

Université Constantine3
Faculté de médecine de Constantine

Mécanique Ventilatoire

Pr BOUGRIDA MOHAMED

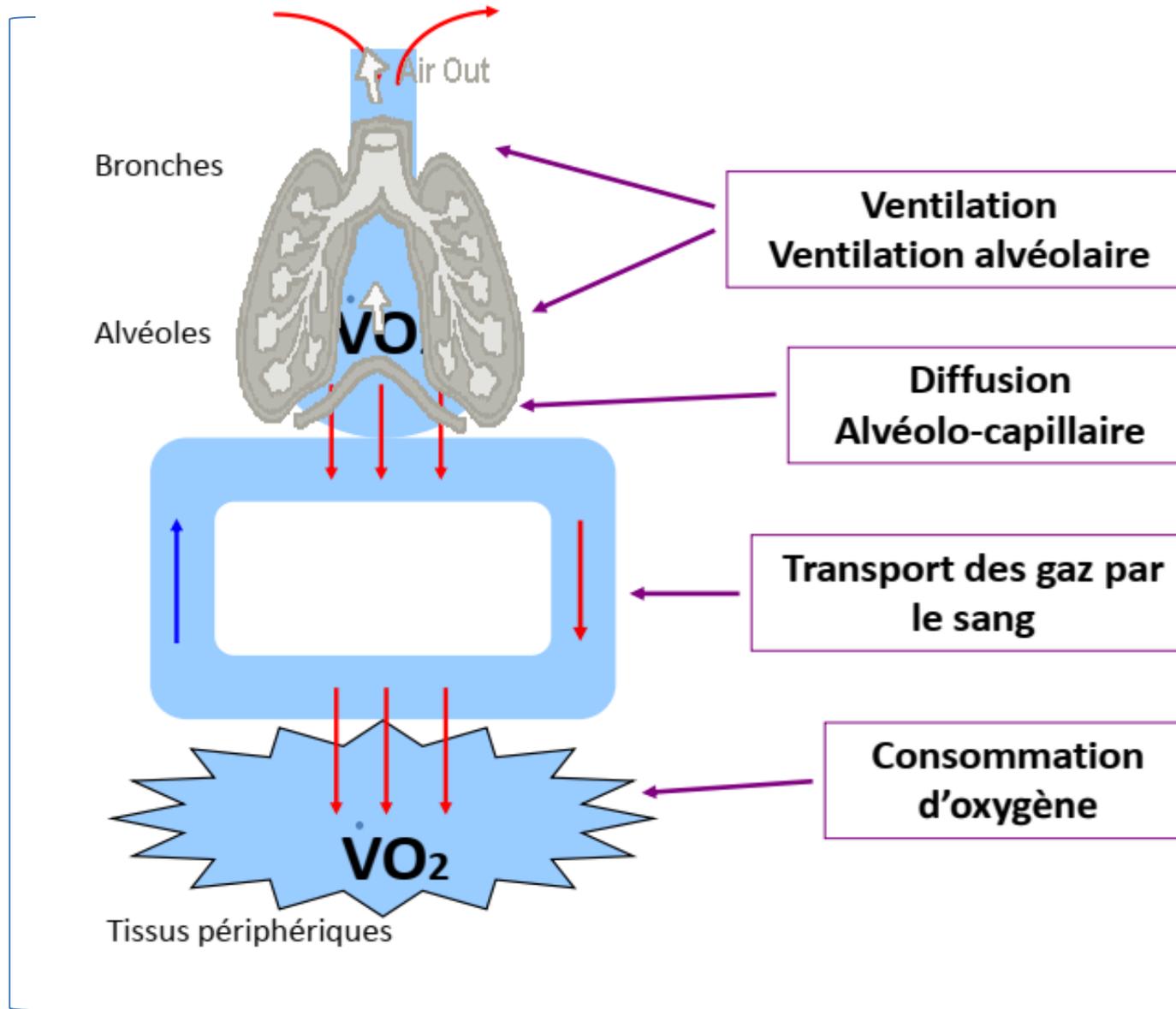
Chef de service de physiologie et des explorations
fonctionnelles

I- Introduction

- L'oxygène, contenu dans l'air, est un gaz indispensable à notre organisme pour vivre.
- Toutes les cellules ont besoin de cet oxygène pour produire de l'énergie .
- Le CO₂ est un gaz toxique qui doit être éliminé.
- Le rôle de l'appareil respiratoire est de permettre l'échange entre les poumons et l'atmosphère ce qui permet d' éliminer le gaz carbonique CO₂

- La respiration est définie par la succession de phénomènes physiologiques permettant le transport de gaz respiratoires :
 - L'oxygène de l'air ambiant vers toutes les cellules et son utilisation dans le métabolisme énergétique
 - Le dioxyde de Carbone CO₂ produit final du métabolisme qui doit être éliminé par les poumons
- Les phénomènes physiologiques permettant la respiration sont:
 - La ventilation
 - Les échanges alvéolo-capillaires
 - Le transport des gaz
 - L'extraction de l'oxygène par les cellules
 - Respiration cellulaire : Phosphorisation oxydative

Contrôle nerveux



Les étapes de la respiration

La ventilation

Elle permet de renouveler les gaz respiratoires présents dans les alvéoles pulmonaires par les mécanismes d'inspiration et d'expiration.

● A l'inspiration:

- Le diaphragme et les muscles intercostaux se contractent.

L'inspiration est donc une phase active.

- Une augmentation du volume de la cage thoracique.
- Distension du système thoraco-pulmonaire provoquant ainsi une diminution de la pression intra-pulmonaire.
- Celle-ci devenant inférieure à la pression atmosphérique l'air entre dans les poumons.

● A l'expiration:

- les muscles inspiratoires principaux se relâchent.
- L'expiration se fait grâce à la rétraction pulmonaire est donc une phase passive sauf lors d'un effort ou lors d'une expiration forcée où les muscles abdominaux se contractent rendant l'expiration active.
- Cela entraîne une diminution du volume de la cage thoracique.
- Augmentation de la pression intra-pulmonaire.
- Celle-ci devenant supérieure à la pression atmosphérique, l'air riche en dioxyde de carbone CO₂ contenu dans les alvéoles est rejetée vers le milieu extérieur.

L'hématose:

- Les échanges alvéolo-capillaire
- Intégrité de la membrane alvéolo-capillaire
- Cet échange se fait grâce aux différences des pressions partielles de l'O₂ et le CO₂ à travers la membrane
- Un bon équilibre entre la ventilation et la perfusion dans les alvéoles pulmonaires
- Un rapport ventilation perfusion optimal

II- La mécanique Ventilatoire

Objectifs du cours :

1. Définir les propriétés physique du système respiratoire

(Compliance- Elasticité – Résistances- Contraintes et déformation)

2. Déterminer les propriétés mécanique de l'appareil ventilatoire

Conditions statiques : Volumes pulmonaires

Condition dynamiques : Débits aériens ou bronchiques

3. Analyser les courbes pressions volumes : Compliance

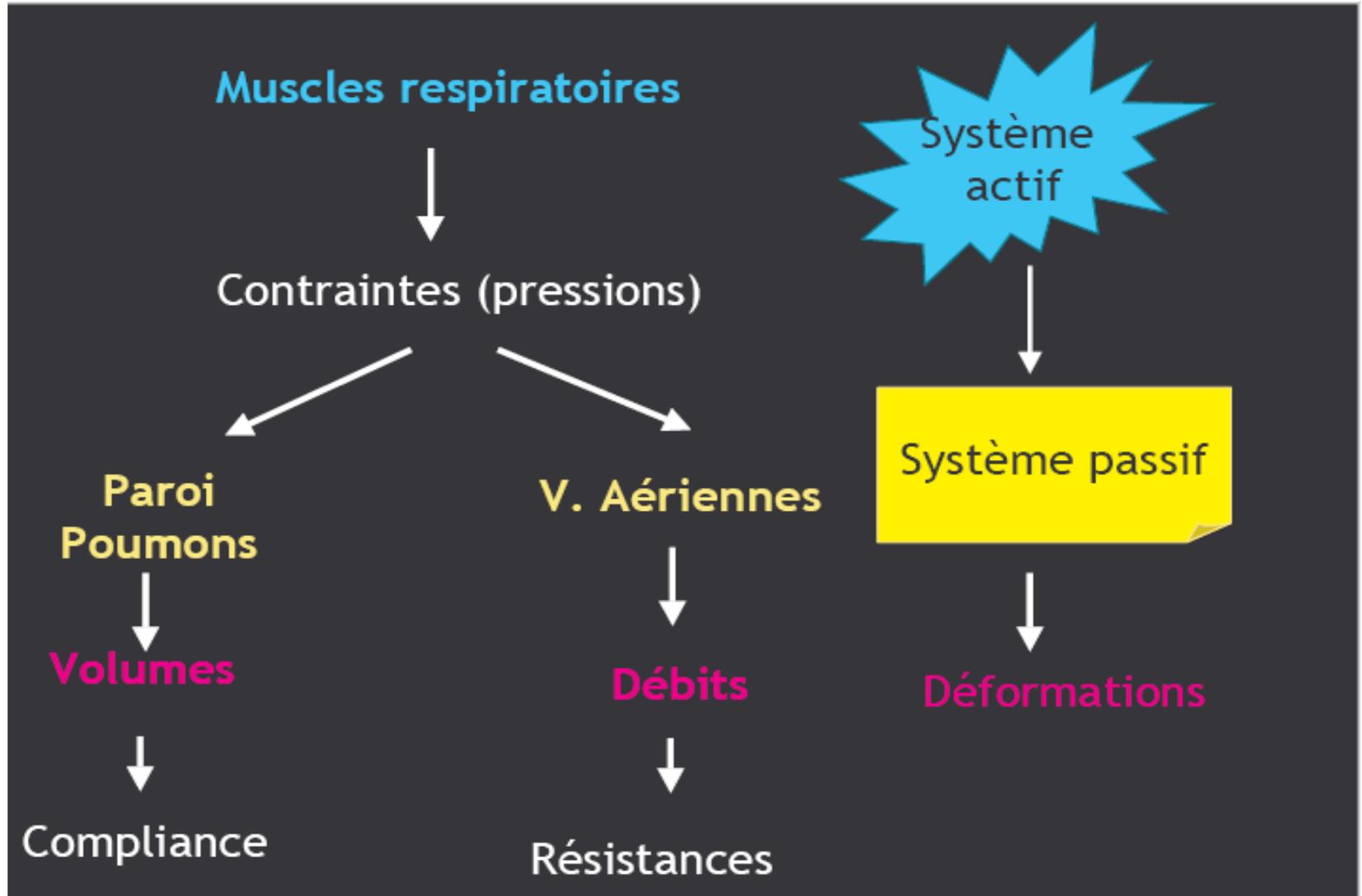
4. Décrire la mesure des volumes et débits par **la sipométrie**

A. Définition de la mécanique ventilatoire

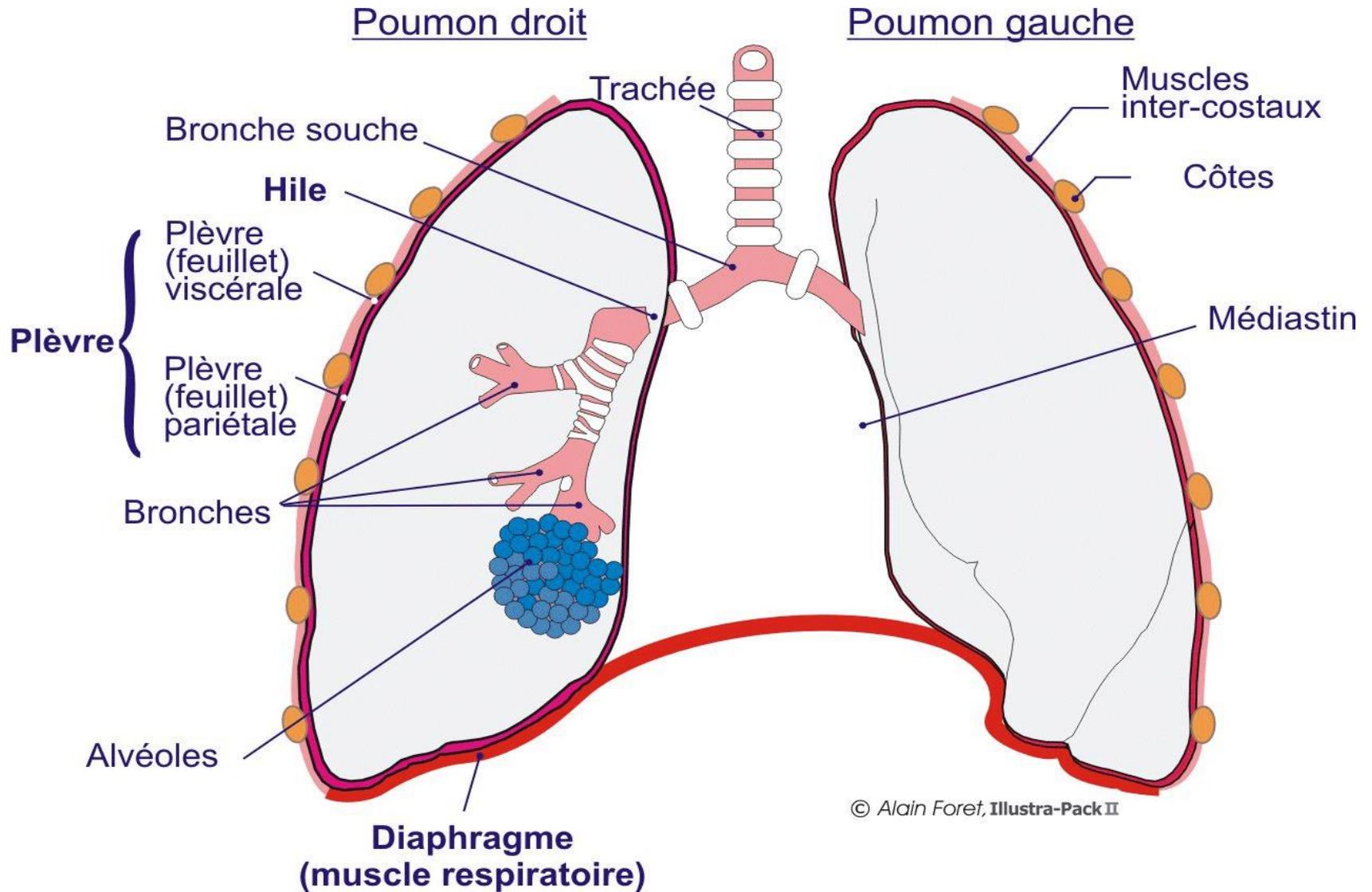
Étude des forces qui permettent ou qui s'opposent
au renouvellement de l'air alvéolaire

- **Elle comprend deux systèmes**
 - système actif : *muscles ventilatoires*
 - système passif : poumon , bronches , plèvre ...

