

Université Constantine3  
Faculté de médecine de Constantine

## Physiologie de l'appareil respiratoire Mécanique Ventilatoire

Pr BOUGRIDA MOHAMED  
Chef de service de physiologie et des explorations  
fonctionnelles CHU Constantine

1

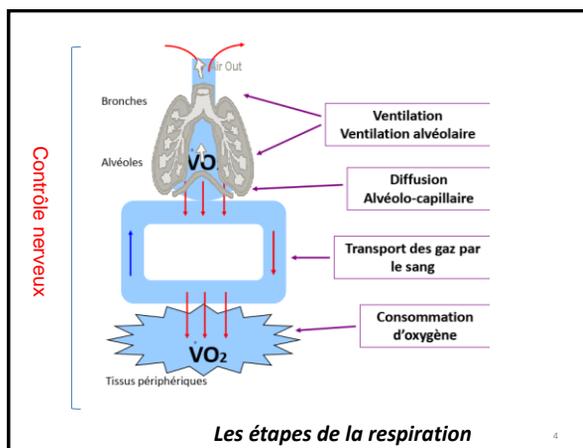
### I- Introduction à la physiologie respiratoire

- 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

2

- 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

3



4

### 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.

5

#### • 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.

6

### L'hématose:

- Les échanges alvéolo-capillaire
- Intégrité de la membrane alvéolo-capillaire
- Cet échange se fait grâce aux différences des pressions partielles de l'O<sub>2</sub> et le CO<sub>2</sub> à travers la membrane
- Un bon équilibre entre la ventilation et la perfusion dans les alvéoles pulmonaires
- Un rapport ventilation perfusion optimal

7

## 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**

8

## A. Définition de la mécanique ventilatoire

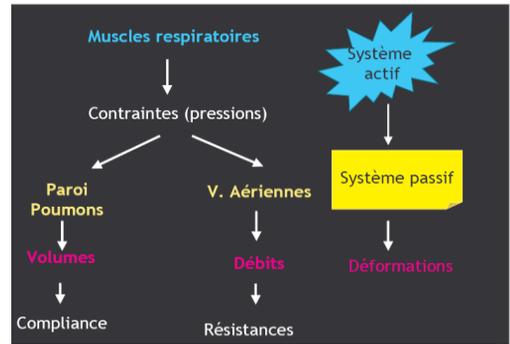
Étude des forces qui permettent ou qui s'opposent au renouvellement de l'air alvéolaire.

### Elle comprend deux systèmes

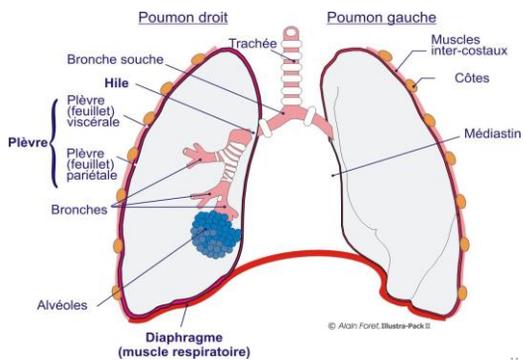
- système actif : *muscles ventilatoires*
- système passif : poumon , bronches ,plèvre ...

