

# Mécanique respiratoire

## Statique du système Poumon -Thorax - Muscles

Dr. Grégoire Gex  
Service de Pneumologie  
HUG – Hôpital du Valais

[gregoire.gex@hug.ch](mailto:gregoire.gex@hug.ch)

# Objectifs d'apprentissage

- Connaître les caractéristiques physiologiques des composants du système Poumon-Thorax-Muscles
- Connaître les définitions des différents volumes pulmonaires et comprendre leurs déterminants (compliance du thorax et du poumon ; force des muscles respiratoire)
- Savoir décrire une courbe pression-volume du système Poumon-thorax et de ses composants pris isolément.
- Connaitre le concept de travail statique
- Comprendre ce qui détermine les différents pressions présentes dans le thorax et leur impact fonctionnel

# Plan de cours

- Acteurs du système poumons-thorax-muscles
- Relations Pression-Volume du système Poumon – Thorax
- Rôle des muscles dans le système Poumon – Thorax
- Définitions et déterminants des volumes pulmonaires (CPT, CRF, VR)
- Pressions intra-thoraciques

# **Les acteurs du système Poumon – Thorax – Muscles**

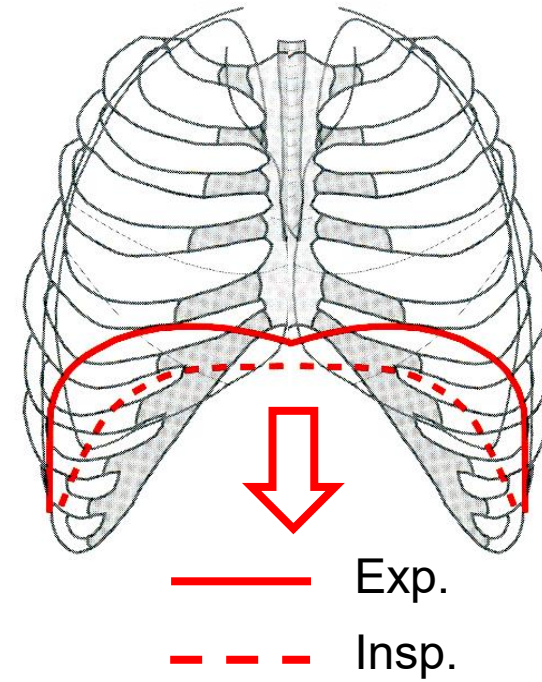
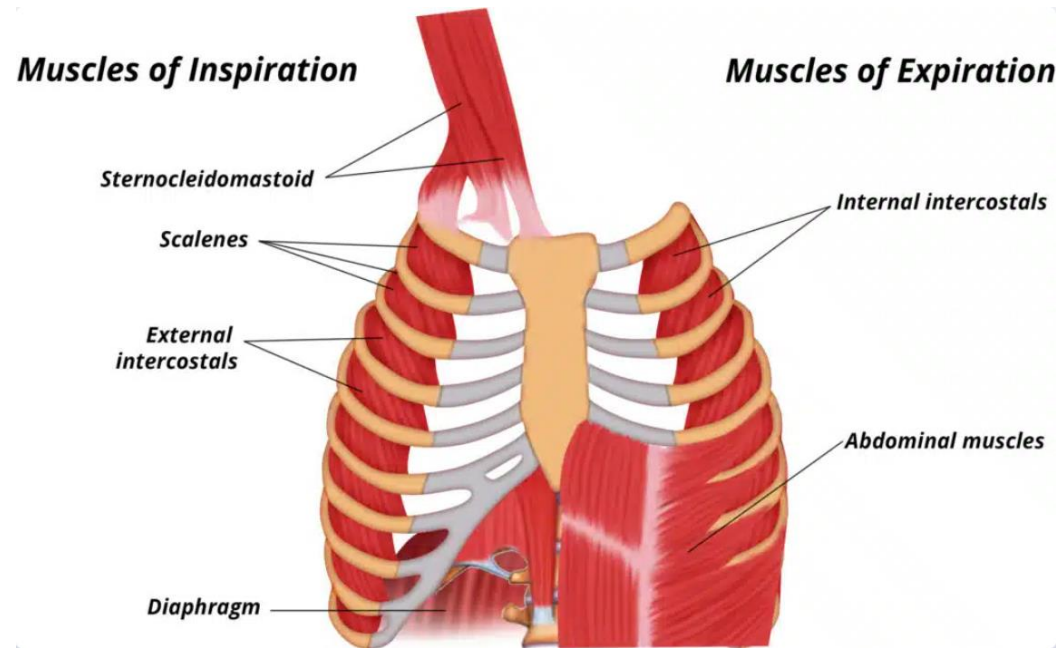
# Le Thorax



- Le thorax délimite un volume thoracique, qu'on peut agrandir ou rétrécir en lui appliquant une pression :
  - Depuis l'extérieur :
    - Compression par mm. expiratoires ou facteur externe (ex: massage cardiaque)
    - Extension par mm. inspiratoires
  - Depuis l'intérieur :
    - Quelque chose qui crée une pression négative (suction) : les poumons
- Sa compliance décrit son élasticité :  $C = \Delta V / \Delta P$   
(modification de volume qu'on obtient en appliquant une modification de pression)

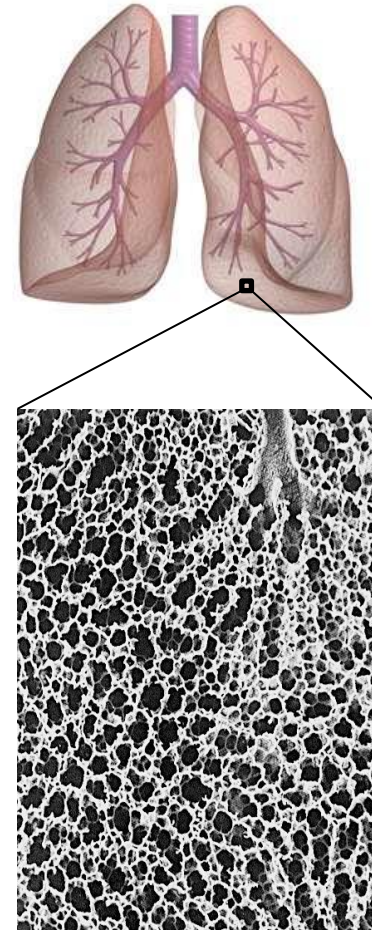
# Les Muscles respiratoires

- Les muscles respiratoires créent des pressions positives et négatives pour modifier les volumes thoraciques et pulmonaires

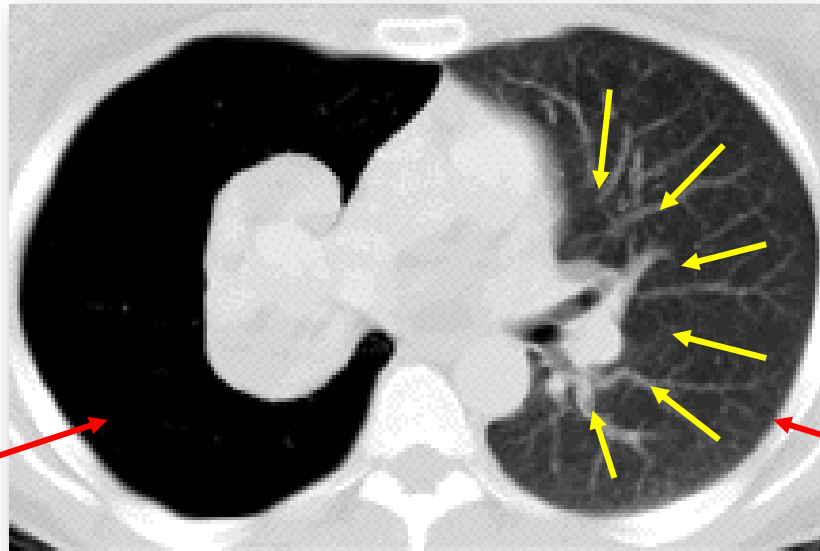


# Les Poumons

- Les poumons sont une structure alvéolée très rétractile, dont l'état d'équilibre est une « petite boule » compacte, mais qui est étirée en la plaçant dans une grande cavité thoracique étanche. Sa force de rappel élastique crée une pression négative dans la cage thoracique.



Volume en état d'équilibre  
(pathologique : la cavité  
pleurale n'est plus étanche  
= pneumothorax)



$P_{PL} = 0 \text{ cmH}_2\text{O}$

Volume en état  
physiologique (sa force  
de rappel élastique  
cause une pression  
pleurale négative)

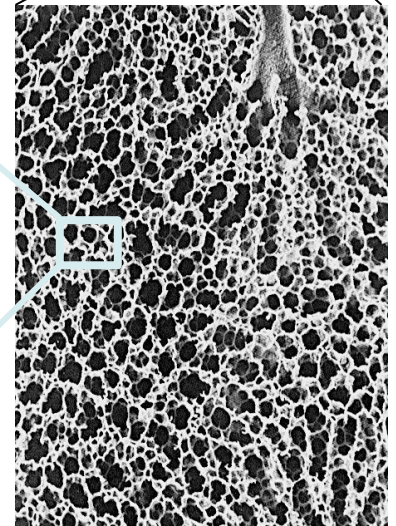
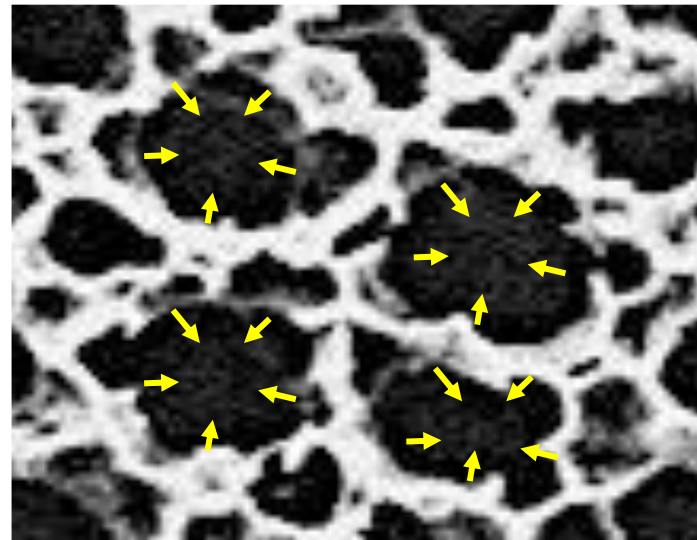
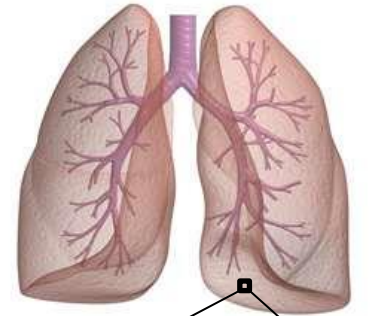
$P_{PL} = - 5 \text{ cmH}_2\text{O}$

# Les Poumons

- Les poumons sont une structure alvéolée très rétractile, qui tend à se collaber.

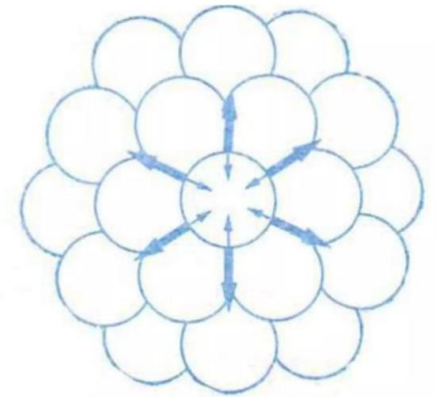
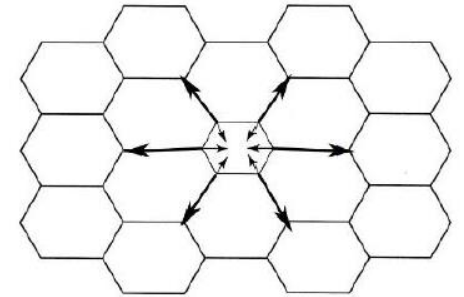
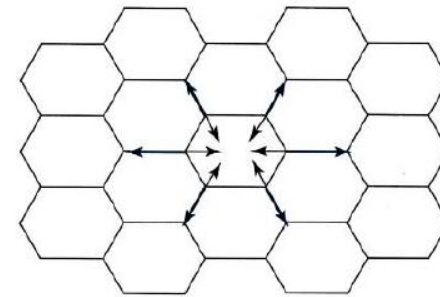
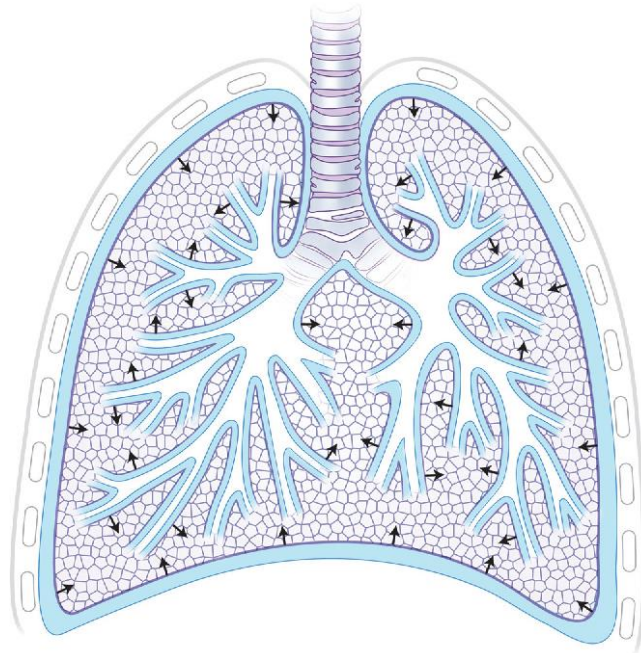
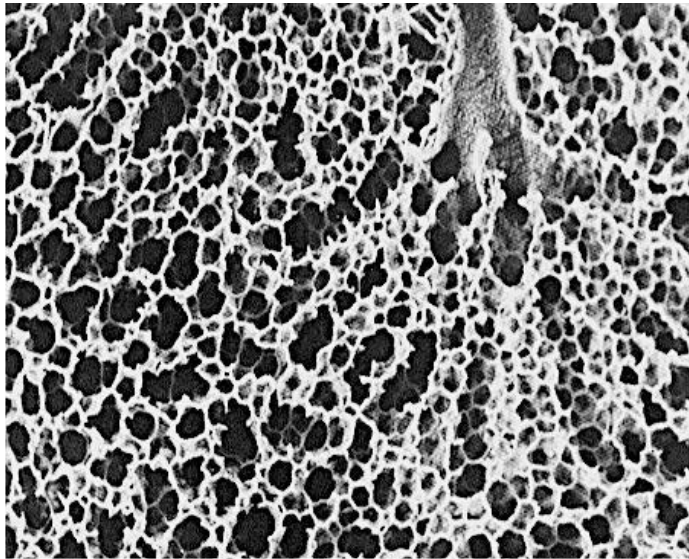
Pourquoi ?

- L'agencement des fibres constituant le réseau alvéolaire crée une force de rappel élastique.
- La tension de surface sur la surface intérieure des alvéoles tend à les collaber.