Mécanique ventilatoire

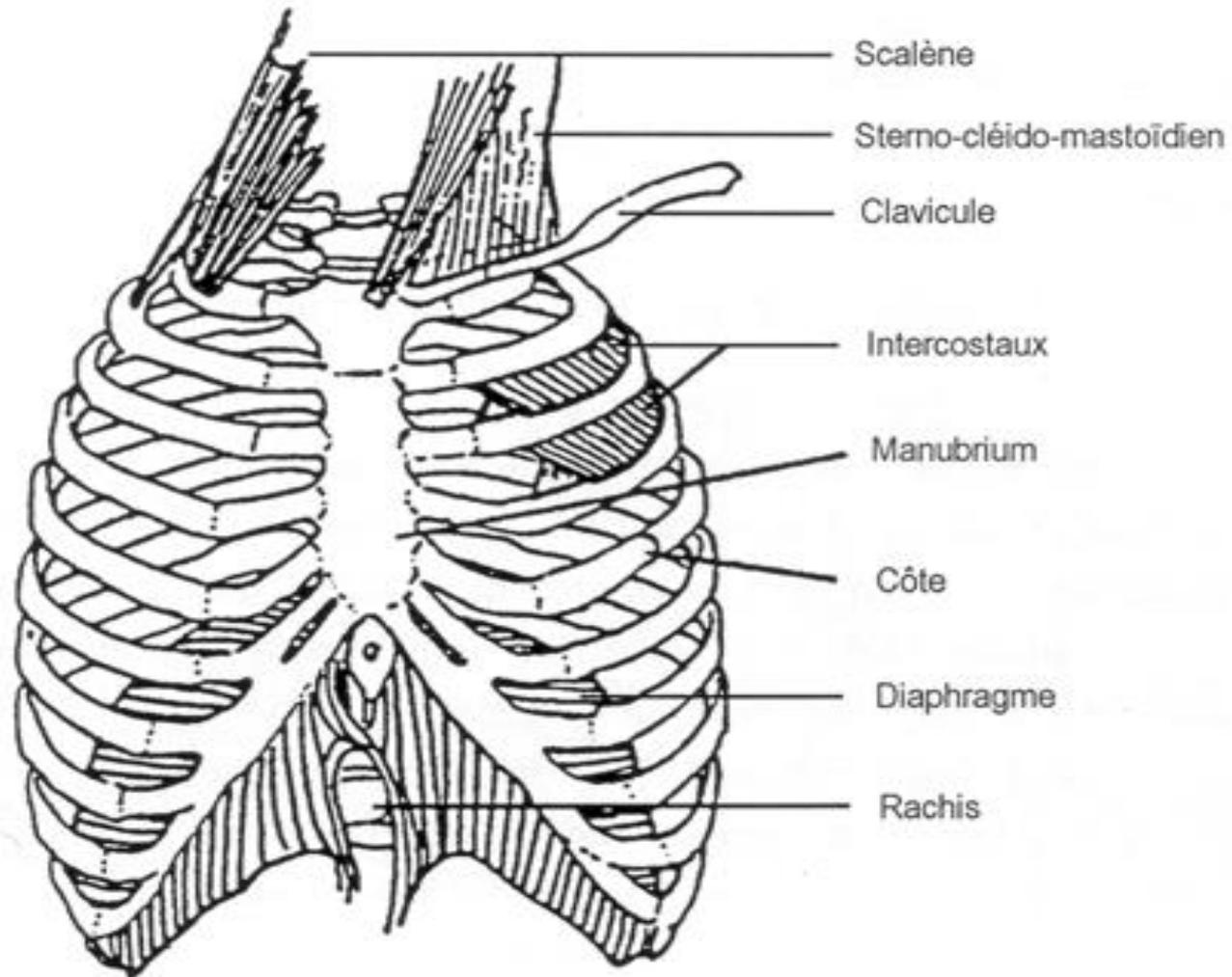


B- Appareil ventilatoire



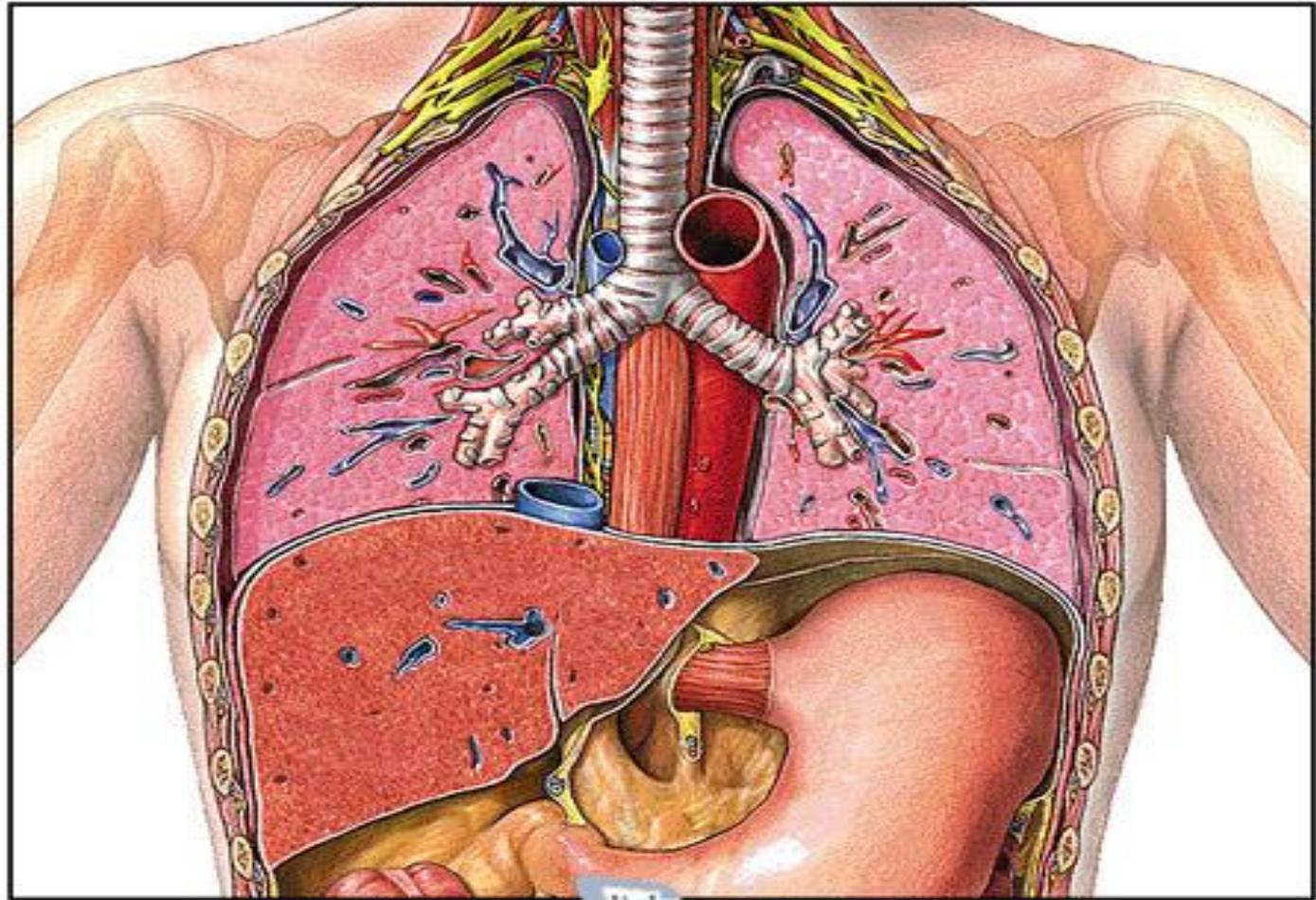
1- Système passif :

► Charpente osseuse



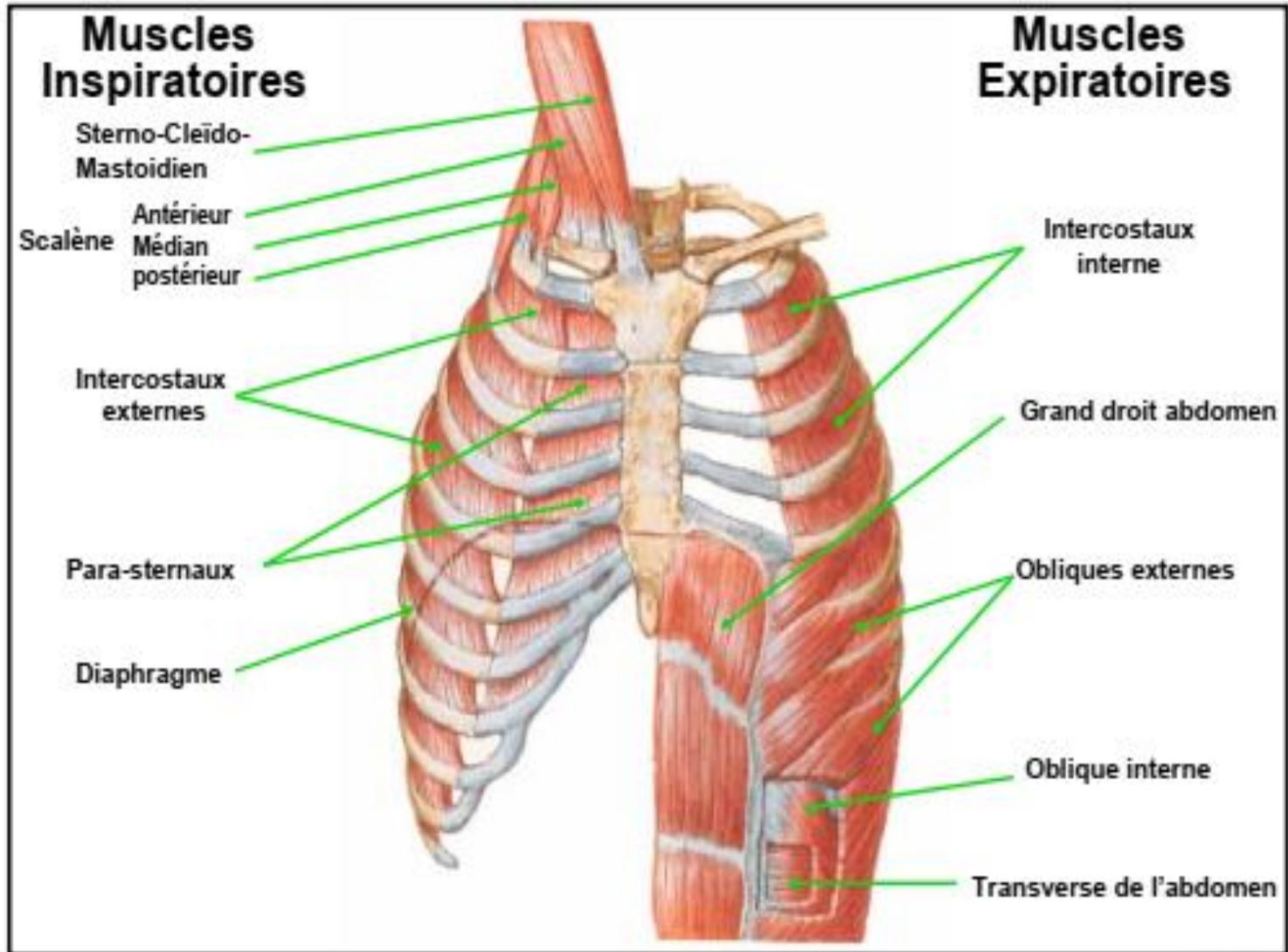
1- Système passif :

► Poumon et voies aériennes

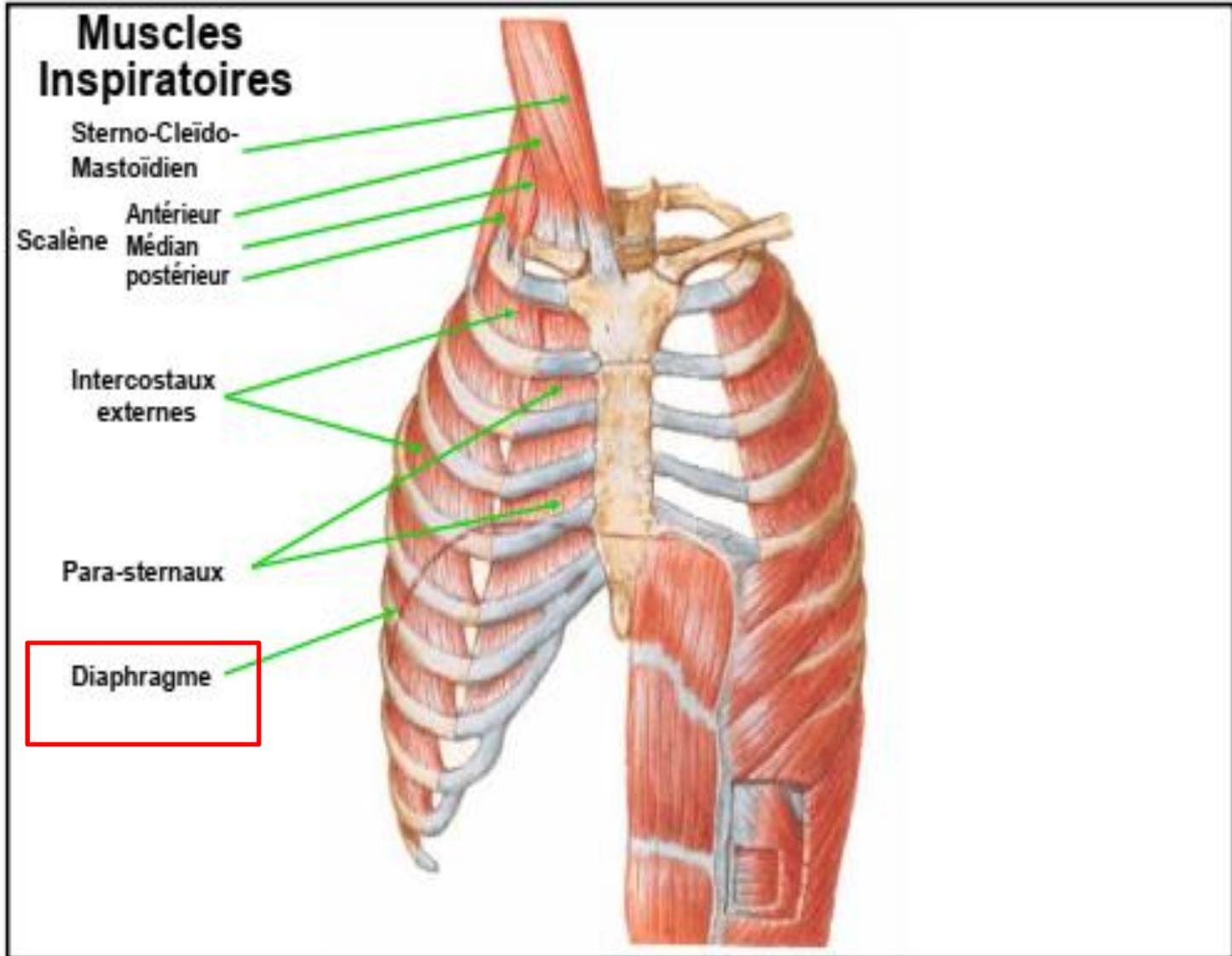


Poumons, plèvre , les bronches.....

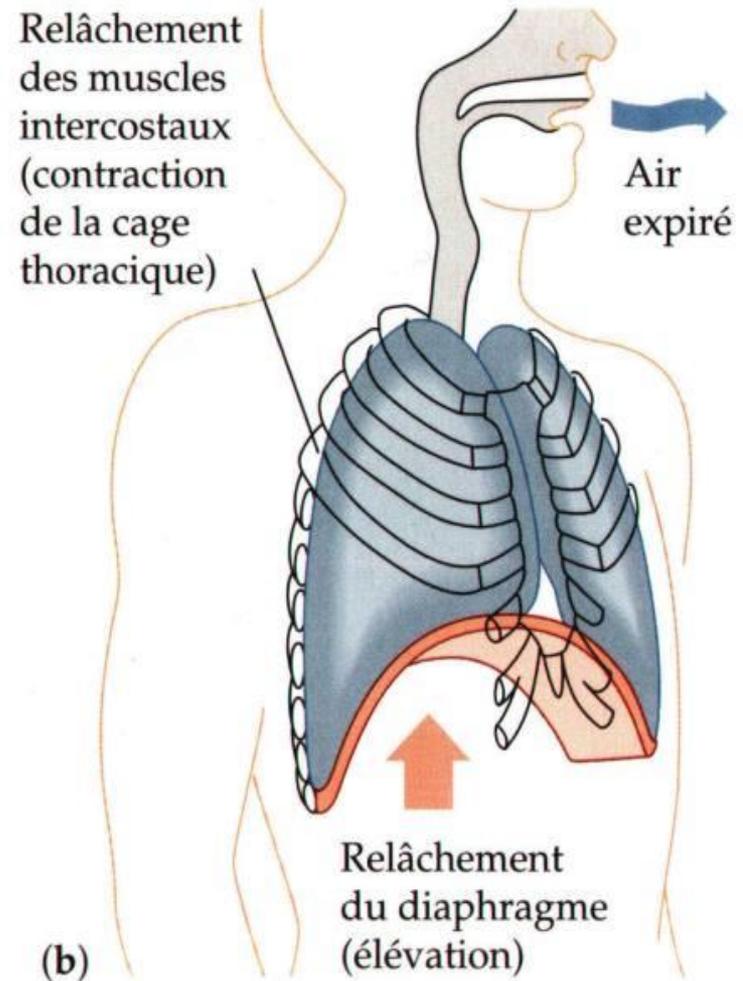
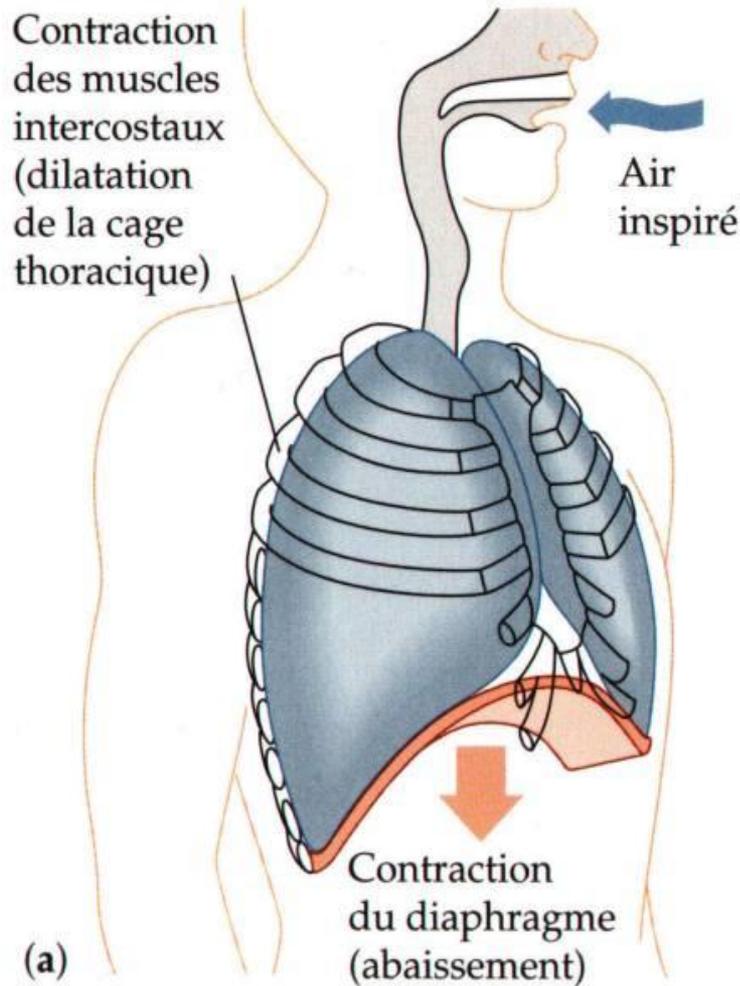
2- Système actif = muscles ventilatoires



a- Muscles inspiratoires



a-1- Diaphragme = muscle inspiratoire principal



Quand un côté du diaphragme est paralysé, il se déplace vers le haut durant l'insp en raison de la diminution de la pression intra thoracique

Le diaphragme est un muscle endurant

2 type de fibres musculaires

```
graph TD; A[2 type de fibres musculaires] --> B[Fibres blanches ou rapides]; A --> C[Fibres rouges ou lentes]; B --- D[Pauvres en mitochondries]; C --- E[Riches en mitochondries]; D --- F[Métabolisme anaérobie]; E --- G[Métabolisme aérobie]; F --- H[Contraction rapide]; G --- I[Contraction lente]; H --- J[force]; I --- K[endurance];
```

