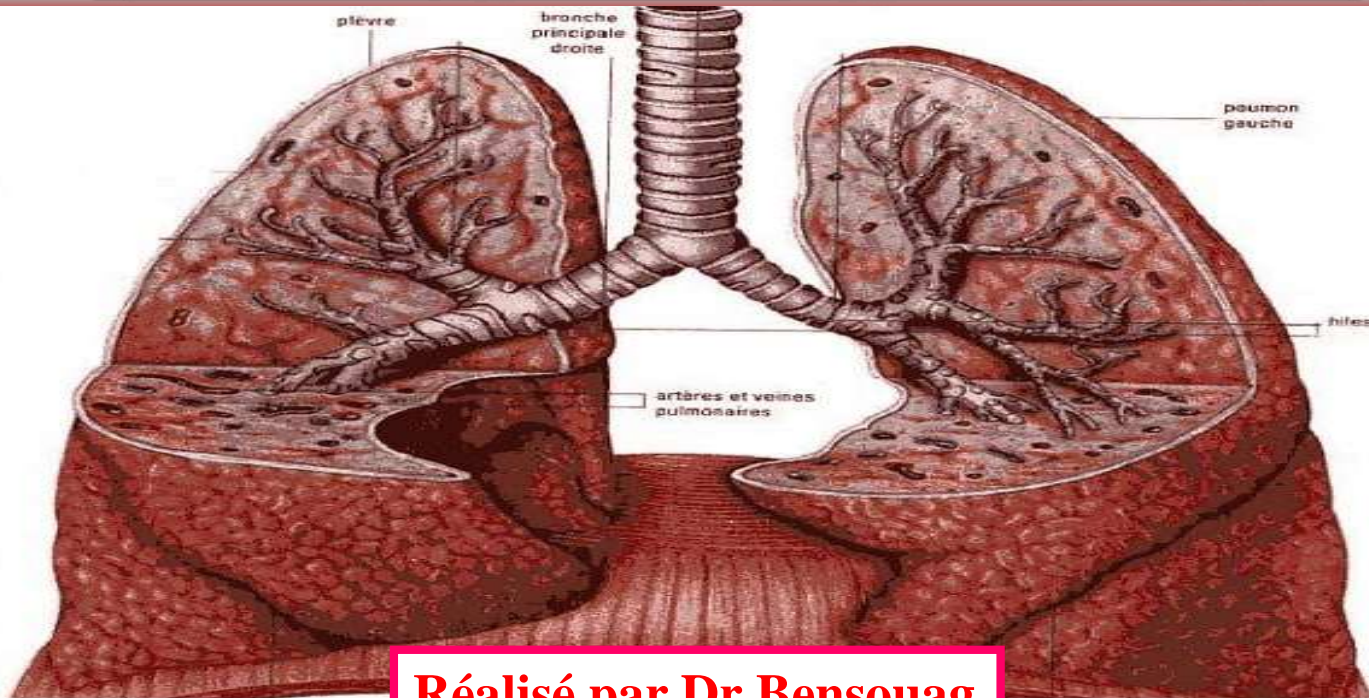




**Faculté de Médecine**

# **PHYSIOLOGIE RESPIRATOIRE**



**Réalisé par Dr Bensouag**

# INTRODUCTION 1

- -La fonction principale du poumon est de permettre des échanges gazeux, c'est-à-dire :
- - à l'oxygène de l'air atmosphérique de pénétrer dans le sang veineux et au gaz carbonique d'en sortir.
- -En plus de cette fonction hématosique, le poumon exerce des fonctions d'épuration (élimination des particules pénétrant dans l'arbre aérien)
- et des fonctions métaboliques (rôle particulier joué par les cellules endothéliales).

# INTRODUCTION 2

- **La fonction hématosique est assurée d'abord**
- **par des échanges de gaz entre l'air ambiant et les alvéoles (ventilation),**
- **puis par le passage de ces gaz à travers la membrane alvéolo- capillaire (diffusion)**
- **enfin par le transport de ces gaz dans le sang (circulation).**

**Ces 3 étapes vont être analysées successivement**

# Le système respiratoire

- Apport d'O<sub>2</sub> et rejet de CO<sub>2</sub>
- Régulation du PH

Mise en jeu de structure anatomiques précises :

- Système respiratoire
- Système circulatoire

## **I- Anatomie du système respiratoire**

- 2 zones à distinguer :
  - ✓ Zone de conduction
  - ✓ Zone respiratoire

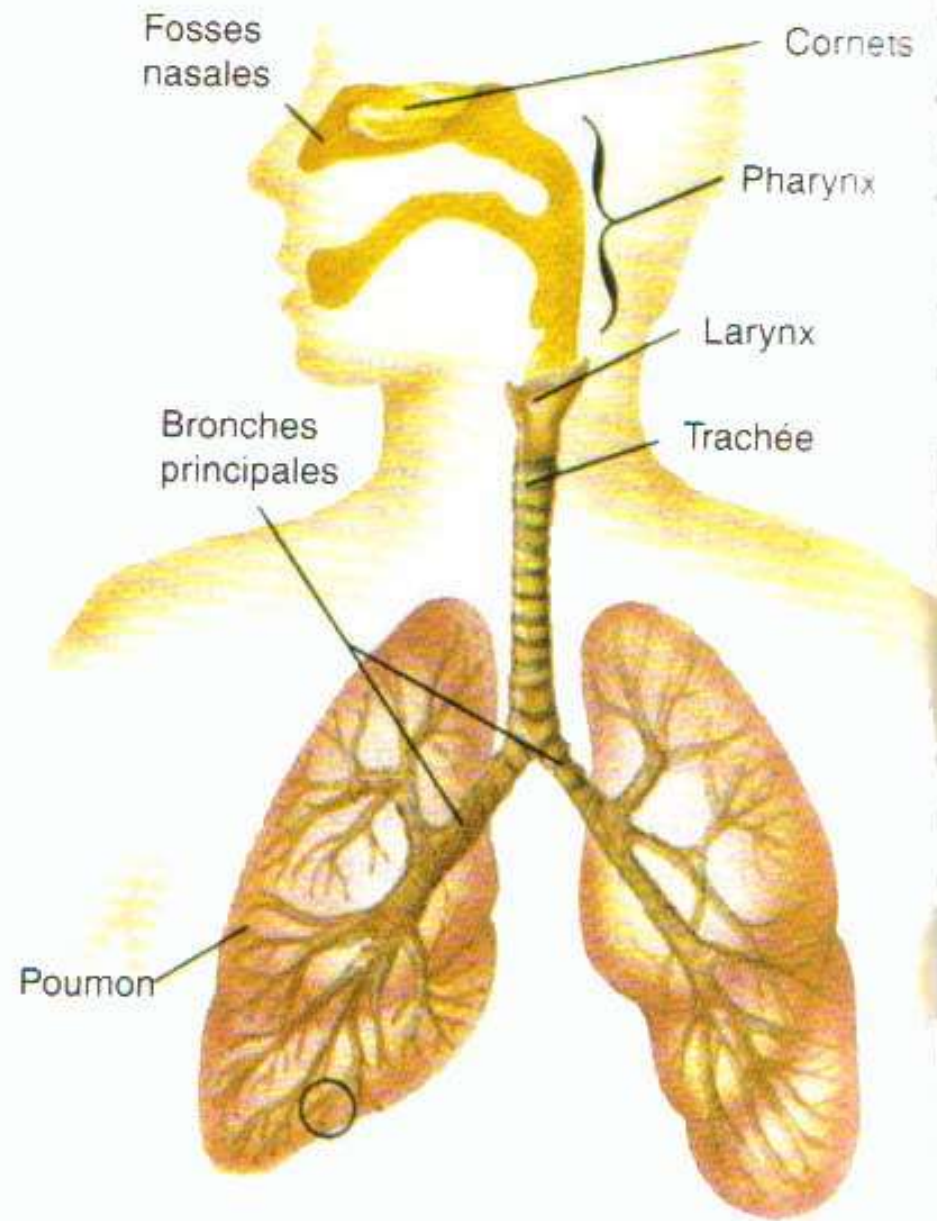
## A- Zone de conduction

### • Du nez aux bronchioles

- ✓ Nez, cavité nasale
- ✓ Pharynx, Larynx
- ✓ Trachée
- ✓ Bronches → Bronchioles

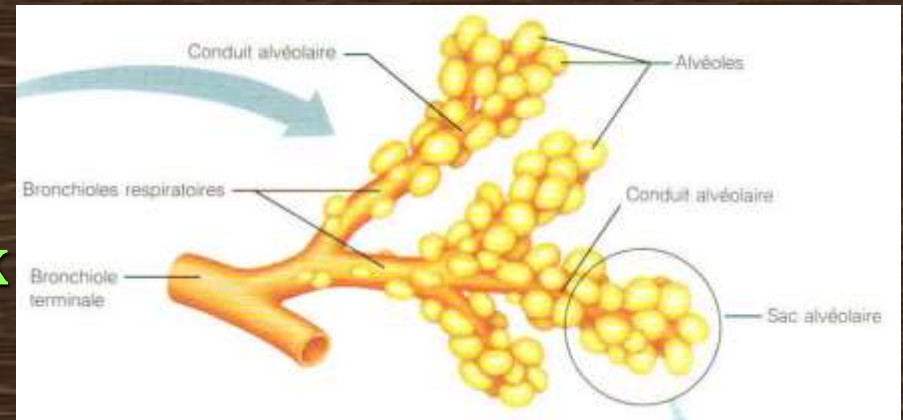
### • Fonctions:

- ✓ Acheminer l'air
- ✓ Filtrer l'air
- ✓ Réchauffer l'air
- ✓ Humidifier l'air



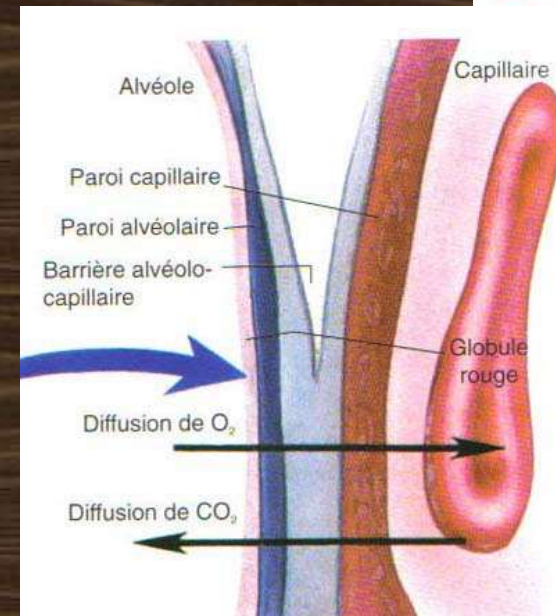
## B- Zone respiratoire

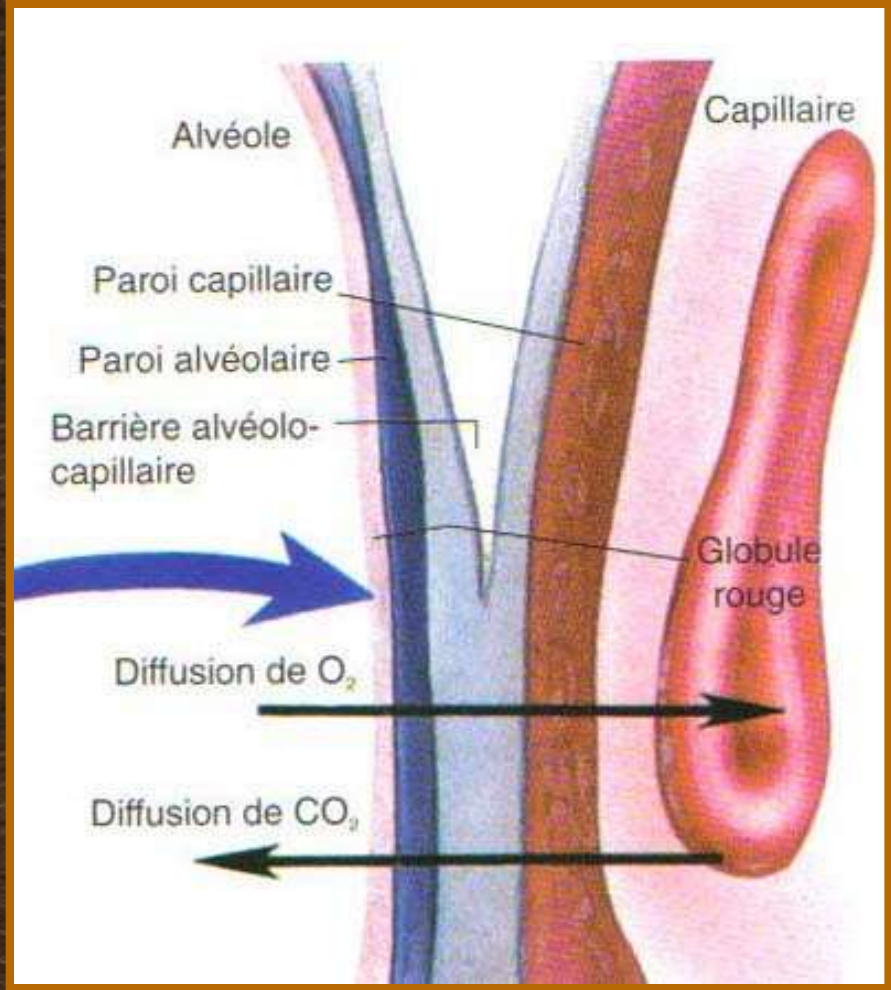
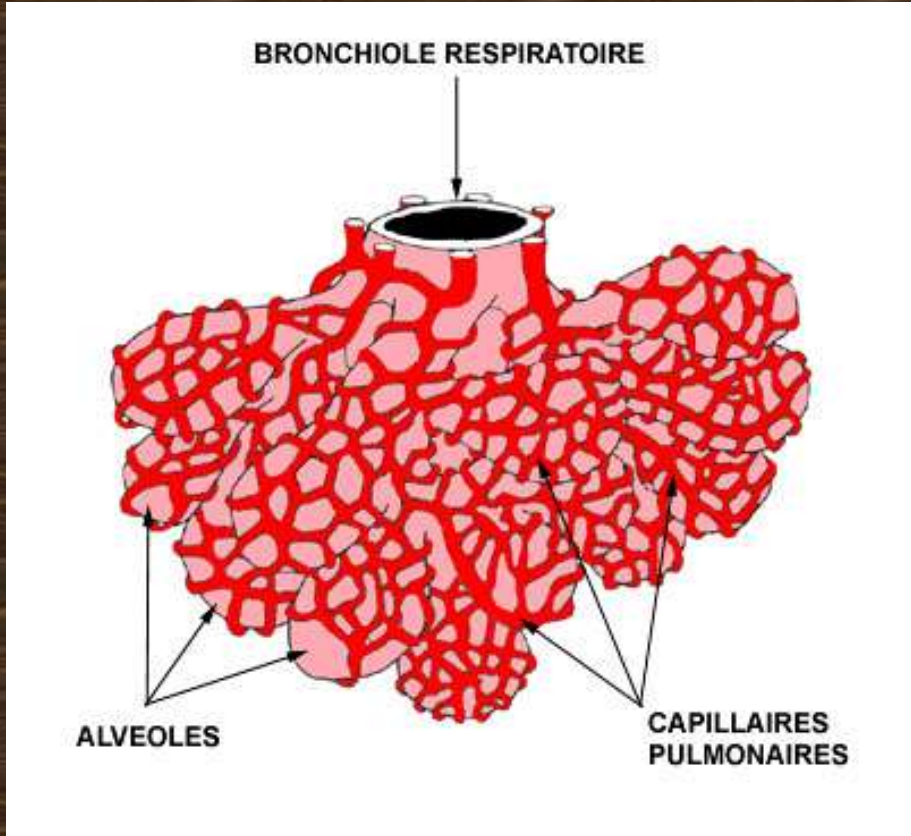
- Fonctions: Echanges gazeux
- ✓ Bronchioles terminales
- ✓ Alvéoles et sacs alvéolaires



## C- Membrane alvéolo-capillaire

- 3 couches constituent la MAC:
  - ✓ La mb alvéolaire
  - ✓ Paroi capillaire
  - ✓ Lame basale





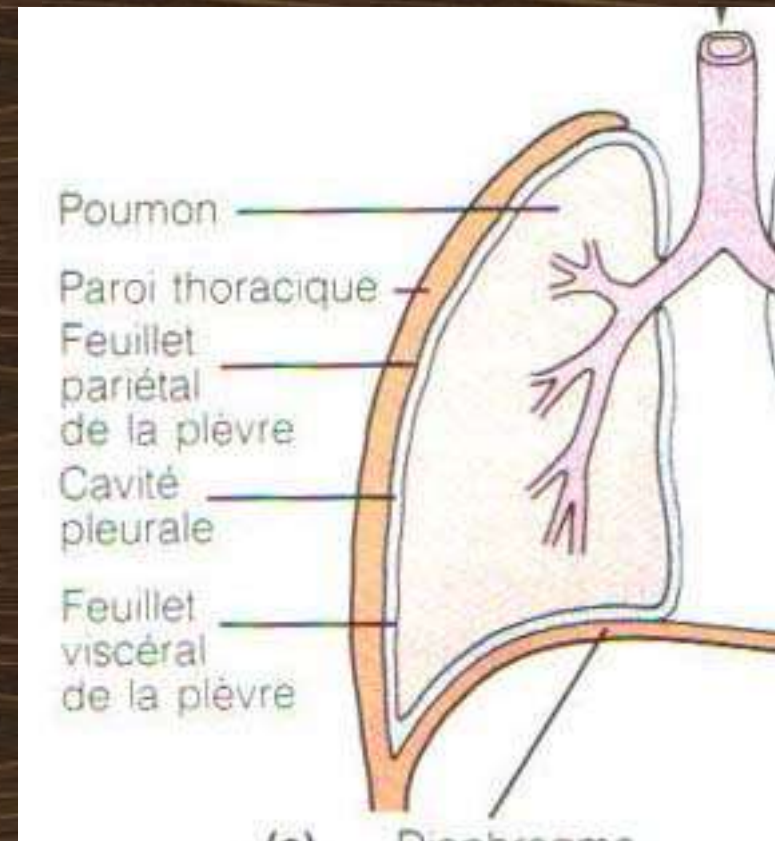
100 m<sup>2</sup> de surface d'échange



**Membrane alvéolo-capillaire**

## E- Poumon et Plèvre

- Chaque poumon est recouvert de la plèvre
  - ✓ Feuillelet viscéral
  - ✓ Feuillelet pariétal
  - ✓ Cavité pleurale



