

# Mécanique ventilatoire

Démarrer le module

## Objectifs

- Citer les muscles ventilatoires responsables de l'inspiration et de l'expiration
- Déterminer les trois composantes de l'équation de Newton
- Décrire la fonction du surfactant
- Citer les volumes pulmonaires mobilisables et non mobilisables
- Décrire les facteurs qui régissent les résistances des bronches à l'écoulement de l'air

# Introduction

La mécanique ventilatoire est l'ensemble des phénomènes qui permettent ou s'opposent au renouvellement de l'air des alvéoles.

# **I-Cycle respiratoire**

**Introduction**

**A-Muscles respiratoires**

**B-Pressions mises en jeu et production du débit aérien**

**C-Inspiration**

**D-Expiration**

**Conclusion**

# Introduction

L'air entre dans les poumons(inspiration) et en sort(expiration) au cours de la ventilation .

L'inspiration suivie de l'expiration constitue le cycle respiratoire.

Il est le résultat des différences de pression entre l'atmosphère et les alvéoles, différences dont le sens s'inverse périodiquement sous l'effet de l'activité cyclique des muscles respiratoires.

La durée d'un cycle respiratoire est d'environ 04 à 05 secondes ce qui correspond à une fréquence respiratoire de 12 à 15 cycles/min chez l'homme au repos.

## A-Muscles respiratoires

En respiration calme, l'inspiration provoque l'augmentation du volume de la cage thoracique et l'expiration est le simple retour au volume de base.

La contraction des muscles inspiratoires principaux est responsable de l'augmentation du volume de la cage thoracique au cours de l'inspiration et l'expiration est due au relâchement des muscles inspiratoires.

### Remarque

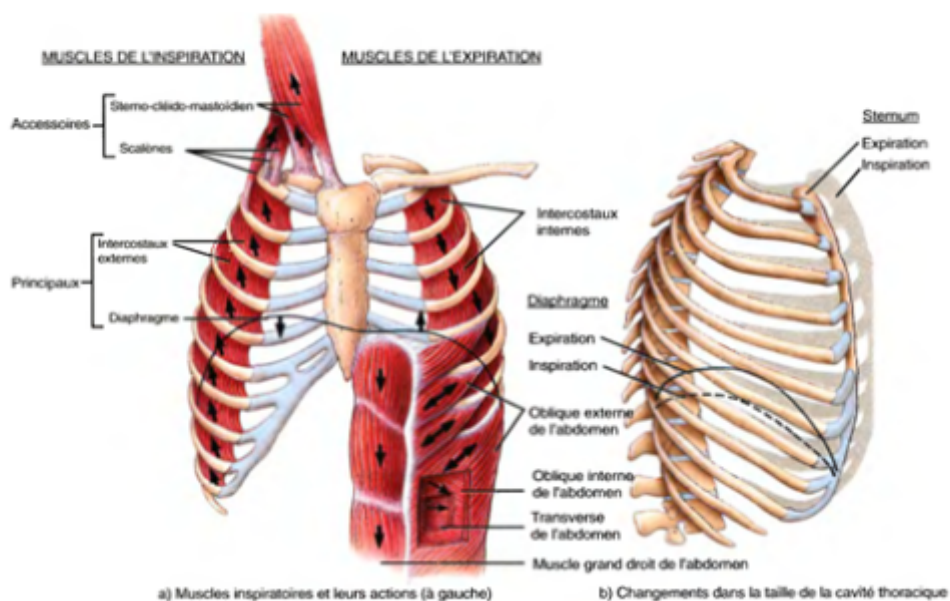
Au cours de la respiration calme, l'expiration est normalement un phénomène passif dû à la rétraction élastique du poumon alors que l'inspiration est un phénomène actif due à une contraction musculaire coûteuse en énergie.

### Complément

L'Inspiration plus profonde résulte d'une plus forte contraction du diaphragme et des muscles intercostaux externes et; de la contraction des muscles inspiratoires accessoires situés dans le cou qui tire sur le sternum et les deux premières côtes vers le haut et augmente le volume de la partie haute de la cage thoracique : augmentation supplémentaire du volume de la cage thoracique et donc des poumons.

Au cours d'une expiration forcée, pour dégonfler les poumons davantage et plus vite que pendant la ventilation calme (exemple de l'exercice physique) l'expiration devient active : contraction des muscles expiratoires (muscles de la paroi abdominale et muscles intercostaux internes) : réduction additionnelle du volume de la cage thoracique et des poumons

### Muscles respiratoires



## B-Pressions mises en jeu et production du débit aérien

### 1- Pression atmosphérique (barométrique)

La pression atmosphérique ( $P_{atm}$ ) est la pression exercée par le poids de l'air de l'atmosphère sur les objets situés à la surface de la terre. Au niveau de la mer elle est égale à 760 mm Hg, elle diminue avec l'altitude.