Fibres blanches
ou rapides

Pauvres en mitochondries

Métabolisme anaérobie
Contraction rapide
force

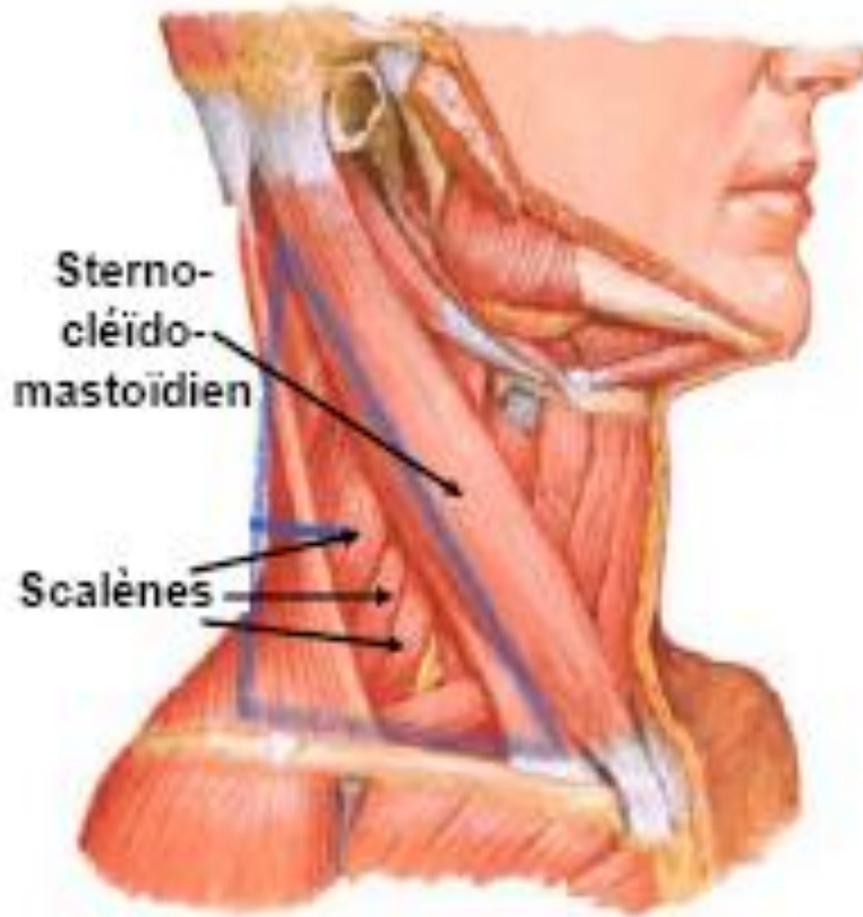
Fibres rouges
ou lentes

Riches en mitochondries

Métabolisme aérobie
Contraction lente
endurance

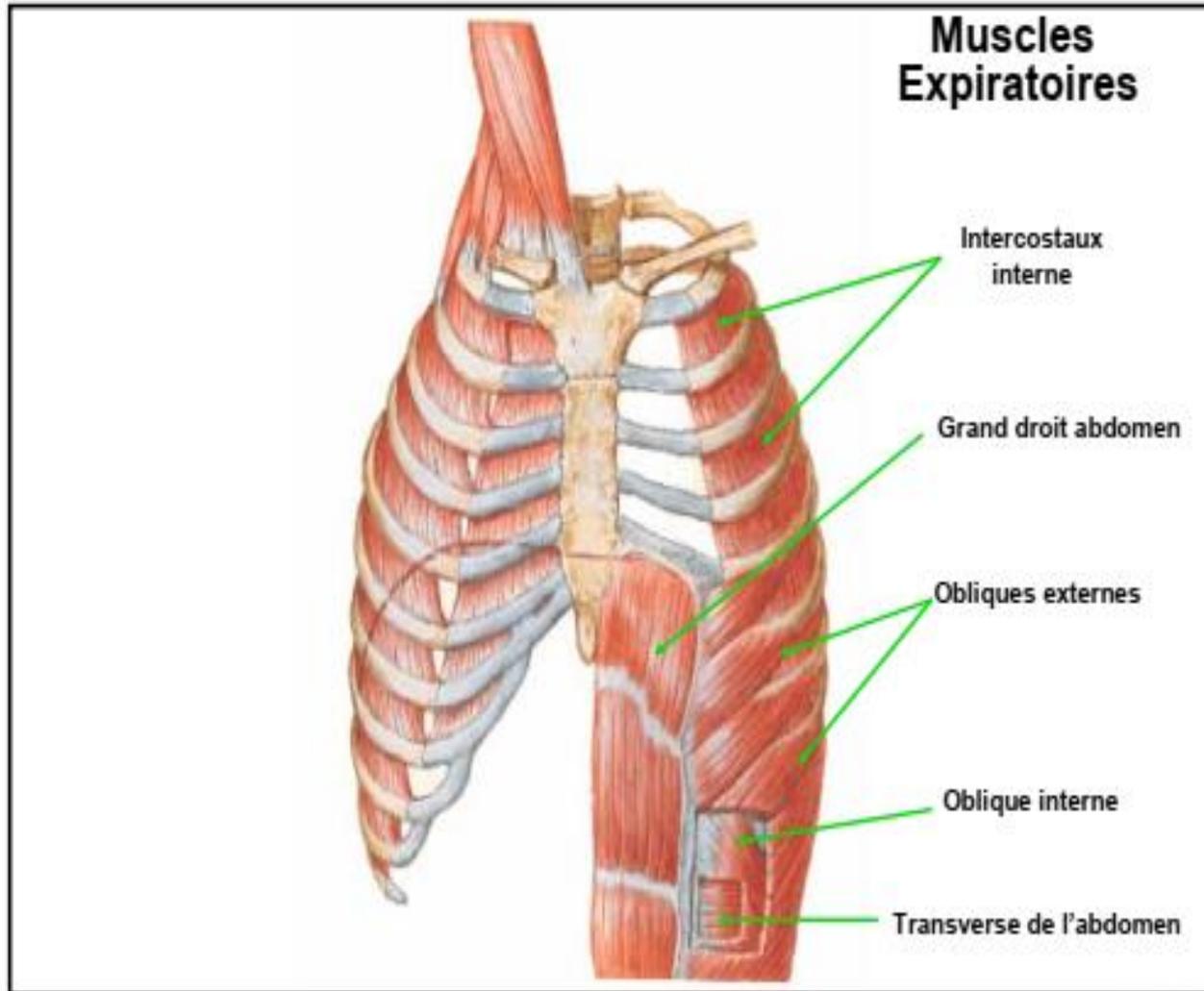
Composition déterminée génétiquement

a-2- Muscles inspiratoires accessoires



La paralysie des muscles intercostaux n'affecte pas la respiration au repos car le diaphragme peut compenser ce manque

b- Muscles expiratoires



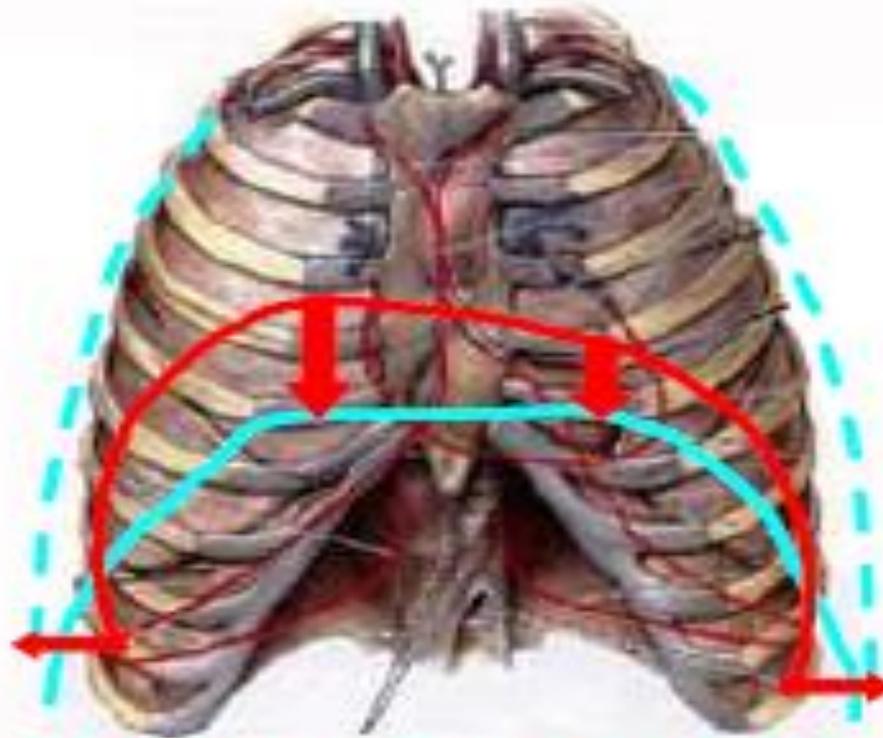
Phénomène expiratoire

- Structures thoraco pulmonaires : Élastiques
- L'expiration : phénomène passif (repos)
- Muscles expiratoires : efforts physique ...
- Les plus importants sont les muscles abdominaux
- L'expiration est diminuée chez l'obèse par diminution du VRE

3- Cycle ventilatoire

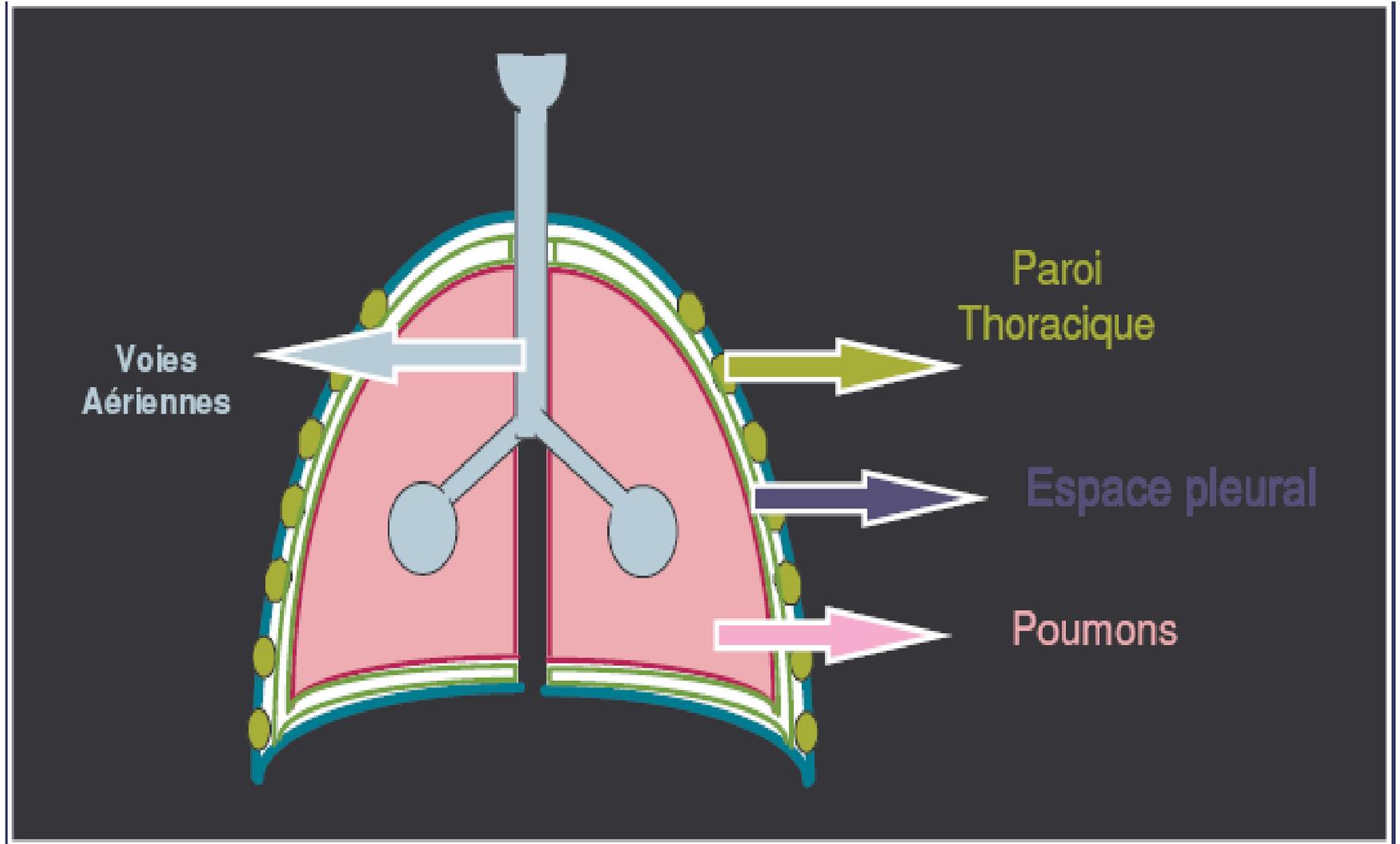
Pression x Volume = Cte

Hautes pressions \longrightarrow Basses pressions

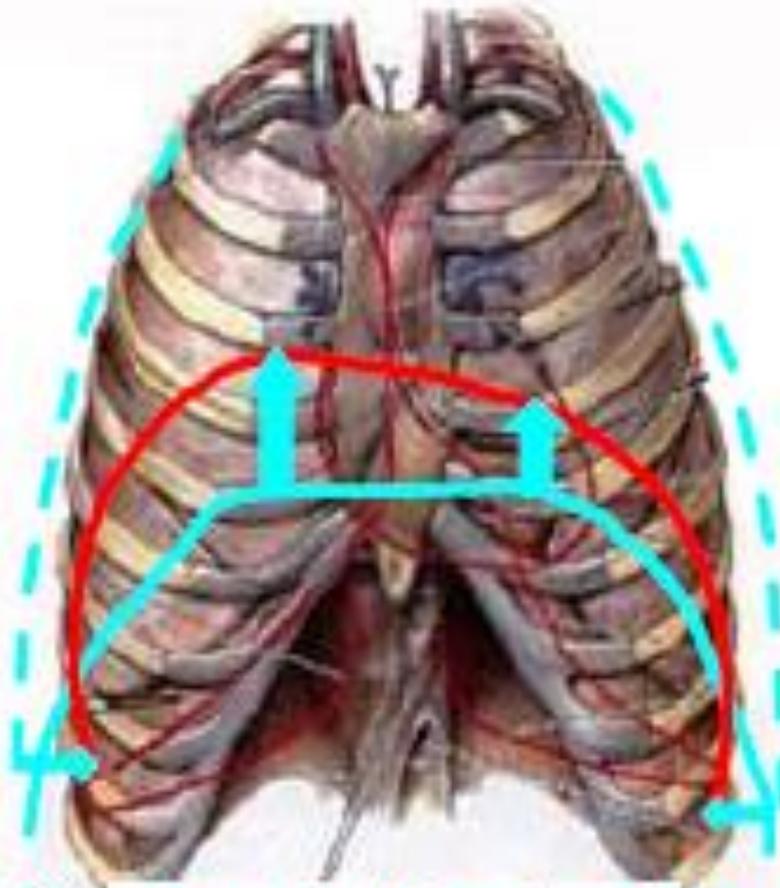


Inspiration = contraction diaphragmatique

3- Cycle ventilatoire



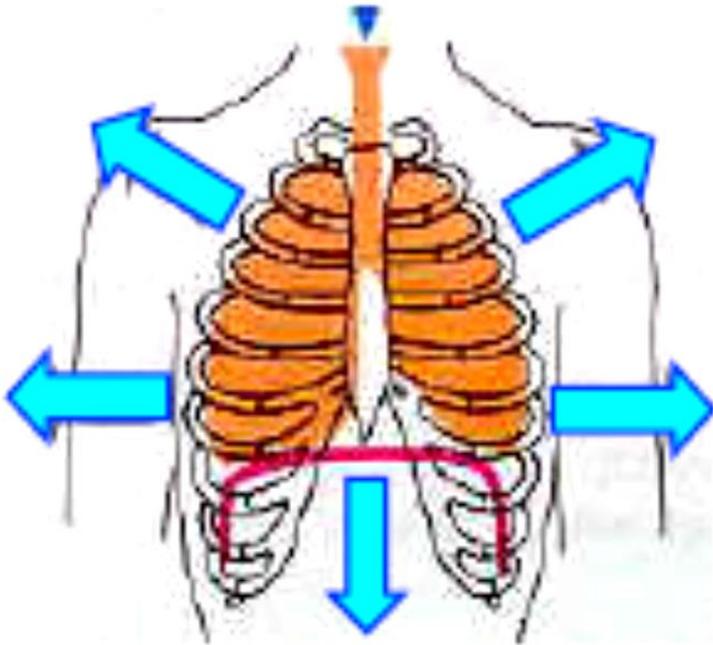
Cycle ventilatoire



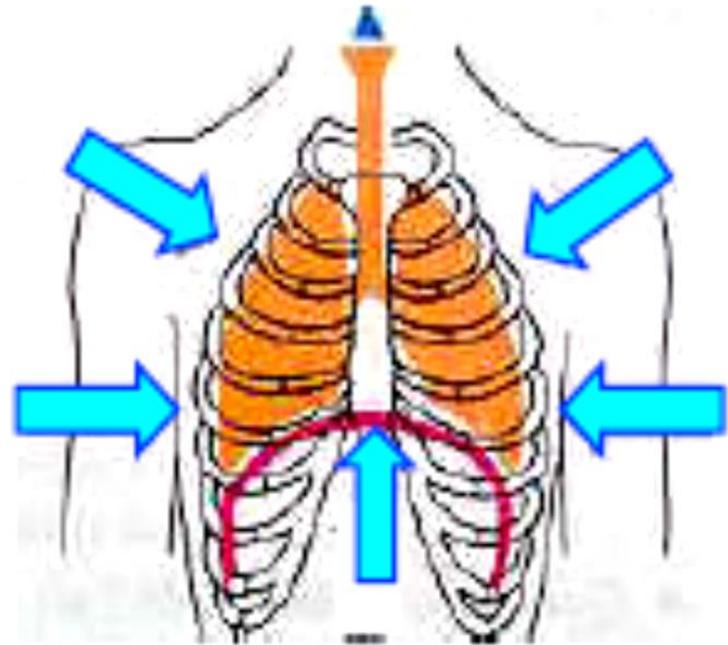
Expiration = contraction des abdominaux,
relâchement du diaphragme

Cycle ventilatoire

Inspiration

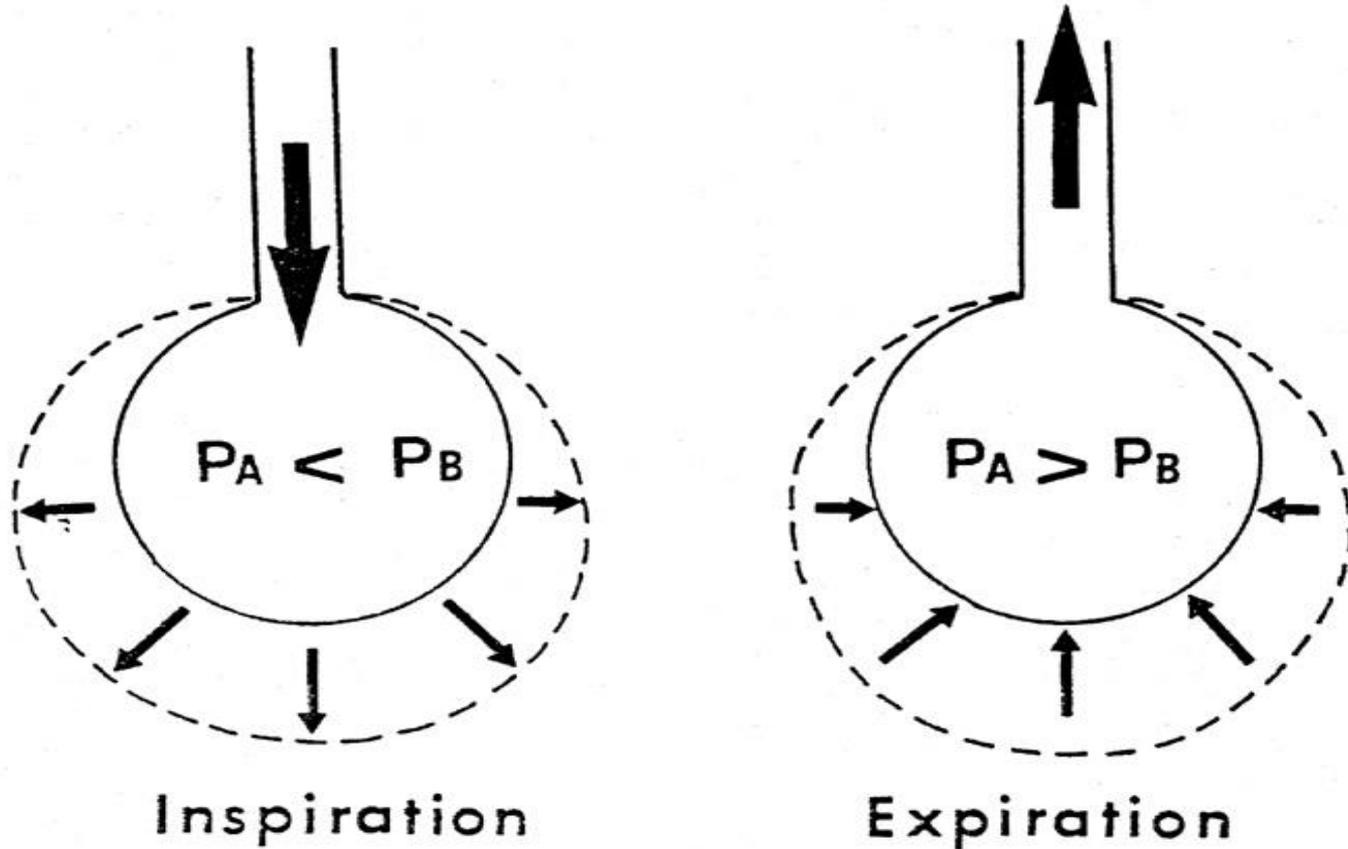


Expiration



Synthèse

Cycle ventilatoire



Le cycle ventilatoire. Lors de l'inspiration, le volume alvéolaire augmente, ce qui entraîne ($PV = ct$) un abaissement de la pression alvéolaire (P_A) en dessous de la pression barométrique (P_B) avec, pour conséquence, une entrée de gaz vers les poumons. Lors de l'expiration, le poumon revient sur lui-même, le volume diminue. P_A devenant supérieur à P_B , l'air sort des poumons.

