

# 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**

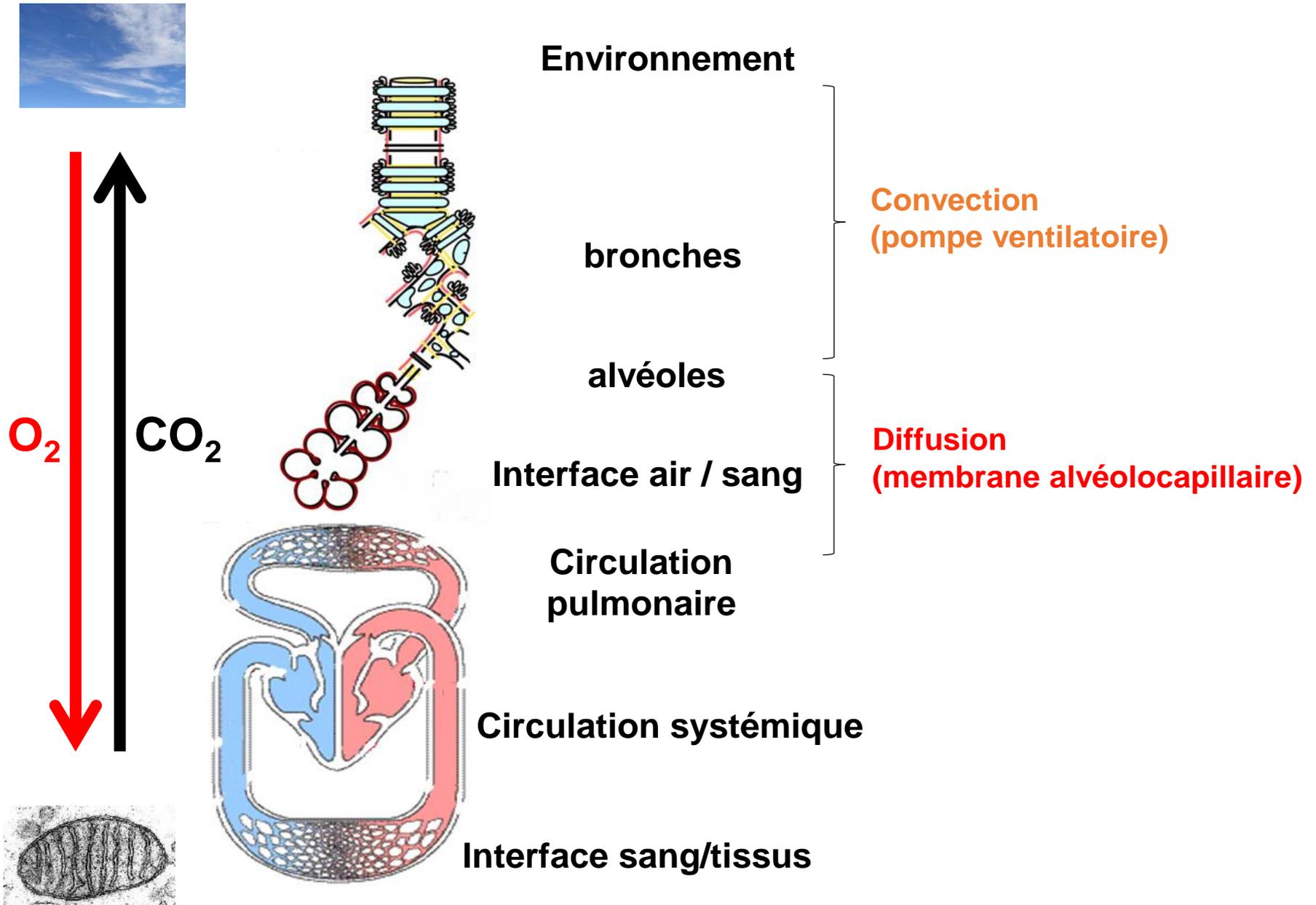
# Plan de l'exposé

## **1- Rappels anatomico-fonctionnels**

- La pompe ventilatoire

- Diffusion alvéolo-capillaire

# Le transport des gaz dans l'organisme

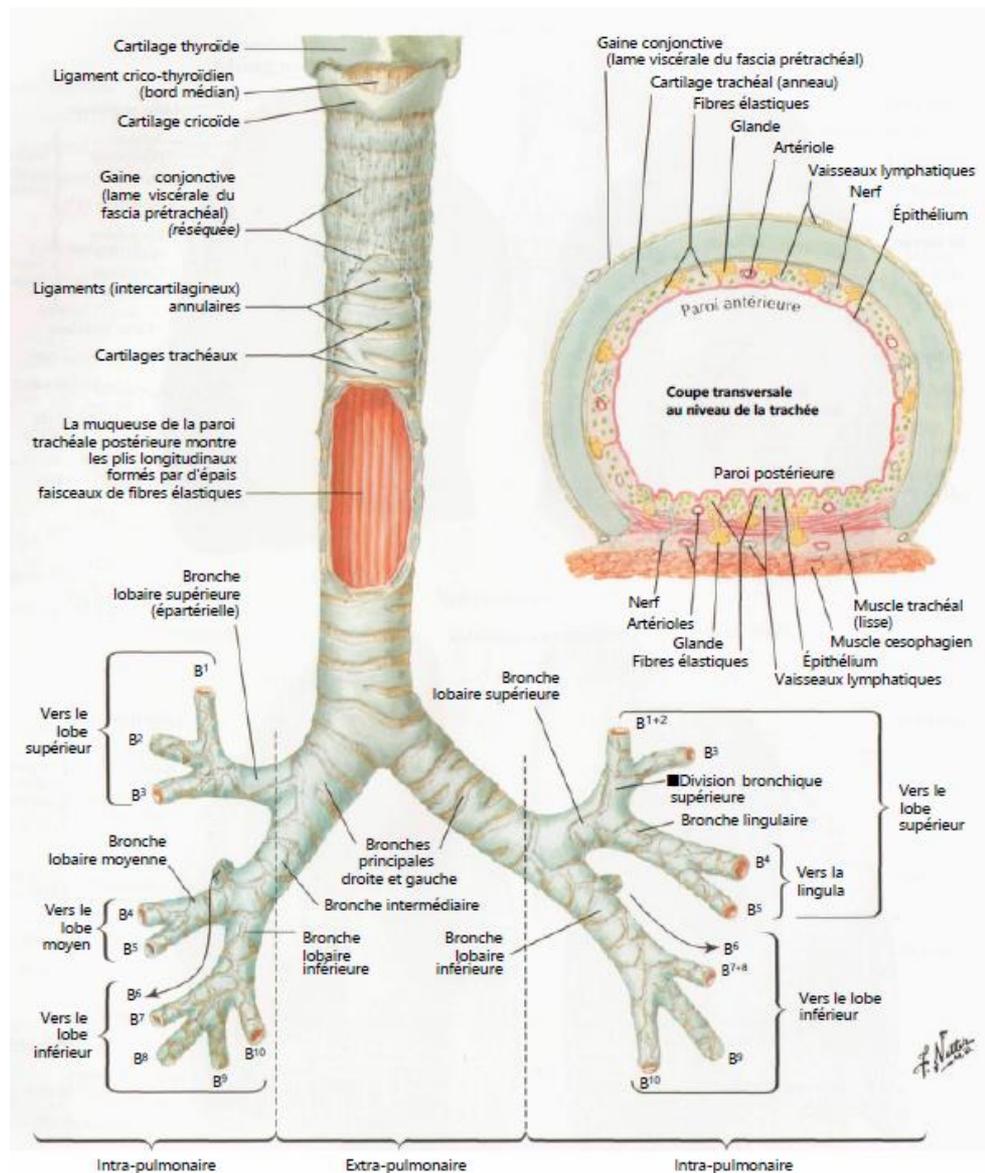


# Pompe ventilatoire

## Anatomie générale des voies aériennes

En conditions normales :