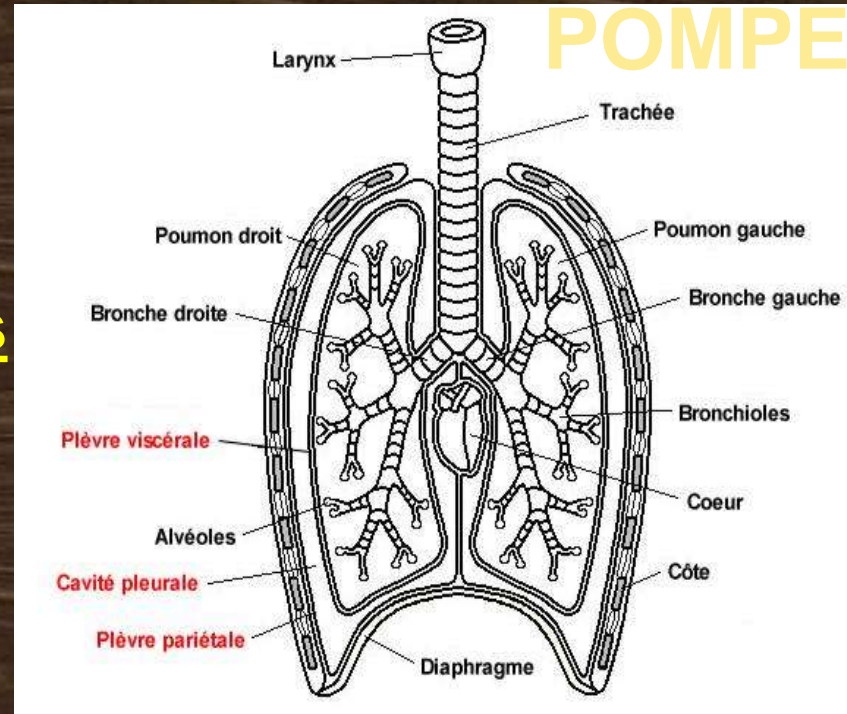


# Mécanique ventilatoire

- C'est quoi?
- *L'étude des fonctions, des éléments, des forces qui permettent ou qui s'opposent à l'écoulement de l'air par les voies aériennes.*
  - *Elle est basée sur la loi de Boyle-Mariotte:*  
$$P \times V = \text{constante.}$$
*En clair, l'air va toujours des hautes pressions vers les basses pressions*

# Système respiratoire :

**POMPE**



Forces motrices

Forces résistantes

## Mécanique ventilatoire :

Phénomènes qui vont l'air alvéolaire

Permettre  
ou  
S'opposer

au renouvellement de

# Plan

I. Introduction

II. Mécanique élémentaire : cycle respiratoire

III. Muscles respiratoires

IV. Propriétés statiques de l'appareil respiratoire

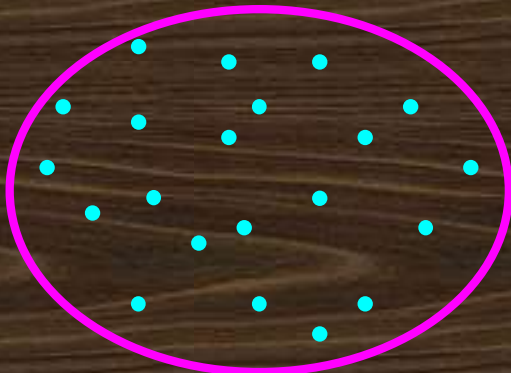
V. Propriétés dynamiques de l'appareil ventilatoire

# I. Introduction

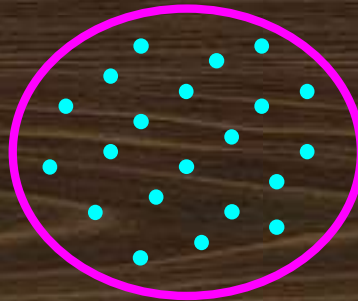
- Mécanique ventilatoire
- permet de renouveler l'air dans les alvéoles
- 2 phases:
  - ✓ La phase inspiratoire
  - ✓ La phase expiratoire

## A- Principes physiques

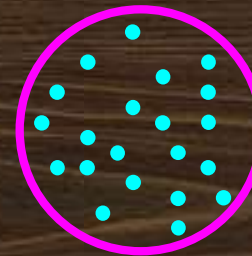
### Relation volume/pression



Si  $V \nearrow$ ,  $p \searrow$



$V, p$

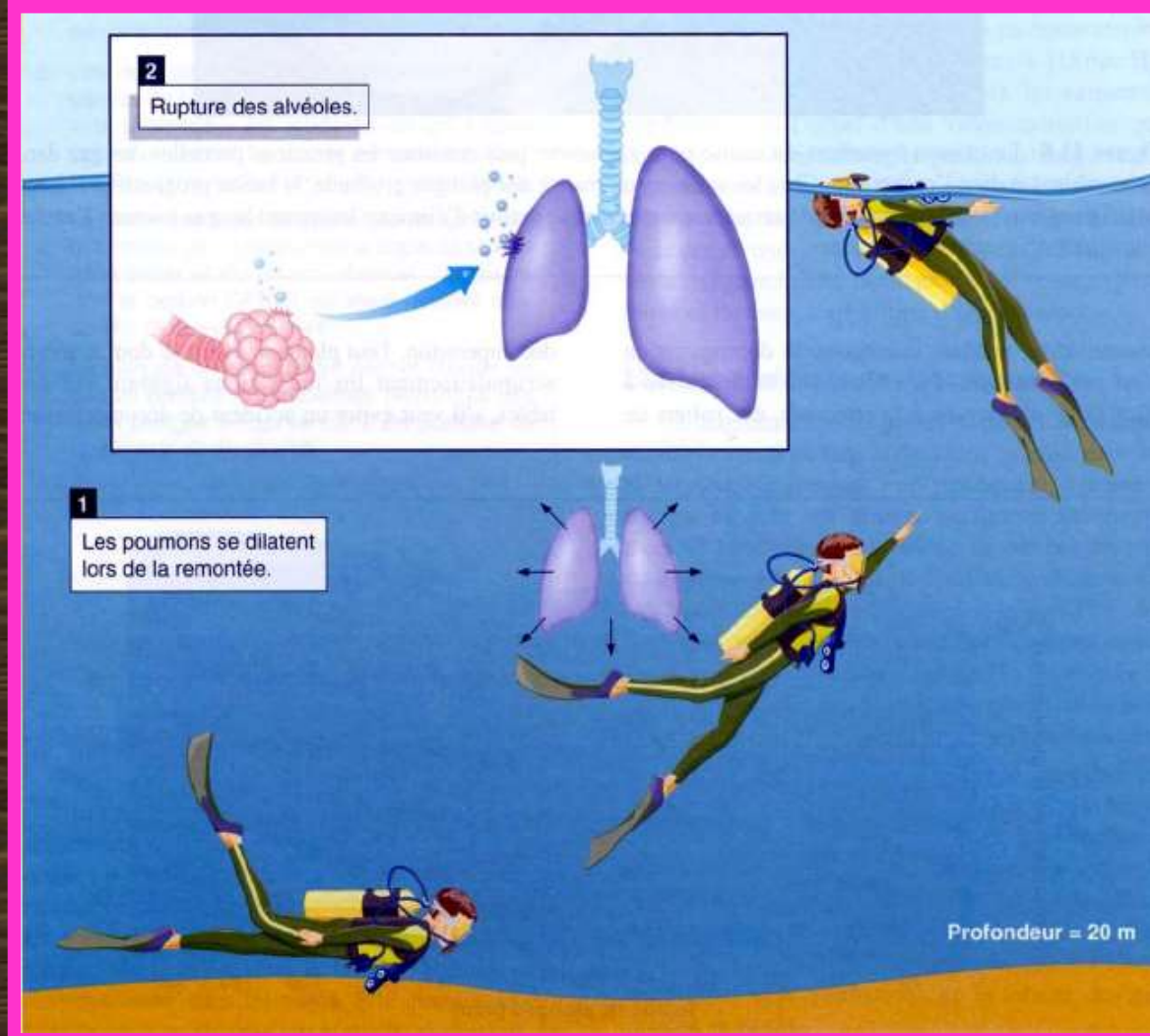


Si  $V \searrow$ ,  $p \nearrow$

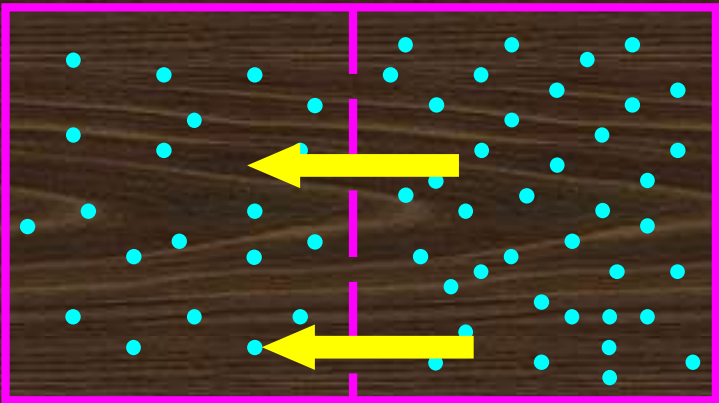
# Loi de Boyle Mariotte



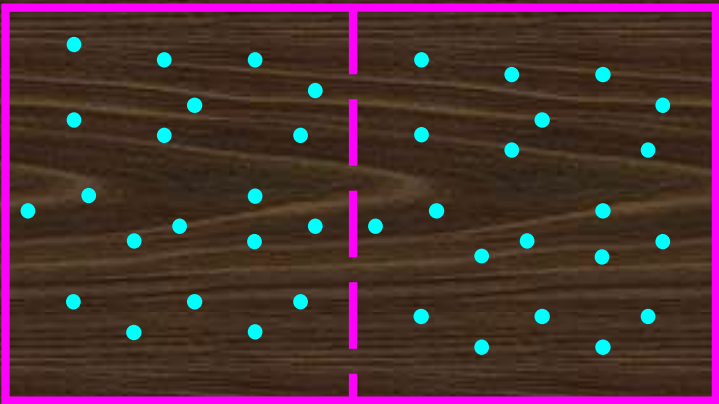
$$P V = Cte$$



**Ecoulement des gaz des zones  
De hte p vers zone basse p**



$$P_1 = P_2$$



I. Introduction

II. Mécanique élémentaire : cycle respiratoire

II.1. Description des phénomènes mécaniques

II.1.1. Inspiration

II.1.2. Expiration

II.2. Relation entre forces motrice et résistante

III. Muscles respiratoires

IV. Propriétés statiques de l'appareil respiratoire

V. Propriétés dynamiques de l'appareil ventilatoire

## II.1 Les phénomènes mécaniques du cycle respiratoire

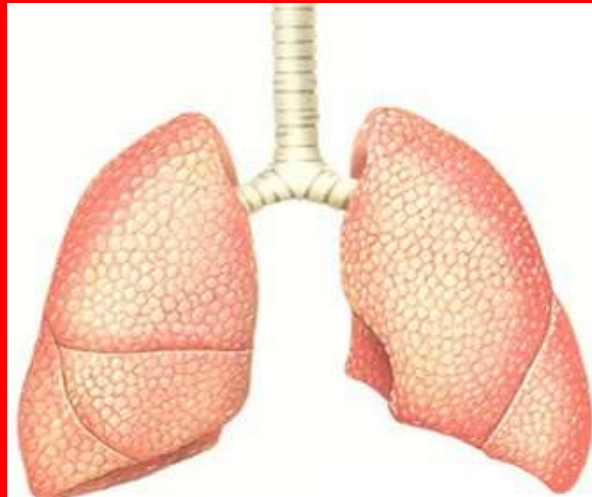
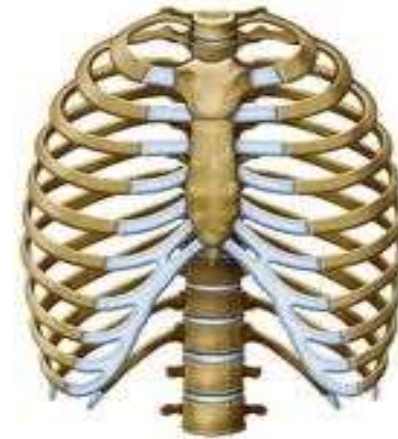
- **Fin d'expiration** :  $P_A = P_B$

*Les forces de distension élastique de la cage thoracique et de rétraction élastique du poumon sont égales et de sens inverse.*

- *Il n'y a pas de débit : la pression alvéolaire s'égalise avec la pression barométrique*



Les forces de distension élastique de la cage thoracique et de  
rétraction élastique du poumon



## *Au début du cycle :*

- *L'INSPIRATION est provoquée par la traction des muscles Inspiratoires.*
- *Le volume pulmonaire augmente, ce qui fait diminuer la pression alvéolaire.  
La pression alvéolaire devient inférieure à la pression barométrique  $PA < PB$ : L'air se dirige des hautes vers les basses pressions et donc entre dans les poumons.,*

## C- Phase inspiratoire

✓ 500ml, Volume courant ( $V_c$ )

*Contraction des m. insp.* (Diaphragme + Intercostaux ext.)



*Si inspiration forcée:*  
Scalènes, SCM, pectoraux

➤ *Volume cage thoracique*



➤ *Volume pulmonaire*



➤ *pression intraalvéolaire ( $p_{alvéolaire} < p_{atm}$ )*



*Ecoulement de l'air des zones  
de htes p (env) vers zone basses p (poumons)*

# Forces en présence à l'inspiration

- -Forces motrices :

- les muscles inspiratoires

- -Forces résistantes :

- l'élasticité du système respiratoire

- les débits dans les voies aériennes

- l'inertie du système respiratoire

# L'EXPIRATION

- *Elle est due à la relaxation des muscles inspiratoires.* -  
*Le volume pulmonaire diminue ce qui fait augmenter la pression alvéolaire.* -  
*La pression alvéolaire devient supérieure à la pression barométrique*
- $PA > PB.$   
*le poumon se vide*

## *D- Phase expiratoire*

✓ *phénomène passif*

*Relâchement des muscles inspiratoires*

*Sauf si expiration forcée:  
Abdominaux, Intercostaux Int*



↘ *Volume alvéolaire (élasticité pulmonaire)*



↗ *pression intrapulmonaire (palvéolaire > patm )*

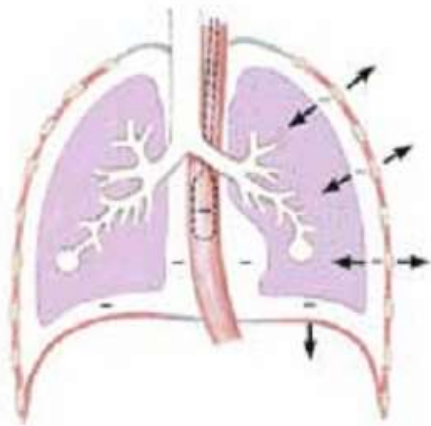


*Ecoulement de l'air hors des poumons*

# Forces en présence à l'expiration

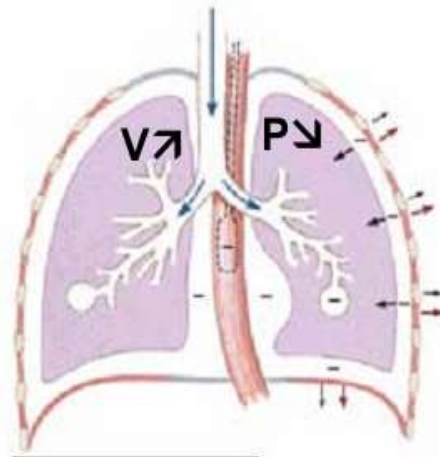
- Force motrice :
  - le retour élastique du système respiratoire
- Forces résistantes
  - les débits dans les voies aériennes  
(résistance plus importante qu'à l'inspiration )
  - l'inertie du système respiratoire

$PA = PB$



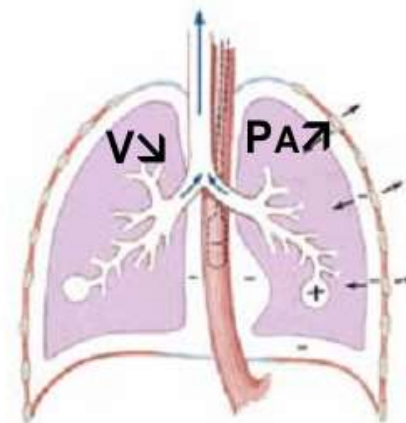
Repos en fin d'expiration

$PA < PB$



Inspiration

$PA > PB$



Expiration

- ✓ Relaxation muscles inspiratoires
- ✓ Vol. pulm.  $\downarrow$  donc P.alv.  $\uparrow$
- ✓ P.alv. devient  $>$  P.bar. : les poumons se vident.