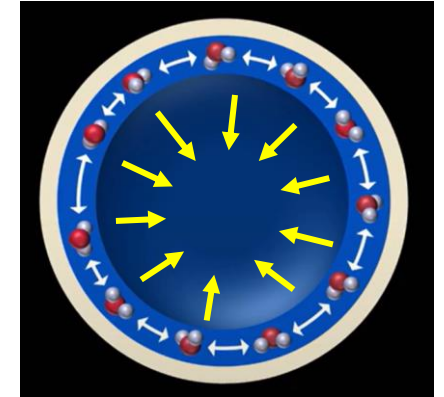
# Les Poumons – propriétés de la structure alvéolaire

- La structure alvéolaire avec interdépendance alvéolaire empêche les alvéoles individuelles de se collaber et permet de répartir uniformément la force de rappel élastique , y compris sur les bronches et les vaisseaux, qui sont ainsi maintenus ouverts.



# Tension de surface et alvéoles pulmonaires

- **Tension de surface** : résulte des forces intermoléculaires qui créent une attraction électromagnétique entre les molécules adjacentes des liquides. Si la surface du liquide est une sphère, la tension de surface tend à la réduire son volume.
- **Loi de Laplace (  $P \approx T/r$  )** : la pression générée par la tension de surface dans une alvéole dépend de l'intensité de la tension de surface (T) et de son rayon (r)
- Problème : si la surface des alvéoles n'était tapissée que d'eau, la force de rappel du poumon serait très importante (très difficile à inspirer) et les petites alvéoles se collaberaient en se vidant dans les grandes :

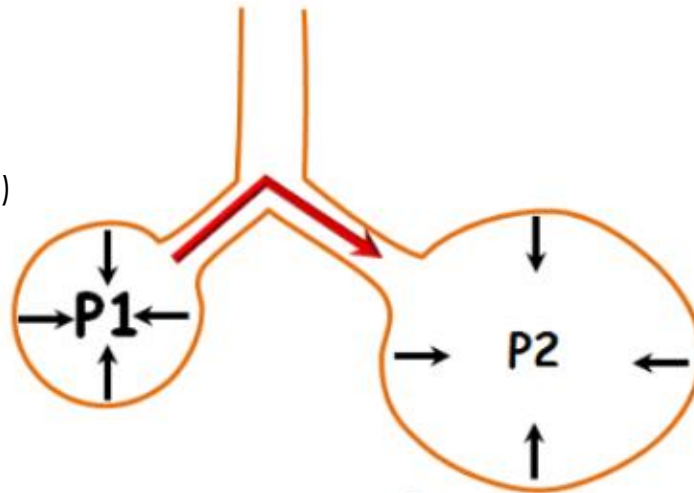


**Petite alvéole :**

T = 4 (tens. de surf. de l'eau)

R = 1

**$P_1 \approx T/r = 4$**



**Grande alvéole :**

T = 4 (tens. de surf. de l'eau)

R = 2

**$P_2 \approx T/r = 2$**

# Tension de surface et alvéoles pulmonaires

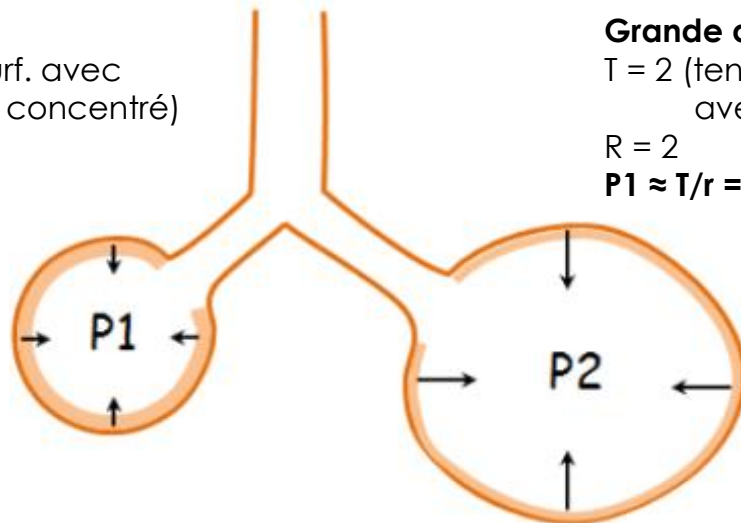
- **Surfactant** : produit par les pneumocytes de type 2 et composé de phospholipides et de protéines, il agit comme un savon et diminue significativement la tension de surface des alvéoles, ce qui évite un collapse complet du poumon.
- De plus, sa quantité étant +/- égale par alvéole, il se dilue dans les grandes alvéoles et se concentre dans les petites alvéoles, devenant donc plus efficace dans les petites alvéoles, évitant ainsi leur effondrement.

## Petite alvéole :

$T = 1$  (tens. de surf. avec surfactant concentré)

$R = 1$

$P1 \approx T/r = 1$

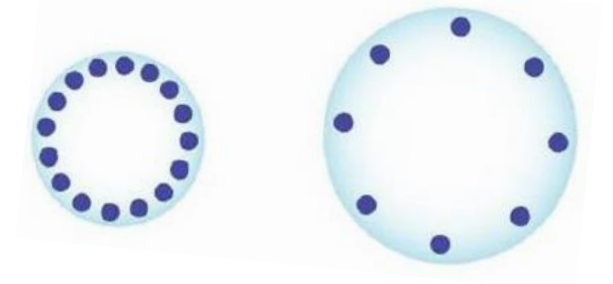


## Grande alvéole :

$T = 2$  (tens. de surf. avec surfactant dilué)

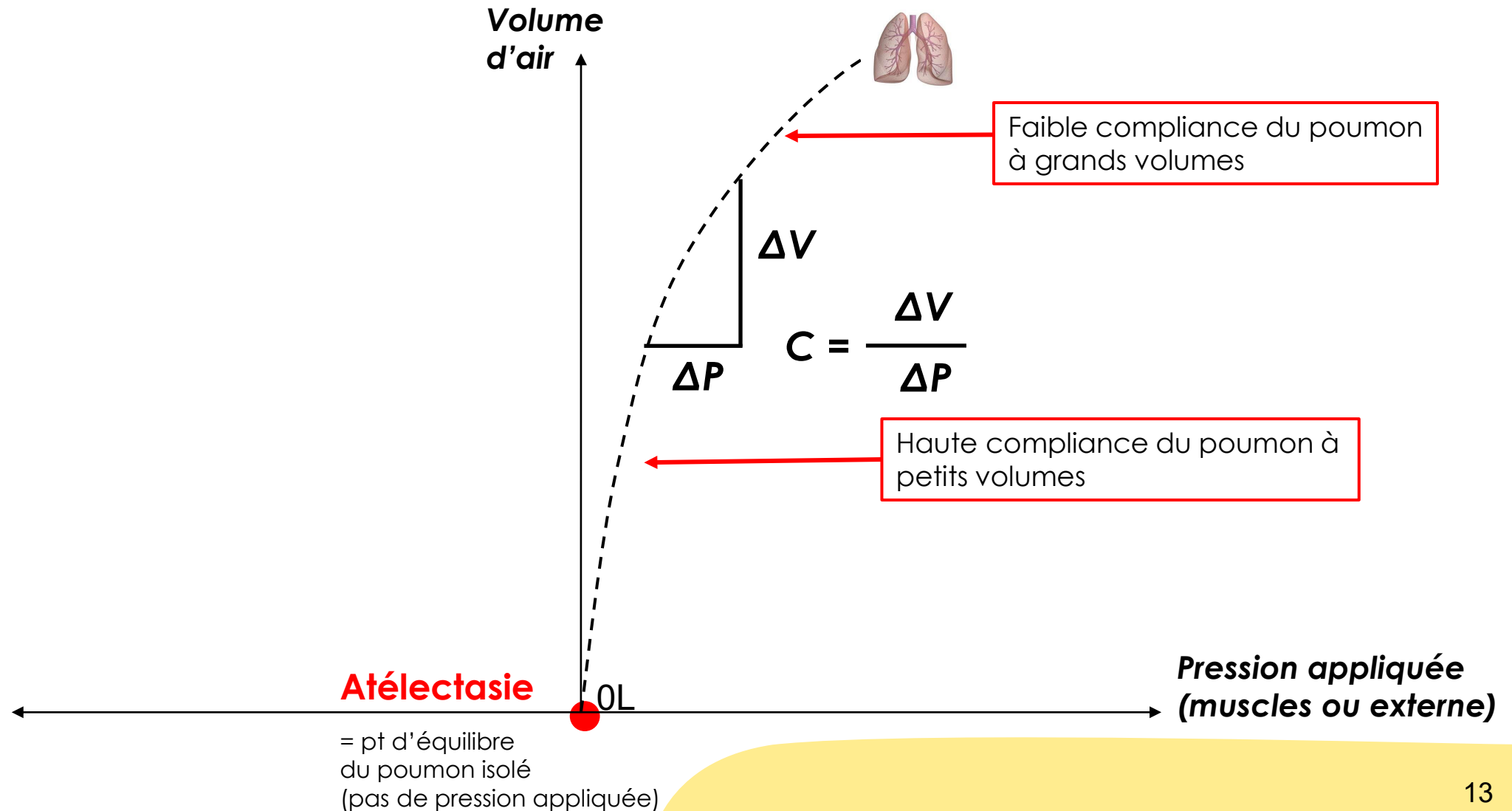
$R = 2$

$P1 \approx T/r = 1$

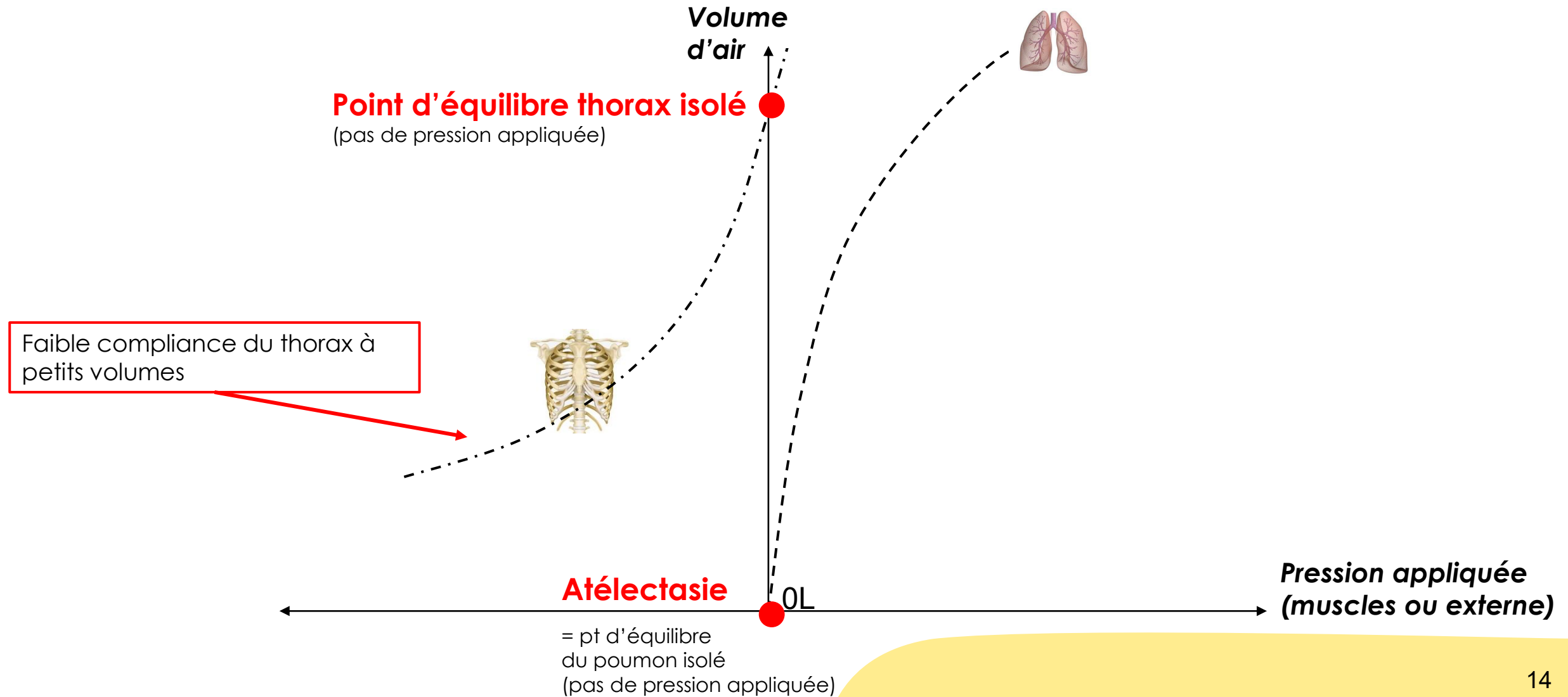


# **Les relations Pression-Volume du système Poumon – Thorax**

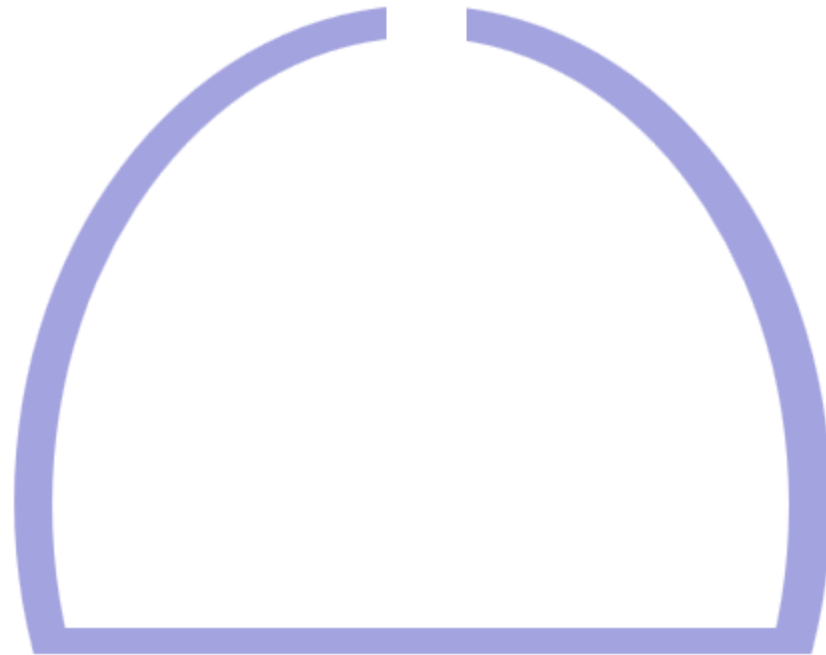
# Relation Pression - Volume : Poumon seul



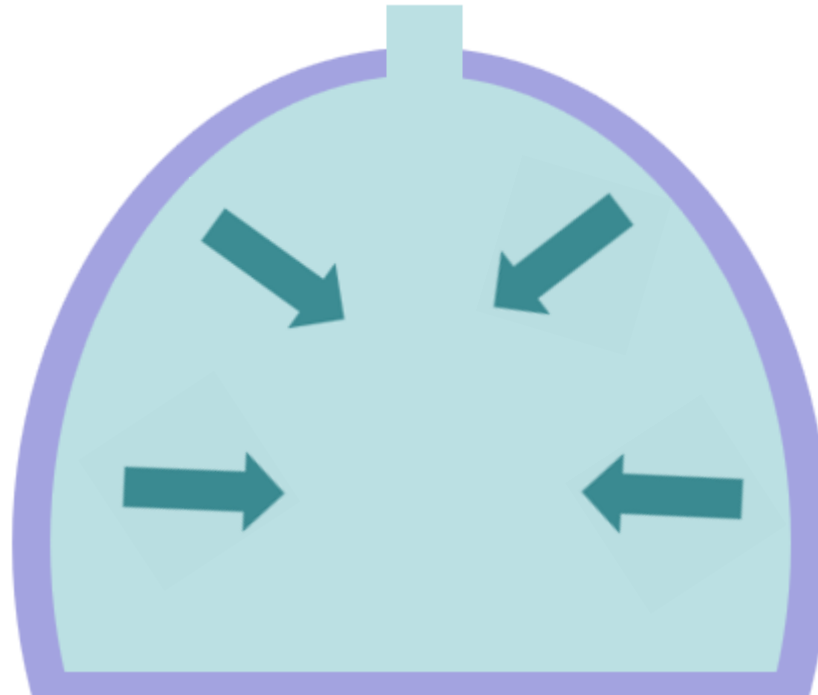
# Relation Pression - Volume : Poumon seul + Thorax seul