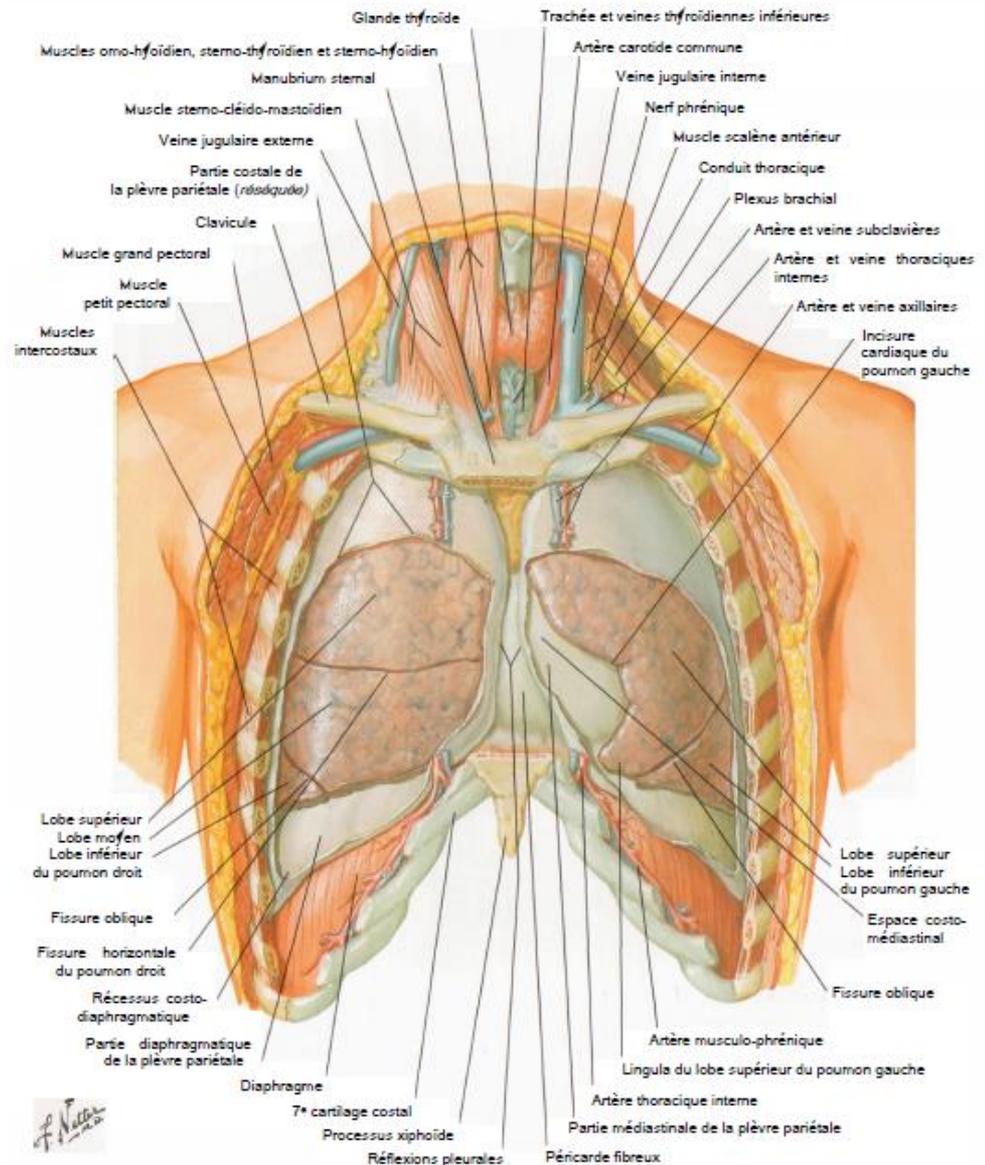
Structure rigide peu déformable



# La paroi thoracique et la plèvre

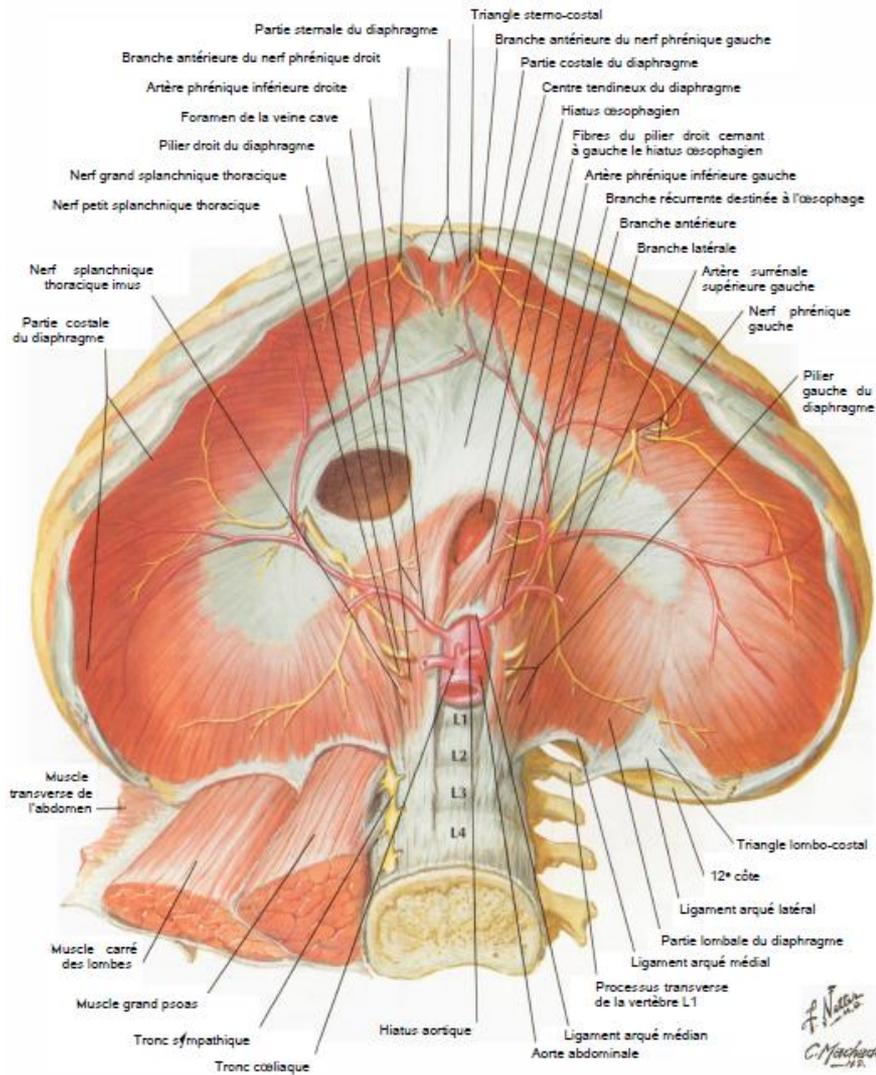
## Structure élastique

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

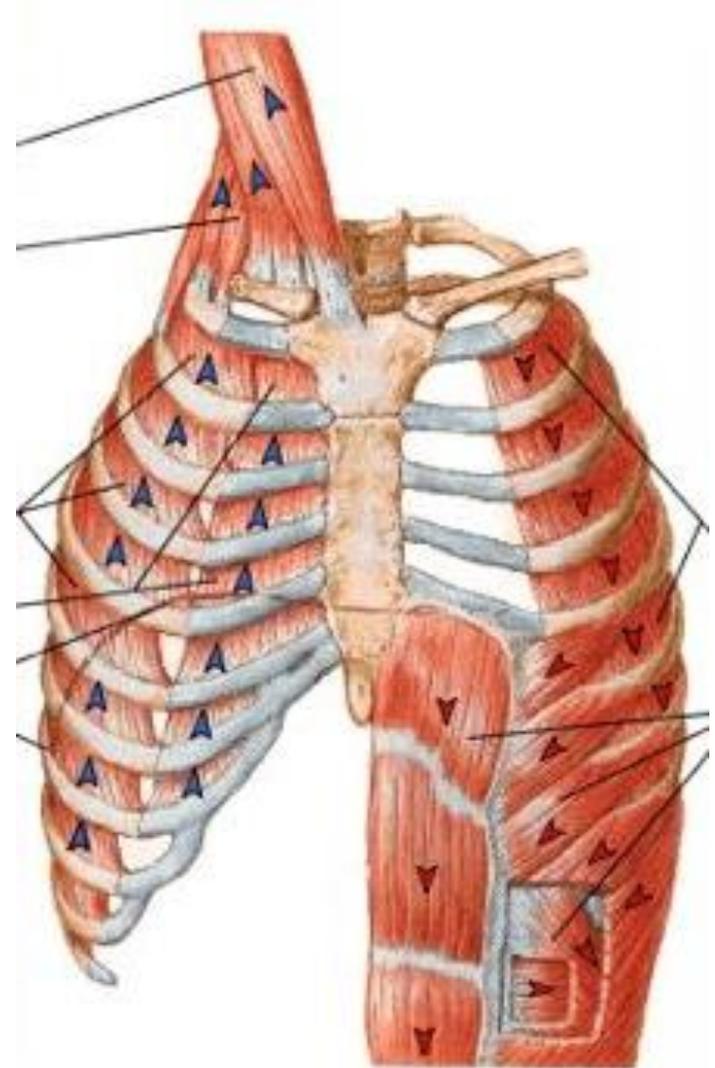


# Les muscles respiratoires

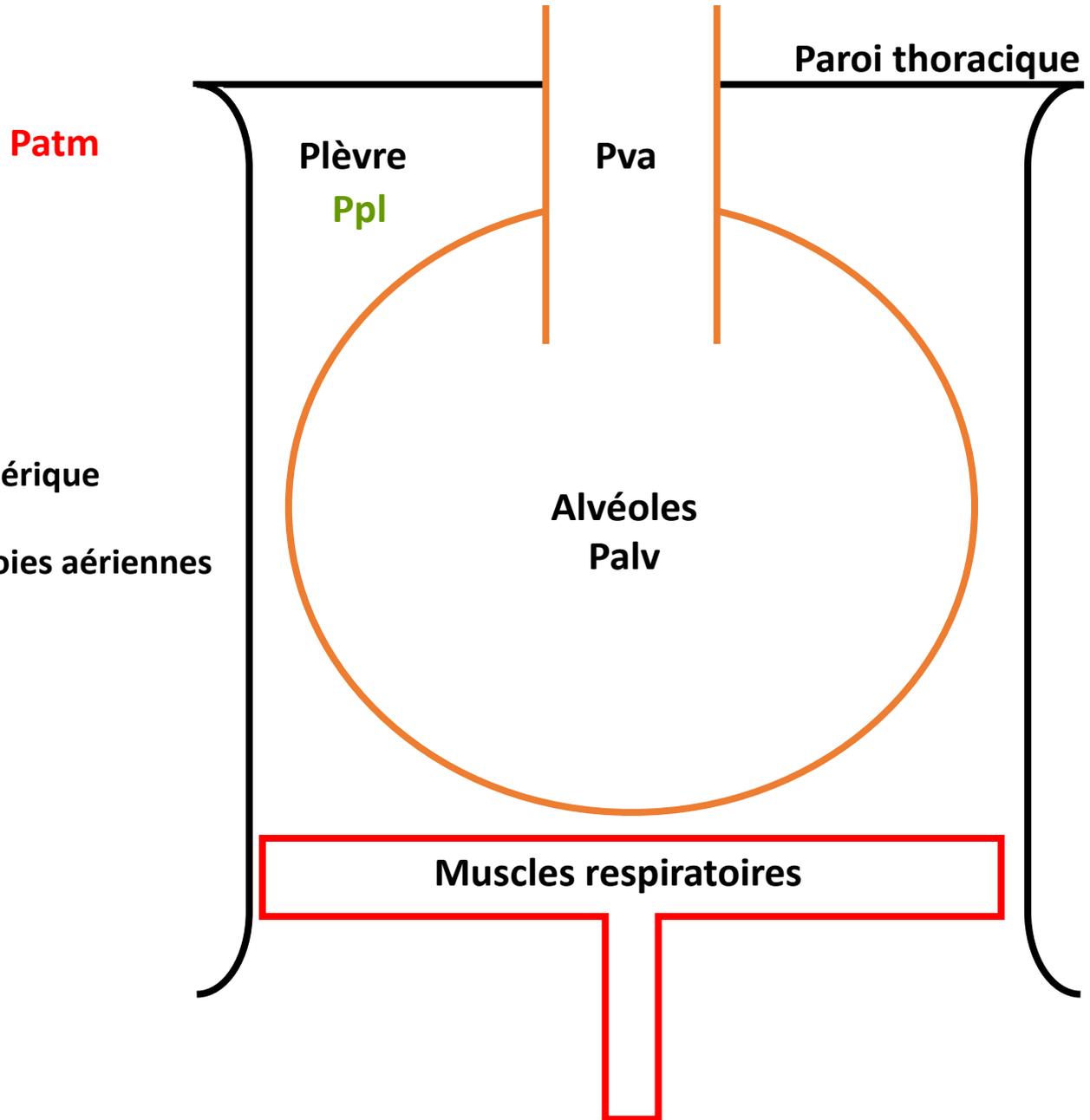
## Principal : diaphragme



## 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

$P_{atm}$

$P_{pl} < P_{atm}$

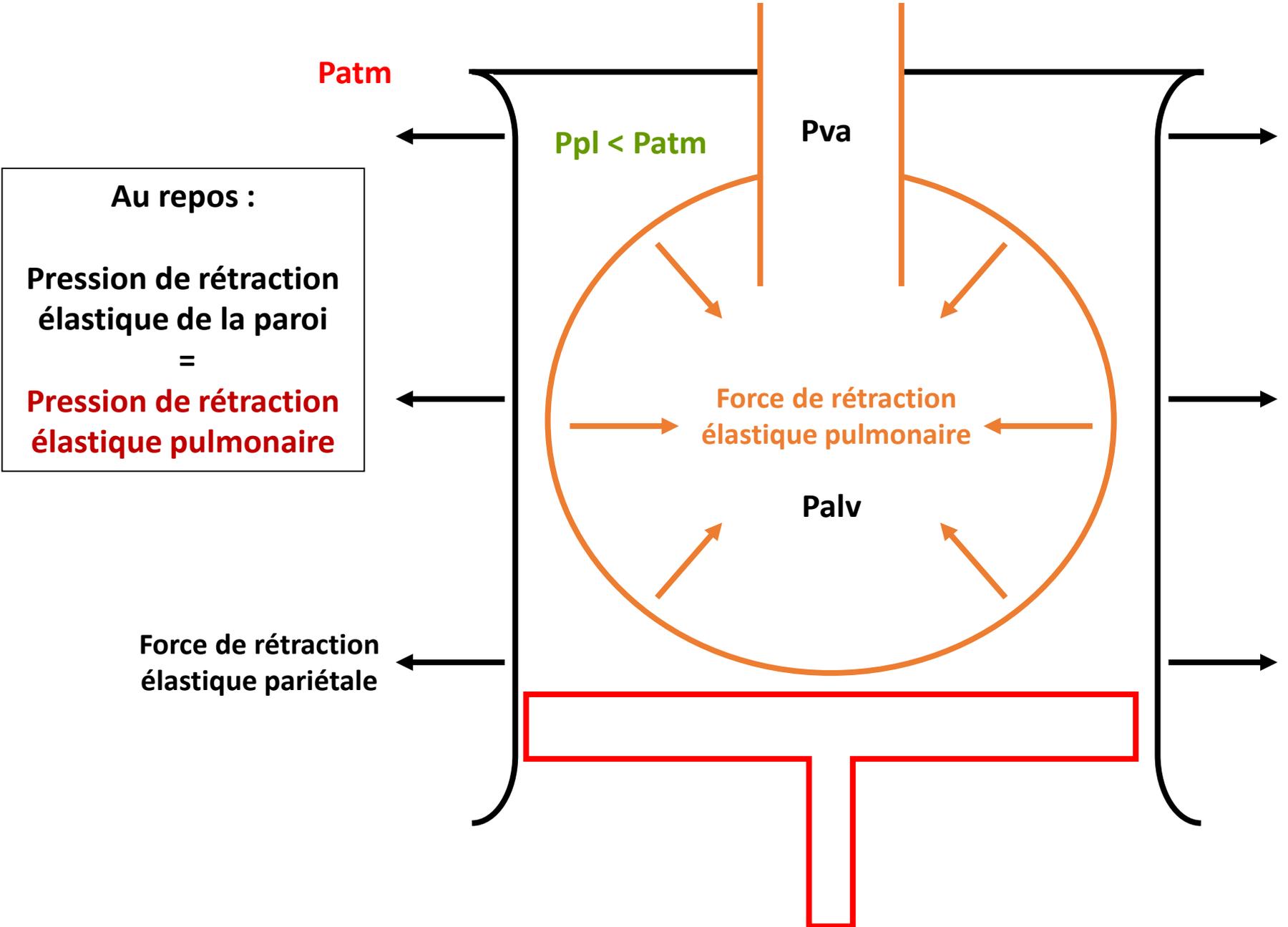
$P_{va}$

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

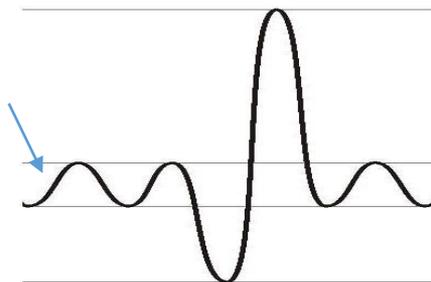
**Force de rétraction élastique pulmonaire**

$P_{alv}$

**Force de rétraction élastique pariétale**

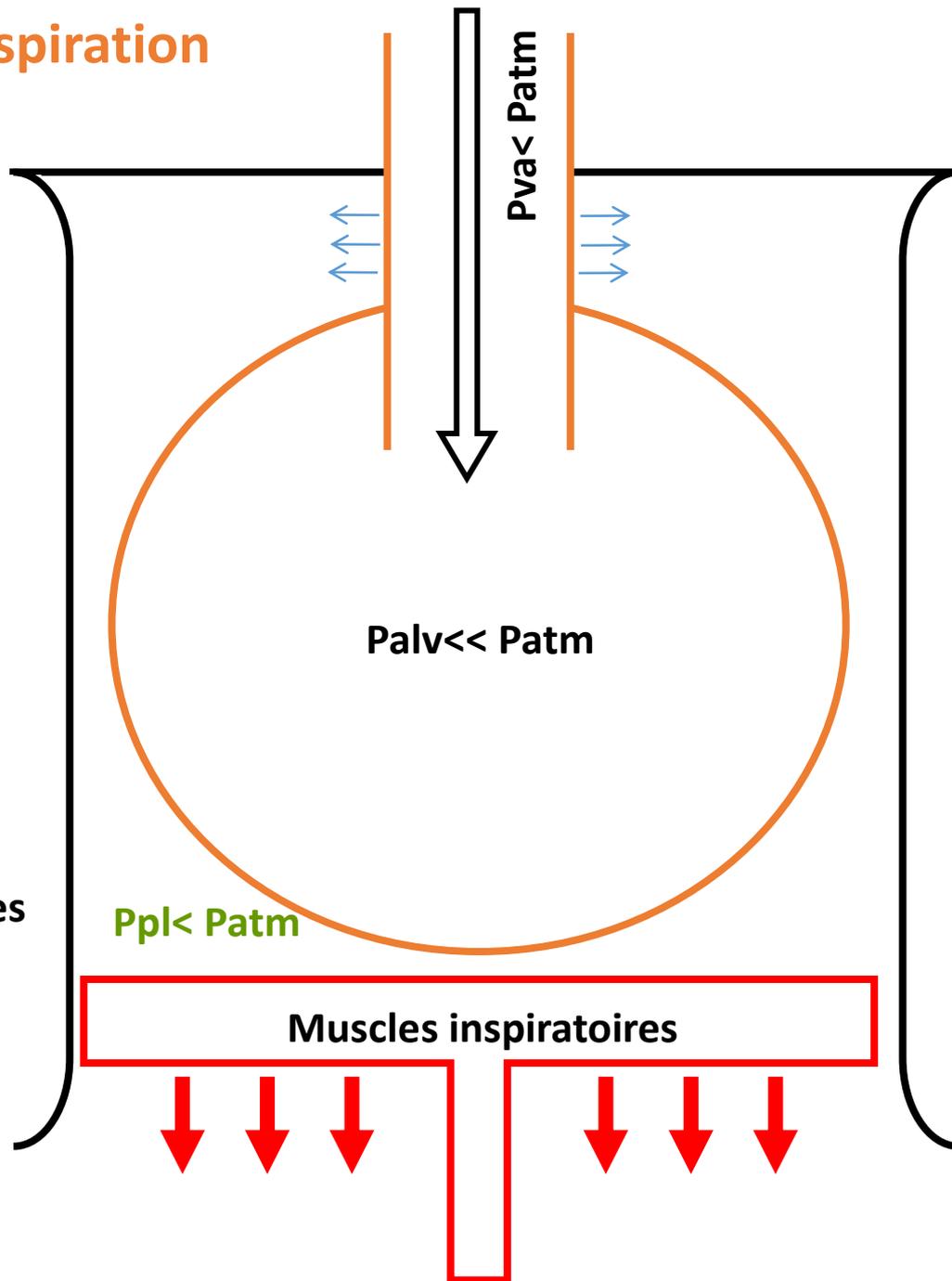


# Le cycle ventilatoire : Inspiration

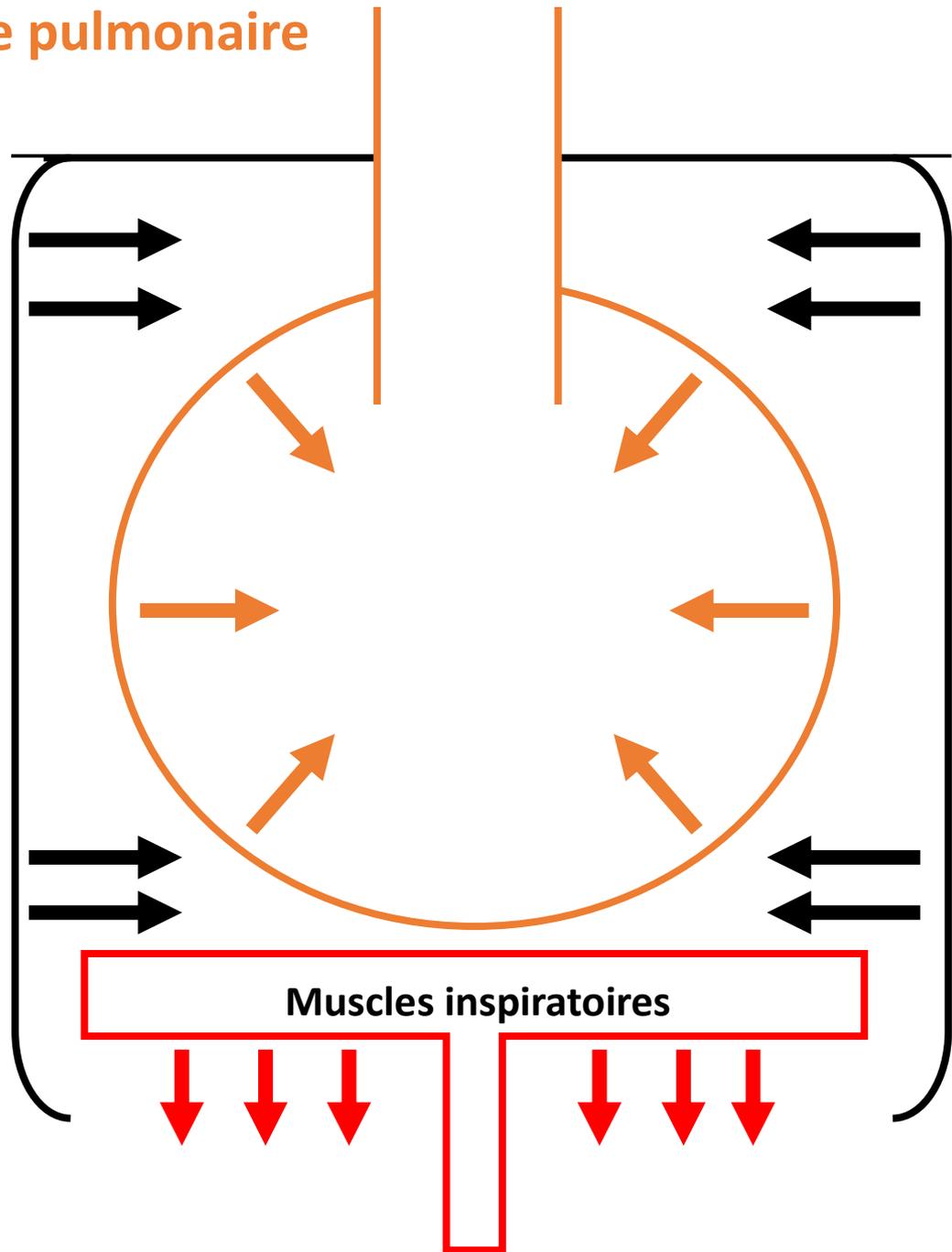
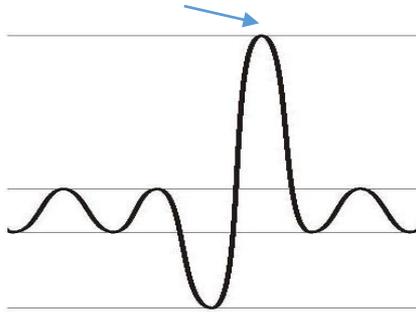