# Plan

I. Introduction

II. Mécanique élémentaire : cycle respiratoire

III. Muscles respiratoires

IV. Propriétés statiques de l'appareil respiratoire

V. Propriétés dynamiques de l'appareil ventilatoire

### III. Muscles respiratoires

**Muscles squelettiques - Adaptés à la ventilation**

**Capacité oxydative + densité en capillaires \*\*\*\*\***

**QS \*\*\*\*\***

**Typiquement endurants**

**Contraction rythmique durant toute la vie**

# III. Muscles respiratoires

## ■ Les muscles inspiratoires

-Le diaphragme.

■ -Les inter-costaux externes et internes (parasternaux).

-Les scalènes.

-Les accessoires

## ■ Les muscles expiratoires

-Les intercostaux internes (partie latérale) .

■ -Les abdominaux.

# 1. Diaphragme : Muscle inspiratoire principal

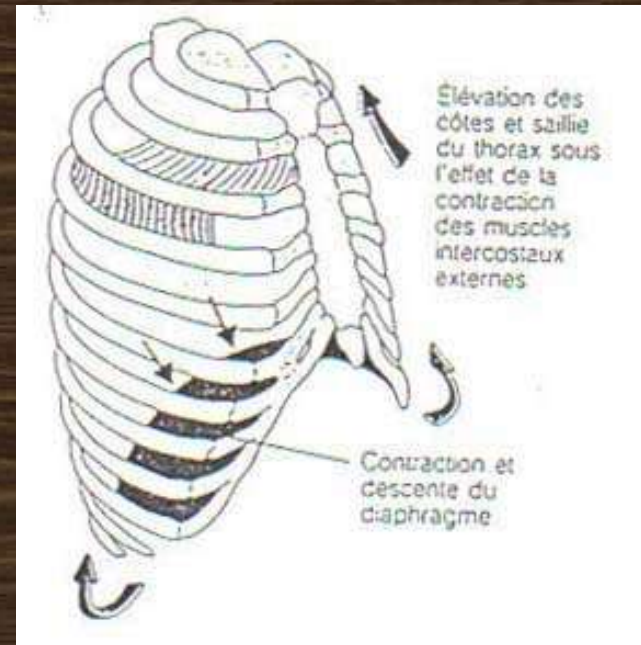
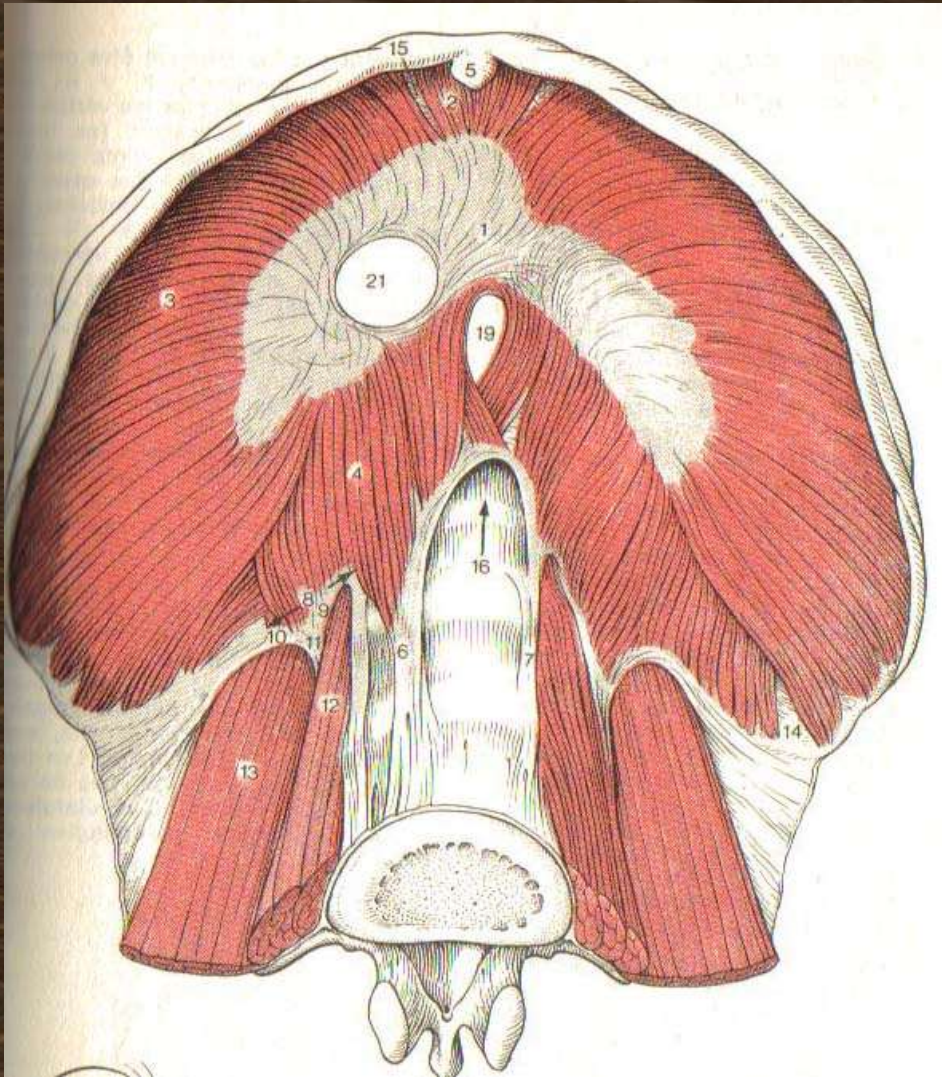
## 1.2. Fonctionnement

Abaissement  $\Rightarrow$  ↗ ∅ vertical C. Th.  
Effet inspiratoire CRANIO-CAUDAL

Contraction  $\Rightarrow$  ↗ ∅ horizontal C. Th.  
Effet inspiratoire D'INSERTION

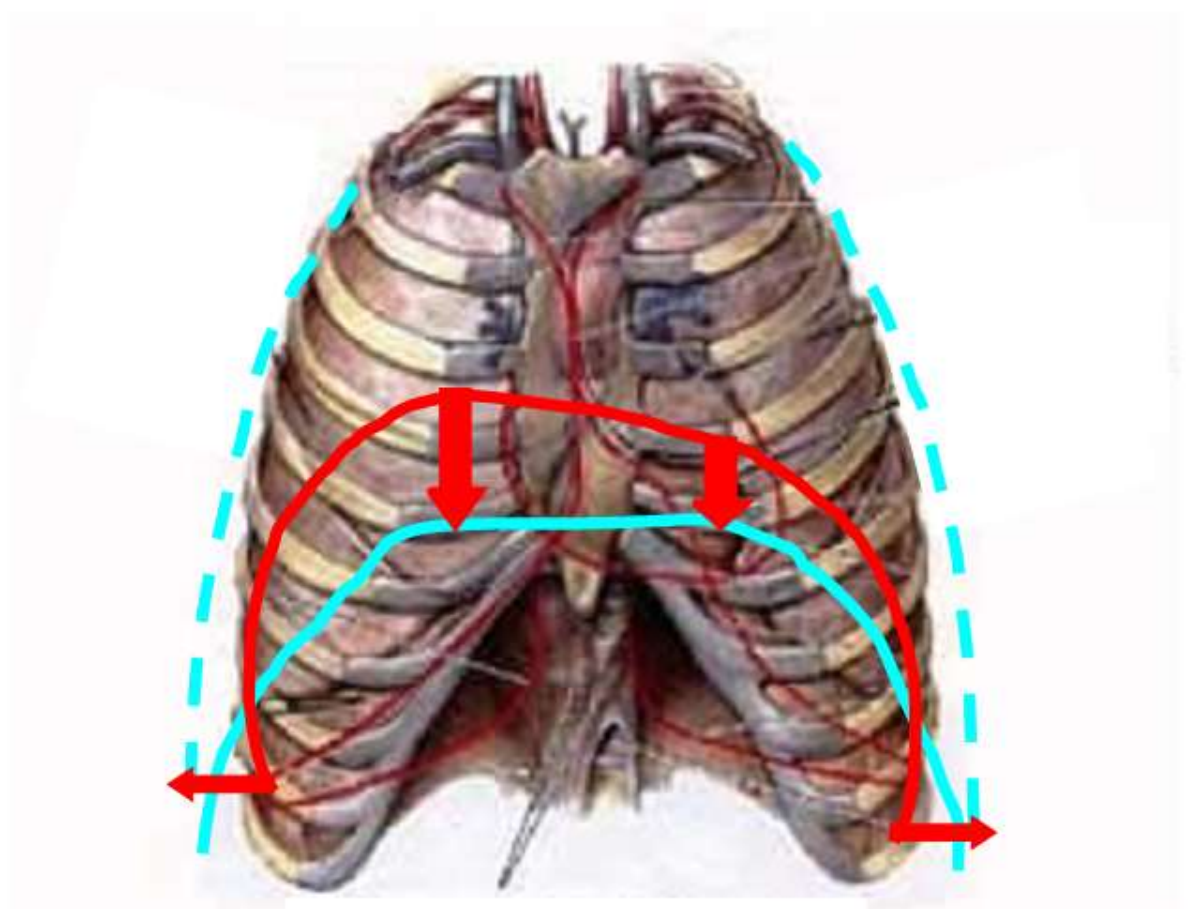
↗ P. Abd.  $\Rightarrow$  ↗ ∅ horizontal C. Th.  
Effet inspiratoire D'APPOSITION

# Diaphragme



## Intercostaux ext





**Inspiration = contraction diaphragmatique**

# Muscles Inspiratoires

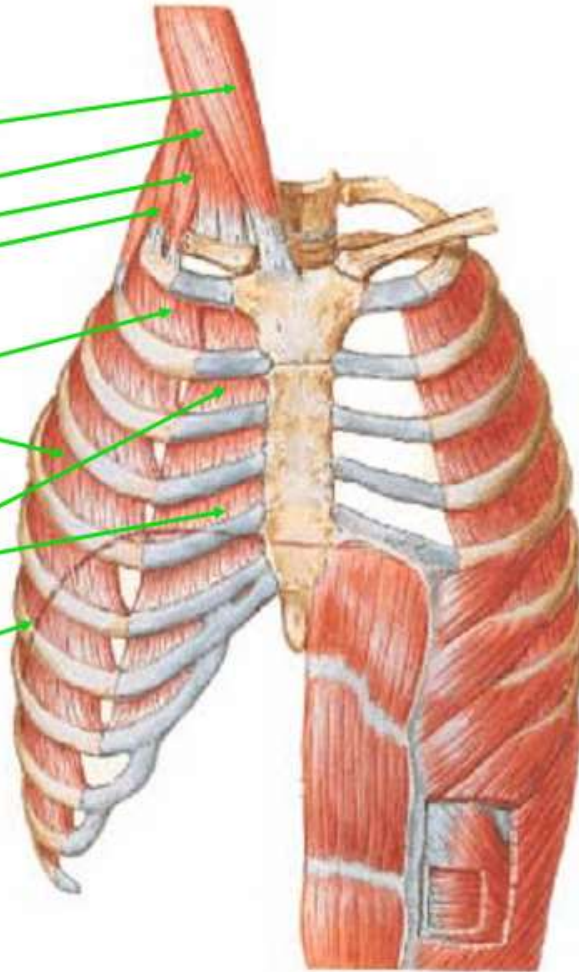
Sterno-Cleïdo-  
Mastoïdien

Scalène Antérieur  
Médian  
postérieur

Intercostaux  
externes

Para-sternaux

Diaphragme



## 2. Autres muscles inspiratoires

### 2.1. Muscles intercostaux

#### ✓ Muscles intercostaux externes

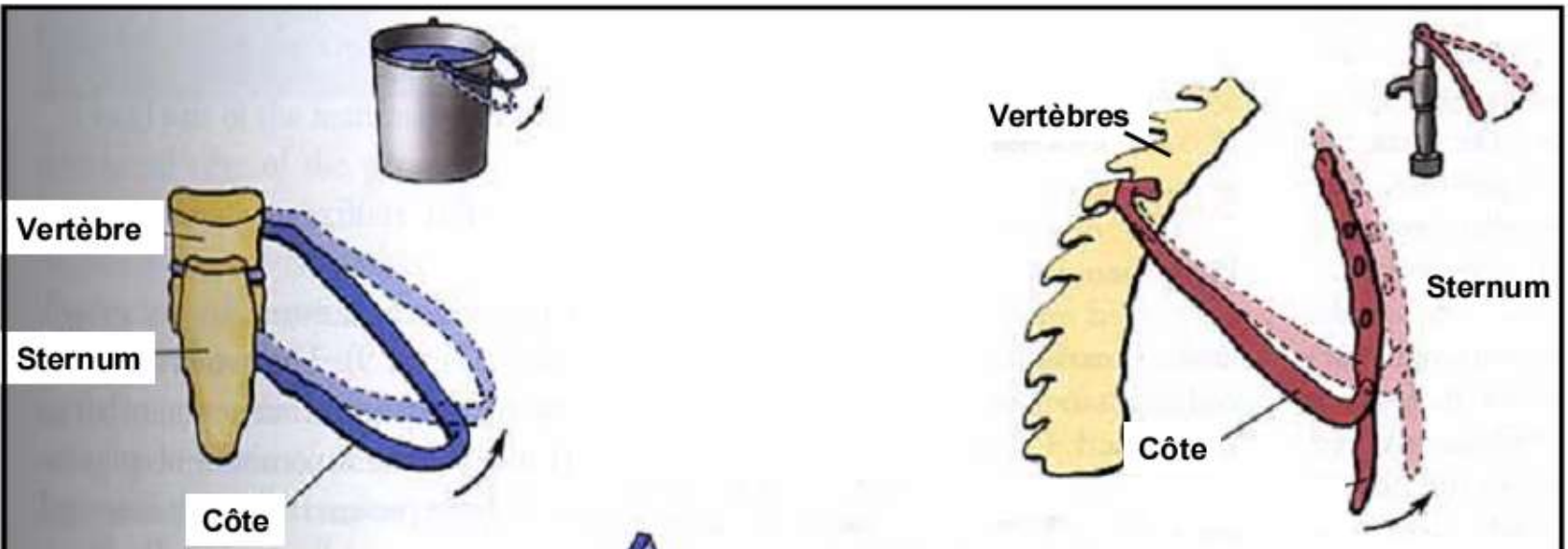
Position post. et latérale  
Orientés en bas et en avant

#### ✓ Muscles para-sternaux (internes)

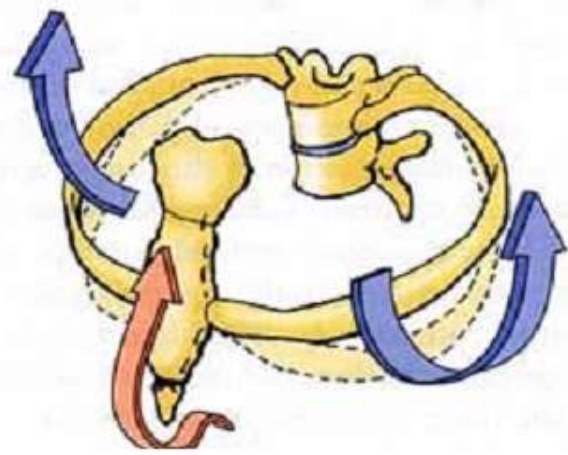
Position antérieure  
Orientés en haut et en avant

**Soulèvent  
la côte  
Inférieure  
et le sternum**

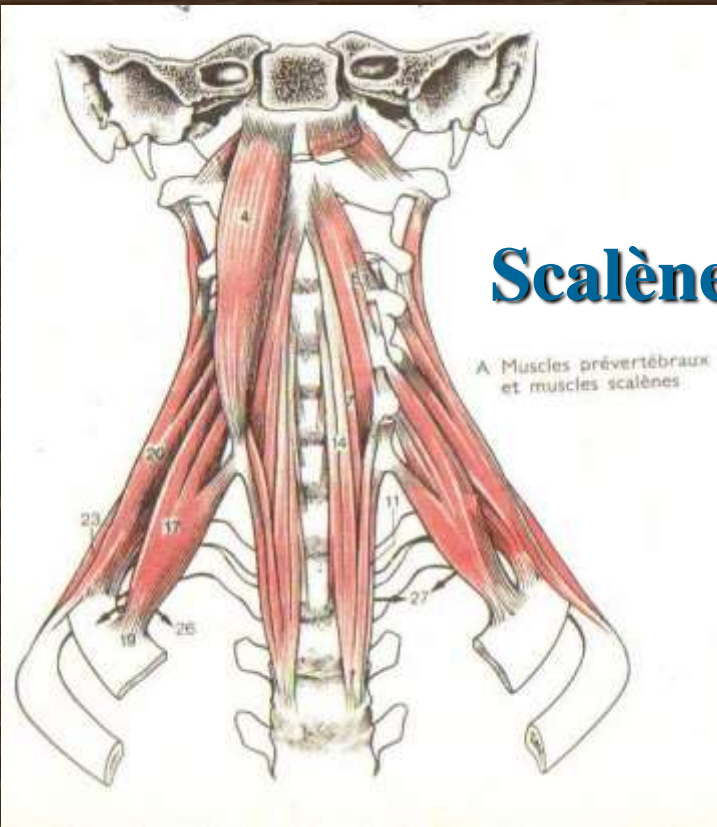




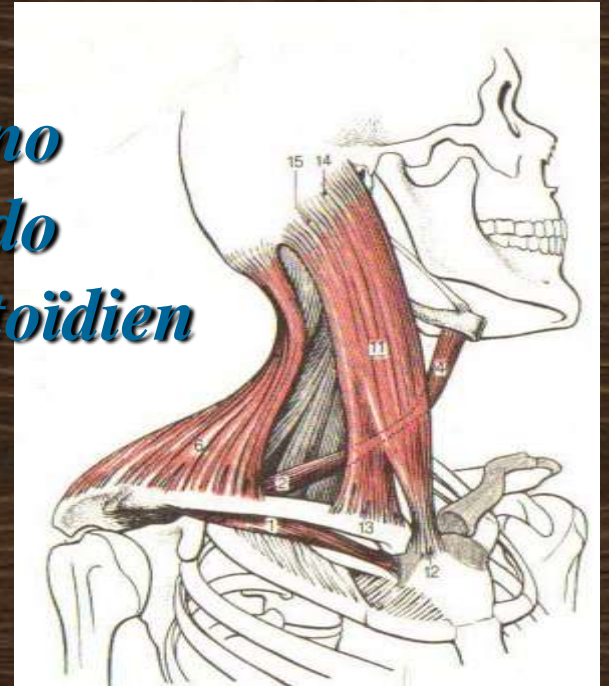
# Muscles intercostaux externes et para-sternaux