# Relation Pression - Volume : Poumon + Thorax ensemble



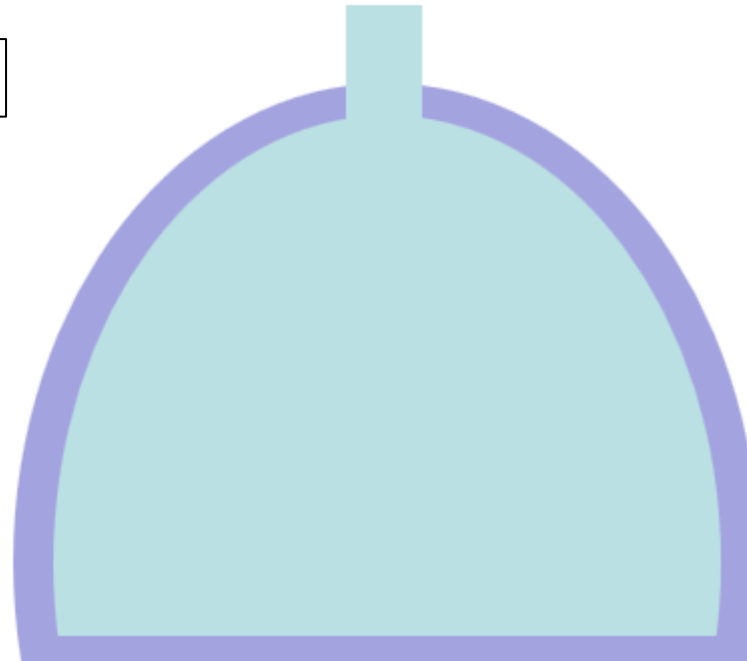
# Relation Pression - Volume : Poumon + Thorax ensemble



- 1) Mettre le poumon dans la cage thoracique
- 2) Le gonfler jusqu'à ce qu'il touche la cage thoracique
- 3) Colmater le joint autour de la trachée
- 4) Lâcher la pression positive mise pour gonfler le poumon et laisser la trachée ouverte
- 5) Le poumon se vide et exerce une force de rétraction, mais il est en partie retenu par le thorax

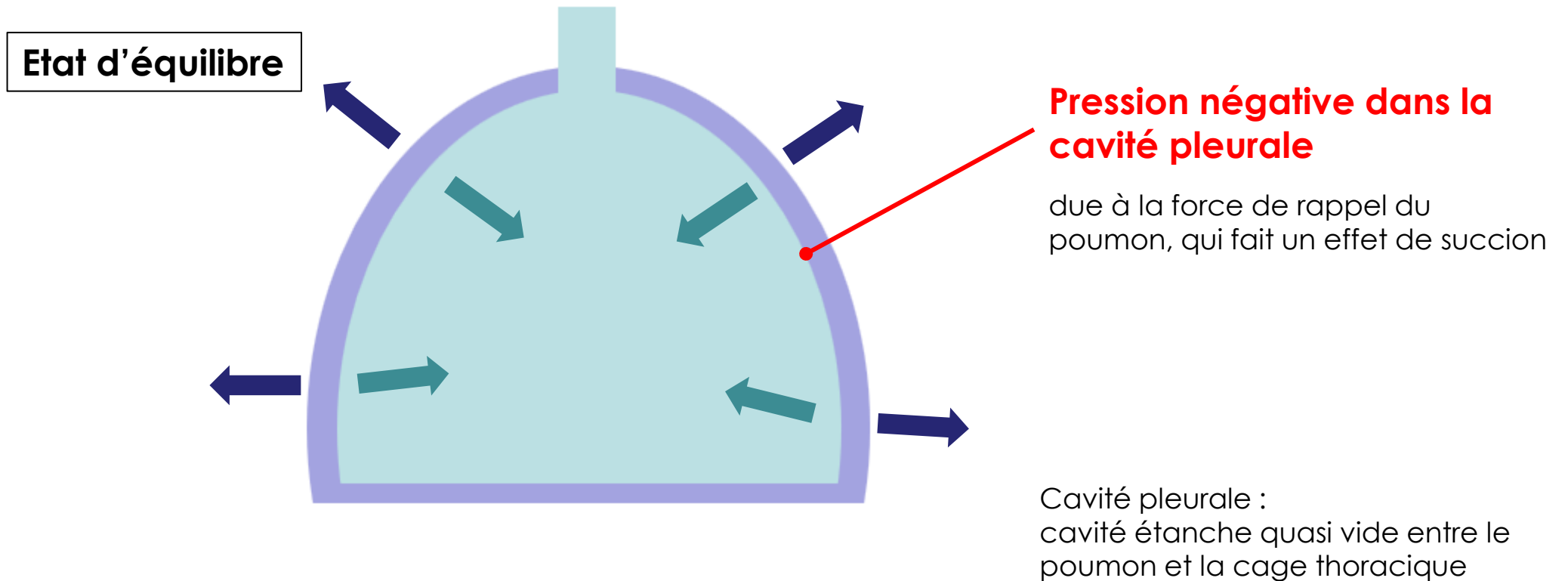
# Relation Pression - Volume : Poumon + Thorax ensemble

**Etat d'équilibre**



- 1) Mettre le poumon dans la cage thoracique
- 2) Le gonfler jusqu'à ce qu'il touche la cage thoracique
- 3) Colmater le joint autour de la trachée
- 4) Lâcher la pression positive mise pour gonfler le poumon et laisser la trachée ouverte
- 5) Le poumon se vide et exerce une force de rétraction, mais il est en partie retenu par le thorax
- 6) Le poumon et le thorax diminue de taille jusqu'à un état d'équilibre

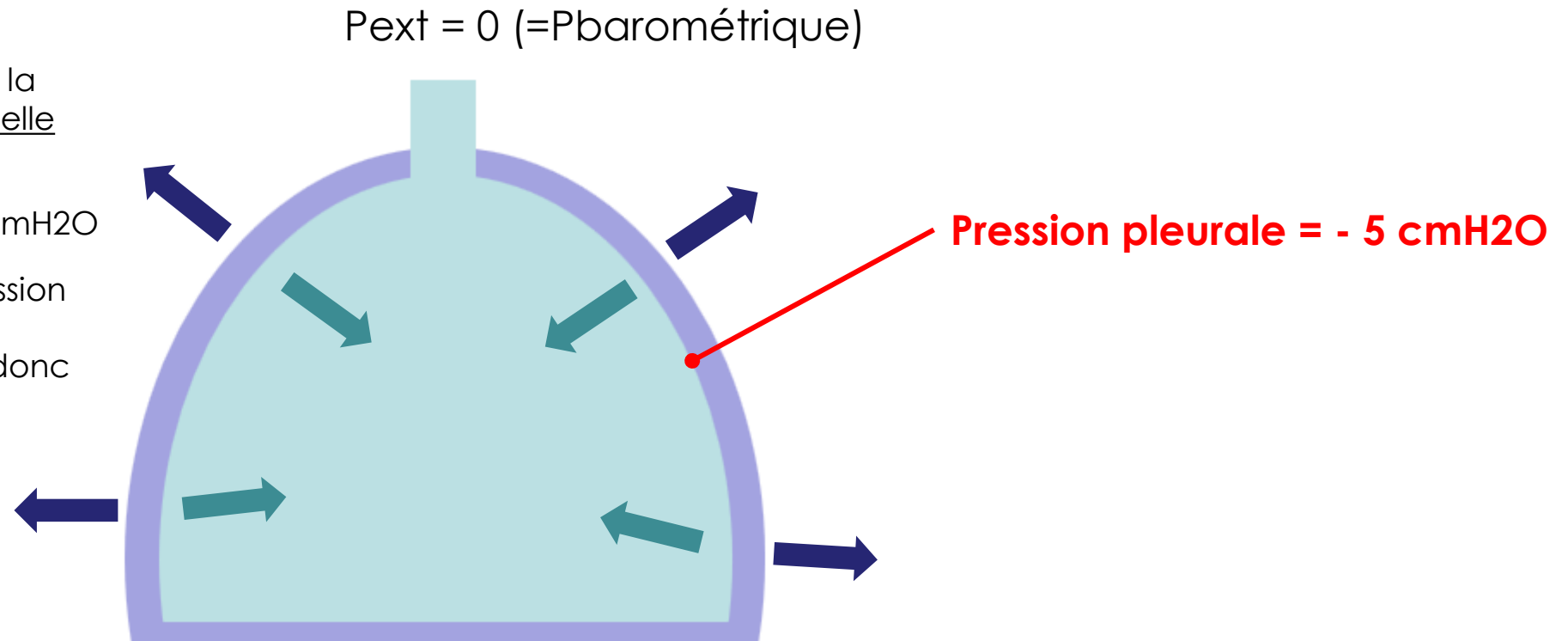
# Relation Pression - Volume : Poumon + Thorax ensemble



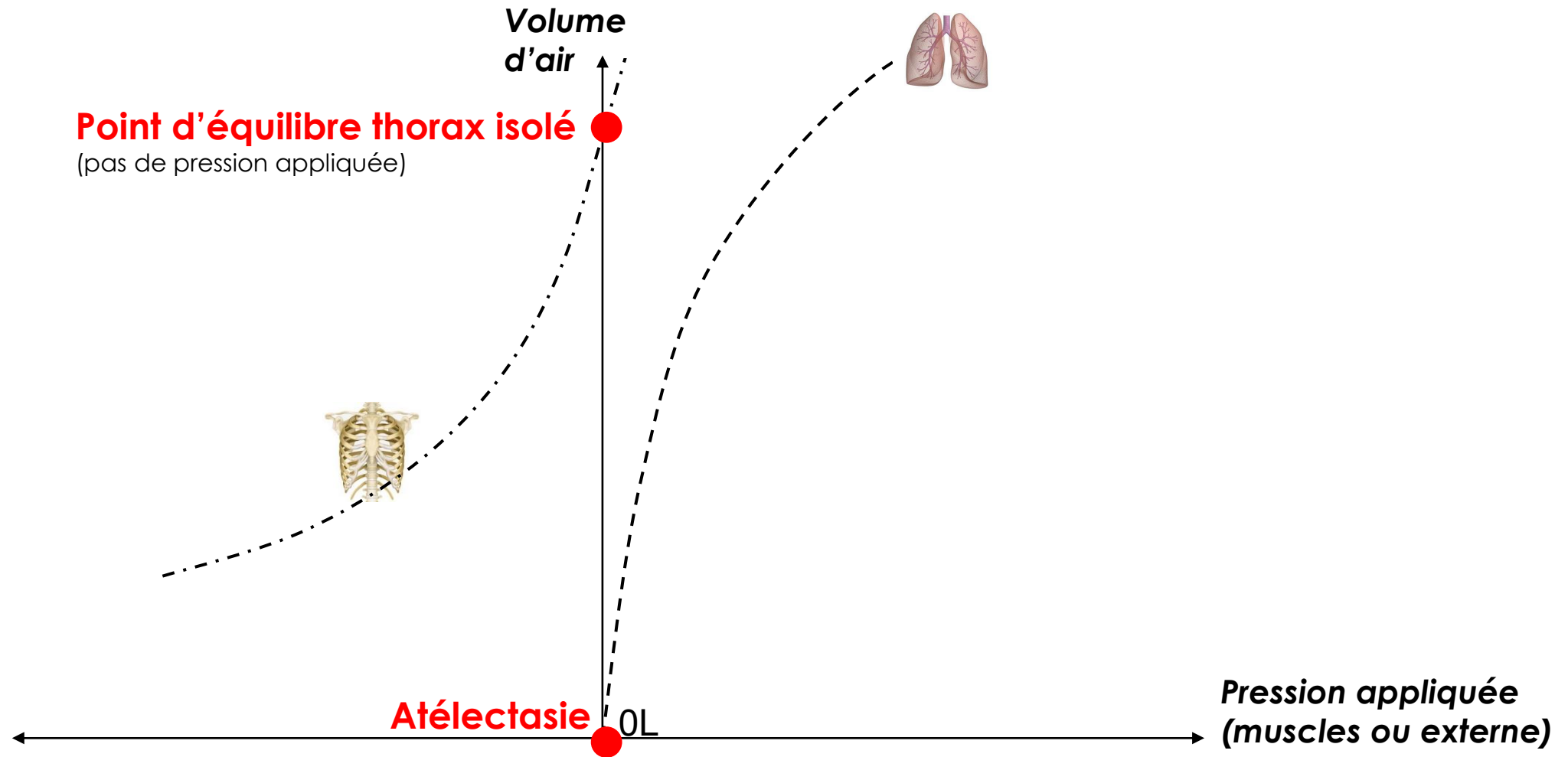
# Relation Pression - Volume : Poumon + Thorax ensemble