Gradient de pression

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

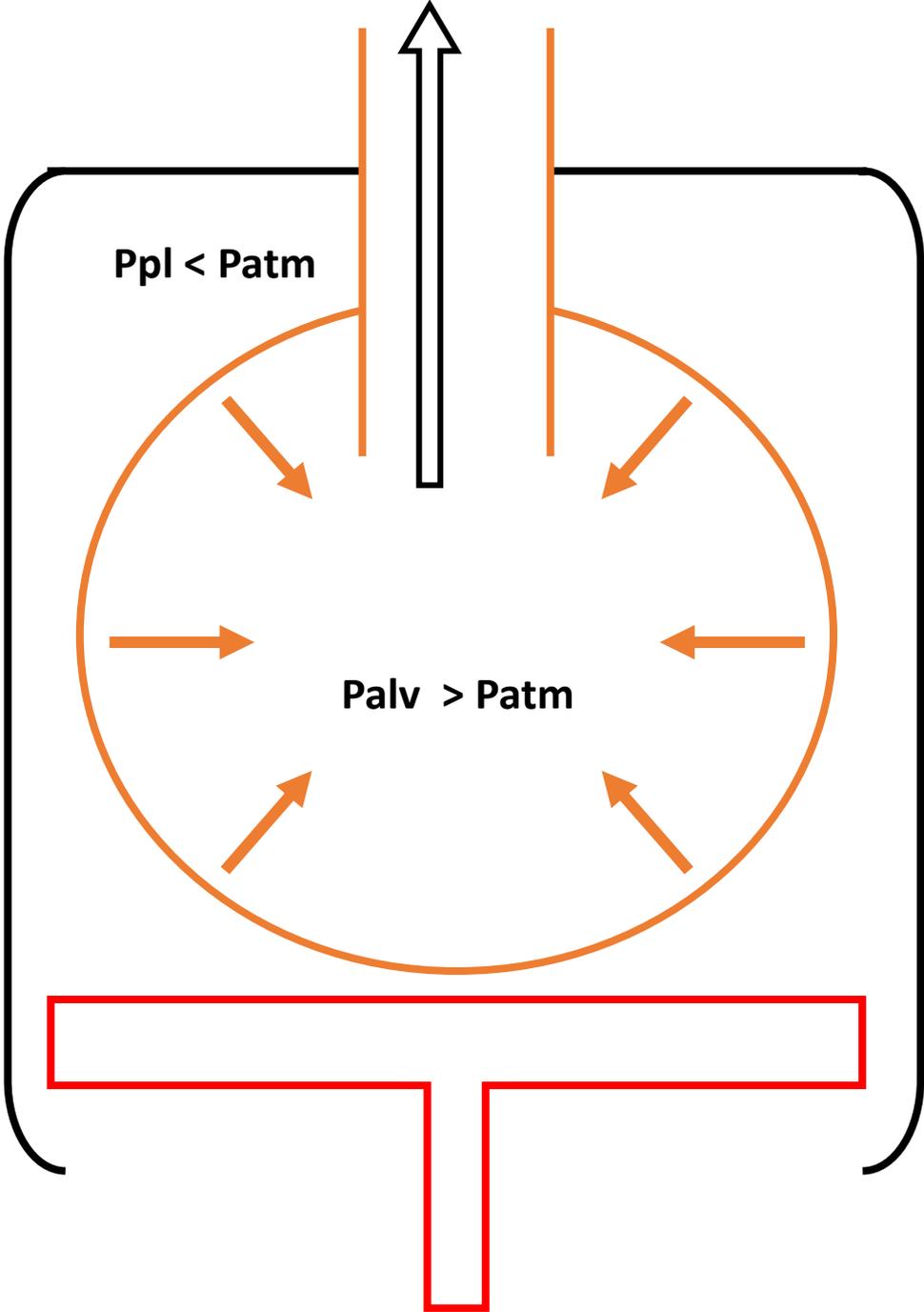
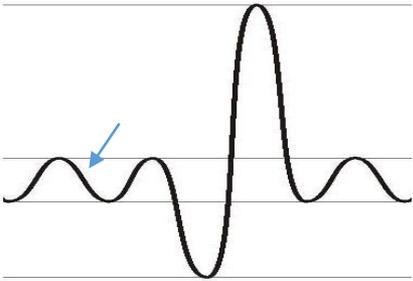


# Déterminants du volume pulmonaire à la CPT



Rétraction élastique pulmonaire  
+  
Rétraction élastique pariétale  
=  
Force musculaire inspiratoire

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

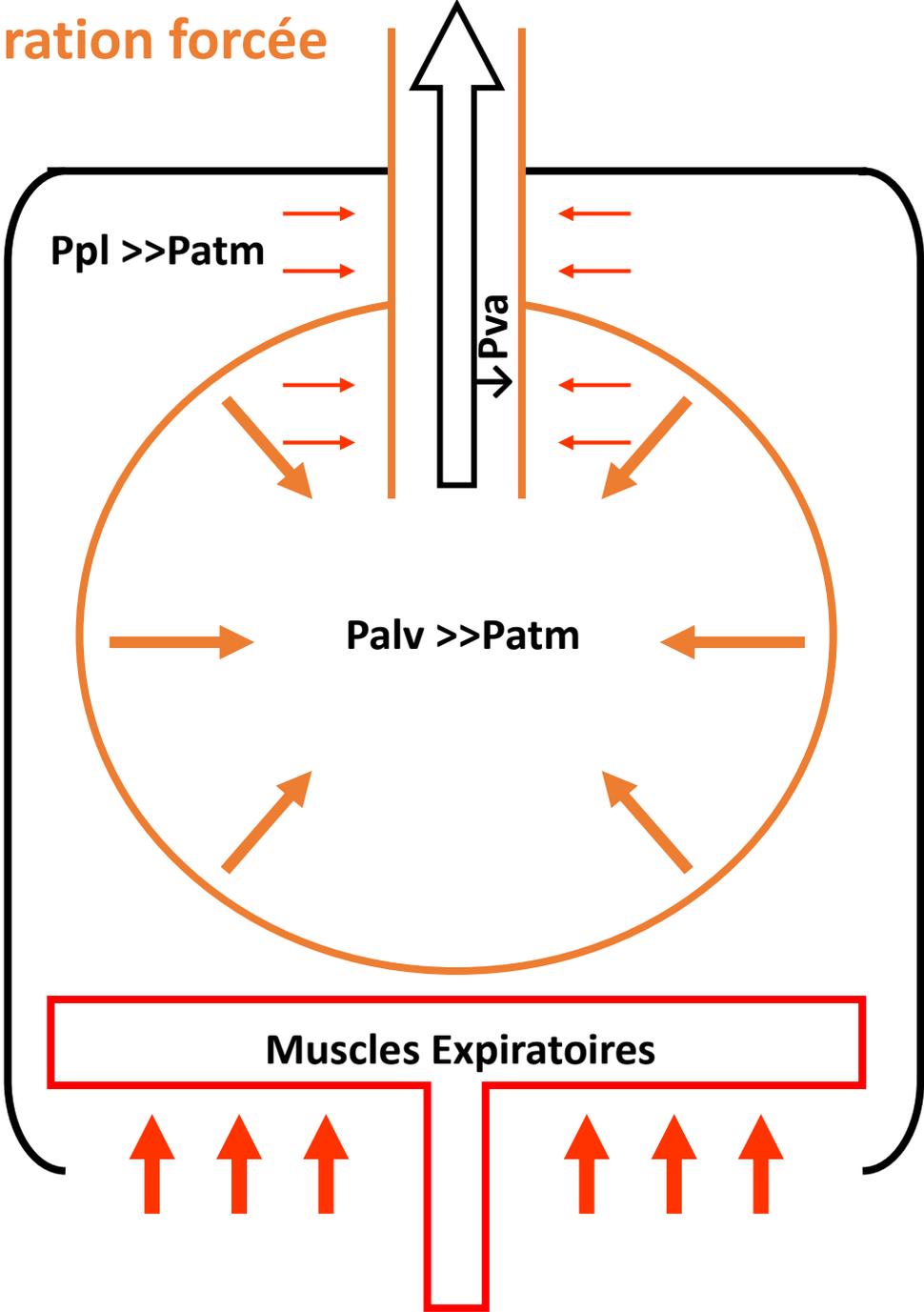


# Le cas particulier de l'expiration forcée

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



↓↓ 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 +++**

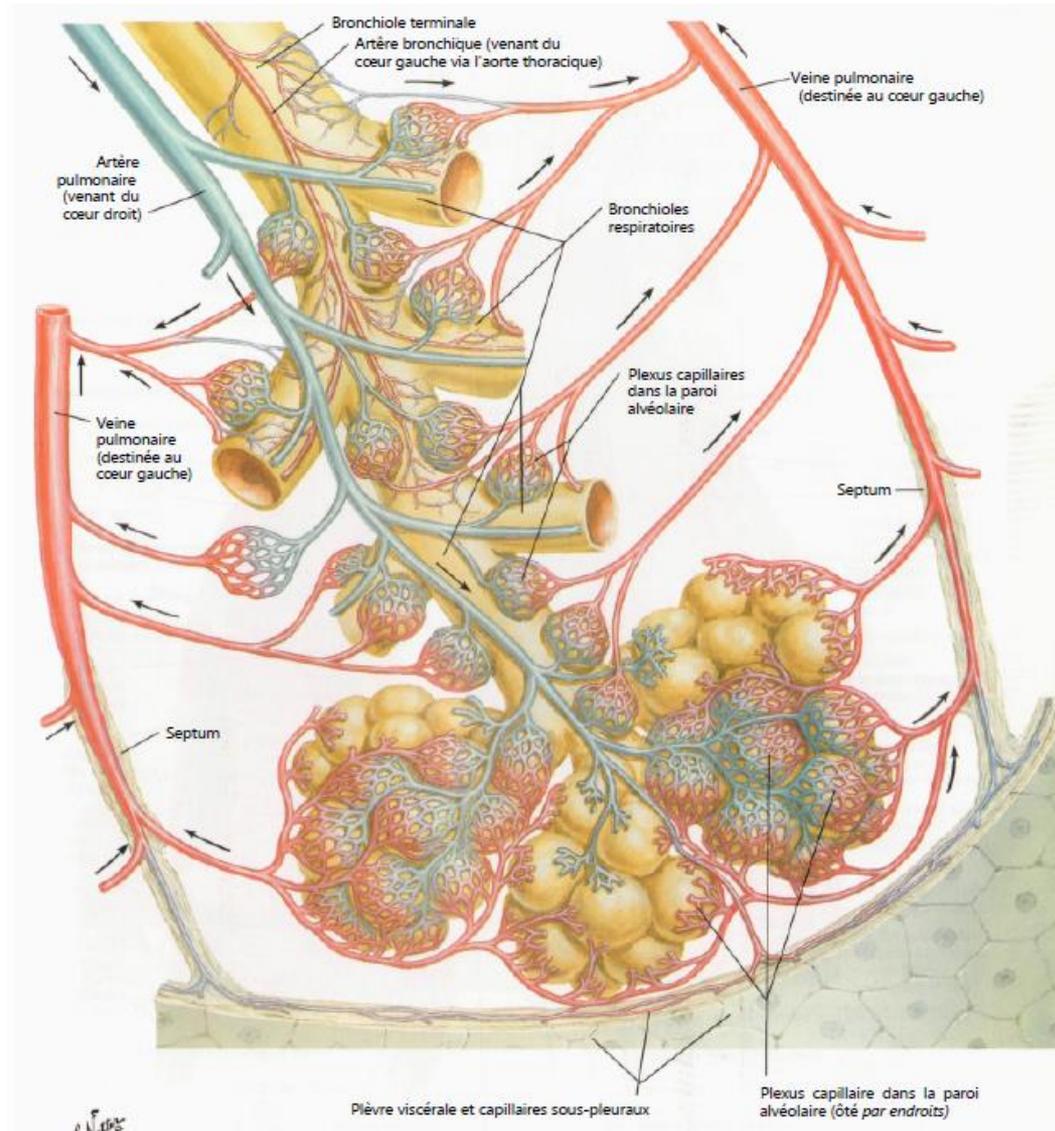
# Cycle ventilatoire

## 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

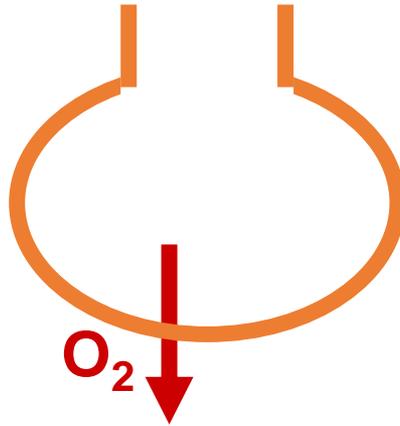
- Pneumopathies interstitielles
- Pathologie ostéoarticulaire, oedèmes
- Pathologie neuromusculaire