II- La mécanique Ventilatoire

Objectifs du cours :

1. Définir les propriétés physique du système respiratoire

(Compliance- Elasticité – Résistances- Contraintes et déformation)

2. Déterminer les propriétés mécanique de l'appareil ventilatoire

Conditions statiques : Volumes pulmonaires

Condition dynamiques : Débits aériens ou bronchiques

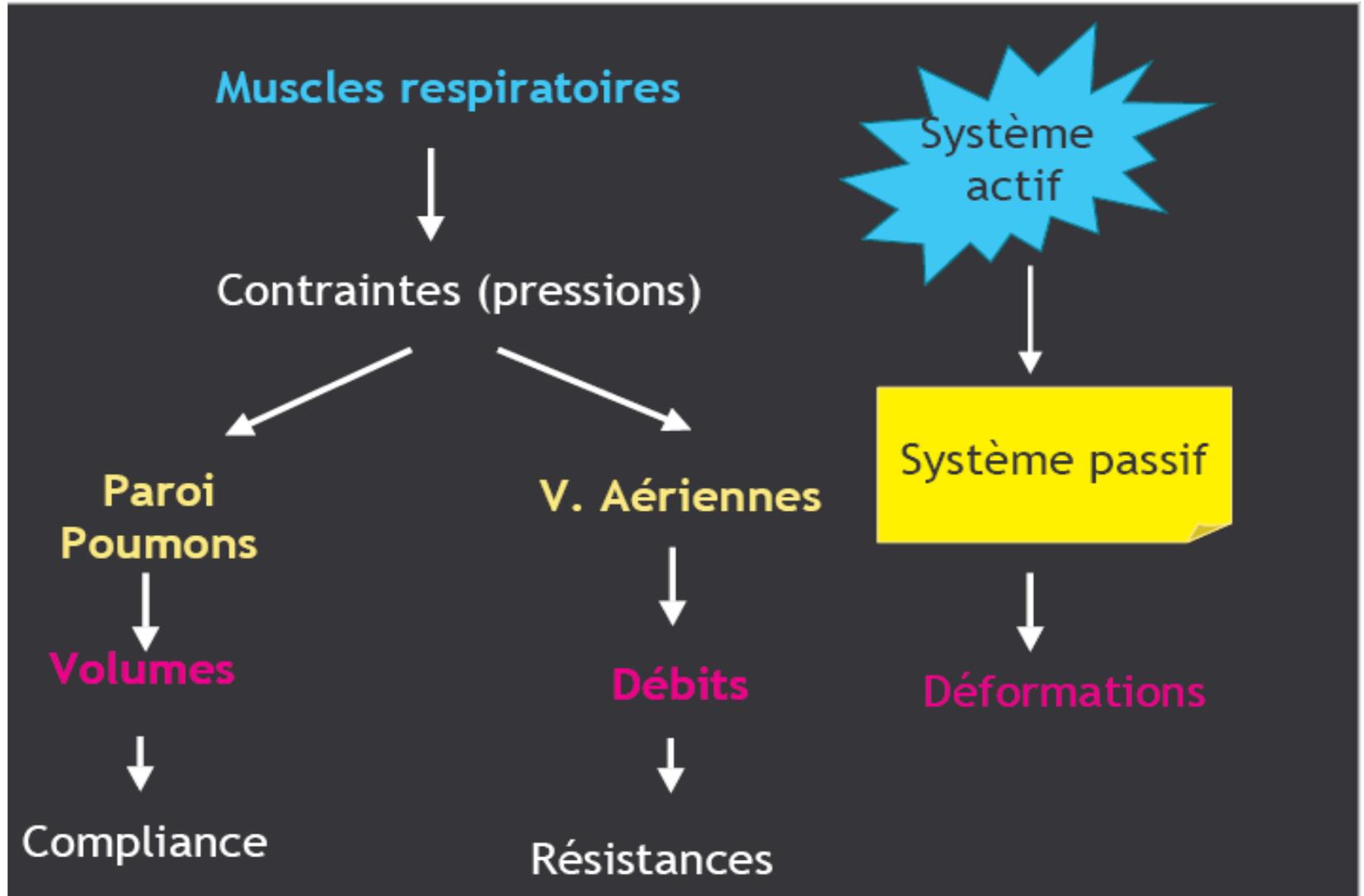
3. Analyser les courbes pressions volumes : Compliance

4. Décrire la mesure des volumes et débits par **la sipométrie**

A. Définition de la mécanique ventilatoire

Étude des forces qui permettent ou qui s'opposent
au renouvellement de l'air alvéolaire

Mécanique ventilatoire



C - Propriétés mécaniques de l'appareil ventilatoire

4. Relation forces motrices et résistantes

$$P_{\text{tot}} = E_{\text{tot}} \times V + R_{\text{tot}} \times \dot{V} + I_{\text{tot}} \times \ddot{V}$$

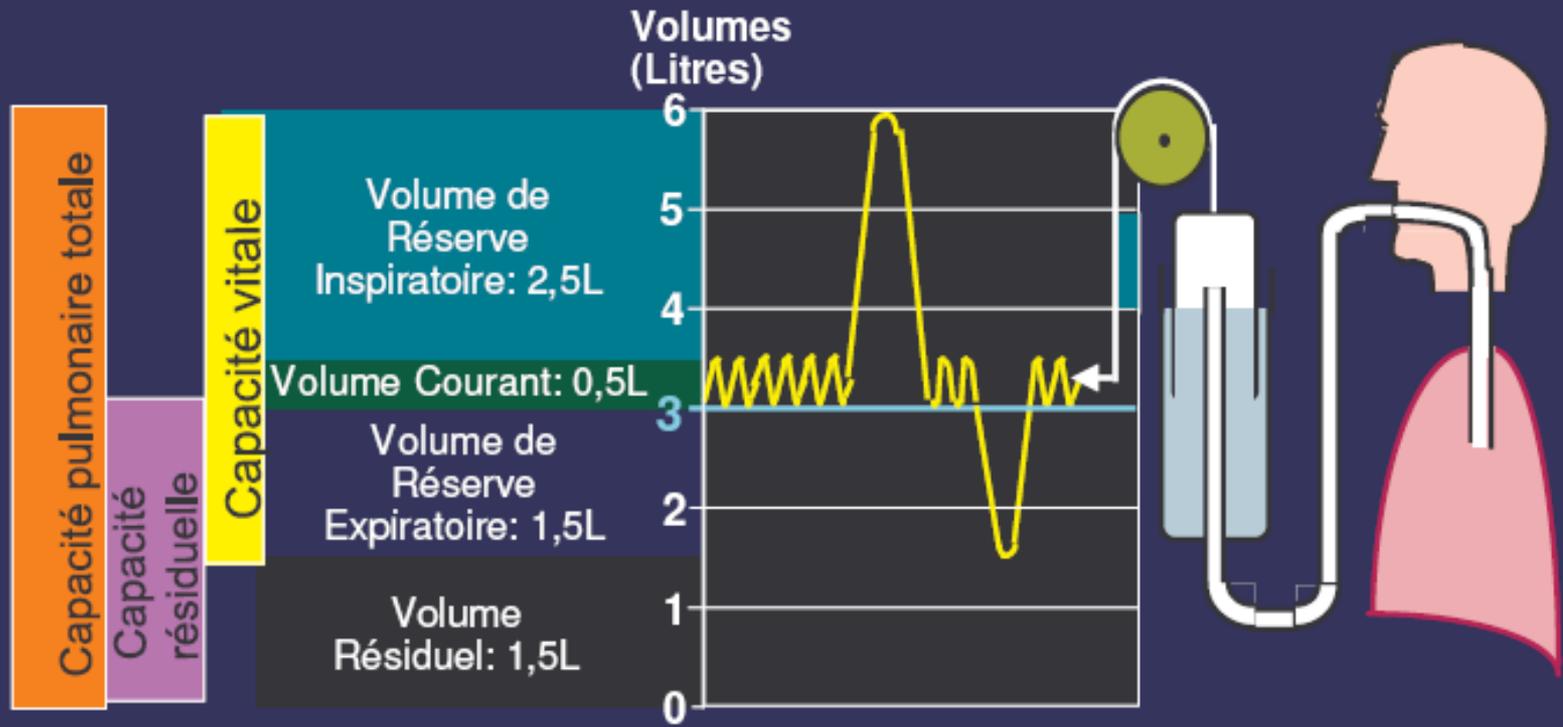
Equation de Newton dans les conditions statiques :

- $P_{\text{tot}} = E_{\text{tot}} \times V$
- E_{tot} : Elastance totale
- V : Volume

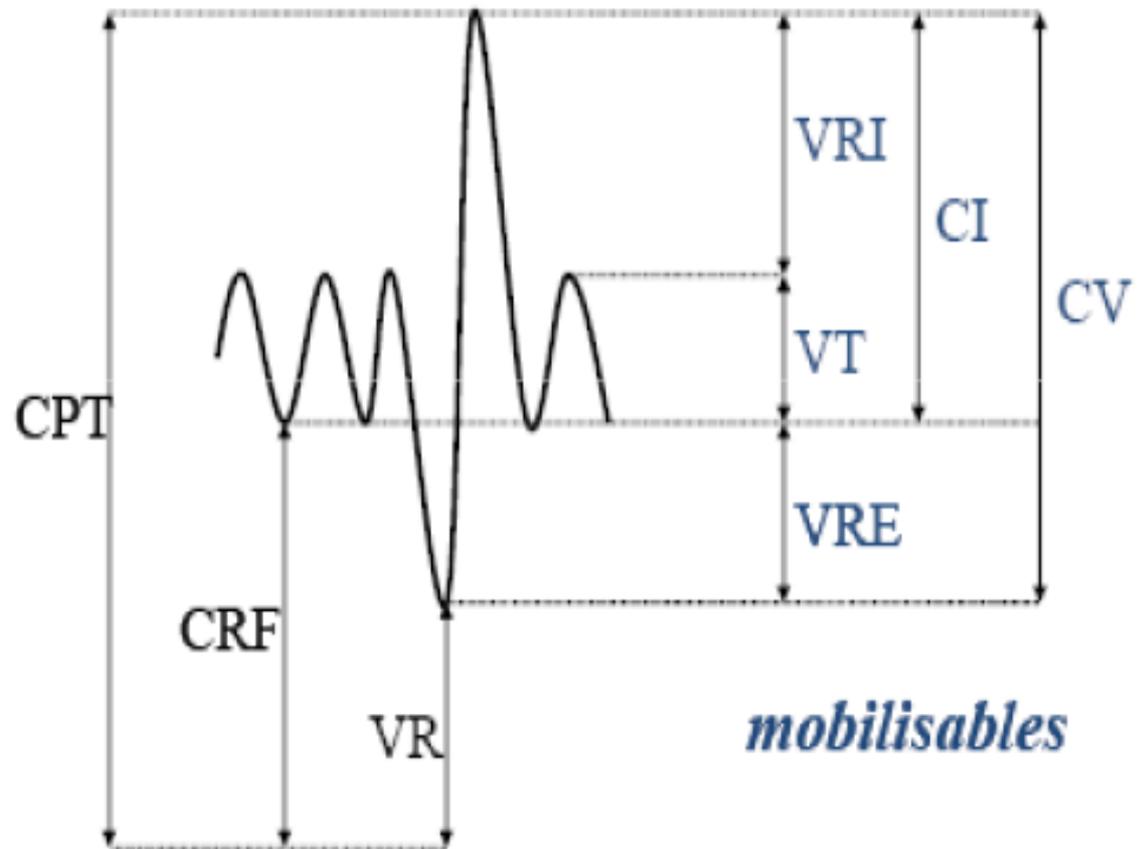
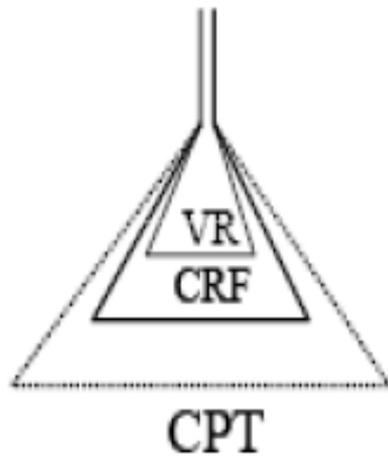
1- Conditions statiques

Etude des volumes pulmonaires

Les volumes pulmonaires



Les volumes pulmonaires mobilisables et non mobilisables

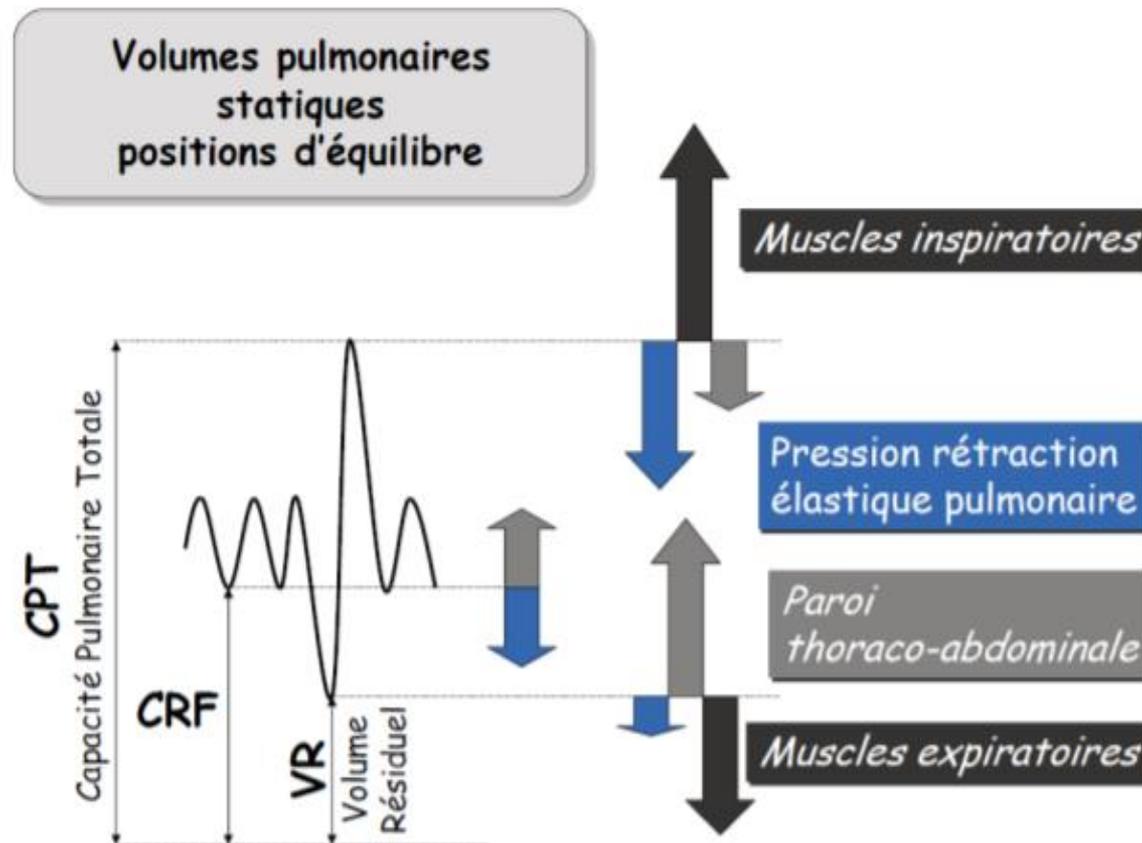


non mobilisables

CRF = Capacité résiduelle fonctionnelle	CPT=Capacité pulmonaire totale	VR=Volume résiduel
<p>C'est le volume à la <u>fin d'une expiration calme</u>.</p> <p>Il y a un équilibre car le poumon tire vers le bas (il souhaite avoir un volume de 0L et exerce donc une pression de rétraction élastique pulmonaire) et la paroi tire vers le haut pour rejoindre son volume de relaxation.</p> <p>S'il y a une rupture d'équilibre, le poumon va se rétracter et la paroi se distendre, c'est le pneumothorax.</p>	<p>C'est le volume à la <u>fin d'une inspiration forcée</u> et donc le maximum de gaz que peut contenir le poumon.</p> <p>La paroi est passée au dessus de sa position d'équilibre et va donc tirer vers le bas. Le poumon s'est distendu et va donc également vouloir tirer vers le bas car il est à sa pression de rétraction maximale. On n'a pas ici d'équilibre car les deux vecteurs vont vers le bas. Mais du fait de l'effort pour gonfler le poumon, les muscles inspiratoires vont être recrutés et vont exercer une force vers le haut qui va permettre cet équilibre.</p>	<p>C'est le volume à la <u>fin de l'expiration forcée</u>. C'est le volume qui reste dans le poumon quand on a tenté de le vider au maximum.</p> <p>Le poumon tire légèrement vers le bas car il est proche de son volume de relaxation (de 0L).</p> <p>La paroi tire fortement vers le haut car on s'éloigne de sa position d'équilibre. Enfin des muscles expiratoires vont être recrutés et vont exercer une force vers le bas qui va permettre l'équilibre.</p>

ne diminution de la CPT peut créer des troubles restrictifs (*on reverra cela en ED*).