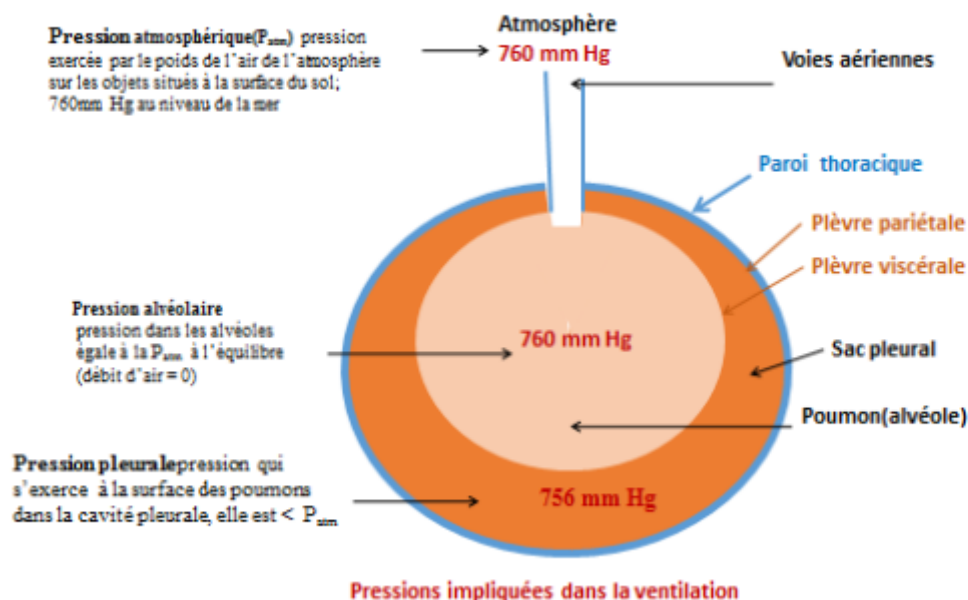
### 2-Pression alvéolaire : pression du gaz contenu dans les alvéoles.

Comme les alvéoles communiquent avec l'atmosphère par les voies aériennes, il y a écoulement de gaz chaque fois que la pression alvéolaire ( $P_{alv}$ ) diffère de la pression atmosphérique ( $P_{atm}$ ). L'écoulement continue jusqu'à ce que les deux pressions s'équilibrent (deviennent égales).

### 3- Pression pleurale ( $P_{pl}$ ) : pression dans la cavité pleurale

C'est la pression exercée sur la surface des poumons à l'intérieur de la cage thoracique.

En général, elle est plus basse que la ( $P_{atm}$ ), égale à 756 mmHg au repos ( $P^\circ$  absolue) correspondant à une pression relative, rapportée à la  $P_{atm}$  normale de 760 mmHg, égale à -4 mmHg.



Les poumons et la cage thoracique sont étroitement accolés sous l'action d'une pression transmurale : la pression transpulmonaire ( $P_{tp}$ ).

Au repos :

$$P_{tp} = P_{alv} - P_{pl}$$

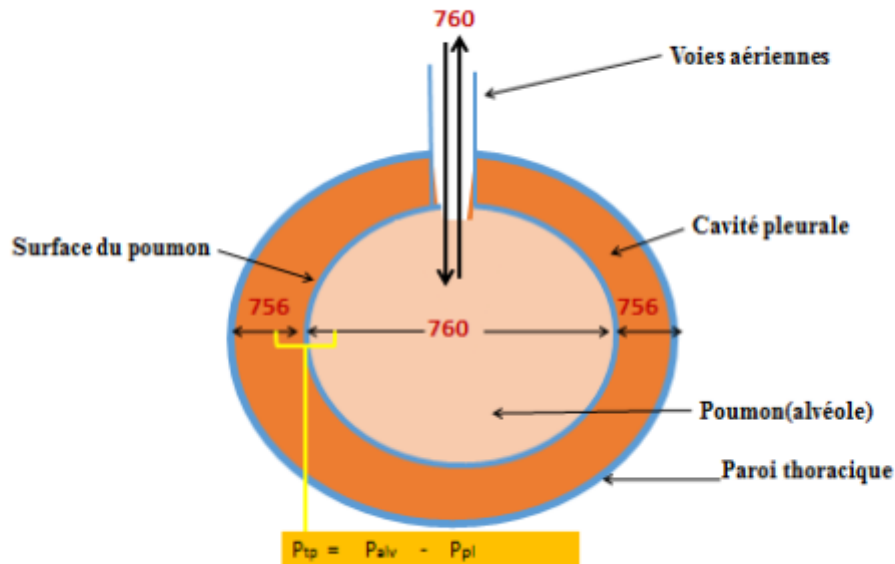
$$P_{tp} = 760 - 756$$

$P_{tp} = 4 \text{ mm Hg}$

-la  $P_{alv}$  de 760mmHg tend à gonfler le poumon (pousse vers l'extérieur);

-la  $P_{pl}$  de 756mmHg tend à le comprimer (pousse vers l'intérieur);

-la différence de pression transpulmonaire) résultante de 4mmHg en poussant vers l'extérieur sur les poumons les distend jusqu'à ce qu'ils remplissent la cage thoracique.



**Différence de pression transmurale: pression transpulmonaire** (les nombres sont les pressions exprimées en mm Hg)

## 4-Production du débit aérien

- Puisque l'air s'écoule de manière passive sous l'effet d'une différence de pressions, d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression il faut que :
  - la  $P_{alv} < P_{atm}$  pour qu'il pénètre dans les poumons pendant l'inspiration ;
  - la  $P_{alv} > P_{atm}$  pour que l'air s'écoule hors des poumons pendant l'expiration.
- La  $P_{alv}$  varie en fonction du volume des poumon.Ce dernier est le résultat d'une activité cyclique des muscles respiratoires.
- La  $P_{alv}$  varie en accord avec la loi de Boyle-Mariotte.

### Loi de Boyle-Mariotte.

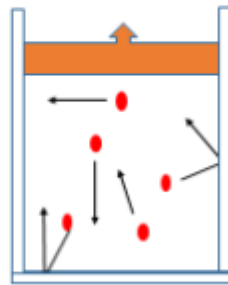
### *Rappel*

La pression du gaz diminue proportionnellement à l'augmentation du volume dans lequel il se trouve et, inversement augmente proportionnellement à la diminution de volume.