# 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 :

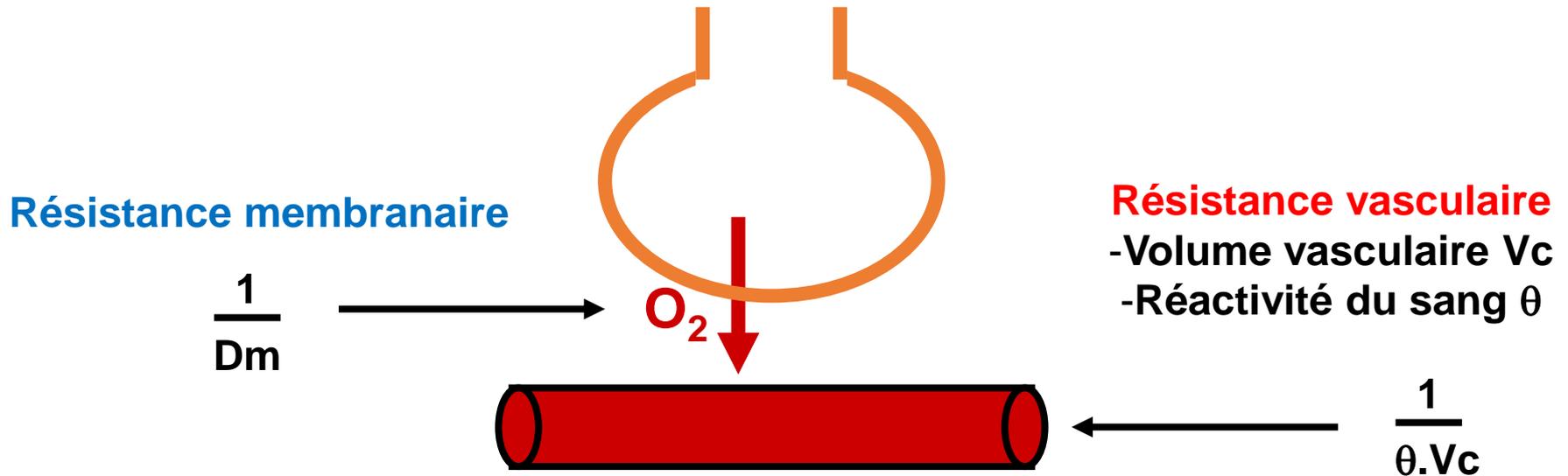
- Au gradient de pression  $\Delta P$  de ce gaz de part et d'autre de la membrane
- A une constante de diffusion  $k$  propre à chaque gaz
- À la conductance (=1/résistance)  $D_m$  de la membrane qui est fonction de sa surface  $S$  et inversement de son épaisseur  $E$

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

$D_m$  : Capacité de diffusion de la membrane ( $\text{ml} \cdot \text{mmHg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )

