

L'exploration fonctionnelle respiratoire en pratique

Dr Laurent Plantier

Service de Pneumologie et Explorations Fonctionnelles Respiratoires

Hôpital Bretonneau - Université François Rabelais - CEPR/INSERM UMR11000

Tours, France

Plan de l'exposé

1- Rappels anatomico-fonctionnels

2- Les principaux examens EFR en pratique courante

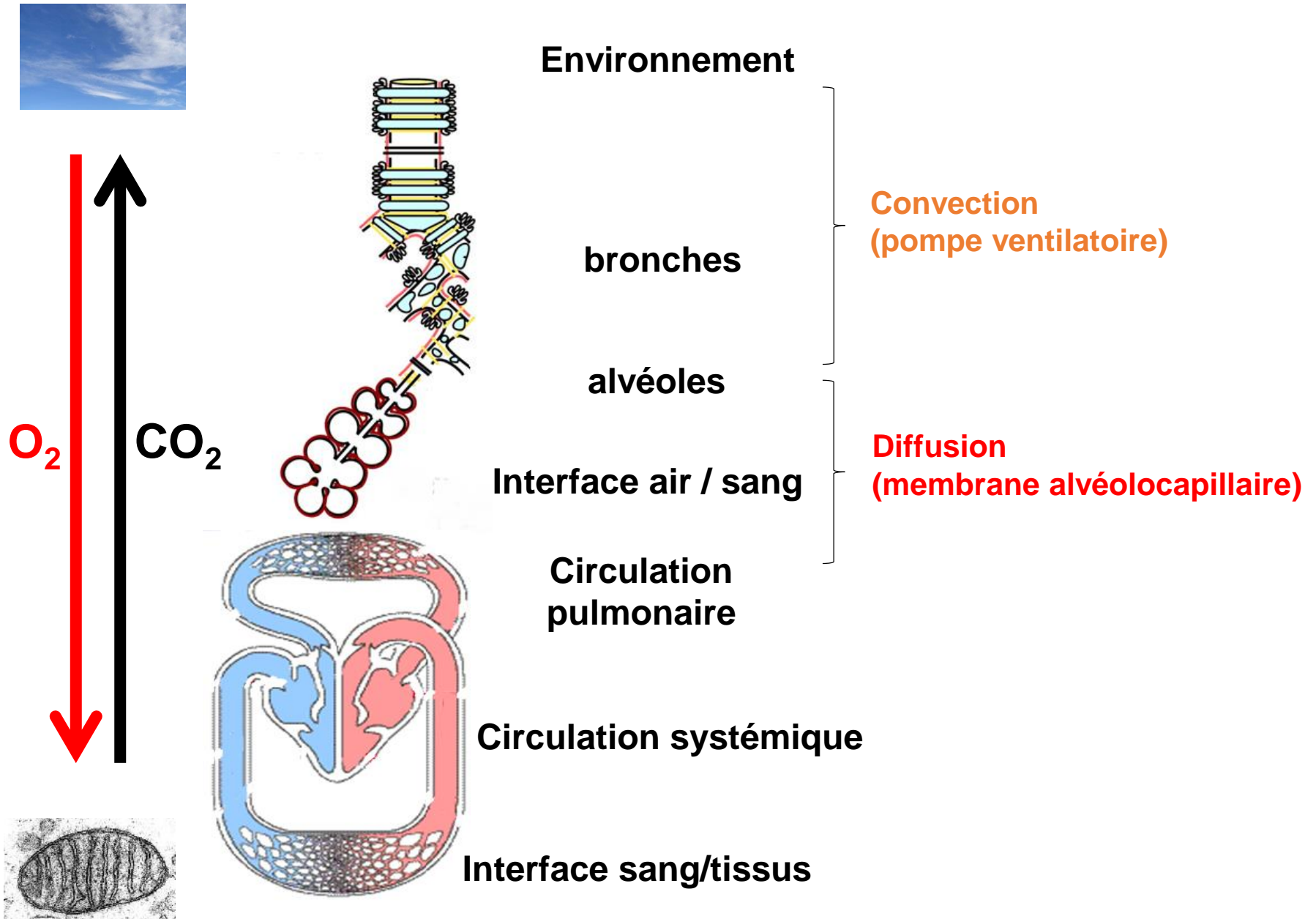
3- Les bases de l'interprétation

Plan de l'exposé

1- Rappels anatomico-fonctionnels

- La pompe ventilatoire
- Diffusion alvéolo-capillaire

Le transport des gaz dans l'organisme

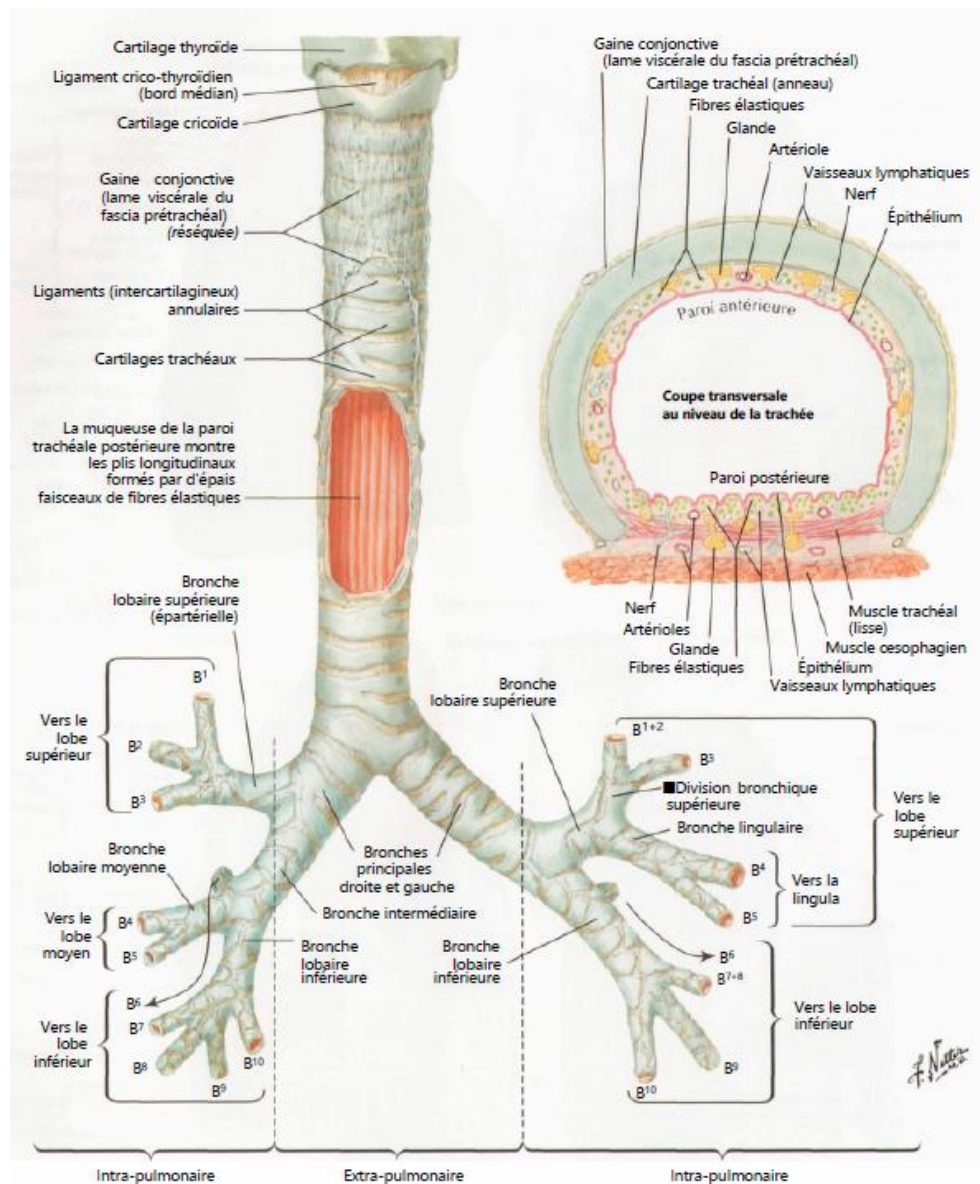


Pompe ventilatoire

Anatomie générale des voies aériennes

En conditions normales :