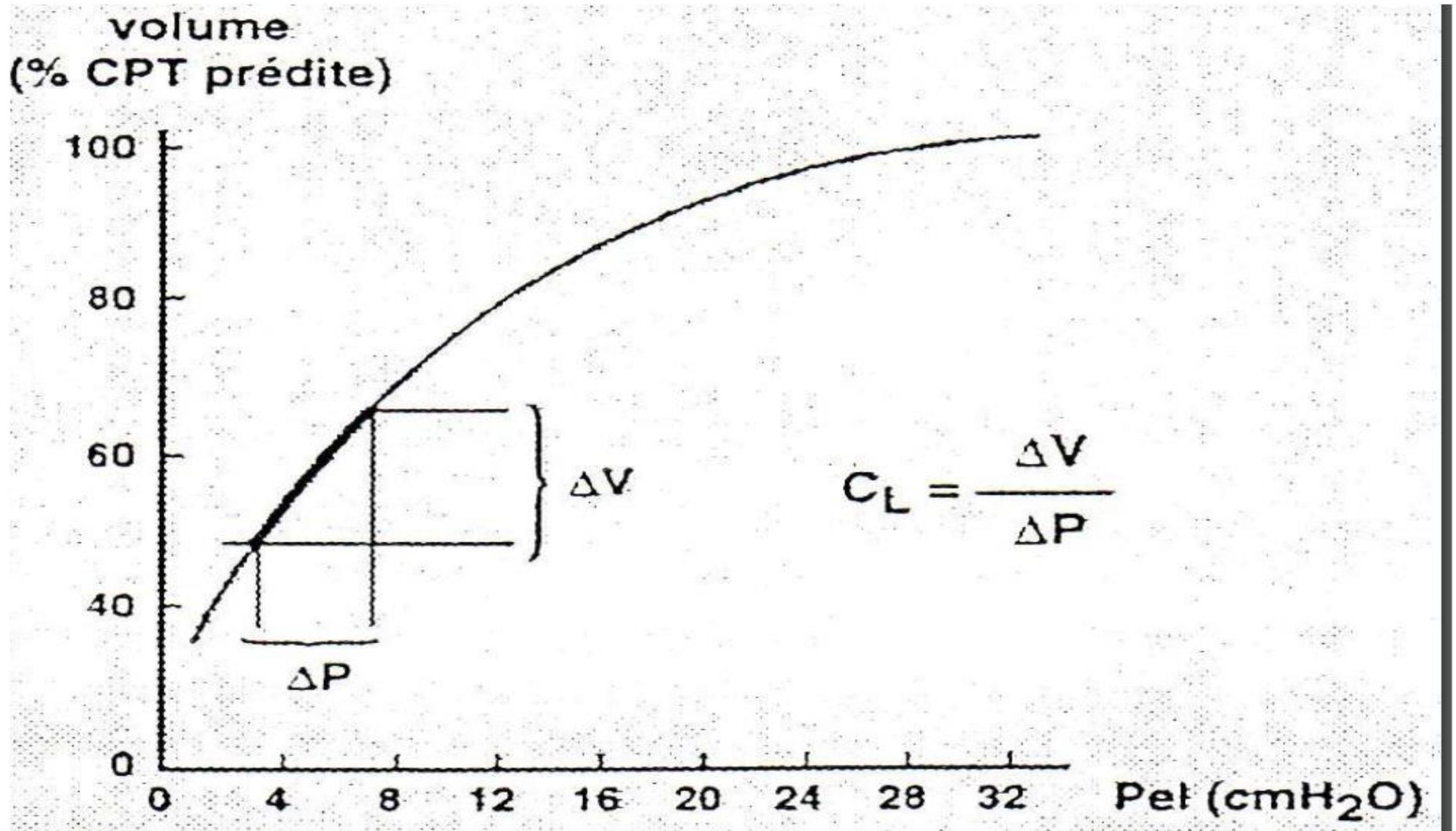
- Volumes pulmonaires statiques et positions d'équilibre.



Ici on enregistre un patient qui inspire et expire d'abord calmement. Puis il va expirer au maximum et re-inspirer au maximum. Il va donc mobiliser différents volumes.

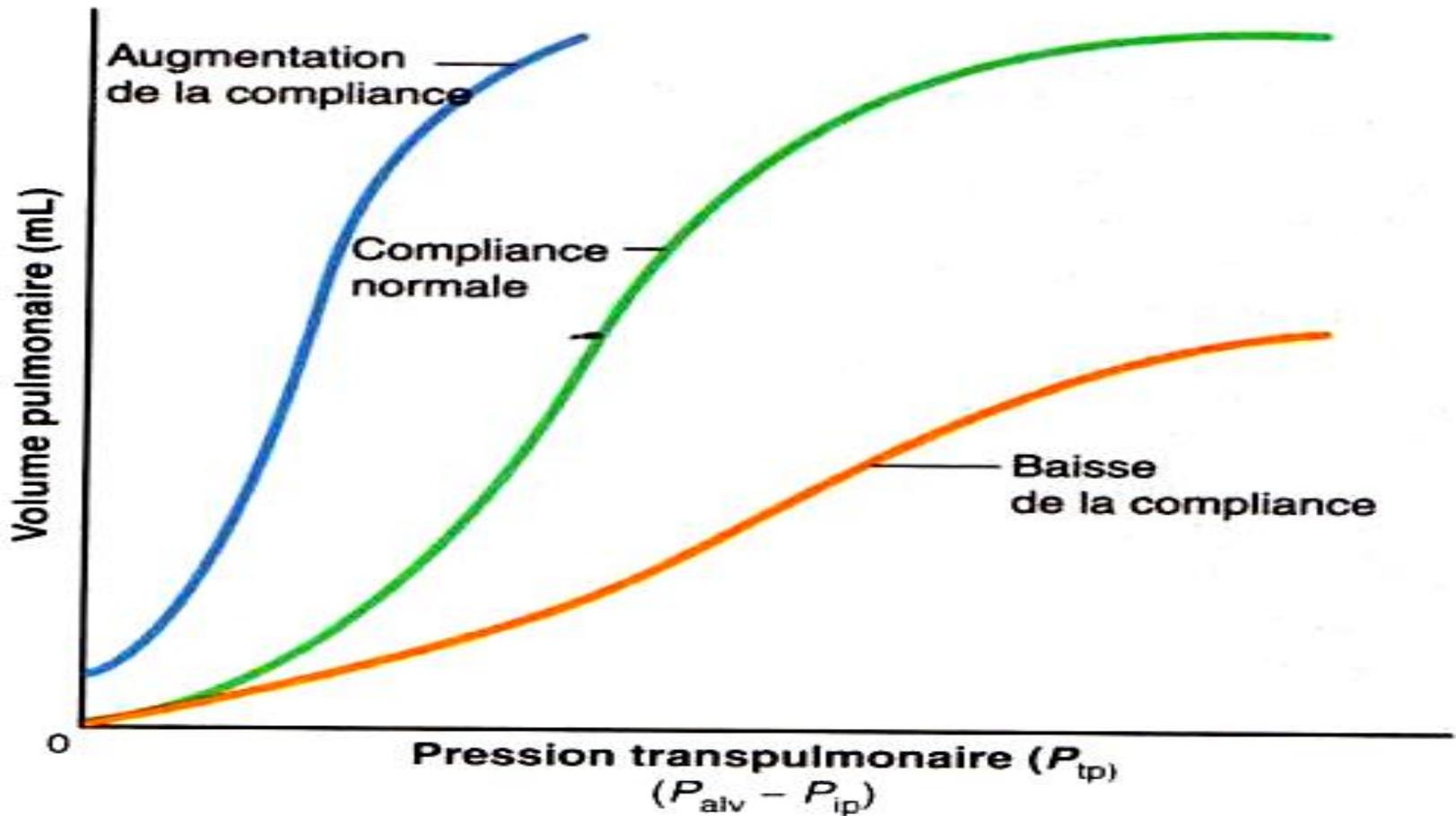
Les volumes statiques ne bougent pas, il n'y a donc pas d'entrée ni de sortie, pas de débit dans les voies aériennes. Ce sont des volumes mesurés à la transition entre l'inspiration et l'expiration. Quand le débit est nul, le **système poumon + paroi est à l'équilibre**.

Compliance pulmonaire



Compliance pulmonaire 1

$$\text{Compliance} = \frac{\Delta \text{ volume pulmonaire}}{\Delta (P_{\text{alv}} - P_{\text{ip}})} = \frac{\Delta V}{\Delta P_{\text{tp}}}$$

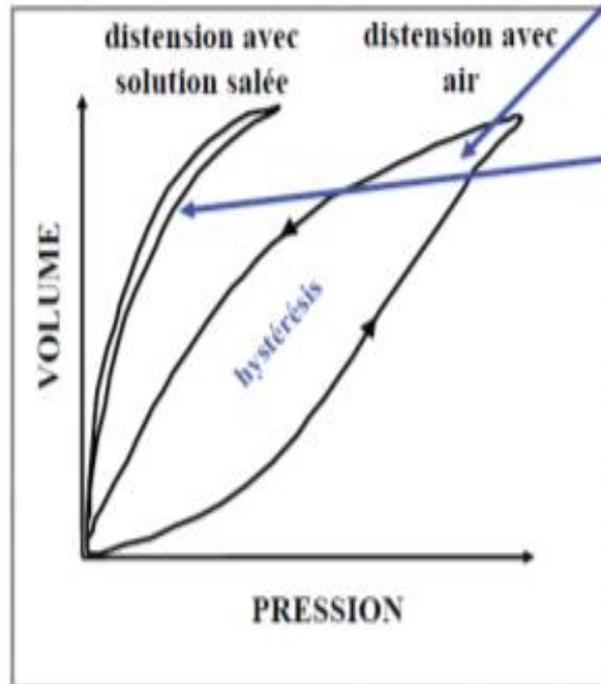


Pour comprendre la notion de compliance :
On reprend la courbe pression-volume.

On va gonfler le poumon avec de l'air puis le dégonfler. La pression mise pour gonfler et la pression mise pour dégonfler à un volume donné est différente. Il faut plus de pression pour gonfler le poumon lors de l'inspiration que pour le dégonfler lors de l'expiration. Il faut donc plus de travail à l'inspiration qu'à l'expiration. C'est ce qu'on appelle l'hystérésis.

Si on gonfle le poumon avec du sérum physiologique (eau salé), il faut, pour un volume donné, mettre moins de pression pour gonfler et dégonfler le poumon que si on gonflait le poumon avec de l'air. Il est donc plus facile de gonfler un poumon avec de l'eau salé plutôt que de l'air. On remarque que le poumon est plus compliant. Ceci s'explique pour le fait que l'eau salé supprime l'interface gaz-tissu. De plus quand on gonfle et dégonfle un poumon avec de l'eau salé, il n'y a pas d'hystérésis. Il y a le même travail

Déterminants de la compliance pulmonaire



*Travail inspiratoire >
travail expiratoire
(hysteresis)*

*Poumon plus compliant lors
de l'instillation de liquide*

*Instillation de liquide
supprime l'interface gaz-tissu*

Deux déterminants :

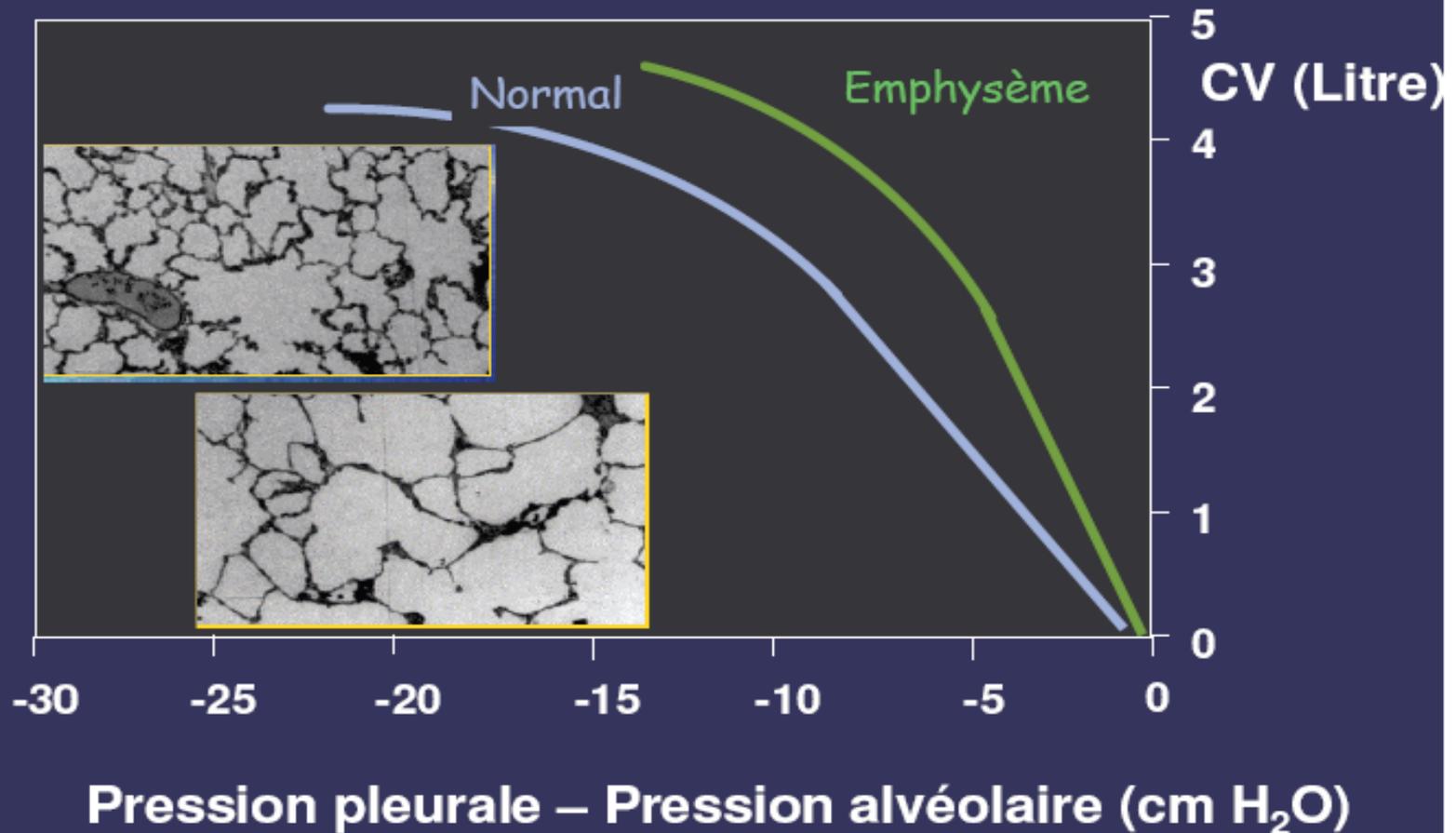
- tissu pulmonaire
- interface gaz - tissu

➤ Rôle du tissu pulmonaire.

- Dans le tissu pulmonaire on retrouve des éléments cellulaires, et une matrice extra-cellulaire qui comprend de l'élastine (qui donne l'élasticité du poumon) et du collagène fibrillaire (qui donne la limite de distensibilité du poumon pour que ça ne casse pas).
- C'est cette matrice extra-cellulaire qui joue un rôle et non les cellules ! Il existe des maladies tel que l'emphysème qui détruit l'élastine et donne plus de volume par contre la fibrose qui donne une accumulation de collagène et moins de volume.
- Ces deux maladies vont donc modifier la compliance du poumon.