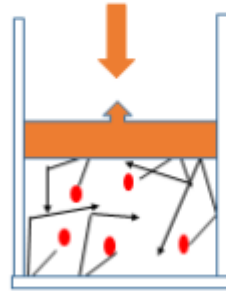


**Loi de Boyle-Mariotte:**  $P_1 V_1 = P_2 V_2$

suppose que la température et le nombre de molécules de gaz demeurent constants



$V_1 = 1\text{L}$   
 $P_1 = 100\text{ mmHg}$



$V_2 = 0,5\text{ L}$   
 $P_2 = 200\text{ mmHg}$

Quand le volume diminue, les collisions et la pression augmentent.

## C-Inspiration

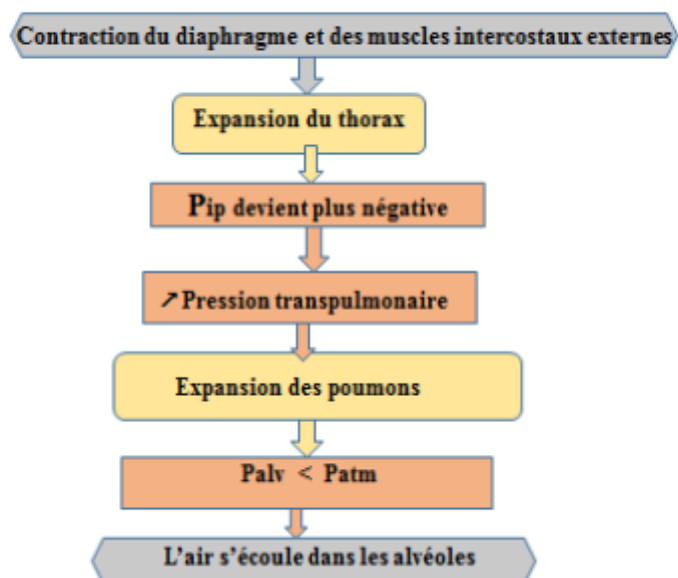
Avant le début de l'inspiration, l'appareil respiratoire est au repos. Il est en apnée ou en condition statique, les voies aériennes sont ouvertes, donc en communication avec l'atmosphère :

-  $P_{alv} = P_{atm}$

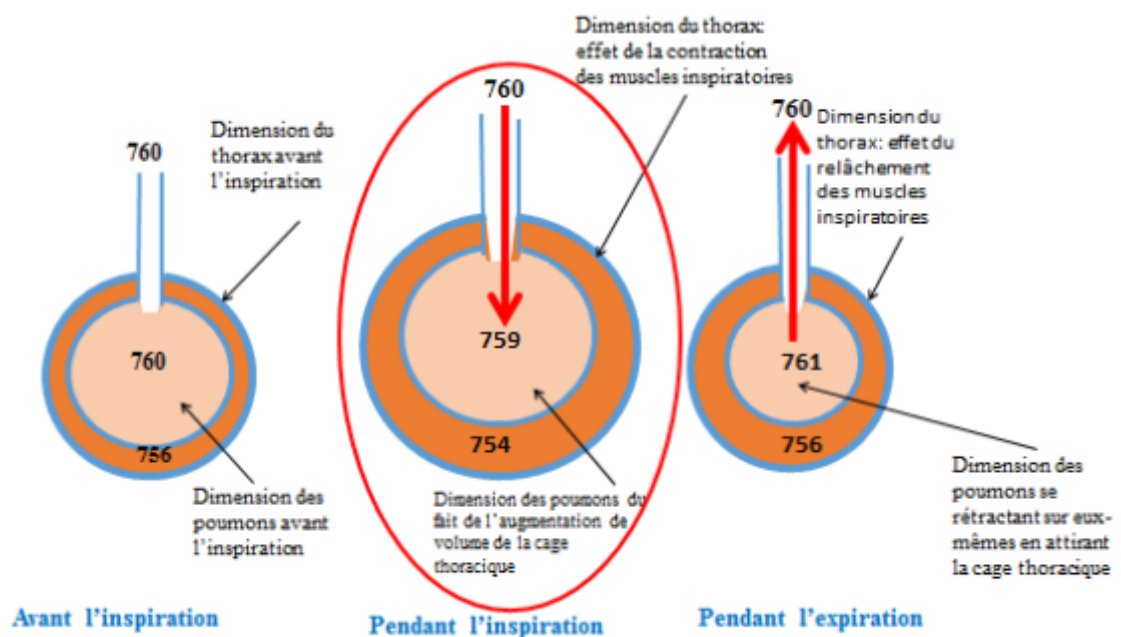
- pas d'écoulement d'air.

Au début de l'inspiration (respiration calme), le diaphragme et muscles intercostaux externes sont stimulés et se contractent.

### Séquence d'évènements au cours de l'inspiration



L'écoulement de l'air continue jusqu'à ce que  $P_{alv} = P_{atm}$ .