# 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

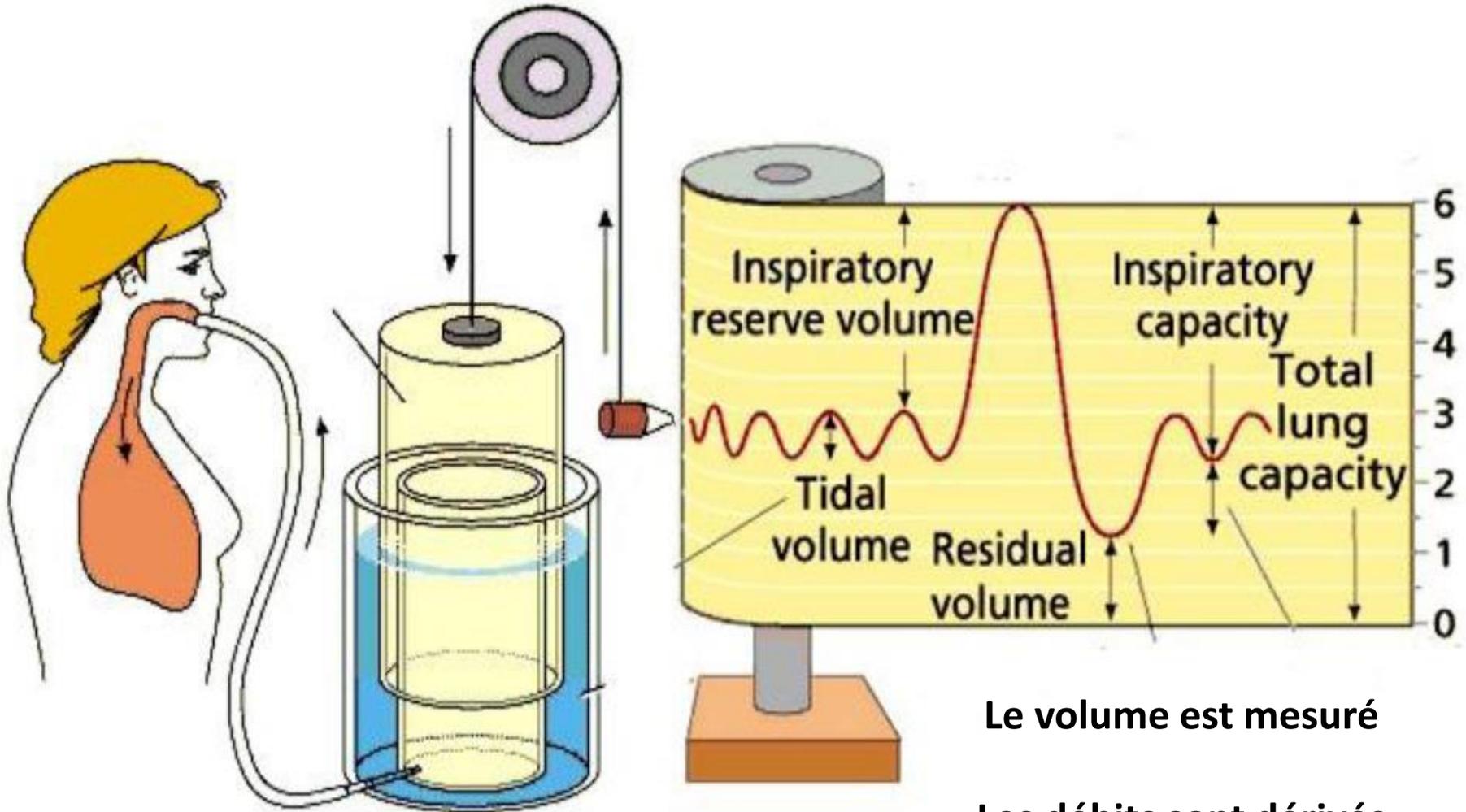
- La spirométrie

- 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



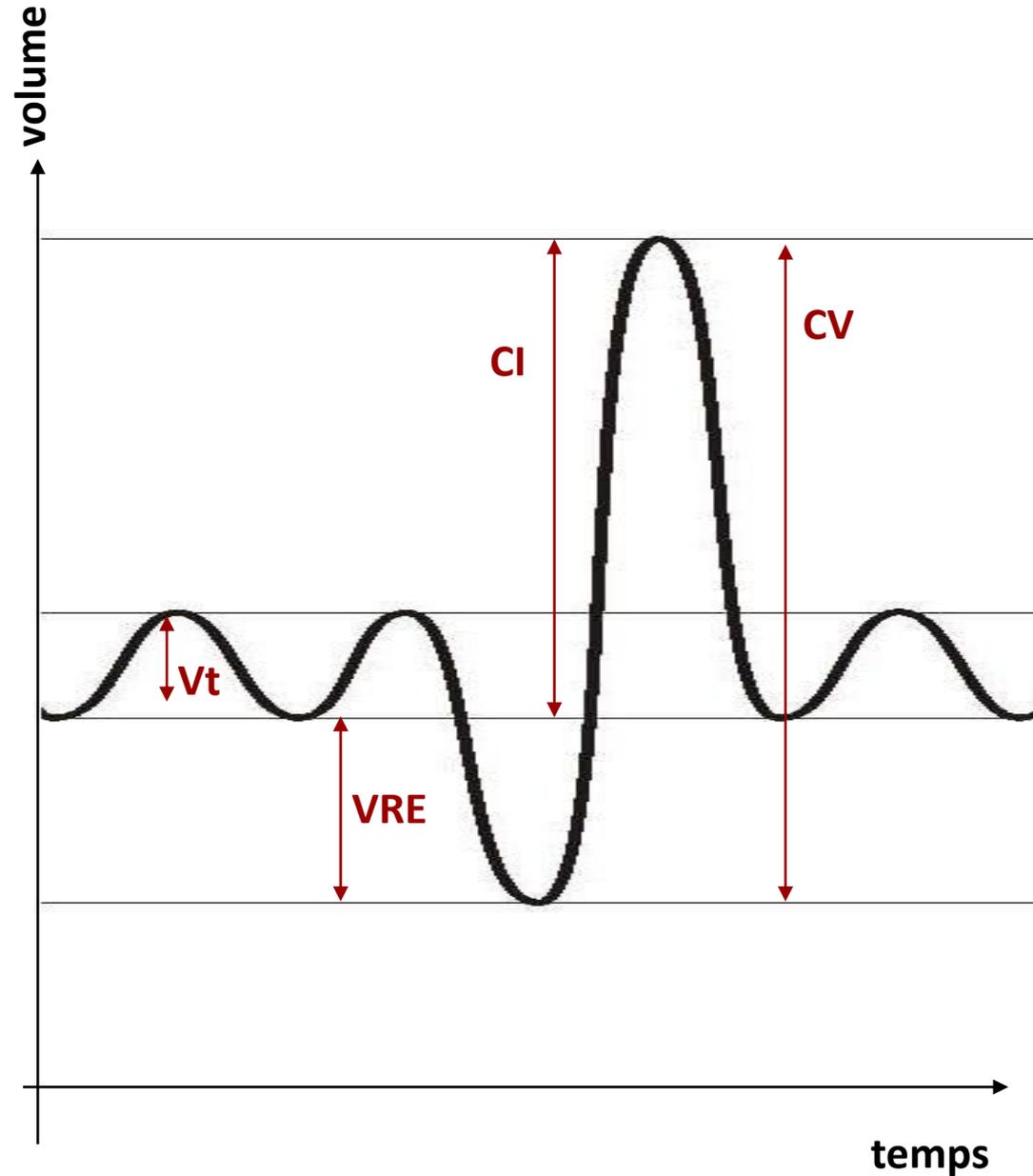
**Le débit est mesuré**

**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

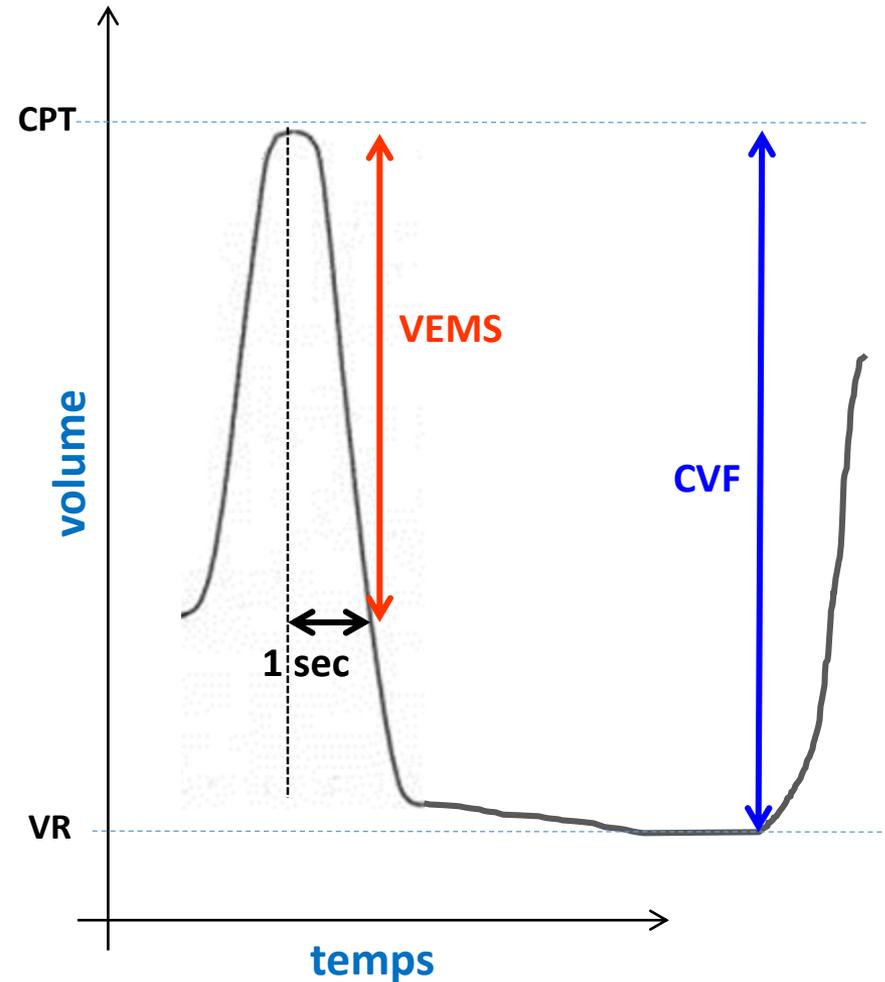
## Consignes

- 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

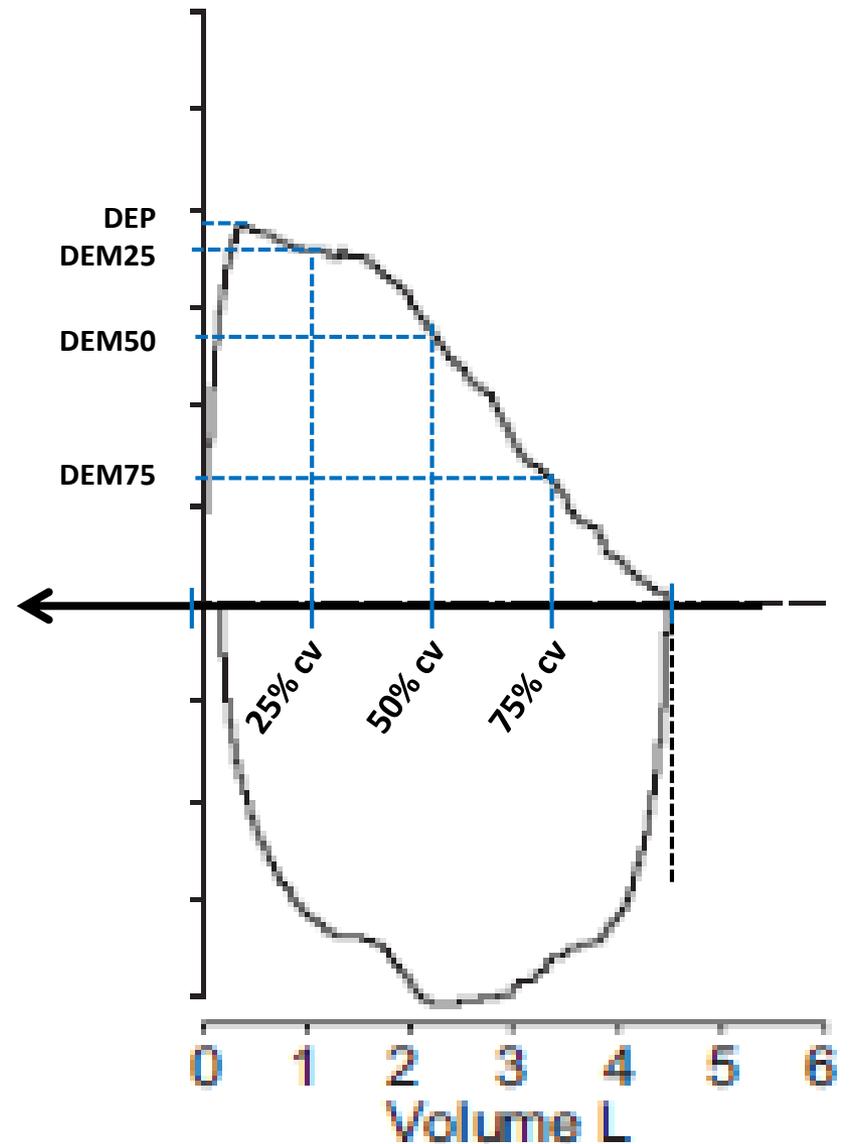


# Spirométrie forcée : Courbe débit-volume

**DEP** : Débit expiratoire de pointe

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

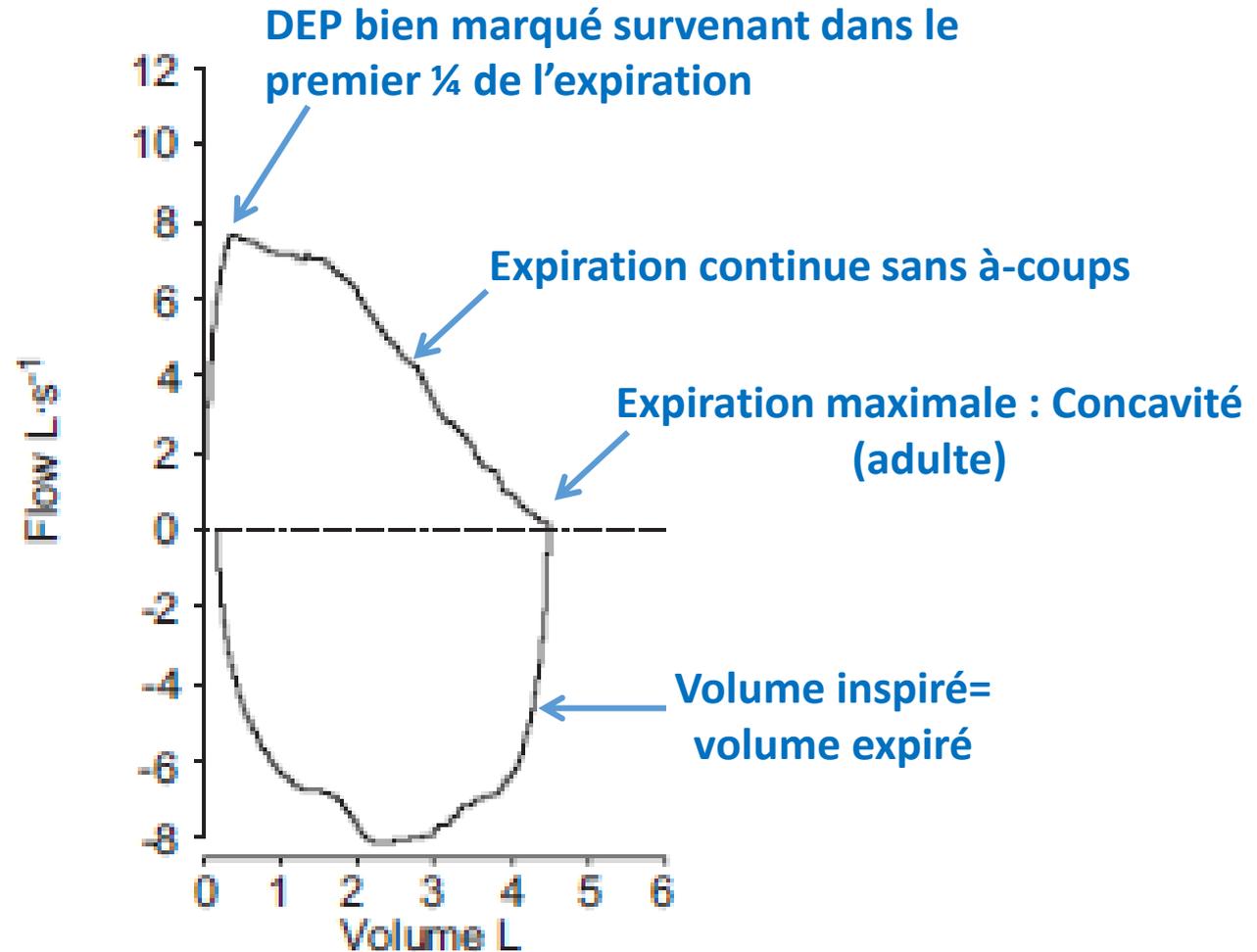
**DEMM25-75** : Débit expiratoire moyen entre 75% et 25% de la CV



# Spirométrie forcée : Contrôle de qualité

L'effort parait maximal

Temps expiratoire > 6sec

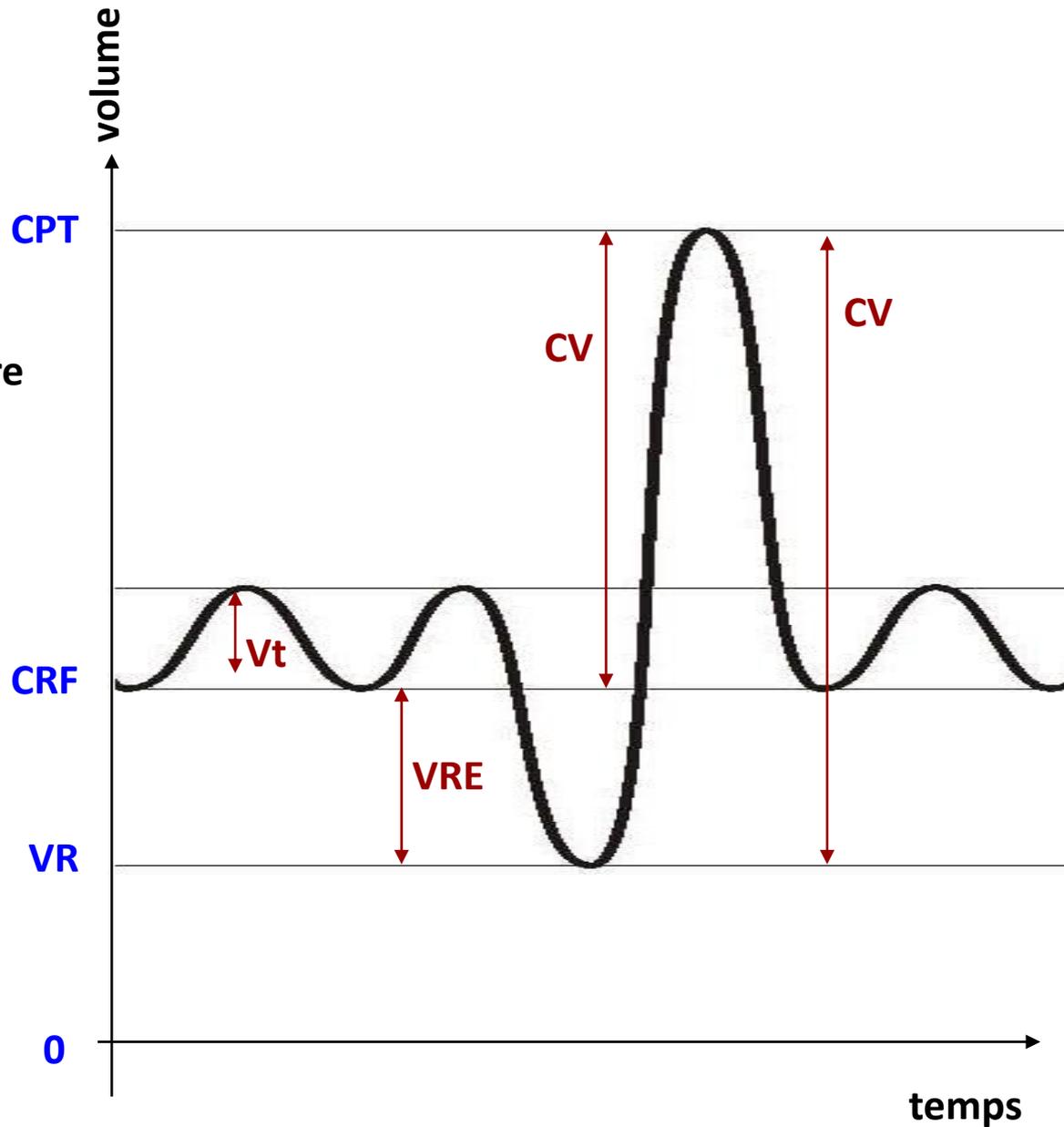


Reproductibilité : Ecart entre les 2 plus grands CVF et VEMS < 150 ml (ou 100 ml si CV < 1 l)

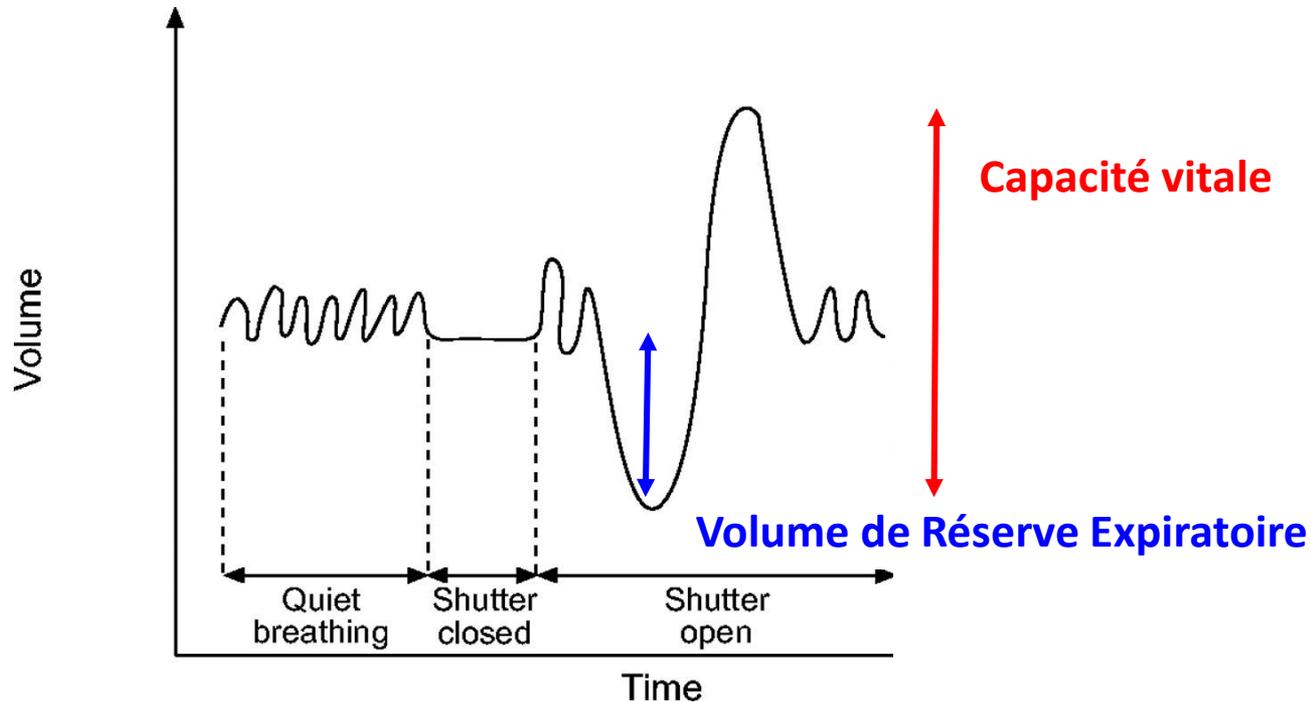
**Une manœuvre expiratoire sous-maximale peut entraîner la surestimation du VEMS**

# 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

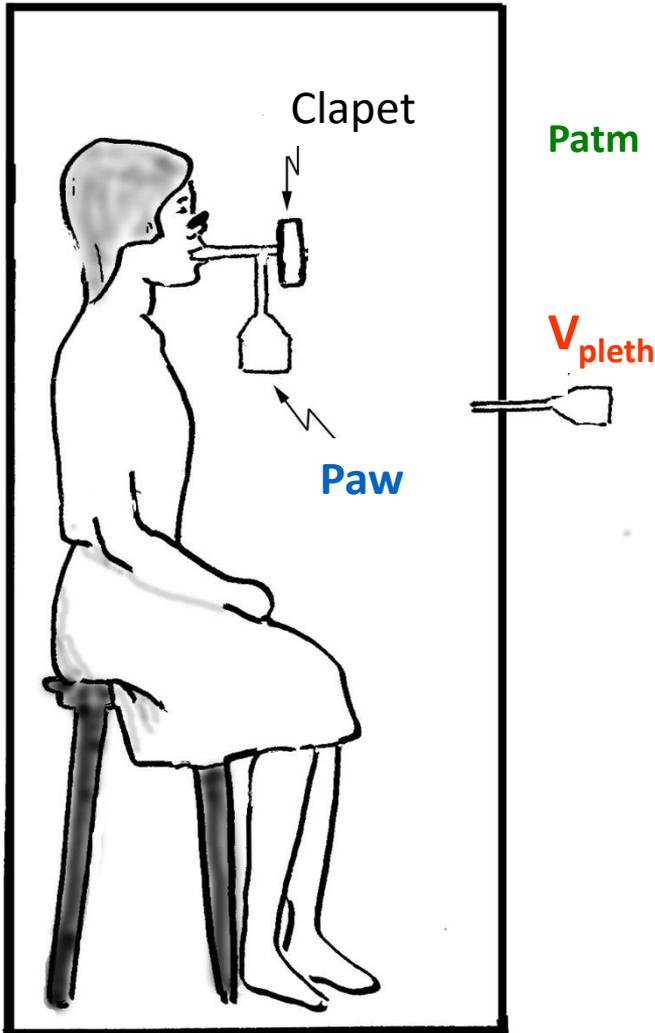


- 1- On mesure la CRF
- 2- On mesure le VRE et la CV par spirométrie
- 3- On calcule

$$VR = CRF - VRE$$

$$CPR = VR + CV$$

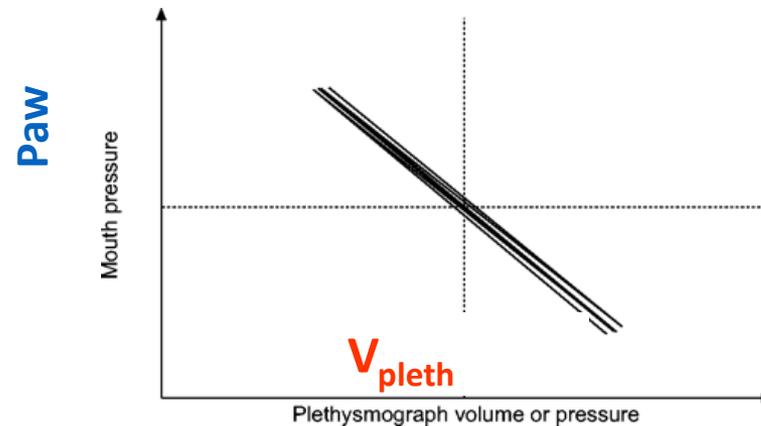
# Pléthysmographie corporelle : Principe



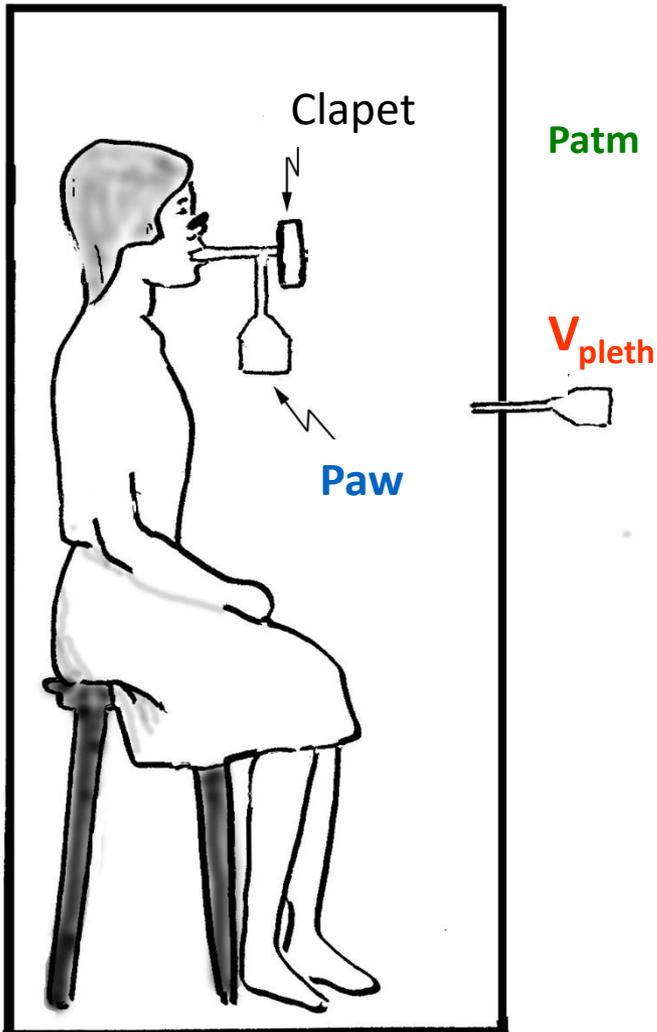
A la CRF, le sujet fait des efforts respiratoires contre un obstacle

