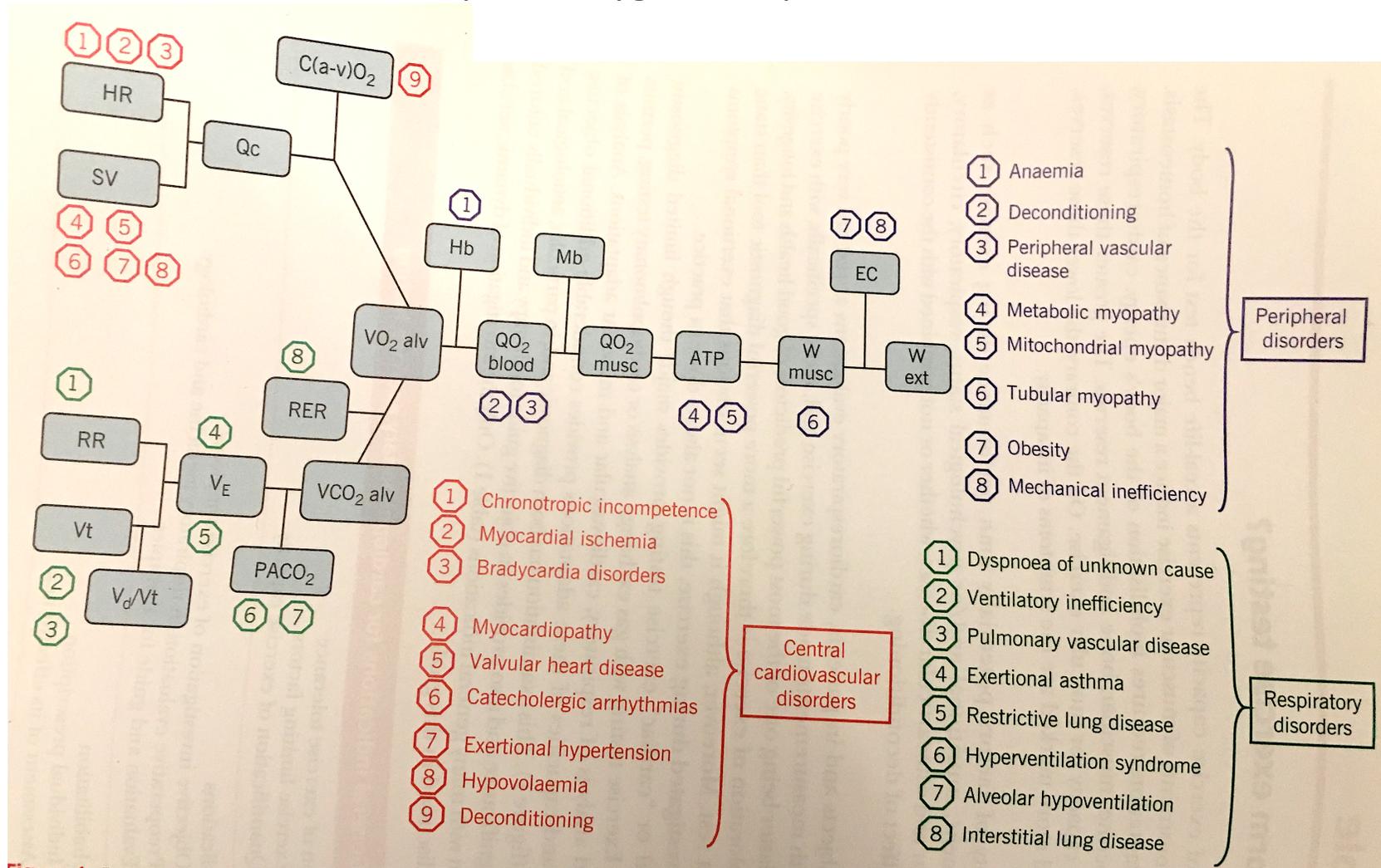


Figure 1: Exertional ...

- ✓ La consommation d'O₂ (VO₂) est calculée sur le principe de la conservation des matières et est égale à la différence entre le volume d'O₂ inspiré et celui expiré. L'équation de Fick indique que l'entièreté du débit cardiaque (DC) passe à travers les poumons et que par la loi de conservation des masses, le débit cardiaque peut être estimé par la VO₂ et la différence artério-veineuse du contenu en O₂. Equation de Fick: $VO_2 = DC \times C(a-v)O_2$
- ✓ La VO₂ max est la quantité maximale d'O₂ qu'un individu est capable de consommer lorsqu'il fournit un effort; elle est exprimée en ml/minute/kg de poids corporel. Sa valeur moyenne est 30-35 chez l'adulte (70-80 marathonien, fondeur, cycliste compétition). Elle représente la capacité maximale du métabolisme aérobie de fournir de l'énergie aux muscles
- ✓ L'idéal est de mesurer la VO₂ par mesure des échanges gazeux lors d'une épreuve d'effort

Embout buccal relié à un analyseur
Monitoring ECG et pression artérielle
Charge croissante, incrément régulier
De 10 ou 20 watts/1 ou 2 minutes



COURS 1. A-II. Epreuve d'effort : théorie

- ✓ L'intensité de l'effort peut être mesurée en Watt ou en MET
- ✓ MET = équivalent métabolique. C'est le rapport de l'activité sur la demande du métabolisme de base.
- ✓ Le niveau de dépense énergétique au repos est = 3,5 ml oxygène/kg poids corporel/minute

