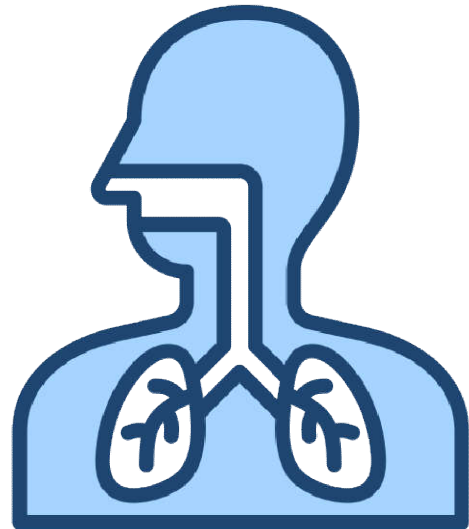


Physiologie respiratoire

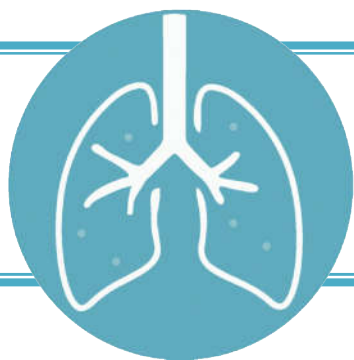
Pr Nahid Zaghba

Supports et cartes mentales basés sur les diapos du professeur

- Anatomie fonctionnelle
- Ventilation
- Fonctions du poumon
- Diffusion alvéolo-capillaire
- Transport des gaz
- Syndromes respiratoires
- Contrôle de respiration



Réalisé par Filali Mohamed



Les supports

Introduction à la physiologie respiratoire

Introduction

- La vie de la cellule nécessite de l'énergie
- Cette énergie est produite dans les mitochondries:
 - consommation d'oxygène (O₂)
 - production du dioxyde de carbone (CO₂)

• C'est la respiration cellulaire

La respiration: Ensemble des phénomènes qui concourent à assurer les échanges gazeux entre le milieu extérieur et la cellule vivante, Nécessite le déroulement de plusieurs étapes

Anatomie de l'appareil respiratoire

I - La cage thoracique

- En avant : **le sternum**
- En arrière : **la colonne vertébrale**
- En bas : **le diaphragme**
 - Cloison musculo membraneuse dont la périphérie s'insère sur le bord inféro-interne de la cage thoracique
- Latéralement: **les côtes**
 - Constituent les parois de la cage thoracique; s'articulent en arrière avec le rachis



II - Les voies aériennes

A. Les voies aériennes supérieures(VAS)

- Fosses nasales, cavité buccale, //- Pharynx, épiglotte, //- Larynx

B. Les voies aériennes inférieures (VAI)

■ Zone de conduction et transition

- Trachée//- Bronches//- Bronchioles terminales//- Bronchioles respiratoires

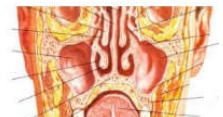
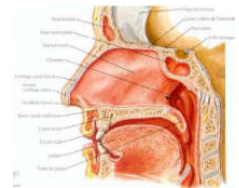
■ Zone respiratoire (d'échange)

- Canaux et sacs alvéolaires

A. Voies aériennes supérieures:

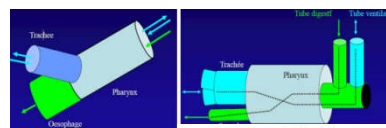
1. Les fosses nasales

- **Muqueuse respiratoire:**
 - Très vascularisée
 - Contient des cellules à mucus et des cellules ciliées
- **Muqueuse olfactive:**
 - Contient des cellules du nerf olfactif
- **Nombreux replis de la muqueuse :**
 - Augmentent la surface d'échange, mais gêne l'écoulement d'air



2. Le pharynx :

- Conduit musculomembraneux collabable
- Carrefour aéro-digestif
- Innervation sensitivomotrice riche: paires

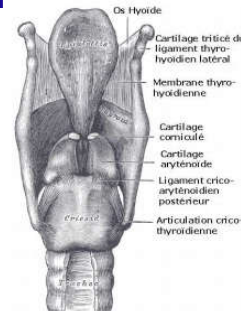


crâniennes (V,IX,X,XII)

- Carrefour aéro-digestif

3. Le larynx

- Conduit ostéo-cartilagineux rigide
- Comprend:
 - L'os hyoïde
 - Les cartilages (cricoïde, thyroïdien, aryténoïde, épiglotte)
 - Les structures musculotendineuses



B. Voies aériennes Inférieures:

- 1 - Zone de conduction:** - Trachée/ - Bronches principales droites et gauches/ - Bronches lobaires et segmentaires/ - Bronchioles terminales
- 2 - Zone de transition:** - Bronchioles respiratoires
- 3 - Zone respiratoire:** - Conduits alvéolaires/ - Sacs alvéolaires

Zone de conduction :

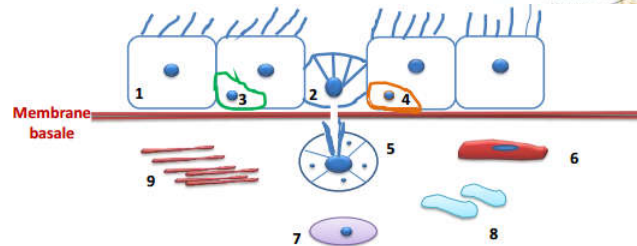
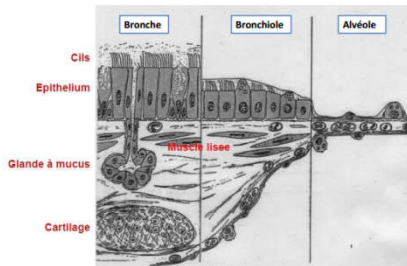
→ Trachée et arbre bronchique

- Epithélium respiratoire/ - Cellules musculaires lisses/ - Fibres élastiques/ - Cartilage/ - Tissu lymphoïde
- La trachée est plus riche en **cartilage** qu'en muscles
- Les bronches sont plus riches en **muscles** qu'en cartilage

Zone de conduction :

Les plaques de cartilage diminuent progressivement de la trachée aux bronchioles où elles sont absentes

Les fibres musculaires lisses sont abondantes dans les bronchioles et persistent au niveau des bronchioles respiratoires



- 1- Cellules ciliées
- 2- Cellules Caliciformes
- 3- Cellules basales
- 4- Cellules Kulchitsky
- 5- Glandes séreuses
- 6 - Capillaire
- 7 - Lymphocyte
- 8 - Cartilage
- 9 - Muscle lisse

Zone de transition :

→ Bronchioles respiratoires (BR)

- A partir de la 17ème subdivision
- De la bronchiole respiratoire de 1er ordre jusqu'à la bronchiole respiratoire terminale
- Petits conduits de 1 mm
- Paroi présente un petit nombre d'alvéoles
- Pas d'échanges gazeux
- Se divisent pour produire 1 million de conduits alvéolaires

→ Bronchioles respiratoires terminales → Alvéoles

Bronchioles : paroi musculaire lisse, pas de cartilages

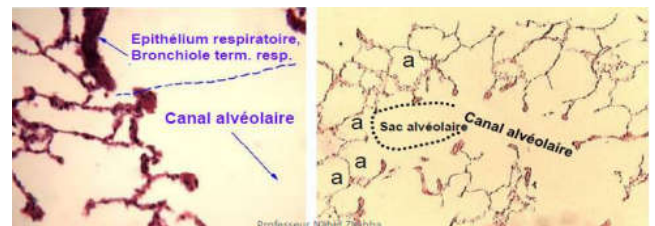
Alvéoles : petits sacs recouverts de capillaires, Lieu de l'oxygénation du sang

Interface sang-air → Echanges gazeux entre le sang et l'air

Zone d'échange (zone respiratoire)

→ Canaux et sacs alvéolaires:

- Les canaux alvéolaires donnent naissance aux sacs alvéolaires
- Chaque bronchiole terminale donne naissance à 6 générations de canaux et de sacs alvéolaires avec un total de 300 à 400 alvéoles



III - Le parenchyme pulmonaire

- **Voies de conduction terminales (d'échange)**: canaux alvéolaires (CA)
- **Alvéoles** (A)
- **Vaisseaux pulmonaires**: artérioles pulmonaires (AP)
- **Espaces interalvéolaires**: septum (S) (les septa)

A. Les alvéoles:

- Nombre:

- 300 à 400 millions d'alvéoles dans le poumon humain

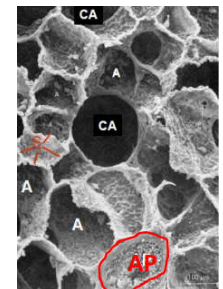
- Surface:

- La surface alvéolaire totale qui est en contact avec les capillaires est de 80 à 100 m² (75m²)
- Lieu des échanges gazeux

- Histologie de l'alvéole:

1- Pneumocyte type I (*pneumocyte membraneux*):

- Cellule aplatie, prolongement cytoplasmique très fin///- Cellule fragile///- 95% de la surface alvéolaire///- Echanges rapides



2- Pneumocyte type II:

- Cellule cuboïdale avec des microvillosités///- 3% de la surface alvéolaire

→ **Rôle: Sécrétion du surfactant**

3 - Macrophage alvéolaire:

- Principal système de défense de l'espace alvéolaire
- Phagocyte, digère et transporte les bactéries et les particules étrangères qui arrivent aux alvéoles
- Reste dans l'alvéole (cellule à poussière) ou Éliminé par le tapis muco-ciliaire