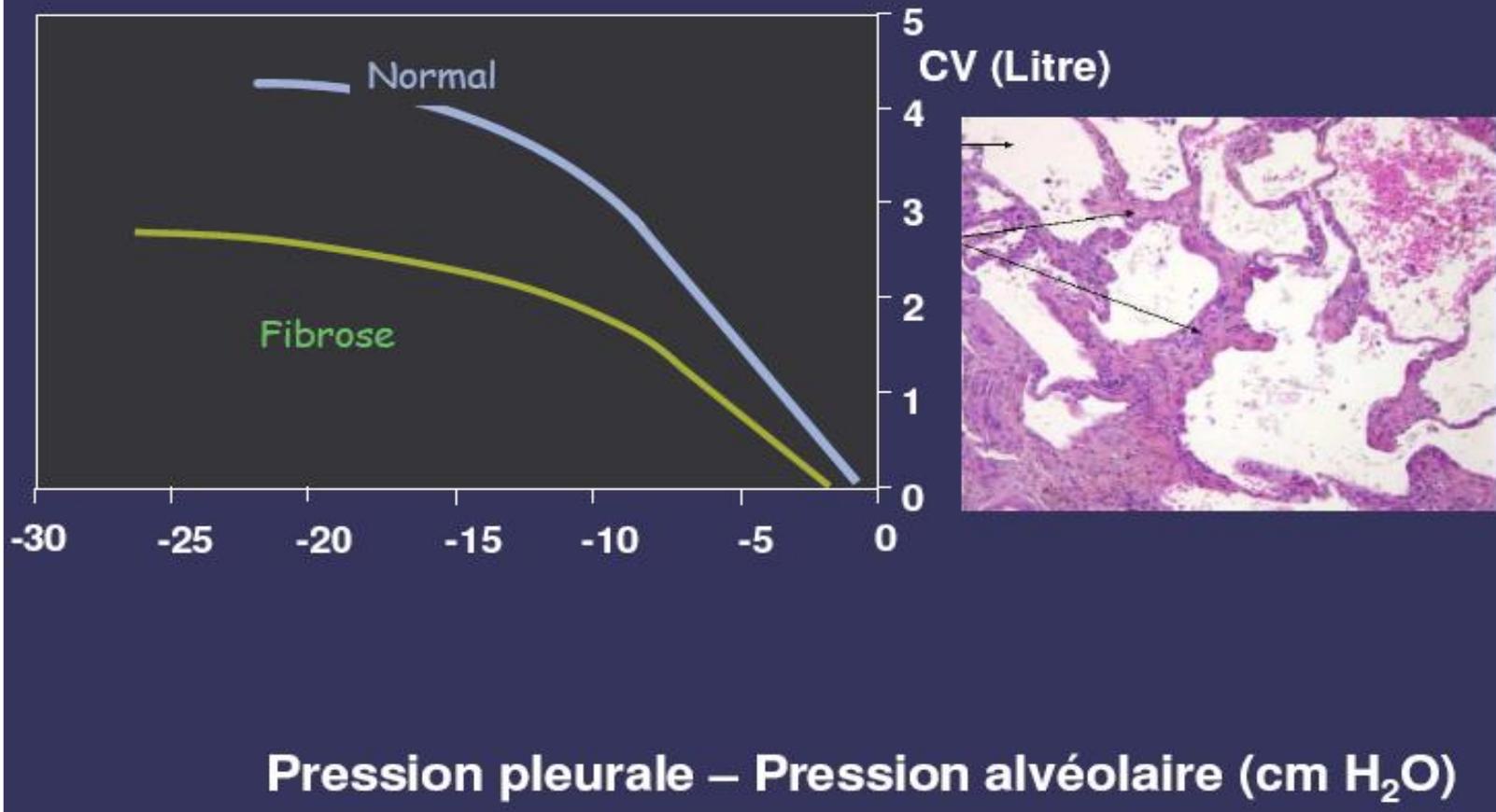
Compliance pulmonaire augmentée

Modifications de la compliance pulmonaire



Compliance pulmonaire diminuée

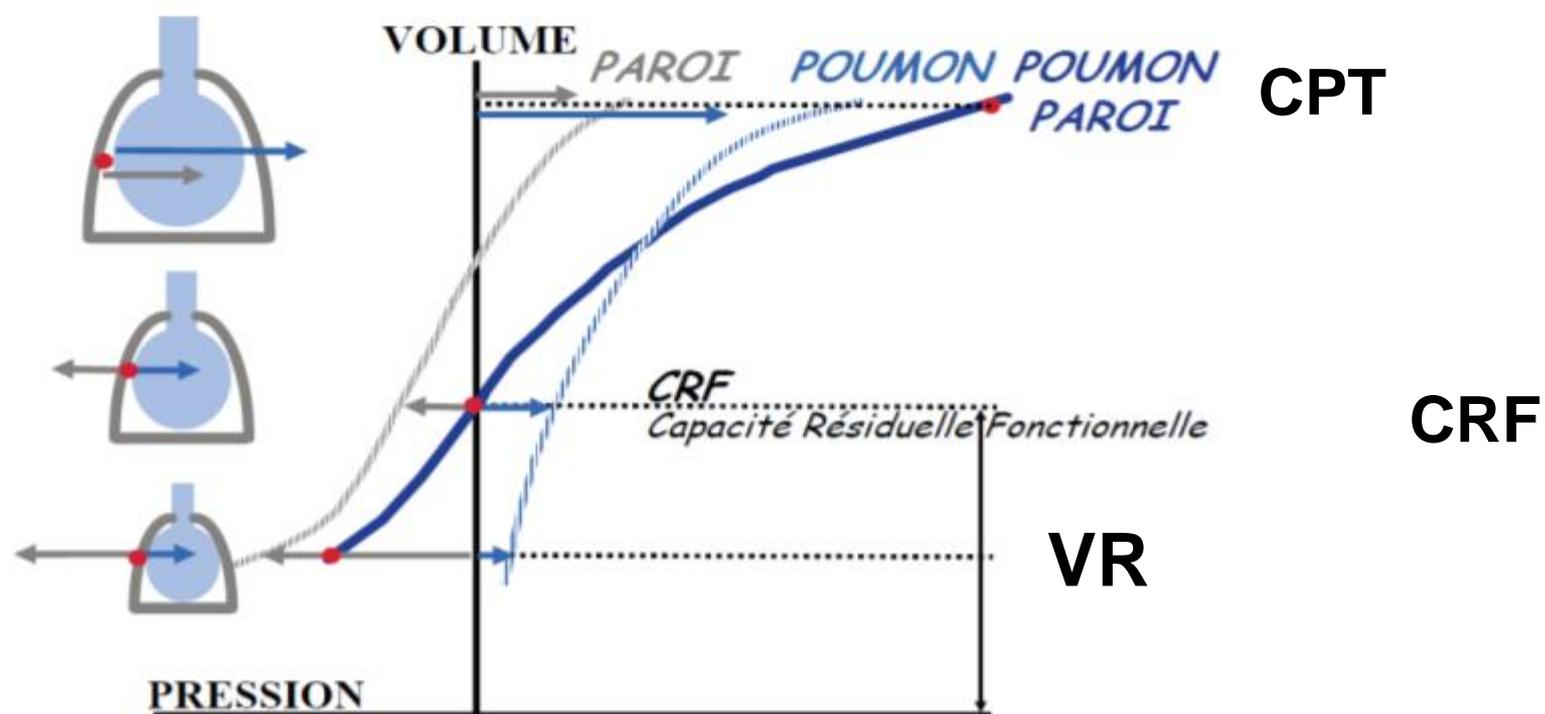
Modifications de la compliance pulmonaire



Les fibroses pulmonaires :

- Histologique: Dénaturation du parenchyme pulmonaire plus de collagène que des fibres élastiques
- Diminution de la compliance et de la distensibilité du poumon
- Déficit ventilatoire restrictif
- Atteinte de la membrane alvéolo-capillaire (DLCO diminuée)
- Particularités de la COVID-19

Relation pression volume : Etudes des forces d'expansion thoraciques et de rétraction pulmonaires en fonction des niveaux ventilatoires

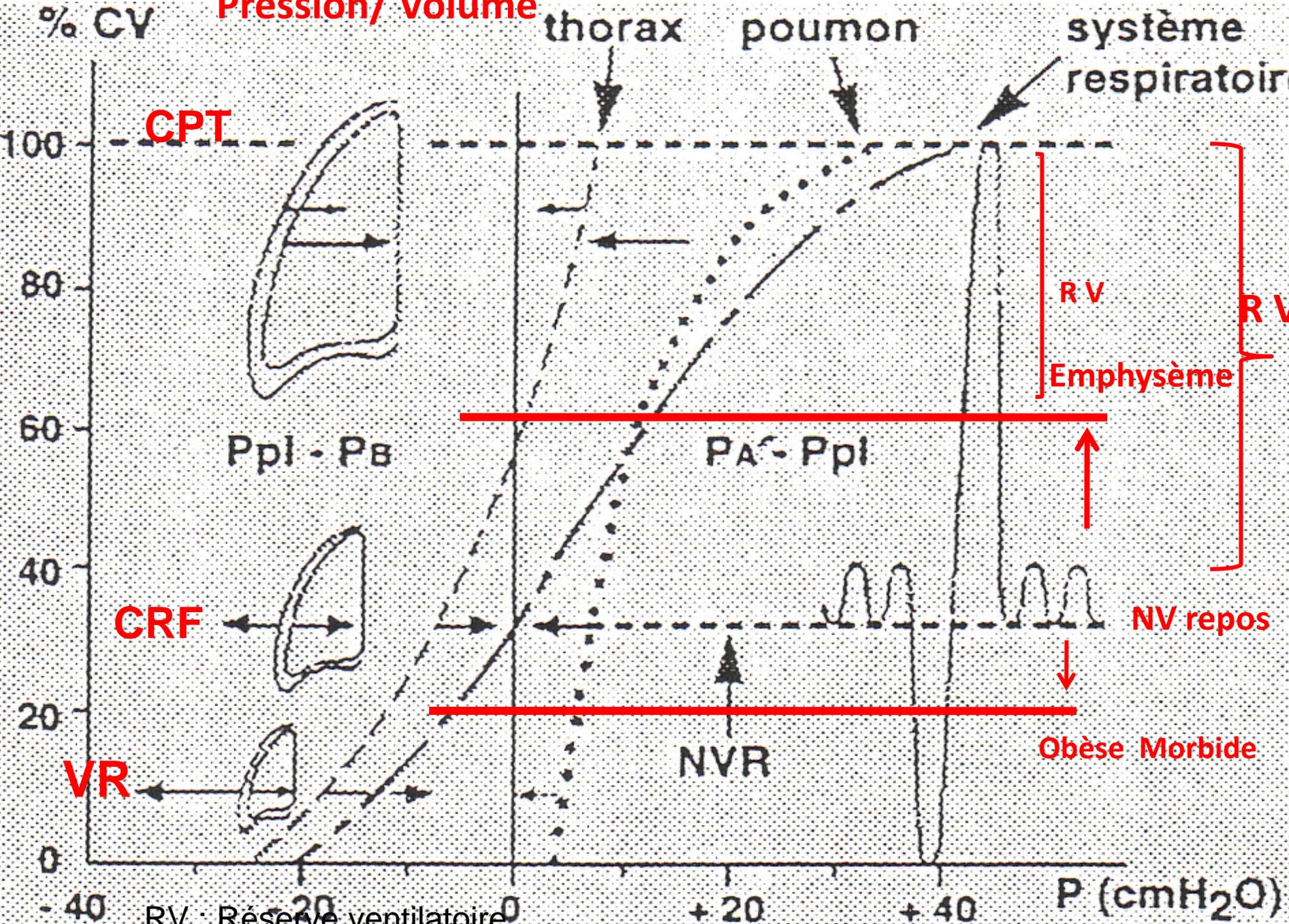


$$E_{tp} = E_t + E_p$$

- C_p pulmonaire $\sim 0,2 \text{ L/cmH}_2\text{O}$
- C_p paroi thor-abd $\sim 0,2 \text{ L/cmH}_2\text{O}$
- C_p thoraco-pulmonaire $\sim 0,1 \text{ L/cmH}_2\text{O}$

Avec E l'élastance.

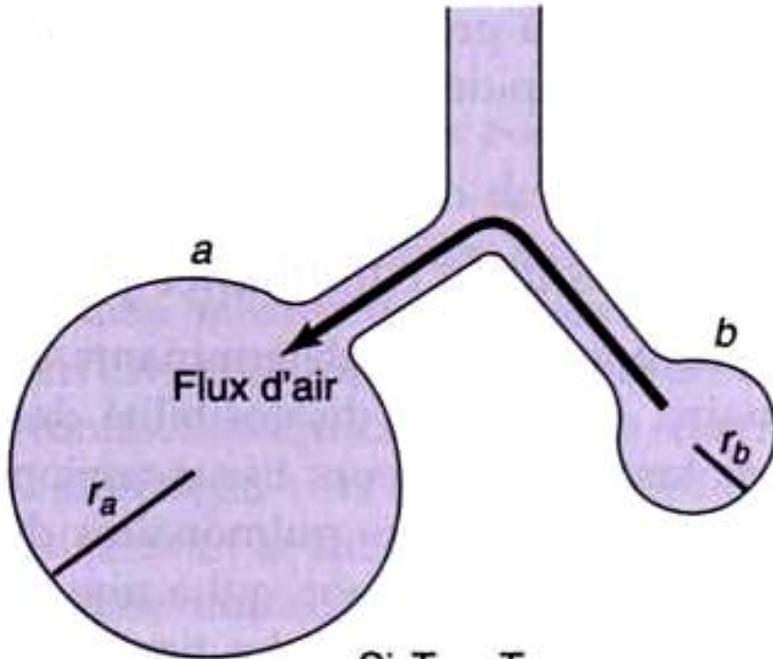
Pression/ Volume



RV : Réserve ventilatoire

Surfactant

Pas de surfactant



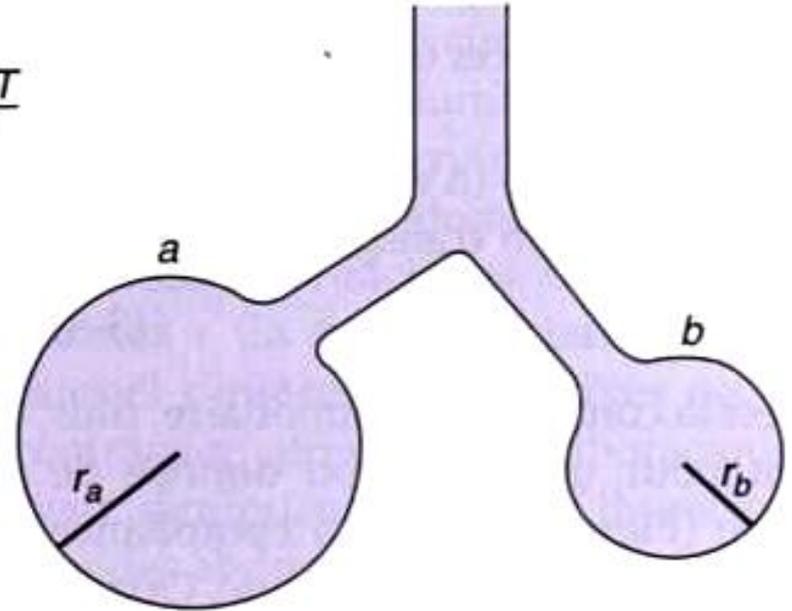
Si $T_a = T_b$

$$P_a < P_b$$

et l'air s'écoule de b vers a ;
b se vide dans a

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

Avec surfactant



Si $T_a > T_b$ (du fait de la propriété
unique du surfactant)

$$P_a = P_b$$

et il n'y a pas d'écoulement
d'air de b vers a ;
les petits alvéoles ne se vident pas

Le surfactant :

Le tissu pulmonaire va sécréter du surfactant qui va se poser sur le bord de l'alvéole (sur le fluide alvéolaire). Il a un pôle hydrophile et un pôle hydrophobe et va permettre de diminuer la tension superficielle. Le surfactant est constitué de phospholipides (85%) et de protéines (13%) et est synthétisé par les pneumocytes de type II qui représentent 60% des cellules épithéliales alvéolaires et forment uniquement 10 % de la surface alvéolaire. Les pneumocytes de type II contiennent des corps lamellaires (vésicules d'exocytose du surfactant)

Rôles du surfactant

- Stabilité alvéolaire
- \uparrow compliance pulmonaire : \downarrow Travail ventilatoire
- Maintient de l'espace alvéolaire à sec

2- conditions dynamiques

Etude des débits bronchiques

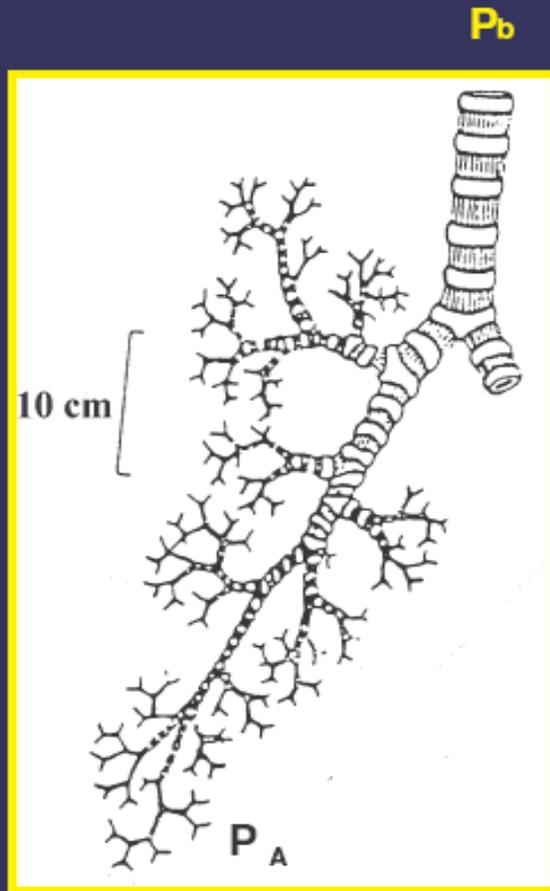
- Écoulement du gaz dans un tube :

1- le débit est inversement proportionnel à la résistance

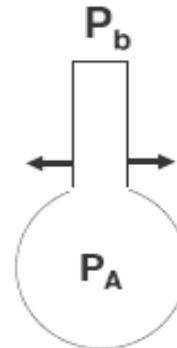
2- le débit est proportionnel à la surface de section

Equation de Nexton : $P_{tot} : \text{Débit} \times R \times \text{accélération}$
 $\text{Débit} \times R \text{ (résistance)}$

Résistance des voies aériennes



Résistances des Voies Aériennes



$$P_A - P_b = \text{Résistances} \times \text{Débit}$$

- Réduction du diamètre bronchique
⇒ augmentation des résistances
diminution du débit
- Augmentation du diamètre bronchique
⇒ Diminution des résistances
augmentation du débit

Les Résistances des voies aériennes

L'arbre bronchique est responsable d'une certaine résistance, exprimée en cm d'H₂O, qui va dépendre de la différence de pression, du débit et du rayon des voies aériennes :

Loi de Poiseuille

$$R = \frac{(P_1 - P_2)}{\text{débit}} \quad R = \frac{8 \cdot l \cdot \eta}{\Pi \cdot r^4} \quad \text{Loi de Poiseuille}$$

cmH₂O / (L/s)

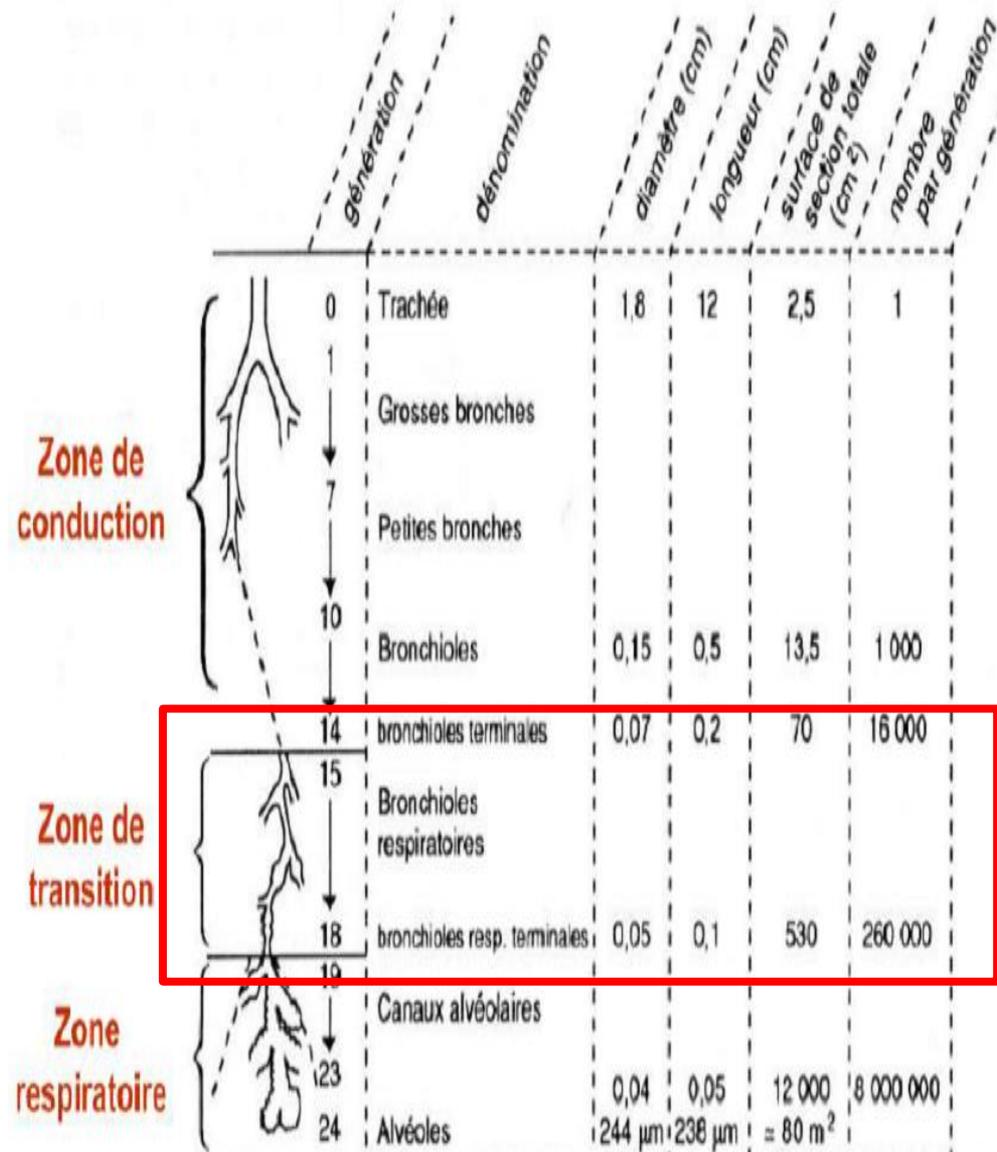
Rappel Anatomohistologique

- 24 générations de bronches

- Anatomiquement:
A partir de la 8^{ème} division jusqu'aux bronchioles terminales

- Histologique :
bronches non cartilagineuses
musculature lisse.