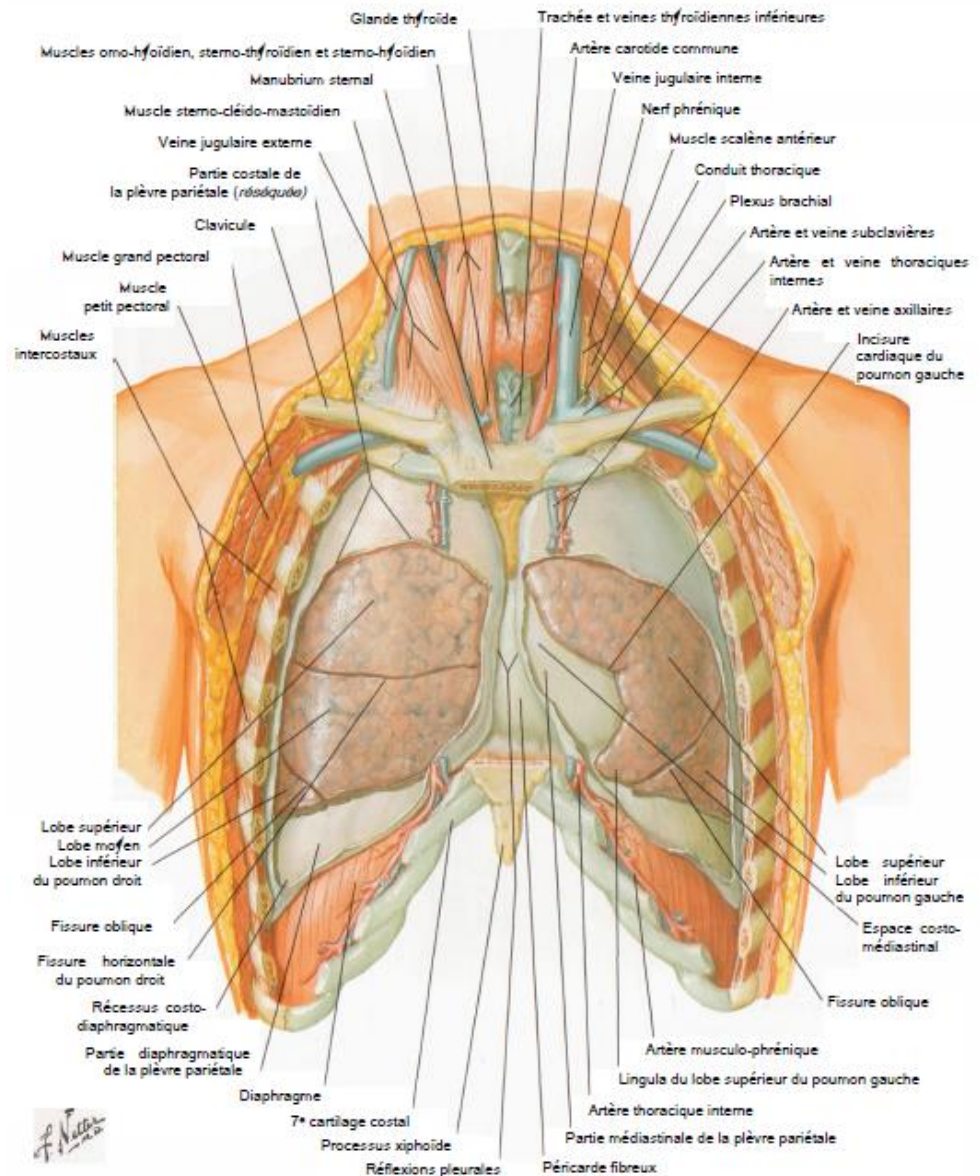
Structure rigide peu déformable



La paroi thoracique et la plèvre

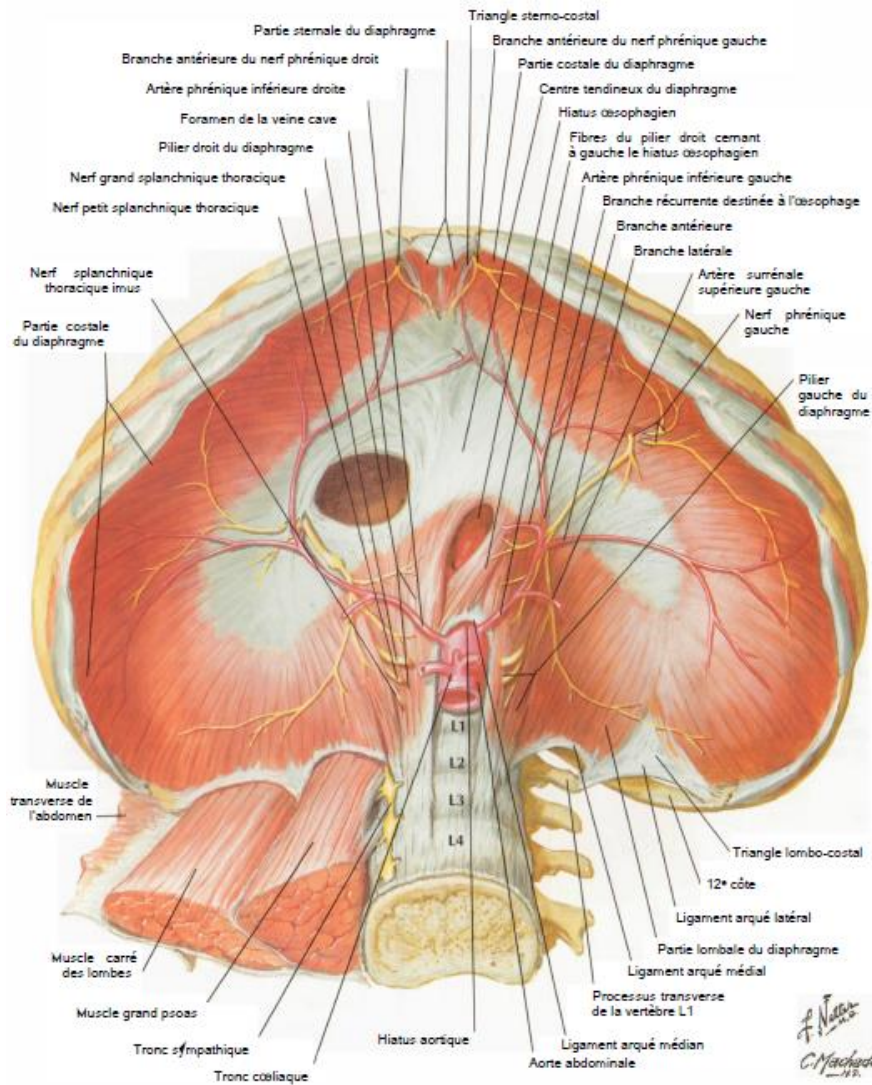
Structure élastique

La plèvre : couplage mécanique entre le poumon et la paroi thoracique

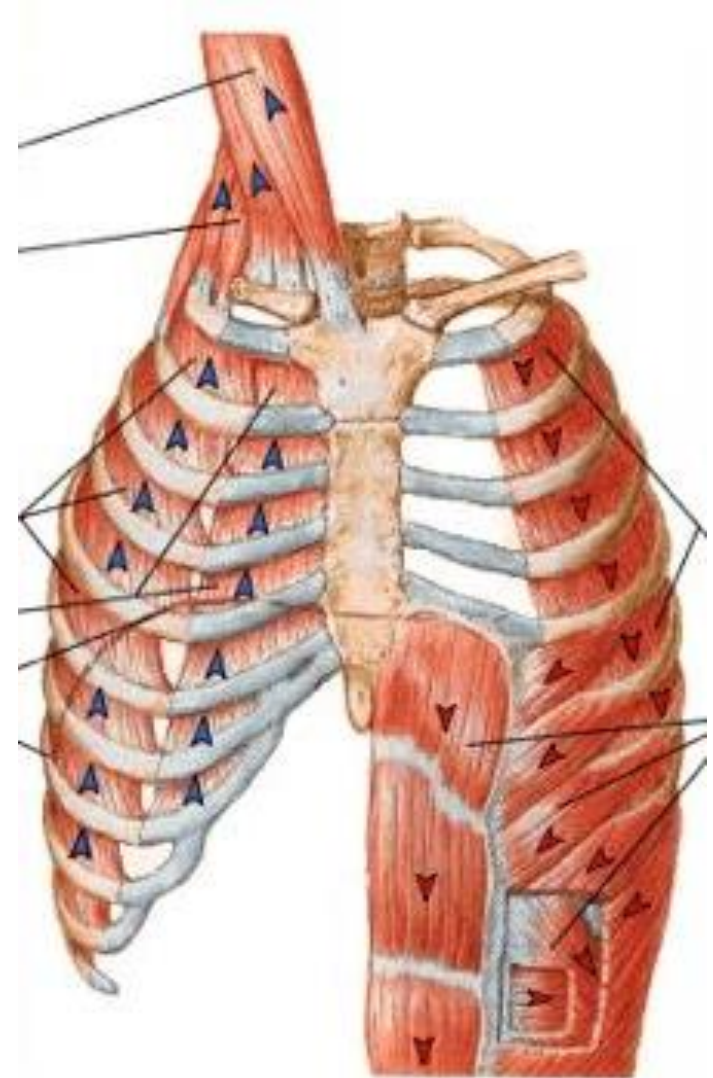


Les muscles respiratoires

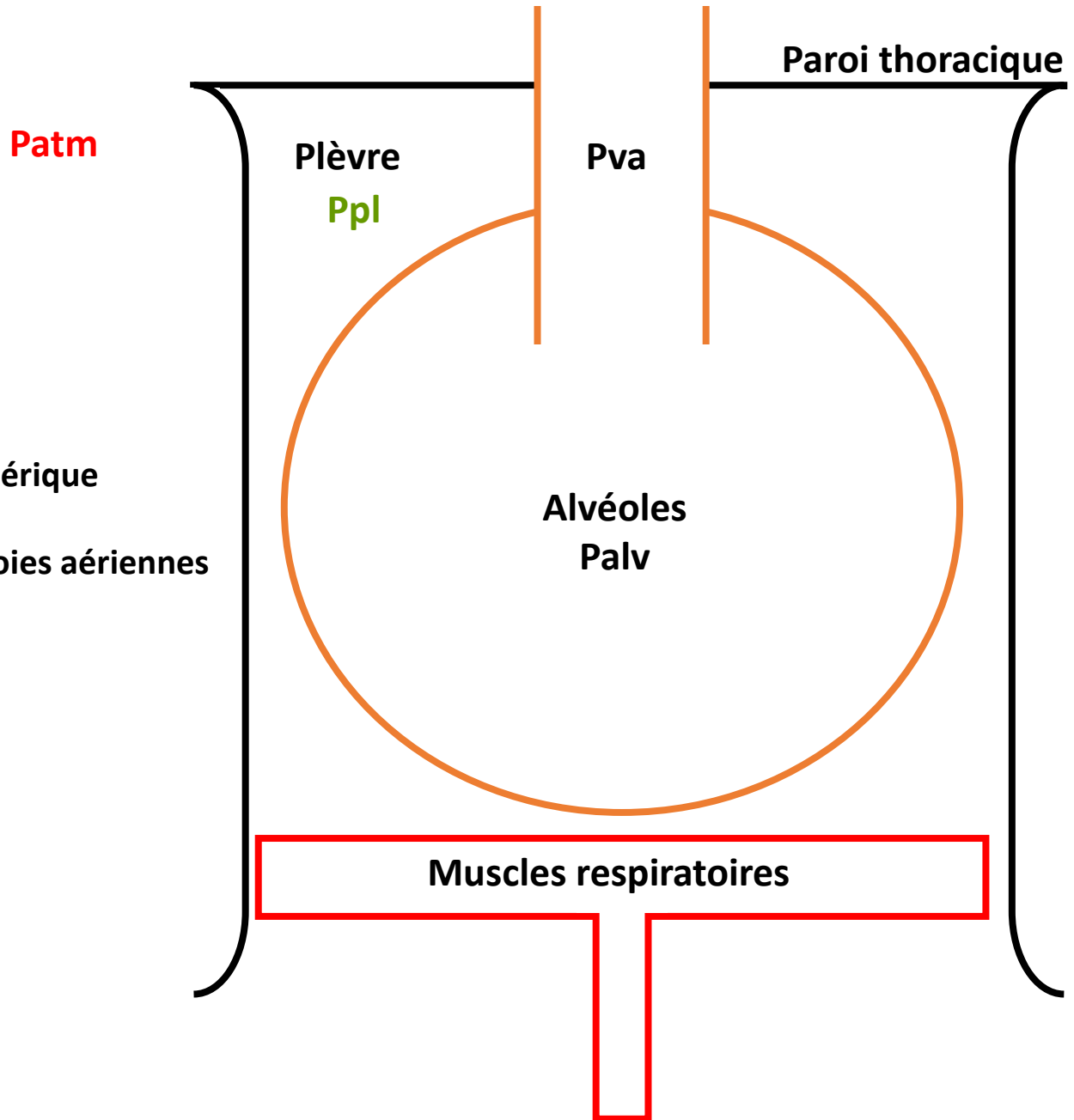
Principal : diaphragme



Muscles accessoires



Structure schématique de la pompe ventilatoire



Patm = Pression atmosphérique

Ppl = Pression pleurale

Pva = Pression dans les voies aériennes

Palv = Pression alvéolaire

A la capacité résiduelle fonctionnelle

P_{atm}

$P_{pl} < P_{atm}$

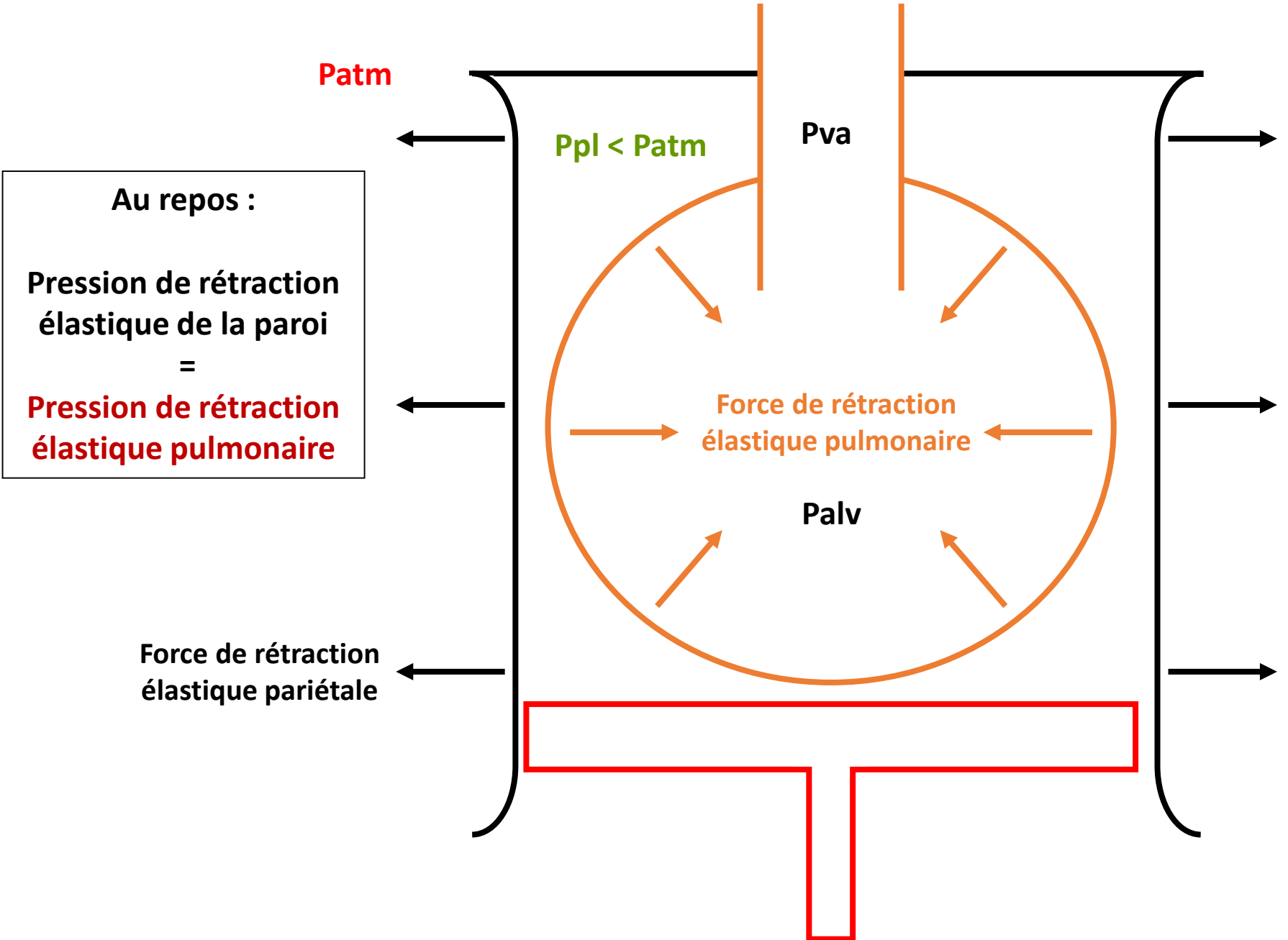
P_{va}

Au repos :
Pression de rétraction élastique de la paroi
=
Pression de rétraction élastique pulmonaire

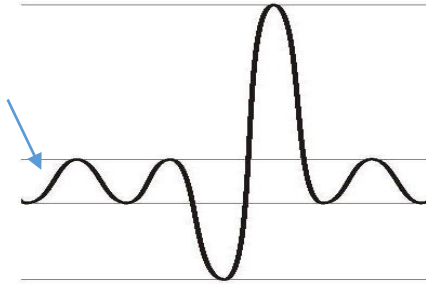
Force de rétraction élastique pulmonaire

P_{alv}

Force de rétraction élastique pariétale

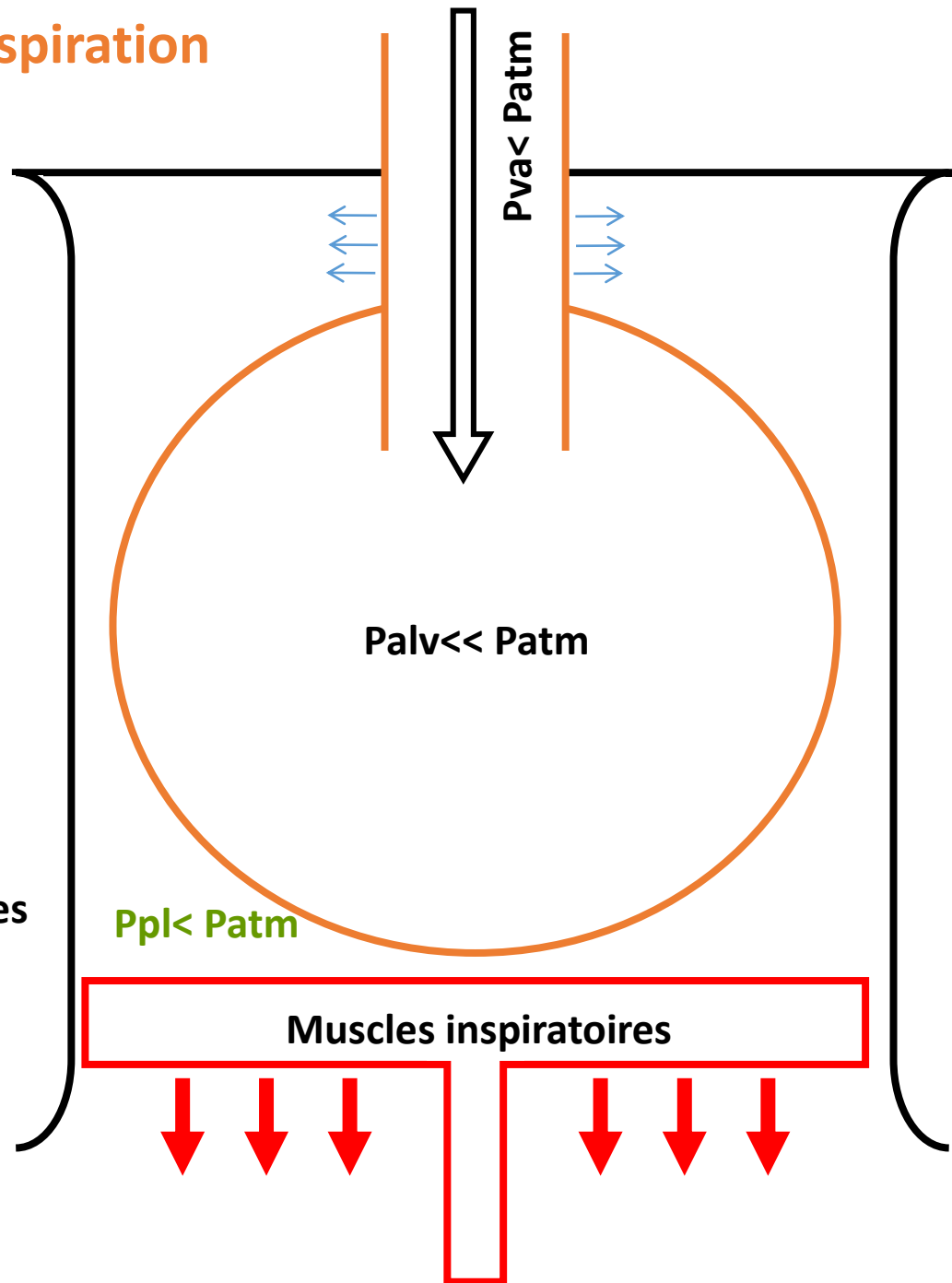


Le cycle ventilatoire : Inspiration

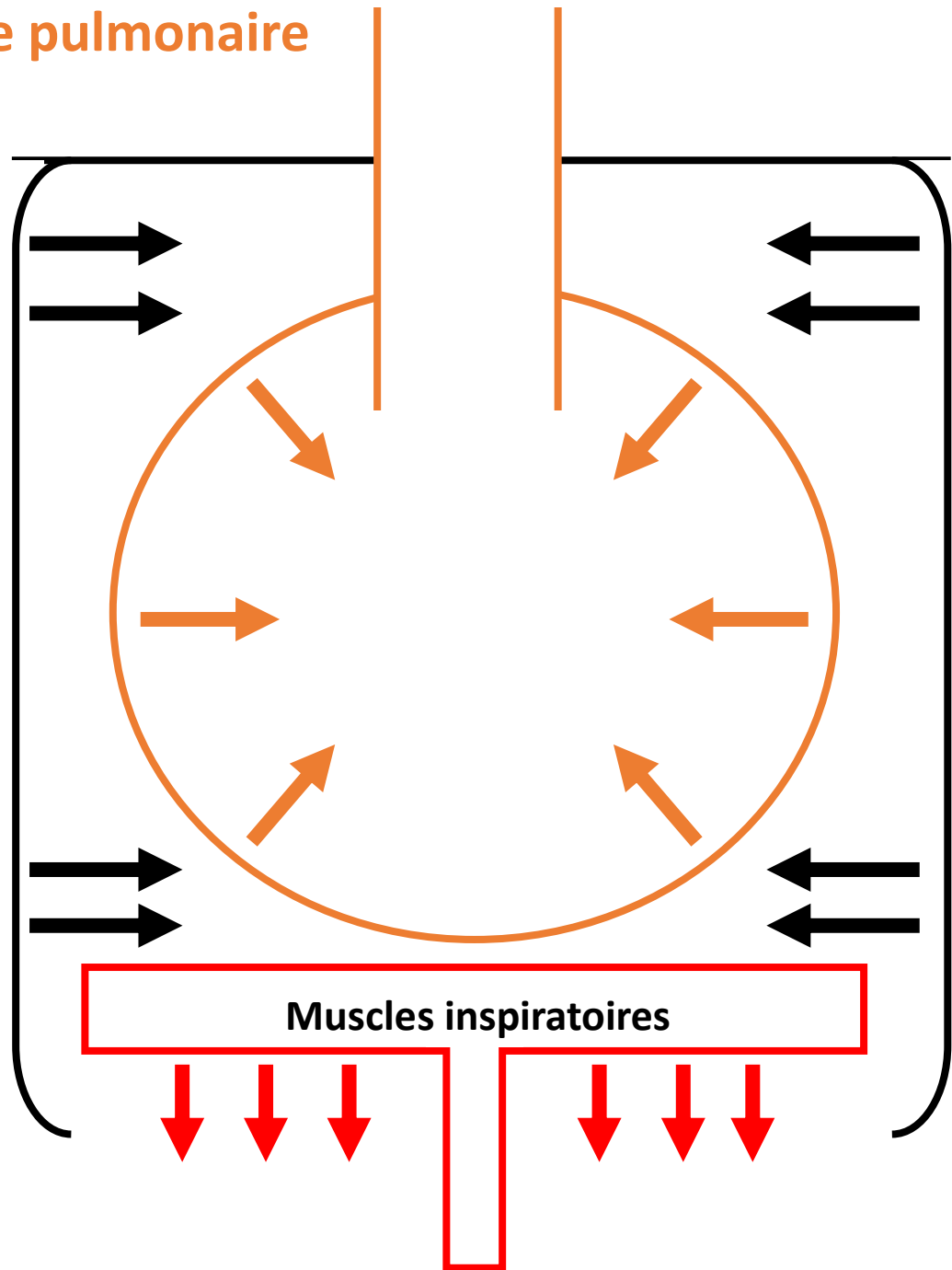
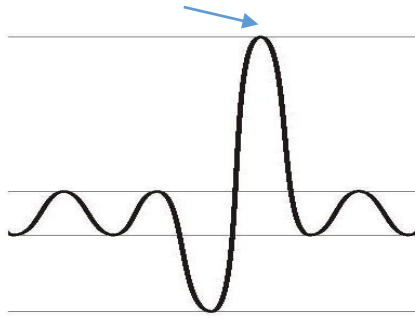