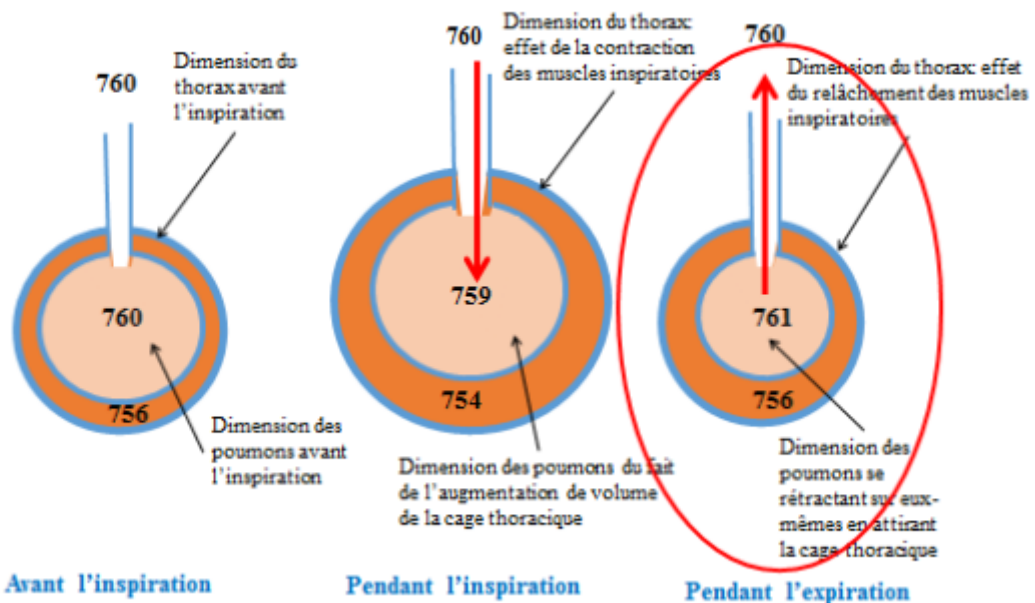
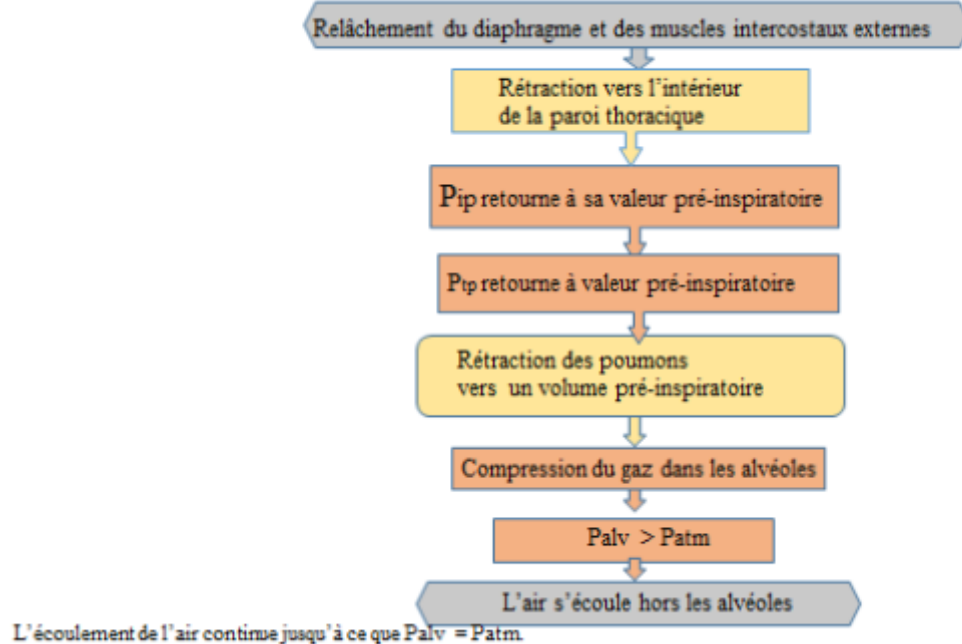


Modification du volume pulmonaire et de la pression alvéolaire durant le cycle respiratoire

## D-Expiration

Il y a relâchement des muscles inspiratoires à la fin de l'inspiration

### Séquence d'évènements au cours de l'expiration



Modification du volume pulmonaire et de la pression alvéolaire durant le cycle respiratoire

## Conclusion

Au total, la contraction musculaire est responsable du déplacement de la cage thoracique et donc, des variations de la  $P_{alv}$ , ce qui permet une ventilation pulmonaire normale. Pour ce faire, la contraction musculaire doit s'opposer aux propriétés mécaniques du poumon:

## **II-Notion de systèmes mécaniques actif et passif**

**Introduction**

**1- Forces en présence**

**2- Relation forces motrices et résistantes:**

# Introduction

Le système ventilatoire désigne l'ensemble des structures qui assurent la ventilation. C'est-à-dire le renouvellement de l'air. Ces structures peuvent être schématiquement regroupées en deux ensembles :

l'un actif : les muscles ventilatoires;

l'autre passif :

- les voies aériennes ;
- les poumons ;
- la paroi thoracoabdominale .

# 1- Forces en présence

La force motrice de l'inspiration est la contraction des muscles inspiratoires qui permet l'augmentation des trois diamètres du système respiratoire.

Ces muscles ont dû lutter contre des forces résistantes:

- l'élasticité du système thoracopulmonaire qu'il fallu étirer;
- l'écoulement de l'air dans les voies aériennes;
- le frottement des tissus sur eux-mêmes provoquent;
- l'inertie du système: puisque le système était au repos

L'expiration normale est la conséquence du retour élastique et passif du système respiratoire sur lui-même.

Ce qui précédemment était une force résistante, la rétraction élastique du système respiratoire, devient une force motrice, celle-ci va lutter contre les résistances des voies aériennes, plus importantes à l'expiration qu'à l'inspiration.