9

## Mécanique ventilatoire



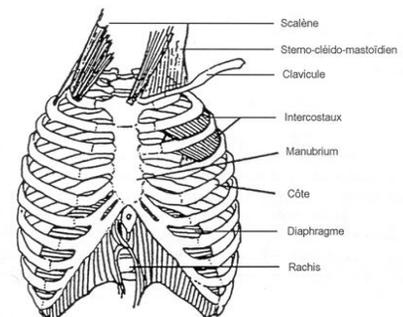
## B- Appareil ventilatoire



11

## 1- Système passif :

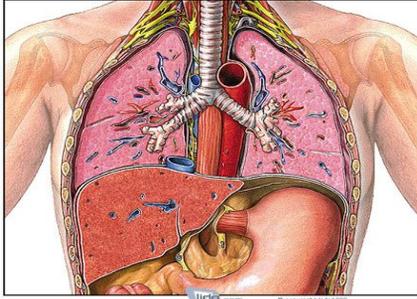
### ► Charpente osseuse



12

### 1- Système passif :

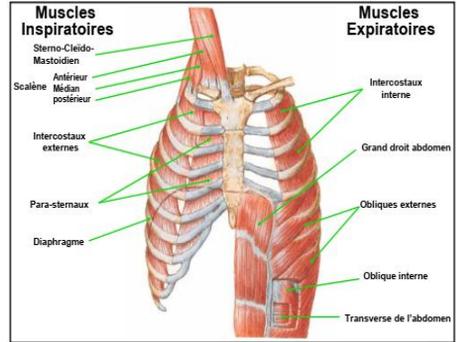
► Poumon et voies aériennes



Poumons, plèvre, les bronches.....

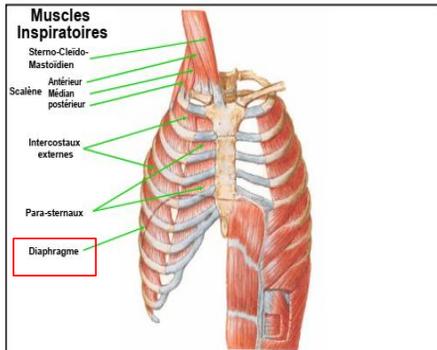
13

### 2- Système actif = muscles ventilatoires



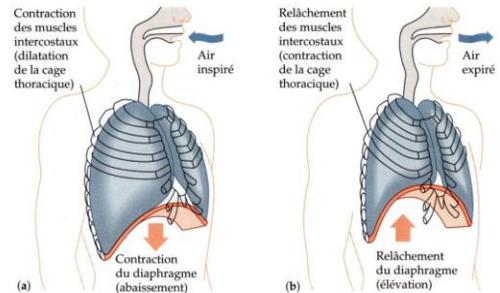
14

### 2-a- Muscles inspiratoires



15

### 2-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

16

### Le diaphragme est un muscle endurant

2 type de fibres musculaires

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**

17

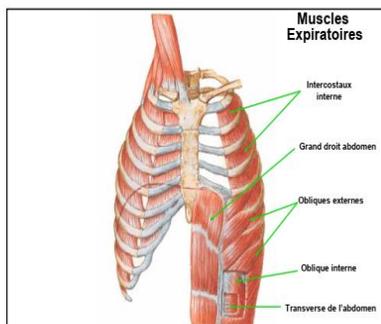
### 2-a-2- Muscles inspiratoires accessoires



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

18

### 2-b- Muscles expiratoires



19

### 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

20

### 3- Cycle ventilatoire

Pression x Volume = Cte  
 Hautes pressions → Basses pressions

**Inspiration = contraction diaphragmatique**

21

### 3- Cycle ventilatoire

22

### Cycle ventilatoire

**Expiration = contraction des abdominaux, relâchement du diaphragme**

23

### Cycle ventilatoire

Inspiration

Expiration

**Synthèse**

24

### Cycle ventilatoire

**Inspiration**                      **Expiration**

Le cycle ventilatoire. Lors de l'inspiration, le volume alvéolaire augmente, ce qui entraîne ( $P_V = ct$ ) 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.

### 4 - Propriétés mécaniques de l'appareil ventilatoire

#### 4. Relation forces motrices et résistantes

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

- Equation de Newton dans les conditions statiques :

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

### 1- Conditions statiques

#### Les volumes pulmonaires

| Capacité                       | Volume |
|--------------------------------|--------|
| Capacité pulmonaire totale     | 6L     |
| Capacité résiduelle            | 1.5L   |
| Capacité vitale                | 4.5L   |
| Volume de Réserve Inspiratoire | 2.5L   |
| Volume Courant                 | 0.5L   |
| Volume de Réserve Expiratoire  | 1.5L   |
| Volume Résiduel                | 1.5L   |

### Les volumes pulmonaires mobilisables et non mobilisables

- Volumes pulmonaires statiques et positions d'équilibre.