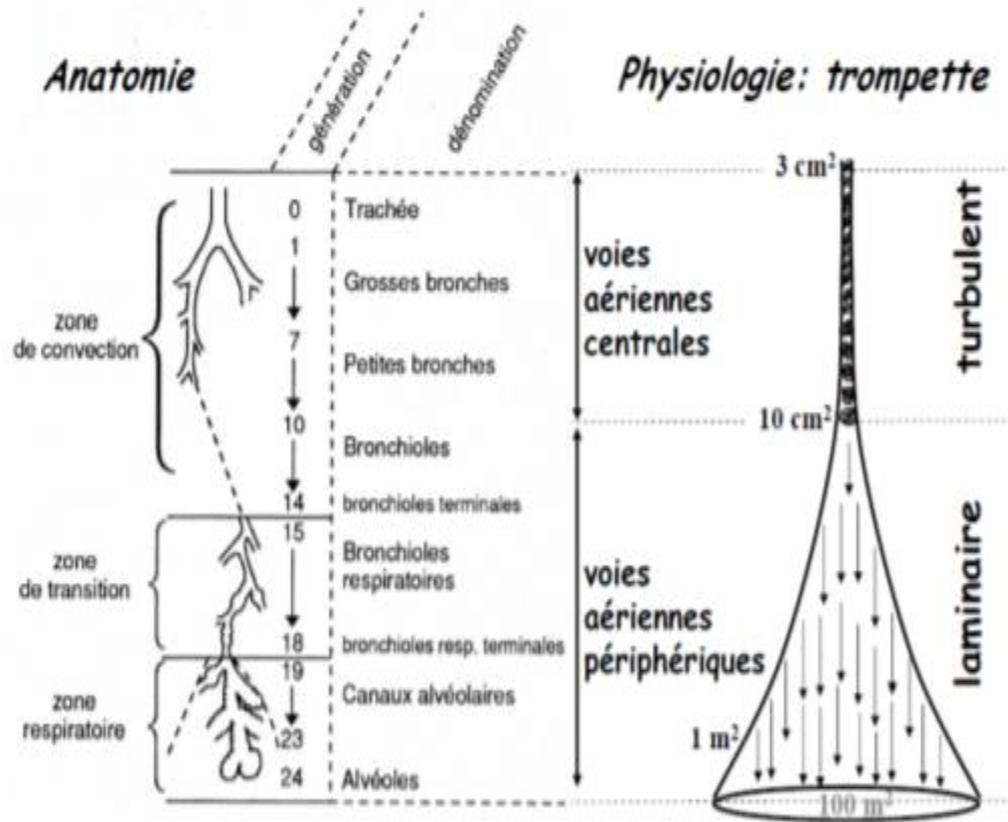
- Chez l'adulte:
le critère le plus souvent retenu est un diamètre inférieur à 2 mm.



Notion de la surface de section

A chaque génération bronchique donnée, on va additionner la section totale donc la résistance ne dépendra plus que d'une section mais de la somme des sections. Le système bronchique est ainsi très fin aux premières générations et va de plus en plus s'élargir. On parle d'une forme en « trompette ». Les bronches seront de plus en plus petites mais de plus en plus nombreuses donc la somme totale des calibres va augmenter.

L'arbre bronchique en physiologie



Les résistances des voies aériennes

Résistance des voies aériennes centrales > Résistance des voies aériennes périphériques.

➤ Résumé de la répartition des résistances dans les voies aériennes :

- Nez : 50% des résistances

-- Voies aériennes centrales : 40% des résistances

-- Voies aériennes périphérique : 10% des résistances

Représentent le site principal des maladies obstructives

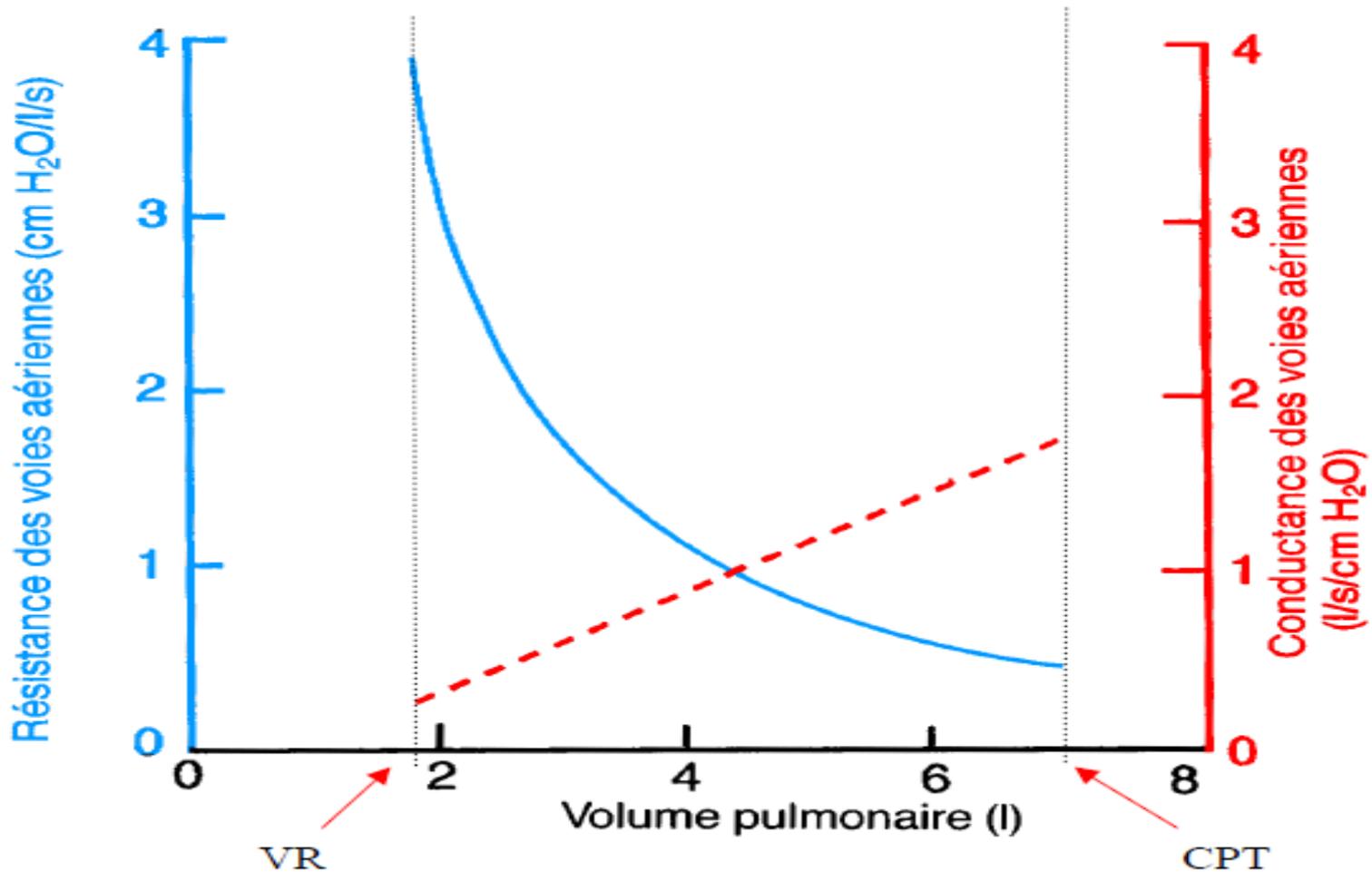
Les résistances des voies aériennes

Facteurs modifiant les résistances des VA :

➤ Viscosité et densité des gaz

- Gaz plus visqueux
- Augmentation de la pression du gaz

➤ Effet du volume pulmonaire



D- Exploration

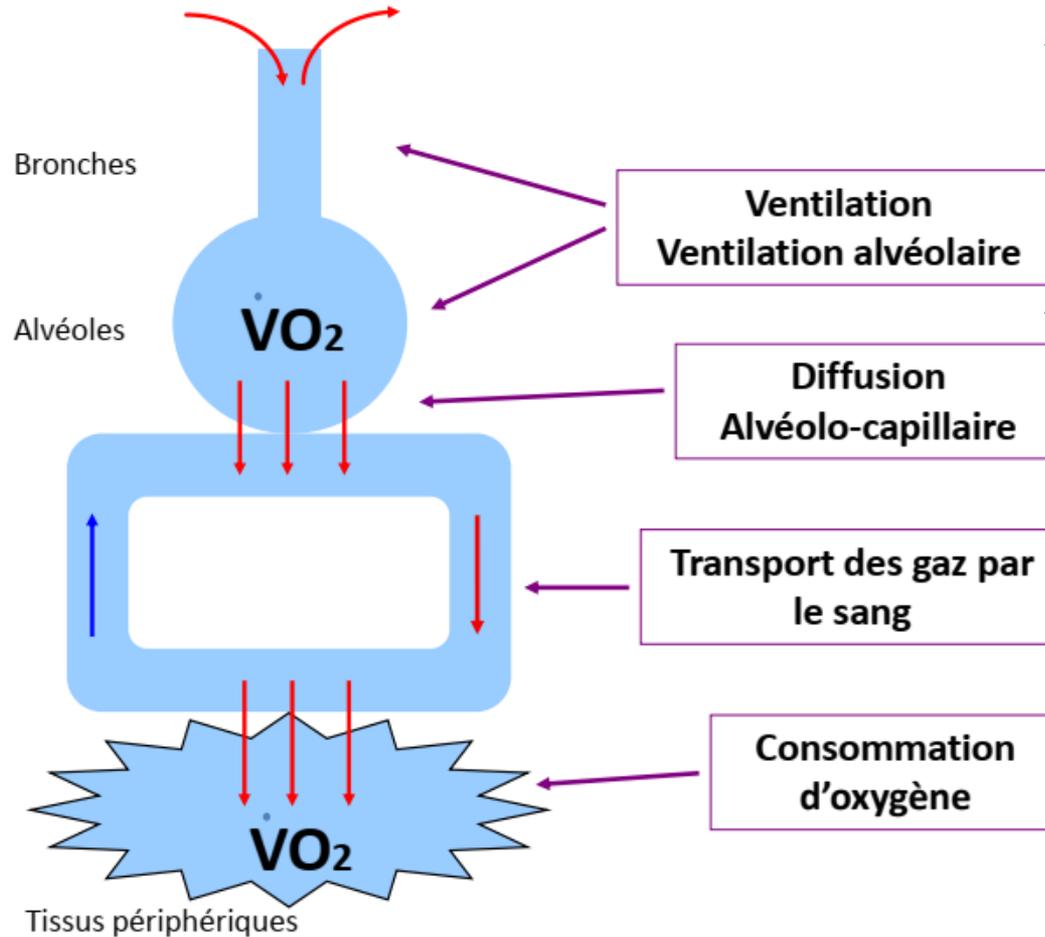
EFR: série d'explorations:

- Spirométrie
Pléthysmographie

- TLCO

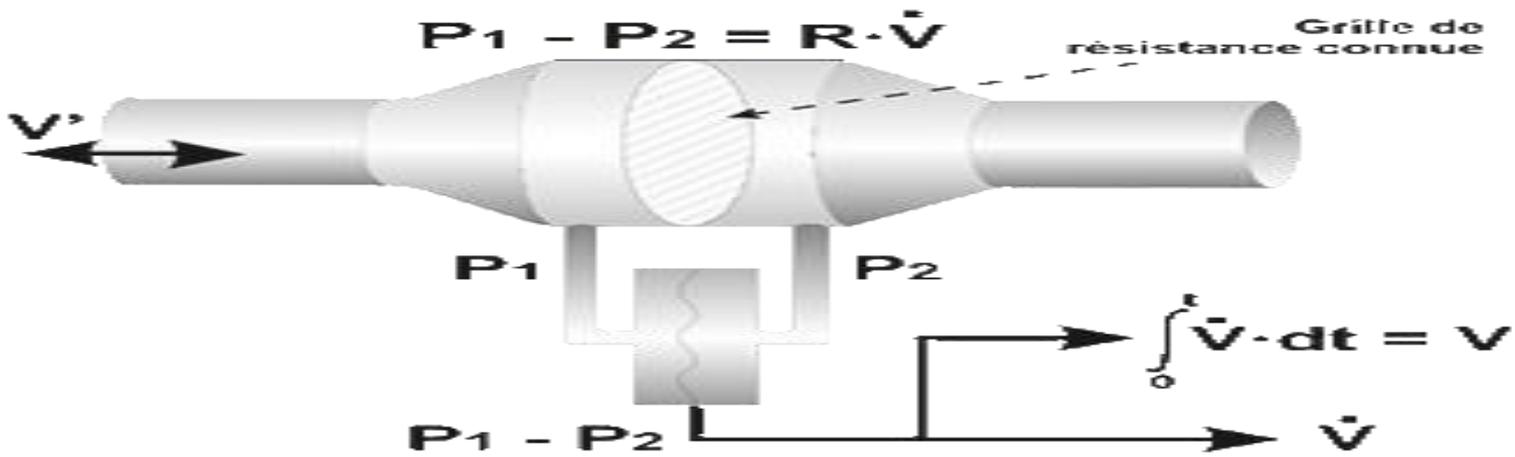
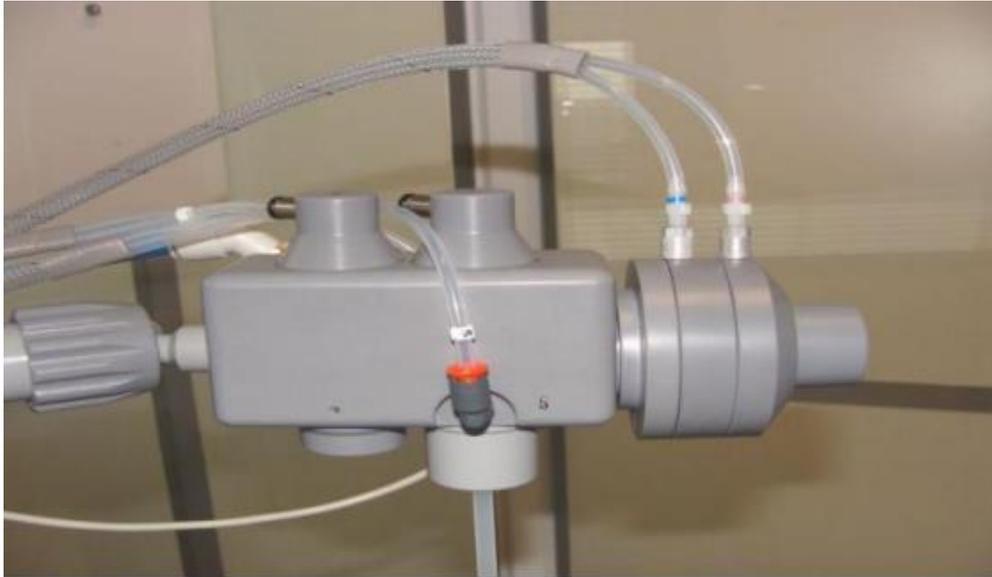
- Gazométrie

- EFX ,TM6



Spirométrie :
étude des volumes pulmonaires mobilisables et des débits bronchique

- ▶ Le pneumotachographe de type Lilly : résistance = Grille
Calibration quotidienne

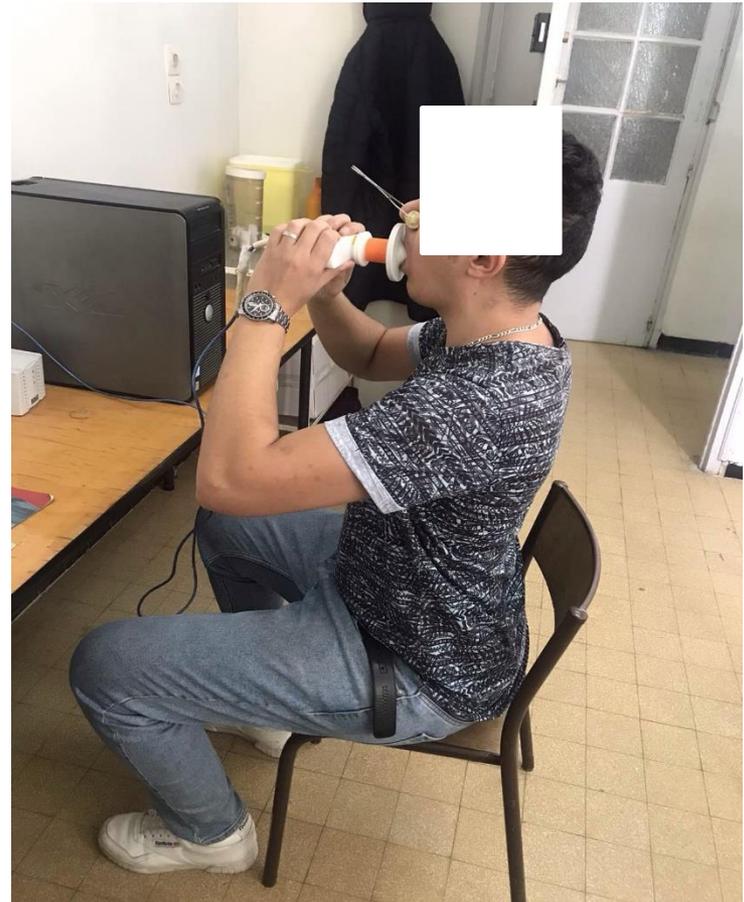


Manœuvres

- Les tests effectués en position debout sont similaires à la position assise dans les études sur les adultes (28), l'obésité (29) et les enfants.