Gradient de pression

La pression alvéolaire est inférieure à la pression des voies aériennes → Bronchodilatation

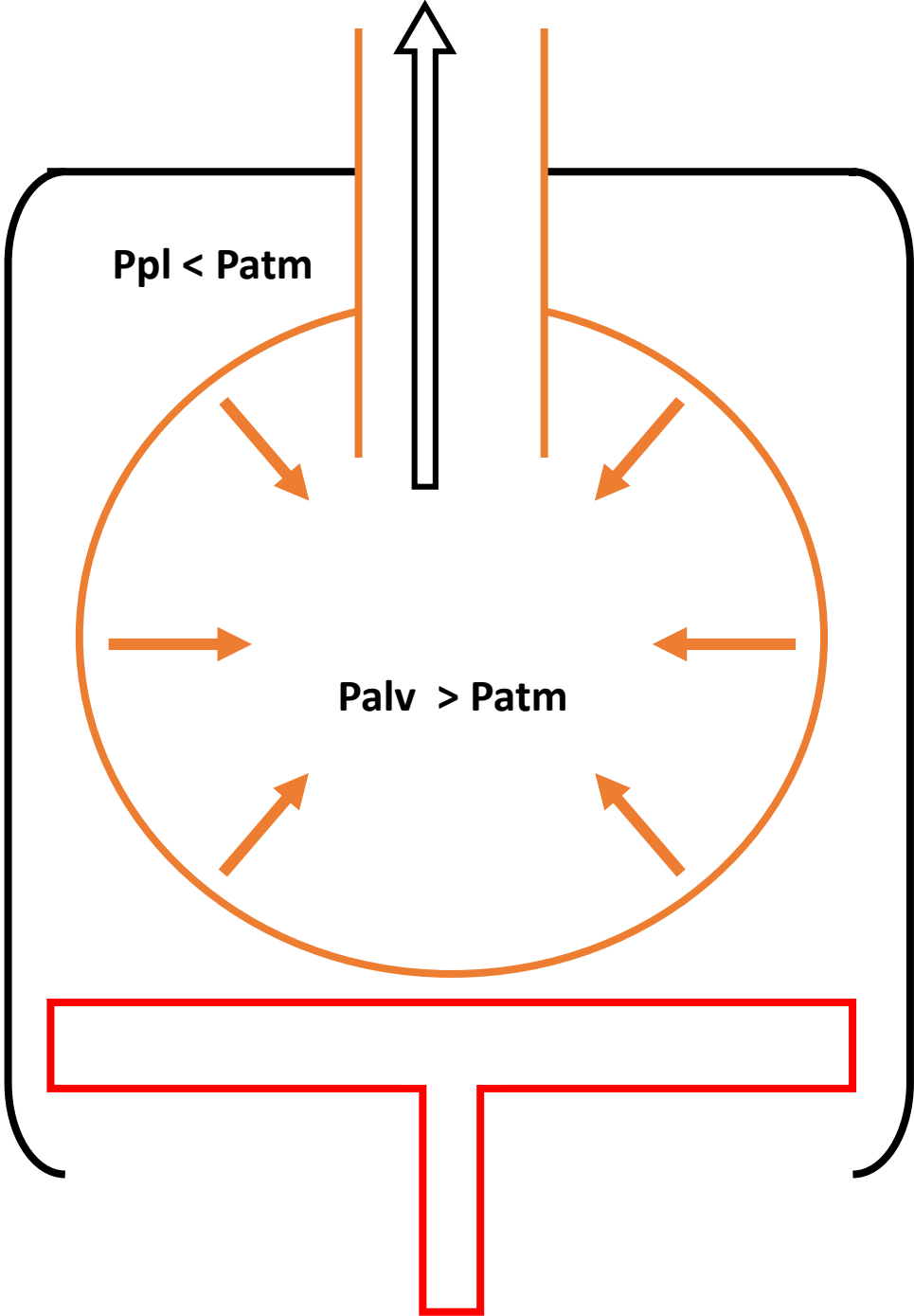
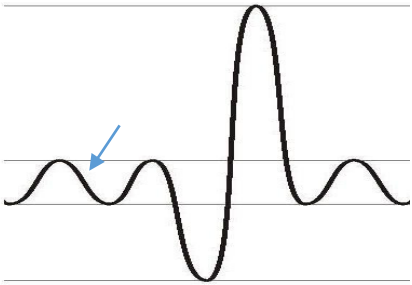


Déterminants du volume pulmonaire à la CPT



Rétraction élastique pulmonaire
+
Rétraction élastique pariétale
=
Force musculaire inspiratoire

**Le cycle ventilatoire en ventilation courante :
Expiration passive**

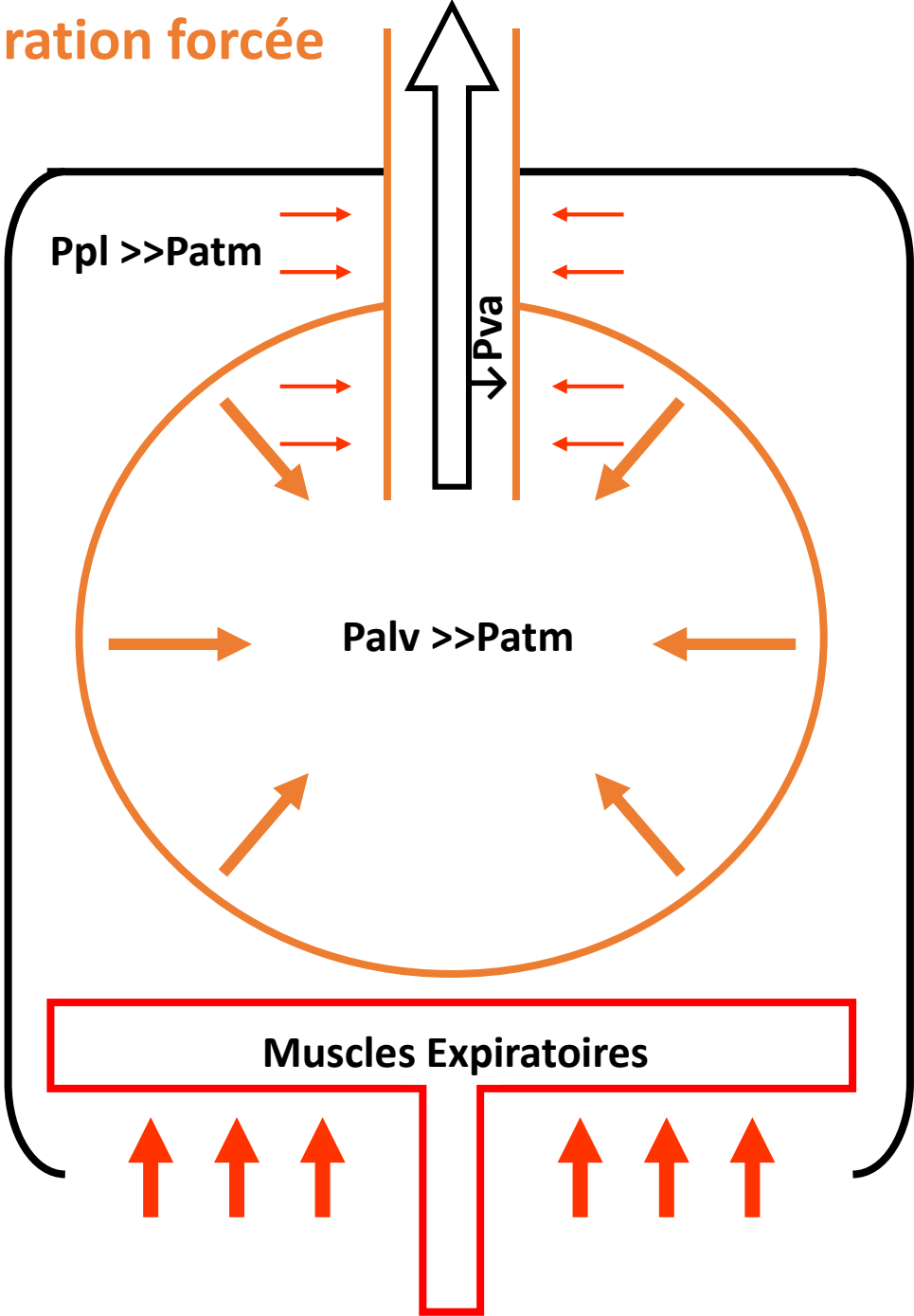


Le cas particulier de l'expiration forcée

$P_{pl} \gg P_{va}$
 $P_{alv} \gg P_{va}$



↓↓ Calibre bronchique
Limitation du flux expiratoire



Cycle ventilatoire

Conséquences physiopathologiques

Les pathologies obstructives des **voies aériennes** se traduisent par une **élévation des résistances** des voies aériennes, responsables d'une **diminution des flux** ventilatoires

En particulier en expiration +

En particulier en expiration forcée +++

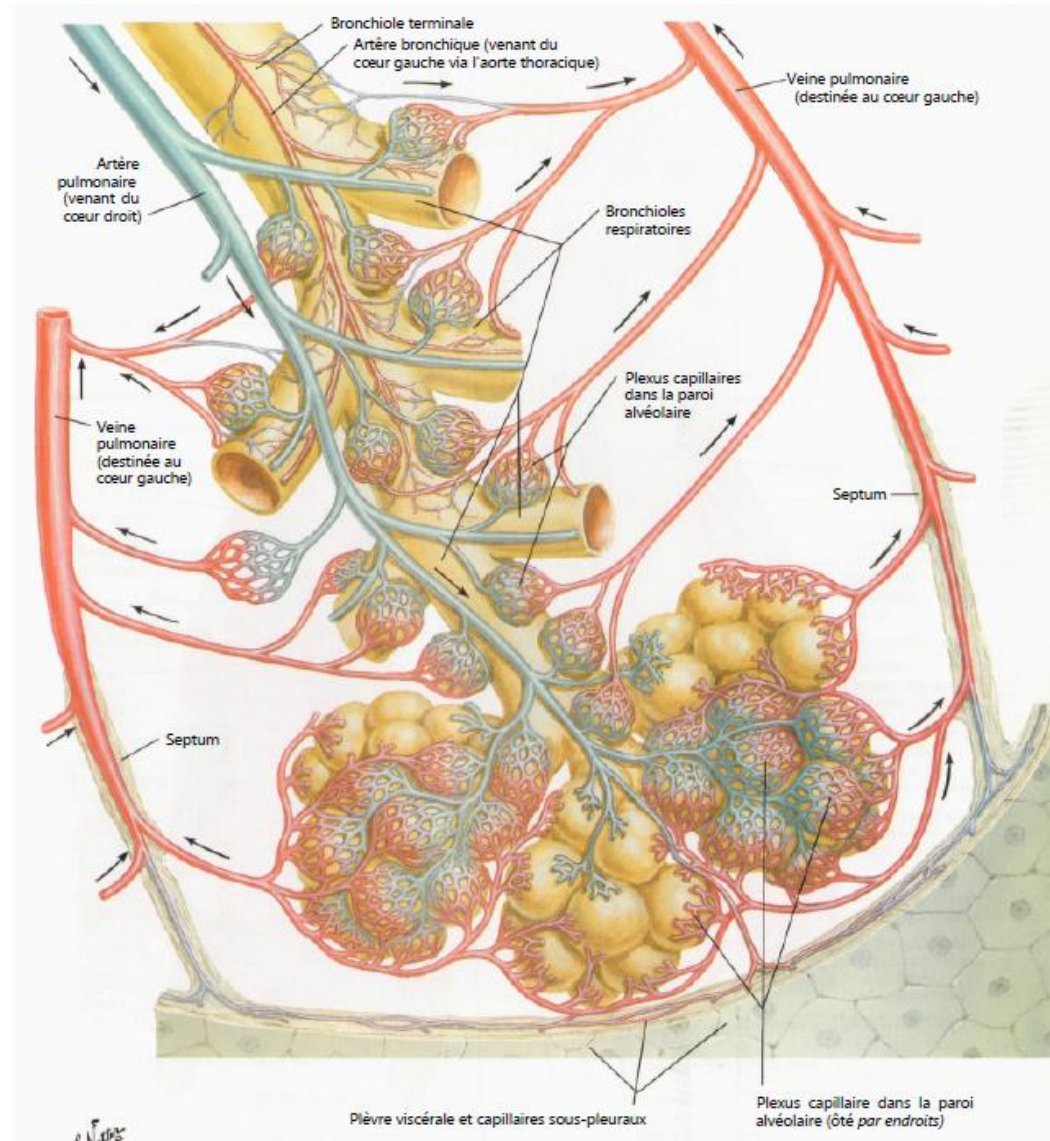
Cycle ventilatoire

Conséquences physiopathologiques

Les pathologies altérant les propriétés mécaniques du **poumon**, de la **paroi thoracique** ou des **muscles** respiratoires vont entraîner une modification des volumes pulmonaires

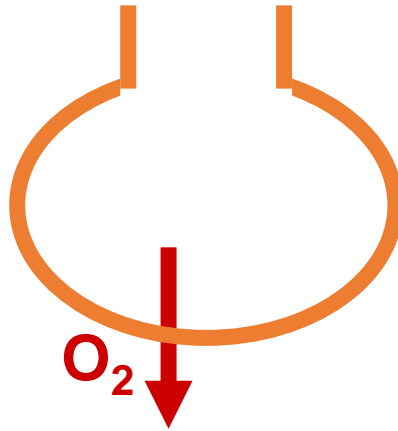
- Pneumopathies interstitielles
- Pathologie ostéoarticulaire, oedèmes
- Pathologie neuromusculaire

Anatomie microscopique du poumon



Les artères pulmonaires et leurs branches se distribuent segmentairement avec les bronches.
Les veines pulmonaires et leurs affluents ont un drainage intersegmentaire.

Diffusion membranaire des gaz : Loi de Fick



le flux de diffusion d'un gaz à travers une membrane est proportionnel :

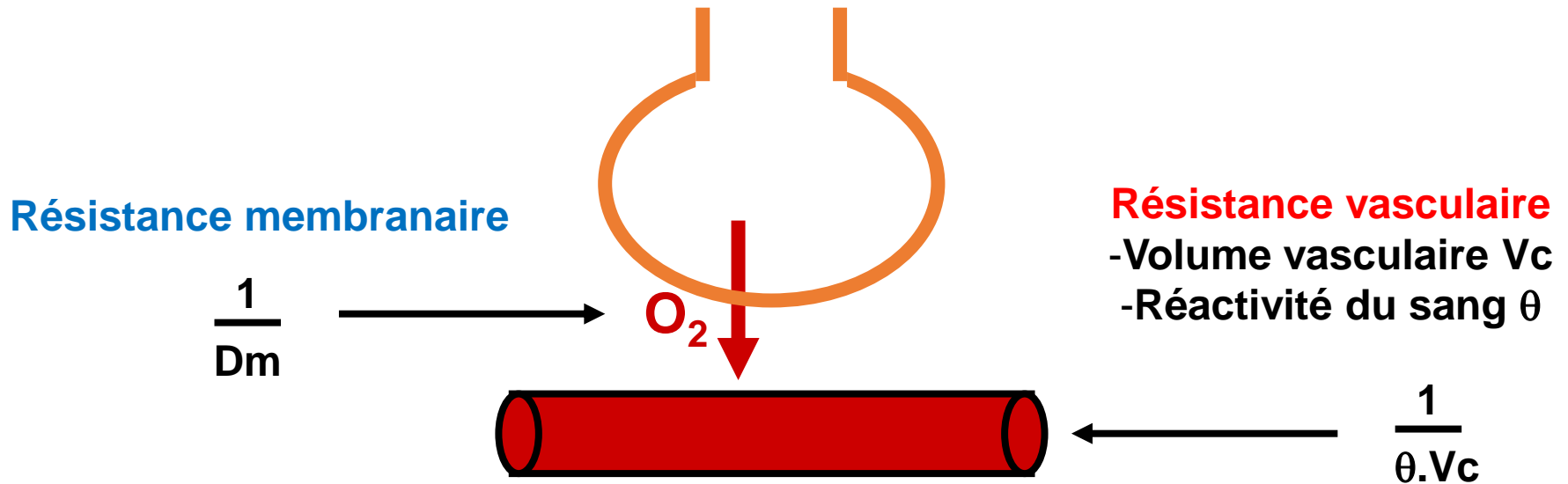
- Au gradient de pression ΔP de ce gaz de part et d'autre de la membrane
- A une constante de diffusion k propre à chaque gaz
- À la conductance (=1/résistance) D_m de la membrane qui est fonction de sa surface S et inversement de son épaisseur E

$$\dot{V} = D_m \cdot \Delta P = \frac{k \cdot S}{E} \cdot \Delta P$$

D_m : Capacité de diffusion de la membrane (ml.mmHg⁻¹.min⁻¹)