**Volumes pulmonaires statiques 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.

29

## Compliance pulmonaire

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

30

## Compliance pulmonaire 1

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

31

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.

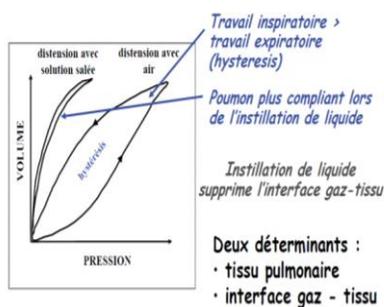
Si on gonfle le poumon avec du sérum physiologique (eau salé), il faut, pour un volume donné, mettre moins de pression pour gonfler et dégonfler le poumon que si on gonflait le poumon avec de l'air. Il est donc plus facile de gonfler un poumon avec de l'eau salé plutôt que de l'air.

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

32

### Déterminants de la compliance pulmonaire



33

### au tissu pulmonaire:

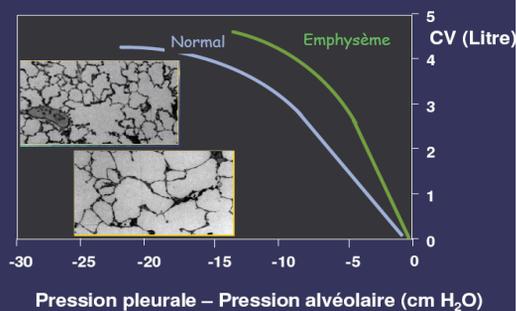
Dans le tissu pulmonaire on retrouve des éléments cellulaires, et une matrice extra-cellulaire qui comprend de l'élastine (qui donne l'élasticité du poumon) et du collagène fibrillaire (qui donne la limite de distensibilité du poumon pour que ça ne casse pas).

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 donc plus de volume et tel que la fibrose qui donne une accumulation de collagène. Ces deux maladies vont donc modifier la compliance du poumon.

34

### Compliance pulmonaire 2

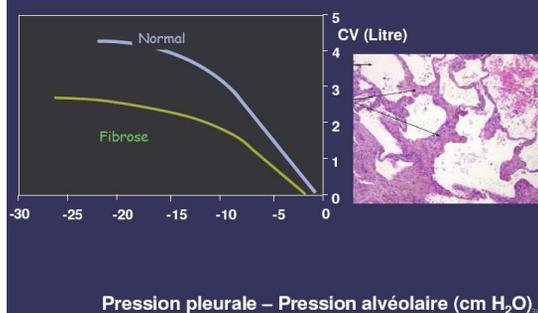
#### Modifications de la compliance pulmonaire



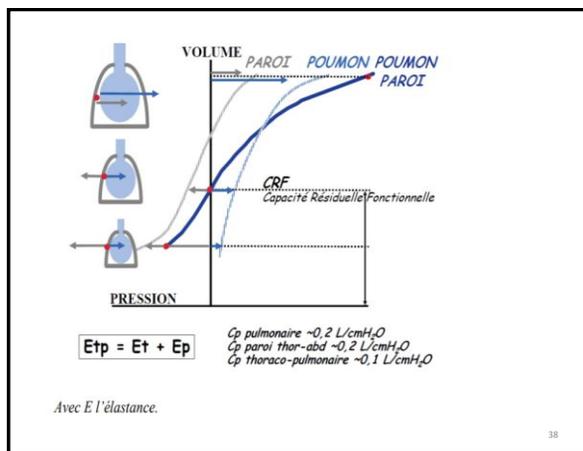
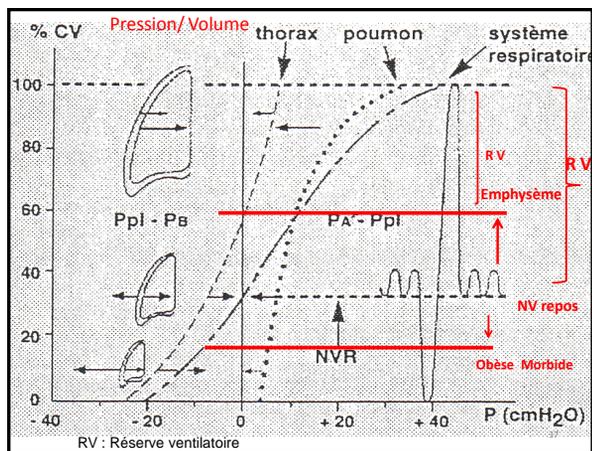
35