## 2- Relation forces motrices et résistantes:

La relation entre les forces motrices et résistantes peut être exprimée par l'équation du mouvement de Newton appliqué à un système en trois dimensions, qui dit que la pression totale appliquée au système doit être égale à la somme des produits de l'élastance totale par le volume, la résistance totale par le débit et de l'inertie par l'accélération :

$$P_{tot} = E_{tot} \times V + R_{tot} \times Q + I \times A$$

L'inertie est négligeable, ce qui permet de supprimer le dernier terme et l'équation simplifiée :

$$P_{tot} = E_{tot} \times V + R_{tot} \times Q$$

$E_{tot} \times V$  : propriétés élastiques (propriétés statiques)

$R_{tot} \times Q$  : propriétés résistives (propriétés dynamiques)



# III- Propriétés élastiques de l'appareil respiratoire

Introduction

A-Relation pression- volume et notion de compliance

B-Mise en évidence de l'élasticité de l'appareil pulmonaire

C-Facteurs de l'élasticité de l'appareil respiratoire

# Introduction

En l'absence de mouvements respiratoires, c'est-à-dire en condition statique, l'équation de Newton se simplifie :

$$P_{\text{tot}} = E_{\text{tot}} \times V$$

Il s'agit d'étudier les propriétés élastiques.

## A-Relation pression- volume et notion de compliance

Considérant l'équation de newton en condition statique, l'élastance du système respiratoire ou de ses composantes, la paroi thoracique et le poumon, est égale au rapport pression(motrice) sur volume(mobilisé)

$$(E_{\text{tot}}) = P_{\text{tot}} / V \rightarrow E = P / V$$

En fait, on ne mesure pas l'élastance, on lui préfère son inverse la compliance:

$$\text{Compliance} = 1/\text{élastance} : C = 1/E = V/P$$

En d'autres termes, on mesure la quantité d'air qui pénètre dans le poumon pour une variation de pression. La compliance est donc une mesure de la distensibilité du système respiratoire.

### Compliance du système respiratoire

Le système poumon-cage thoracique sont des structures élastiques solidaires l'une de l'autre.

La contraction des muscles inspiratoires → l'étirement de la cage thoracique → étirement des poumons.

L'étirement ou la compression d'une structure élastique → une pression qui tend à ramener la structure à son état initial (volume de relaxation ou de repos).

A l'intérieur d'une structure élastique (poumon, cage thoracique, association poumon cage thoracique ou autre):

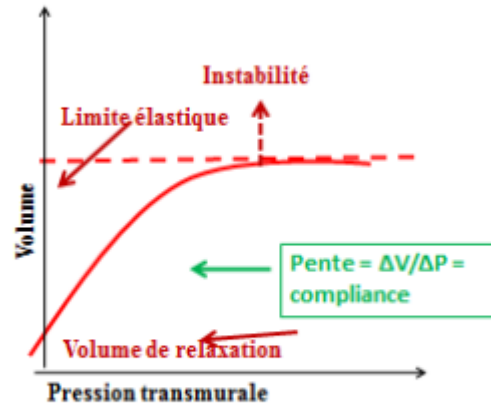
- le volume est directement proportionnel à la différence de pression de part et d'autre de la paroi ( $\Delta P$ );

-  $\Delta P$  s'appelle pression transmurale ou pression de distension pariétale, plus elle augmente plus elle va distendre la structure.

On peut caractériser une structure élastique par la courbe pression transmurale – volume (voir courbe)

## Notion de compliance

- On peut caractériser une structure élastique par la courbe **pression transmurale – volume**
- Structures biologiques: volume de relaxation  $\neq 0$ .
- **Pente de la courbe  $\Delta V/\Delta P =$  compliance.**
- La compliance caractérise la distensibilité de la structure.
- Plus la compliance est grande, plus la structure est distensible.



## *Remarque*

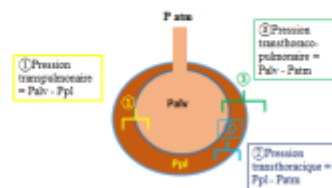
On peut calculer la courbe pression-volume, la compliance du:

- poumon uniquement;
- thorax uniquement;
- système thoracopulmonaire.

Tout dépend de la pression transmurale considérée.

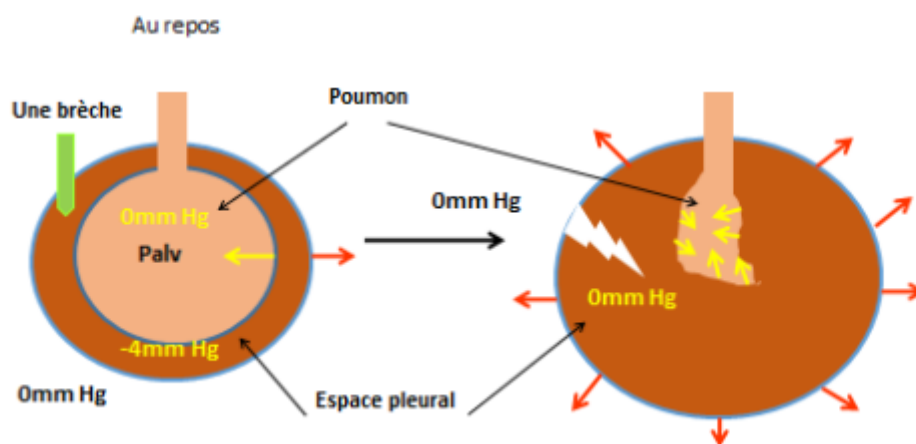
Si on veut calculer la courbe pression-volume et la compliance pulmonaire on prend la pression transmurale qui s'applique sur le poumon càd  $P_{alv} - P_{pl}$  (pression transpulmonaire).

Les principales pressions transmursales du système thoracopulmonaires:



## B-Mise en évidence de l'élasticité de l'appareil pulmonaire

### Mise en évidence de l'élasticité de l'appareil respiratoire



## C-Facteurs de l'élasticité de l'appareil respiratoire

Les facteurs de l'élasticité de la cage thoracique sont les facteurs anatomiques : la cage thoracique est composée d'un squelette ostéocartilagineux, de muscles et de ligaments qui vont conférer à la cage thoracique des propriétés élastiques.