## Chez un sujet paralysé en état d'équilibre :

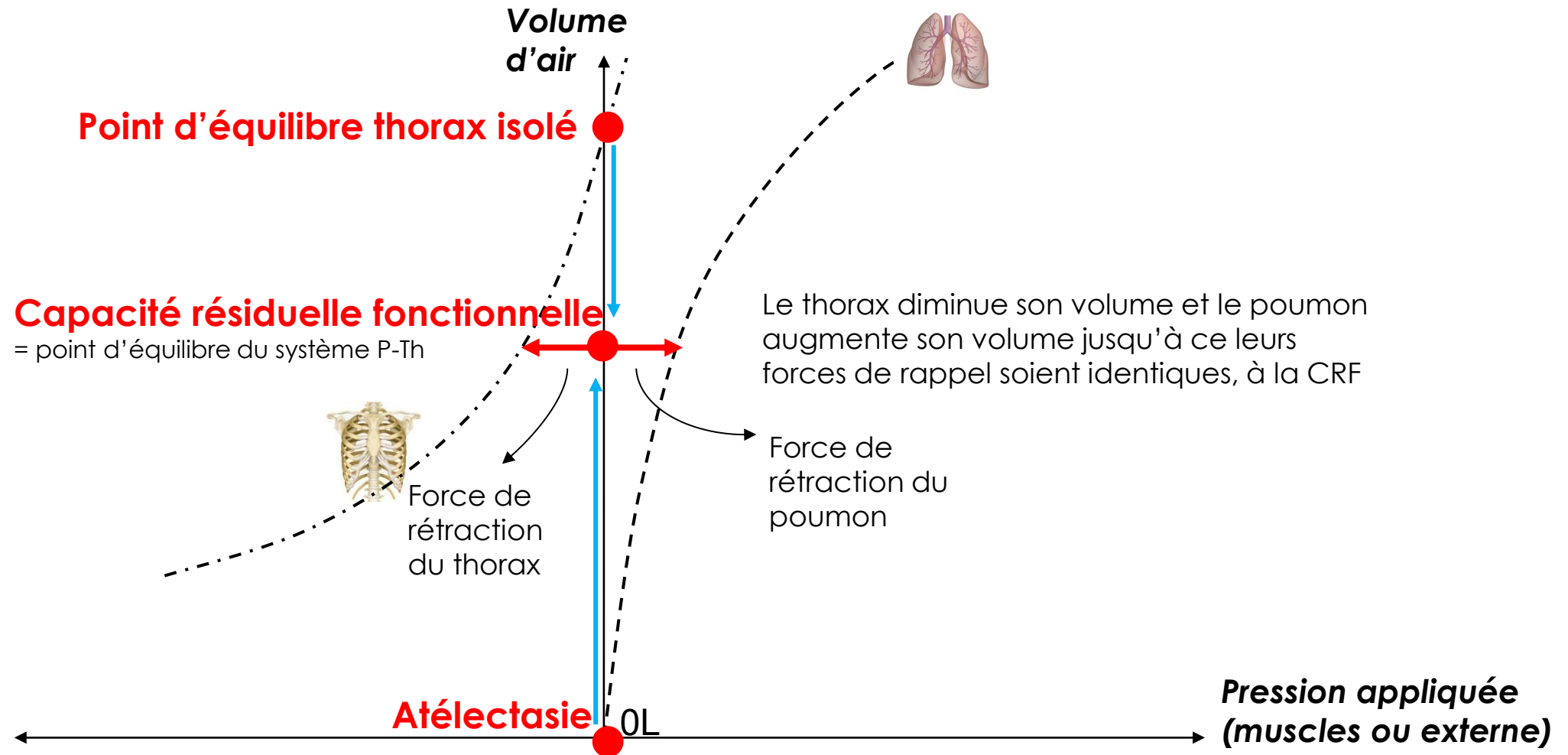
- Le volume dans le poumon est la Capacité Résiduelle Fonctionnelle (CRF)
- La pression pleurale est de  $-5 \text{ cmH}_2\text{O}$
- La pression alvéolaire et la pression extérieure =  $0 \text{ cmH}_2\text{O}$   
(pas de gradient de pression, donc pas de débit d'air)



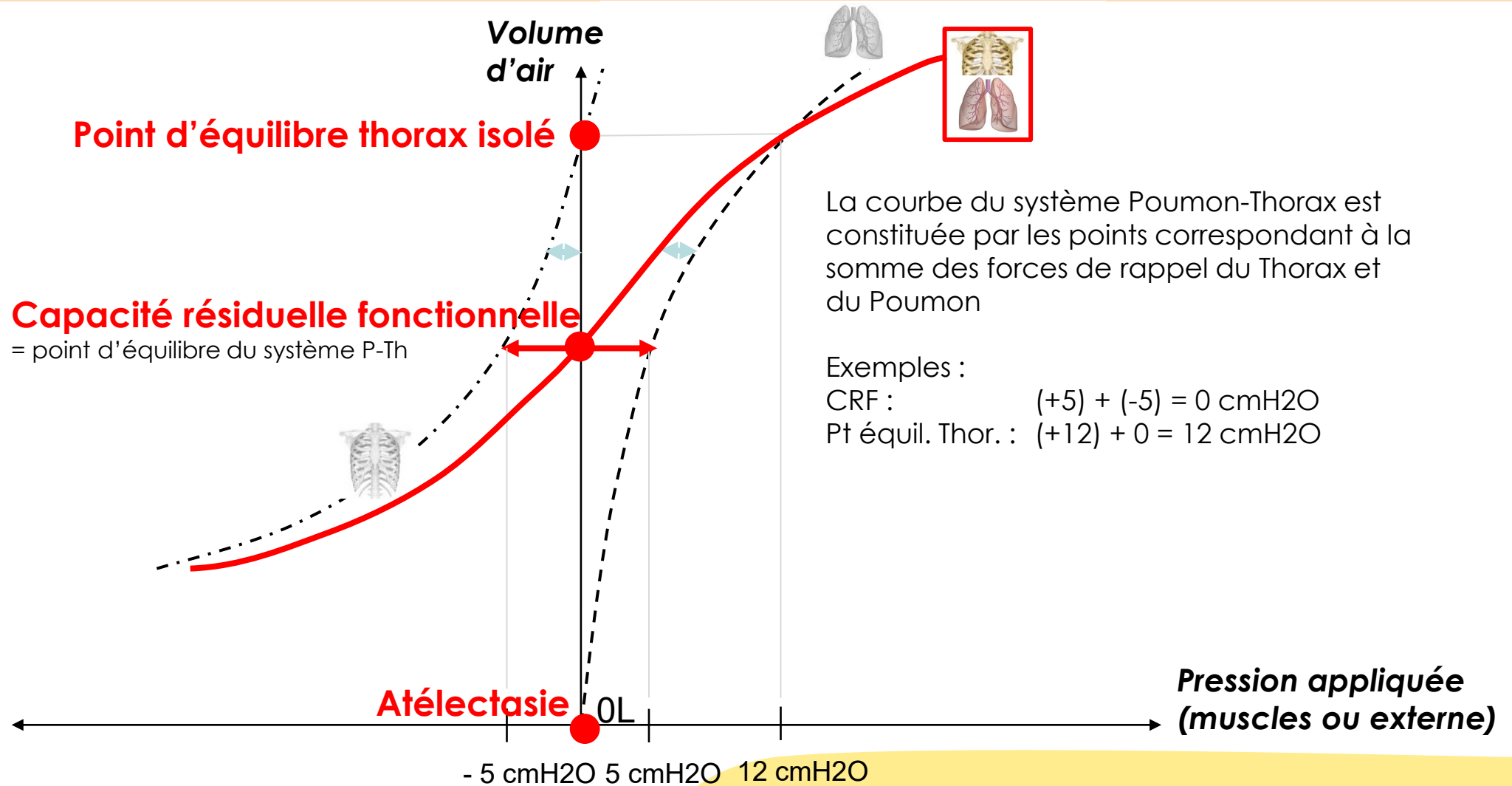
# Relation Pression - Volume : Poumon **seul** + Thorax **seul**



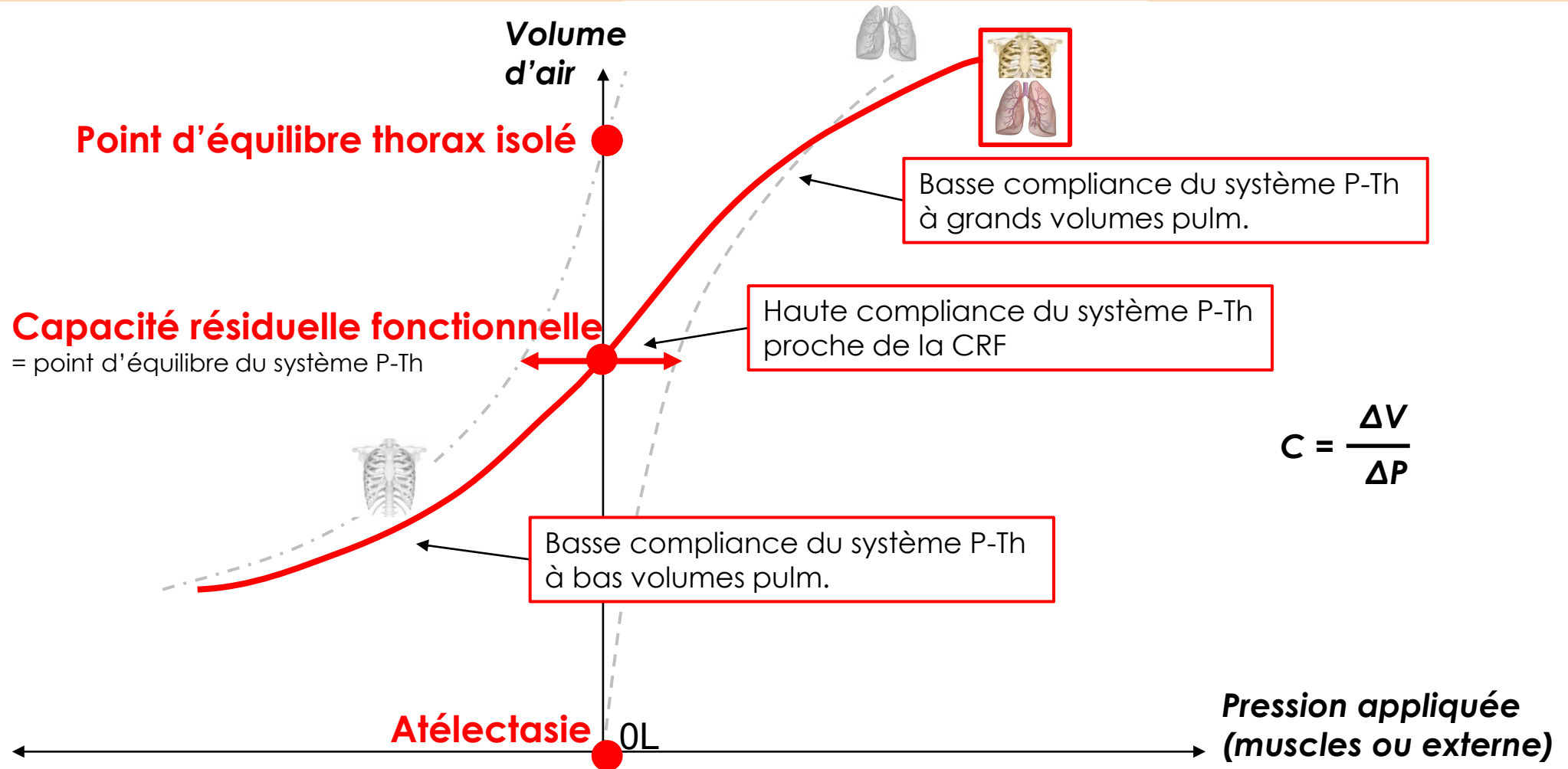
# Relation Pression - Volume : Poumon + Thorax **ensemble**