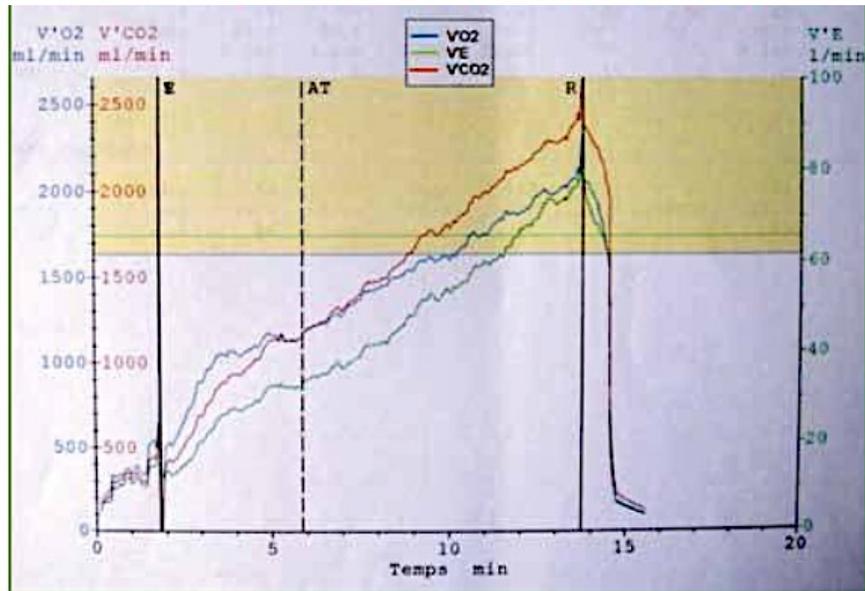
Activité physique	MET
légère	<3
dormir	0.9
écrire à l'ordinateur	1.8
modérée	3-6
jardinage	4.4
nage	4.5
Marche 4 km/h	4
intense	>6
course à pied	7
corde à sauter	10
Squash	12

Equivalence Mets/Watts

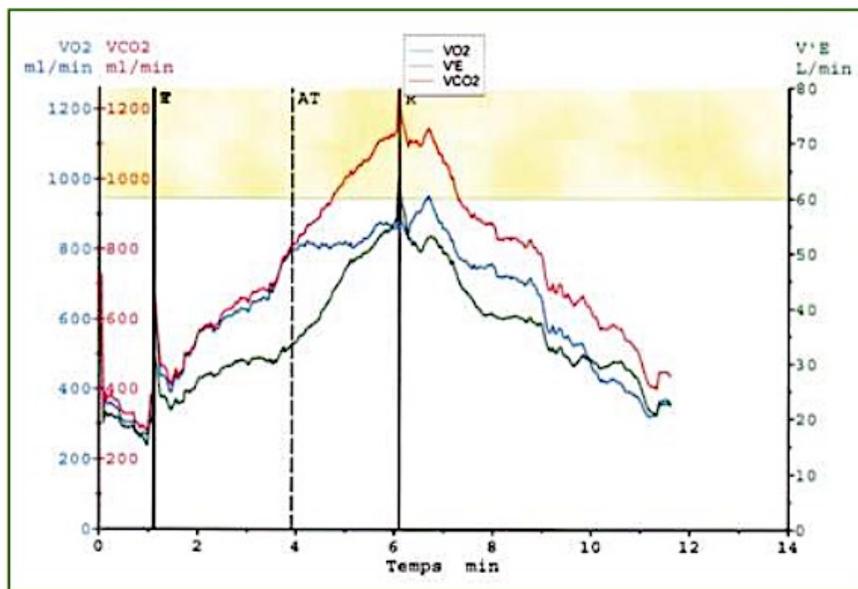
METS	WATTS
1	repos
5	75
7	100
8.5	150
11	200

- ✓ Relation linéaire entre l'intensité de l'effort, la VO₂ max, la pression artérielle et la FC.
- ✓ En dehors de facteurs non cardiologiques (ostéo-articulaires, motivation, diffusion pulmonaire), les facteurs limitants de la VO₂ MAX sont: l'augmentation du débit cardiaque et le déconditionnement physique.
- ✓ Chez le sujet sain, le premier facteur n'est pas limitant, la condition physique est déterminante
- ✓ Chez l'insuffisant cardiaque, la VO₂ MAX
 - ✓ est abaissée (souvent entre 10 et 20 ml) en raison d'une limitation à l'augmentation du débit cardiaque mais aussi par le déconditionnement physique.
 - ✓ N'est pas corrélée au chiffre de fraction d'éjection de ventricule gauche
 - ✓ A un impact pronostique sur la survie du patient
 - ✓ Est un marqueur de réponse à un traitement
- ✓ La pente VE/VCO₂ est la pente de la ventilation sur le volume expiré de dioxyde de carbone : témoin de l'efficacité respiratoire c-à-d d'éliminer le CO₂ pour une ventilation donnée. Elle indique le nombre de litre d'air que le patient doit ventiler par min pour rejeter 1L de CO₂. Valeur normale < 30; augmente chez l'insuffisant cardiaque (augm espace mort ventilatoire, baisse du débit pulmonaire, ergoréflexe musculaire exacerbé); pronostic péjoratif > 40%.