### Compliance pulmonaire 3

#### Modifications de la compliance pulmonaire



36

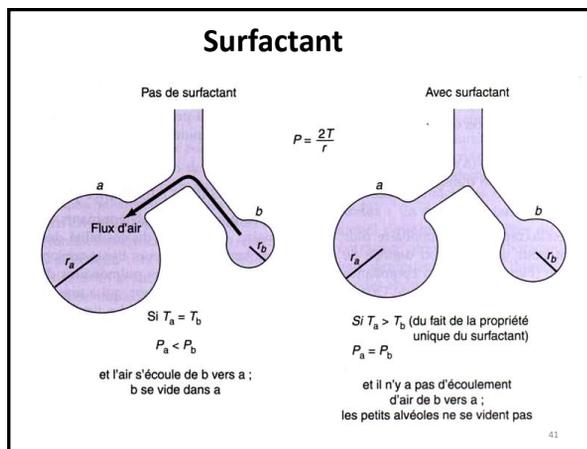


| CRF = Capacité résiduelle fonctionnelle  | CPT=Capacité pulmonaire totale   | VR=Volume résiduel  |
|--|--|---|
| C'est le volume à la fin d'une expiration calme. Il y a un équilibre car le poumon tire vers le bas (il souhaite avoir un volume de 0L et exerce donc une pression de rétraction élastique pulmonaire) et la paroi tire vers le haut pour rejoindre son volume de relaxation. S'il y a une rupture d'équilibre, le poumon va se rétracter et la paroi se distendre, c'est le pneumothorax. | C'est le volume à la fin d'une inspiration forcée et donc le maximum de gaz que peut contenir le poumon. 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. | C'est le volume à la fin de l'expiration forcée. C'est le volume qui reste dans le poumon quand on a tenté de le vider au maximum. Le poumon tire légèrement vers le bas car il est proche de son volume de relaxation (de 0L). 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. |

une diminution de la CPT peut créer des troubles restrictifs |

**à l'interface gaz-tissu.**

- A l'interface gaz-tissu il existe une tension superficielle qui est une force à la surface d'un liquide qui exprime que les interactions entre molécules de liquides sont supérieures aux interactions entre un liquide et un gaz.
- Ceci explique notamment le phénomène de la goutte d'eau. Dans le tissu respiratoire, l'eau du tissu est autour du gaz alvéolaire et donc cette interface va créer une pression à l'intérieur des alvéoles qui dépend du rayon des alvéoles (d'après la loi de Laplace) et de la tension superficielle.
- 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).



□ **Rôle du surfactant :**

- Diminuer la tension superficielle et donc d'augmenter la compliance pulmonaire ce qui permet une économie d'énergie pour la respiration en diminuant le travail respiratoire.
- Permet la coexistence d'alvéoles de tailles différentes.

-En effet, normalement, d'après la loi de Laplace, la différence de rayon des alvéoles devrait entraîner une pression différente et donc des mouvements de gaz entre alvéoles. Mais grâce au surfactant ce n'est pas le cas.

- Il participe ainsi à la stabilisation alvéolaire c'est à dire qu'il adapte la tension de surface à la taille alvéolaire.