Film liquidien endo-alvéolaire

- Film liquidien qui tapisse la face interne de l'alvéole
- Formé de 3 couches:
 - **Glycocalix:** au contact de l'épithélium alvéolaire
 - **Couche acqueuse:** contenant des immunoglobulines
 - **Surfactant :** au contact de l'air alvéolaire

Surfactant

- Mixture complexe de lipides et de protéines sécrétée par les pneumocytes de type II
- Diminue la tension superficielle des liquides qui tapissent la surface des alvéoles
- Les molécules du surfactant sont disséminées entre les molécules d'eau
- Les forces de cohésion entre les molécules de surfactant et d'eau sont très petites de sorte que la tension de surfactant est réduite.
- La diminution de la tension de surface du liquide alvéolaire par le surfactant pulmonaire a 2 conséquences bénéfiques:
 - 1 - Il augmente la compliance des poumons, ce qui réduit le travail nécessaire pour les gonfler
 - 2- Il réduit la tendance des poumons à se rétracter, et par conséquent, s'oppose à leur affaissement

Les 3 rôles principaux du surfactant :

1. Diminution de la tension de surface, ce qui permet :

- Augmentation de la compliance pulmonaire : le poumon est plus distensible
- Economie d'énergie pour le travail pulmonaire

Absence de surfactant = détresse respiratoire

2. Il permet la coexistence d'alvéoles de taille différente :

- Stabilisation alvéolaire
- Adapte la tension de surface à la taille de l'alvéole pour faire en sorte que la pression soit la même partout

3. Il permet aux alvéoles de rester "au sec" :

- Evite la sortie de plasma dans l'alvéole
- Diminue la pression autour des vaisseaux

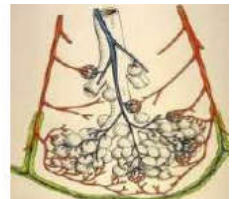
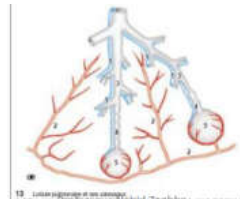
B. Espace inter-alvéolaire:

Squelette conjonctif du poumon

- Parois alvéolaires
- Capillaires
- Fibroblastes, macrophages, lymphocytes
- Fibres de collagène, de réticuline, d'élastine
- Substance interstitielle muco polysaccharidique

Unité respiratoire anatomique: Le lobule pulmonaire

- Forme de pyramide tronquée
- Sommet hilare et base pleurale
- Limité par septas conjonctifs
- Subdivision d'une bronchiole terminale en 3 générations de bronchioles respiratoires



IV - Les muscles respiratoires

A. Les muscles inspiratoires :

1. Le diaphragme:

- Contraction diaphragmatique : - Abaisse les coupoles : **Augmente le diamètre vertical**
- Refoule les côtes inférieures en haut et en dehors (insertions costales) : **Augmente les diamètres horizontaux**

- Augmente la pression intra-abdominale :- Déplace les côtes inférieures vers l'extérieur :

Augmente les diamètres horizontaux

- **Principal** muscle inspiratoire
- 75% de la ventilation
- Déplacement de 1cm mobilise 250 cm³ d'air

2. Les muscles intercostaux externes:

- Leur contraction élève la côte en haut et en dedans (anse de seau)
- Augmentation du diamètre latéral du thorax

3. Les muscles inspiratoires accessoires:

- **Sterno-cleido-mastoidien**: relève le sternum
- **Scalènes**: relèvent les côtes supérieures
- **Pectoraux, trapèze, dentelé**
- Mis en jeu en cas d'inspiration forcée (ventilation ≥ 50 l/mn)
- Sollicités en cas d'insuffisance respiratoire chronique

➤ Inspiration:

- Phénomène **actif** et **automatique**
- Contraction des muscles intercostaux **externes**
- L'air pénètre dans le poumon quand la pression dans les alvéoles est inférieure à la pression atmosphérique
- Le volume de la cage thoracique augmente par contraction des muscles inspiratoires

➤ Expiration:

- Phénomène passif
- Devient actif en cas d'expiration forcée
- Contraction des muscles intercostaux **internes** (anse de seau)
- Diminution du volume du thorax

Muscles inspiratoires	Muscles expiratoires
Principaux: <ul style="list-style-type: none">- Diaphragme- Intercostaux externes	Expiration normale: Phénomène passif (pas d'intervention des muscles)
Accessoires: <ul style="list-style-type: none">- Sterno-cléido-mastoidien- Scalènes,- Trapèze, dentelé	Expiration forcée: <ul style="list-style-type: none">- Muscles intercostaux internes- Muscles de l'abdomen (<i>droit de l'abdomen, oblique interne et externe et le transverse de l'abdomen</i>)

V - La plèvre

La plèvre est une séreuse qui enveloppe le poumon

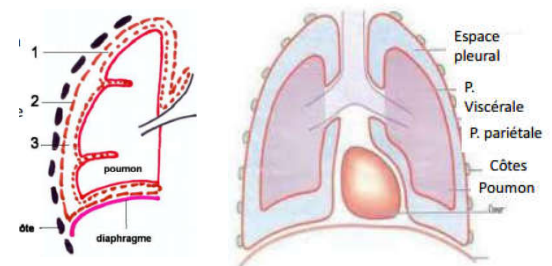
- La plèvre est constituée de:

- **Feuillet viscéral** (1): Recouvre la face externe du poumon

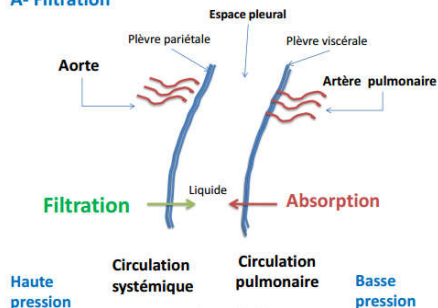
- **Feuillet pariétal** (2): Face interne de la cage thoracique et le médiastin

- **Espace pleural** (3): Entre les deux feuillets

- Espace pleural: virtuel
- Sécrétion de liquide pleural
- Sujet normal: environ 2ml de liquide réparti sur toute la surface de la plèvre
- Réabsorption permanente par les lymphatiques



A- Filtration



B - Absorption:

- 80% du liquide est absorbé par les vaisseaux
- 20% par les lymphocytes pulmonaires
- Equilibre entre filtration et absorption
- Liquide qui reste dans la cavité pleurale permet aux poumons de glisser sur la paroi
- Faciliter la respiration

C- Pressions:

- Pression (cavité pleurale) < Pression atmosphérique
- Pression intra-pulmonaire= Pression atmosph
- Cette pression est suffisante pour distendre les poumons et les maintenir en état de distension permanente à l'intérieur de la cage thoracique
- Les deux feuillets sont soumis à des forces élastiques opposées
- Ils restent accolés grâce à une pression pleurale négative
- Contraction des muscles inspiratoires entraîne une expansion de la cage thoracique
- L'expansion des poumons suit l'expansion thoracique grâce aux plèvres
- En fin d'expiration, les forces élastiques du thorax et du poumon s'équilibrent et la pression pleurale est de -2 à -5 cm H₂O.

La ventilation

- Définition :

- correspond aux phénomènes de déplacement de l'air de l'environnement externe vers les alvéoles et des alvéoles vers l'atmosphère
- Elle assure la mobilisation des gaz respiratoires grâce à des mouvements d'ampliation et de retrait de la cage thoracique

I-Structures thoraciques impliquées

1- le squelette osseux:

- **Les côtes:** mobilisées autour d'un axe horizontal, réalisant un mouvement en « anse de seau »
- **Les vertèbres:**

- Inspiration: extension → augmentation du volume du thorax
- Expiration: flexion → diminution du volume thoracique

2- Les muscles respiratoires:

- L'inspiration augmente le volume de la cage thoracique par contraction des muscles inspiratoires

3- Les bronches:

- Conduction de l'air vers les alvéoles
- Épuration, réchauffement et humidification de l'air

4- Les plèvres:

- Transmission des mouvements de la cage thoracique aux poumons

II. La mécanique ventilatoire

1. Inspiration:

- Phénomène actif et automatique
- L'air pénètre dans le poumon quand la pression dans les alvéoles est inférieure à la pression atmosphérique
- Le volume de la cage thoracique augmente par contraction des muscles inspiratoires

- Les muscles inspiratoires:

- Le diaphragme:

- **principal** muscle inspiratoire
- 75% de la ventilation
- sa contraction augmente le diamètre vertical du thorax
- déplacement de 1cm mobilise 250 cm² d'air

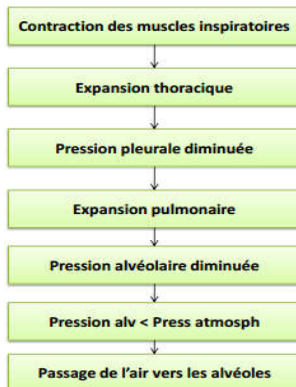
- Les muscles intercostaux externes:

- Leur contraction élève la côte en haut et en dedans (anse de seau)

Inspiration

Les muscles inspiratoires accessoires:

- Sterno-cleido-mastoidien, scalène, pectoraux, trapèze, dentelé
- Mis en jeu en cas d'inspiration forcée (ventilation ≥ 50 l/mn)
- Sollicités en cas d'insuffisance respiratoire chronique



Expiration:

- Phénomène passif
- Devient actif en cas d'expiration forcée
- Contraction des muscles intercostaux internes (anse de seau)
- Diminution du volume du thorax