Diffusion alvéolo-capillaire des gaz

2 résistances doivent être vaincues en série



Diffusion dans le poumon (D_L) : Équation de Roughton et Forster

$$\frac{1}{D_L} = \frac{1}{D_m} + \frac{1}{\theta \cdot V_c}$$

D_L : Capacité de diffusion du poumon ($ml \cdot mmHg^{-1} \cdot min^{-1}$)

Diffusion alvéolo capillaire

Conséquences physiopathologiques

Les pathologies altérant les régions alvéolaires et / ou la vascularisation pulmonaire vont entraîner une diminution de la capacité de diffusion du poumon D_L

- Pneumopathies interstitielles**
- Emphysème pulmonaire**
- Pathologies vasculaires pulmonaires primitives ou secondaires**

Plan de l'exposé

2- Les principaux examens EFR en pratique courante

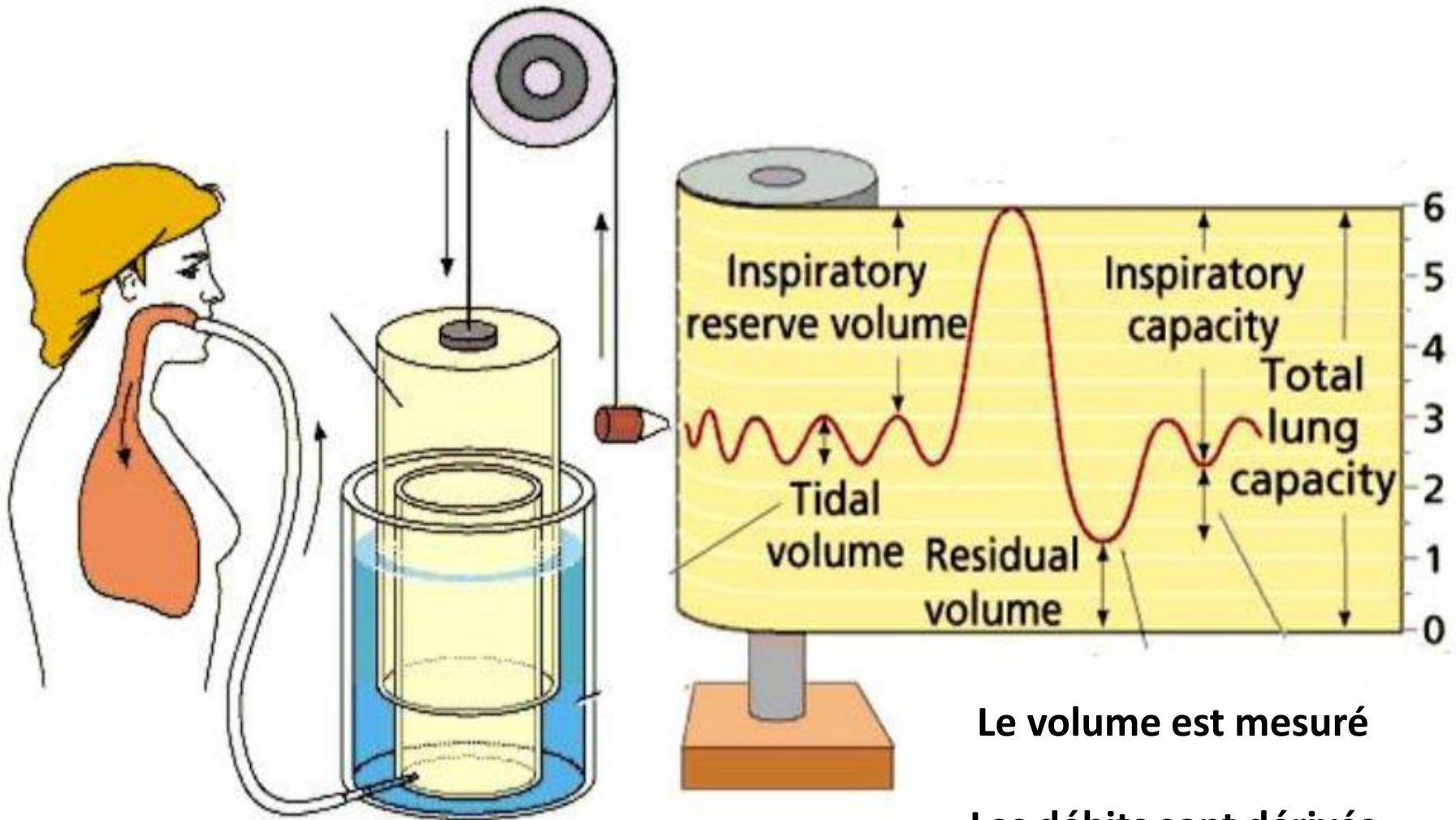
- La spirométrie

- Les volumes pulmonaires statiques

- Les pressions maximales

- Le transfert du CO

Spiromètre historique



Le volume est mesuré

Les débits sont dérivés

Appareillage lourd

Spiromètres modernes = pneumotachographes



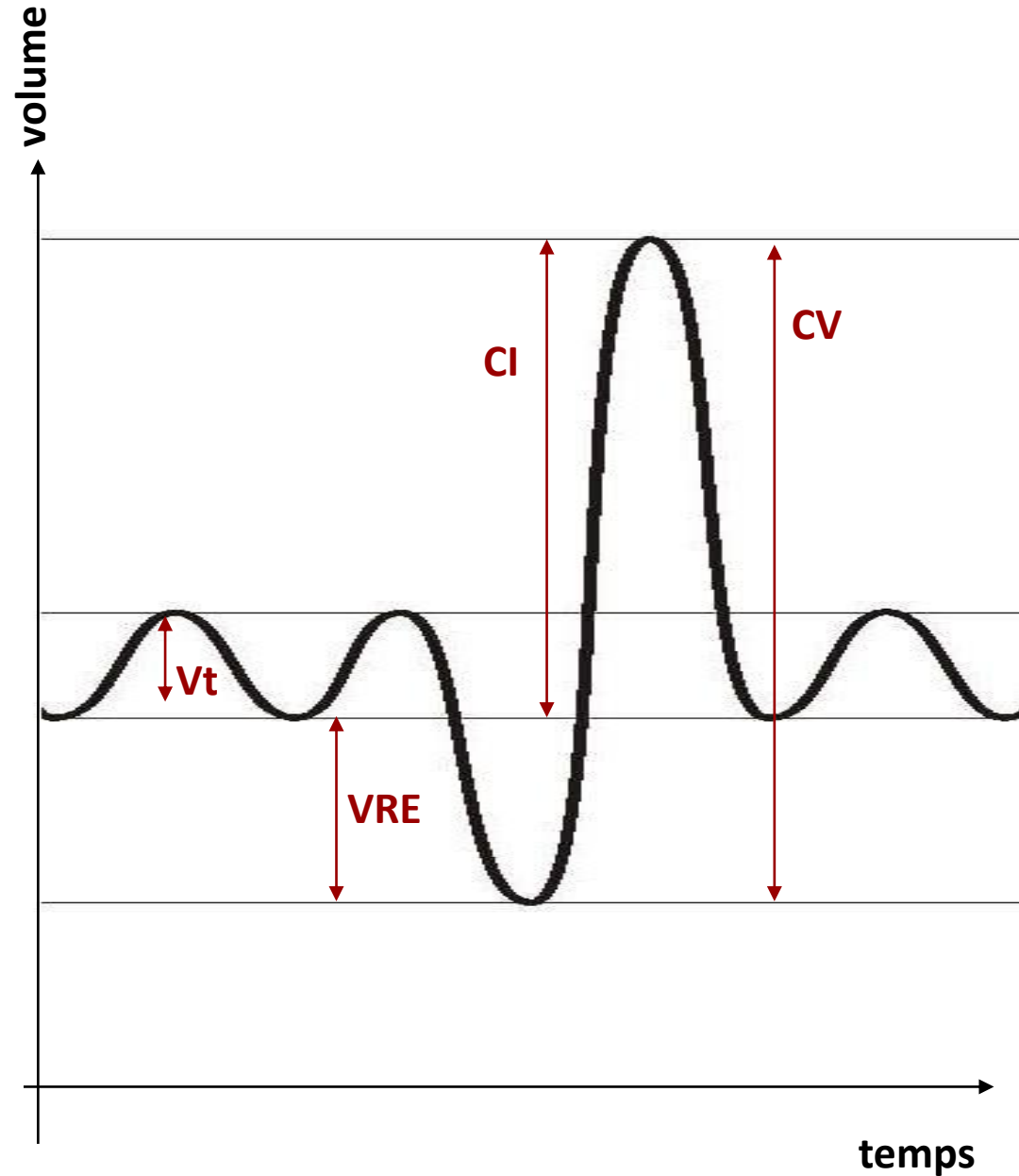
Le débit est mesuré

Les volumes sont intégrés

Appareillage léger

Les volumes pulmonaires mobilisables, le cycle ventilatoire

Vt : Volume courant
VRE : Volume de Réserve Expiratoire
CI : Capacité Inspiratoire
CV : Capacité Vitale



Spirométrie forcée

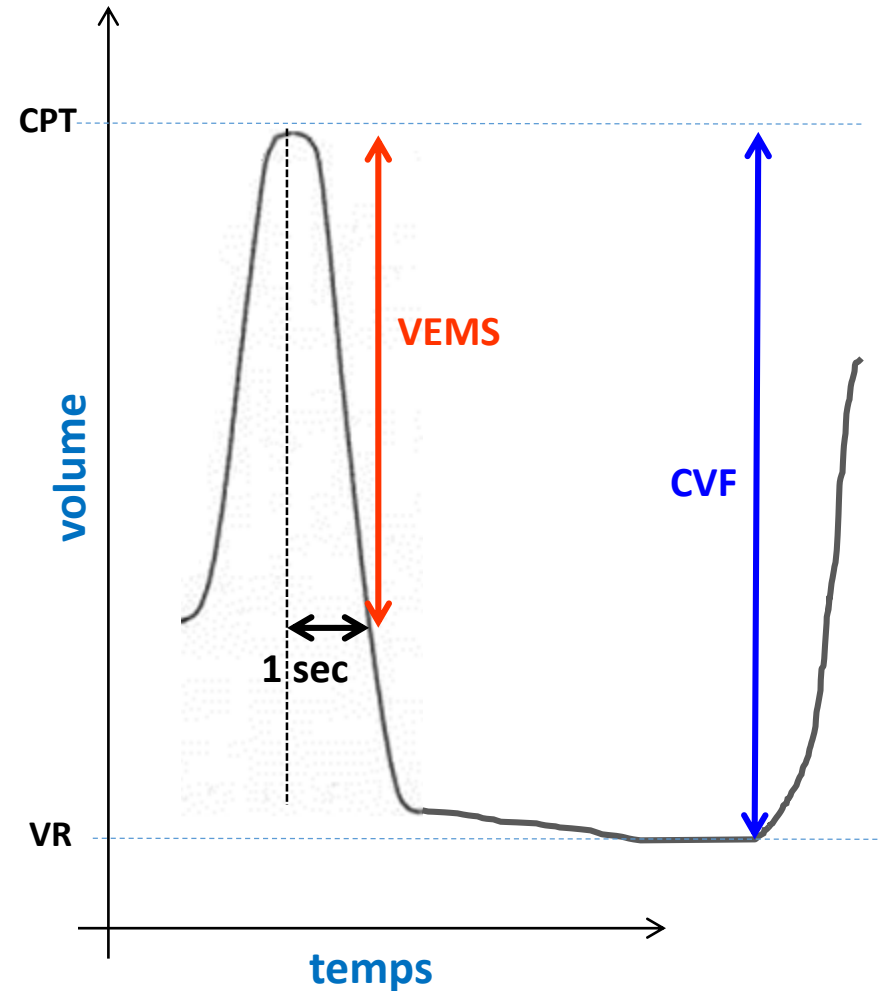
Consignes

- 1) Inspiration maximale (→ CPT)
- 2) Expiration maximale
 - Très brutale
 - Prolongée (→ VR, > 6 secondes)

Les paramètres-clés :

VEMS : Volume Expiré Maximal en 1 S

CVF : Capacité Vitale Forcée

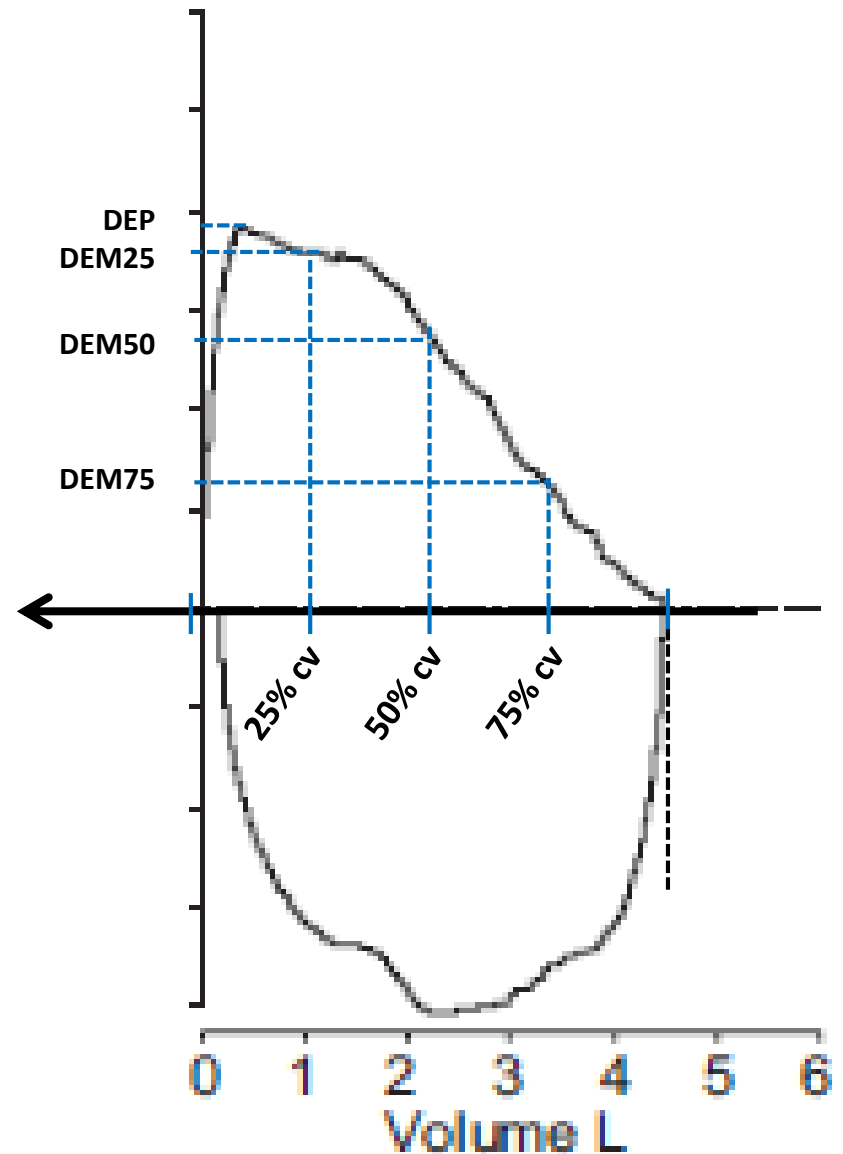


Spirométrie forcée : Courbe débit-volume

DEP : Débit expiratoire de pointe

DEM : Débit expiratoire maximal à 25, 50 ou 75% de la capacité vitale

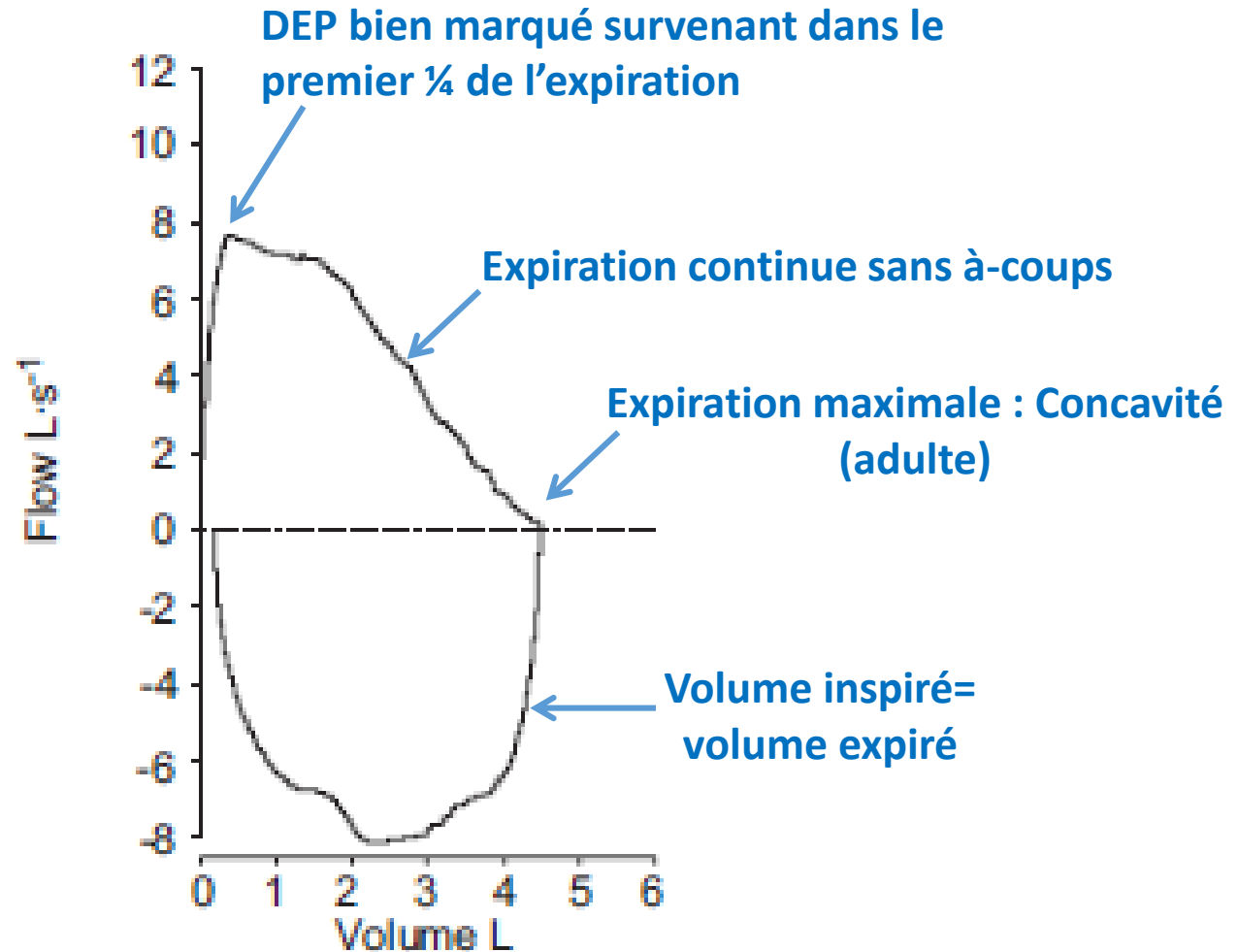
DEMM25-75 : Débit expiratoire moyen entre 75% et 25% de la CV