COURS 1. A-II. Epreuve d'effort : VO2 max



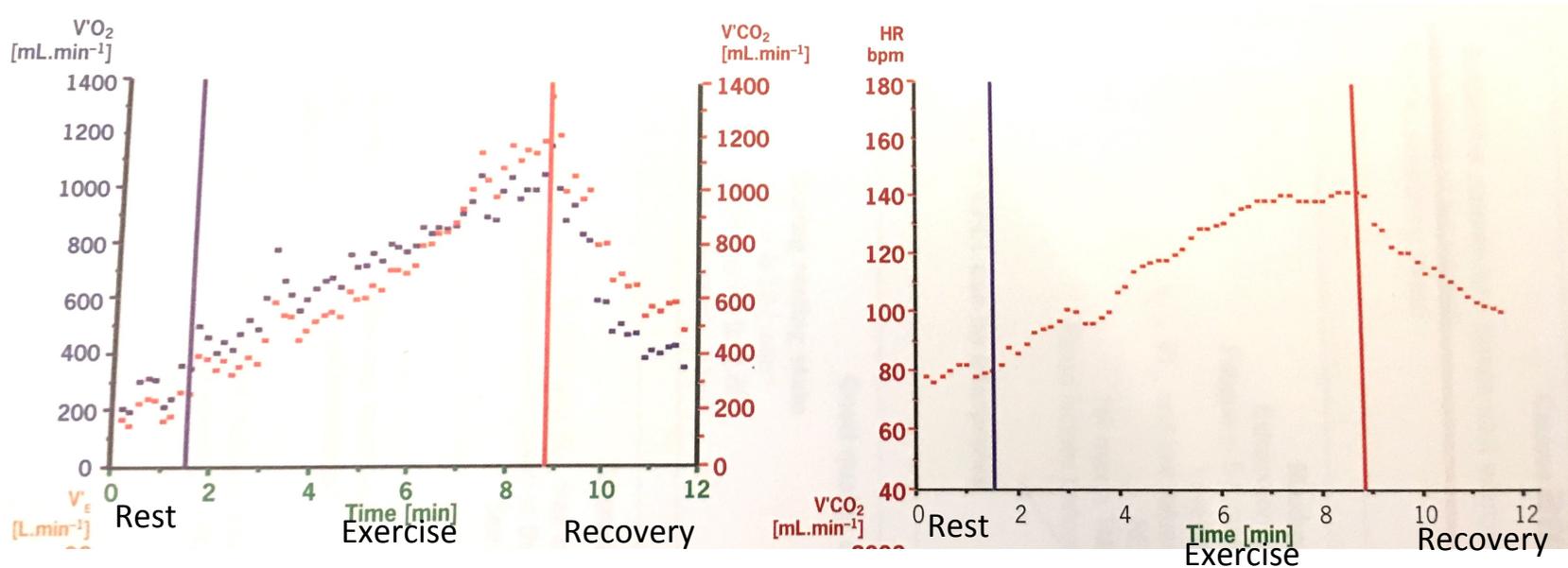
Individu normal
Durée test : 14 min
Pic VO2 = 27 ml/kg/min



Insuffisant cardiaque
Durée test : 6 min
Pic VO2 = 12 ml/kg/min

Normal aerobic adaptations

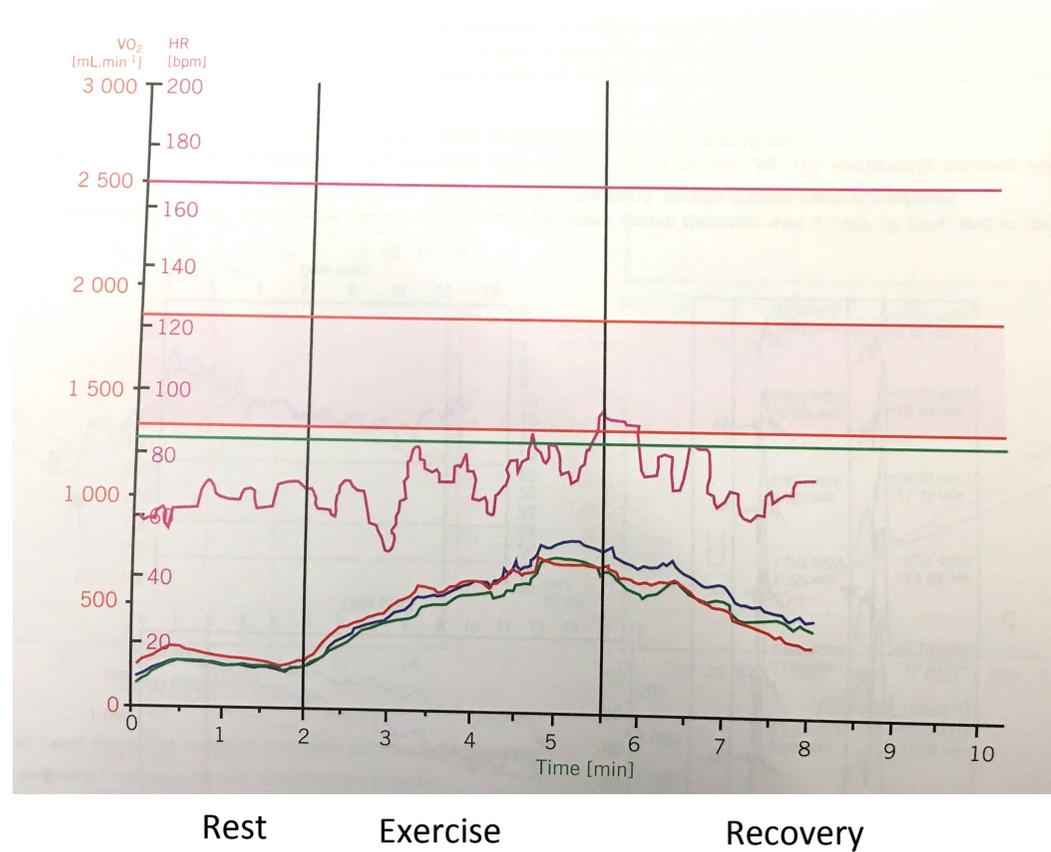
Cohen-Sohal, Practical guide to cardiopulmonary exercise