# Relation Pression - Volume : Poumon + Thorax ensemble

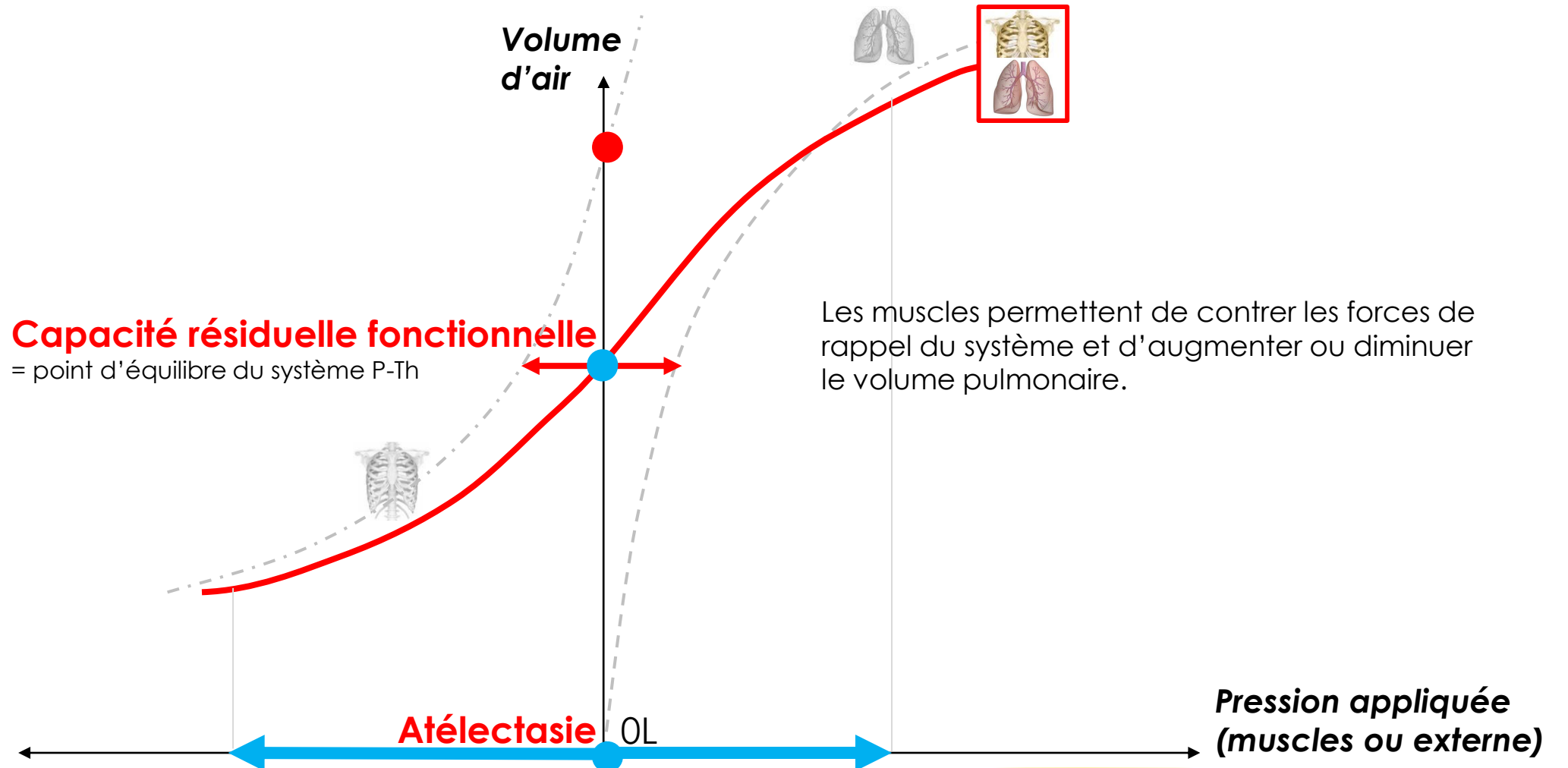


# Relation Pression - Volume : Poumon + Thorax ensemble

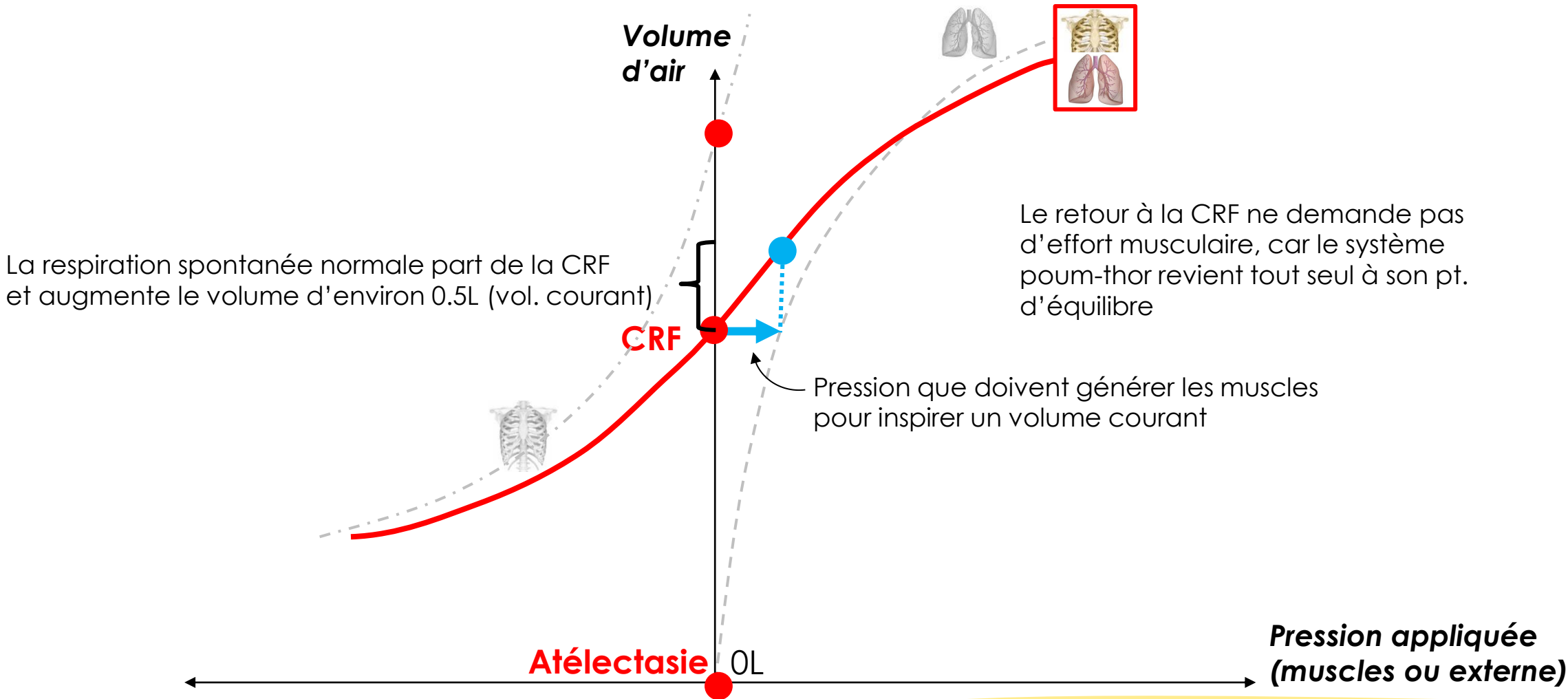


# **Rôle des muscles dans le système Poumon – Thorax**

# Rôle des muscles respiratoires

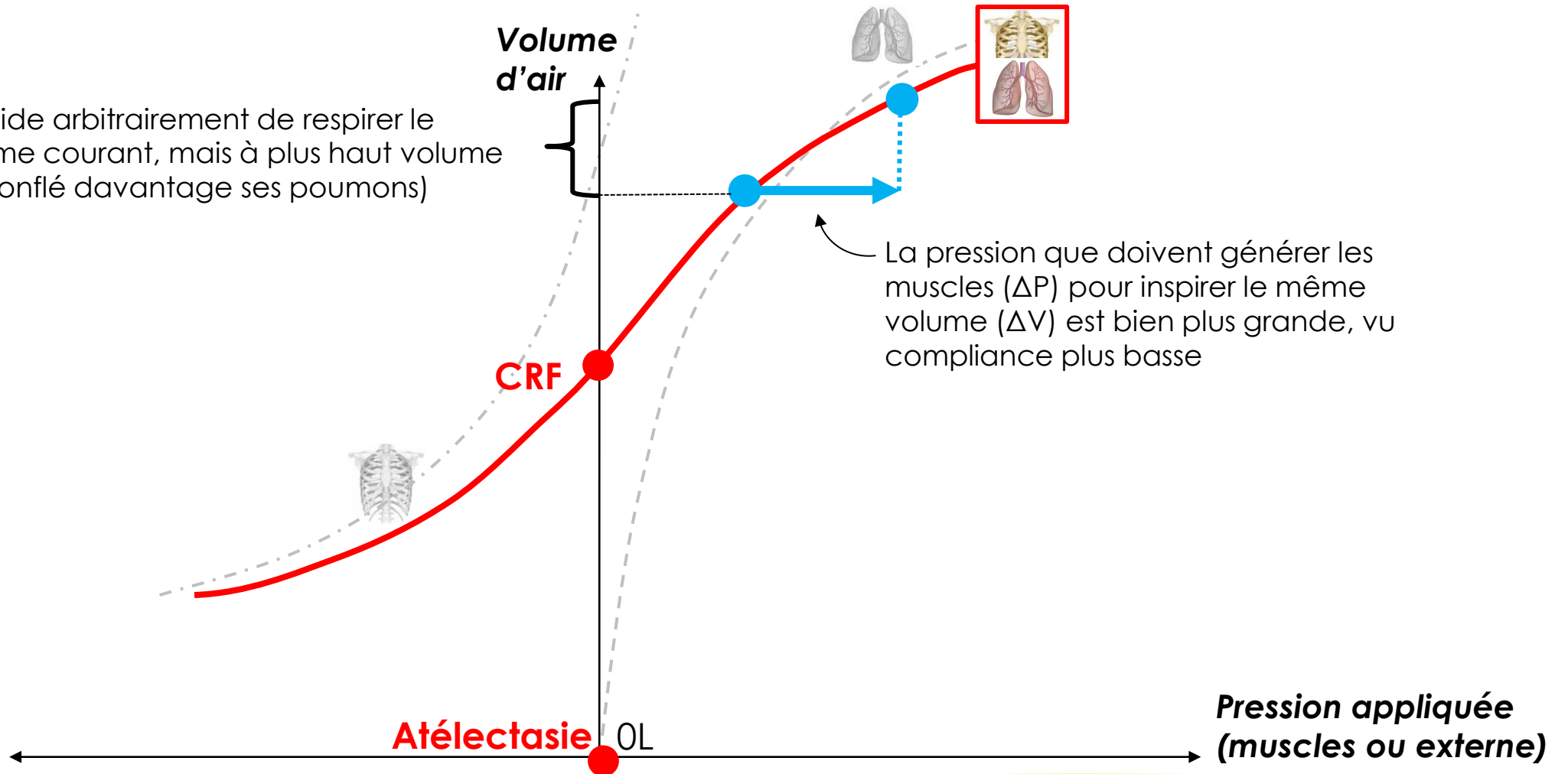


# Rôle des muscles - respiration spontanée au repos

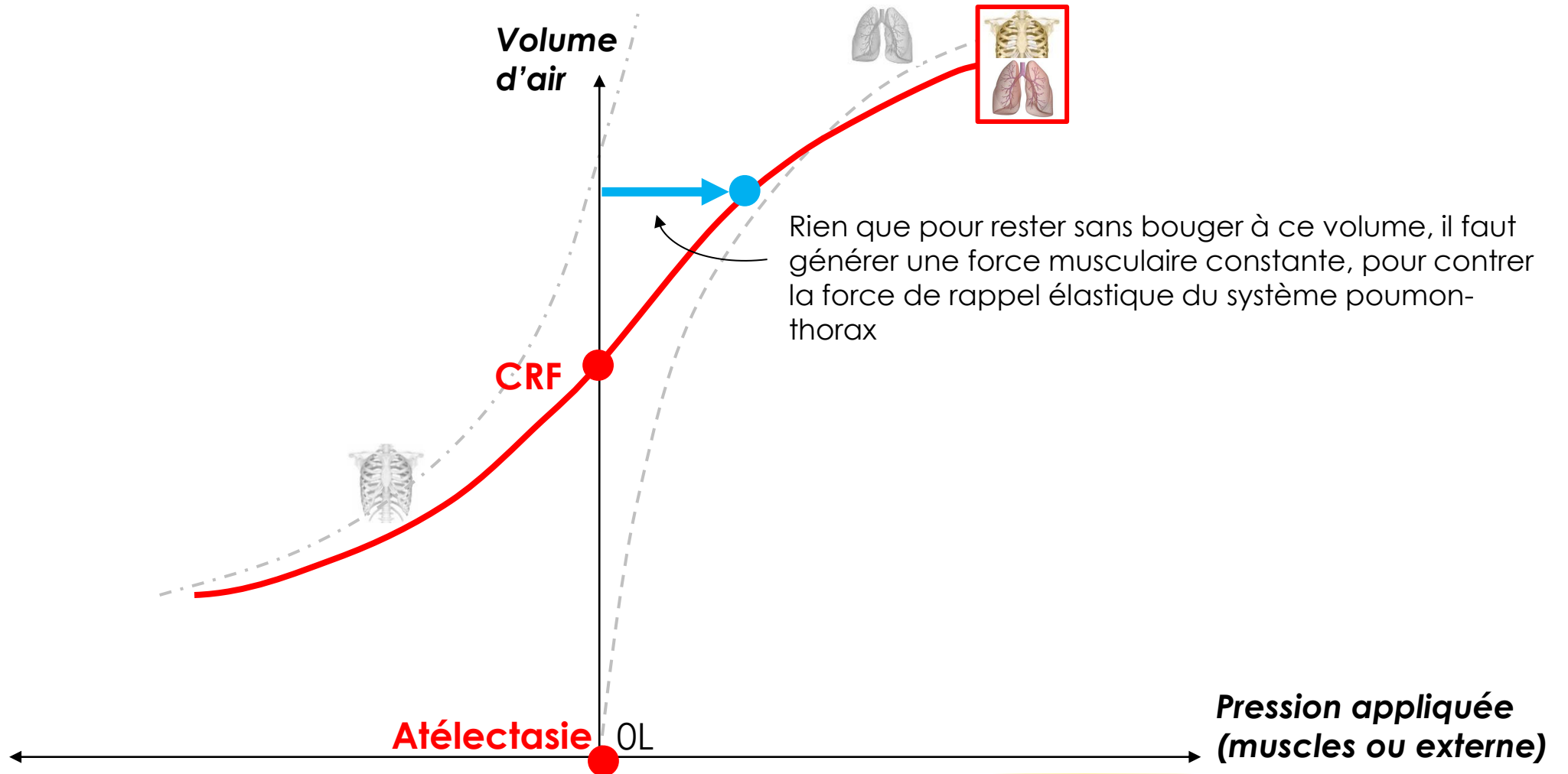


# Rôle des muscles - respiration à haut volume

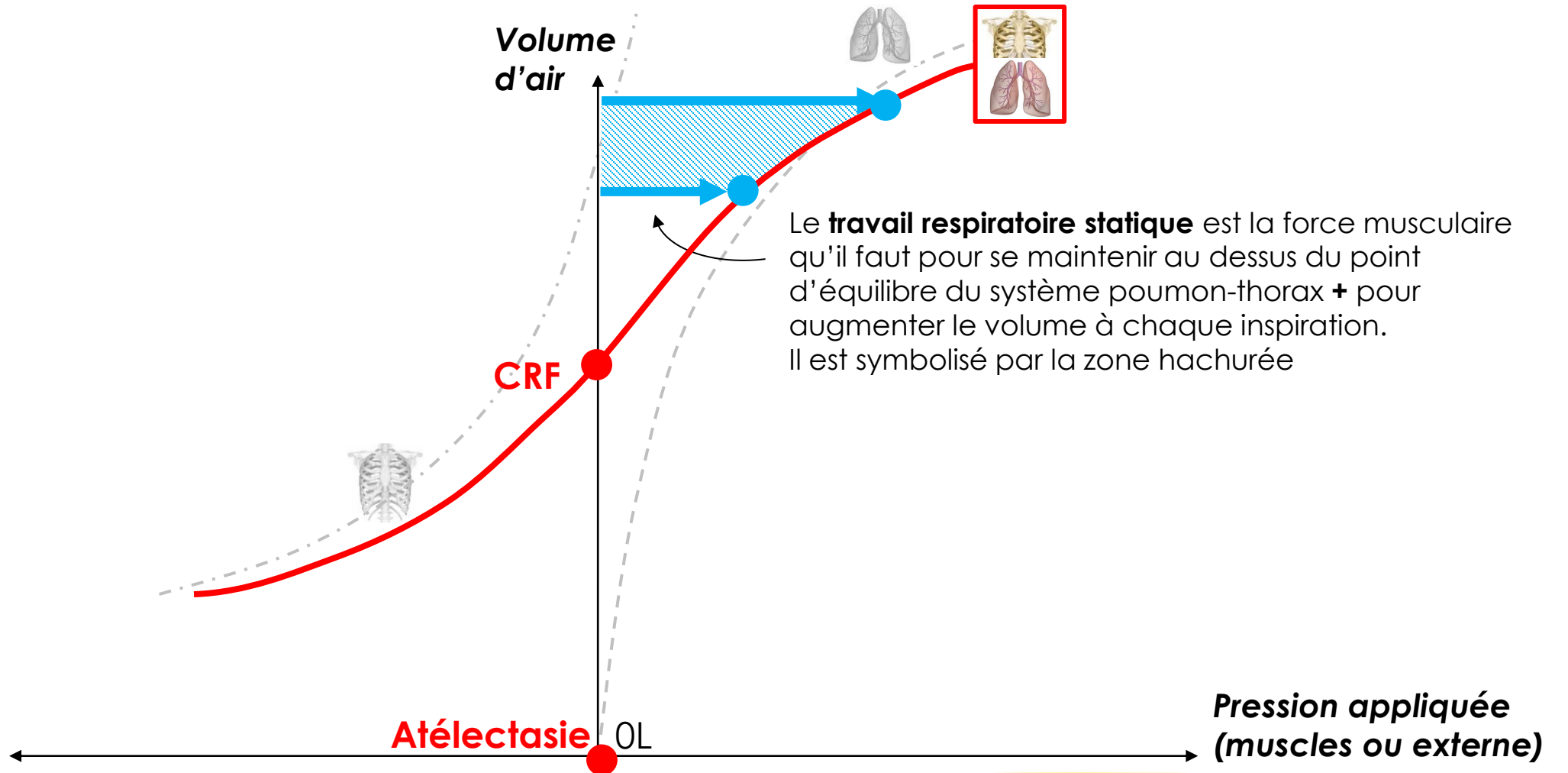
Le sujet décide arbitrairement de respirer le même volume courant, mais à plus haut volume (en ayant gonflé davantage ses poumons)