Spirométrie forcée : Contrôle de qualité

L'effort parait maximal

Temps expiratoire > 6sec

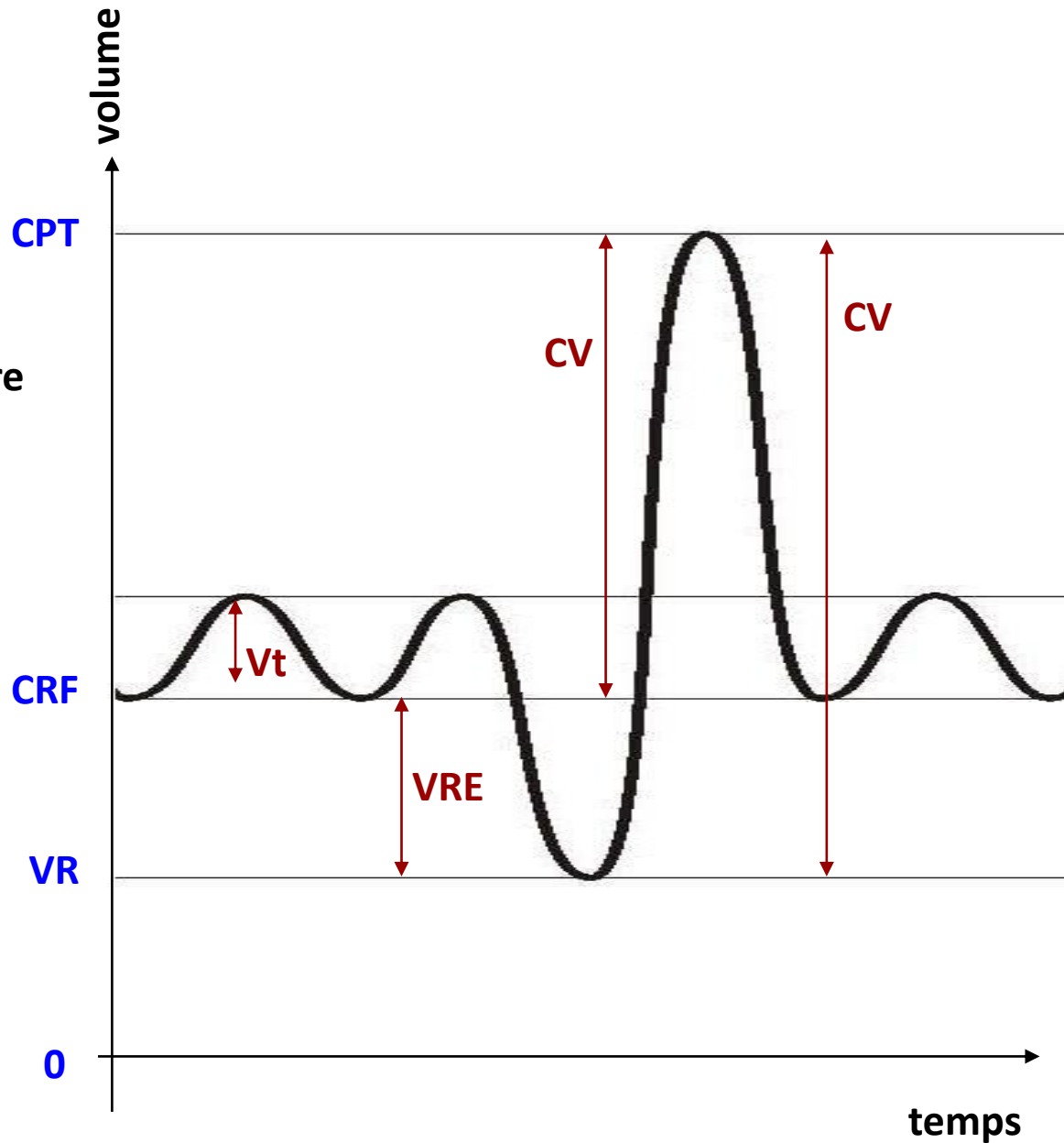


Reproductibilité : Ecart entre les 2 plus grands CVF et VEMS <150 ml (ou 100 ml si CV < 1 l)

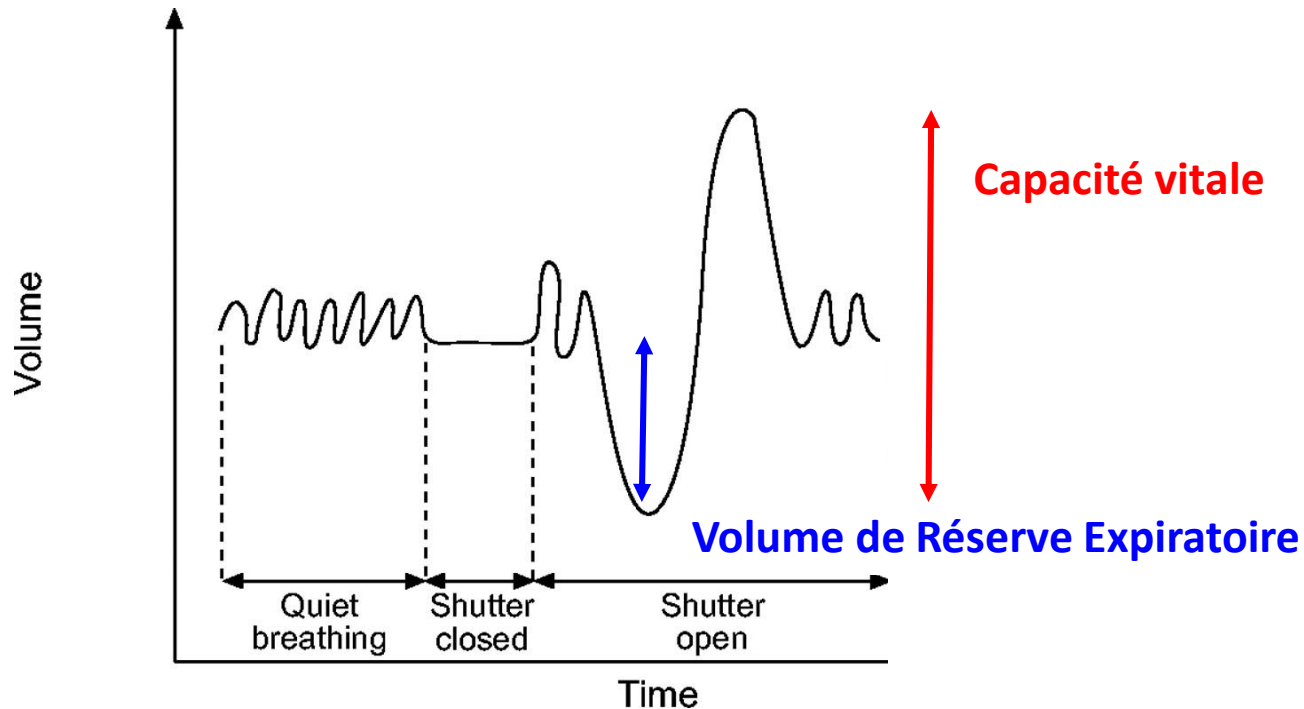
Une manœuvre expiratoire sous-maximale peut entraîner la surestimation du VEMS

Les volumes pulmonaires, le cycle ventilatoire

Vt : Volume courant
VRE : Volume de Réserve Expiratoire
CI : Capacité Inspiratoire
CV : Capacité Vitale



Mesure des volumes pulmonaires statiques : principe général

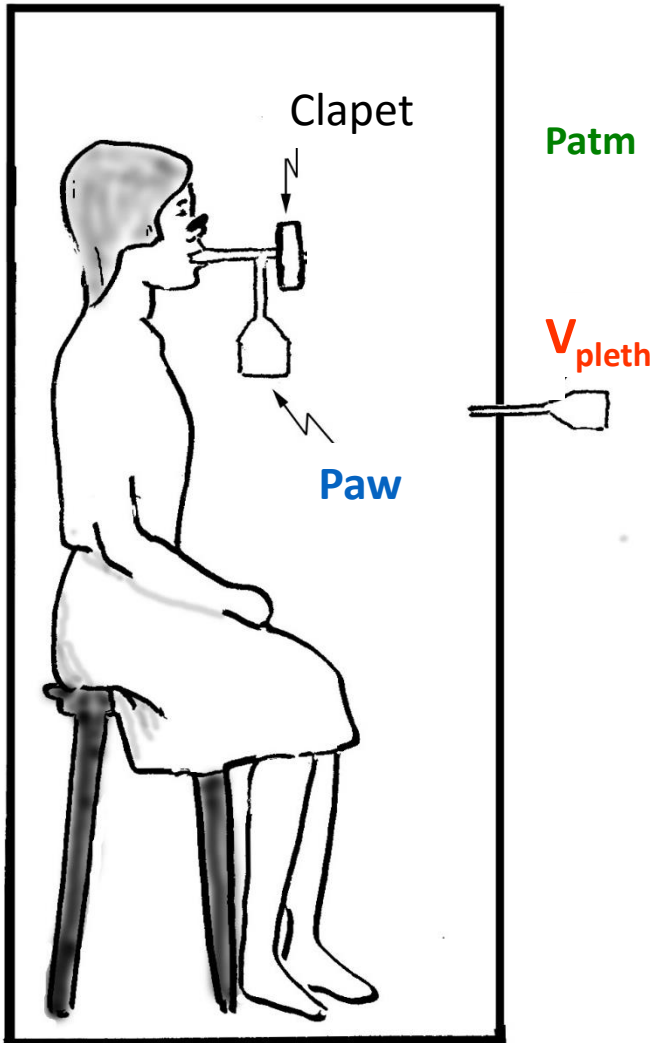


- 1- On mesure la CRF
- 2- On mesure le VRE et la CV par spirométrie
- 3- On calcule

$$VR = CRF - VRE$$

$$CPR = VR + CV$$

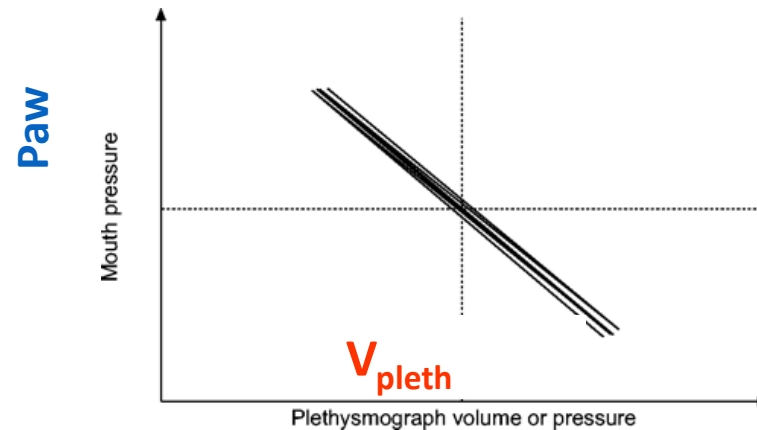
Pléthysmographie corporelle : Principe



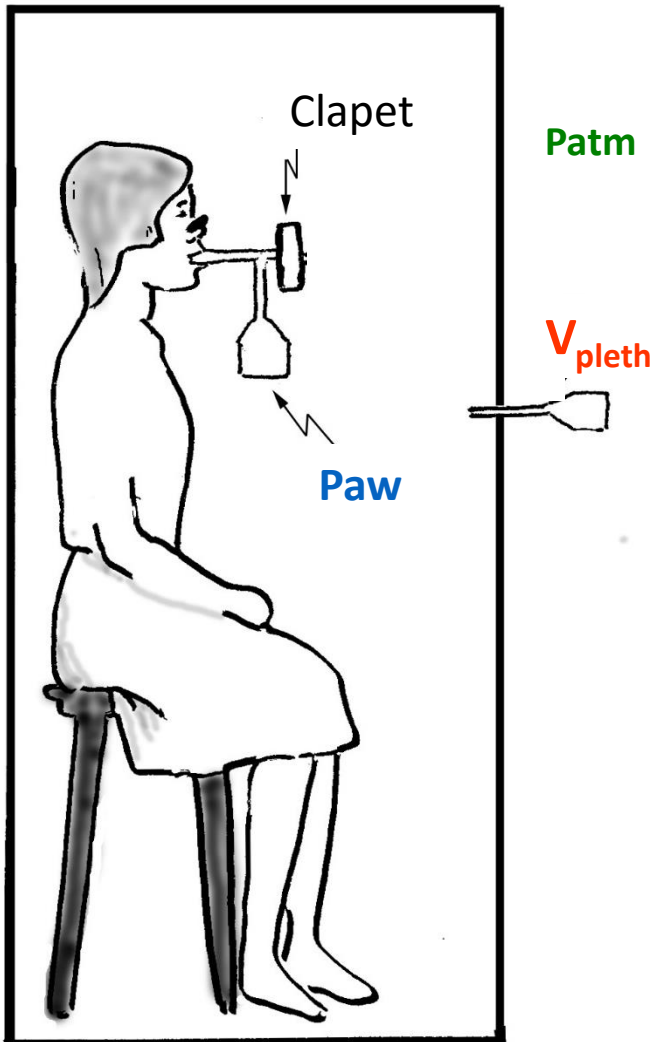
A la CRF, le sujet fait des efforts respiratoires contre un obstacle

On mesure :

- Les variations de pression à la bouche ΔP_{aw}
- Les variations de volume dans la boîte ΔV_{pleth}
- La pression atmosphérique P_{atm}