Parameter at the end of exercise	Normal value
Cardiac output	20-25 L/min
Blood pressure (systolic/diastolic)	220/110 mmHg
Respiratory Rate	35-60 breaths/min
Heart Rate	85% TMHR (220-age or 210-0.65 age)
$\dot{V}_E/\dot{V}'CO_2$ slope	<30
$C(a-v)O_2$	12-16 ml O ₂ /100 ml

Severe heart failure

Cohen-Sohal, Practical guide to cardiopulmonary exercise



VO₂: 300 ml at rest, peak at 600 ml, slow recovery; chronotropic incompetence

COURS 1. A-II. Epreuve d'effort : théorie

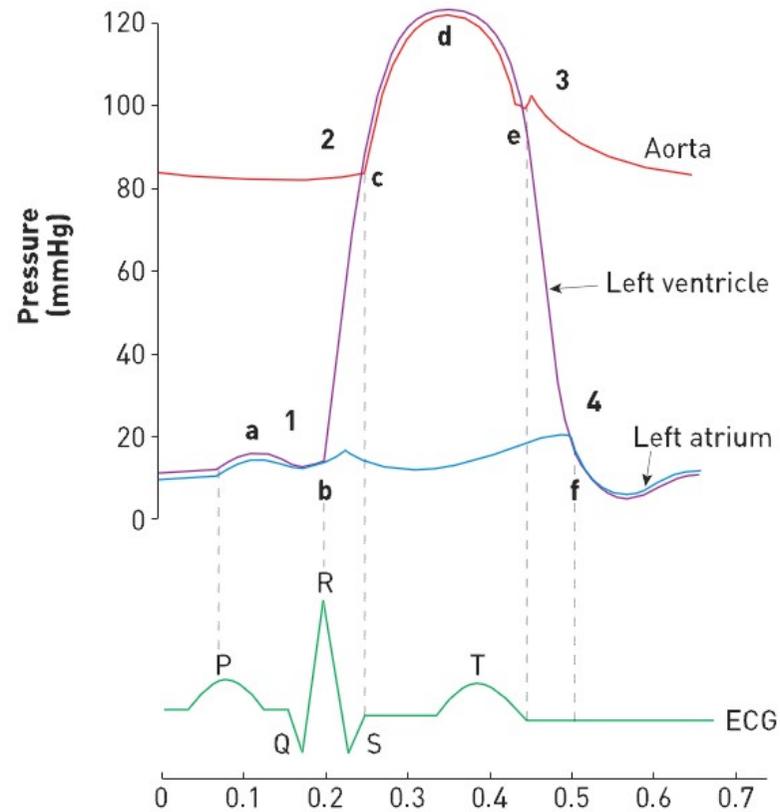
Guazzi et al. J Am Coll Cardiol 2017;70:1618-36

Primary CPET Variables			
VE/Vco ₂ Slope	Peak V _{O₂}	EOV	P _{ET} CO ₂
<u>Ventilatory Class I</u> VE/Vco ₂ slope <30.0	<u>Ventilatory Class A</u> Peak V _{O₂} >20.0 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹	Not Present	Resting P _{ET} CO ₂ ≥33.0 mm Hg 3-8 mm Hg increase during ET
<u>Ventilatory Class II</u> VE/Vco ₂ slope 30.0-35.9	<u>Ventilatory Class B</u> Peak V _{O₂} = 16.0-20.0 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹		
<u>Ventilatory Class III</u> VE/Vco ₂ slope 36.0-44.9	<u>Ventilatory Class C</u> Peak V _{O₂} = 10.0-15.9 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹	Present	Resting P _{ET} CO ₂ <33.0 mm Hg <3 mm Hg increase during ET
<u>Ventilatory Class IV</u> VE/Vco ₂ slope ≥45.0	<u>Ventilatory Class D</u> Peak <10.0 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹		
Standard ET Variables			
Hemodynamics	ECG	HRR	
Rise in systolic BP during ET	No sustained arrhythmias, ectopic foci, and/or ST-segment changes during ET and/or in recovery	>12 beats at 1 min recovery	
Flat systolic BP response during ET	Altered rhythm, ectopic foci, and or ST-segment changes during ET and/or in recovery: did not lead to test termination	≤12 beats at 1 min recovery	
Drop in systolic BP during ET	Altered rhythm, ectopic foci, and/or ST-segment changes during ET and/or in recovery: led to test termination		
Patient Reason for Test Termination			
Lower extremity muscle fatigue	Angina	Dyspnea	
Interpretation			

Classe de Weber (A-B-C-D, en fonction VO₂ max) directement corrélée avec la mortalité d'un insuffisant cardiaque.