On mesure :

- Les variations de pression à la bouche  $\Delta P_{aw}$
- Les variations de volume dans la boîte  $\Delta V_{pleth}$
- La pression atmosphérique  $P_{atm}$



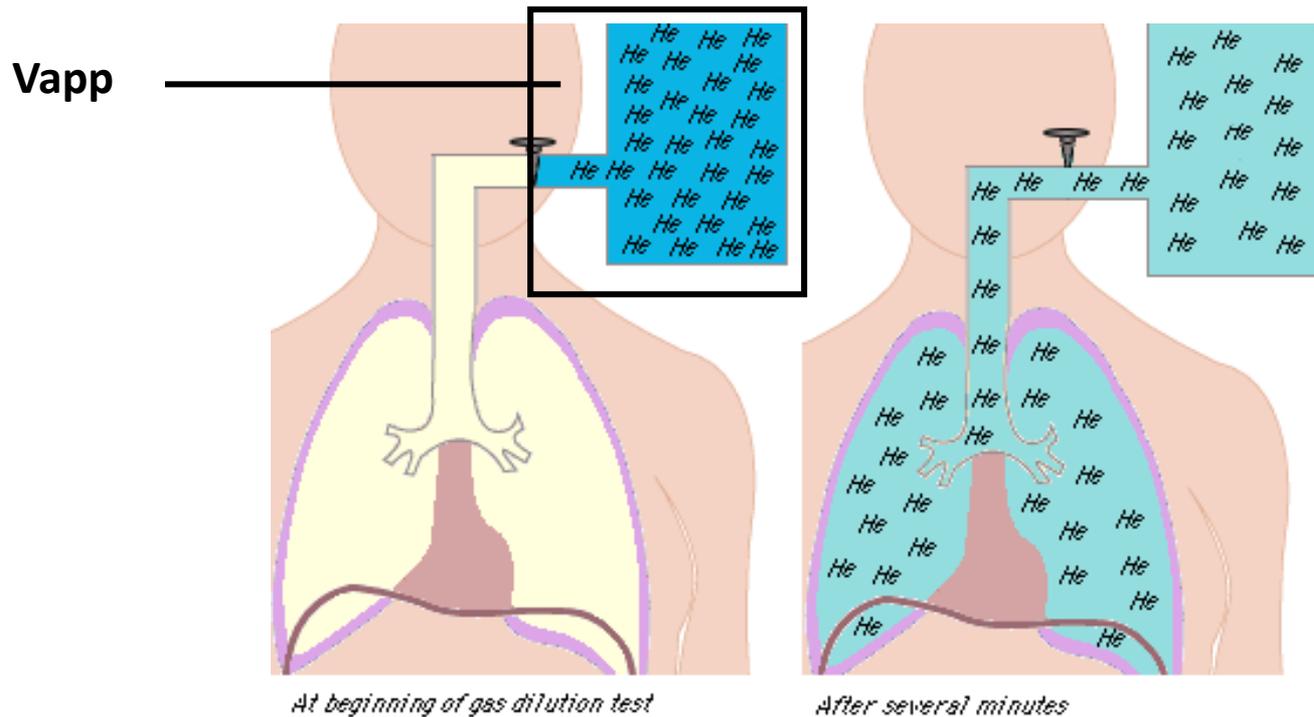
# Pléthysmographie corporelle : Principe



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

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

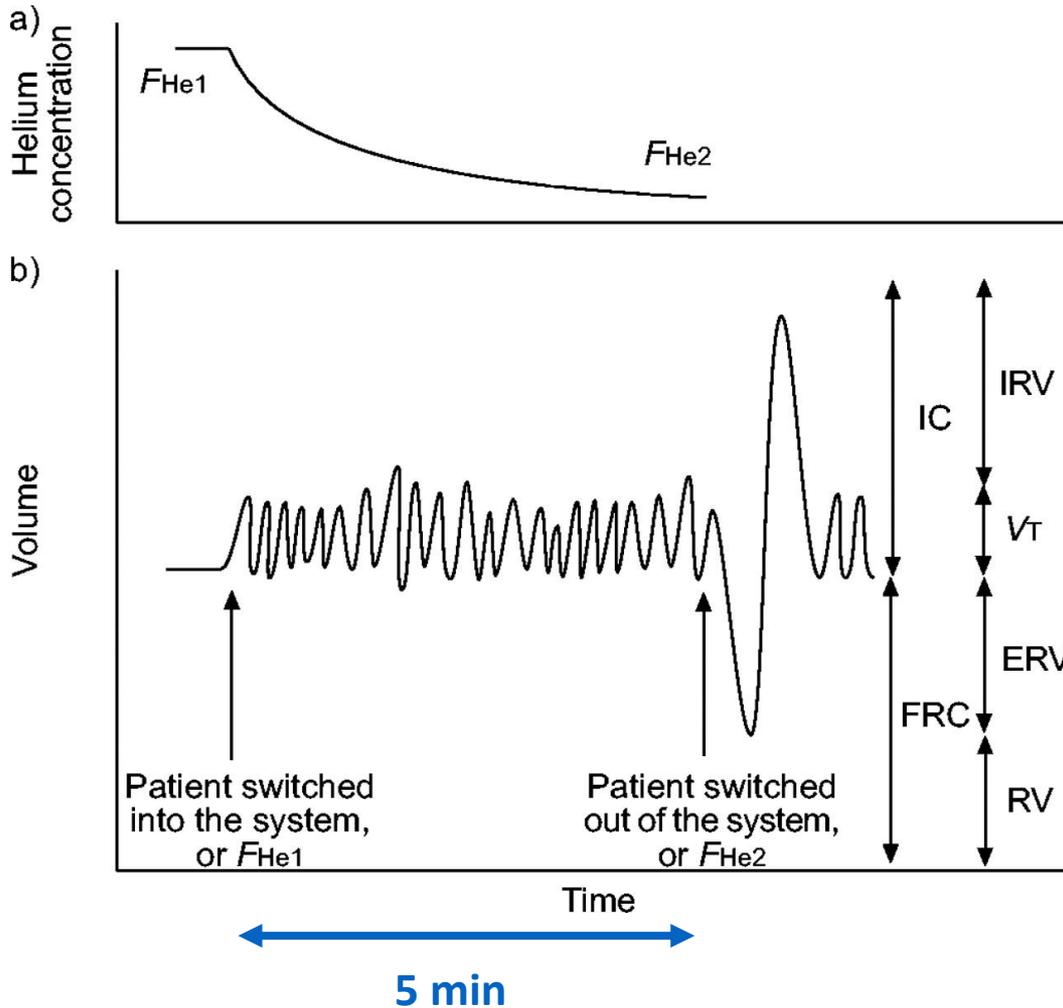
## Mesure de la CRF par dilution de l'Hélium : Principe



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

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

# 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

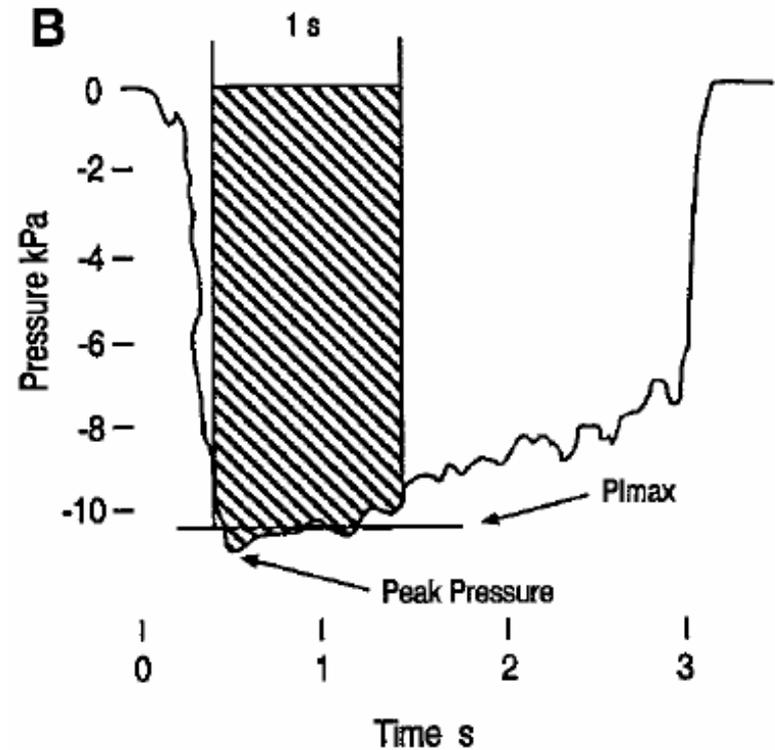
Substance	Réf	Pré	Pré(%)	Post couché	Var%	Post(%)
CVF	3.59	3.12	87	2.15	-31	60
VEMS	2.79	2.44	87	1.65	-32	59
VEMS%CF	77.64	78.21	101	76.51	-2	99
VEMS%CV	75.15	78.21	104	76.51	-2	102
VIMS		2.37		1.65	-31	
DPE	7.58	5.00	66	3.32	-34	44
DEMM	3.08	2.29	74	1.40	-39	45

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<sub>E</sub>max AND P<sub>I</sub>max\*

No.	P <sub>E</sub> max	P <sub>I</sub> 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

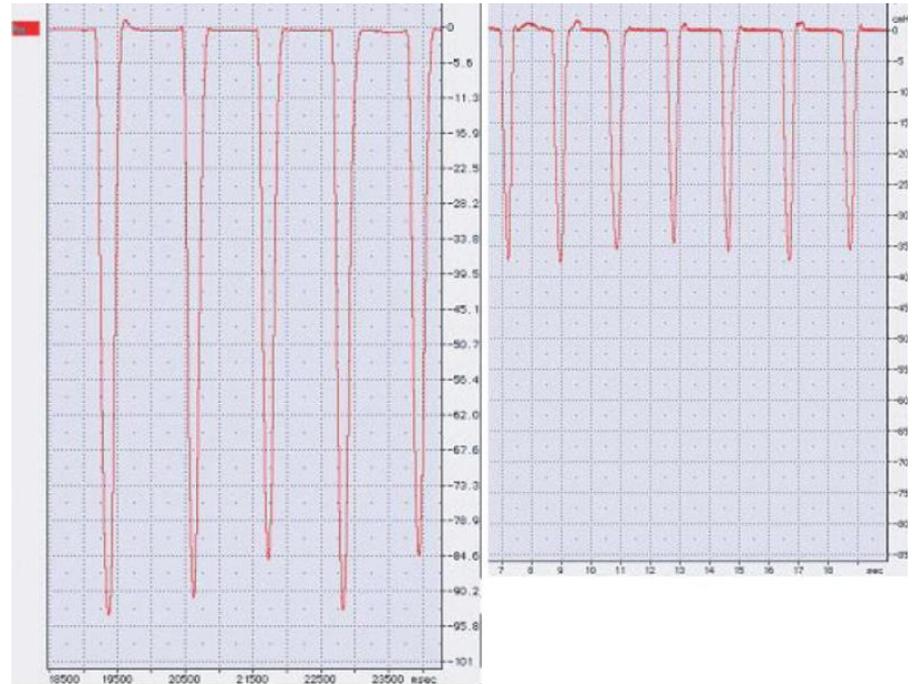
*Definition of abbreviations:* P<sub>E</sub>max = maximum static expiratory pressure; P<sub>I</sub>max = maximum static inspiratory pressure.

\* Values represent kilopascals (1 kPa = 10.19 cm H<sub>2</sub>O), 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)**

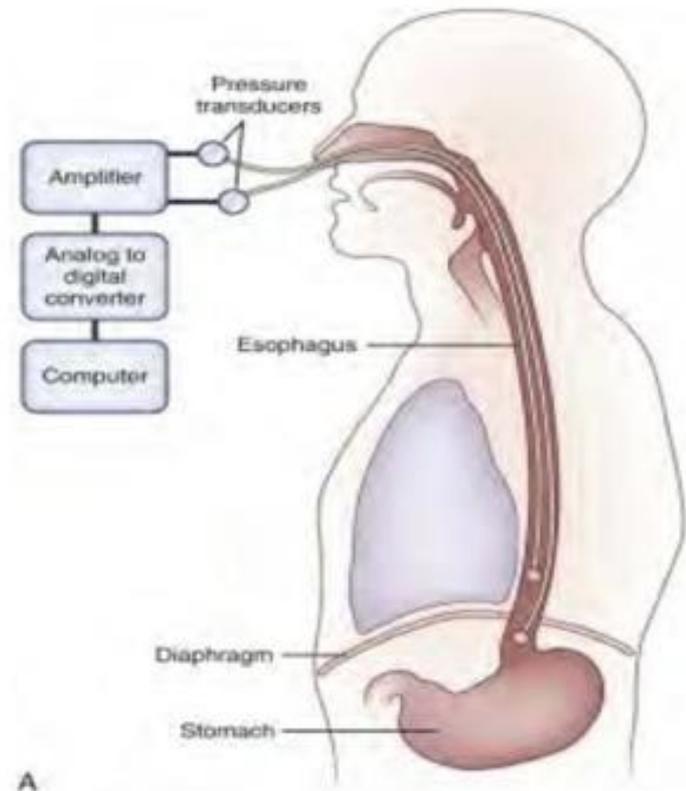


Normal

Faiblesse sévère

# Diagnostic de certitude : Mesure de la pression transdiaphragmatique Pdi

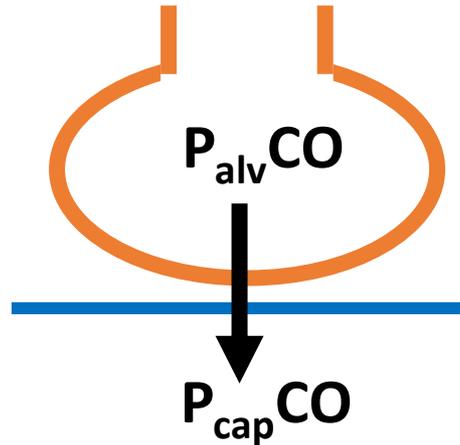
- $P_{di} = P_{\text{gastrique}} - P_{\text{œsophagienne}}$
- Mise en place de capteurs de pression dans l'œsophage et l'estomac
- Manœuvres volontaires
- Stimulation magnétique des racines cervicales
- Combinaison à l'EMG diaphragmatique, à la stimulation électrique des nerfs phréniques...