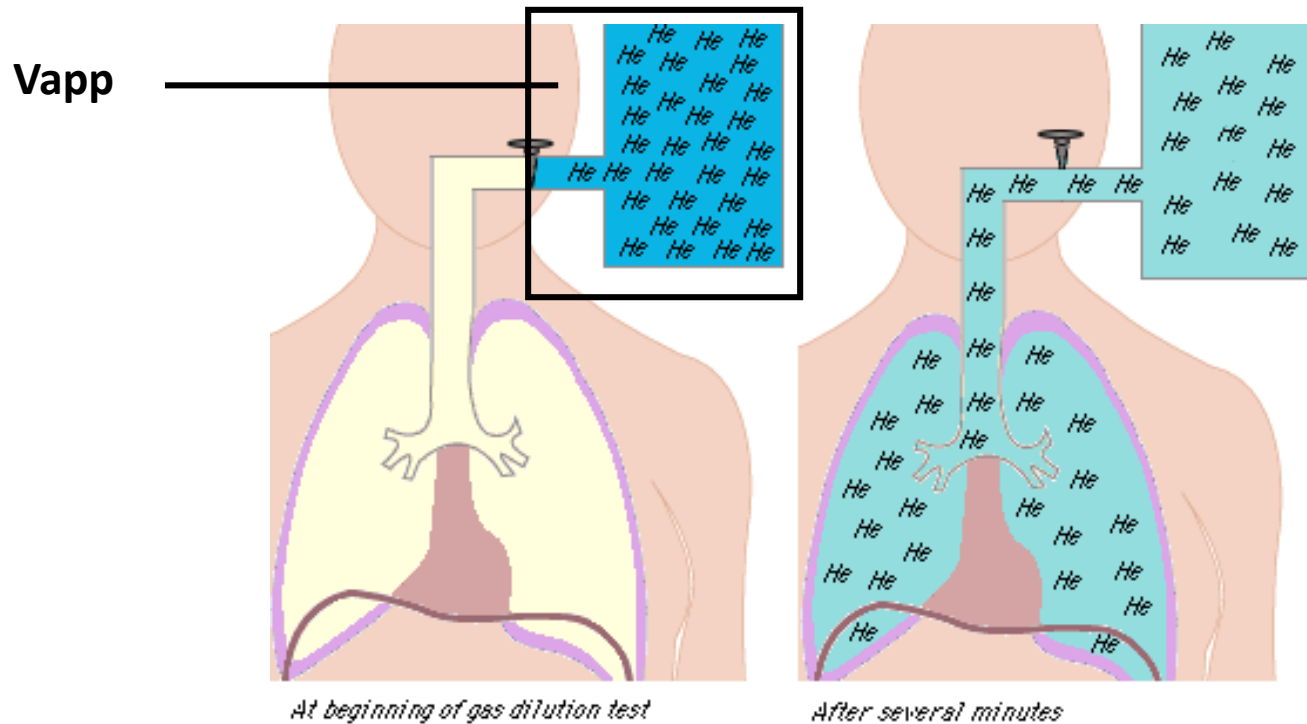
Pléthysmographie corporelle : Principe



$$Patm \cdot CRF = (Patm - \Delta P) \times (CRF + \Delta V)$$

$$\longrightarrow \boxed{CRF = \frac{\Delta V}{\Delta P} \times (Patm - \Delta P)}$$

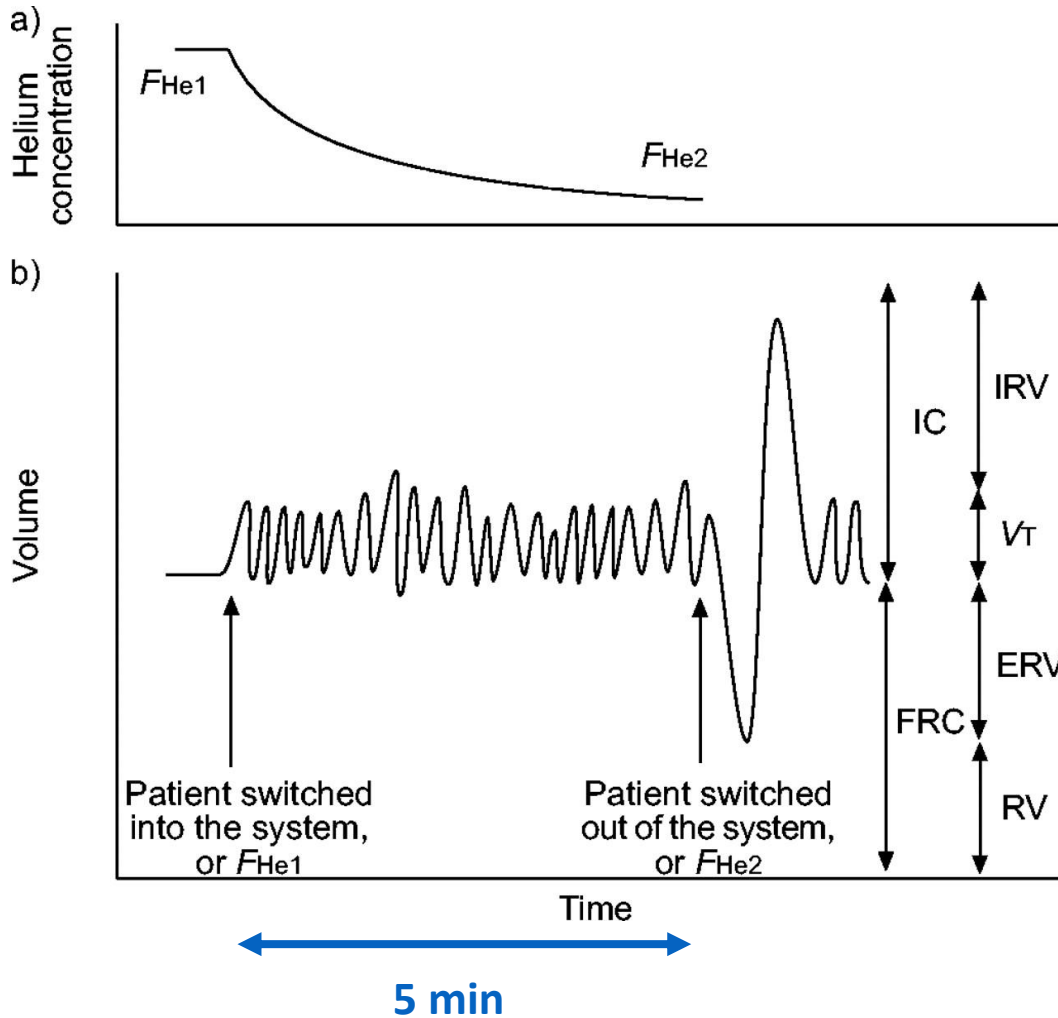
Mesure de la CRF par dilution de l'Hélium : Principe



$$V_{app} \times F_{He1} = (V_{app} + CRF) \times F_{He2}$$

$$CRF = V_{app} \times \frac{F_{He1} - F_{He2}}{F_{He2}}$$

Mesure de la CRF par dilution de l'Hélium : Réalisation



Avantages

- Simple : Ventilation courante
- Pas de manœuvre spécifique
- Possible au fauteuil

Inconvénients

- Un peu long
- Problème des fuites
- Volumes ventilés uniquement

Explorations non invasives des muscles respiratoires

- **Spirométrie en décubitus dorsal**
 - Diminution > 10% de la CV
- **Pression inspiratoire maximale**
 - Inspiration maximale sur un obstacle
 - À partir du volume résiduel
 - Reflète la force de tous les muscles inspiratoires
 - Dysfonction probable si <60%
- **Test de reniflement**

Courbe débit-volume

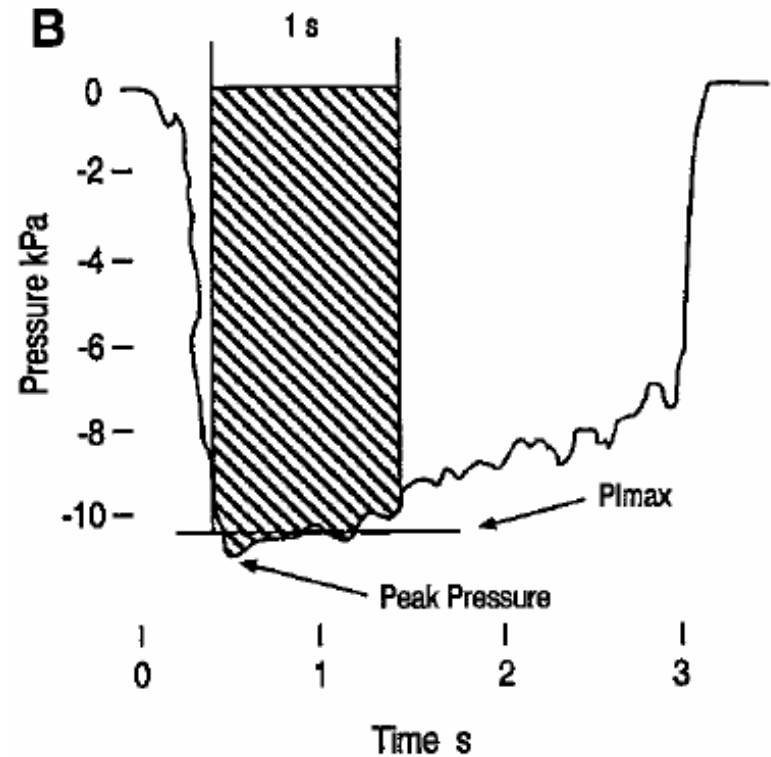
Substance	Réf	Pré	Pré(%)	Post couché	Var%	Post(%)
CVF	3.59	3.12	87	2.15	-31	60
VEMS	2.79	2.44	87	1.65	-32	59
VEMS%CF	77.64	78.21	101	76.51	-2	99
VEMS%CV	75.15	78.21	104	76.51	-2	102
VIMS		2.37		1.65	-31	
DPE	7.58	5.00	66	3.32	-34	44
DEMM	3.08	2.29	74	1.40	-39	45

Pléthysmographie

Substance	Réf	Pré	Pré(%)	Post couché	Var(%)
CV Max	3.72	3.12	84	2.15	-31
CRFpl	3.44	3.60	105		
VRE	1.00	0.62	62		
CI	2.72	2.49	92		
VR	2.44	2.98	122		
CPT	6.34	6.09	96		
VR%CPT	40.09	48.85	122		
Raw	3.06	2.31	76		
SR AW	1.18	1.08	92		
PIMax	8.21	3.17	39		
PEMax	13.03	4.18	32		

Explorations non invasives des muscles respiratoires

- Spirométrie en décubitus dorsal
 - Diminution $> 10\%$ de la CV
- **Pression inspiratoire maximale**
 - Inspiration maximale sur un obstacle
 - À partir du volume résiduel
 - Reflète la force de tous les muscles inspiratoires
 - Dysfonction probable si $< 60\%$
- Test de reniflement



Explorations non invasives des muscles respiratoires

- **Spirométrie en décubitus dorsal**
 - Diminution de > 10 % de la CV
- **Pression inspiratoire maximale**
 - Inspiration maximale sur un obstacle
 - À partir du volume résiduel
 - Reflète la force de tous les muscles inspiratoires
- **Test de reniflement**

TABLE 2. REFERENCE NORMAL RANGES FOR P_Emax AND P_Imax*

No.	P _E max	P _I max	Source (Ref.)	Mouthpiece Design
Male				
106	23.4 ± 4.5	12.7 ± 3.1	40	Tube
60	22.8 ± 4.1	12.1 ± 2.1	26	Tube
80	21.2 ± 4.4	12.4 ± 2.7	41	Tube
325	15.1 ± 8.0	11.1 ± 3.5	42	Flanged
80	14.4 ± 3.3	10.4 ± 3.0	43	Flanged
46	13.7 ± 3.7	10.3 ± 2.5	44	Flanged
Female				
94	16.1 ± 2.9	9.6 ± 2.4	40	Tube
60	14.9 ± 2.6	8.5 ± 1.5	26	Tube
121	13.5 ± 6.7	8.9 ± 2.4	41	Tube
480	9.2 ± 3.2	7.0 ± 2.6	42	Flanged
87	9.1 ± 1.6	7.2 ± 2.1	43	Flanged
60	8.7 ± 2.3	6.9 ± 2.3	44	Flanged

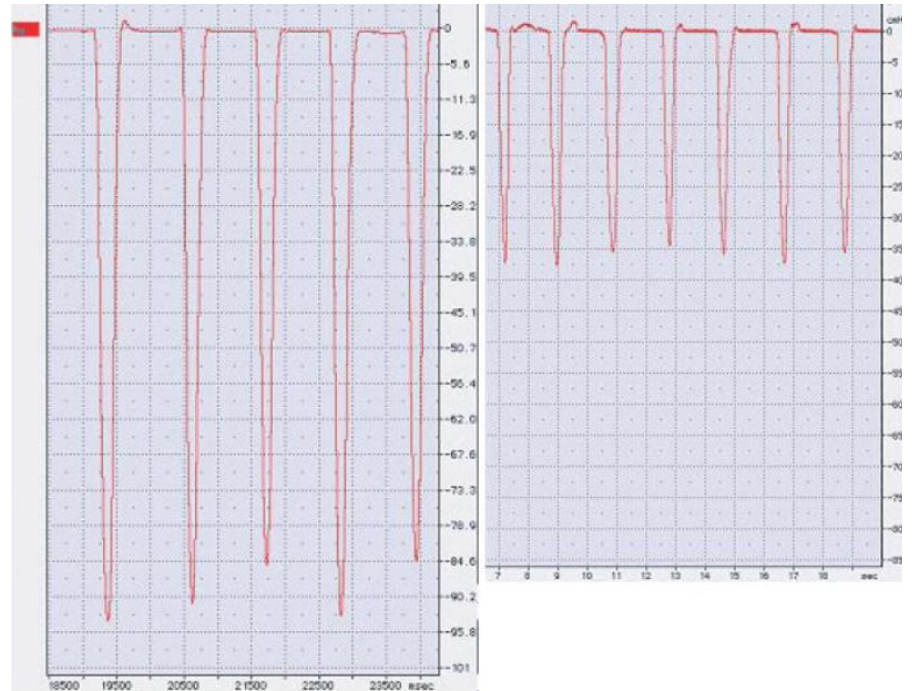
Definition of abbreviations: P_Emax = maximum static expiratory pressure; P_Imax = maximum static inspiratory pressure.

* Values represent kilopascals (1 kPa = 10.19 cm H₂O), mean ± SD.

Reprinted by permission from Reference 27.

Explorations non invasives des muscles respiratoires

- **Spirométrie en décubitus dorsal**
 - Diminution de $> 10\%$ de la CV
- **Pression inspiratoire maximale**
 - Inspiration maximale sur un obstacle
 - À partir du volume résiduel
 - Reflète la force de tous les muscles inspiratoires
 - Dysfonction probable si $< 60\%$
- **Pression nasale (Sniff test)**

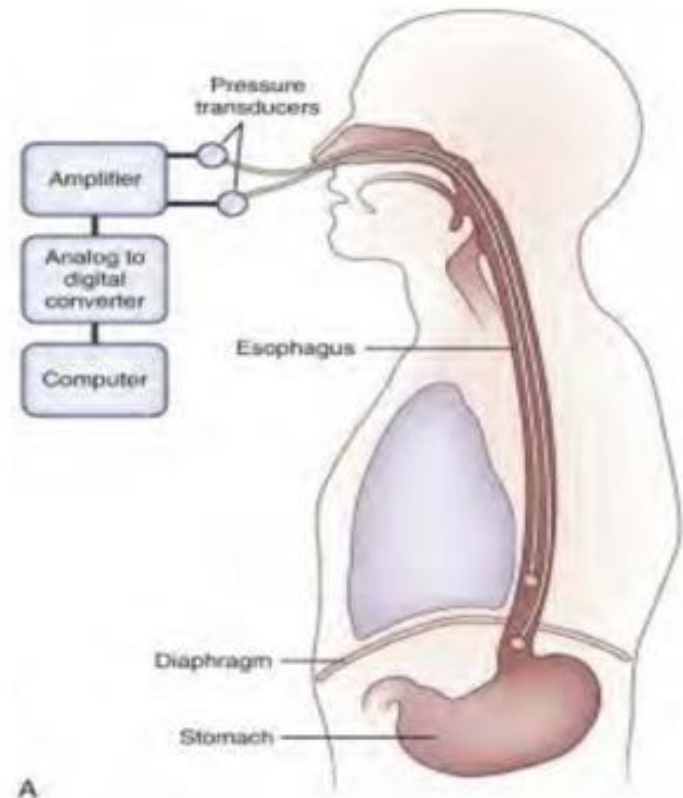


Normal

Faiblesse sévère

Diagnostic de certitude : Mesure de la pression transdiaphragmatique Pdi

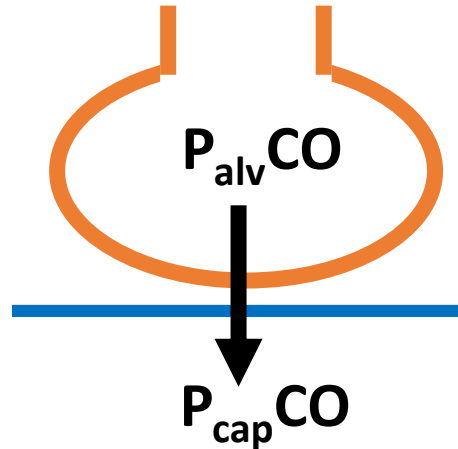
- $P_{di} = P_{\text{gastrique}} - P_{\text{œsophagienne}}$
- Mise en place de capteurs de pression dans l'œsophage et l'estomac
- Manœuvres volontaires
- Stimulation magnétique des racines cervicales
- Combinaison à l'EMG diaphragmatique, à la stimulation électrique des nerfs phréniques...