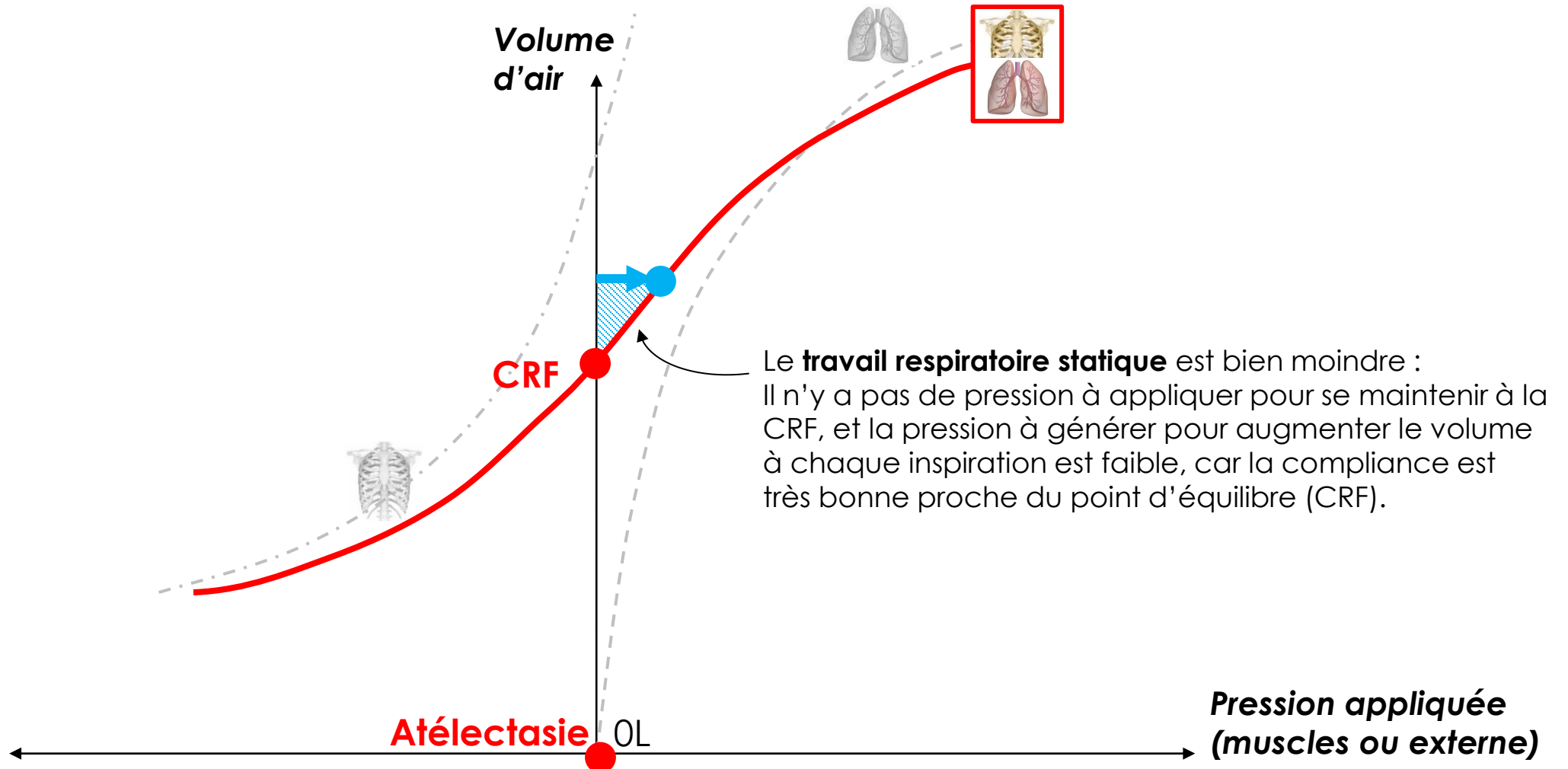
# Travail respiratoire statique de la respiration à haut volume



# Travail respiratoire statique de la respiration à haut volume



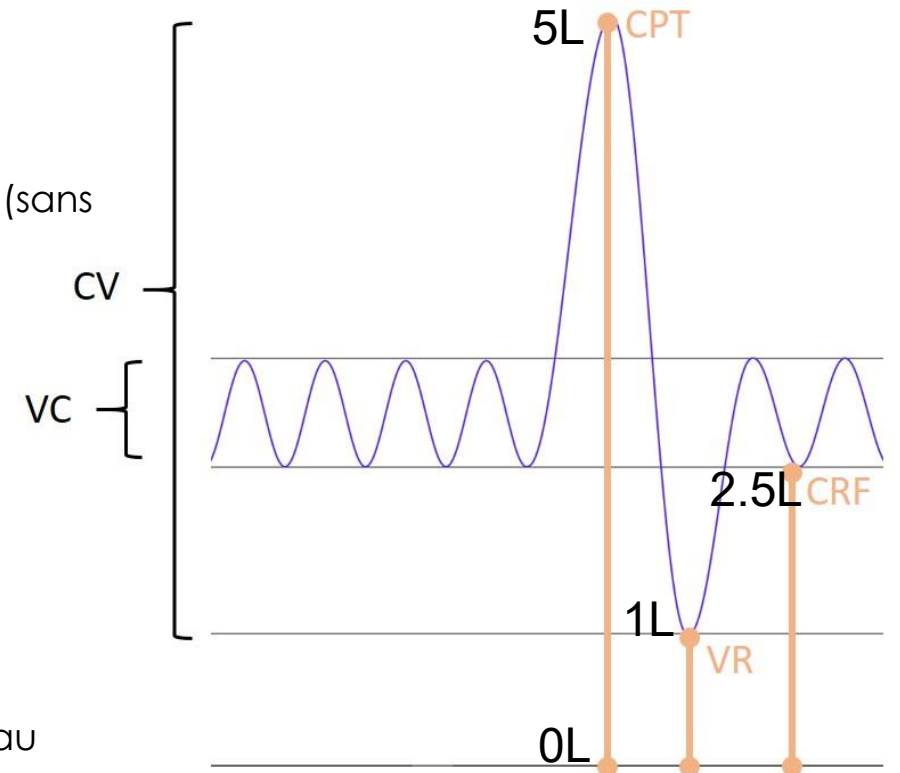
# Travail respiratoire statique de la respiration spontanée



# Définitions et déterminants des volumes pulmonaires

# Les volumes pulmonaires physiologiques importants

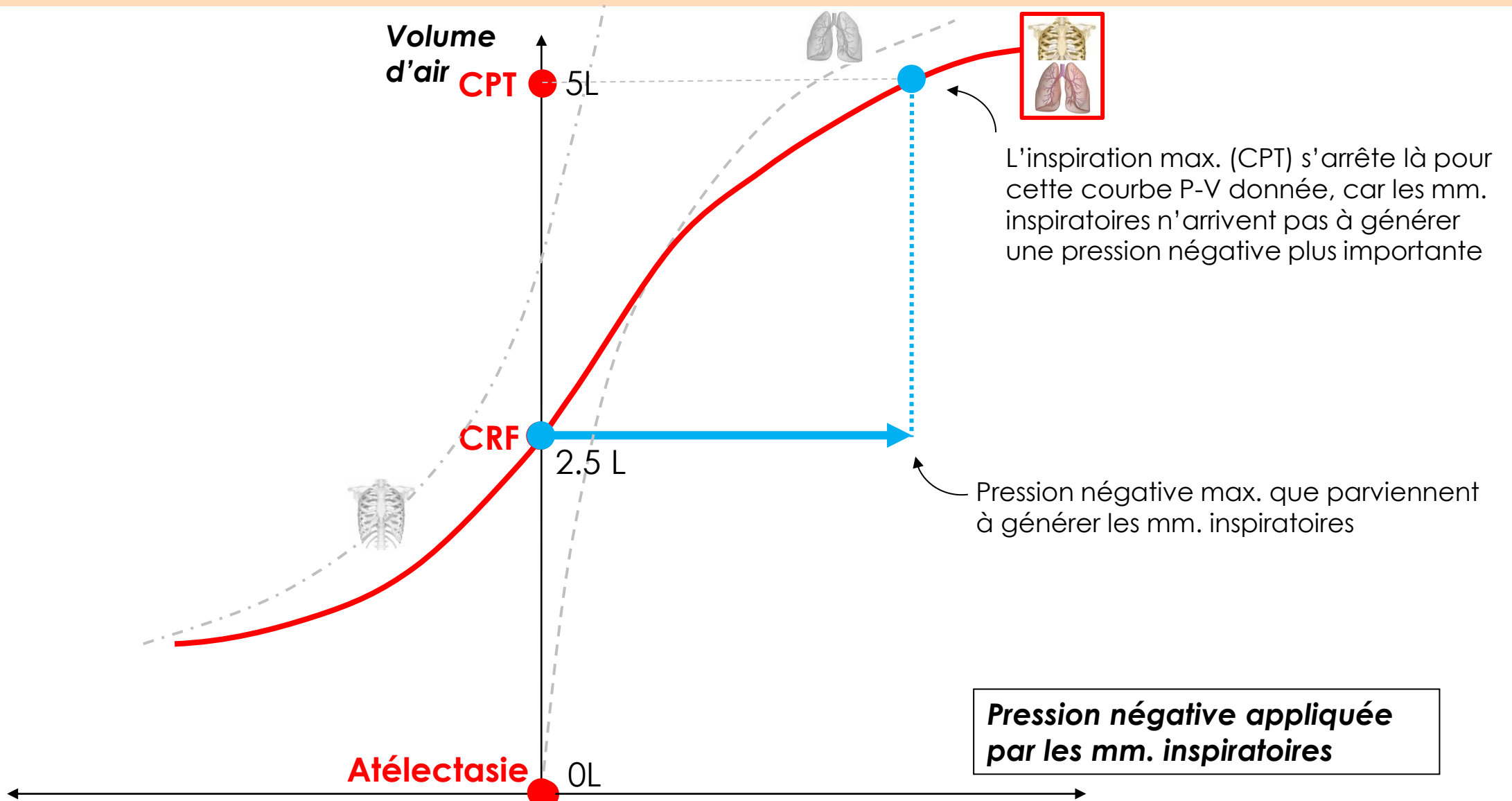
- **Capacité pulmonaire totale (CPT)**
  - Volume d'air maximal qu'un sujet peut prendre dans ses poumons
- **Capacité résiduelle fonctionnel (CRF)**
  - Volume d'air qui reste dans les poumons d'un sujet en état d'équilibre (sans aucune force musculaire, ex : décès)
- **Volume résiduel (VR)**
  - Volume d'air qui reste dans les poumons d'un sujet qui fait un effort musculaire maximal pour vider ses poumons
- **Capacité vitale (CV)**
  - Volume d'air maximal qu'un sujet peut inspirer entre son VR et sa CPT
- **Volume courant (VC)**
  - Volume d'air mobilisé par un sujet en respiration spontanée régulière au repos



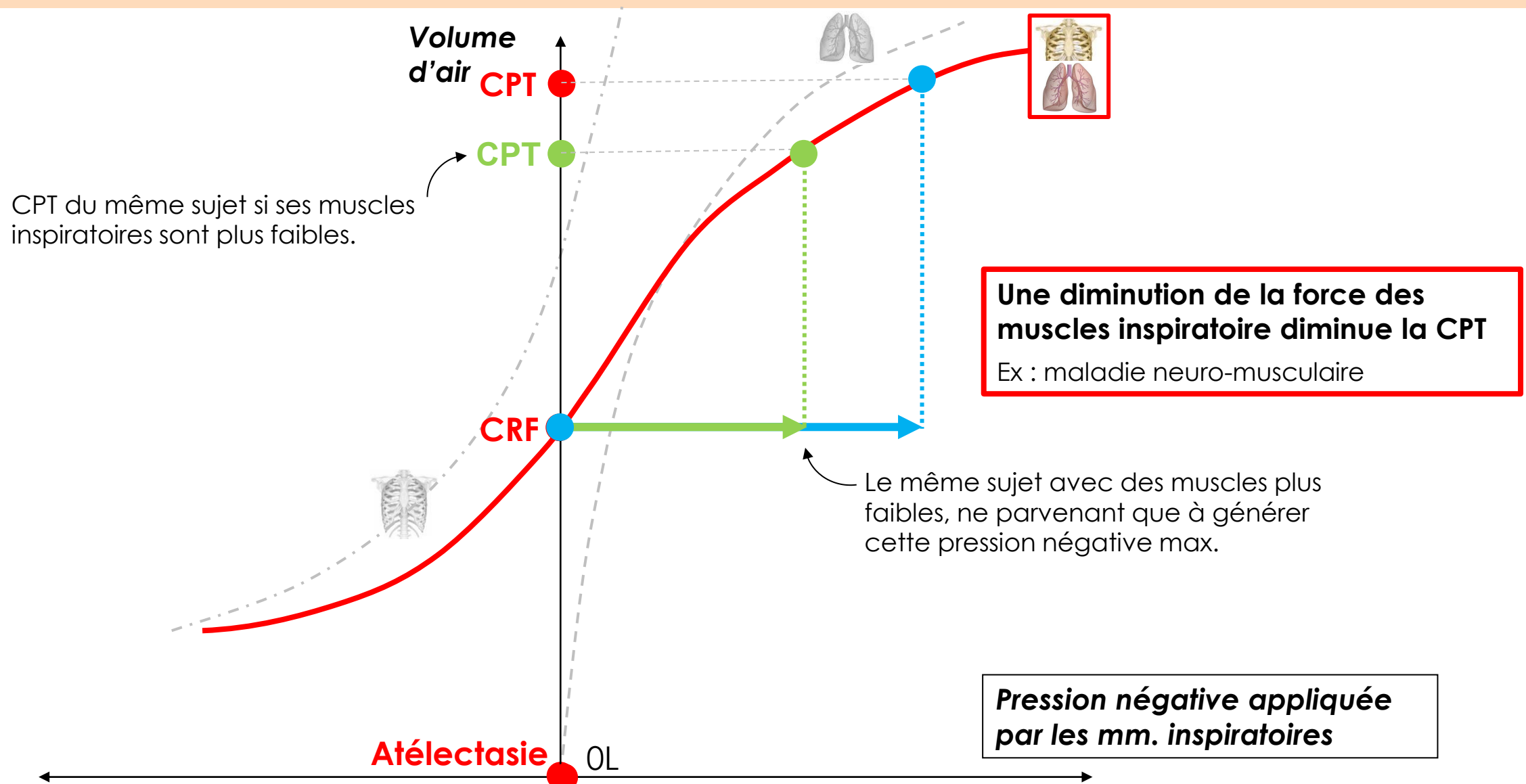
# Déterminants de la Capacité Pulmonaire Totale

- La capacité pulmonaire totale d'un sujet dépend de sa taille, de son sexe, de son âge et de son ethnie.
- D'un point de vue physiologique, elle dépend de :
  - la compliance de son système poumons-thorax
  - la force de ses muscles inspiratoires
- Les muscles inspiratoires respectent la loi générale de la musculature striée (Starling) :
  - la force isométrique qu'ils sont capables de développer dépend de leur allongement préalable. Ainsi, ils sont très puissants lorsque les poumons sont quasi vides, et beaucoup plus faibles quand ils sont très raccourcis, en fin d'inspiration.