III. Volumes et débits

1- Moyens de mesure:

- le spiromètre/ - le pneumotachographe/ - le pléthysmographe/ - le mini-débitmètre de pointe

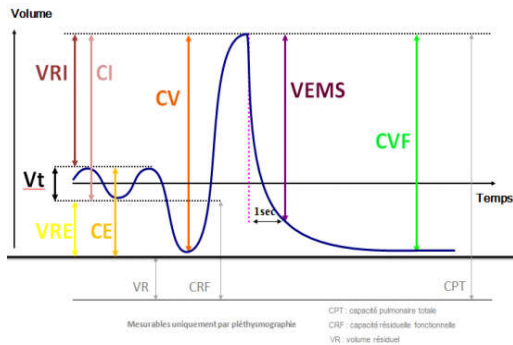
Types de Spiromètres

Spiromètre à cloche ou à eau Spiromètre électronique

Courbe Volume -Temps :

2- Les volumes pulmonaires:

a- Volumes mobilisables:



-Volume courant: ($V_t=500\text{ml}$) : - Le volume d'air mobilisé par une inspiration ou une expiration normale

-Volume de réserve inspiratoire ($V_{RI}=2\text{l}$) : - Le volume d'air mobilisé par une inspiration profonde faisant suite à une inspiration normale

- Volume de réserve expiratoire ($V_{RE}= 1,5\text{l}$) : - Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde faisant suite à une expiration normale

Capacité inspiratoire ($CI=V_t+V_{RI}$) : - Le volume d'air mobilisé par une inspiration profonde faisant suite à une expiration normale

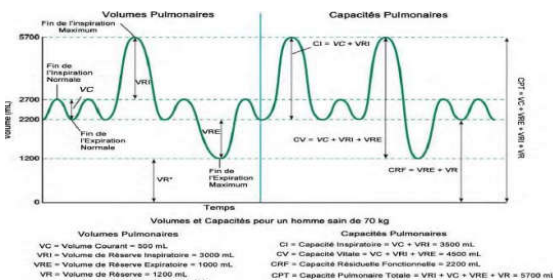
- Volumes et débits

-Capacité expiratoire ($CE=V_t+V_{RE}$) : - Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde faisant suite à une inspiration normale

-Capacité vitale: ($CV = 4\text{ à }5\text{l}$) : $CV=V_t+V_{RE}+V_{RI}$ - Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde après une inspiration Profonde (ou inspiration profonde après expiration profonde)

b- Volumes non mobilisables:

-Volume résiduel: ($VR= 1,2 \text{ à } 1,4\text{l}$) : - Le volume d'air contenu dans les poumons après une expiration forcée



Capacité résiduelle fonctionnelle (CRF): $V_{RE}+VR$: - Le volume d'air contenu dans les poumons après une expiration normale

Capacité pulmonaire totale (CPT): - Le volume d'air contenu dans les poumons après une inspiration profonde

3- Les débits pulmonaires:

- Volume expiratoire maximal par seconde (VEMS):

- La fraction de la capacité vitale expulsée pendant une seconde par une expiration forcée et rapide

➤ Volume inspiratoire maximal par seconde (VIMS):

- Inverse du VEMS (intérêt dans l'obstruction de la trachée)

- Débits normalisés:

- Débits mesurés à un point de la courbe d'expiration forcée

- **DEM75:** débit au niveau des grosses bronches

- **DEM50:** débit au niveau des bronches de moyen calibre

- **DEM25:** débit au niveau des petites bronches

- **DEM25-75:** plus sensible

- **DEP:** débit expiratoire de, pointe : débit expiratoire maximal maintenu pendant au moins 3ms

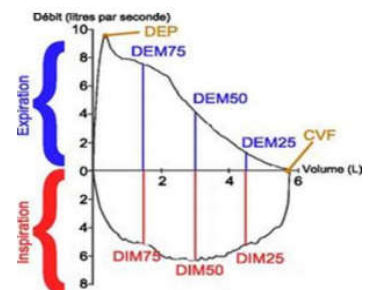
IV. Compliance pulmonaire

- *Ce sont les variations de pression qui génèrent les variations de débit et non l'inverse!*

- Inspiration: la mobilisation d'un volume (V) nécessite une pression (P)

- la compliance correspond à la variation du volume par unité de temps

- la compliance diminue quand la différence de pression augmente (système rigide: fibrose pulmonaire)



IV. Travail respiratoire

- Force qui doit vaincre les résistances:
 - résistances élastiques du poumon
 - résistances de la paroi thoracique
 - résistances des voies aériennes: mode d'écoulement de l'air dans les voies aériennes
- Le travail expiratoire: acte passif
- Le travail inspiratoire: acte actif, s'oppose aux forces de rétraction élastique du poumon et aux forces d'écoulement de l'air dans les voies aériennes

V. Ventilation alvéolaire

- C'est la fraction de ventilation pulmonaire qui participe aux échanges gazeux (l'hématose)
- C'est le volume d'air par minute qui atteint les alvéoles et les autres structures de la zone d'échange
- Chez l'adulte normale, 70% du volume courant arrive à la zone respiratoire ou d'échange et participe aux échanges gazeux, alors que 30% sont retenus dans la zone de conduction

• Valeurs normales:

- 2,6l/mn/m² de surface corporelle
- 70 à 75% de globale

L'espace mort anatomique (EMA):

- C'est la partie des voies aériennes qui ne participe pas aux échanges gazeux
- S'étend des voies aériennes supérieures aux bronchioles)

V. Ventilation alvéolaire

➤ L'espace mort physiologique:

- EMA + volume d'air des alvéoles ventilés, mais non perfusés

Position debout: Apex bien ventilés, mal perfusés ($VA/Q=3$)

Bases mal ventilées, bien perfusées ($VA/Q=0,6$)

➤ Rapport ventilation/perfusion (VA/Q)

- $VA= 2,6\text{l/mn}$, $Q= 3,2\text{l/mn} \rightarrow VA/Q= 0,8$
- zone mal ventilée, bien perfusée → **Effet shunt**
- zone mal perfusée, bien ventilée → **Effet espace mort**

Fonctions du poumons

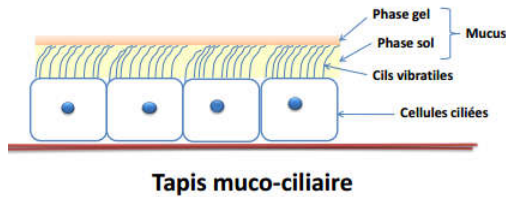
Les principales fonctions pulmonaires:

- La respiration
- L'épuration: Moyen de défense
- La bronchomotricité
- Autres...

1- La respiration (détails le long des chapitres du module)

2- L'épuration: Moyen de défense

- Particules de diamètre:
 - $>10\mu$: sont arrêtées par les voies aériennes supérieures
 - 2 à 10μ : sont arrêtées par les bronches
 - $< 2\mu$: sont arrêtées par les macrophages alvéolaires (cellules à poussière)
- **Tapis muco-ciliaire:**
 - Ces particules sont éliminées grâce au tapis muco-ciliaire
 - Ces particules sont éliminées grâce au tapis muco-ciliaire



• Les bronches sécrètent :

- Les immunoglobulines (IgG, IgA)
- L' $\alpha 1$ anti-trypsine
- L'albumine

• Les macrophages alvéolaires:

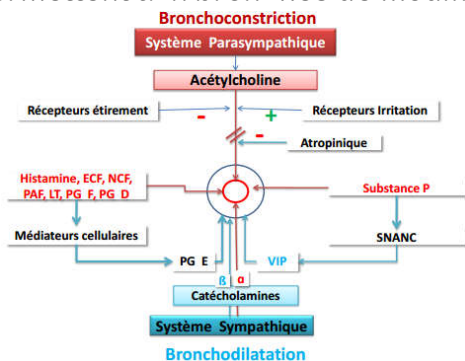
- Cellules à poussière
- Phagocytent les particules inhalées

• L'immunité générale:

- Intervient également dans les mécanismes de défense de l'organisme

3- La bronchomotricité

- La paroi des bronches et des bronchioles est pourvue de cellules musculaires lisses qui permettent aux bronches de modifier leur calibre **C'est la bronchomotricité**



• SNANC: Système Non Adrénérique Non Cholinérique

• LT: Leucotriènes

• PAF: Facteur d'activation des plaquettes

• PG: prostaglandines (F, D et E)

• VIP: Vaso-active intestinal peptid

• ECF: Facteur chimotactique des éosinophiles

• NCF: Facteur chimotactique des neutrophiles

Fonctions des voies respiratoires :

1- La conduction de l'air :

- Conduire l'air chargé d'O₂ de l'extérieur au fond des alvéoles.
- Conduire l'air chargé de CO₂ du fond des alvéoles à l'extérieur

2- Le réchauffement et l'humidification de l'air

- Mettre l'air à 37°C
- Saturer l'air en vapeur d'eau

3- Filtration et purification de l'air

- nez, poils, tapis muco-ciliaire, cellules à poussière, toux

- La toux:

- Réflexe déclenché notamment par une irritation de la muqueuse trachéale ou bronchique
 - Fermeture de la glotte
 - Augmentation de la pression intra-thoracique par contraction de certains muscles respiratoires
 - Puis relâchement brutal de l'obstruction
- Permet de rejeter les corps étrangers (fausse route...)