Les facteurs de l'élasticité du poumon :

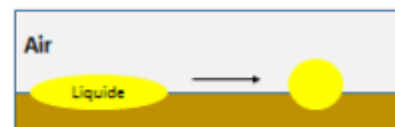
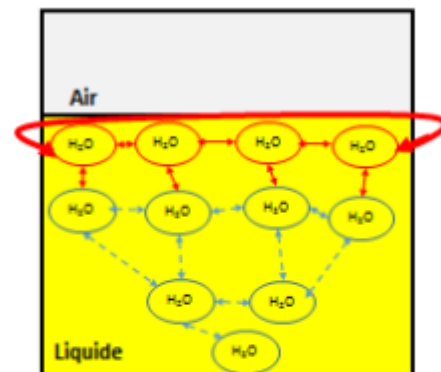
- facteurs histologiques:
  - un interstitium riche en fibres élastiques;
  - une structure alvéolaire avec un contenu liquidien
- facteur physicochimique: responsable d'une tension superficielle qui elle-même va créer des forces élastiques

### 1-Tension de surface alvéolaire ou tension de surface des interfaces air-eau au sein des alvéoles

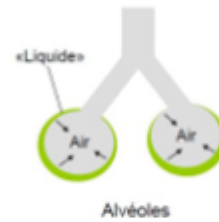
Les alvéoles sont des sacs d'air tapissés d'une surface hydrique. Il y a un contact entre l'air et le liquide

#### Tension de surface d'un liquide

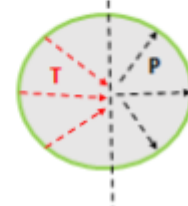
- Dans un liquide: les molécules d'eau qui sont en profondeur sont soumises à des forces d'attraction aléatoires qui s'annulent.
- A l'interface air/liquide: les molécules d'eau sont attirées préférentiellement:
  - les unes vers les autres;
  - vers l'intérieur
- Conséquences: l'interface air/liquide se rétracte pour atteindre une surface minimum
- Exemple: un peu de liquide sur une surface plane tend à prendre une forme de goutte sphérique pour laquelle l'interface air/liquide a une surface minimale.
- La tension superficielle(T) est la force superficielle de contraction d'un liquide grâce à laquelle la surface air/liquide tend à être la plus réduite possible.



## Tension de surface alvéolaire



- Dans les alvéoles, pour minimiser l'interface air-liquide, la tension superficielle tend à collapser les alvéoles et à les faire se ratatiner sur eux-mêmes. La tension de surface est élevée
- Dans une sphère élastique distensible (alvéole), l'équilibre est atteint lorsque la pression de distension  $P = 2T/r$  (loi de Laplace):
  - $r$  = rayon de la sphère(alvéole)
  - $T$  = tension de surface
  - La sphère garde son intégrité.



### Remarque

Ainsi , l'expansion pulmonaire nécessite de l'énergie pour :

- étirer le tissu conjonctif;
- surmonter la tension de surface de la couche d'eau tapissant les alvéoles

## 2-Tension de surface et surfactant

En fait, la tension de surface de l'eau pure est si élevée que si les alvéoles n'étaient tapissés que d'eau pure, l'expansion pulmonaire nécessiterait un effort musculaire épuisable et les poumons tendraient à se collapser.

Il est donc essentiel que les cellules alvéolaires de type II sécrètent une substance ayant des propriétés de détergent, appelée surfactant(surface active agent) qui diminue notamment les forces de cohésion entre les molécules d'eau à la surface alvéolaire.

#### Caractéristiques du surfactant

1-Le surfactant pulmonaire est un mélange de phospholipides et de protéines

2-II est sécrété par les pneumocytes de type II

3-II abaisse la tension de surface de la couche de liquide à la surface des alvéoles, ce qui augmente la compliance pulmonaire, facilitant ainsi l'expansion pulmonaire

4-Son effet le plus marqué dans les petits alvéoles, ce qui diminue la tension de surface de ces derniers de façon plus importante que dans les alvéoles plus grands. Cela stabilise les alvéoles

5-Une respiration profonde augmente sa sécrétion par étirement des pneumocytes de type II. Sa concentration diminue quand la respiration est superficielle

6-II est produit en fin de grossesse dans le poumon fœtal



## **IV- Propriétés résistives de l'appareil respiratoire**

**Introduction**

**A-Principes généraux**

**B-Résistances des voies aériennes**

**C-Influence de certains facteurs sur la résistance des voies aériennes**

# Introduction

Pendant la ventilation en condition dynamique (quand le débit aérien se produit), l'activité des muscles respiratoires doit vaincre :

- l'élasticité pulmonaire;
- la résistance au passage de l'air qui comprend :

- les frottements du tissu pulmonaire que l'on distend;

- les résistances des voies aériennes (VA) qui correspondent à la résistance au passage de l'air

# A-Principes généraux

1-Ecoulement dans un système de conduction bronchique:

Les paramètres d'écoulement de l'air :

-la pression: gradient de pression( $P_{alv} - P_{atm}$ ) → débit d'air;

-le débit: quantité d'air qui circule dans les VA/unité de temps;

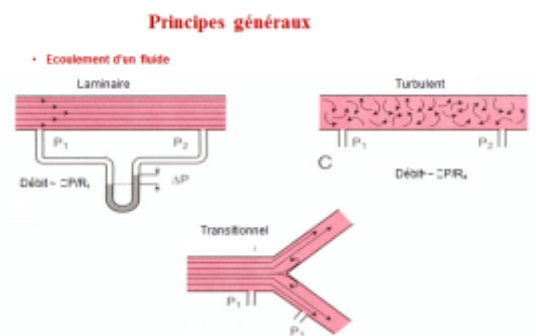
-la résistance: difficulté à laquelle l'air se heurte pour circuler entre 2 points des VA s/l'action d'une  $\Delta P$

2-Différents types d'écoulement :

-écoulement laminaire: déplacement ordonné en parallèle aux parois du conduit;

-écoulement turbulent: déplacement aléatoire;

-écoulement transitionnel: les 2 types d'écoulement au sein du même conduit et surtout à l'embranchement (bifurcation) du conduit aérien(la plupart de l'arbre bronchique)



En périphérie, dans les bronchioles terminales, l'écoulement est laminaire.