# CPT - Rôle des muscles



# CPT - Rôle des muscles



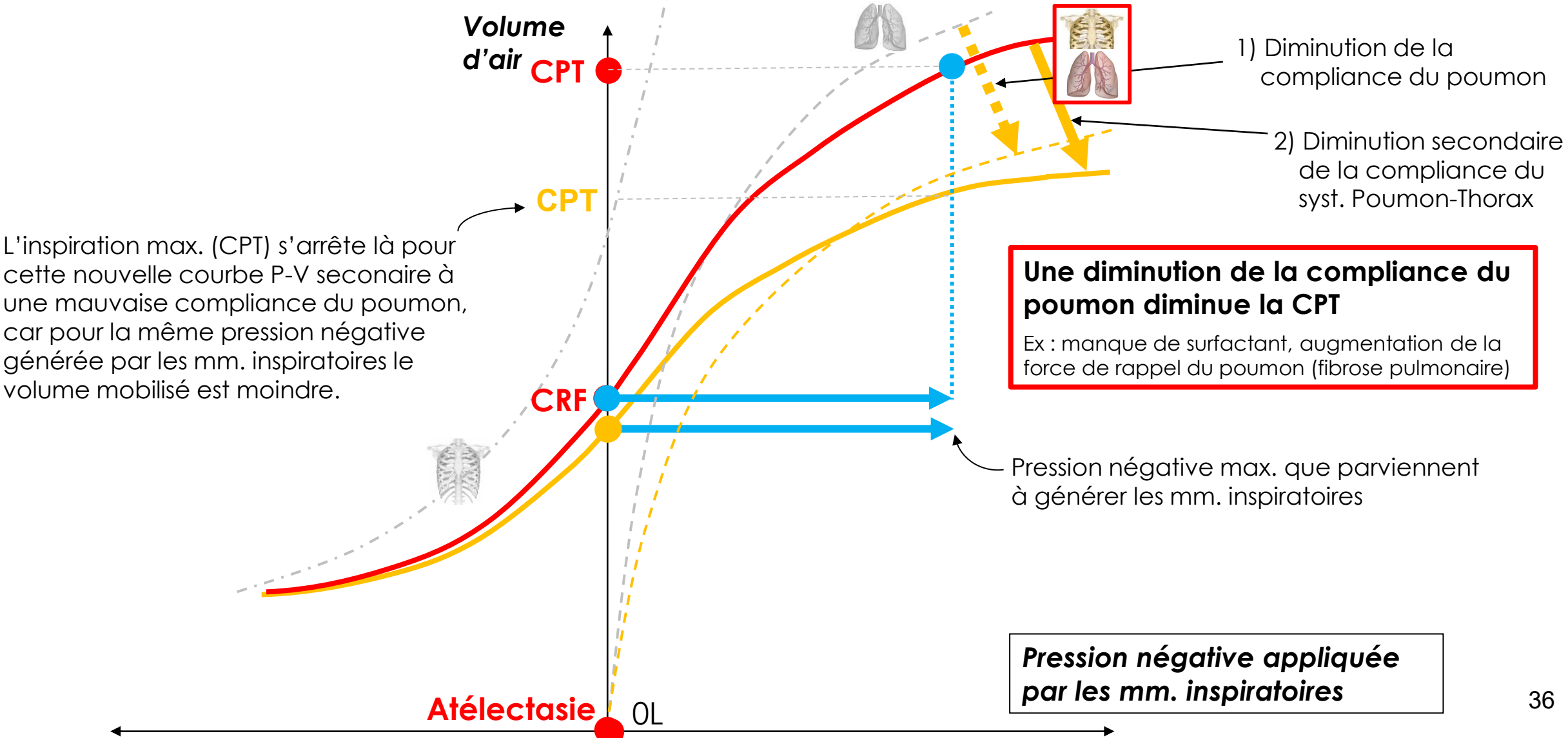
CPT du même sujet si ses muscles inspiratoires sont plus faibles.

**Une diminution de la force des muscles inspiratoire diminue la CPT**  
Ex : maladie neuro-musculaire

Le même sujet avec des muscles plus faibles, ne parvenant que à générer cette pression négative max.

**Pression négative appliquée par les mm. inspiratoires**

# CPT - Rôle de la compliance du poumon



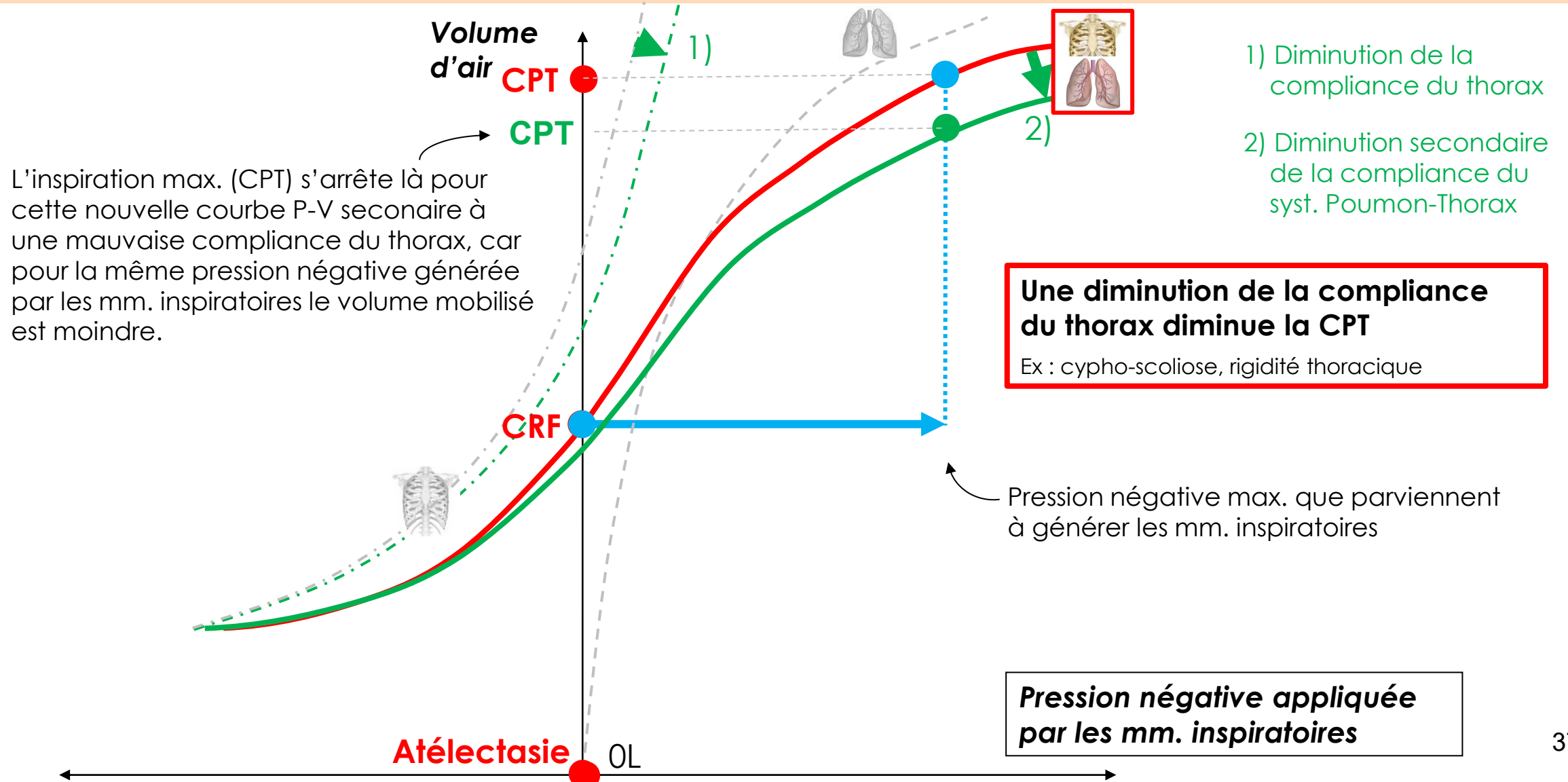
L'inspiration max. (CPT) s'arrête là pour cette nouvelle courbe P-V secondaire à une mauvaise compliance du poumon, car pour la même pression négative générée par les mm. inspiratoires le volume mobilisé est moindre.

**Une diminution de la compliance du poumon diminue la CPT**  
 Ex : manque de surfactant, augmentation de la force de rappel du poumon (fibrose pulmonaire)

Pression négative max. que parviennent à générer les mm. inspiratoires

Pression négative appliquée par les mm. inspiratoires

# CPT - Rôle de la compliance du thorax



L'inspiration max. (CPT) s'arrête là pour cette nouvelle courbe P-V secondaire à une mauvaise compliance du thorax, car pour la même pression négative générée par les mm. inspiratoires le volume mobilisé est moindre.

**Une diminution de la compliance du thorax diminue la CPT**  
Ex : cypho-scoliose, rigidité thoracique

- 1) Diminution de la compliance du thorax
- 2) Diminution secondaire de la compliance du syst. Poumon-Thorax

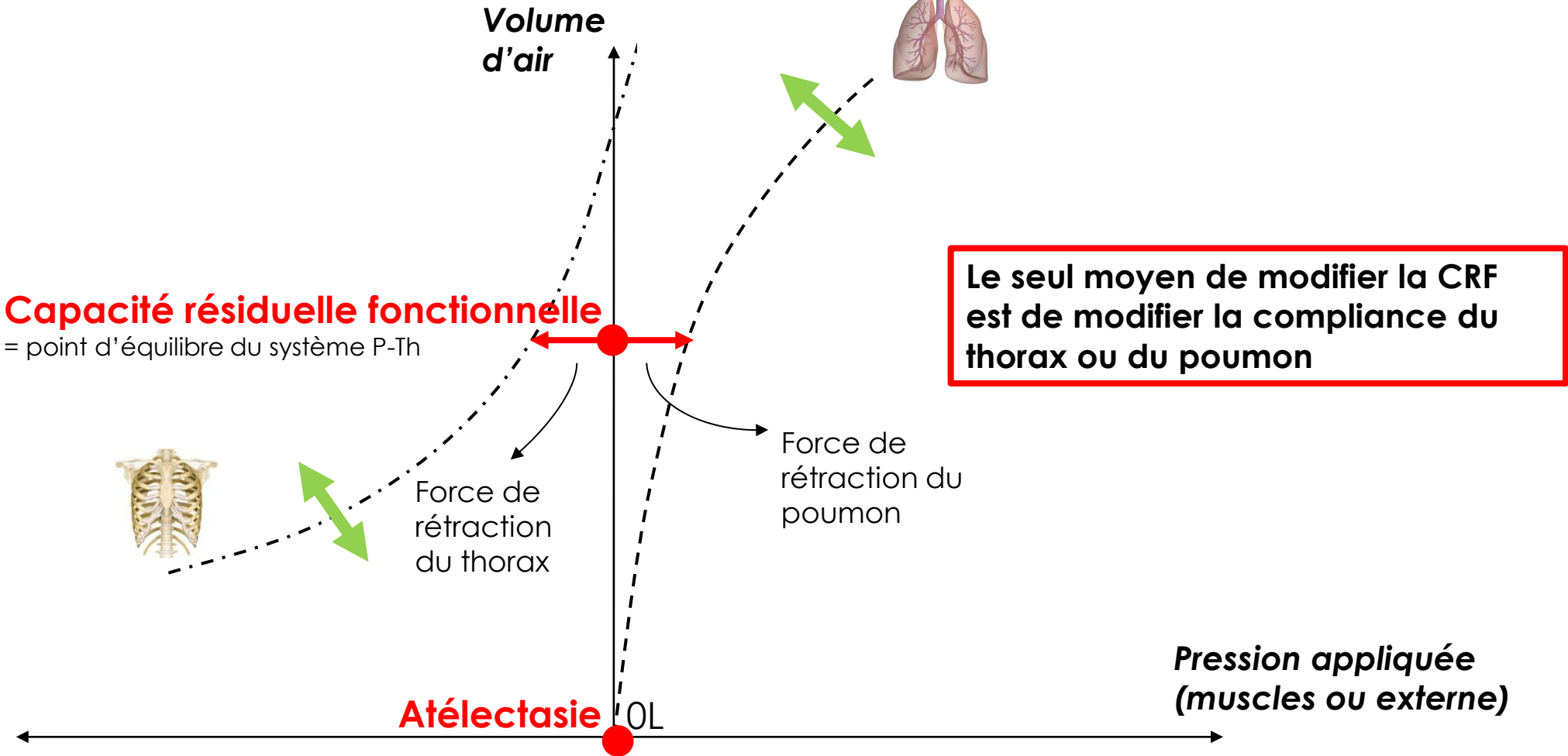
Pression négative max. que parviennent à générer les mm. inspiratoires

**Pression négative appliquée par les mm. inspiratoires**

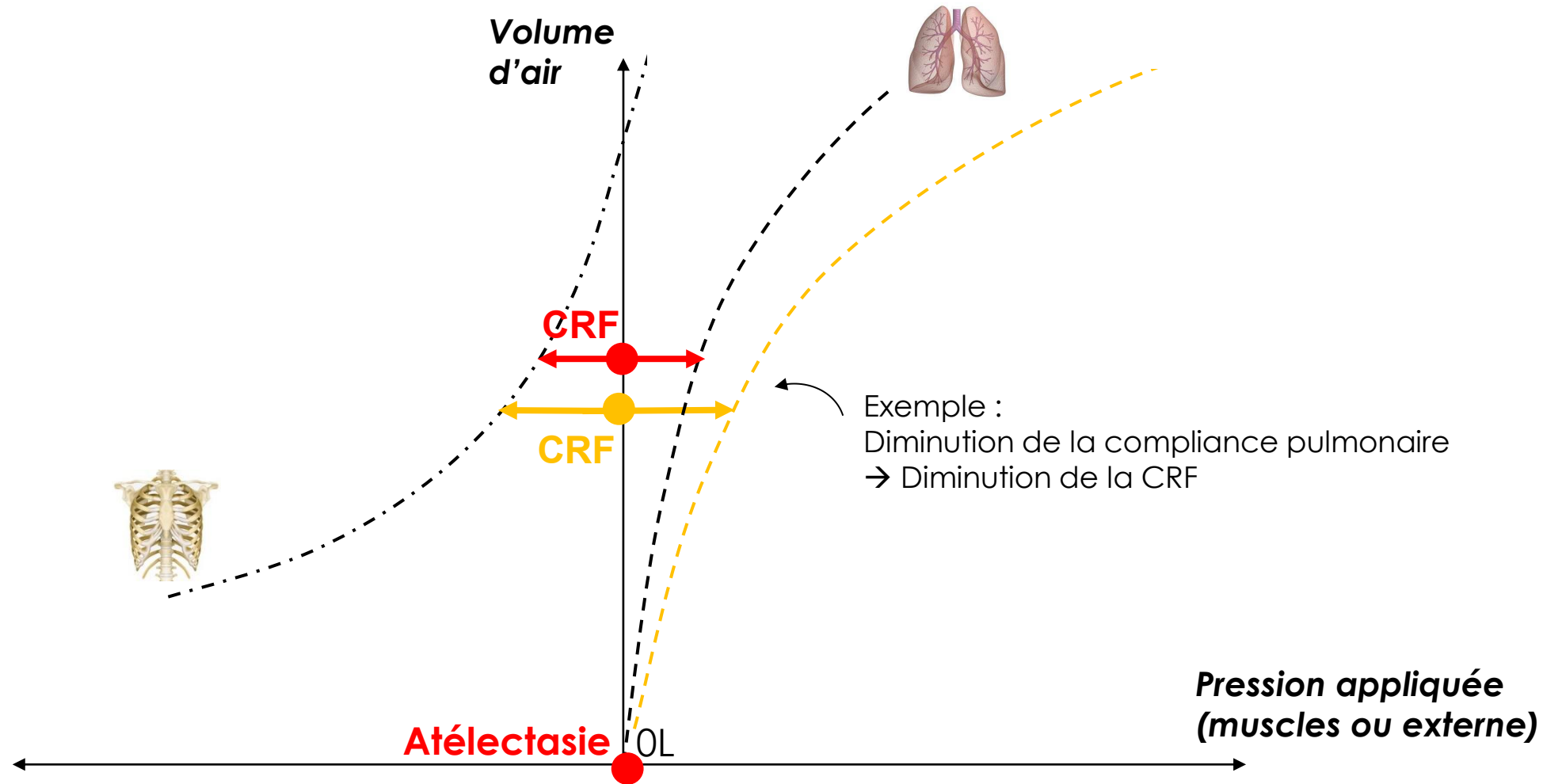
# Capacité résiduelle fonctionnelle

- La capacité résiduelle fonctionnelle d'un sujet dépend de sa taille, de son sexe, de son âge et de son ethnie.
- D'un point de vue physiologique, elle dépend de :
  - La compliance de son système poumons-thorax :
    - CRF augmente si compliance pulmonaire ou thoracique augmente
    - CRF diminue si compliance pulmonaire ou thoracique diminue
- La CRF ne dépend pas de la force des muscles inspiratoires, car c'est un point d'équilibre atteint quand aucune force musculaire ne s'applique.