42

### Rôles du surfactant

- Stabilité alvéolaire
- ↑ compliance pulmonaire : ↓ Travail ventilatoire
- Maintient de l'espace alvéolaire à sec

43

### 2- conditions dynamiques

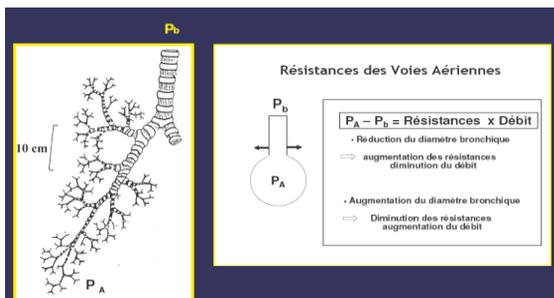
- Écoulement du gaz dans un tube :

- 1- le débit est inversement proportionnel à la résistance
- 2- le débit est proportionnel à la surface de section
- 3- la résistance est 1/ proportionnelle à la S2 de section

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

44

## Résistance des voies respiratoires



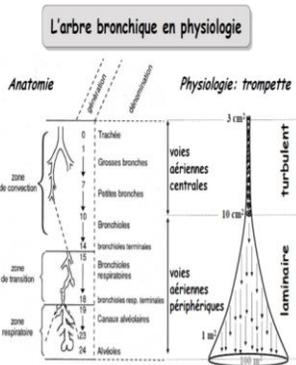
Cet arbre bronchique va être responsable d'une certaine résistance, exprimée en cm d'H<sub>2</sub>O, qui va dépendre de la différence de pression et du débit :

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

( cmH<sub>2</sub>O / (L/s) )

- La géométrie/calibre et donc de la section totale des voies aériennes.
- Des conditions d'écoulements des gaz. Si l'écoulement est laminaire, c'est donc moins résistant que si l'écoulement est turbulent.
- Dans un écoulement turbulent, il y a beaucoup de forces de friction qui vont diminuer le débit et donc augmenter la perte de charge et la résistance.

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.



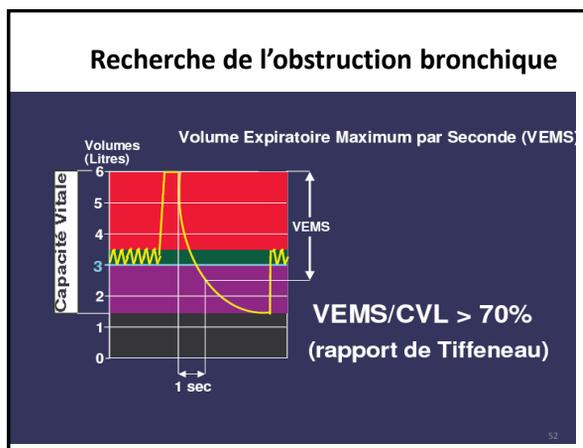
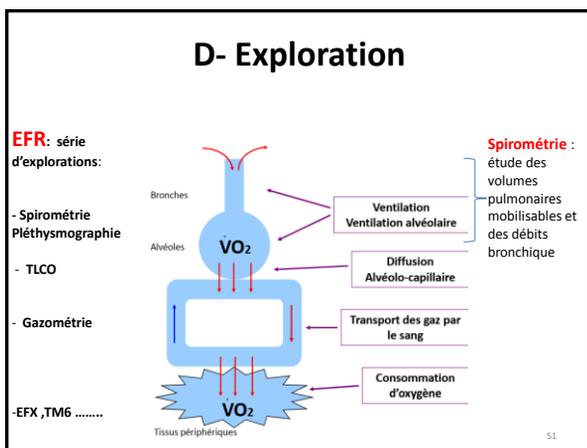
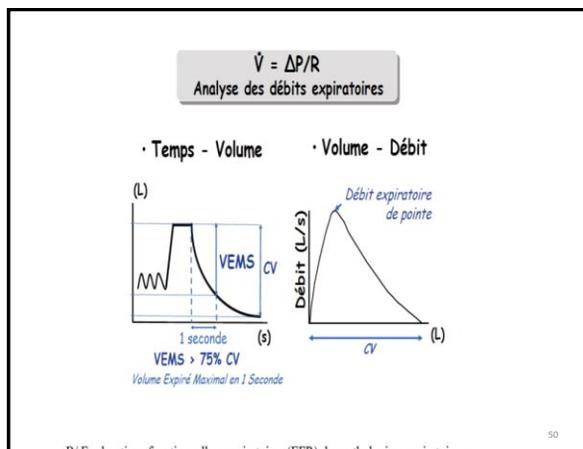
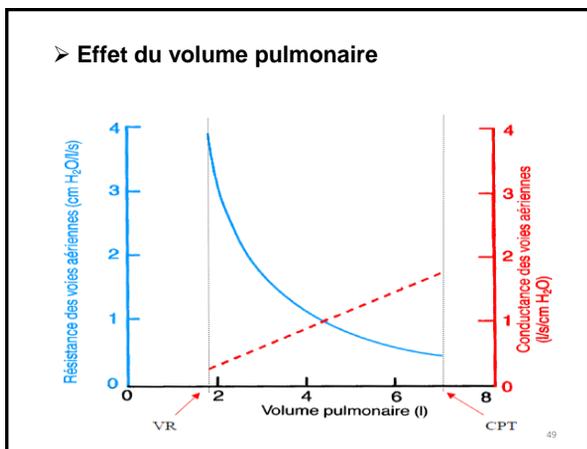
Résistance des voies aériennes centrales > Résistance des voies aériennes périphériques.