L'épreuve d'effort permet de quantifier la capacité d'effort d'une personne et de distinguer les problèmes de déconditionnement physique des autres causes de dyspnée. La VO2MAX est un indice pronostic important de l'insuffisance cardiaque et un indicateur de réponse au traitement/évolution du stade fonctionnel de la maladie.

✓ L'hémodynamique est une analyse invasive des variations de pressions intracardiaques au cours du cycle cardiaque.

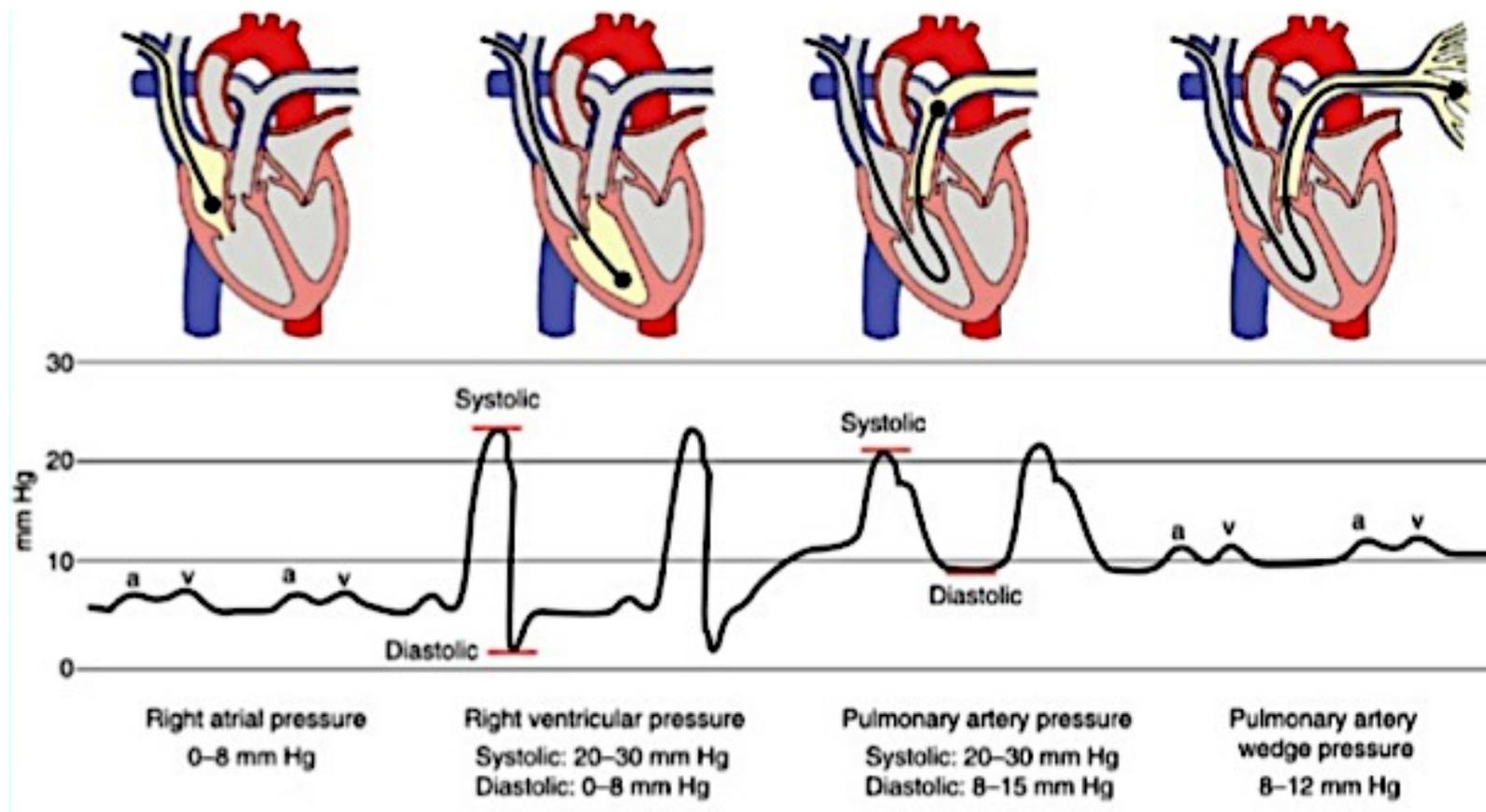


The Wigger's diagram of cardiac haemodynamics TIME (SEC)

1=crossing point is mitral valve closure, 2=aortic valve opening, 3=aortic valve closure, 4= mitral valve opening. a=a wave, b=onset isovolumetric contraction, c =systolic ejection, d=peak ejection and beginning of diastolic relaxation, e= beginning of isovolumetric relaxation, f=initiation of LV filling.