A

Exploration de DL en pratique : Mesure de DLCO

Pourquoi utiliser le CO ?



$$\dot{V}_{\text{gaz}} = D_{\text{LCO}} \times (P_{\text{alv}} \overline{\text{CO}} - P_{\text{cap}} \text{CO})$$

Le CO est extrêmement affin pour l'hémoglobine

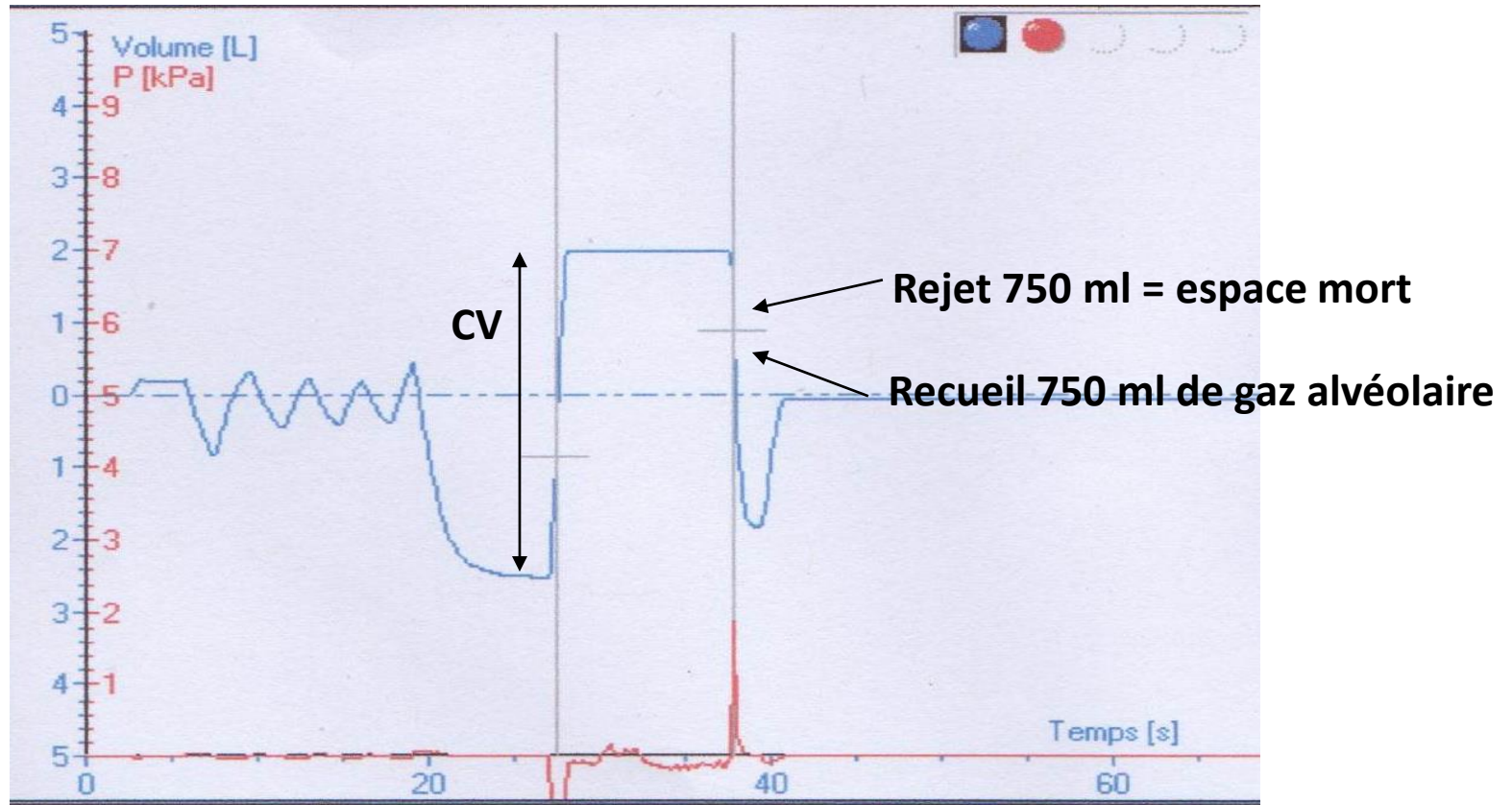
→ $P_{\text{cap}} \text{CO}$ est quasi nul

→ \dot{V}_{CO} dépend surtout de D_{LCO}

On peut calculer DLCO si on peut mesurer \dot{V}_{CO} et $P_{\text{alv}} \overline{\text{CO}}$

$$\dot{V}_{\text{CO}} = D_{\text{LCO}} \times P_{\text{alv}} \overline{\text{CO}}$$

Mesure de D_LCO : Manœuvre



- 1) Inspirer rapidement du VR à la CPT un mélange gazeux contenant CO et He
- 2) Tenir une apnée de 10 secondes
- 3) Expirer rapidement
- 4) [CO] et [He] sont mesurés dans le gaz alvéolaire

Mesure de D_LCO en pratique : Calcul de VA et de la concentration alvéolaire de CO en début d'apnée

On calcule le volume « alvéolaire » VA

= volume pulmonaire ventilé lors de 1 cycle ventilatoire de 10 secondes

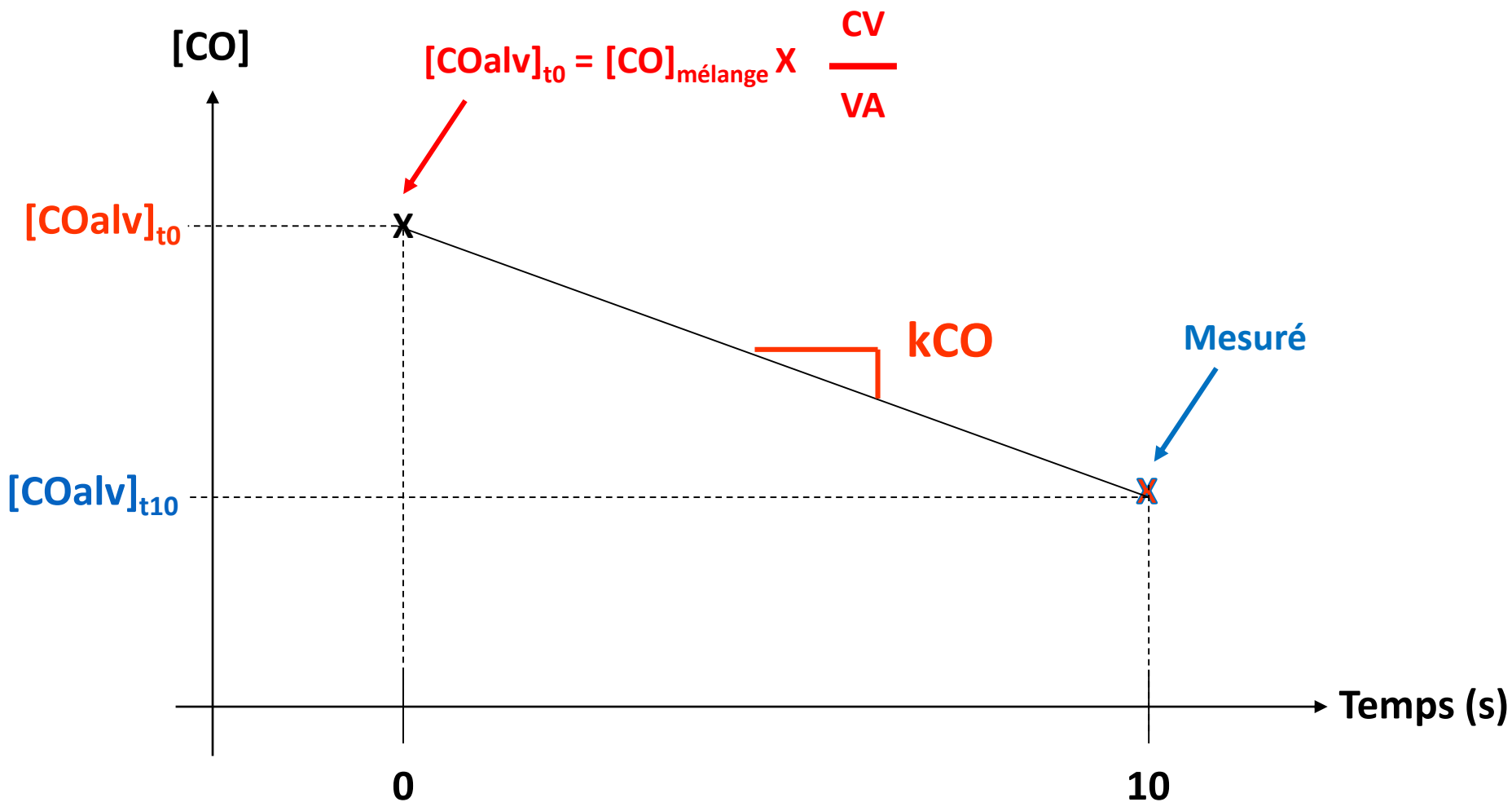
$$VA = \frac{[He]_i \times CV}{[He]_{10s}}$$

On peut alors calculer la concentration de CO alvéolaire en début d'apnée

$$[CO_{alv}]_{t0} = [CO]_{mélange} \times \frac{CV}{VA}$$

La concentration de CO alvéolaire en fin d'apnée est mesurée

Calcul du coefficient de transfert du CO (kCO)



$kCO = \text{quantité de CO} / \text{volume} / \text{temps} / \text{Qté d'hémoglobine}$

Mesure de D_LCO en pratique : Calcul de DLCO

$$D_LCO = VA \times KCO \text{ (ou } DLCO/VA)$$

Echanges gazeux
pulmonaires



Volume d'échange

Echanges gazeux par unité de volume

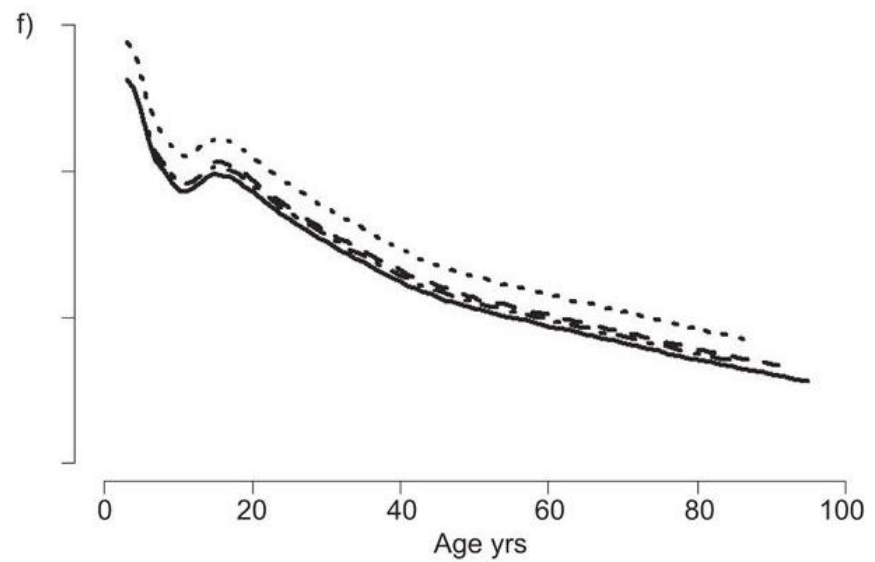
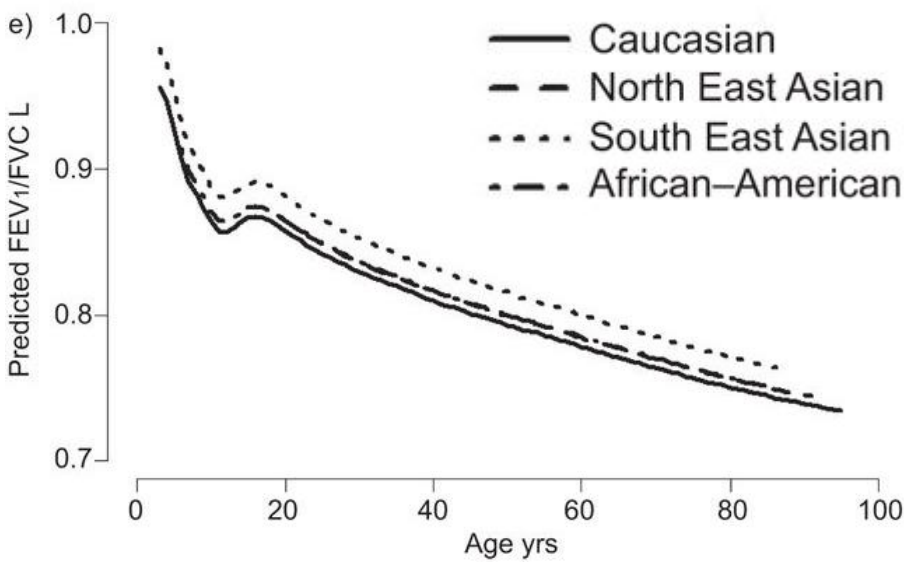
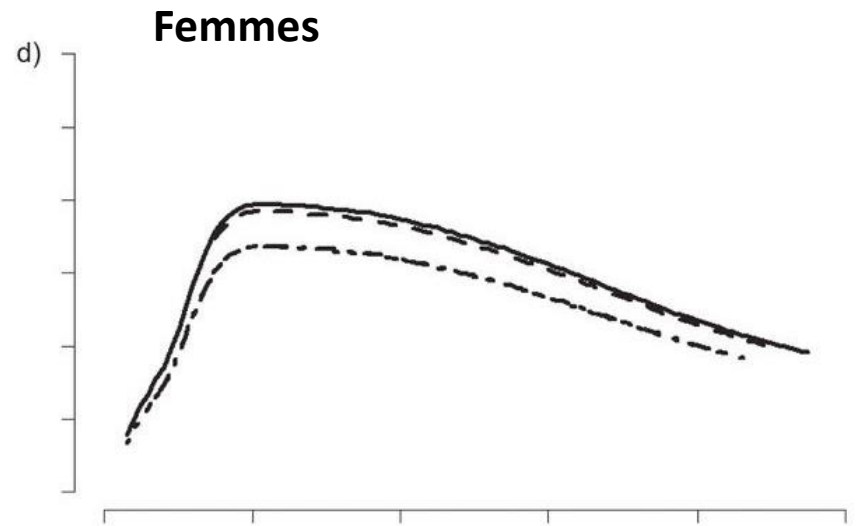
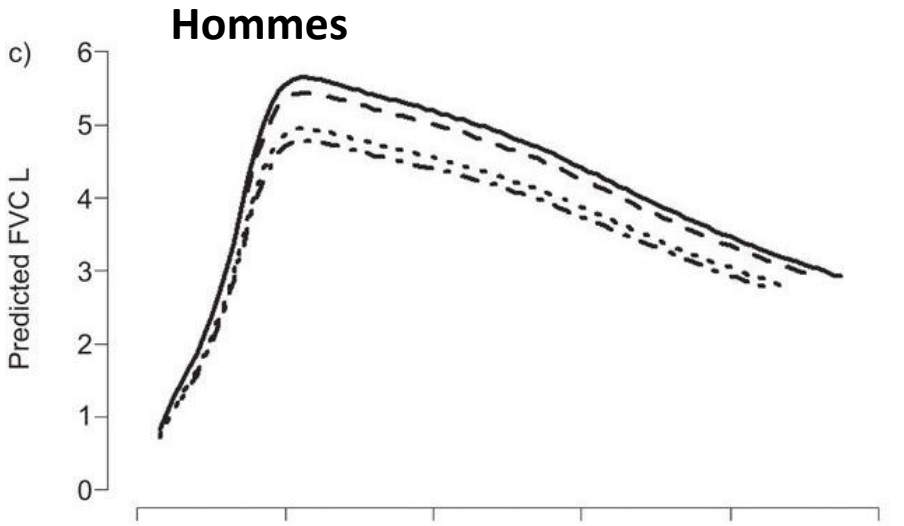
Plan de l'exposé