Support réalisé par : Filali Mohamed (étudiant de la promo médecine 2022)

Source : Diapo du Professeur Nahid Zaghiba

La diffusion alvéolo-capillaire

I. Généralités:

Diffusion alvéolo capillaire = Hématose:

- Correspond aux échanges gazeux à travers la **membrane alvéolo-capillaire**
- Passage de l'oxygène (O₂) de l'alvéole vers le capillaire pulmonaire (sang)
- Passage du dioxyde de carbone (CO₂) du sang vers l'alvéole
- Phénomène qui dépend de plusieurs facteurs

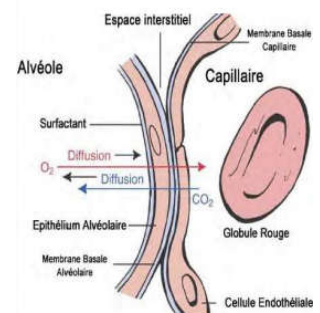
La structure de l'appareil respiratoire est parfaitement adaptée à sa fonction :

- La barrière alvéolo-capillaire est fine et perméable
- Le grand nombre d'alvéoles pulmonaires procure à chaque poumon une très grande surface d'échanges entre l'air et le sang
- Seuls certains gaz, appelés **gaz respiratoires**, participent aux échanges.
- La diffusion des gaz respiratoires dépend non seulement de l'intégrité de la **barrière alvéolo-capillaire**
- Mais aussi de la **composition des milieux** intérieur et extérieur.
- Lorsqu'ils sont passés dans le sang, les gaz respiratoires sont pris en charge par divers mécanismes de transport.
- La concentration d'un gaz est appelée **pression**, elle se mesure en kilopascals (kPa).
- Dans un mélange, chaque gaz se comporte de manière indépendante par rapport aux autres, on parle alors de **pression partielle**.
- Exemple : dans l'air, on considère la pression atmosphérique globale, et les pressions partielles en azote, dioxygène, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, etc.

II. Membrane alvéolo-capillaire (MAC) :

Elle est composée de plusieurs structures:

1. Capillaire pulmonaire
2. Endothélium capillaire
3. Membrane basale capillaire
4. Espace interstitiel
5. Membrane basale alvéolaire
6. Épithélium alvéolaire (pneumocyte I)
7. Surfactant



III. Rappel sur les lois de la diffusion :

- Lorsqu'un gaz est inégalement réparti entre deux compartiments séparés par une barrière perméable, comme c'est le cas entre l'air alvéolaire et le sang, séparés par la barrière alvéolo-capillaire.

- Mouvement naturel qui fait passer des molécules de gaz du milieu le plus « concentré » vers le milieu le moins « concentré » : c'est la **diffusion**.

Le phénomène est similaire à celui observé pour la diffusion des molécules en solution dans un liquide, mais on n'exprime pas la quantité de gaz en concentration, mais en pression.

- Mouvement naturel qui se produit du compartiment dont la pression partielle est la plus forte vers celui dont la pression partielle est la plus basse
- Dans un volume donné ou à travers une interface (surface d'échanges),

- Jusqu'à l'équilibre des concentrations.
- Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte de façon indépendante

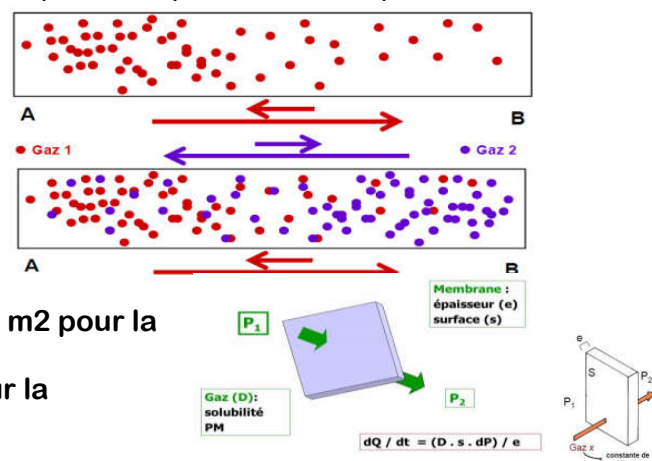
- La diffusion d'un gaz à travers un tissu est régie par la **loi de Fick**:

- Elle est proportionnelle à la **surface du tissu** (S: 50 à 100 m² pour la barrière alvéolo-capillaire)

- Inversement proportionnelle à l'**épaisseur** (e: 0,5 µm pour la barrière alvéolocapillaire)

La diffusion d'un gaz à travers un tissu:

- Proportionnelle au **gradient de concentration** (ou de pression: P₁ - P₂) de part et d'autre du tissu
- Proportionnelle à une **constante de diffusion (D)** qui tient compte des caractéristiques du gaz
- Cette constante est proportionnelle à la **solubilité du gaz (Sol)**



- Et inversement proportionnelle à la racine carrée de son **poids moléculaire (PM)**.
- Cette constante de diffusion est 20 fois plus élevée pour CO₂ que pour O₂.

IV. Facteurs de la diffusion :

- Nature du gaz
- Le gradient de pression au niveau de la MAC
- L'épaisseur de la MAC
- La surface de contact air-sang
- Le temps de contact air-sang

1- Nature du gaz:

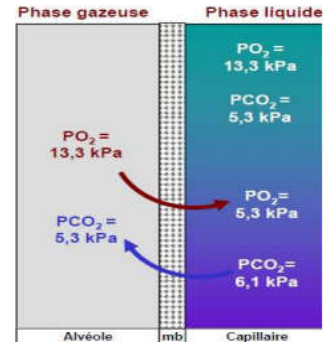
- La diffusion est proportionnelle à la **solubilité du gaz** dans les milieux
- Inversement proportionnelle à la **masse moléculaire du gaz**

2- la différence de pression partielle du gaz de part et d'autre de la MAC:

- La diffusion est proportionnelle à la différence de pression partielle au niveau de l'alvéole et au niveau du capillaire pulmonaire

	Alvéole	Sang veineux mêlé
PO ₂ (mmHg)	103	40
PCO ₂	40	46

- L'O₂ passe de l'alvéole vers le sang, car sa pression partielle est plus élevée au niveau de l'alvéole qu'au niveau du capillaire pulmonaire (Gradient: 103 - 40 = 63 mmHg)
- Le CO₂ diffuse du sang vers l'alvéole, car sa pression partielle au niveau du sang est plus élevée (Gradient: 46 - 40 = 6 mmHg)



3- L'épaisseur de la MAC (e):

- La diffusion est inversement proportionnelle au de l'épaisseur de la MAC
- Exp: épaississement de la MAC entraîne une diminution de la diffusion (en cas de fibrose pulmonaire)

4- La surface de contact: air-sang (S) :

- Correspond à la surface des alvéoles ventilés et perfusés (75m²)
- La diffusion est proportionnelle à la surface d'échange

5- Le temps de contact de l'air avec la MAC :

- La diffusion est proportionnelle au temps de contact

A l'effort:

- Augmentation des capillaires
- Donc augmentation des alvéoles ventilés et perfusés
- Par conséquent, augmentation de la capacité de diffusion

Au total:

- La diffusion est un acte passif
- La capacité de diffusion d'un gaz:
- C'est le volume de ce gaz qui traverse la MAC en 1 minute pour un gradient de concentration de 1 mmHg

- unité: ml/mn/mmHg

• Diffusion de l'O₂:

- La diffusion de l'O₂ est de 20 ml/min/mmHg

• Diffusion du CO₂:

- Le CO₂ est 20 fois plus diffusible que l'O₂

• Diffusion de l'O₂:

- Grande ΔP entre le sang qui arrive dans les capillaires pulmonaires et l'air alvéolaire

- Equilibre atteint rapidement (0,3-0,4s)

• Diffusion du CO₂:

- Faible ΔP entre le sang veineux mêlé et l'air alvéolaire, mais diffusibilité importante

- Equilibre atteint rapidement (0,3-0,4s)

• Mesure de la diffusion alvéolo-capillaire:

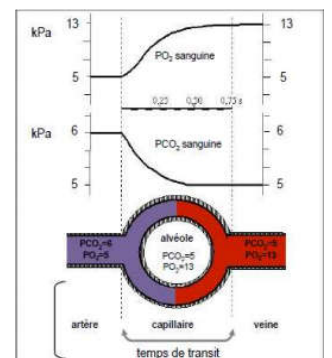
Diffusion Libre du CO (DLCO)

- Pour l'O₂, la diffusion est de 20 ml/mn/mmHg

- Le CO₂ est 20 fois plus diffusible que l'O₂

- La diffusion libre de CO

- Dépend de : L'âge (DLCO diminue avec l'âge)/Le sexe/ La surface corporelle /La fixation du CO sur l'hémoglobine(Hb)



Le transport des gaz

I - Généralités

- L'O₂ et le CO₂ sont transportés par la circulation sanguine
 - des poumons vers les tissus
 - des tissus vers les poumons
- Le sang fixe l'O₂ et le CO₂
 - de manière réversible
 - sous l'influence d'un gradient de pression partielle
- Gaz transportés en milieu liquide (plasma, cytoplasme du GR)
- Dans un liquide, un gaz peut être présent sous 2 formes:

- Dissoute

- Combinée à un transporteur ou après réaction, chimique

- Seule la fraction dissoute du gaz participe à la pression partielle
- Le volume de gaz dissout dans un liquide est déterminé par:
 - la **Pression partielle** du gaz (P_{gaz})
 - son coefficient de **Solubilité** (S_{gaz})
 - la température du liquide

- Loi de dissolution ou loi de Henry:

$$V_{\text{gaz}} = S_{\text{gaz}} \cdot \frac{P_{\text{gaz}}}{P_{\text{atm}}}$$

- **V: Volume**
- **S: Solubilité**
- **P: Pression**
- **P_{atm}: Pression atmosph**