COURS 1. A. III. Cathétérisme cardiaque hémodynamique

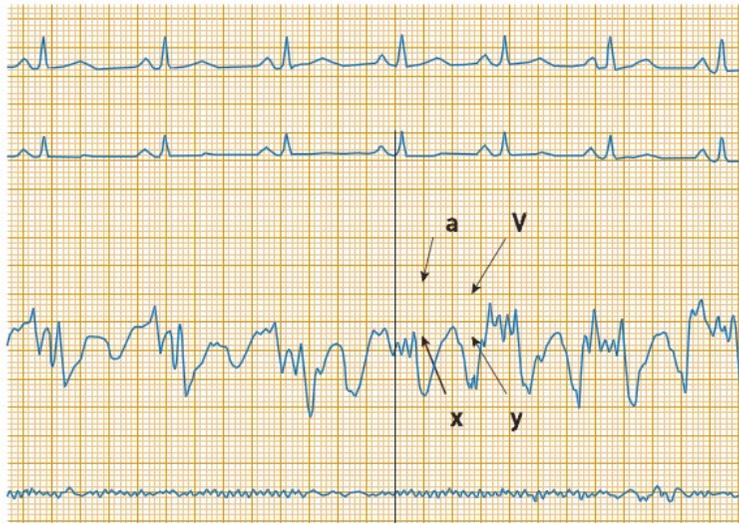
- ✓ Le cathétérisme des cavités droites permet de différencier les différentes causes de dyspnée, en mesurant le niveau de la pression dans les différentes cavités (oreillette droite, ventricule droit, artère pulmonaire, pression capillaire pulmonaire) et en analysant la forme de ces courbes.



COURS 1. A. III. Cathétérisme cardiaque hémodynamique

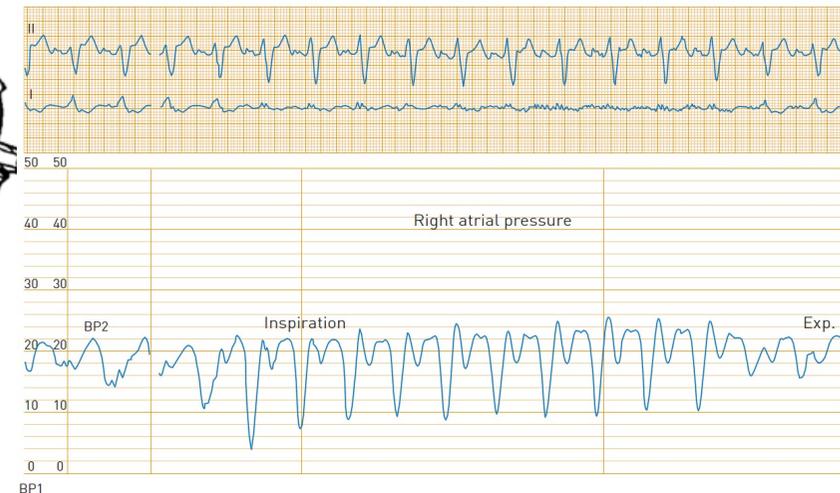
- ✓ Oreillette droite (OD) : normale entre 0 et 8 mmHg = PVC (pression veineuse centrale)
- ✓ Le signe de Kussmaul est une augmentation de pression OD à l'inspiration, suggestif de péricardite constrictive, gêne au remplissage passif; s'accompagne souvent de pente Y ++

Pression OD normale



Onde a : systole atriale,
Descente/pente x : diastole atriale
Onde v : remplissage atrial passif

Pression OD anormale

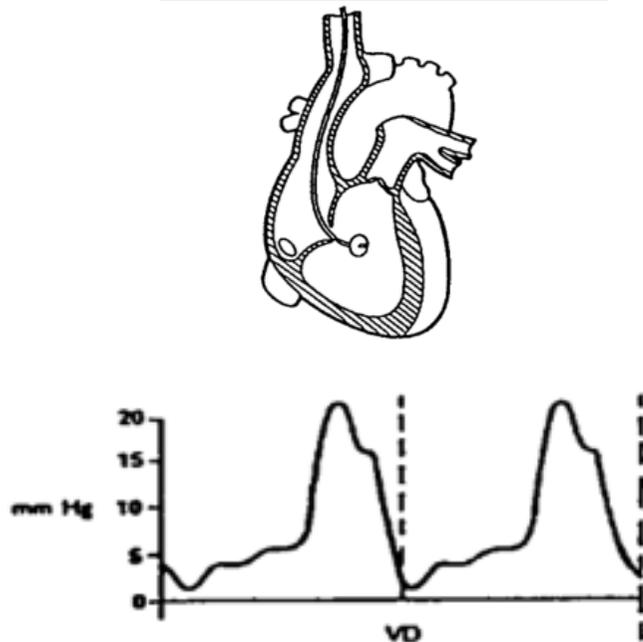


Pente Y très marquée :
dysfonction cavités droites, pathologies
constrictives/restrictives

COURS 1. A. III. Cathétérisme cardiaque hémodynamique

- ✓ Ventricule droit (VD) : normale entre Pr systolique 15-25 et Pr diastolique 0-8 mmHg
- ✓ Le dip-plateau correspond à un arrêt brutal et précoce du remplissage diastolique du ventricule droit, suggestif de dysfonction VD sévère, régurgitation tricuspide sévère, péricardite constrictive, cardiomyopathie restrictive.