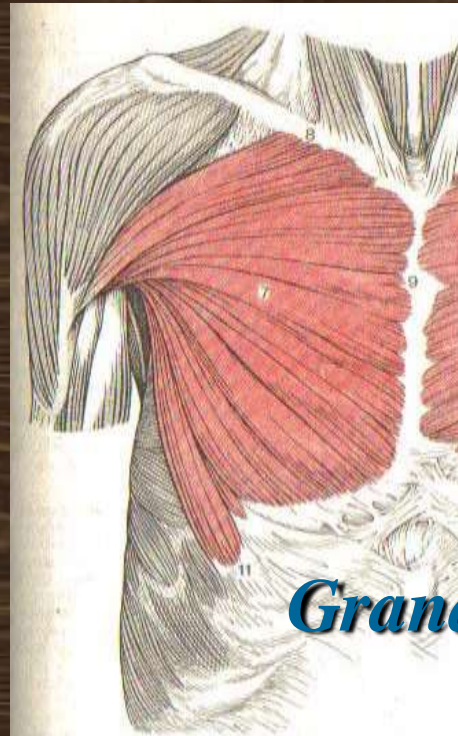
↗ diamètres later. thorax



**Scalènes**



**Sterno  
Cleido  
mastoidien**



**Grand pectoral**

## **3. Muscles expiratoires**

### **3.1. Muscles intercostaux internes**



**Abaissent la côte supérieure**



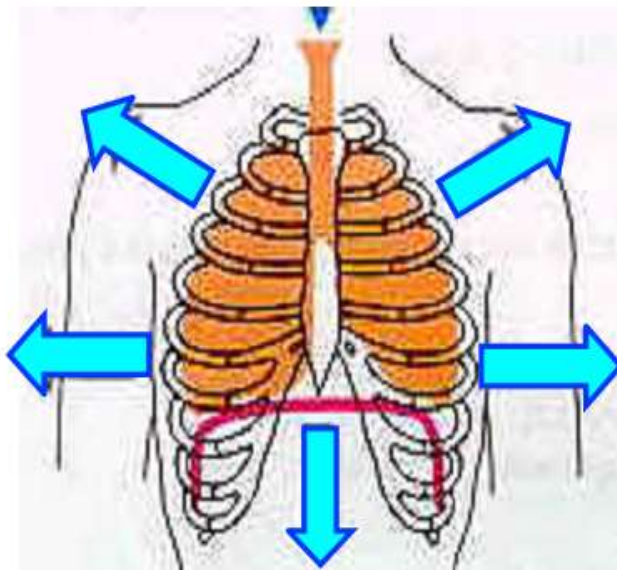
**Diminuent les diamètres  
horizontaux du thorax**

## **3. Muscles expiratoires**

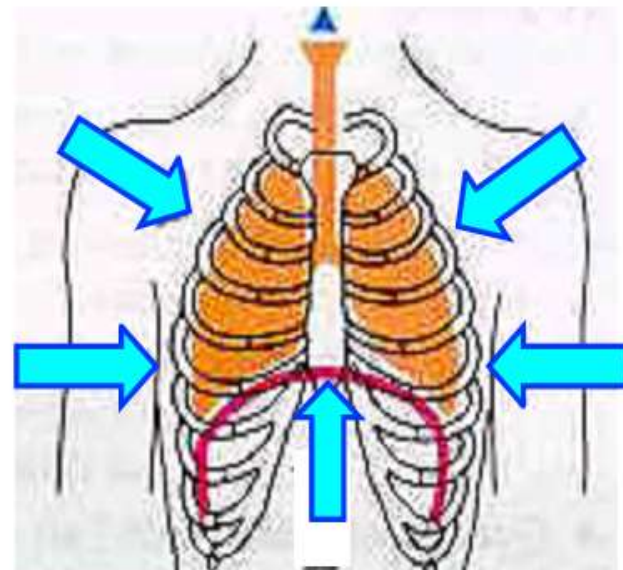
### **3.2. Muscles abdominaux**

- ✓ Expiration forcée
- ✓ Refoulent les viscères abdominaux en direction céphalique
- ✓ Abaissent les côtes

**Inspiration**



**Expiration**



**Synthèse**

# Plan

I. Introduction

II. Mécanique élémentaire : cycle respiratoire

III. Muscles respiratoires

IV. Propriétés statiques de l'appareil respiratoire

V. Propriétés dynamiques de l'appareil ventilatoire

## IV. Propriétés statiques de l'appareil respiratoire

### Condition statique : Equation de Newton

$$P_{TOT} = E_{TOT} \cdot V$$

$P_{TOT}$  = Pression totale

$E_{TOT}$  = Elastance totale

$V$  = Volume

### Propriétés statiques de l'app respiratoire

Elasticité du système respiratoire (et/ou de ses composantes)

Volumes pulmonaires

# *IV.1. Volumes pulmonaires*

## Volumes pulmonaires: méthodes de mesure

- Volumes mobilisables
  - Spirométrie à cloche
  - Pneumotachographie
- Volumes et capacités non mobilisables
  - VR, CRF, CPT : pléthysmographie corporelle
  - VR: dilution de l'hélium



Condition statique : Equation de Newton

$$P_{TOT} = E_{TOT} \cdot V$$

$P_{TOT}$  = Pressions totales

$E_{TOT}$  = Elastance totale

$V$  = Volume

*Système poumon-thorax*

Poumon (L) ou thorax (W)

$$P_L = E_L \cdot V$$

$$P_W = E_W \cdot V$$

Compliance (C) = 1/E

**DISTENSIBILITE**

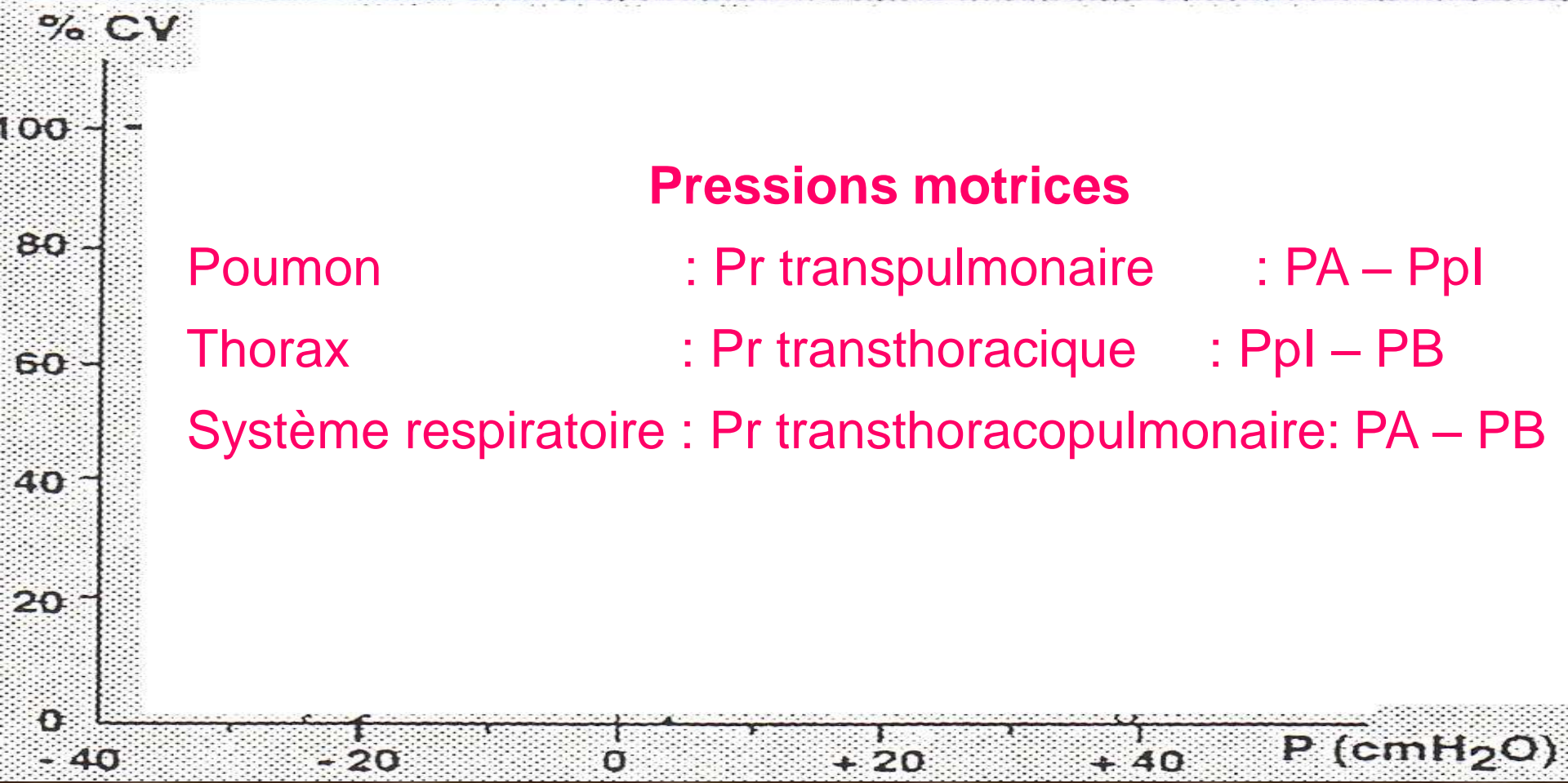
# IV.3. Détermination des propriétés élastiques du système respiratoire: relation pression-volume

$$P_L = E_L \cdot V$$

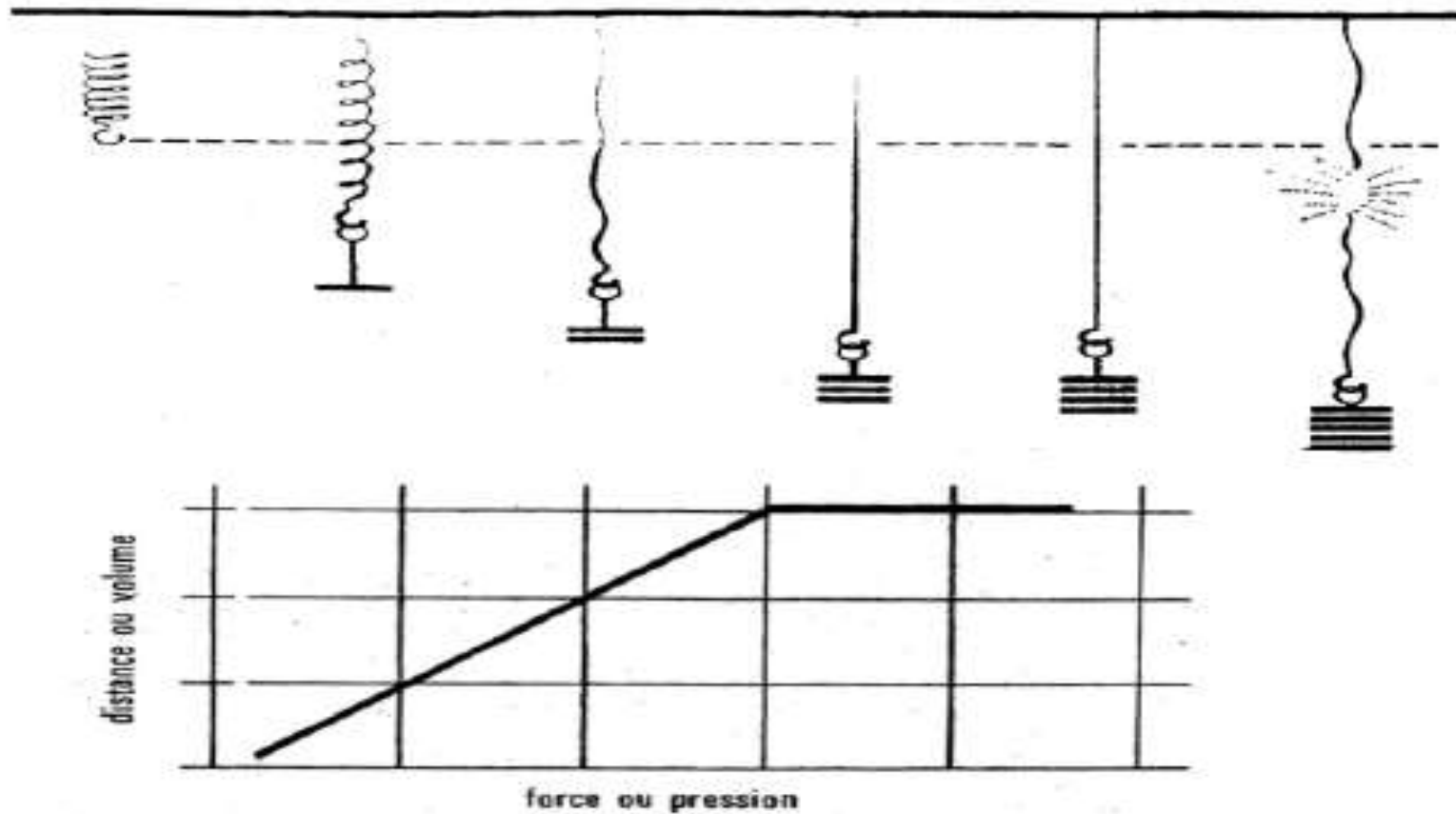
$$P_W = E_W \cdot V$$

$$C_L = V/P_L$$

$$C_W = V/P_W$$



# Les résistances statiques : La complianc



$$e = \Delta L / \Delta F$$

ressort

$$C = \Delta V / \Delta P$$

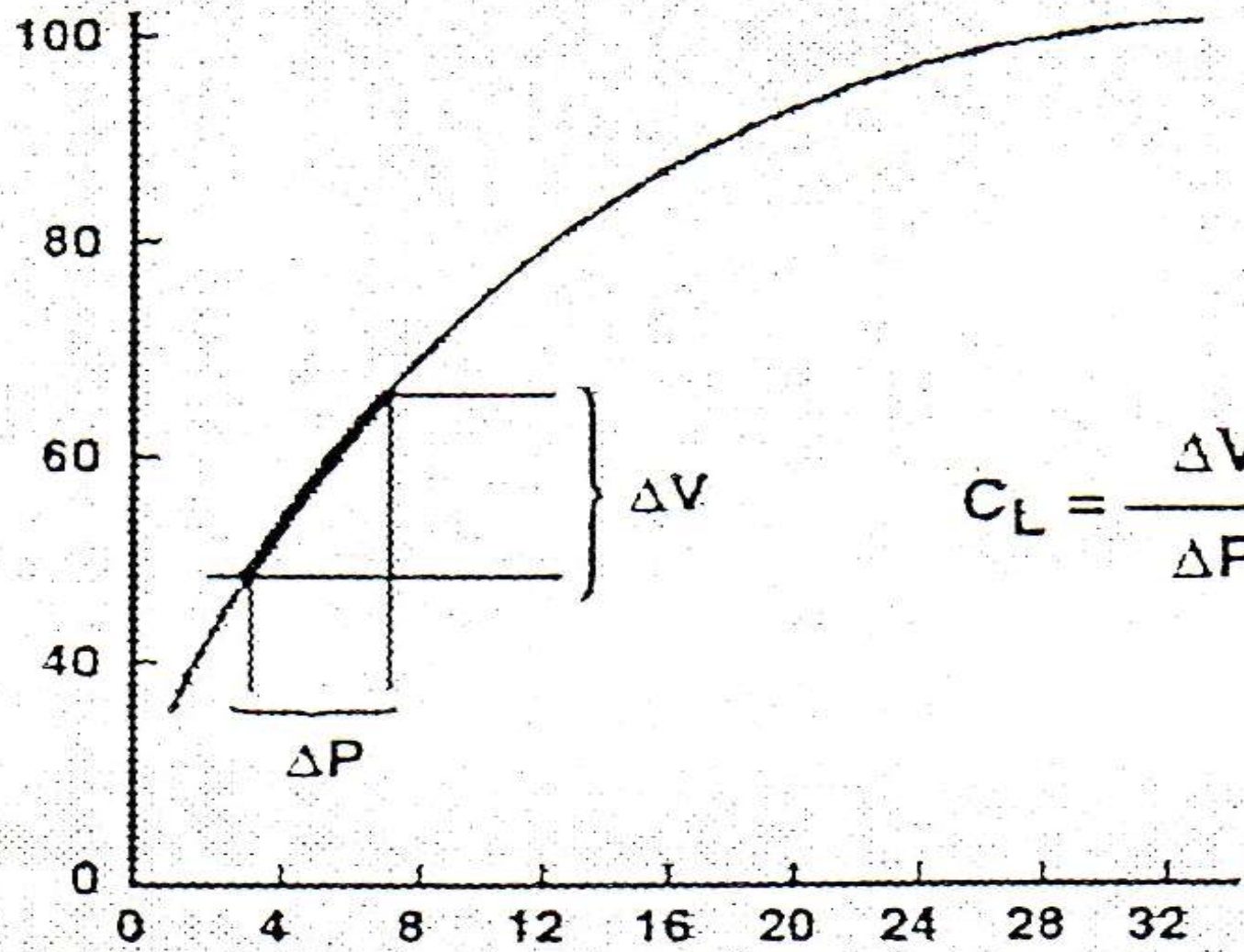
système tridimensionnel

## Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Poumon et cage thoracique = structures élastiques
- Etirement ou compression d'une structure élastique
  - ↳ pression qui tend à ramener la structure à l'état initial