Dans la trachée: écoulement turbulent vrai, surtout à l'exercice.

En considérant que l'écoulement est transitionnel (proche de la réalité) :  $\Delta P = R_1 Q + R_2 Q^2$

En considérant que l'écoulement laminaire(approximation en pneumologie) :  $\Delta P = R_1 Q$  ; Situation où on peut appliquer la loi de Poiseuille.

## Loi de Poiseuille

## Définition

$\Delta P$ (entre deux points d'un conduit) =  $R Q$

$Q = \frac{P_2 - P_1}{R}$  et  $R = \frac{8 \eta L}{\pi r^4}$

$\eta$  = viscosité de l'air

$L$  = longueur du conduit

$r$  = rayon de chaque conduit

## Remarque

Le rayon de chaque conduit peut être modifié.

Les déterminants du  $Q$  d'air qui va s'écouler dans l'arbre bronchique sont

-  $\Delta P$ (entre deux points d'un conduit)

- rayon du conduit

## B-Résistances des voies aériennes

En respiration nasale, chez un sujet normal au repos :

- les VA extrathoraciques : plus grande résistance au passage de l'air, (50%) des résistances totales ;
- la trachée et grosses bronches : 2ème site de résistance (40%) ;
- les G7 à G23 (10%)

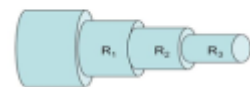
1- Résistance des VAS à l'inspiration et pendant le sommeil :

- grippe → œdème → ↓ Ø du conduit nasal → ↑ R ;
- sommeil → ↓ Ø du pharynx .

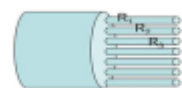
2- Résistance des VA inférieures : R ↑ à l'expiration  
→ intérêt dans les situations pathologiques → troubles ventilatoires obstructifs (asthme- bronchite)

### Résistances pulmonaires

- \* Les voies aériennes dont le diamètre est inférieur à 2 mm ne contribuent que 10% à la  $R_{VA}$ 
  - La diminution du calibre est compensée par
    - l'augmentation ++ de la surface de section totale
    - le faible débit aérien
  - On estime que les résistances sont en parallèle et non plus en série:  $1/R_{tot} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$



Résistance en série



Résistance en parallèle

## **C-Influence de certains facteurs sur la résistance des voies aériennes**

Le muscle lisse des parois des bronchioles est extrêmement sensible aux commandes motrices et à certains produits chimiques :

-l'inhalation d'agents irritants→ réflexe du système nerveux parasympathique →contraction des bronchioles ;

- l'histamine et d'autres substances inflammatoires sécrétées lors d'une crise d'asthme aigue → bronchoconstriction

-l'adrénaline libérée à la suite de l'activation du système nerveux sympathique ou administrée à des fins thérapeutiques dilate les bronchioles et réduit la résistance;

Les accumulations locales de mucus, les matières infectieuses et les tumeurs obstruant les conduits aériens constituent des sources majeurs de résistance dans les maladies respiratoires

# V-Volumes et capacités pulmonaires

Introduction

[sans titre]

# Introduction

Volumes et capacités respiratoires pour un jeune adulte mâle de corpulence moyenne		
Mesure	Valeur habituelle	Définition
<b>Volumes respiratoires</b>		
1-Volume courant ( $VT^*$ )	500 ml	Quantité d'air inhalée ou expirée lors d'une respiration calme
2-Volume de réserve inspiratoire(VRI)	3000 ml	Quantité d'air pouvant être inspirée avec effort maximal en sus d'une inspiration courante
3-Volume de réserve expiratoire(VRE)	1200 ml	Quantité d'air pouvant être expirée avec un effort maximal en sus d'une expiration courante
4-Volume résiduel(VR)	1200 ml	Quantité d'air restant dans les poumons après une expiration maximale
<b>Capacités pulmonaires</b>		
5-Capacité vitale (CV)	4800 ml	Quantité d'air pouvant être expirée avec un effort inspiratoire maximal $= VT + VRI + VRE$
6-Capacité inspiratoire (CI)	3500 ml	Quantité maximale d'air pouvant être inspirée après une expiration courante $= VT + VRI$
7-Capacité résiduelle fonctionnelle(CRF)	2400 ml	Quantité d'air restant dans les poumons après une expiration courante $VR + VRE$
8-Capacité pulmonaire totale (CPT)	6000 ml	Quantité maximale d'air que les poumons peuvent contenir $VR + CV$

A l'exception du VR, de la CPT et de CRF, toutes les grandeurs citées ci-dessus peuvent être mesurées à l'aide d'un spiromètre.

Un spiromètre est une cloche remplie d'air baignant dans une enceinte remplie d'eau.

La cloche monte et descend quand le sujet, qui respire à travers un embout buccal par une tubulure débouchant dans la cloche, expire et inspire, respectivement.

L'enregistrement correspondant est appelé spirogramme.