A- Transport de l'oxygène

- Essentiellement **forme combinée**, liée à l'hémoglobine dans les GR (97%)
- **Forme dissoute**: faible quantité, dissoute dans le plasma et le cytoplasme des GR (3%)

• Transport du gaz carbonique

- Sous **forme dissoute** dans le plasma et le cytoplasme des GR (5-10%)
- Sous **forme combinée**:
 - Après réaction chimique: bicarbonates dans le plasma (60-65%)
 - Liée à l'hémoglobine dans les GR (30%)

□ L'hémoglobine:

- L'hémoglobine (Hb) est un pigment respiratoire présent exclusivement dans les GR
- Protéine transporteuse
 - fixation réversible et instable d'un ligand (ex. O₂) sur un site de fixation
 - affinité protéine-ligand plus grande au départ qu'à l'arrivée

II-Structure et propriétés de l'hémoglobine

□ L'hémoglobine:

- Tétramère de masse moléculaire: 68000 kDa
- 1 molécule = 4 chaînes polypeptidiques avec un groupement hème au centre qui comprend
 - 1 noyau porphyrine
 - 1 atome de fer qui peut fixer 1 molécule d'O₂
- L'Hb peut fixer différents gaz
 - Affinité + pour le CO₂
 - Affinité +++ pour l'O₂
 - Affinité +++++ pour le monoxyde de carbone (CO)

Affinité: CO₂ < O₂ < CO

□ Fer:

- Peut fixer O₂ s'il est sous forme divalente (Fe⁺⁺)
- Ne peut pas fixer O₂ s'il est sous forme trivalente (HbFe⁺⁺⁺ = méthémoglobine)

III -Transport de l'oxygène

- L'O₂ est transporté aux différents tissus par le sang
- Une oxygénation correcte des tissus dépend de plusieurs facteurs:

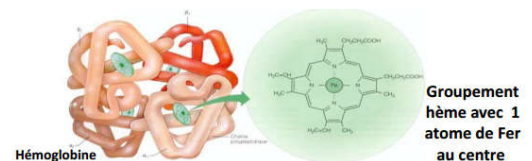
1. La qualité de l'hématose (échanges gazeux)

2. Le débit cardiaque

3. La concentration sanguine en hémoglobine

4. La courbe de dissociation de l'hémoglobine

L'oxygène est transporté



- Dans le plasma: - sous forme dissoute

- Dans les hématies:

- sous forme dissoute

- sous forme combinée à l'Hb

Contenu du sang en O₂ = [O₂dissout] + [O₂combiné]

- Proportionnel à PO₂

A- Forme dissoute: faible

- Sang artériel: 0,25 à 0,30 ml/100ml

- Sang veineux mêlé: 0,10ml/100ml

- Forme de passage obligatoire qui permet la diffusion pour les échanges gazeux

- Pour PaO₂ = 13 kPa (100 mmHg) → Volume d'O₂ dissous = 0,003 ml/ml de sang artériel

= 0,3 ml/100 ml sang artériel

- Consommation d'O₂ ≈ 300 ml/min → **Insuffisant pour oxygéner les tissus correctement**

B - Forme combinée:

- Forme combinée à l'hémoglobine **4O₂ + Hb₄ → Hb(O₂)₄ = O₂ + Hb → HbO₂ (oxyhémoglobine)**

- Forme principale de transport

- Constitue un réservoir qui cède l'O₂ au plasma au fur et à mesure que la PaO₂ diminue

- Combinaison réversible

- Forme combinée à l'hémoglobine

- 4O₂ + Hb₄ → Hb(O₂)₄ = O₂ + Hb → HbO₂

- Il y a 15g d'Hb pour 100 ml de sang

- 1g d'Hb fixe ≈ 1,34 ml d'O₂ en conditions réelles

- Capacité totale de fixation: 20ml d'O₂/100ml de sang

Le contenu total du sang en O₂ dépend principalement de la forme combinée de l'O₂

C – Saturation de l'Hb:

- 1 molécule d'Hb = 4 chaînes comprenant un atome de fer qui fixe l'O₂

- 1 molécule d'Hb peut fixer 4 molécules d'O₂

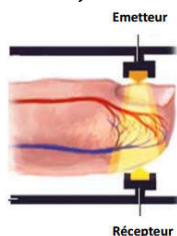
- La capacité maximale n'est pas atteinte systématiquement

- Saturation de l'Hb en O₂ = SaO₂

SaO₂ = (quantité d'O₂ liée à l'Hb/quantité maximale) x 100

- SaO₂ = 95% (saturation artérielle)

- SvO₂ = 70% (saturation veineuse)

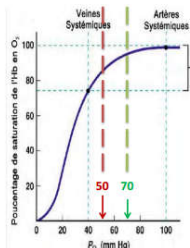


Mesure de la saturation:

D- Courbe de dissociation de l'Hb

- Représente la variation de saturation de l'Hb en O₂ en fonction de la PO₂

- Courbe non linéaire, sigmoïde

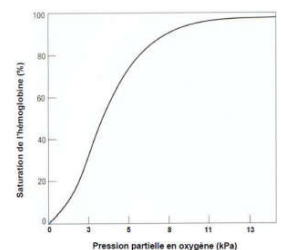


- Jusqu'à 50mmHg, une variation faible de PaO₂ entraîne une très grande variation de SaO₂

- A partir de 70 mmHg, une variation importante de PaO₂ entraîne une faible variation de SaO₂

- A 100mmHg, la SaO₂ est égale à 97%

- **P50:** pression pour laquelle 50% de l'Hb est saturée



E – Facteurs d'affinité de l'Hb pour l'O₂

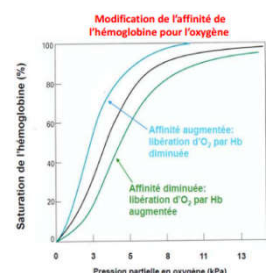
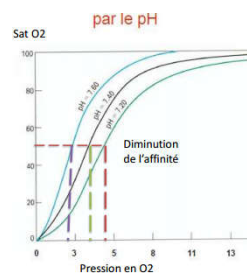
1. La P50:

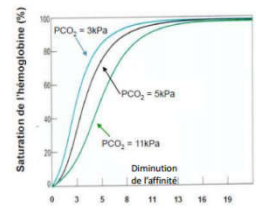
- L'affinité de l'Hb pour l'O₂ est inversement proportionnelle à la P50

2. Le pH:

- Le Ph est inversement proportionnel à la P50

- ↓pH → ↑P50, et donc diminution de l'affinité





3. La PCO₂:

- L'augmentation de la PCO₂ entraîne une diminution de l'affinité

4. La température:

- Une augmentation de la température entraîne une diminution de l'affinité

5. Le 2-3DPG:

- DPG: métabolite de la glycolyse dans les GR

- L'augmentation du 2-3DPG entraîne une diminution de l'affinité (hypoxie, altitude, anémie)

Interactions entre ces facteurs pour optimiser les échanges respiratoires:

- Favoriser la libération des molécules d'O₂ dans les capillaires tissulaires

- Favoriser la fixation des molécules d'O₂ dans les capillaires pulmonaires

□ Effet Bohr :

• Changement d'affinité de l'O₂ dû au variation de pH:



IV -Transport du gaz carbonique:

Le gaz carbonique est transporté

- Dans le plasma (70%), sous forme :

• Dissoute

• Combinée après réaction chimique

- Dans les hématies (30%), sous forme:

• Dissoute

• Combinée à l'Hb

• Combinée après réaction chimique

A- Forme dissoute:

1. Après réaction chimique: Les bicarbonates



AC

- Coefficient de solubilité du CO₂ > celui de l'O₂ (près de 20 fois)

- CO₂ dissout représente 5 % du CO₂ total dans le sang veineux

- Réaction lente en l'absence d'enzyme

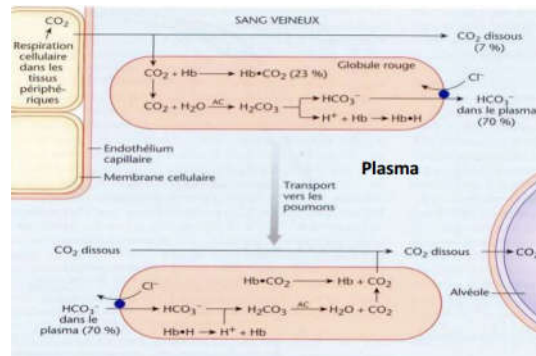
- Très rapide en présence d'anhydrase carbonique (AC)

- Pas d'anhydrase carbonique (AC) dans le plasma

- Abondante dans les GR

B- Forme combinée:

1. Après réaction chimique: Les bicarbonates



• Dans le cytoplasme des GR:

- Production ++ d'ions HCO₃⁻

- Qui sortent du GR, avec échange avec ions Cl⁻ :

Effet Hamburger

- Donc peu d' HCO₃⁻ dans les GR

- Les ions H⁺ sont tamponnés par Hb

B- Forme combinée:

1. Après réaction chimique: Les bicarbonates



• Dans le plasma:

- Les ions HCO₃⁻ sont abondants++

2. Combinée à l'hémoglobine: L'hémoglobine carbaminée

B- Forme combinée:

• Dans le cytoplasme des GR:

- Le CO₂ se fixe sur l'hémoglobine = hémoglobine carbaminée

• Site de fixation différent du site de fixation de l'O₂

• 30% du transport du CO₂

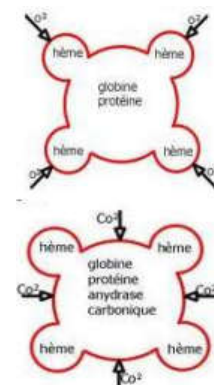
- Combinaison du C avec les groupes aminés terminaux des protéines:

La carbamino-hémoglobine = HbCO₂



Représente 5% du CO₂ transporté dans le sang veineux

La liaison est facilitée par la forme réduite de l'Hb → Effet Haldane



V - Equilibre acide-base:

Le transport du CO₂:

- Est indissociable de l'équilibre acido-basique
- L'Hb:
- rôle dans le transport de O₂
- rôle important dans le transport du CO₂
- rôle dans le maintien du pH

A- Rappel :

- A l'état normal: Equilibre acido-basique
- Le pH du liquide extracellulaire est régulé à une valeur proche de 7.40 $7.38 < \text{pH} < 7.42$
- Acidose ou Alcalose = DANGER
- Vie possible si $6.8 < \text{pH} < 7.8$
- pH intracellulaire = 7.0
- Equilibre acido-basique essentiel au fonctionnement correct de l'organisme
- Adaptation de l'organisme aux variations de pH par
 - Systèmes tampons (intra- et extracellulaires)
 - Rein (HCO₃⁻)
 - Appareil respiratoire (ventilation, PaCO₂): $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- $\text{pH} = 6.10 + \log (\text{HCO}_3^-) / (\text{CO}_2)$

B- Acidose respiratoire :

- Réduction de l'élimination pulmonaire du CO₂
- Augmentation de la PCO₂
- Rappel : $\text{H}^+ = K \cdot \text{PCO}_2 / \text{HCO}_3^-$ $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- $\uparrow \text{PCO}_2 \Rightarrow \text{CO}_2$ et H_2CO_3 , donc $\uparrow \text{H}^+$
- En aigu : tamponnement par le plasma (protéines, Ph plasmatiques...) , et Hb (30%)
- Puis interviennent les tampons tissulaires (protéines cellulaires, tampons phosphates intracellulaires ...50%)
- L'HCO₃⁻ passe de l'intra vers l'extracellulaire
- Puis intervient la compensation rénale

C- Acidose métabolique :

- Accumulation d'acides dans le sang ou perte de base
- $\text{H}^+ = K \cdot \text{PCO}_2 / \text{HCO}_3^-$ (diminution de HCO₃⁻)
- Les bicarbonates plasmatiques diminuent
- Charge acide tamponnée:
 - ✓ 40% de la charge est tamponnée dans le milieu extracellulaire (HCO₃⁻/CO₂)
 - ✓ 60% par le secteur cellulaire (dont 8% par Hb) et l'os
- PCO₂ augmente dans un premier temps
- Puis le CO₂ est éliminé par une hyperventilation \Rightarrow PCO₂ chute (15 -20mmHg)
- Ce qui normalise le pH = compensation respiratoire


Exp 1: Acidose métabolique

- Diabète, insuffisance rénale...
- Le taux d'acides fixes augmenté \rightarrow réserve alcaline diminue \rightarrow les ions H⁺ stimulent les centres respiratoires
- \rightarrow Hyperventilation \rightarrow Diminution du CO₂

Acidose métabolique compensée

Exp 2: Acidose respiratoire

- Diminution de l'élimination du CO₂ \rightarrow Augmentation du CO₂ et PaO₂
- Le rein réagit en 48h \rightarrow réabsorbe les bicarbonates et H⁺ contre Na⁺
- H⁺ se combine à NH₃ fournis par la glutamine
- \rightarrow NH₄⁺ augmente dans les urines
- Si le mécanisme est débordé, le pH reste bas
- \rightarrow Acidose respiratoire décompensée

			
	7.35	7.40	7.45
	Acidose		Alcalose
Respiratoire	Pa CO ₂		PaCO ₂
Métabolique	HCO ₃ ⁻		HCO ₃ ⁻

Syndromes fonctionnels respiratoires

A - Syndrome obstructif

- La CV est normale ou légèrement diminuée.
- La CPT est normale
- Le VEMS est abaissé, en dessous de 80% de la valeur théorique → Tiffeneau (VEMS/CV) est également abaissé.
- Le DEP est abaissé
- le DEM 75, 50 et 25 diminués
- Le VR augmenté
- VR/CPT augmenté
- Au total:
 - Les débits sont diminués
 - Les volumes sont normaux ou augmentés
- Causes:
 - Broncho pneumopathie chronique obstructive (BPCO)
 - Bronchite chronique obstructive
 - Emphysème pulmonaire: Panlobulaire, Centrolobulaire
 - Asthme
- Epreuves pharmaco-dynamiques:
 - Trouble ventilatoire obstructif (TVO): diminution du rapport de Tiffeneau (VEMS/CV)
 - Gravité du TVO jugée sur la diminution du VEMS
 - Test de réversibilité du TVO:
 - 15 à 20mn après inhalation de Béta 2 mimétiques
 - test positif si gain du VEMS >12% ET >200ml

B - Syndrome restrictif

- CPT diminuée
- CV (Vt, VRI, VRE) diminués
- VEMS normal ou légèrement diminué
- VEMS/CV normal ou augmenté
- VR diminué
- VR/CPT normal
- Au total:
 - Les débits sont normaux
 - Les volumes sont diminués
- Sévérité du TVR:
 - Jugée sur la CPT (<80% de la valeur théorique)

• Causes:

- Origine neuromusculaire : myopathies, paralysie diaphragmatique bilatérale.
- Origine ostéo-articulaire : scolioses et cyphoscolioses sévères, cyphoses
- Origine pulmonaire : Séquelles de tuberculose pulmonaire, Fibrose pulmonaire, Pneumoconioses
- Origine pleurale : pachypleurite

C – Syndrome Mixte:

Syndrome obstructif + Syndrome restrictif

D – Troubles de la diffusion:

Diminution de la capacité de diffusion du CO(DLCO):

- Pneumopathies interstitielles diffuses, Fibrose pulmonaire

E – Les hypoxies:

1- Hypoxie hypoxémique: Respiration en air confiné , Altitude, Hypoventilation alvéolaire, trouble de diffusion, Shunt droit gauche

2- Hypoxie anémique:

- PaO2 est normale, mais la quantité d'Hb est diminuée
- Parfois, c'est le taux d'Hb pour le transport qui est diminué (intoxication au CO)

3- Hypoxie histotoxique:

- Quantité d'O2 fournie aux tissus normaux, mais sous l'effet d'un agent toxique
- Les tissus sont incapables d'utiliser l'O2

4- Hypoxie Circulatoire: - La PaO2 et Taux d'Hb normaux mais le débit sanguin dans les tissus est diminué

Capacité pulmonaire totale (CPT)

> 85 %	→	normal
entre 70 et 85 %	→	léger
entre 60 et 70 %	→	modéré
< 60 %	→	sévère

Contrôle de respiration

I- Généralités

-Activité respiratoire rythmique, automatique et permanente
-Prend naissance dans des réseaux neuronaux du **tronc cérébral** qui fonctionnent de façon automatique et permettent d'envoyer des ordres moteurs via les motoneurones aux muscles respiratoires.

• Ces muscles permettent à la paroi thoracique de se modifier et de changer de volume.

-Régulation odifiée par de multiples facteurs

• Système automatique qui est modulé par un certain nombre de signaux :

- L'efficacité des échanges gazeux est perçue par:

- **Chémorécepteurs périphériques** (carotide et aorte)

- **Chémorécepteurs centraux** (centres respiratoires)

- Qui sont sensibles au niveau d'O₂ et de CO₂

- En fonction de ce qu'ils perçoivent, ces chémorécepteurs envoient des signaux aux centres respiratoires qui vont ensuite permettre d'augmenter ou diminuer la ventilation.

- Signaux provenant des poumons et de la cage thoracique qui renseignent sur le volume du poumon ou de la cage thoracique aux centres respiratoires, qui vont ensuite modifier la ventilation.

• Les principaux centres nerveux qui contrôlent la respiration sont situés dans:

- **le bulbe rachidien**

- **la protubérance annulaire**

II – Centres respiratoires:

(Voir schéma page 10 du diapo du professeur)

A - Centres bulbaires:

2 amas de neurones respiratoires:

- Groupe Respiratoire Dorsal:

- **neurones inspiratoires**

- intégration des infos périphériques

- efférences vers les motoneurones phréniques et GRV

- Groupe respiratoire Ventral:

- **neurones inspiratoires et expiratoires**

B- Centre Pneumotaxique (PNX):

- Situé dans la partie supérieure du pont

- Module l'activité des centres bulbaires en fonction des informations centrales et périphériques

C - Centre Apneustique (APN):

- Excitateur des centres bulbaires

- Rôle mal connu

III-Automatisme respiratoire

Automatisme respiratoire assuré par les centres bulbaires→alternance inspiration/expiration

-**Inspiration** : activation des neurones inspiratoires du TC→ contraction des muscles inspiratoires

-**Expiration** : interruption de la stimulation par les neurones inspiratoires

Stimulation des neurones expiratoires→contraction des muscles expiratoires

Plusieurs hypothèses de fonctionnement des centres bulbaires

IV- Régulation de la respiration

-Ventilation adaptée :

-aux modifications des besoins métaboliques

-à l'utilisation du système respiratoire pour des activités non liées aux échanges gazeux

-aux modifications de la composition ou des pressions partielles de l'air ambiant

-Boucles de rétro-contrôles négatif

A.Régulation chimique :