### IV.3.1 Courbe pression-volume du poumon

volume  
(% CPT prédite)

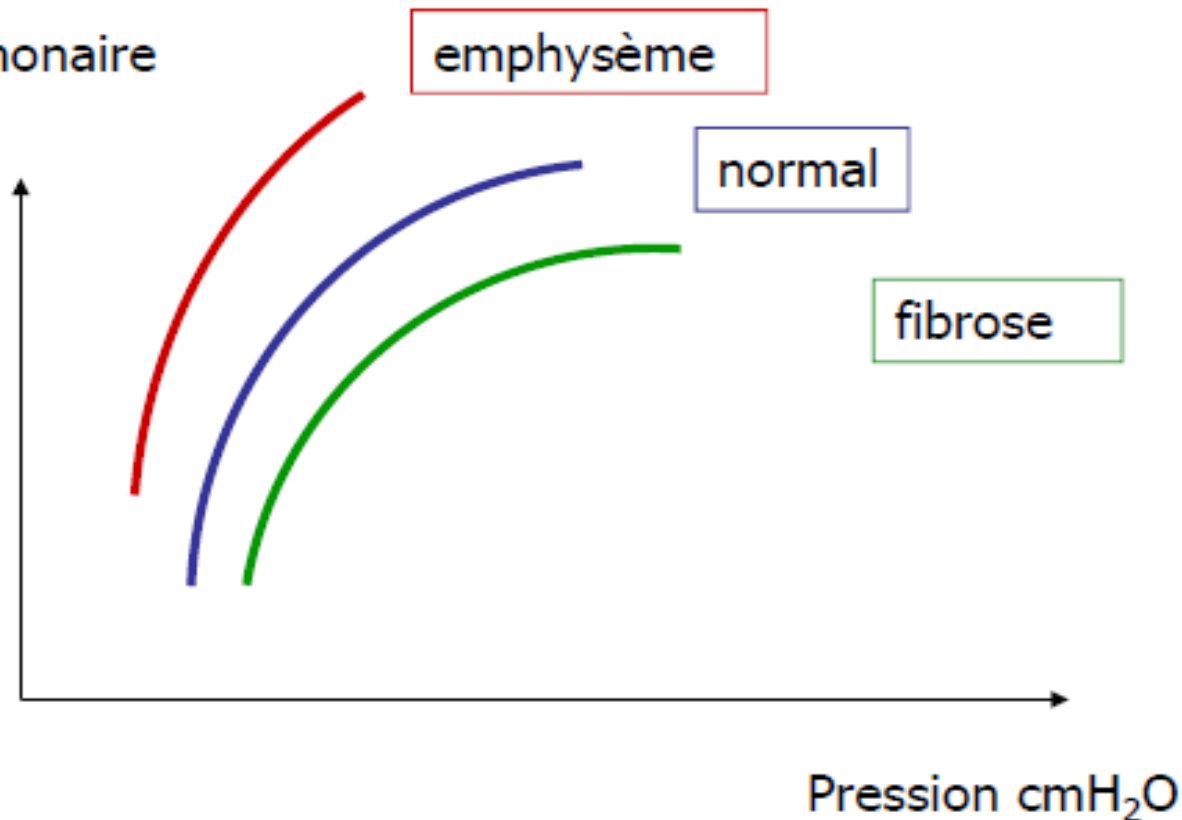


$$C_L = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

Pet (cmH<sub>2</sub>O)

## Compliance pulmonaire

Volume pulmonaire



Sujet sain : 2.5 cmH<sub>2</sub>O pour mobiliser un VT=500ml

emphysème : 1.7 cmH<sub>2</sub>O pour mobiliser un VT=500ml

fibrose : 30 cmH<sub>2</sub>O pour mobiliser un VT=500ml

**Rétraction élastique du poumon**  
**2 types de facteurs**

*Histologiques*

**\_Fibres d'élastine + collagène**

**Eléments élastiques du poumon (Vx,  
branches)**

**Contenu liquidien du poumon**

*Physicochimiques*

**Forces de tension superficielle  
(interface air-liquide)**

#### IV.4.1. Surfactant

**Substance tensio-active**

**Lipoprotéine (Pneumocytes de type II)**

**DPPE**

**Résorption : alvéoles**

**1/2 vie : 30h**

#### IV.4.2. Rôles du surfactant

**↓ Force de tension superficielle (interface air-liquide)**

**Poumon «sec»**

**↓ Travail des muscles respiratoires**

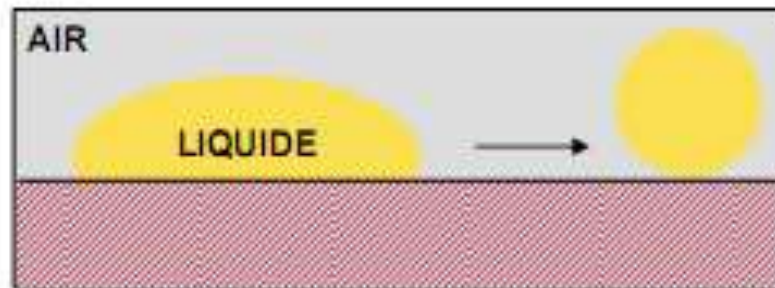
**Stabilité alvéolaire**

**Vital (DRNN)**



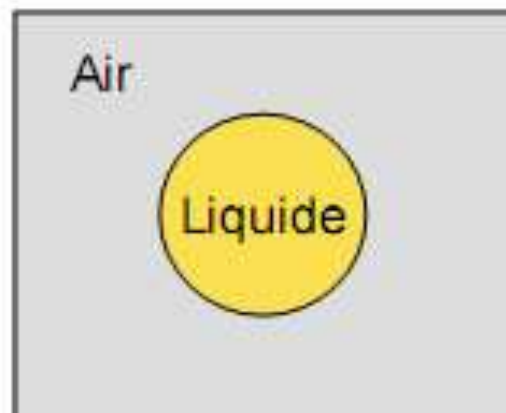
# Propriétés élastiques du poumon

- Interface air/liquide → se rétracte pour atteindre une surface minimum

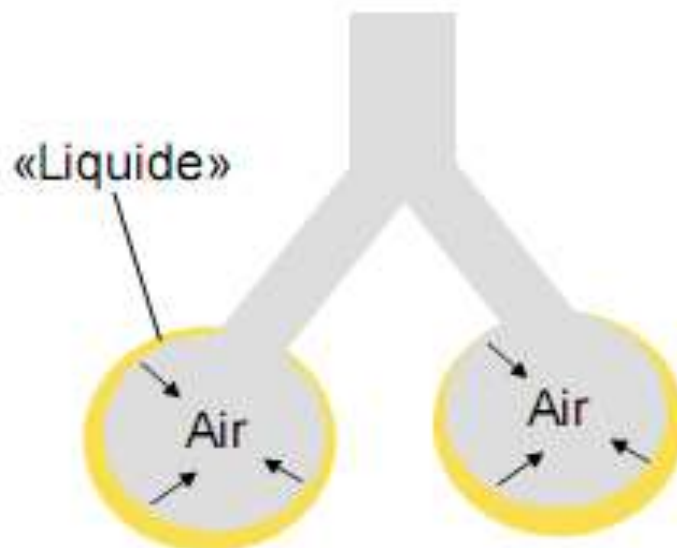


- **Tension superficielle** ( $T$ , dyn/cm) = force superficielle de contraction d'un liquide grâce à laquelle la surface air/liquide tend à être la plus réduite possible

# Propriétés élastiques du poumon



Goutte d'eau

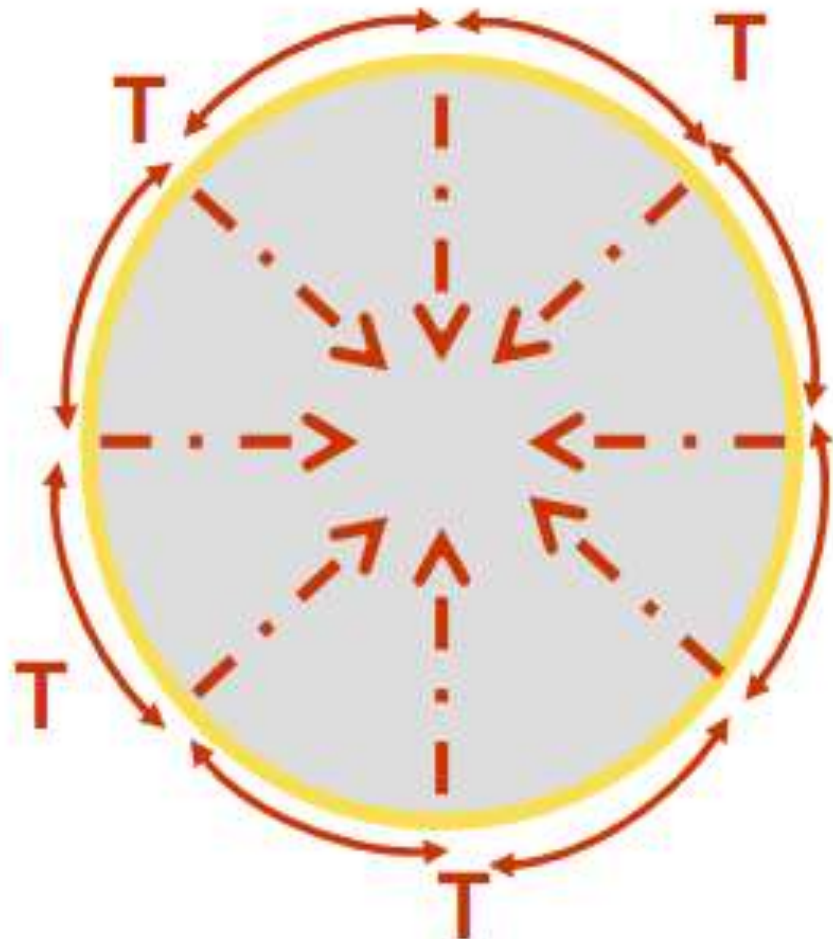


Alvéoles

- Surface alvéolaire des pneumocytes recouverte d'un mince film aqueux en contact avec le gaz alvéolaire → interface air/liquide
- Tension superficielle élevée

# Propriétés élastiques du poumon

- Tension superficielle d'une sphère
  - effet net de la tension superficielle sur la paroi  
→ **collapsus** de la sphère



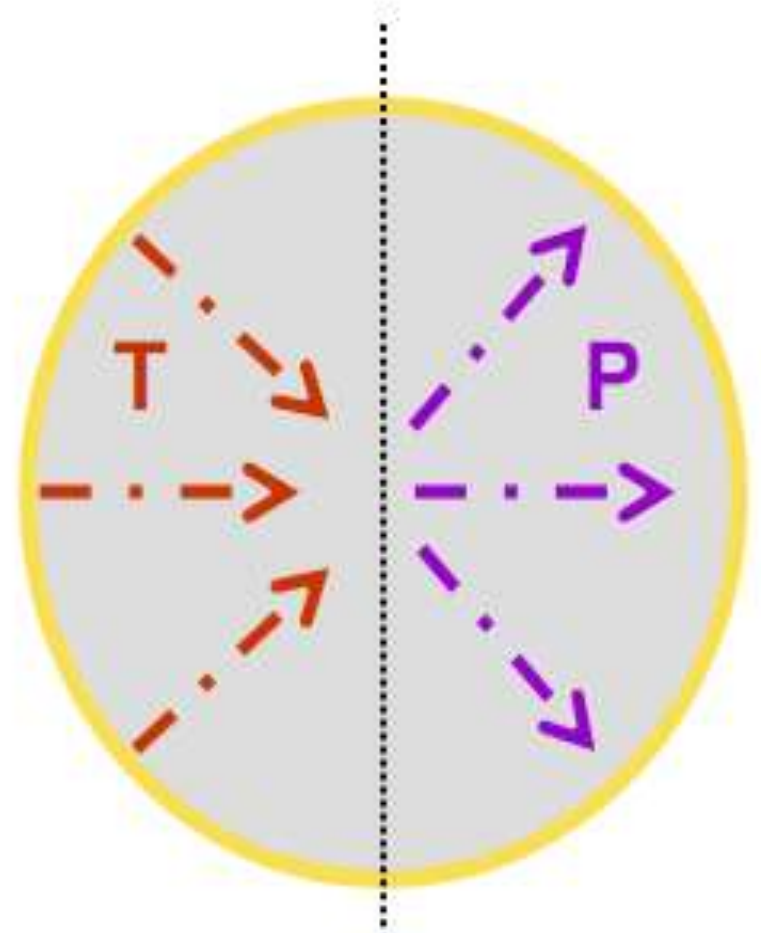
# Propriétés élastiques du poumon

- Tension superficielle d'une sphère distensible

- Rayon  $r$ , Pression de distension  $P$
- Equilibre atteint lorsque:

$$P = \frac{2T}{r}$$

- loi de Laplace

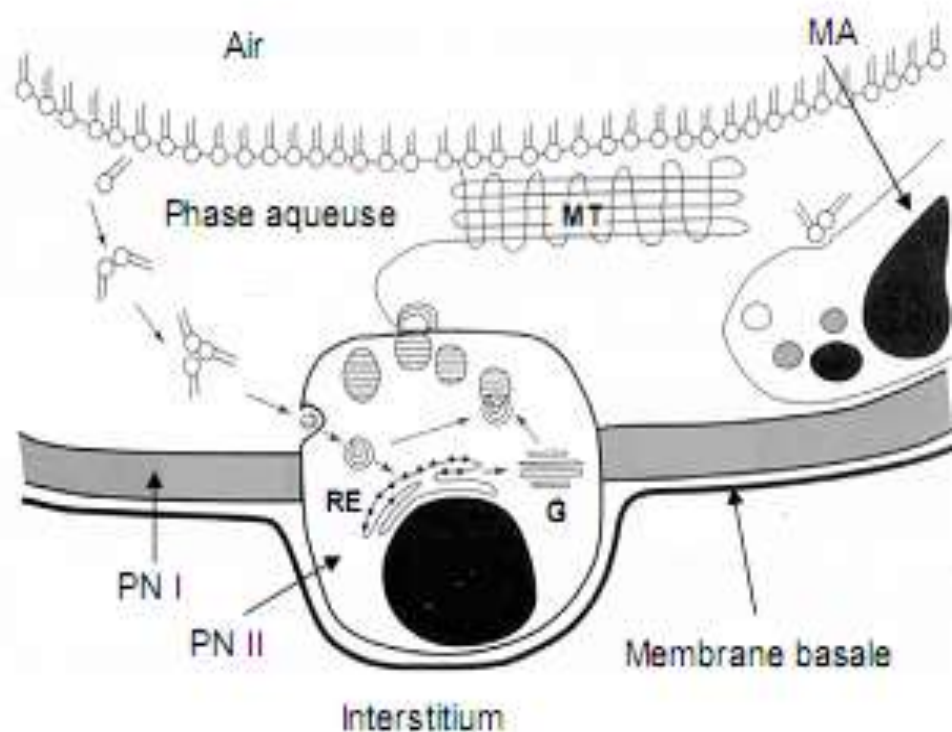


# Propriétés élastiques du poumon

- Ajout d'un **agent tensio-actif** à l'interface air/liquide
  - ↳ ↓ tension superficielle
  - ↳ ↓ force de rétraction de la paroi
- Dans les alvéoles, agent tensio-actif = **surfactant**  
= Lipoprotéine complexe
  - Phospholipides (DiPalmitoyl PhosphatidylCholine, DPPC)
  - Apoprotéines
  - Ions calcium

# Propriétés élastiques du poumon

- **Sécrétion**
  - par les PN II
  - à partir d'acides gras extraits du sang capillaire
  - en fin de grossesse
- **Demi-vie courte:**
  - phagocytose par macrophages alvéolaires et PN de type II
  - passage vers capillaires



*D'après référence 5*



# Propriétés élastiques du poumon

- Rôles physiologiques:
  - le surfactant diminue la tension superficielle alvéolaire donc augmente la compliance pulmonaire ( $\Delta\text{volume}/\Delta\text{pression}$ )
  - stabilise les alvéoles de taille différentes
  - diminue la quantité de liquide filtré hors des capillaires et rend la surface alvéolaire imperméable aux protéines