3- Les bases de l'interprétation

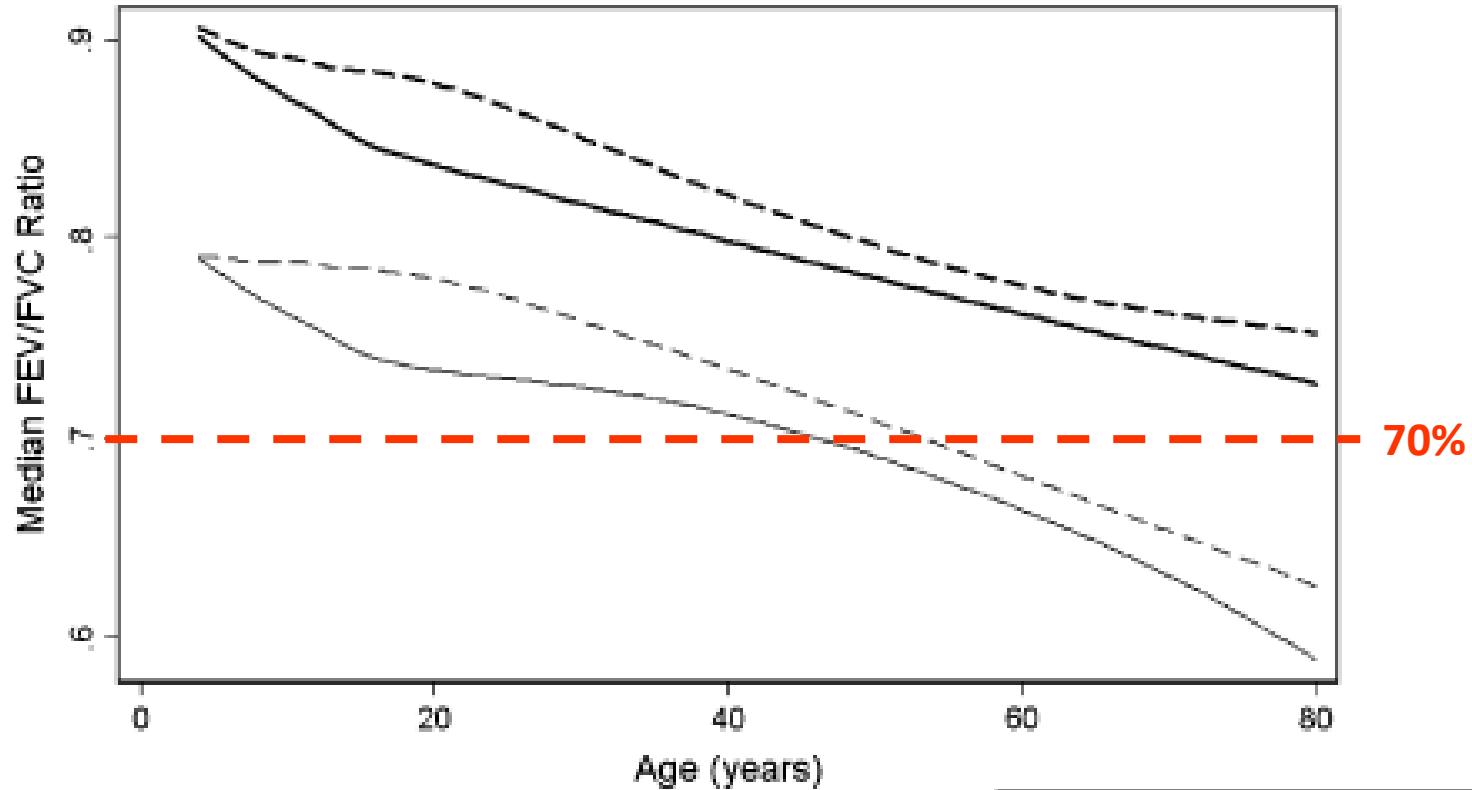
-Les valeurs de référence

-Les grands syndromes

Fonction respiratoire et données anthropométriques



Évolution de la fonction respiratoire au cours de la vie



5^e percentile : Définition statistique de la normalité



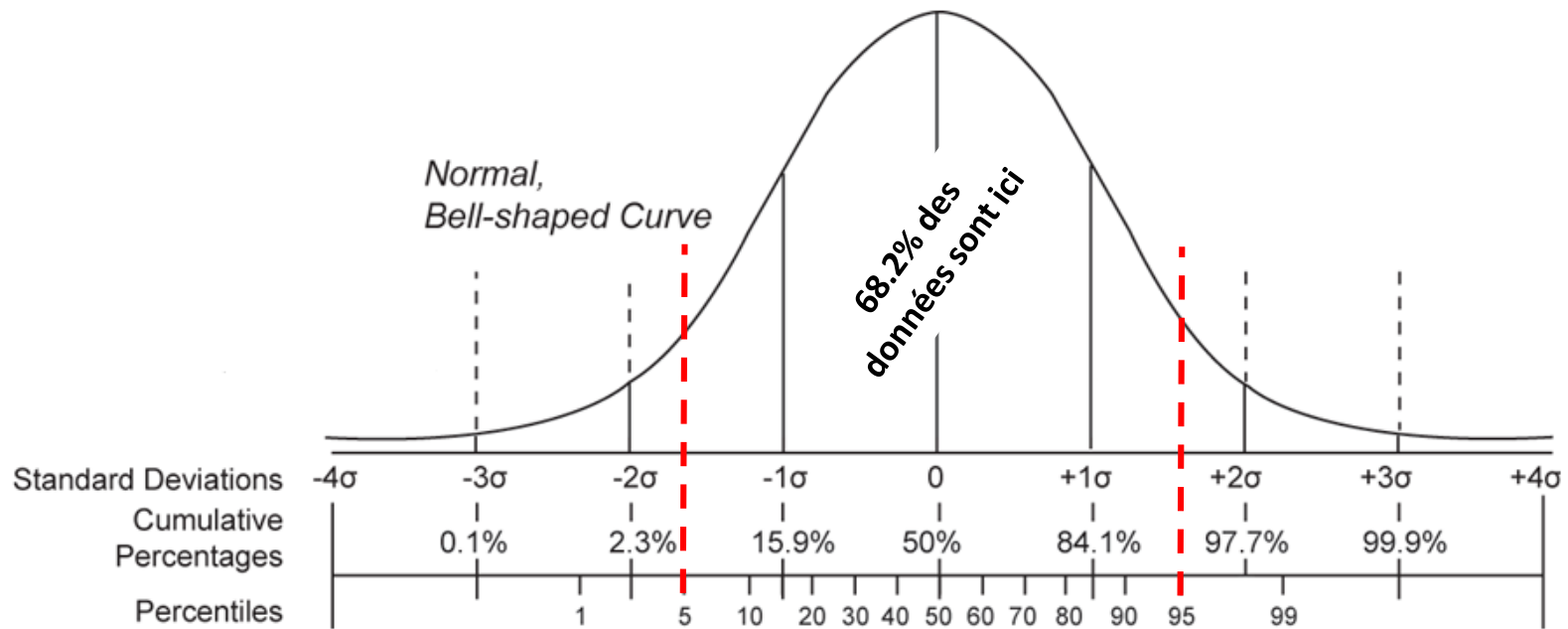
Comment interpréter ?

Les résultats des EFR s'interprètent sur la base d'une comparaison avec des valeurs de référence relevées chez des sujets « normaux » ou « sains » qui doivent avoir les mêmes caractéristiques anthropologiques.

- Age
- Taille (mesurée)
- Sexe
- Ethnie

→ Les données sont habituellement exprimées par rapport à une valeur de référence

Comment définir la normalité d'un paramètre EFR ?



Dans la cadre d'une distribution normale :

Moyenne +/-1.64 ET : 5^e-95^e percentiles des données

On considère traditionnellement les valeurs comprises entre le 5^e et le 95^e percentile comme statistiquement normales. Sur la plupart des systèmes d'EFR, les valeurs sortant de cette fourchette sont signalées (en rouge par exemple).

Chez un sujet d'âge et taille moyens, le 5^e-95^e percentiles correspondent environ à 80-120% de la valeur prédite

Comment exprimer de façon normalisée un paramètre EFR ?

- **Approche traditionnelle** : En pourcentage de la valeur prédite (moyenne de la population)
Avantage : Se prête à un raisonnement physiopathologique
- **Z-score** = (Valeur mesurée – valeur moyenne dans la population) / écart-type de la population
Avantage : Précise finement le caractère statistiquement typique ou atypique

Comment exprimer de façon normalisée un paramètre EFR ?

		%Chg...	Théo	Meil.	%...	Es 1
CV	L	4	2.95	2.55	86	
CVF	L	4	2.87	2.55	89	2.55
VEMS	L	1	2.44	1.38	57	1.38
VEMS % CVF	%	-3	79.41	54.16	68	54.16
VEMS % CV...	%	-3	79.41	54.16	68	54.16
CI_F	L	-5	2.03	0.67	33	0.67
DPE	L/s	-7	6.16	4.09	66	4.09
DEM25	L/s	-22	1.52	0.20	13	0.20
DEM50	L/s	-21	3.80	0.67	18	0.67
DEM75	L/s	27	5.48	1.71	31	1.71



Grande variabilité inter-individuelle aux âges extrêmes de la vie

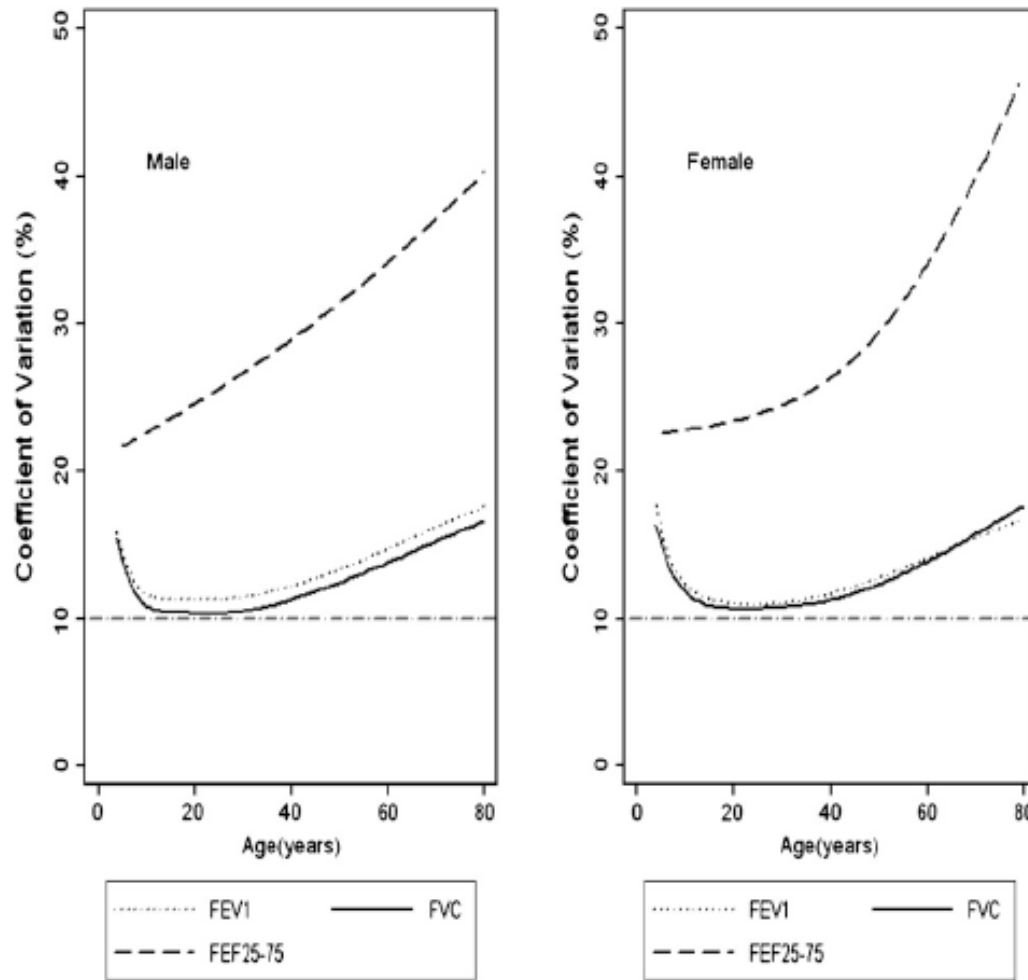


Figure 3. Between-subject variability, expressed as the coefficient of variation (CV) for each of the three spirometric outcomes. A CV of 10% corresponds to a normal range of 80 to 120% predicted. As can be seen, the CV for FVC and FEV₁ is near 10% only over the age range of 15 to 35 years. The variability at other ages and for FEF₂₅₋₇₅ at all ages is considerably greater.

→ La fourchette des valeurs statistiquement normales s'agrandit au-delà de 80-120% après 40 ans

Existe-t-il une limite de la normale ?

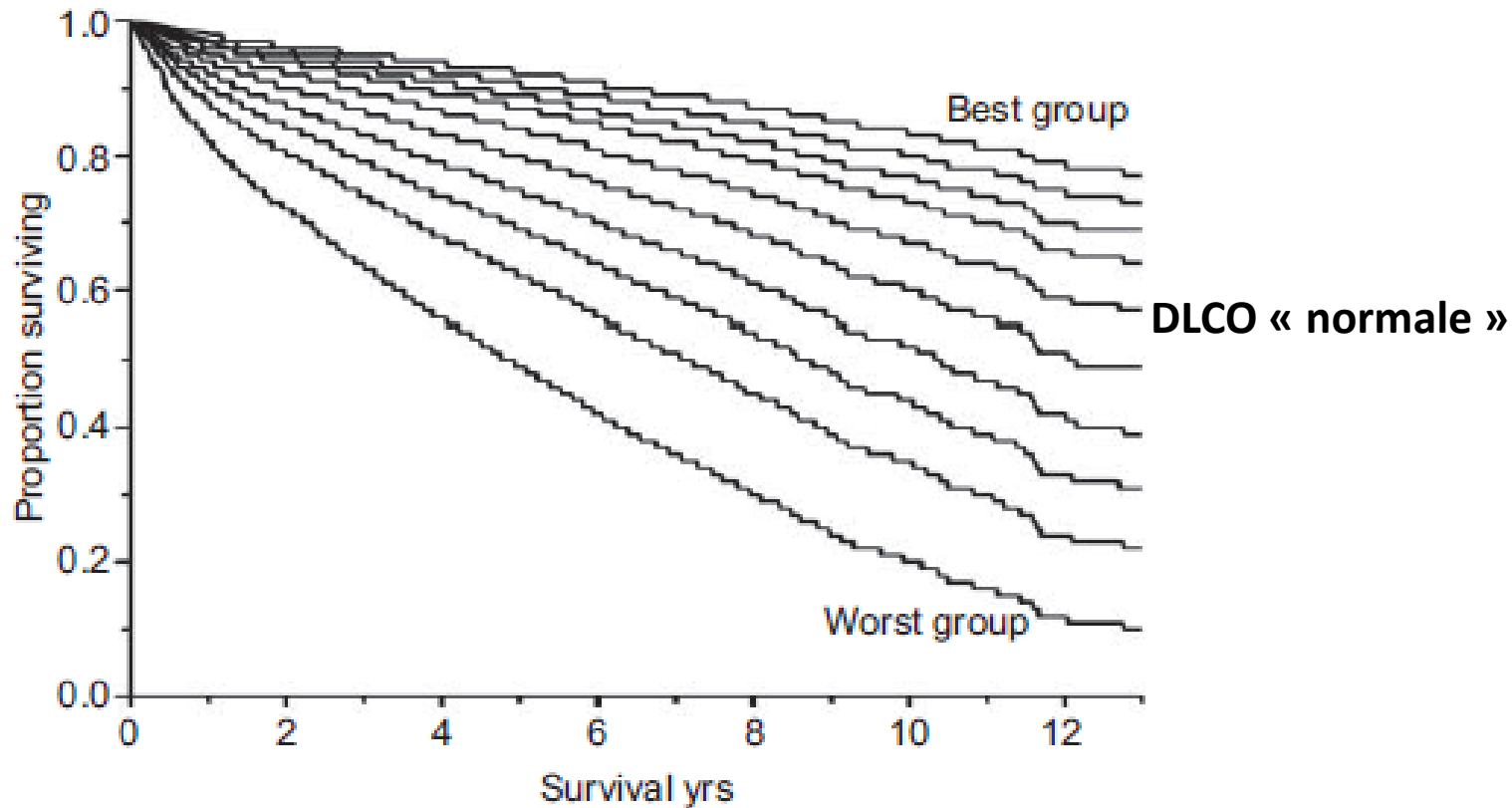


FIGURE 1. Survival curves for each of the standardised residuals of single-breath diffusing capacity of the lung for carbon monoxide ($DLCO_{SR}$) groups from the Cox regression using, as survival predictors, the $DLCO_{SR}$ groups using the Miller equations, sex, age, body mass index deciles and smoking status.

Quelle est la meilleure valeur de référence ?

Un patient peut avoir un index de fonction respiratoire à la limite inférieure de la dispersion normale alors qu'en fait, elle a évolué d'une valeur de la limite supérieure à une autre à la limite inférieure de la normale.



La valeur de référence idéale d'un individu est en fait sa "meilleure valeur personnelle", prise dans un état de bonne santé.

Conséquence clinique : Surveillance des travailleurs exposés à un toxique respiratoire, surveillance des sujets à risque de maladie obstructive des voies aériennes (allogreffe de moëlle)

Points-clés

- **Exploration de deux domaines physiologiques distincts :**
 - **la pompe ventilatoire (spirométrie, volumes)**
 - **les échanges alvéolo-capillaires (DLCO)**
- **La meilleure valeur de référence est celle mesurée chez le sujet dans son état de bonne santé, avant l'exposition à un risque +++**
- **DLCO : Examen très sensible pour la pathologie alvéolaire**
- **L'expression des résultats en z-scores permet une évaluation fine de l'atypicité statistique du résultat**