➤ 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

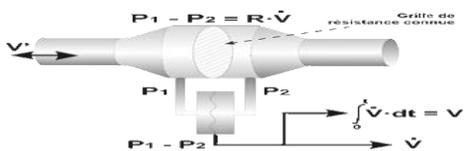
Facteurs modifiants les résistances des VA :

- Viscosité et densité des gaz
- Gaz plus visqueux
- Augmentation de la pression du gaz



► Le pneumotachographe de type Lilly : résistance = Grille

Calibration quotidienne



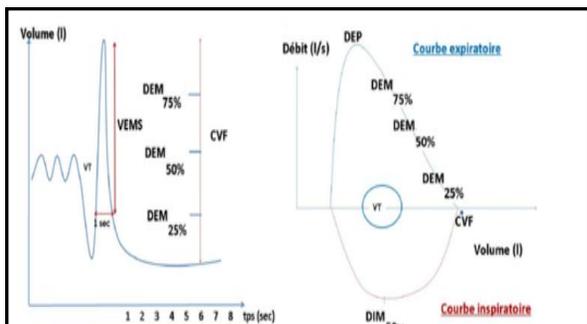
53

Manœuvres

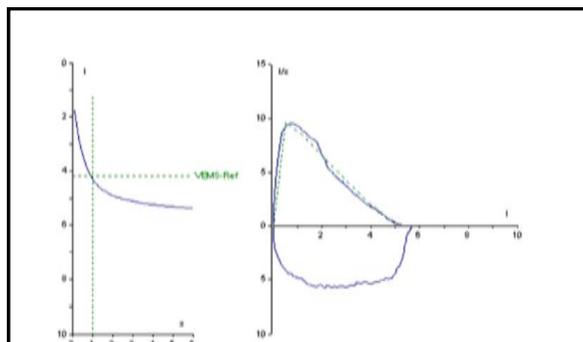
► Les tests effectués en position debout sont similaires à la position assise



54



55



56

## Les maladies pulmonaires obstructives

- Obstruction des voies aériennes intrathoraciques

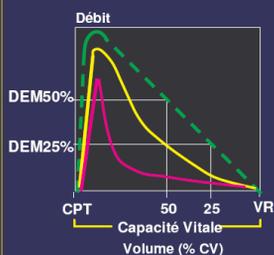
### Asthme

### 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

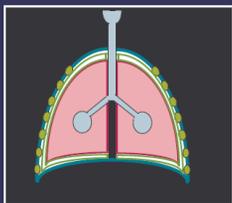
- Limitations des mouvements du thorax
- Obésité

### 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<sup>ème</sup> 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