# CRF – Rôle des compliances du Thorax et du Poumon



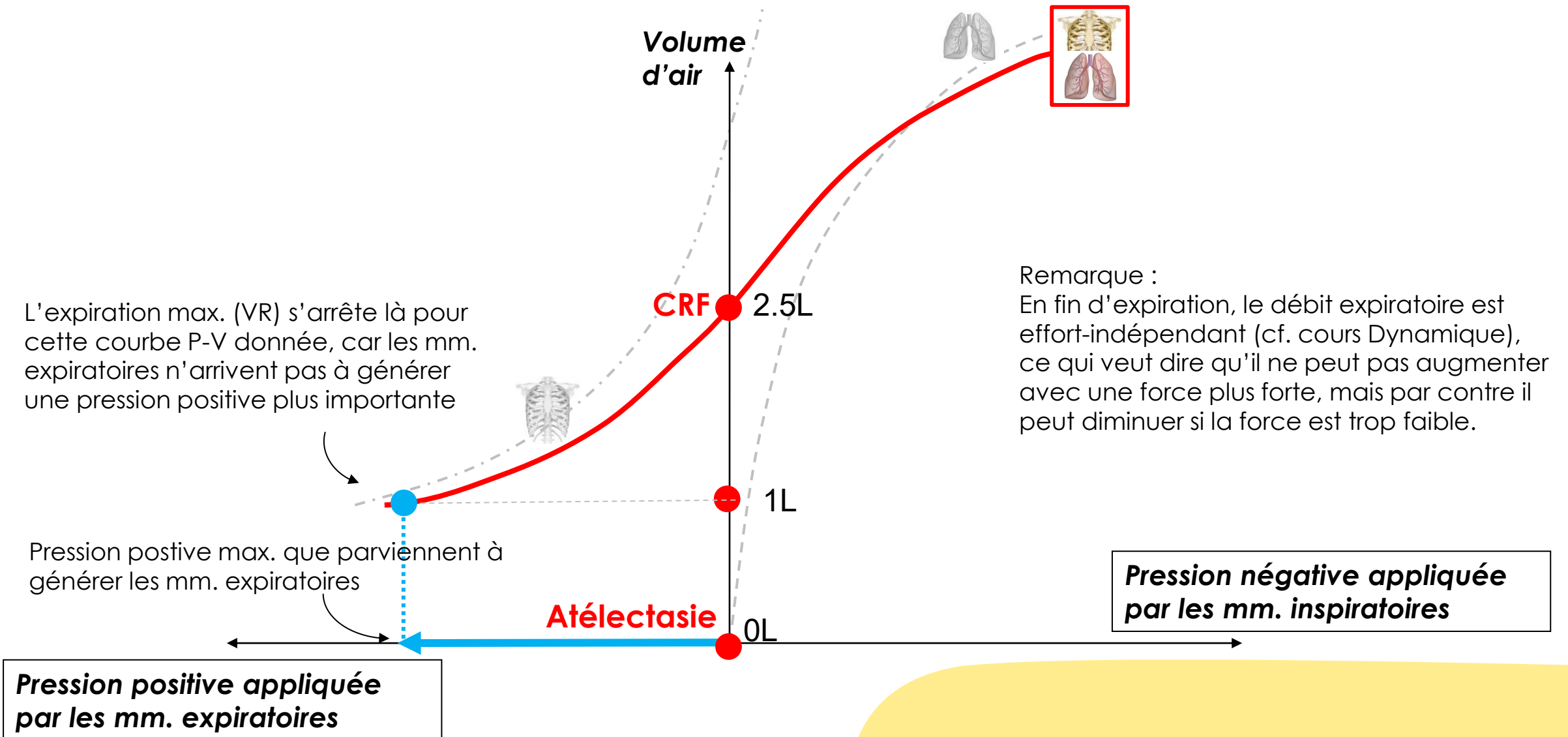
# CRF – Exemple de diminution de compliance pulm.



# Volume résiduel

- Le volume résiduel d'un sujet dépend de sa taille, de son sexe, de son âge et de son ethnité.
- D'un point de vue physiologique, il dépend de :
  - La compliance de son système poumons-thorax
  - La force de ses muscles expiratoires (faibles en fin d'expiration, vu loi de Starling)
  - La compression dynamique des bronches (cf. cours Dynamique) : certaines petites voies aériennes se collabent en fin d'expiration, en raison d'une pression transbronchique négative ( $P_{ext} > P_{int}$ ). Ce phénomène dépend principalement de la force de rappel élastique du poumon :
    - Compliance élevée du poumon : collapse précoce des VA → VR augmenté
    - Compliance basse du poumon : collapse tardif des VA → VR diminué

# Volume résiduel - Rôle des muscles

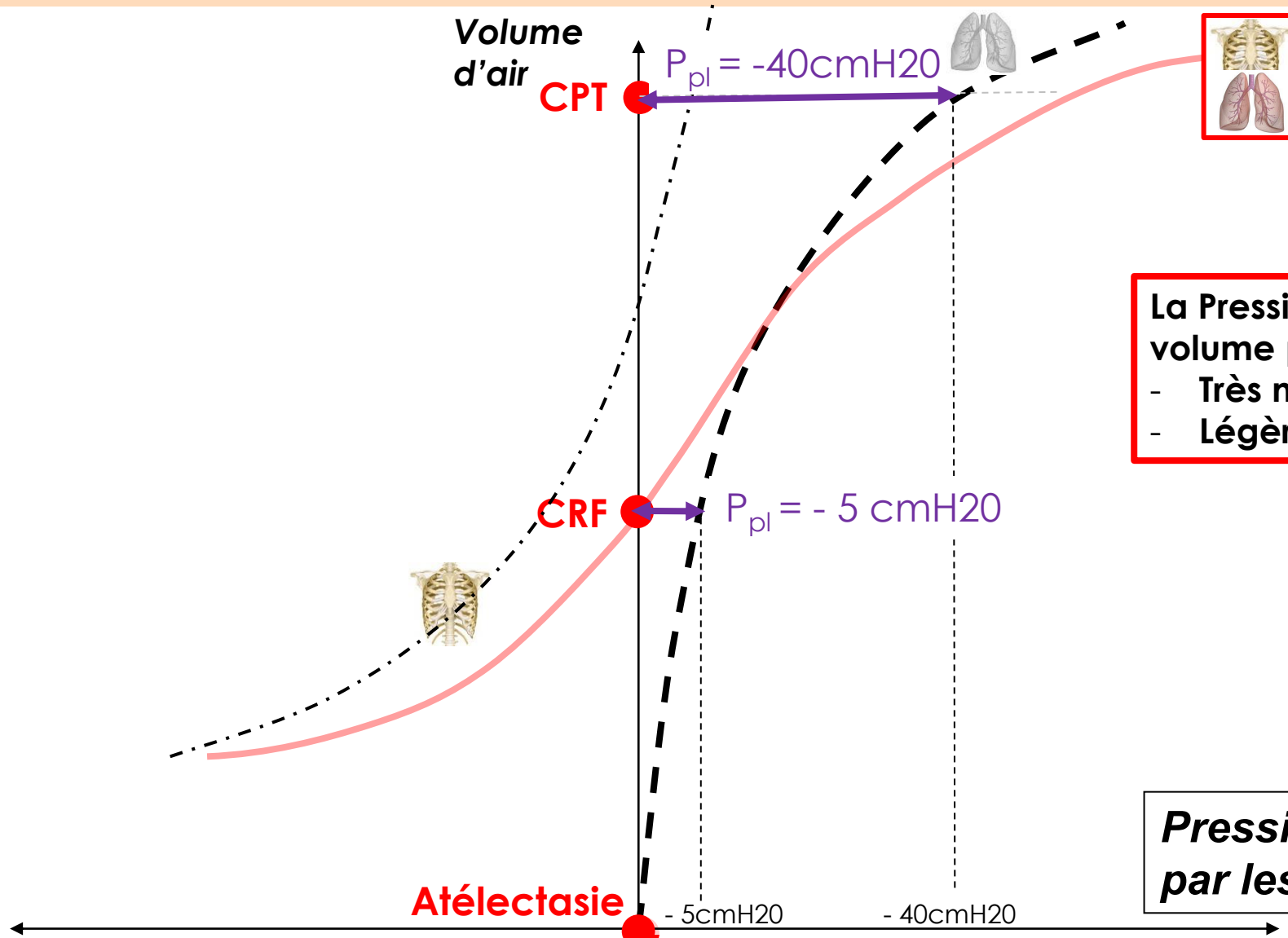


# Les pressions intra-thoraciques

# La pression intra-pleurale

- La pression intra-pleurale est la pression dans la cavité pleurale, une cavité quasi virtuelle car collabée en situation physiologique, ne contenant que quelques ml de liquide qui joue un rôle de lubrifiant.
- Pour des raisons de simplification, on considère souvent qu'elle est égale dans le haut et le bas du thorax, ce qui en réalité n'est pas le cas, au vu du poids du poumon et de la gravité.
  - Ex : à la CRF : pression moyenne – 5 cmH<sub>2</sub>O ( -10 cmH<sub>2</sub>O aux apex ; - 2.5 cmH<sub>2</sub>O aux bases)
- En statique (mesure de la  $P_{PL}$  pour une position donnée statique de la cage thoracique, sans aucun débit d'air), la pression intra-pleurale est **déterminée uniquement par la force de rétraction du poumon**, qui génère une force de « suction ». La  $P_{PL}$  peut donc se lire sur la courbe Pression-Volume du poumon.

# Pression intra-pleurale statique : rôle du volume pulmonaire

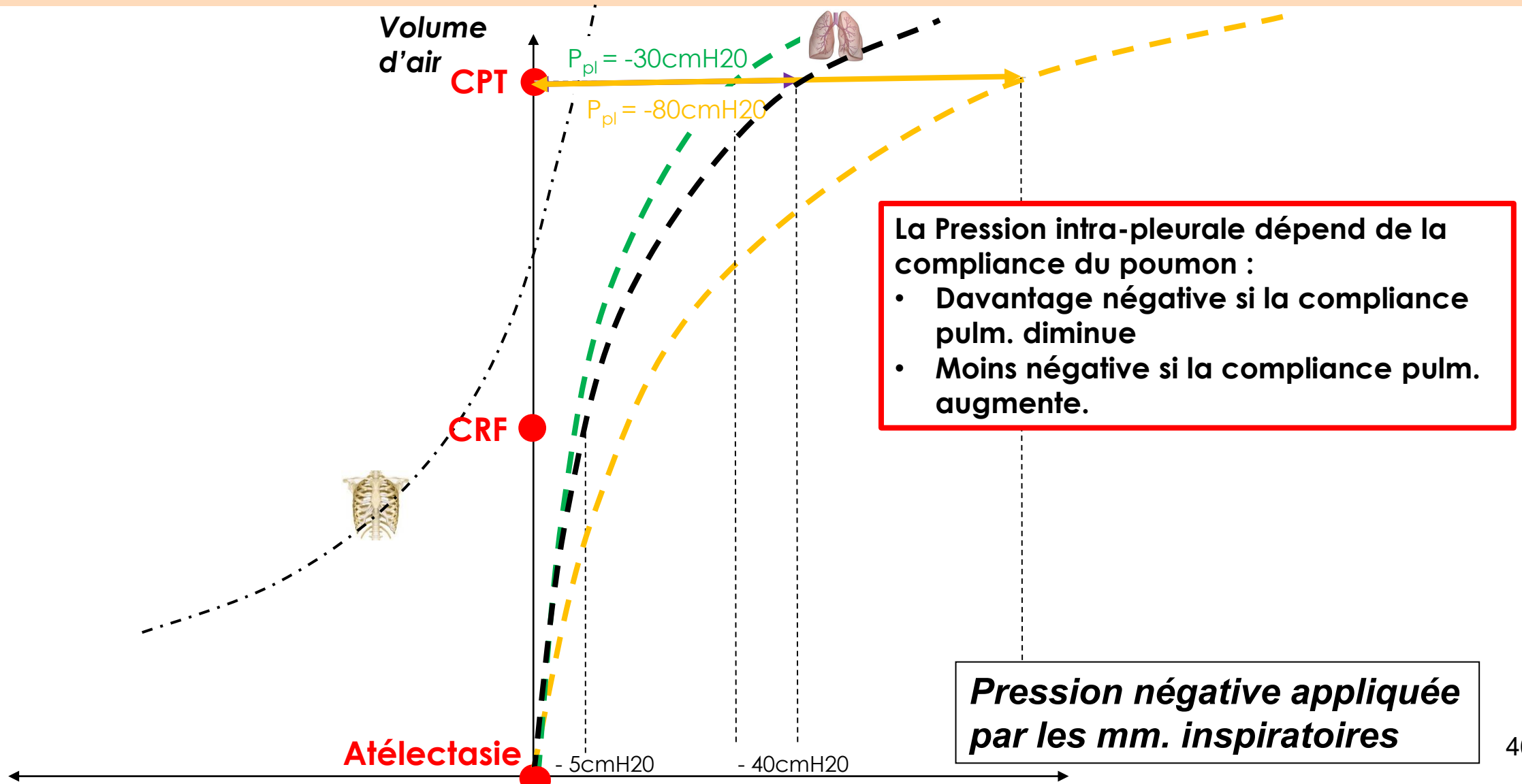


La Pression intra-pleurale dépend du volume pulmonaire :

- Très négative proche de la CPT
- Légèrement négative proche du VR

*Pression négative appliquée par les mm. inspiratoires*

# Pression intra-pleurale statique : rôle de la compliance pulm.



# Impact de la pression intra-pleurale

- La pression intra-pleurale se répartit dans les milieux non rigides, y compris l'interstice pulmonaire et les tissus péribronchiques et péri-vasculaire. Elle détermine donc la pression transmurale de ces structures.
- Ceci explique que le diamètre des bronches est plus élevé vers la CPT, car la Pression pleurale y est très négative (ex : - 40 cmH<sub>2</sub>), ce qui génère une pression transbronchique importante qui dilate les bronches.
- Si la pression intra-pleurale (donc interstitielle) reste constamment très négative (ex : compliance pulmonaire diminuée), la pression transmurale augmentée des petits vaisseaux sanguins peut favoriser une extravasation de liquide et un œdème pulmonaire.

# L'essentiel en bref

- La capacité résiduelle fonctionnelle est le point d'équilibre du système poumon-thorax, où les forces de rappel élastique opposées du poumon et du thorax sont identiques et s'annulent.
- La compliance du système poumon-thorax est haute aux environs de la CRF et basse à grand ou petit volume pulmonaire.
- La capacité pulmonaire totale est déterminée par la force des muscles inspiratoires et par la compliance du poumon et du thorax.
- La pression intra-pleurale en situation statique et glotte ouverte est uniquement déterminée par la force de rappel élastique du poumon. Elle est très négative à haut volume et faiblement négative à bas volume.
- La pression intra-pleurale se répartit dans l'interstice pulmonaire et le tissu péri-bronchique et péri-vasculaire, participant à maintenir ces structures ouvertes.

# Sources

- West - Physiologie respiratoire - 2e Ed - 2022
- West - Pulmonary pathophysiology - 10th. Ed - 2022
- Conti F - Fisiologia medica vol. 2 (2<sup>nd</sup> Edition) – 2010
- Polycopié de Pierre Haab - 2000
- Leff & Schumacker – Respiratory Physiology: Basics and Applications

Rem : Certaines images et parties de graphiques ont été repris des cours des précédents enseignants (F. Lador, M. Pons), avec mes remerciements