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

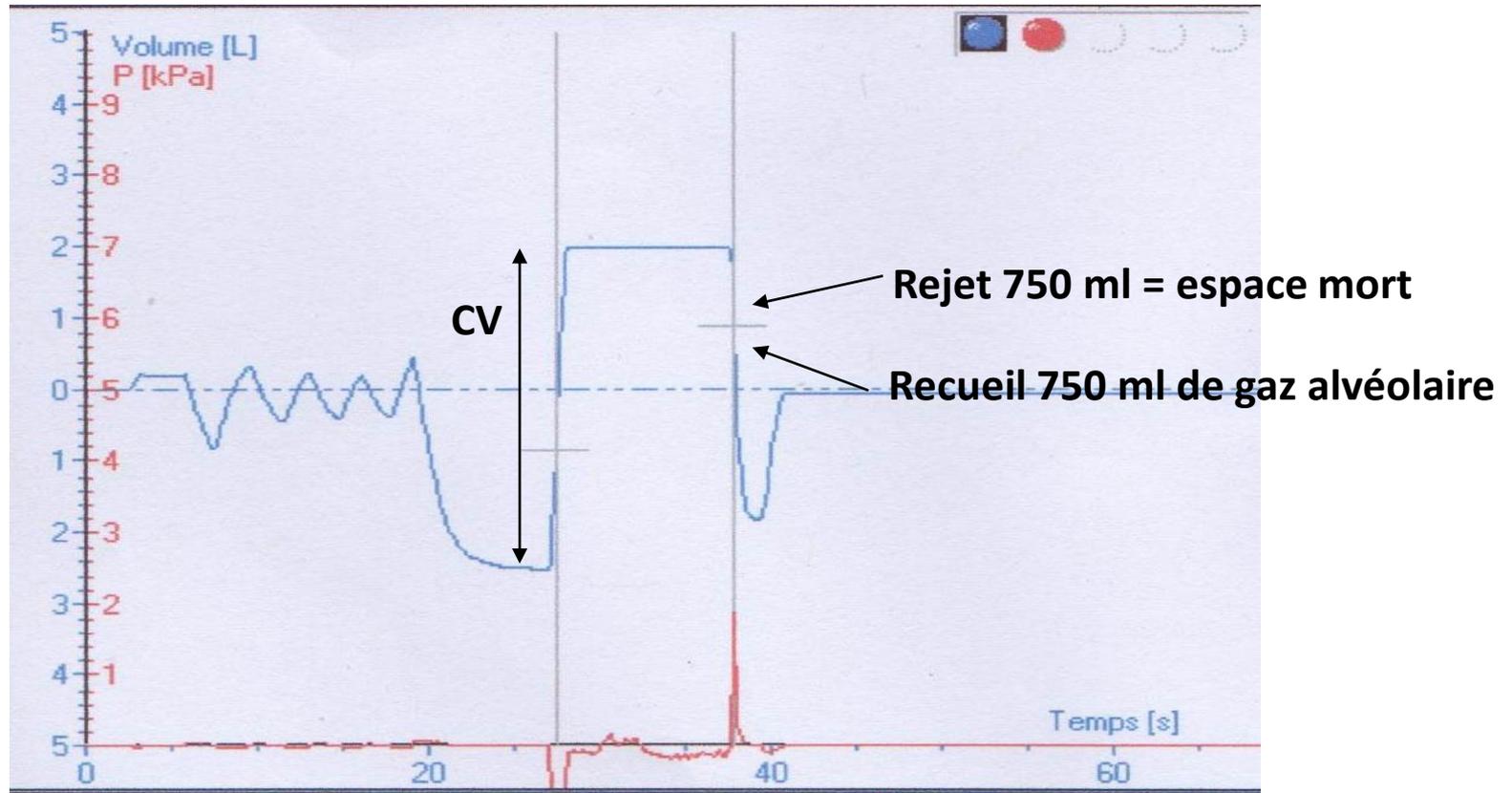
→  $P_{\text{cap}} \text{CO}$  est quasi nul

→  $V_{\text{CO}}$  dépend surtout de  $D_{\text{L}} \text{CO}$

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

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

## 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

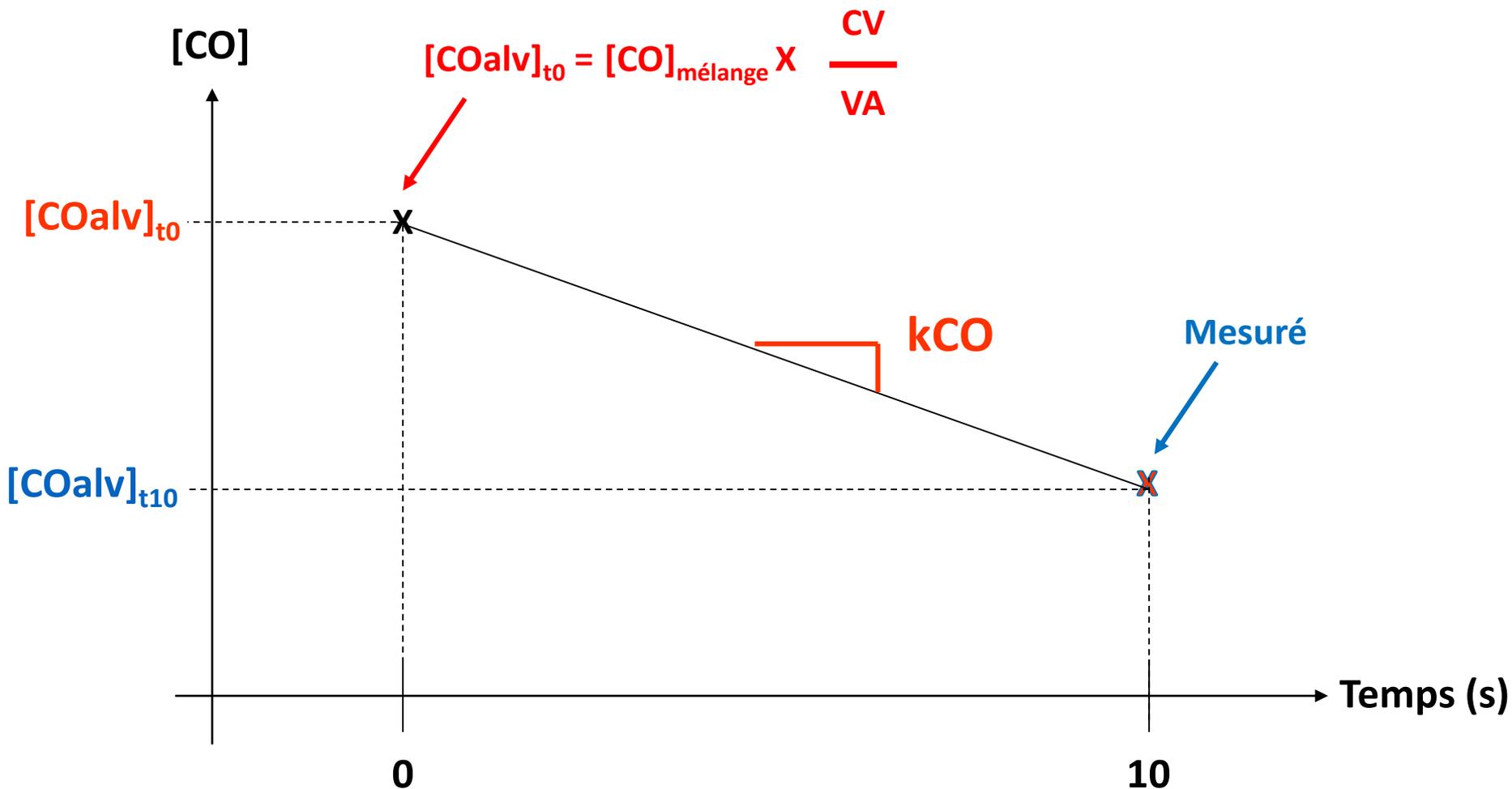
$$VA = \frac{[He]_i \times CV}{[He]_{10s}}$$

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

$$[CO_{alv}]_{t_0} = [CO]_{mélange} \times \frac{CV}{VA}$$

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

# Calcul du coefficient de transfert du CO (kCO)

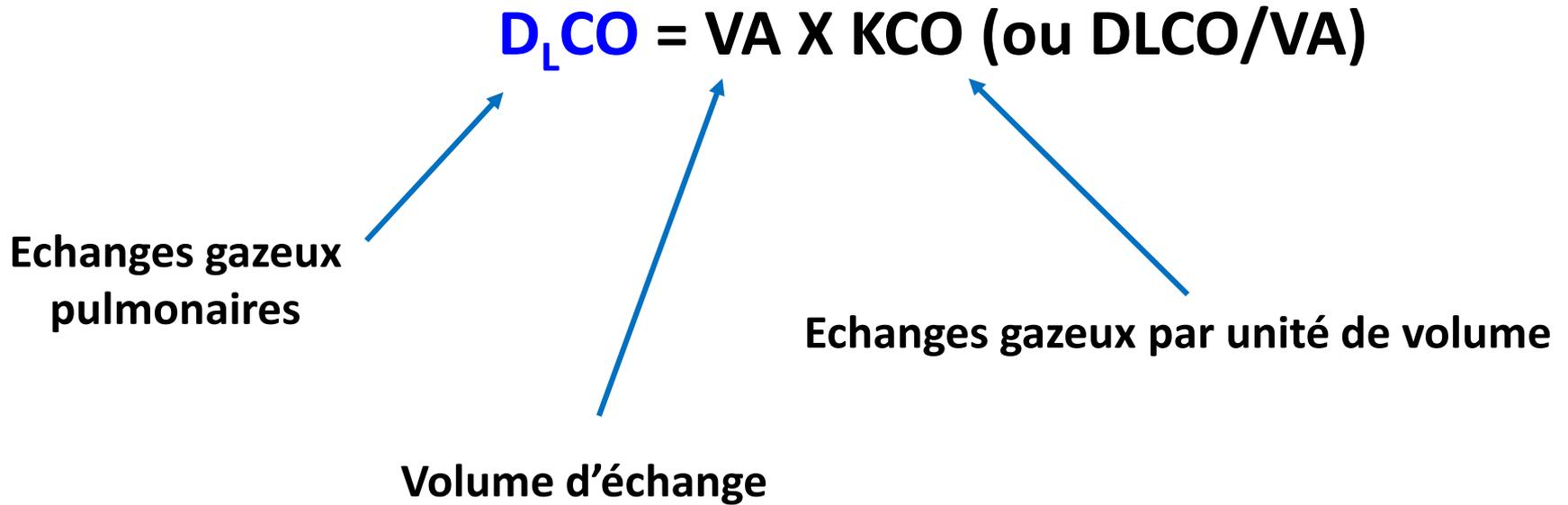


$kCO = \text{quantité de CO} / \text{volume} / \text{temps} / \text{Qté d'hémoglobine}$

## 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

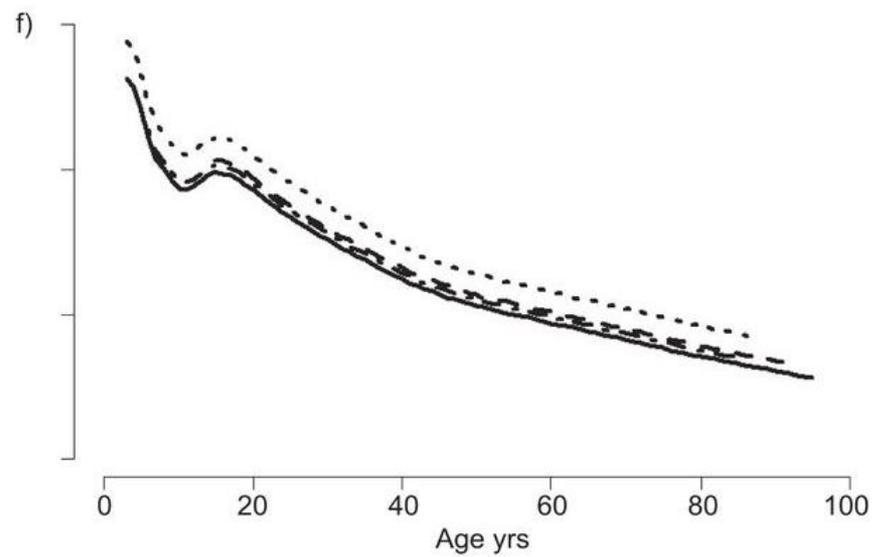
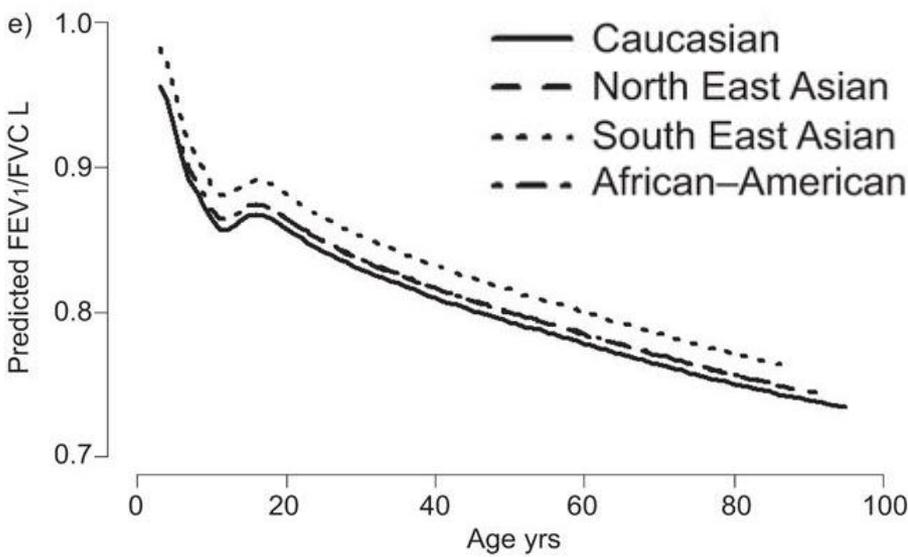
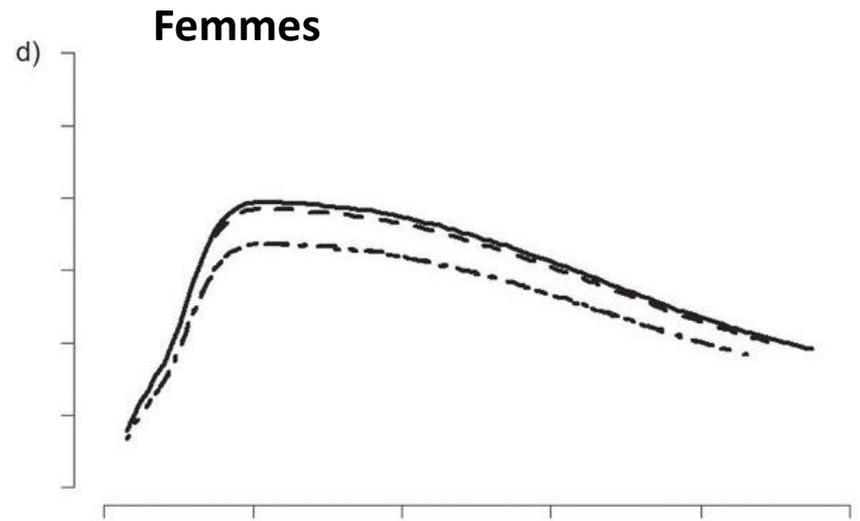
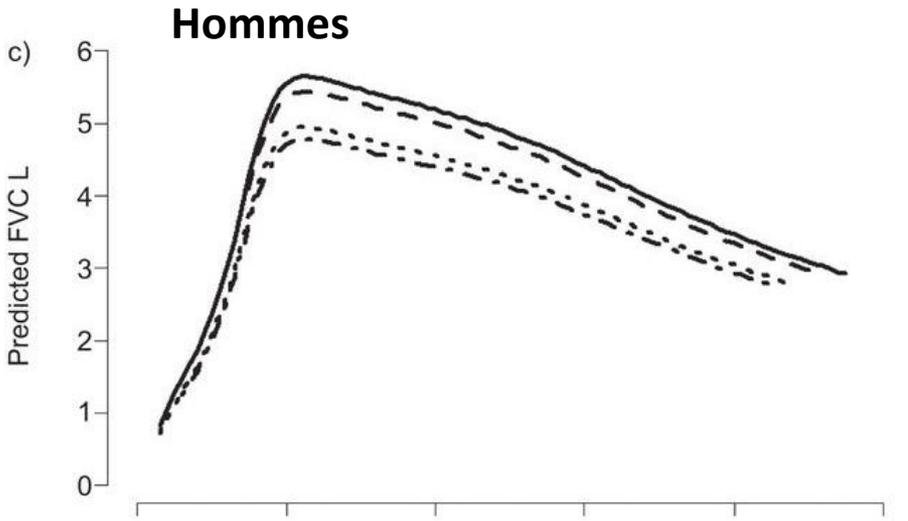
# Plan de l'exposé