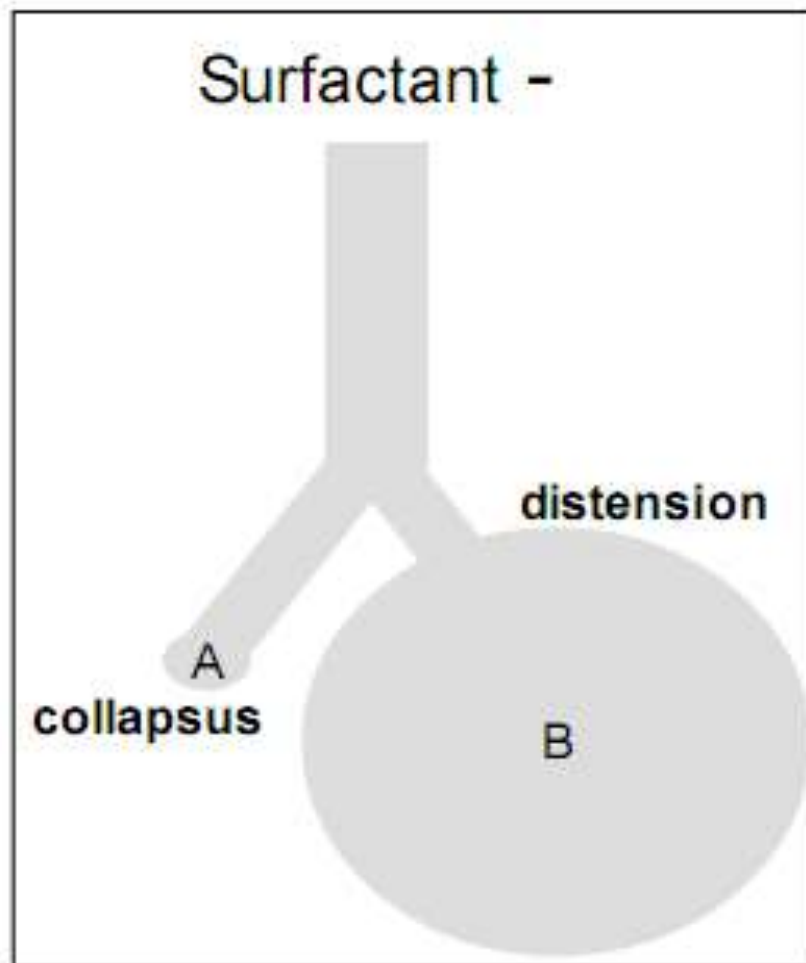
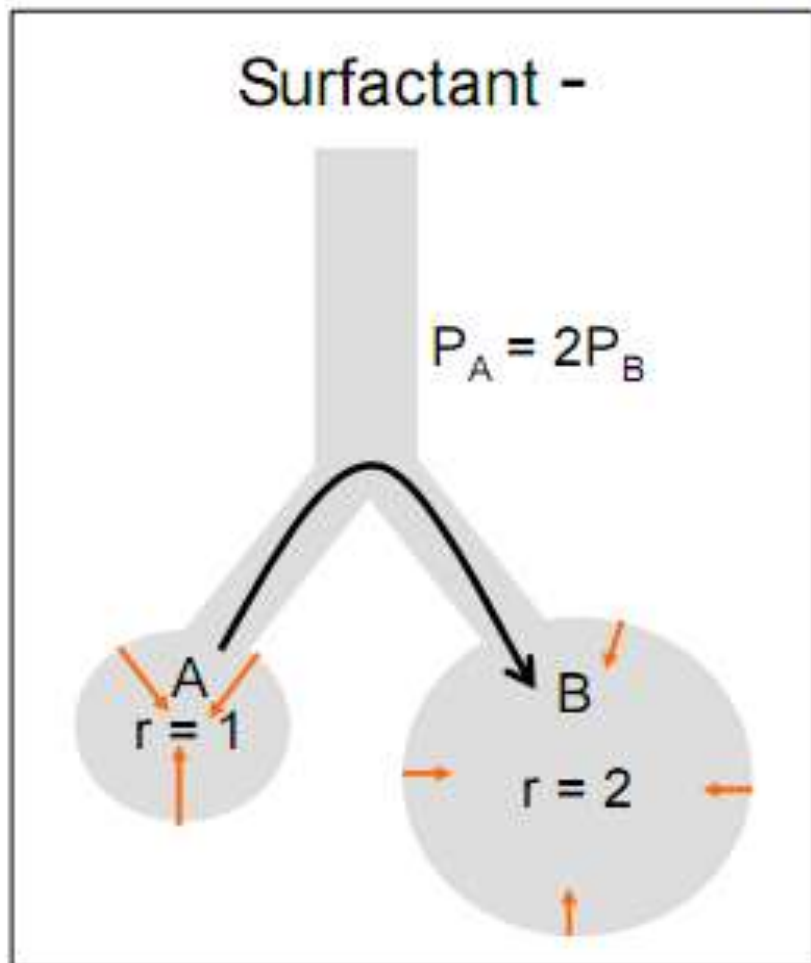
# Propriétés élastiques du poumon

- Propriétés tensio-actives du surfactant
  - varient en fonction du rayon alvéolaire (de l'épaisseur de la couche de surfactant)
  - de façon à ce que le rapport  $2T/r$  soit constant)



# Propriétés élastiques du poumon

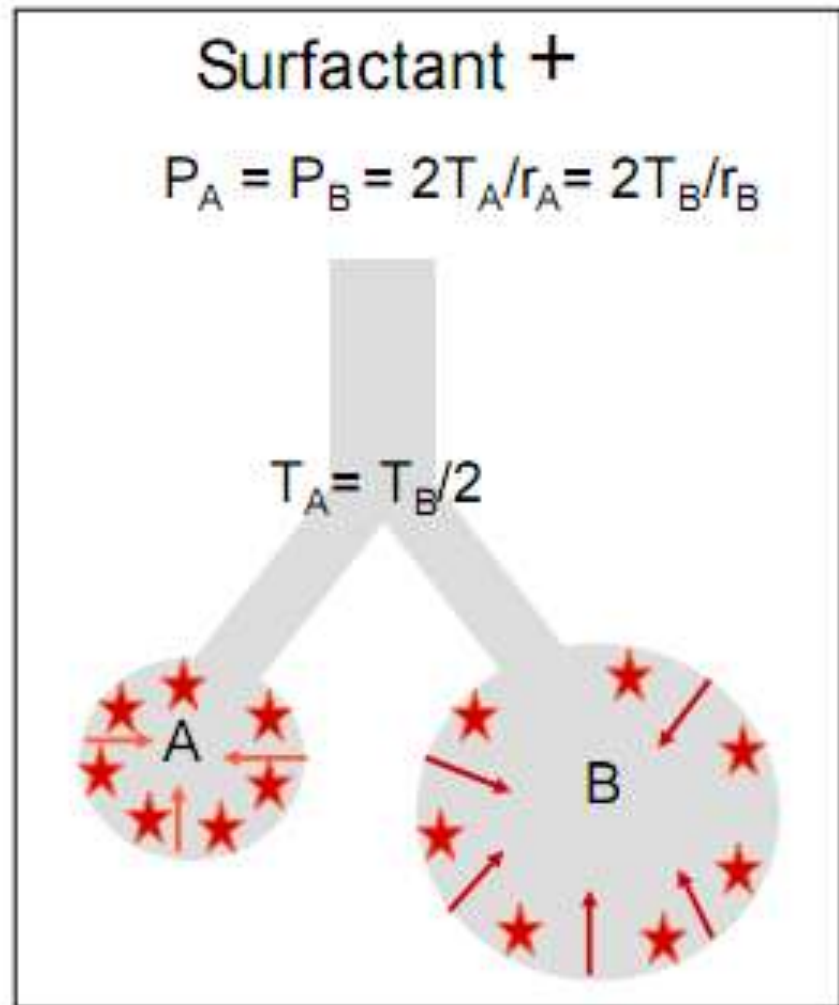
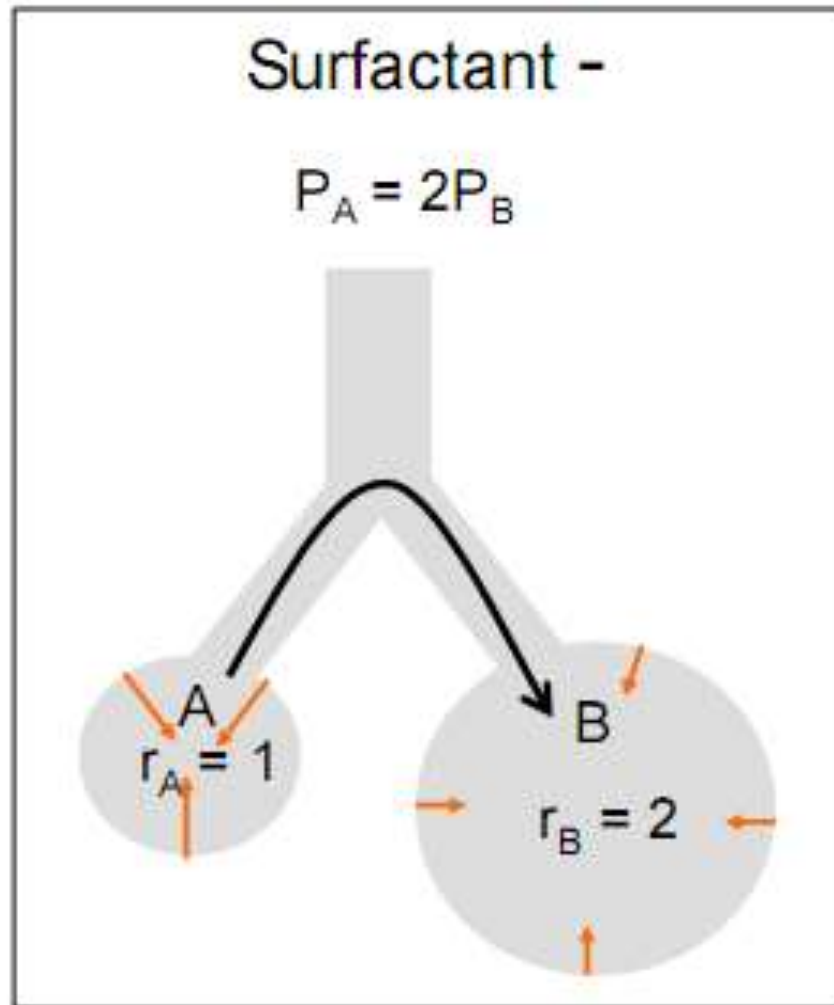
Loi de Laplace:  $P=2T/r$



Sans surfactant, T est constante

# Propriétés élastiques du poumon

Loi de Laplace:  $P=2T/r$ , mais  $T$  varie en fonction de  $r$



Le surfactant abaisse plus la TS dans les petits alvéoles que dans les gros

# Propriétés élastiques du poumon

- Déficit en surfactant: détresse respiratoire du prématuré
  - PN II vers 22 SA, surfactant adéquat vers 36 SA
  - Déficit en surfactant responsable de
    - collapsus/distension alvéolaires → mauvaise ventilation pulmonaire
    - diminution de la compliance pulmonaire → travail respiratoire↑
    - Présence de protéines ++ à la surface alvéolaire («membranes hyalines») → mauvais échanges gazeux

# Plan

I. Introduction

II. Mécanique élémentaire : cycle respiratoire

III. Muscles respiratoire

IV. Propriétés statiques de l'appareil  
respiratoire

V. Propriétés dynamiques de l'appareil  
ventilatoire

V.1. Résistances pulmonaires ou relation pression-  
débit

V.2. Débits maximaux expiratoires : relations  
volume-temps et débit-volume

**Condition dynamique** : Equation de Newton

$$P_{TOT} = E_{TOT} \cdot V + R_{TOT} \cdot \dot{V} + I \cdot \ddot{V}$$

$$P_{TOT} = E_{TOT} \cdot V + R_{TOT} \cdot \dot{V}$$

V.1. Résistances pulmonaires ou relation pression-débit

**Résistances des voies aériennes + Résistances tissulaires**

# Résistances pulmonaires

- Pression

- gradient de pression ( $P_{alv} - P_{atm}$ ) → débit aérien

- Débit

- quantité d'air qui circule dans les VA/unité de temps

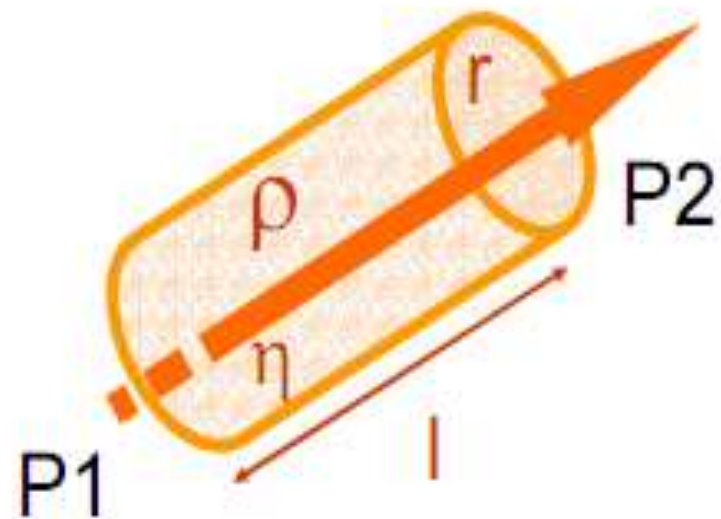
- Résistance

- difficulté à laquelle l'air se heurte pour circuler entre 2 points des VA sous l'action d'une  $\Delta P$  donnée

# Résistances pulmonaires

## Fluide

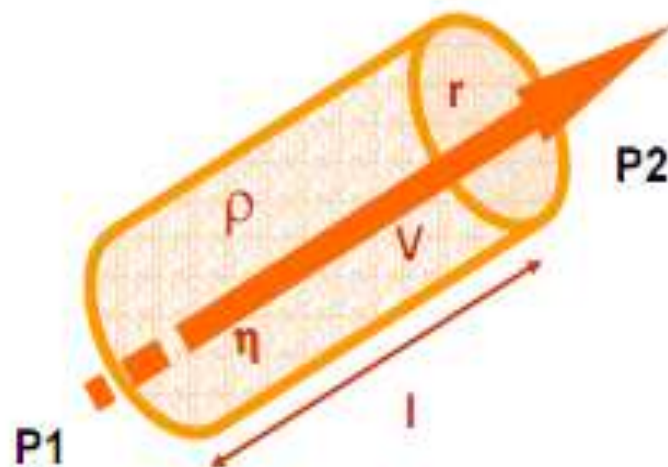
- viscosité  $\eta$
- densité  $\rho$
- conduit de longueur  $l$
- rayon  $r$



$$\hookrightarrow \dot{V} = \frac{\Delta P}{R}$$

(Loi de Poiseuille)

# Résistances pulmonaires



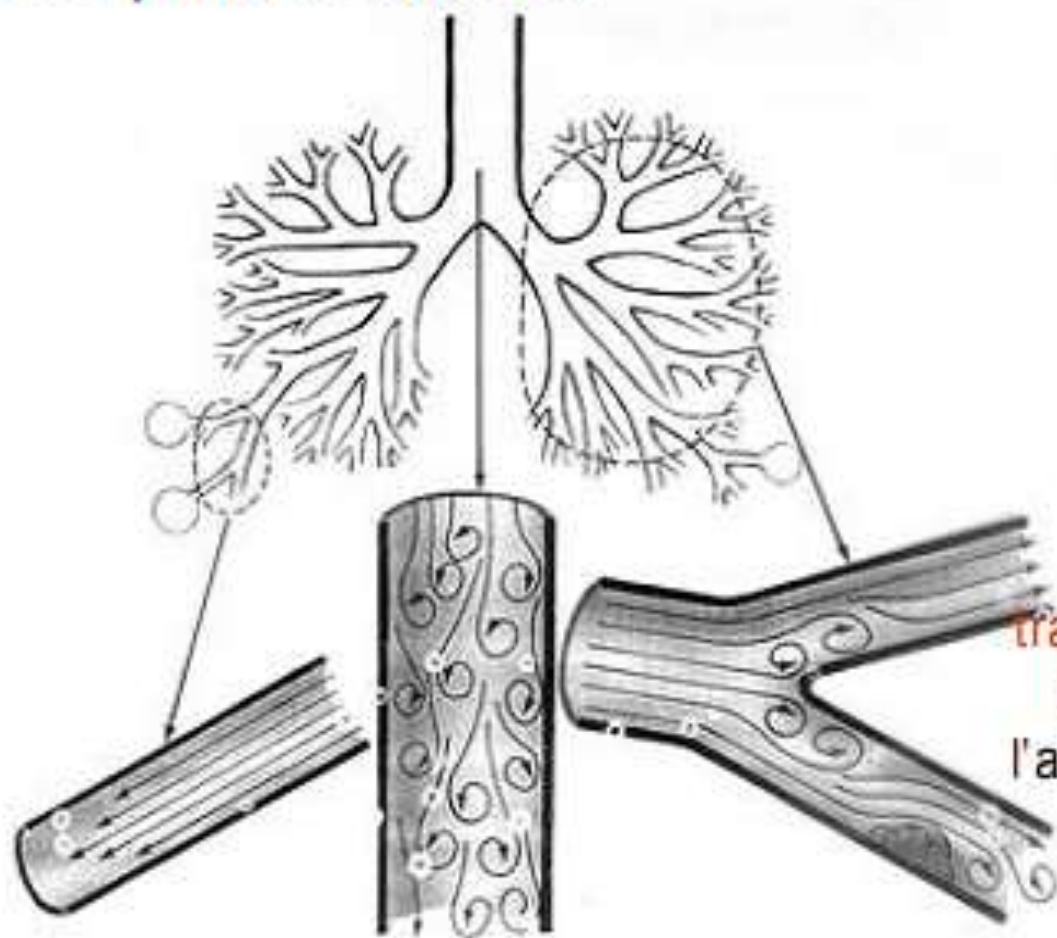
$$\Delta P = R \cdot \dot{V} \quad R = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$$

A red arrow points to the  $r^4$  term in the denominator of the resistance equation.