Pression VD normale



Niveau de pression normal
Différentielle systolo-diastolique

Pression VD anormale

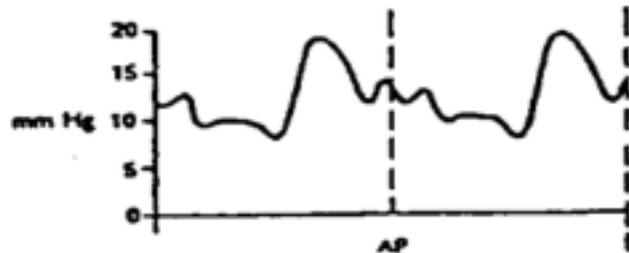


Pression trop élevée en systole et diastole
Onde très creusée en télédiastole (dip)
Stop brutal de l'élévation de la Pr diast = plateau

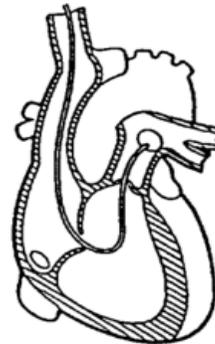
COURS 1. A. III. Cathétérisme cardiaque hémodynamique

- ✓ Artère pulmonaire (AP) : normale entre Pr systolique 15-25 et Pr diastolique 8-15 mmHg
- ✓ L'hypertension artérielle pulmonaire se définit par une augmentation de la PAPm ≥ 25 mmHg au repos. Elle est le plus souvent post-capillaire (insuffisance ventriculaire gauche)
- ✓ Le cathétérisme droit est l'examen de référence pour la différencier de l'htap pré-capillaire, définie par pression capillaire ≤ 15 mmHg et Res pulm > 3 U Wood.

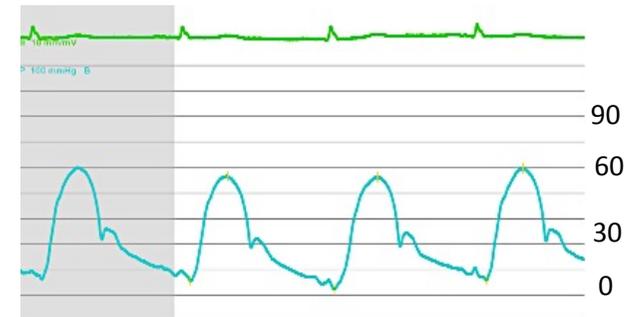
Pression AP normale



Pulsatilité systolo-diastolique
Pr diastolique $>$ VD
Onde dicrote



Pression AP anormale

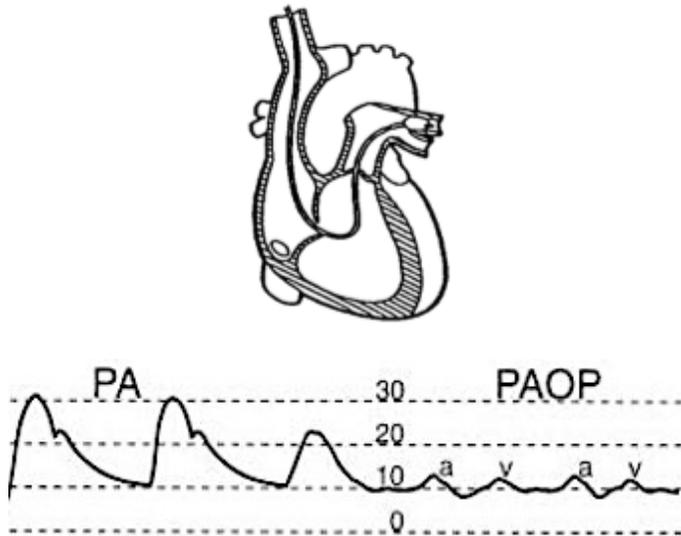


Pression trop élevée en systole
Onde dicrote préservée

COURS 1. A. III. Cathétérisme cardiaque hémodynamique

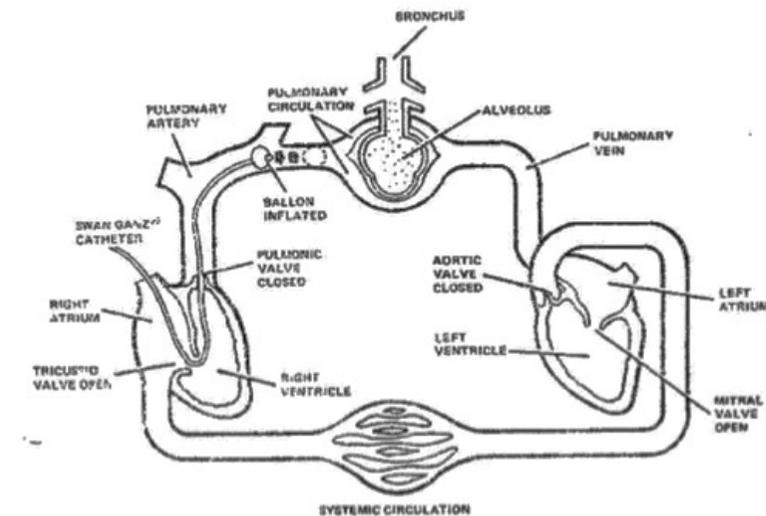
- ✓ Pression capillaire (CAP) : normale entre 6-12 mmHg .
- ✓ Elle reflète la valeur de la pression télédiastolique ventriculaire gauche (PtdVG)

Pression capillaire normale



Forme de pression auriculaire
Onde A = systole auriculaire
Onde V = remplissage passif <-
veines pulmonaires

Ballon gonflé donne une pression d'occlusion



Pr cap = PtdVG sauf si obstacle entre AP-VG:

- Sténose veines pulmonaires
- Sténose valve mitrale

Pr cap = PAP diastolique

Si différence PAPd - CAP > 5mmHg : HTAP précap

COURS 1. A. III. Cathétérisme cardiaque hémodynamique

- ✓ Le calcul des résistances vasculaires pulmonaires est essentiel dans le bilan d'une insuffisance cardiaque avec hypertension artérielle pulmonaire car il permet entre autres, d'évaluer la possibilité de transplantation cardiaque.