PaO₂ et PaCO₂ doivent rester constantes

Le système réagit de telle manière que

-Si PaO₂ ↓ et PaCO₂ ↑ → Hyperventilation

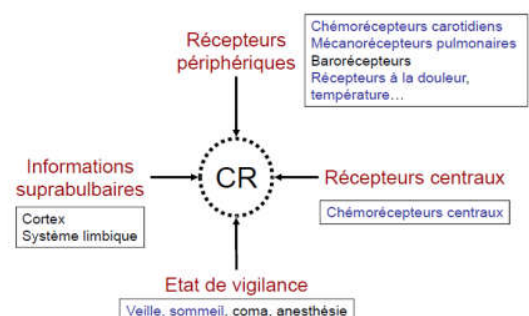
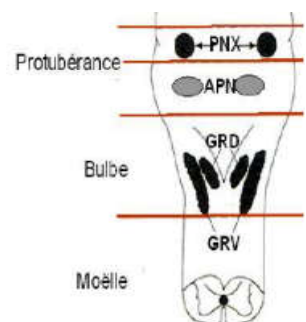
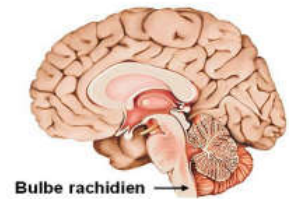
-Si PaO₂ ↑ et PaCO₂ ↓ → Hyperventilation

Régulation chimique de la ventilation :

-PaO₂

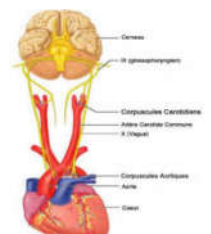
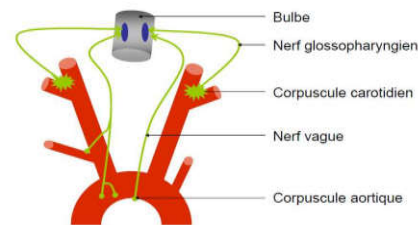
-PaCO₂

-pH



Récepteurs périphériques et centraux

Importance pendant le sommeil



Chémorécepteurs périphériques	Chémorécepteurs centraux	Mécanorécepteurs pulmonaires	Mécanorécepteurs pharyngés
<ul style="list-style-type: none"> -situés dans les corpuscules carotidiens -sensibles surtout aux variations de PaO_2 (mais aussi de pH et à l'augmentation de la $PaCO_2$) : -influx transite par IX, arrive aux centres bulbaires 	<ul style="list-style-type: none"> -situés à la surface ventrale du bulbe -Ne sont pas sensibles à la PO_2 -stimulés par les ions H^+ (PCO_2) présent dans le LCR -Stimulent les neurones inspiratoires 	<ul style="list-style-type: none"> situés dans le parenchyme et les voies aériennes - sensibles à l'étirement - influx transite par le X, arrive aux centres bulbaires information sur le niveau d'inflation pulmonaire → interruption de l'inspiration 	<ul style="list-style-type: none"> - situés dans la paroi pharyngée - sensibles à l'étirement - réflexe dilatateur du pharynx: activation réflexe des muscles pharyngés dilateurs en réponse à une pression intraluminaire négative

Par les chémorécepteurs centraux:	Par les chémorécepteurs périphériques	Réponse ventilatoire à l' O_2	Réponse ventilatoire au CO_2	Réponse ventilatoire au pH
<ul style="list-style-type: none"> - Proches des centres respiratoires bulbaires - Sensibles aux variations de la $PaCO_2$ et du pH du sang artériel et du LCR - Lorsque la $PaCO_2$ ↑, le CO_2 diffuse dans le LCR et forme rapidement H_2CO_3 qui se dissocie en H^+ et HCO_3^- - Les ions H^+ stimulent les chémorécepteurs et induisent une hyperventilation réactionnelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Détectent une ↓ de la PaO_2 - Situés au niveau de la division des artères carotides et de la crosse de l'aorte 	<ul style="list-style-type: none"> - Une ↓ de la PaO_2 entraîne une ↑ de la ventilation - Alors que ↑ de la PaO_2 n'affecte pas la ventilation 	<ul style="list-style-type: none"> - Une ↓ de la $PaCO_2$ (hypocapnie) entraîne une ↓ de la ventilation - Une ↑ de la $PaCO_2$ (hypercapnie) entraîne une hyperventilation 	<ul style="list-style-type: none"> - Une injection intra veineuse (IV) de HCl à un chien entraîne une ↑ de la ventilation - La ↓ du pH(acido-cétose diabétique) entraîne une hyperventilation alvéolaire - Fait intervenir les chémorécepteurs périphériques

(Tableaux réalisés par Yara)

B- Régulation Nerveuse:

- Contrôle par le cortex
- Contrôle volontaire de la ventilation
- **Modification du rythme volontaire:**
- **Au début d'un effort:** la ventilation augmente avant même le début d'un effort

Support réalisé par : Filali Mohamed (étudiant de la promo médecine 2022)

Source : Diapo du Professeur Nahid Zaghba



Les cartes mentales

La ventilation

Définition :

- correspond aux phénomènes de déplacement de l'air de l'environnement externe vers les alvéoles et des alvéoles vers l'atmosphère
- Elle assure la mobilisation des gaz respiratoires grâce à des mouvements d'ampliation et de retrait de la cage thoracique

I-Structures thoraciques impliquées

1- le squelette osseux:

- **Les côtes:** mobilisées autour d'un axe horizontal, réalisant un mouvement en « anse de seau »

- Les vertèbres:

- > Inspiration: extension → augmentation du volume du thorax
- > Expiration: flexion → diminution du volume thoracique

2- Les muscles respiratoires:

- L'inspiration augmente le volume de la cage thoracique par contraction des muscles inspiratoires

3- Les bronches:

- Conduction de l'air vers les alvéoles
- Épuration, réchauffement et humidification de l'air

4- Les plèvres:

- Transmission des mouvements de la cage thoracique aux poumons

II. La mécanique ventilatoire

1. Inspiration:

- Phénomène actif et automatique
- L'air pénètre dans le poumon quand la pression dans les alvéoles est inférieure à la pression atmosphérique
- Le volume de la cage thoracique augmente par contraction des muscles inspiratoires

Les muscles inspiratoires:

Le diaphragme:

- **principal** muscle inspiratoire
- 75% de la ventilation
- sa contraction augmente le diamètre vertical du thorax
- déplacement de 1cm mobilise 250 cm³ d'air

Les muscles intercostaux externes:

- Leur contraction élève la côte en haut et en dedans (anse de seau)

Les muscles inspiratoires accessoires:

- Sterno-cleido-mastoidien, scalène, pectoraux, trapèze, dentelé
- Mis en jeu en cas d'inspiration forcée (ventilation ≥ 50l/mn)
- Sollicités en cas d'insuffisance respiratoire chronique

2.Expiration:

- Phénomène passif
- Devient actif en cas d'expiration forcée
- Contraction des muscles intercostaux internes (anse de seau)
- Diminution du volume du thorax

III.Volumes et débits

→ Moyens de mesure :

- le spirographe
- le pneumotachographe
- le pléthysmographe
- le mini-débitmètre de pointe

Les volumes pulmonaires

Volumes mobilisables

Volume courant: (Vt=500ml) :

Le volume d'air mobilisé par une inspiration ou une expiration normale

Volume de réserve inspiratoire (VRI=2l) :

Le volume d'air mobilisé par une inspiration profonde faisant suite à une inspiration normale

Volume de réserve expiratoire (VRE= 1,5l) :

Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde faisant suite à une expiration normale

Capacité inspiratoire (CI=Vt+VRI) :

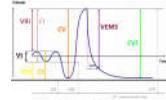
Le volume d'air mobilisé par une inspiration profonde faisant suite à une expiration normale

Capacité expiratoire (CE=Vt+VRE) :

Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde faisant suite à une inspiration normale

Capacité vitale: (CV = 4à5l) :

CV=Vt+VRE+VRI : Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde après une inspiration Profonde (ou inspiration profonde après expiration profonde)



Volumes non mobilisables

Volume résiduel: (VR= 1,2 à 1,4l) :

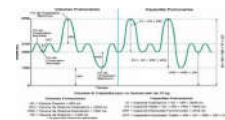
Le volume d'air contenu dans les poumons après une expiration forcée

Capacité résiduelle fonctionnelle (CRF): VRE+VR :

Le volume d'air contenu dans les poumons après une expiration normale

Capacité pulmonaire totale (CPT):

Le volume d'air contenu dans les poumons après une inspiration profonde



Les débits pulmonaires

Volume expiratoire maximal par seconde (VEMS):

- La fraction de la capacité vitale expulsée pendant une seconde par une expiration forcée et rapide

Volume inspiratoire maximal par seconde (VIMS):

- Inverse du VEMS (intérêt dans l'obstruction de la trachée)

Débits normalisés:

- Débits mesurés à un point de la courbe d'expiration forcée

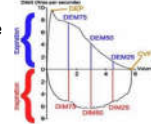
DEM75: débit au niveau des grosses bronches

DEM50: débit au niveau des bronches de moyen calibre

DEM25: débit au niveau des petites bronches

DEM25-75: plus sensible

DEP: débit expiratoire de pointe : débit expiratoire maximal maintenu pendant au moins 3ms



IV.Compliance pulmonaire

Ce sont les variations de pression qui génèrent les variations de débit et non l'inverse!