# Résistances pulmonaires

Ecoulement laminaire en périphérie (bronchioles terminales)



Ecoulement transitionnel dans la majorité de l'arbre bronchique

Ecoulement turbulent vrai dans la trachée, surtout à l'exercice

Régime transitionnel

(combinaison laminaire-turbulent)

$$P = (K_1 \times \dot{V}) + (K_2 \times \dot{V}^2)$$

Répartition topographique des résistances des voies aériennes

Loi de Poiseuille

$$R = 8 \eta l / \pi r^4$$

~~Site principal des résistances = petites voies aériennes~~

Somme de surface de section : 500 cm<sup>2</sup> bronchioles terminales

2,5 cm<sup>2</sup> trachée

# Répartition des RVA

Voies aériennes  
supérieures

50% des RVA



Surface de section

de la trachée :

2.5 cm<sup>2</sup>

Trachée et  
bronches centrales

40% des RVA

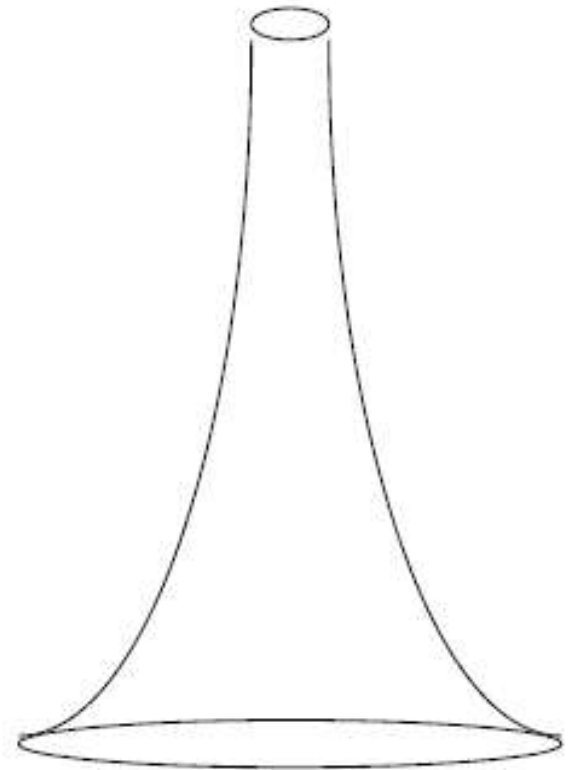


des bronchioles  
terminales :

500 cm<sup>2</sup>

Bronches  
périphériques

10% des RVA



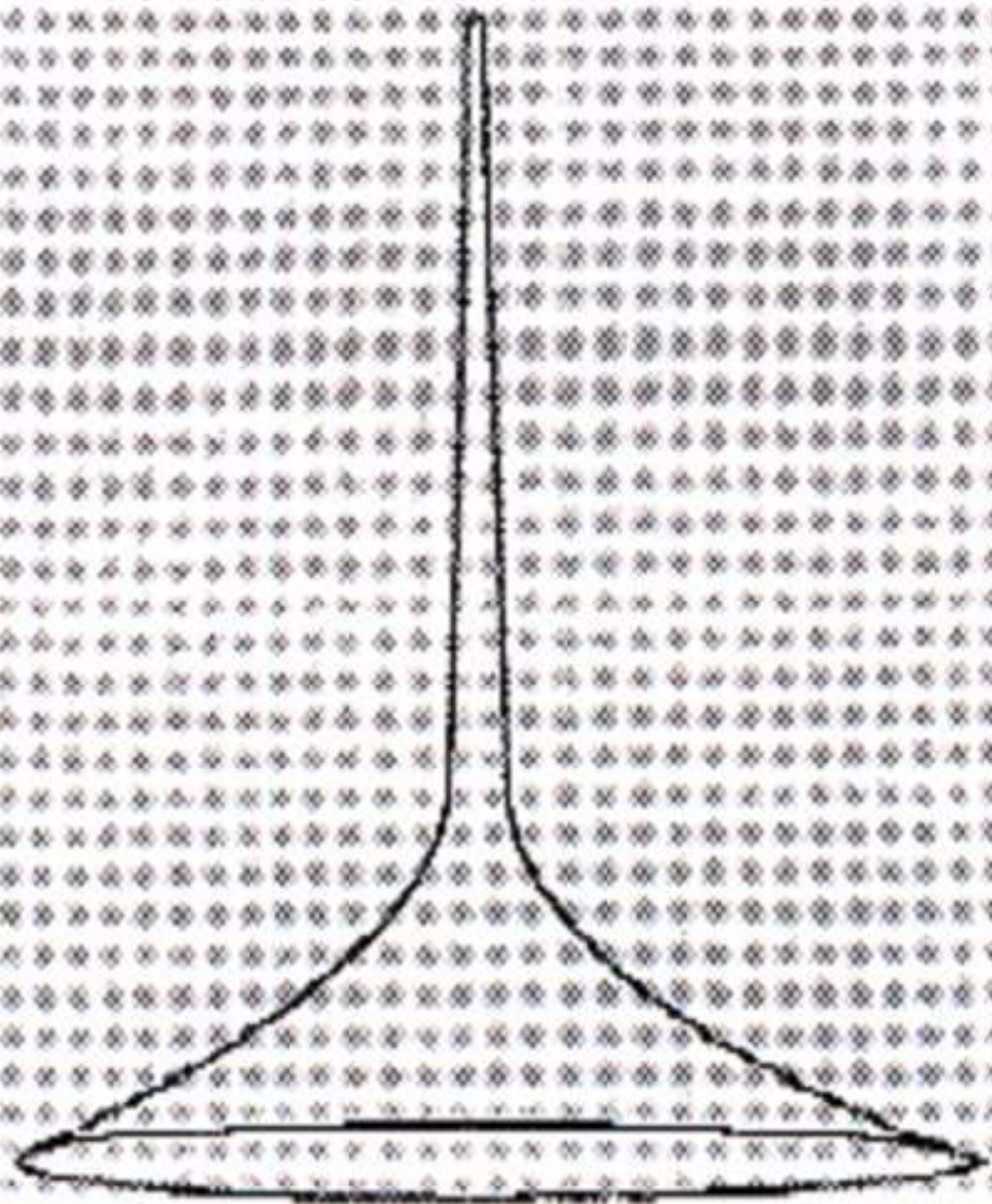
trachée:  $2,5 \text{ cm}^2$

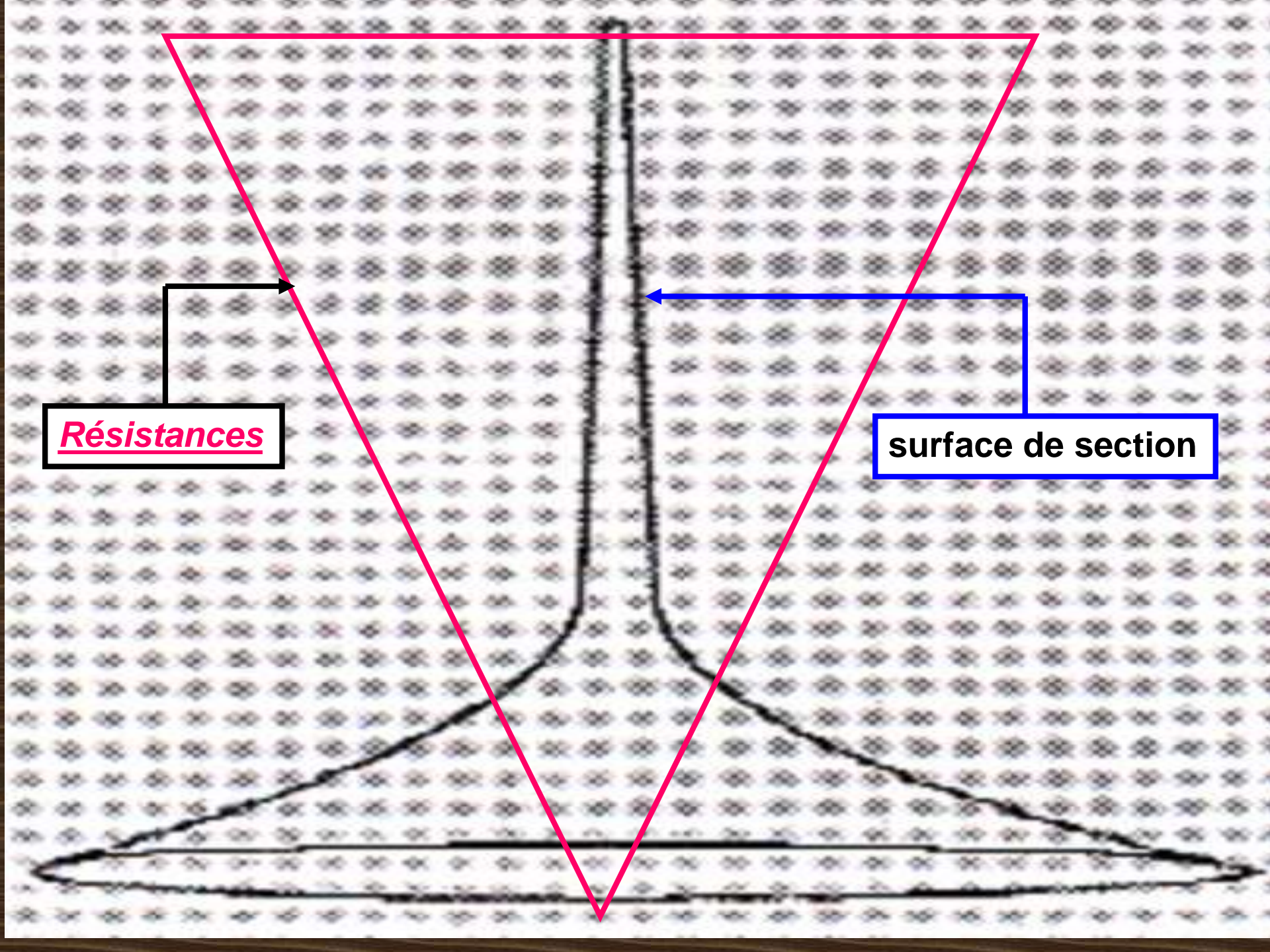
génération 3:  $5 \text{ cm}^2$

génération 10:  $10 \text{ cm}^2$

génération 15:  $100 \text{ cm}^2$

génération 23:  $1 \text{ m}^2$





***Résistances***

**surface de section**

## Résistance totale à l'écoulement de l'air

- 50% = voies aériennes supérieures
- 40% = voies aériennes centrales
- 10% = voies aériennes périphériques

Pathologie: lorsque les voies aériennes périphériques deviendront “parlantes” en terme de résistance, cela correspondra à une atteinte massive de ces voies. Il sera trop tard.

- Bronches = 25% des résistances des voies aériennes profondes (ou inférieures)
- Bronchioles = 25% des résistances des voies aériennes profondes (ou inférieures)

### Résistances totales de l'arbre aérien

Voies aériennes extrathoraciques	50%
Trachée + grosses bronches	40%
<u>Petites bronches</u>	10%



«Zone silencieuse»