Res vasc pulmonaires = $\frac{\text{PAPm} - \text{Pr capillaire}}{\text{débit cardiaque}}$ en unités Wood (X80 pour dynes.sec.cm⁻⁵)

✓ Résistances vasculaires systémiques = $\frac{\text{Pr artérielle moyenne} - \text{Pr OD}}{\text{débit cardiaque}}$ X 80

✓ Pression artérielle moyenne (PAm) = PA systolique + 2X PA diastolique/3

✓ Pression artérielle pulmonaire moyenne (PAPm) = PAP syst + 2X PAP diast/3

COURS 1. A. III. Cathétérisme cardiaque hémodynamique : le débit cardiaque

✓ La méthode de **Fick** se base sur la différence artérioveineuse en oxygène, elle nécessite une mesure du contenu en oxygène dans l'artère pulmonaire et dans l'aorte ainsi que la consommation d'oxygène du patient. L'équation de Fick s'écrit :

$$\text{Cardiac Output} = \frac{\text{O}_2 \text{ consumption}}{\text{O}_2 \text{ content arterial} - \text{O}_2 \text{ content venous}}$$

✓ Le contenu en O₂ = 1.34 (= Qté ml O₂ transporté par chaque gr d'HB) X saturation O₂ X concentration Hb

✓ Elle présente le désavantage de devoir estimer théoriquement la consommation en oxygène du patient mais elle garde une excellente fiabilité dans des situations de changements hémodynamiques qui affectent le débit cardiaque comme la fréquence cardiaque et les conditions de charge.

Elle est plus fiable en cas de débit cardiaque abaissé que la technique de thermodilution, plus répandue.

✓ La technique de **thermodilution** repose sur une mesure de variation de température d'un volume connu injecté dans l'oreillette droite vers l'artère pulmonaire, où une thermistance réalise les mesures.

L'équation de thermodilution est :

$$\text{Cardiac Output} = \frac{\text{Constant} [V_{\text{injectate}} \times (T_{\text{blood}} - T_{\text{injectate}})]}{\frac{\Delta T}{dt}}$$

où le volume de l'injectat est égal à 10 mL de liquide salin à température connue et T représente la température mesurée par la thermistance localisée dans l'artère pulmonaire.

✓ La technique de thermodilution est considérée comme plus facile, donnant un résultat immédiat mais elle est moins fiable en cas de faible débit cardiaque ainsi qu'en cas de régurgitation tricuspидienne.

Valeurs normales du cathétérisme cardiaque

Paramètre	unité	normale
Pression Oreillette droite	mm Hg	0 – 8
Pression Ventricule droit systolique	mm Hg	15 – 25
Pression Ventricule droit diastolique	mm Hg	0 – 8
Pression Artère pulmonaire systolique	mm Hg	15 – 25
Pression Artère pulmonaire diastolique	mm Hg	8 – 15
Pression Artère pulmonaire moyenne	mm Hg	10 - 20
Pression Oreillette gauche	mm Hg	6 – 12
Onde V oreillette gauche	mm Hg	6 – 16
Pression capillaire	mm Hg	6 – 12
Pression artérielle systolique	mm Hg	90 – 140
Pression artérielle diastolique	mm Hg	60 – 90
Pression artérielle moyenne	mm Hg	70 – 105
Débit cardiaque	L/min	4 – 8
Index cardiaque (DC/surface corporelle)	L/min/m ²	2.5 – 4
Résistances vasculaires pulmonaires	dynes.sec.cm-5	<250
Résistances vasculaires systémiques	dynes.sec.cm-5	800 - 1200

Le cathétérisme cardiaque permet de distinguer les causes cardiologiques d'autres problèmes pouvant expliquer la dyspnée en quantifiant les valeurs de pression intracardiaque, de débit cardiaque, de résistances vasculaires pulmonaires et systémique.

Il permet de dépister l'hypertension pulmonaire et de différencier la forme pré- et post-capillaire.

La forme des courbes de pression peut orienter le diagnostic causal de l'insuffisance cardiaque.

- ✓ Une des causes les plus fréquentes de dyspnée en cardiologie est l'insuffisance cardiaque.
- ✓ L'échocardiographie transthoracique de repos est un examen simple et rapide qui permet de détecter l'insuffisance cardiaque en appréciant la fonction systolique du ventricule gauche et de la quantifier en mode TM et 2D.
- ✓ L'épreuve d'effort permet de quantifier la capacité d'effort d'une personne et de distinguer les problèmes de déconditionnement physique des autres causes de dyspnée. La VO₂MAX est un indice pronostic important de l'insuffisance cardiaque et un indicateur de réponse au traitement/évolution du stade fonctionnel de la maladie.
- ✓ Le cathétérisme cardiaque permet de quantifier les valeurs de pression intracardiaque, le débit cardiaque, les résistances vasculaires pulmonaires et systémiques. Il permet de dépister l'hypertension pulmonaire et de différencier la forme pré- et post-capillaire. La forme des courbes de pression peut orienter le diagnostic causal de l'insuffisance cardiaque.

Références pour illustrations – données

- The PCR-EAPCI Textbook
- Grossman's textbook, 7 edition, Donald Baim
- Tabet JY, Revue sur la VO₂, 2013
- Devriendt J. Monitoring hémodynamique - slideshare
- Vyair Medical, cardiopulmonary exercise testing
- Cohen-Solal, Practical guide to cardiopulmonary exercise