## **3- Les bases de l'interprétation**

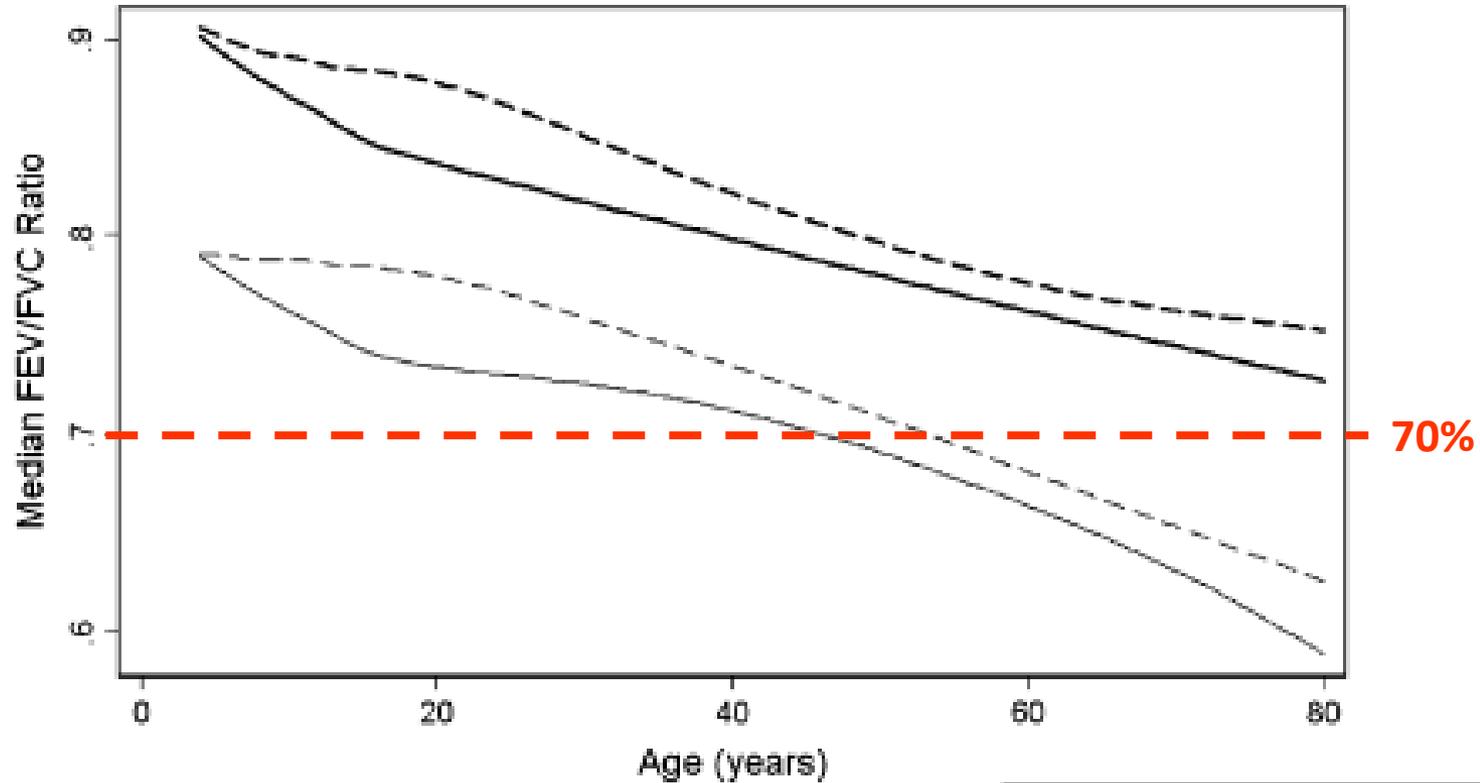
**-Les valeurs de référence**

**-Les grands syndromes**

# Fonction respiratoire et données anthropométriques



# Évolution de la fonction respiratoire au cours de la vie



5<sup>e</sup> percentile : Définition statistique de la normalité



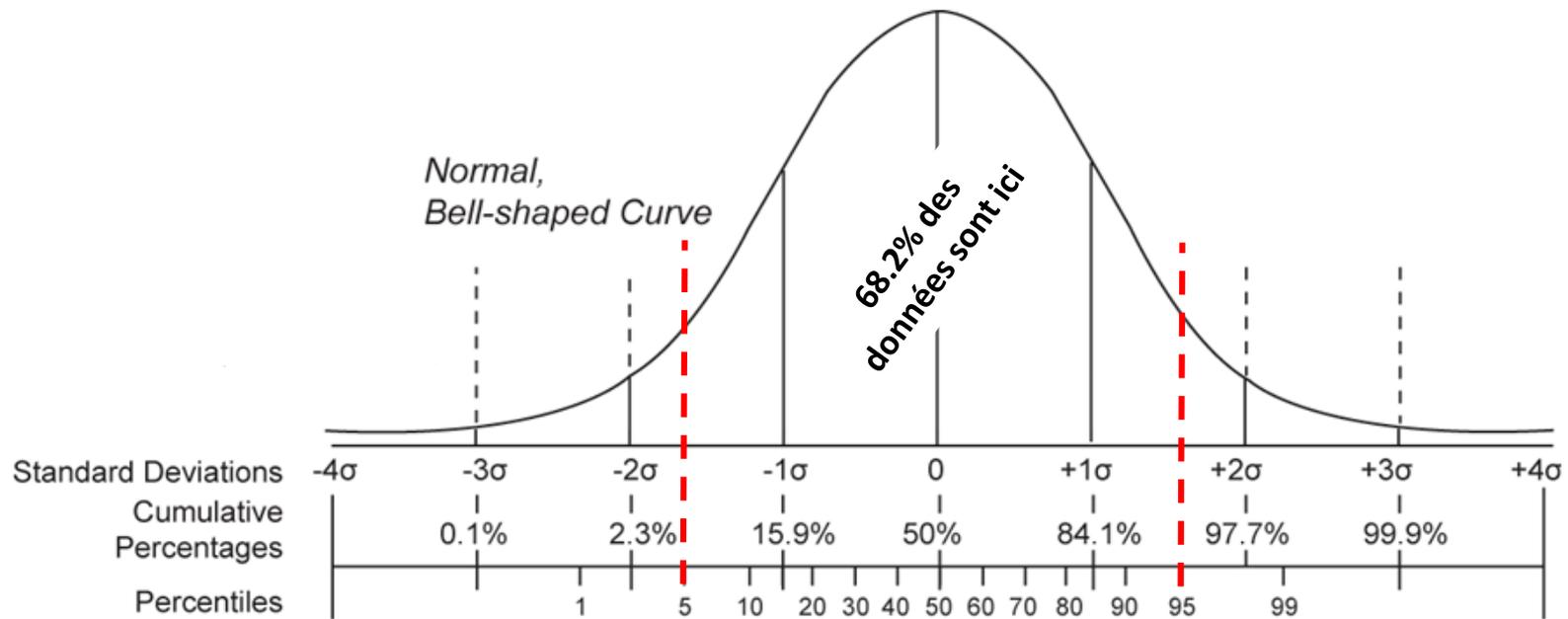
## Comment interpréter ?

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<sup>e</sup>-95<sup>e</sup> percentiles des données**

**On considère traditionnellement les valeurs comprises entre le 5<sup>e</sup> et le 95<sup>e</sup> 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<sup>e</sup>-95<sup>e</sup> percentiles correspondent environ à 80-120% de la valeur prédite**

## Comment exprimer de façon normalisée un paramètre EFR ?

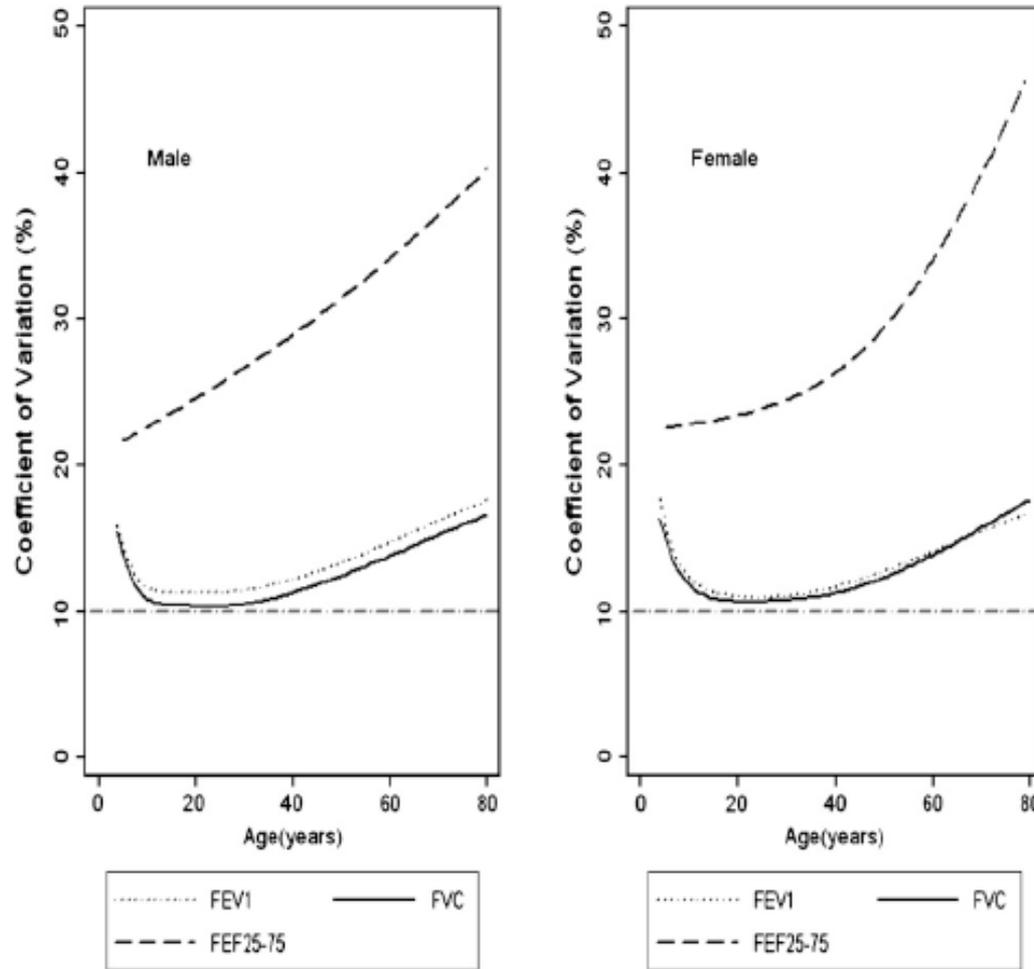
- **Approche traditionnelle** : En pourcentage de la valeur prédite (moyenne de la population)  
Avantage : Se prête à un raisonnement physiopathologique
- **Z-score** = (Valeur mesurée – valeur moyenne dans la population) / écart-type de la population  
Avantage : Précise finement le caractère statistiquement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



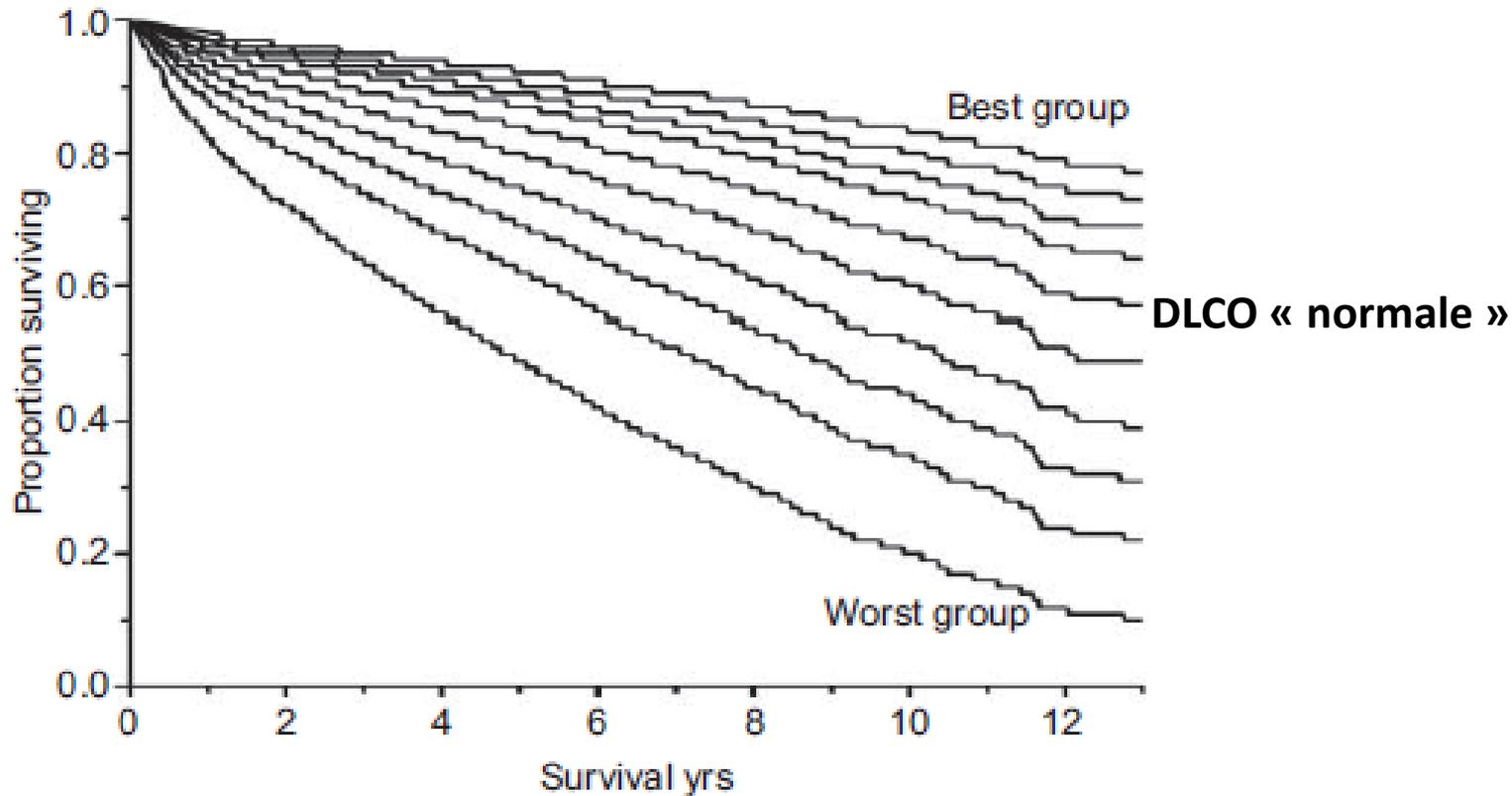
# Grande variabilité inter-individuelle aux âges extrêmes de la vie



*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 FEV<sub>1</sub> is near 10% only over the age range of 15 to 35 years. The variability at other ages and for FEF<sub>25-75</sub> at all ages is considerably greater.

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

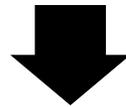
# Existe-t-il une limite de la normale ?



**FIGURE 1.** Survival curves for each of the standardised residuals of single-breath diffusing capacity of the lung for carbon monoxide ( $DL_{CO}SR$ ) groups from the Cox regression using, as survival predictors, the  $DL_{CO}SR$  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**