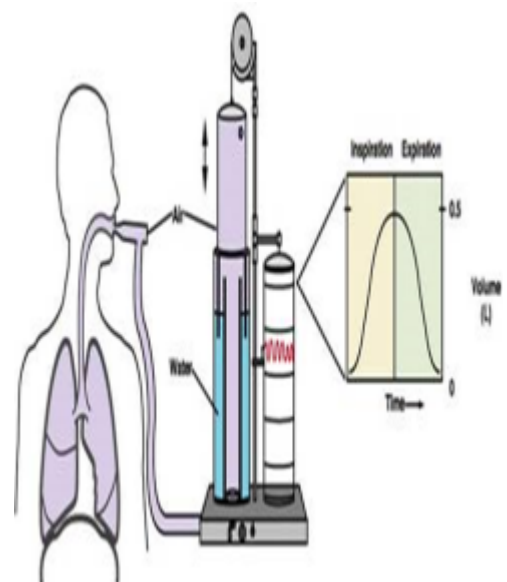
La plume, reliée à la cloche par un fil inextensible passant sur une poulie, monte quand la cloche baisse à l'inspiration et descend quand elle monte à l'expiration.

Les déplacements de la plume et la vitesse de rotation du tambour sont étalonnés en volume et temps, respectivement.

Une variante de la CV est la détermination du volume expiratoire maximal seconde(VEMS) qui est le volume de gaz expiré pendant la toute première seconde d'une expiration maximale à partir d'une inspiration maximale.

Il est normalement de 75 à 80% de la(CV) ; le rapport VEMS/CV est le coefficient de Tiffeneau.

La mesure de la CV et du VEMS est appelée épreuve fonctionnelle respiratoire.



## **VI-Espace mort et les différences de ventilation:**

### **Définitions**



## Définitions

La ventilation pulmonaire ou ventilation minute ou débit d'air est le volume d'air inspiré et expiré en une minute :

Ventilation pulmonaire = volume courant (VT) X fréquence respiratoire (ml/mn) (cycles/mn)

Fréquence respiratoire = nombre de cycles par minute qui est en moyenne de 12 à 16 cycles/mn chez un adulte au repos.

Espace mort anatomique:

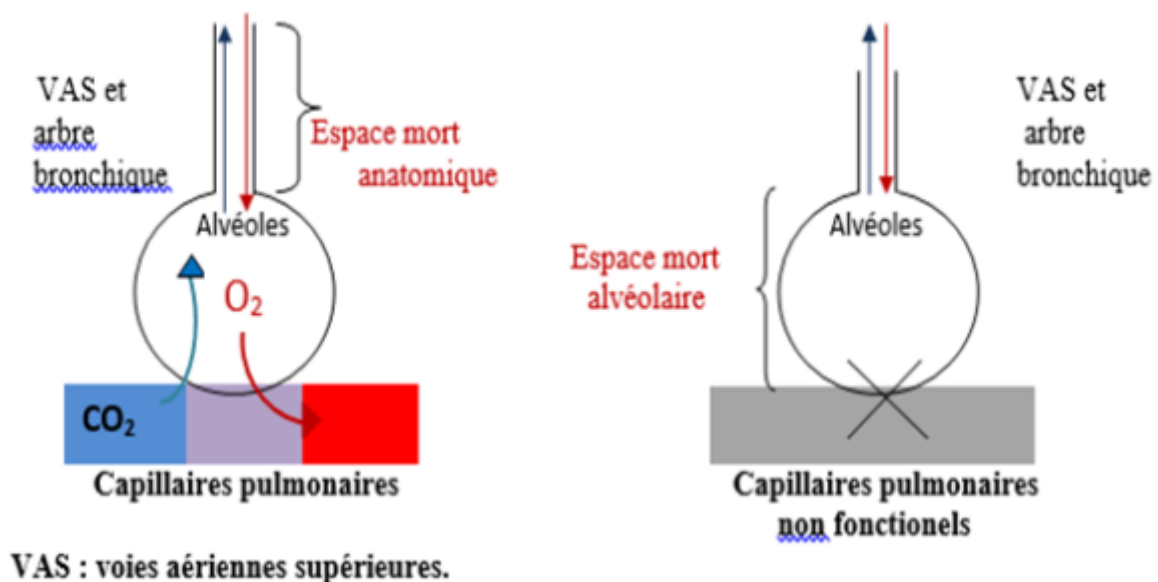
Tout l'air inspiré n'arrive pas jusqu'aux alvéoles; une partie reste dans les voies aériennes de conduction qui ne participent pas aux échanges gazeux. Ce volume d'air est de 150 ml chez l'adulte normal ; c'est l'espace mort anatomique .

Espace mort alvéolaire

L'air atmosphérique entre dans les alvéoles et participe aux échanges d'O<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub> avec le sang des capillaires pulmonaires. Cependant certains alvéoles ventilés ne sont pas perfusés par du sang et ne participent pas aux échanges gazeux et constituent l'espace mort alvéolaire.

La somme des deux espaces morts (anatomique et alvéolaire) correspond à l'espace mort physiologique ou total.

La ventilation alvéolaire est le volume d'air échangé par minute entre les alvéoles et l'atmosphère :



Chez le sujet normal, l'espace mort alvéolaire est négligeable. Dans ce cas, l'espace mort physiologique est à égal à l'espace mort anatomique.

## Conclusion

Le premier échange en physiologie respiratoire est la ventilation, le flux net d'air entre l'atmosphère et les alvéoles. Comme le flux sanguin, le flux d'air nécessite une pompe pour créer une différence de pression et il rencontre des résistances qui sont principalement dues aux changements de diamètre des conduits dans lesquels il s'écoule. Les propriétés mécaniques des sacs pleuraux et la force de rétraction élastique de la paroi thoracique et des poumons sont essentielles pour la respiration normale.