(28)



29

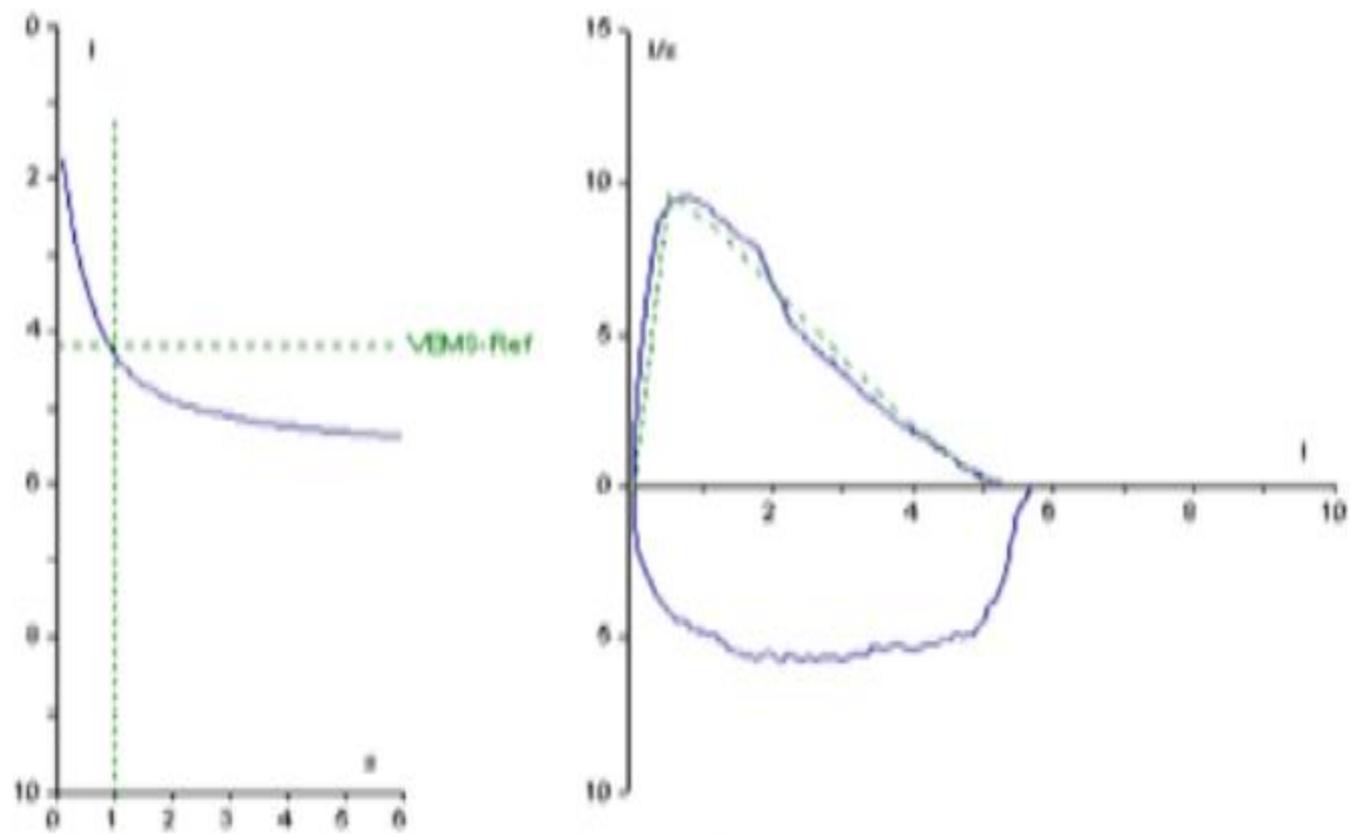


Fig.5a. Spirométrie d'allure normale

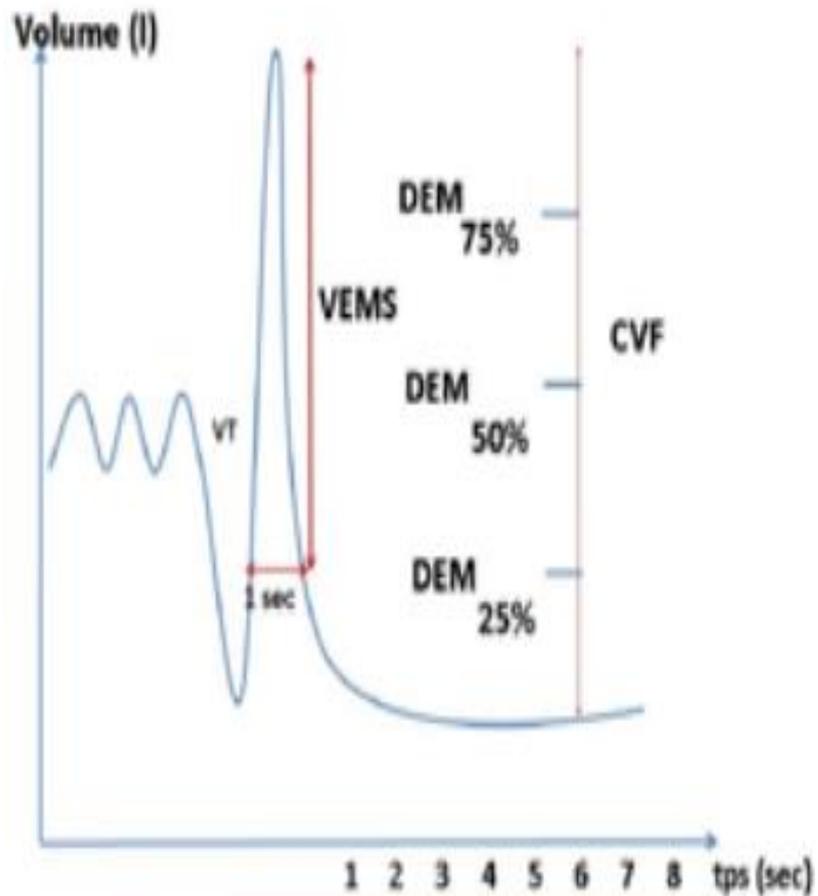


Fig.2a. Tracé volume-temps

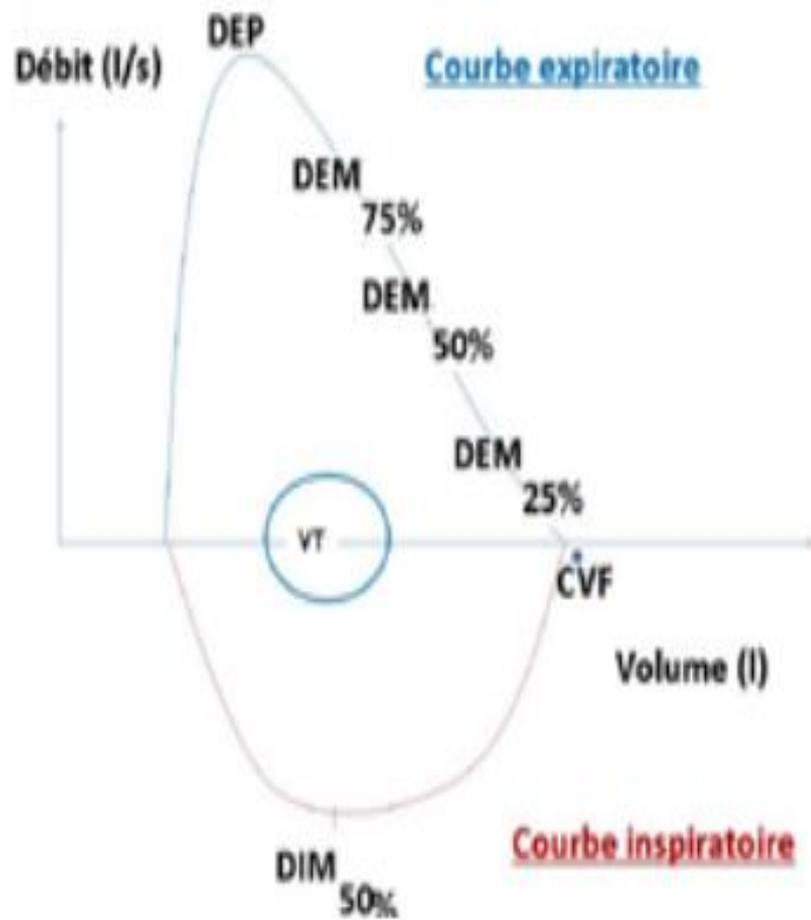
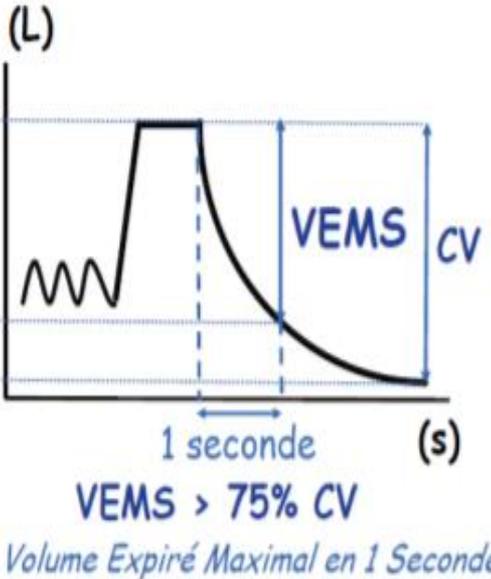


Fig.2b. Courbe débit-volume

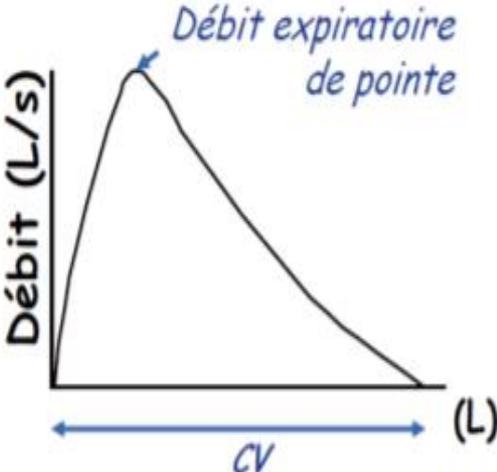
$$\dot{V} = \Delta P / R$$

Analyse des débits expiratoires

• Temps - Volume

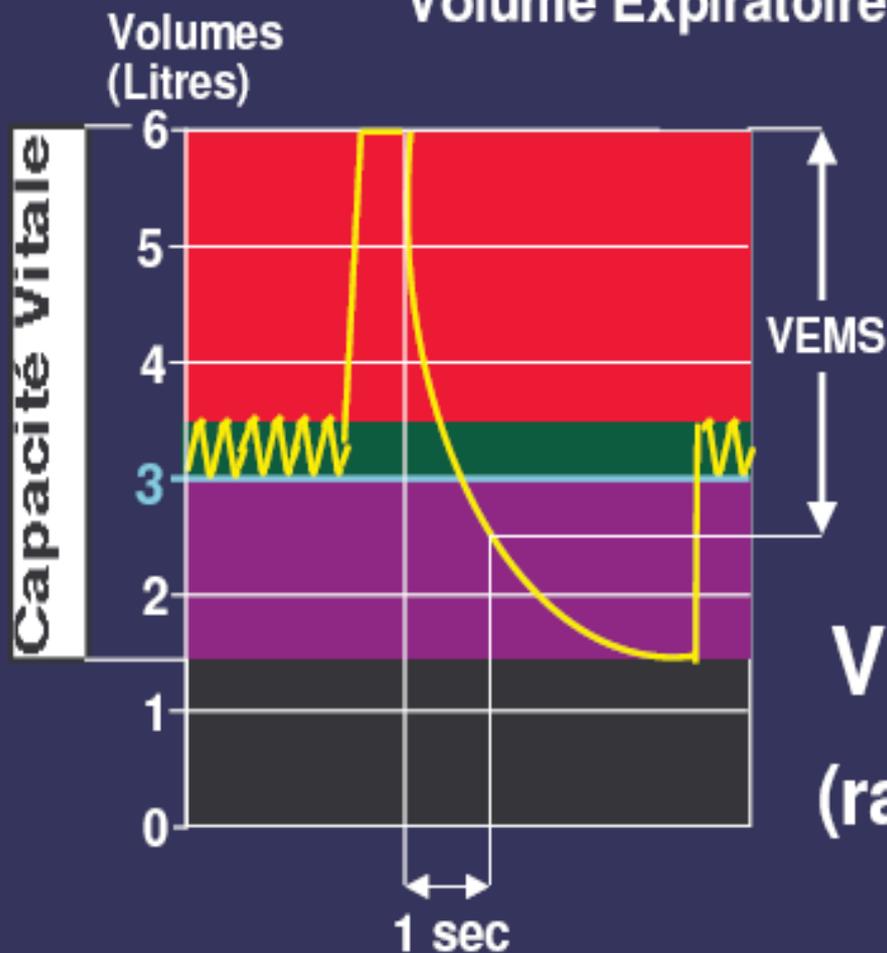


• Volume - Débit



B/ Explorations fonctionnelles respiratoires (EFR) des pathologies respiratoires

Volume Expiratoire Maximum par Seconde (VEMS)



$VEMS/CVL > 70\%$
(rapport de Tiffeneau)

L'obstruction bronchique $VEMS/CV < 70\%$

Les maladies pulmonaires obstructives

- Obstruction des voies aériennes intrathoraciques

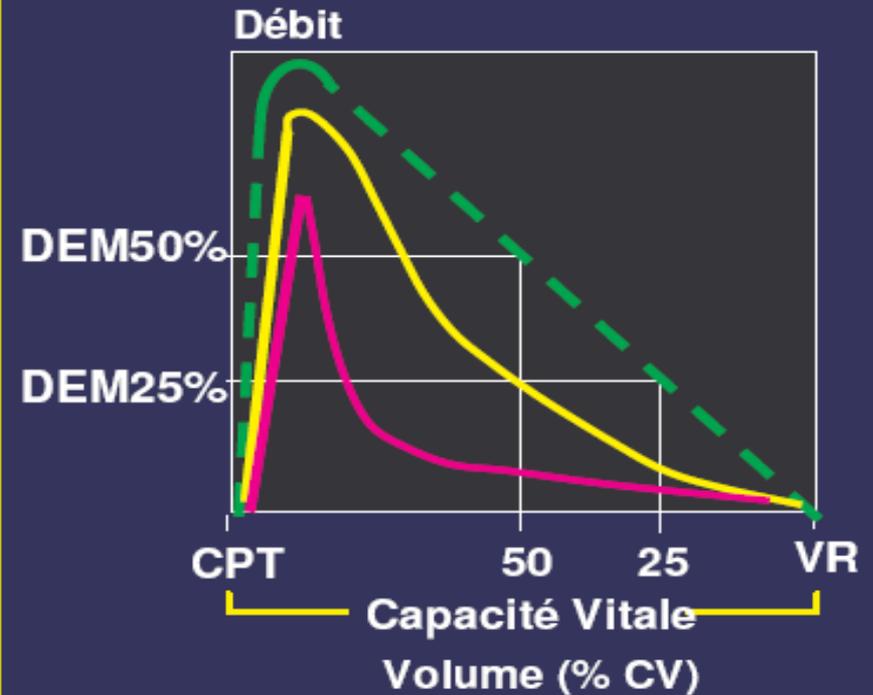
Asthme

Bronchite chronique

constriction muscle lisse bronchique
œdème de la muqueuse bronchique
hypersécrétion de mucus

Emphysème

bronche normale
augmentation de la compliance



Le trouble ventilatoire restrictif

– CPT ↓

– CVL, CRF, VR ↓

diminution harmonieuse
des volumes pulmonaires

– $VEMS/CVL = N$

Les maladies pulmonaires restrictives

Atteinte de la paroi thoracique

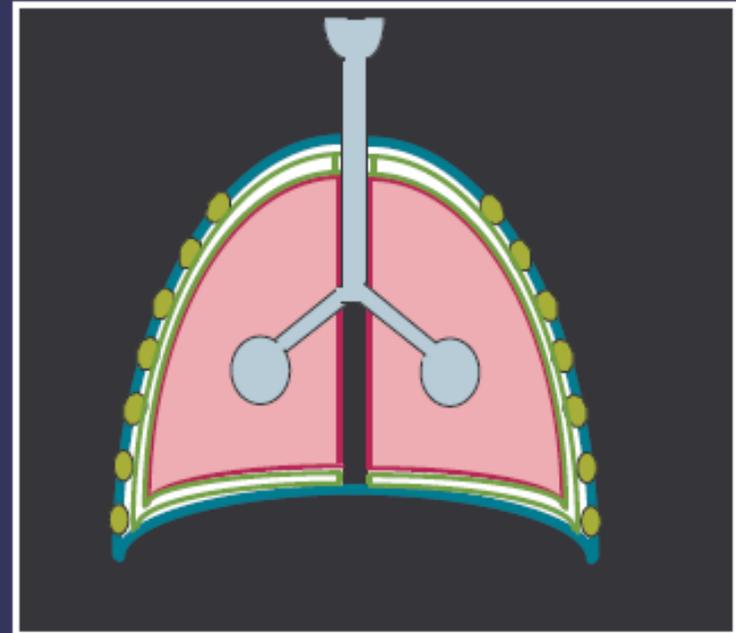
- Limitations des mouvements du thorax
- Obésité

Atteinte pleurale

Pneumothorax, pleurésie

Atteinte pulmonaire

- Fibrose
- Oedème pulmonaire
- Atélectasie
- Résection pulmonaire



Références bibliographiques :

- 1. EMC Pneumologie 2014**
- 2. Physiologie humaine Hervé Guenard édition 2017**
- 3. Traité de physiologie : Arthur Guyton 2009**
- 4. L'essentiel de la spirométrie : Helmi Ben saad , Sonia Rouatbi**
- 5. Physiologie humaine Wander 6^{ème} édition 2013**
- 6. Physiologie humaine Sherwood 2006**
- 7. Atlas de poche de physiologie 2017**
- 8. Revue des maladies respiratoires oct 2019 vol 36 n°8**
- 9. Roberts F., Kestin I., Respiratory Physiology, Update in Anaesthesia, 2000**