- Inspiration: la mobilisation d'un volume (V) nécessite une pression (P)
- la compliance correspond à la variation du volume par unité de temps
- la compliance diminue quand la différence de pression augmente (système rigide: fibrose pulmonaire)

IV. Travail respiratoire

- Force qui doit vaincre les résistances:

- résistances élastiques du poumon

- résistances de la paroi thoracique

- **résistances des voies aériennes:** mode d'écoulement de l'air dans les voies aériennes

• **Le travail expiratoire:** acte passif

• **Le travail inspiratoire:** acte actif, s'oppose aux forces de rétraction élastique du poumon et aux forces d'écoulement de l'air dans les voies aériennes

V. Ventilation alvéolaire

- C'est la fraction de ventilation pulmonaire qui participe aux échanges gazeux (l'hématose)

- C'est le volume d'air par minute qui atteint les alvéoles et les autres structures de la zone d'échange

• Chez l'adulte normale, 70% du volume courant arrive à la zone respiratoire ou d'échange et participe aux échanges gazeux, alors que 30% sont retenus dans la zone de conduction

• Valeurs normales:

- 2,6l/mn/m² de surface corporelle

- 70 à 75% de globale

L'espace mort anatomique (EMA):

• C'est la partie des voies aériennes qui ne participe pas aux échanges gazeux

• S'étend des voies aériennes supérieures aux bronchioles

V. Ventilation alvéolaire

> L'espace mort physiologique:

• EMA + volume d'air des alvéoles ventilés, mais non perfusés

Position debout: Apex bien ventilés, mal perfusés (VA/Q=3)

Bases mal ventilées, bien perfusées (VA/Q=0,6)

> Rapport ventilation/perfusion (VA/Q)

- VA= 2,6l/mn, Q= 3,2l/mn → VA/Q= 0,8

- zone mal ventilée, bien perfusée → **Effet shunt**

- zone mal perfusée, bien ventilée → **Effet espace mort**

Diffusion alvéolo-capillaire

I. Généralités:

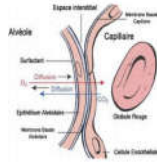
Diffusion alvéolo capillaire = Hématose:

- Passage de l'oxygène (O₂) de l'alvéole vers le capillaire pulmonaire (sang)
 - Passage du dioxyde de carbone (CO₂) du sang vers l'alvéole
 - Phénomène qui dépend de plusieurs facteurs
- La structure de l'appareil respiratoire est parfaitement adaptée à sa fonction :
- La barrière alvéolo-capillaire est fine et perméable
 - Le grand nombre d'alvéoles pulmonaires procure à chaque poumon une très grande surface d'échanges entre l'air et le sang
 - Seuls certains gaz, appelés **gaz respiratoires**, participent aux échanges.
 - La diffusion des gaz respiratoires dépend aussi de la composition des milieux intérieur et extérieur.
 - Dans un mélange, chaque gaz se comporte de manière indépendante par rapport aux autres, on parle alors de **pression partielle**.

II. Membrane alvéolo-capillaire (MAC) :

Elle est composée de plusieurs structures:

1. Capillaire pulmonaire
2. Endothélium capillaire
3. Membrane basale capillaire
4. Espace interstitiel
5. Membrane basale alvéolaire
6. Épithélium alvéolaire (pneumocyte I)
7. Surfactant



III. Rappel sur les lois de la diffusion :

- **Diffusion** : mouvement naturel qui se produit du compartiment dont la pression partielle est la plus forte vers celui dont la pression partielle est la plus basse
 - Jusqu'à l'équilibre des concentrations.
 - Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte de façon indépendante.
 - La diffusion d'un gaz à travers un tissu est régie par **la loi de Fick** :
 - Elle est proportionnelle à :
 - **La surface du tissu (S)** : 50 à 100 m² pour la barrière alvéolo-capillaire)
 - **Gradient de concentration** (ou de pression: P₁ - P₂) de part et d'autre du tissu
 - **Constante de diffusion (D)** qui tient compte des caractéristiques du gaz
 - Inversement proportionnelle à
 - **L'épaisseur (e)** : 0,5 µm pour la barrière alvéolocapillaire)
- La constante de diffusion (D) est proportionnelle à
- La solubilité du gaz (Sol)
 - Inversement proportionnelle à :
 - La racine carrée de son **poids moléculaire (PM)**.
 - Cette constante de diffusion est 20 fois plus élevée pour CO₂ que pour O₂.

IV. Facteurs de la diffusion :

- Nature du gaz
- Le gradient de pression au niveau de la MAC
- L'épaisseur de la MAC
- La surface de contact air-sang
- Le temps de contact air-sang

1- Nature du gaz:

- La diffusion est proportionnelle à la **solubilité du gaz** dans les milieux
- Inversement proportionnelle à la **masse moléculaire du gaz**

2- la différence de pression partielle du gaz de part et d'autre de la MAC:

- La diffusion est proportionnelle à la différence de pression partielle au niveau de l'alvéole et au niveau du capillaire pulmonaire
- L'O₂ passe de l'alvéole vers le sang, car sa pression partielle est plus élevée au niveau de l'alvéole qu'au niveau du capillaire pulmonaire
- Le CO₂ diffuse du sang vers l'alvéole, car sa pression partielle au niveau du sang est plus élevée

3- L'épaisseur de la MAC (e):

- La diffusion est inversement proportionnelle au de l'épaisseur de la MAC

4- La surface de contact: air-sang (S) :

- Correspond à la surface des alvéoles ventilés et perfusés (75m²)
- La diffusion est proportionnelle à la surface d'échange

5- Le temps de contact de l'air avec la MAC :

- La diffusion est proportionnelle au temps de contact

A l'effort:

- Augmentation des capillaires
- Donc augmentation des alvéoles ventilés et perfusés
- Par conséquent, augmentation de la capacité de diffusion

Au total:

- La diffusion est un acte passif
- La capacité de diffusion d'un gaz:
 - **Diffusion de l'O₂**:
 - La diffusion de l'O₂ est de 20ml/min/mmHg
 - Grande ΔP entre le sang qui arrive dans les capillaires pulmonaires et l'air alvéolaire
 - Equilibre atteint rapidement (0,3-0,4s)
 - **Diffusion du CO₂**:
 - Le CO₂ est 20 fois plus diffusible que l'O₂
 - Faible ΔP entre le sang veineux mêlé et l'air alvéolaire, mais diffusibilité importante
 - Equilibre atteint rapidement (0,3-0,4s)

• Mesure de la diffusion alvéolo-capillaire:

Diffusion Libre du CO (DLCO)

- Pour l'O₂, la diffusion est de 20ml/mn/mmHg
- Le CO₂ est 20 fois plus diffusible que l'O₂
- La diffusion libre de CO
- Dépend de :
 - L'âge (*DLCO diminue avec l'âge*)
 - Le sexe
 - La surface corporelle
 - La fixation du CO sur l'hémoglobine(Hb)

Syndromes fonctionnels respiratoires

Syndrome obstructif

- La **CV** est normale ou légèrement diminuée.
- La **CPT** est normale
- Le **VEMS** est abaissé, en dessous de 80% de la valeur théorique → **Tiffeneau (VEMS/CV) est également abaissé.**
- Le **DEP** est abaissé
- le **DEM 75, 50 et 25** diminués
- Le **VR** augmenté
- **VR/CPT** augmenté
- **Au total:**
- Les débits sont diminués
- Les volumes sont normaux ou augmentés

Causes

- Broncho pneumopathie chronique obstructive (BPCO)
- Bronchite chronique obstructive
- Emphysème pulmonaire: Panlobulaire, Centrolobulaire
- Asthme

Epreuves phar-maco-dynamiques:

- Trouble ventilatoire obstructif (TVO): diminution du rapport de Tiffeneau (VEMS/CV)
- Gravité du TVO jugée sur la diminution du VEMS
- Test de réversibilité du TVO:
 - 15 à 20mn après inhalation de Béta 2 mimétiques
 - test positif si gain du VEMS >12% ET >200ml

Syndrome restrictif

- CPT diminuée
- CV (Vt, VRI, VRE) diminués
- VEMS normal ou légèrement diminué
- VEMS/CV normal ou augmenté
- VR diminué
- VR/CPT normal
- Au total:**
- Les débits sont normaux
- Les volumes sont diminués
- **Sévérité du TVR:**
- Jugée sur la CPT (<80% de la valeur théorique)

Causes

- Origine neuromusculaire :** myopathies, paralysie diaphragmatique bilatérale.
- Origine ostéo-articulaire :** scolioses et cyphoscolioses sévères, cyphoses
- Origine pulmonaire :** Séquelles de tuberculose pulmonaire, Fibrose pulmonaire, Pneumoconioses
- Origine pleurale :** pachypleurite

Les hypoxies:

Hypoxie hypoxémique: Respiration en air confiné, Altitude, Hypoventilation alvéolaire, trouble de diffusion, Shunt droit gauche

Hypoxie anémique:

- PaO2 est normale, mais la quantité d'Hb est diminuée
- Parfois, c'est le taux d'Hb pour le transport qui est diminué (intoxication au CO)

Hypoxie histotoxique:

- Quantité d'O2 fournie aux tissus normaux, mais sous l'effet d'un agent toxique
- Les tissus sont incapables d'utiliser l'O2

Hypoxie Circulatoire: La PaO2 et Taux d'Hb normaux mais le débit sanguin dans les tissus est diminué

Syndrome Mixte:

Syndrome obstructif + Syndrome restrictif

Troubles de la diffusion

Diminution de la capacité de diffusion du CO (DLCO):
- Pneumopathies interstitielles diffuses, Fibrose pulmonaire