$$\text{Mesure } R_{va} = (P_b - P_A) / \dot{V}$$

$\dot{V}$  : pneumotachographe

$P_b$  : pression buccale

$P_A$  : pléthysmographe

**PRATIQUE** : Mesure des débits et non des Rva

Mesure facile

Rva : grosses bronches

Débits : {arbre bronchique}

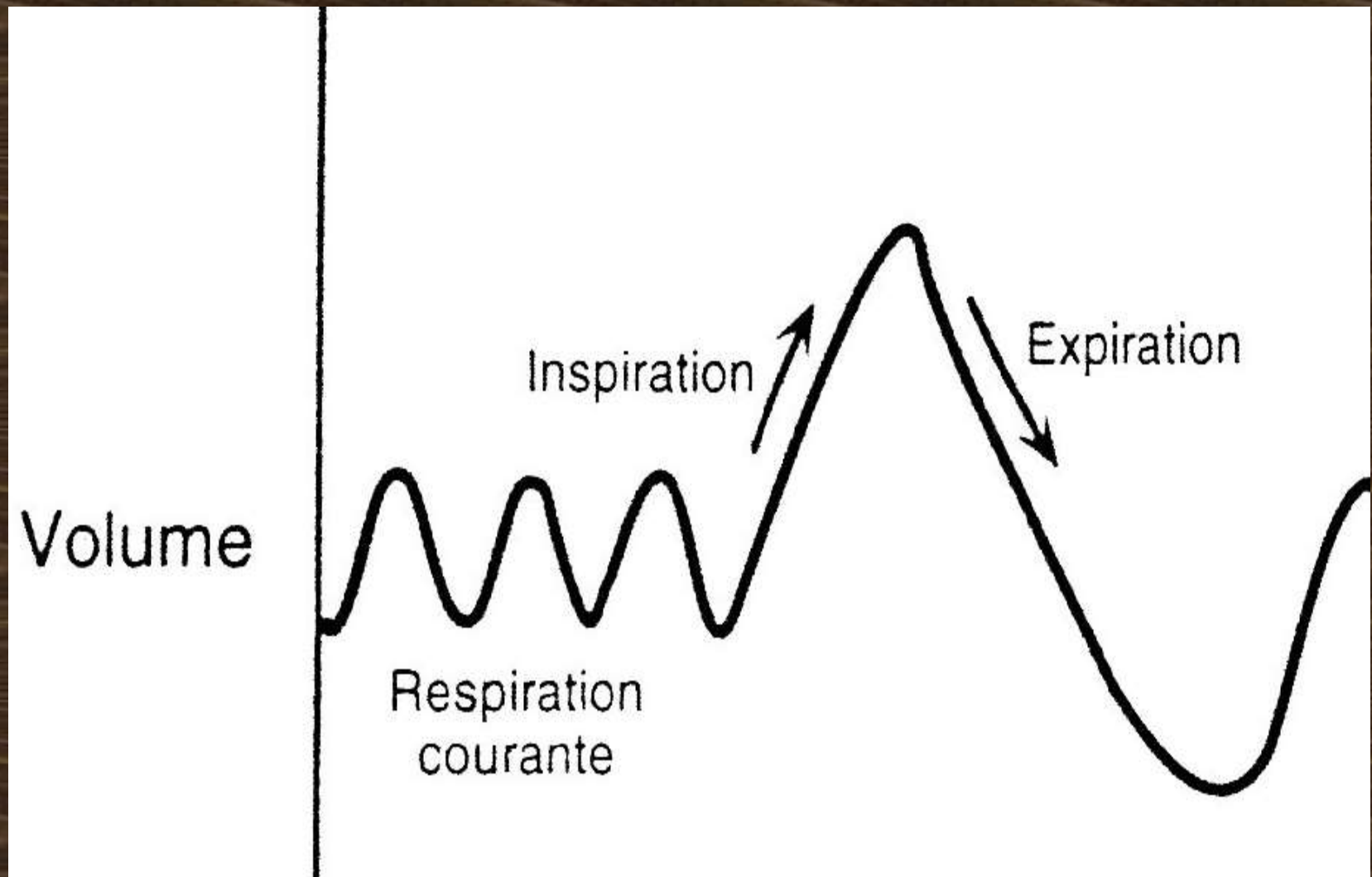
**Courbe d'expiration forcée**

**Standardisation**

**Reproductibilité**

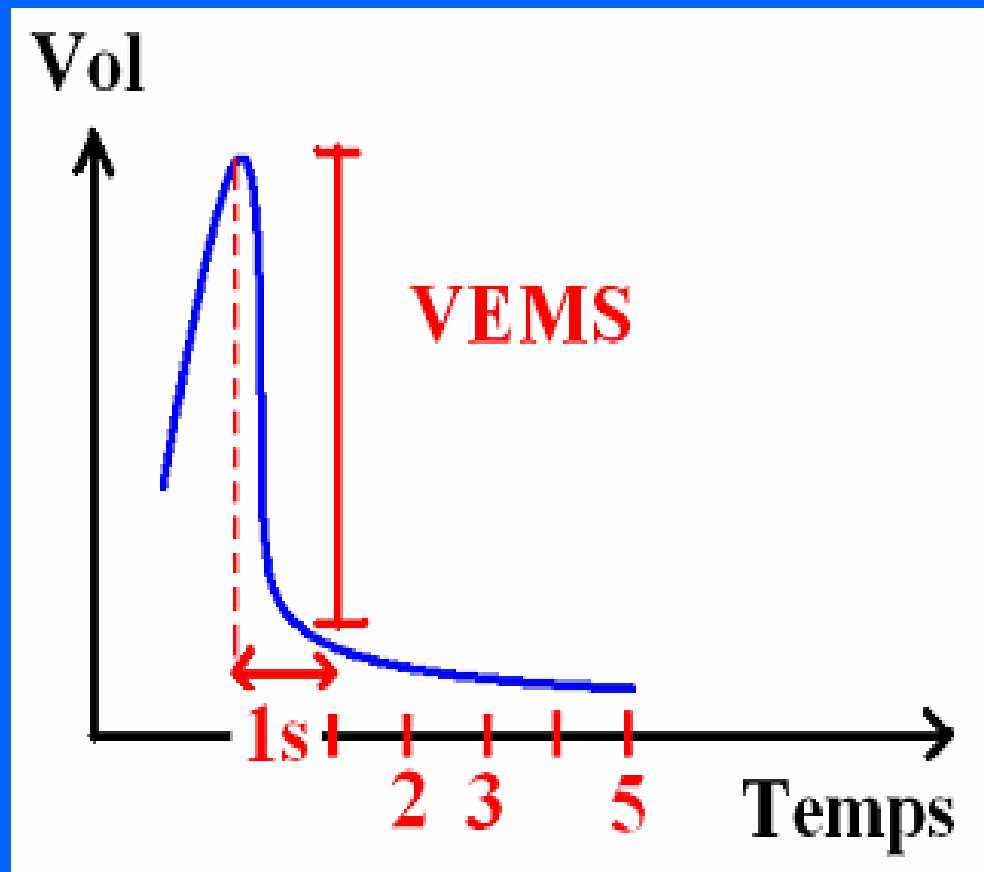


## V.2. Débits maximaux expiratoires : relations volume-temps et débit-volume



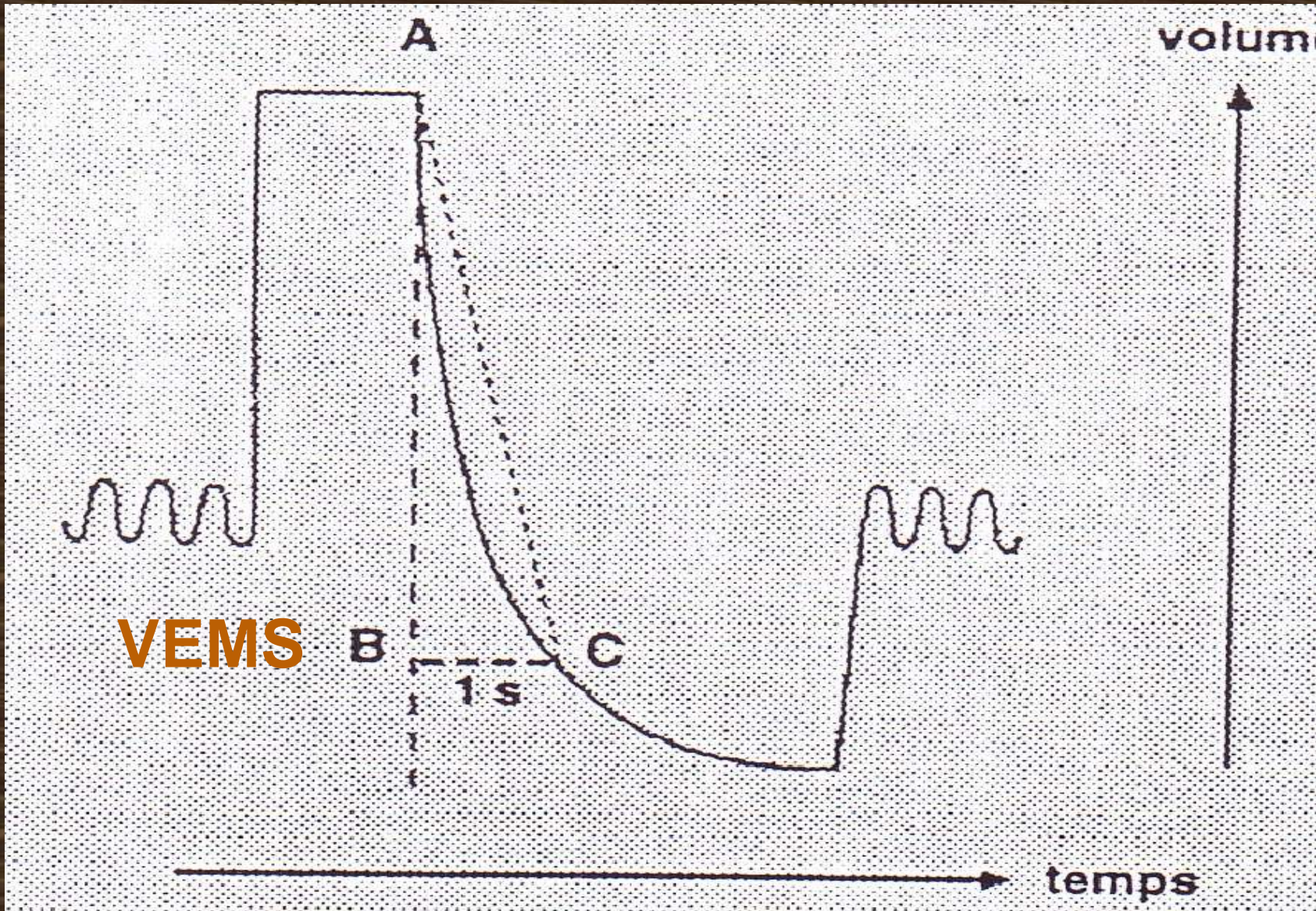
## Les débits pulmonaires :

VEMS = 80% de la CV

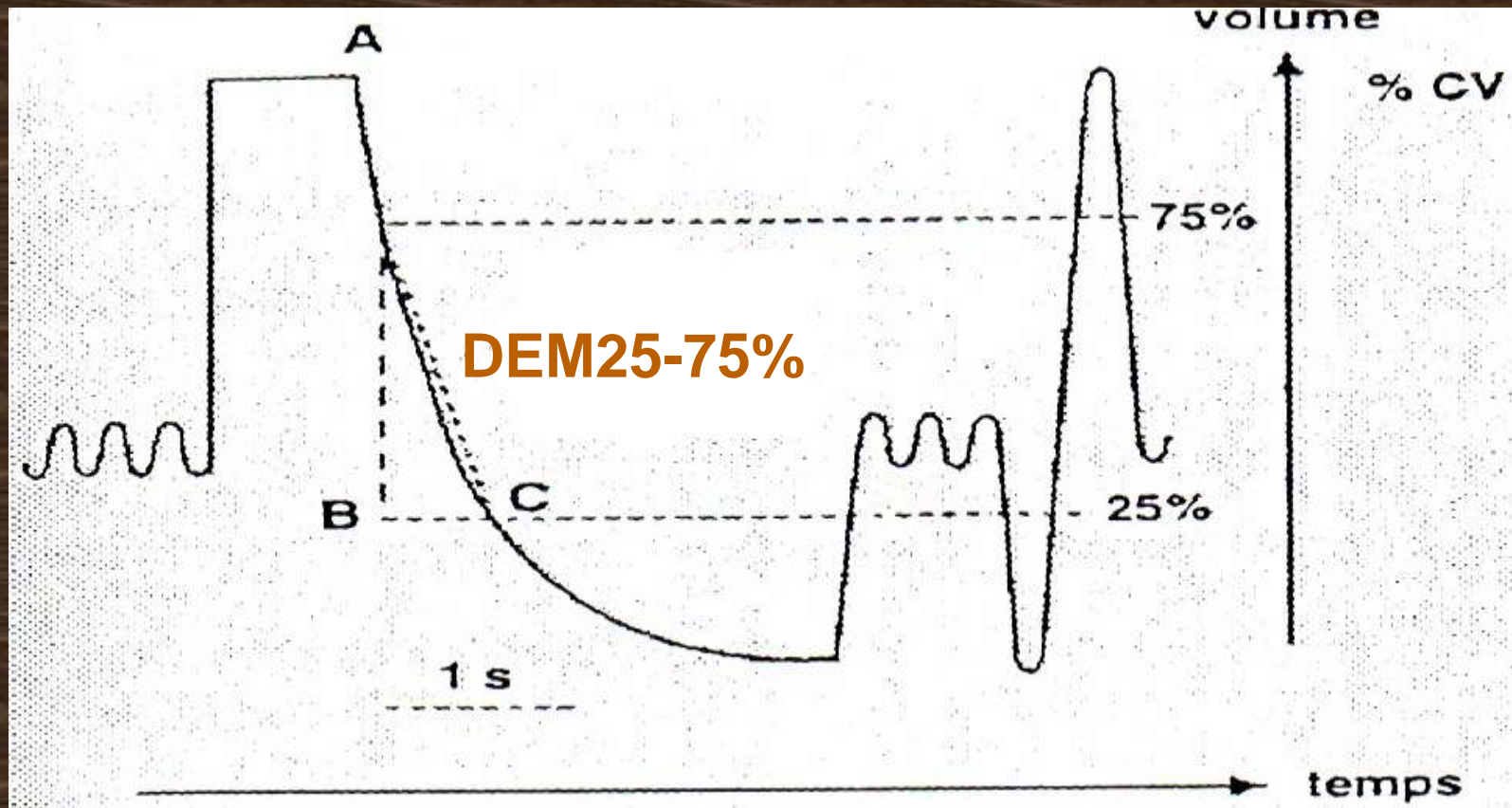


**VEMS:** On inspire, on va jusqu'au max de son VRI, on expire le plus vite possible et on mesure le volume expiré pendant la 1<sup>ère</sup> seconde

V.2.1. Débits moyens ou relation volume-temps



## V.2.1. Débits moyens ou relation volume-temps



**Intérêts respectifs de ces 2 débits?**

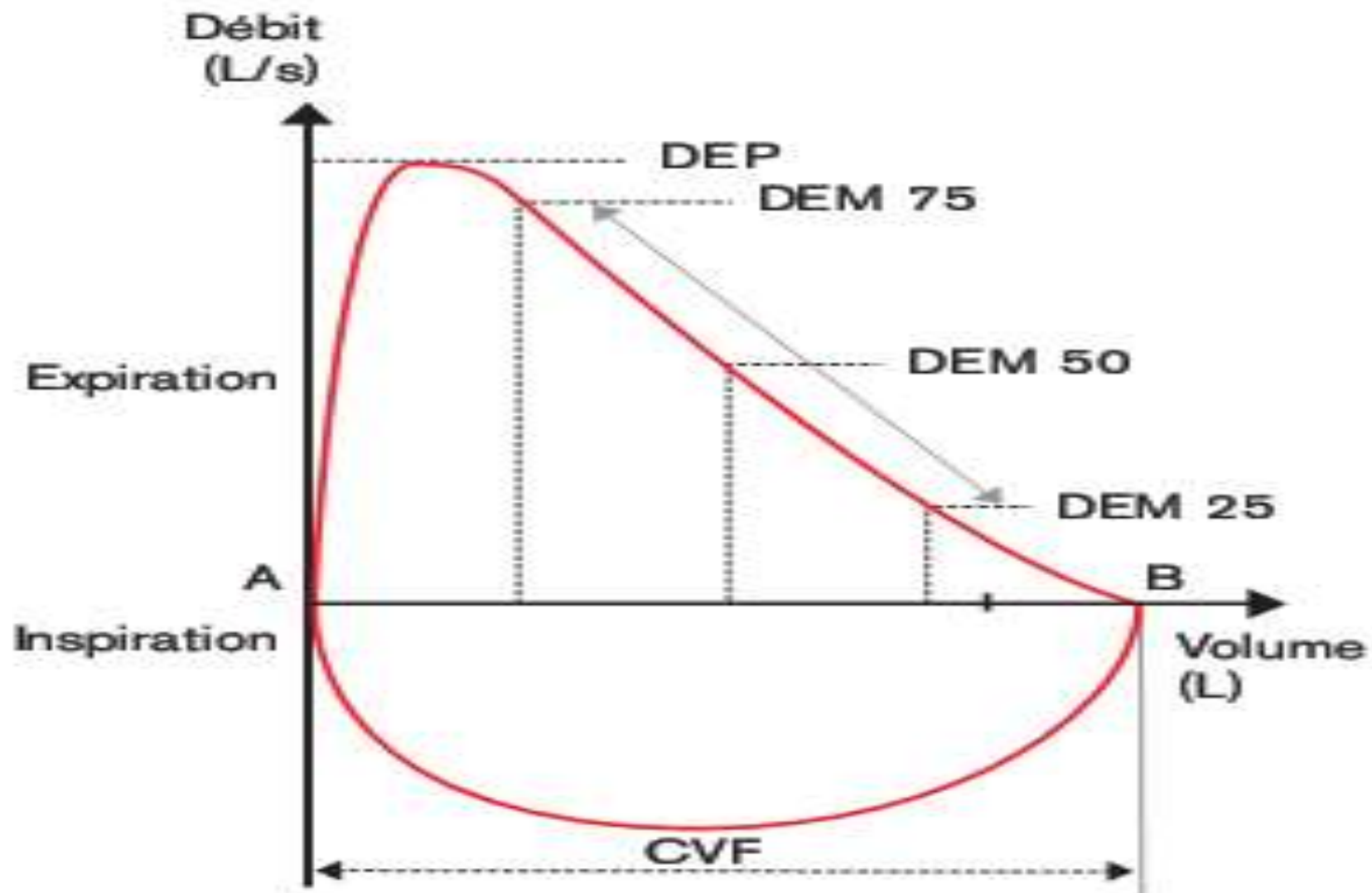
**DEM25-75** : Bronches de moyen et petit calibres

**Effort indépendant**

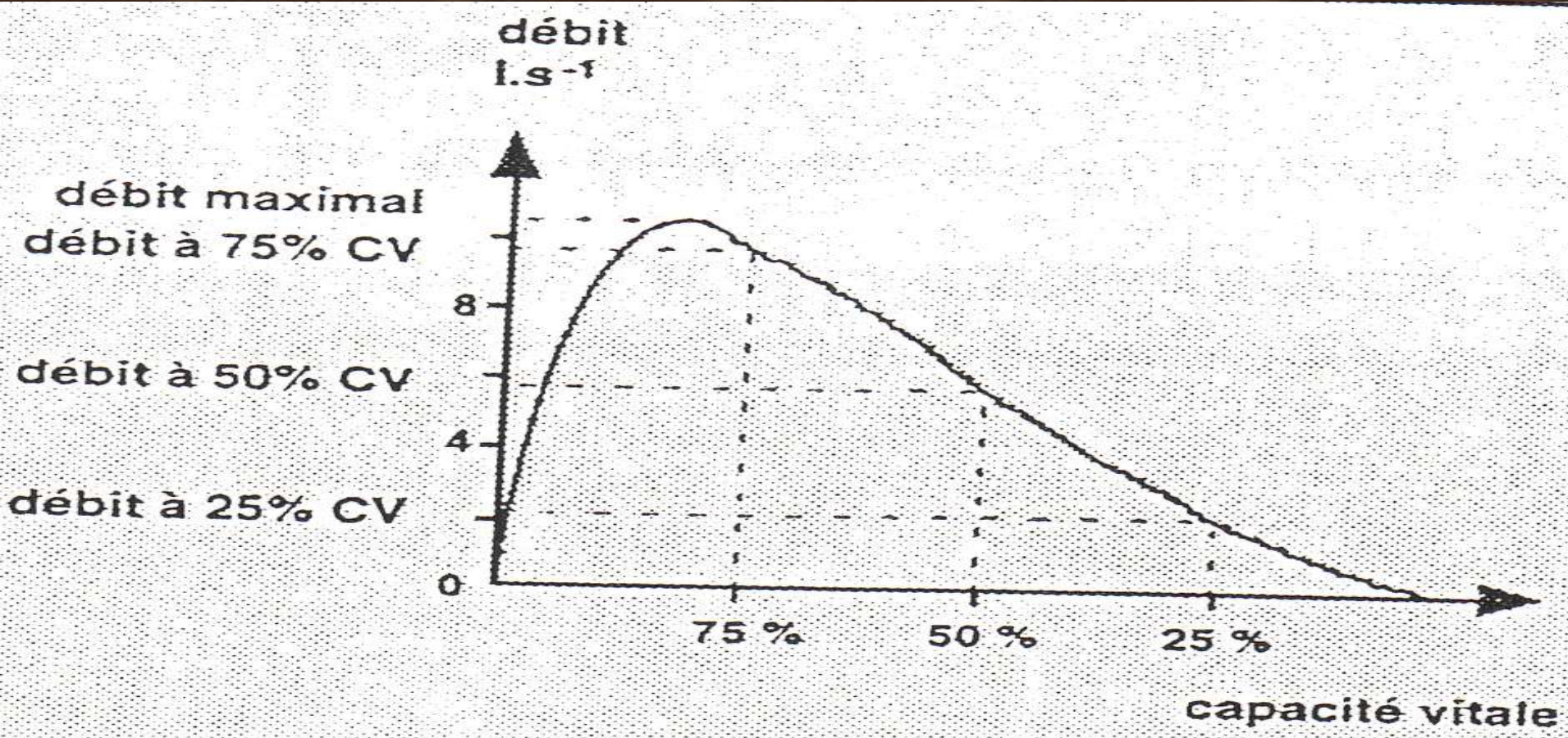
**VEMS** : Exploration globale

**Effort dépendant**

## Courbe débit-volume



## V.2.2. Débits instantanés ou relation débit-volume



**DEP + DEM75** : même signification que le VEMS  
**DEM50 + DEM25** : même intérêt que le DEM25-75

- **Le débit expiratoire de pointe (DEP)** : débit maximum atteint lors d'une expiration forcée commencée à partir d'une inspiration maximale. Sa valeur est fonction des voies aériennes centrales (trachée et grosses bronches). Il est très dépendant de l'effort expiratoire du patient

■ **Le débit expiratoire maximal à 75% de la capacité vitale**

**(DEM 75)** : débit expiratoire maximal instantané mesuré à 75% de la capacité vitale forcée restante. Comme le DEP, il est dépendant des résistances centrales et de l'effort expiratoire.

■ **Le débit expiratoire maximal à 50% de la capacité vitale**

**(DEM 50)** : débit expiratoire maximal instantané mesuré à 50% de la CVF. Il explore le milieu de l'expiration (bronches moyennes et une partie des petites), il peut être perturbé malgré un VEMS normal. Sa variabilité est plus grande que celle du DEM 25-75.



- **Le débit expiratoire maximal à 25% de la capacité vitale (DEM 25)** : débit expiratoire maximal instantané mesuré à 25% de la capacité vitale forcée restante. Il analyse les débits à petits volumes pulmonaires. Sa reproductibilité médiocre et sa grande variabilité intra-individuelle en font un paramètre moins fiable.
- **Le débit expiratoire maximal médian (DEMM ou DEM 25-75)** : débit moyen mesuré entre 25 et 75% de la CVF lors d'une manœuvre d'expiration forcée. **Représentant une valeur moyenne, il apparaît plus reproductible que les débits instantanés (DEM 50, DEM 25) donc préférentiellement utilisé pour l'exploration des débits périphériques.**