

PHYSIOLOGIE RESPIRATOIRE

Oussama Essahili



Anatomie de l'appareil respiratoire
La ventilation
La diffusion alvéolo-capillaire ou Hématose
Transport des gaz
Contrôle de la respiration

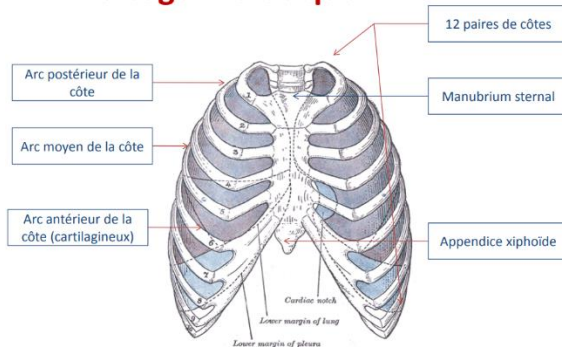
Chapitre 1 : Anatomie de l'appareil respiratoire

- Les éléments qui participent à la respiration :

- 1- La cage thoracique
- 2- Les voies aériennes
- 3- Le parenchyme pulmonaire
- 4- Les muscles respiratoires
- 5- Les plèvres

1)- 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)



2)- Les voies aériennes :

a. Les voies aériennes supérieures (VAS)

- Fosses nasales, cavité buccale,
- Pharynx, épiglote,
- Larynx

Les fosses nasales	<ul style="list-style-type: none"> • 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 de la surface d'échange, mais gênent l'écoulement d'air.
Le pharynx	Conduit musculo-membraneux collabable Carrefour aéro-digestif Innervation sensitivo-motrice riche : paires crâniennes (V, IX, X, XII)
Le larynx	Conduit ostéo-cartilagineux rigide <ul style="list-style-type: none"> • Os hyoïde • Les cartilages (cricoïde, thyroïdien, aryténoïde, épiglote) • Les structures musculo-tendineuses

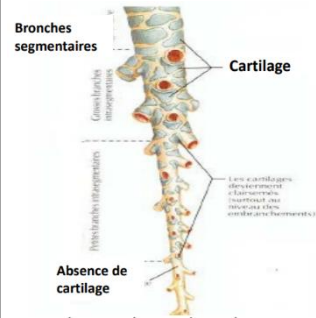
b. Les voies aériennes inférieures (VAI)

- **Zone de conduction :** Trachée, bronches principales droites et gauches, bronches lobaires et segmentaires, bronchioles terminales
- **Zone de transition :** Bronchioles respiratoires
- **Zone respiratoire (d'échange) :** Canaux (conduits) et sacs alvéolaires

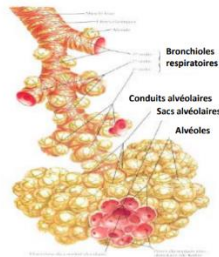
Zone de conduction	<ul style="list-style-type: none"> • Trachée et arbre bronchique Epithélium respiratoire Cellules musculaires lisses Fibres élastiques Cartilage Tissu lymphoïde => La trachée est riche en cartilage plus qu'en muscles
---------------------------	---

=> Les **bronches** sont riches en **muscles** plus qu'en cartilage

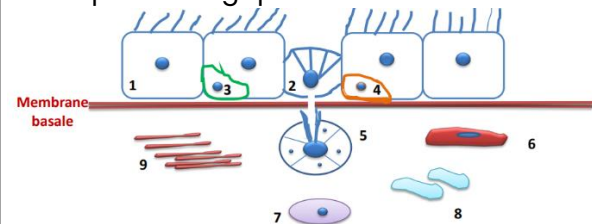
- Les plaques de cartilage diminuent progressivement de la trachée aux bronchioles où elles sont absentes



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



→ Coupe histologique d'une bronche :



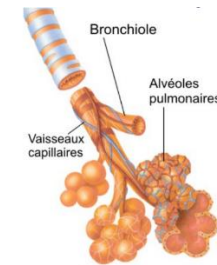
- 1- Cellules ciliées 2- Cellules caliciformes
- 3- Cellules basales 4- Cellules Kulchitsky
- 5- Glandes séreuses 6- Capillaire
- 7- Lymphocyte 8- Cartilage
- 9- Muscle lisse

Zone de transition

Bronchioles respiratoires → 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 respiratoire ou d'échange

Canaux et sacs alvéolaires

3)- Le parenchyme pulmonaire :

- Voies de conduction terminales (d'échange) : canaux alvéolaires CA
- Alvéoles A
- Vaisseaux pulmonaires : artérioles pulmonaires AP
- Espace inter alvéolaires : septum S

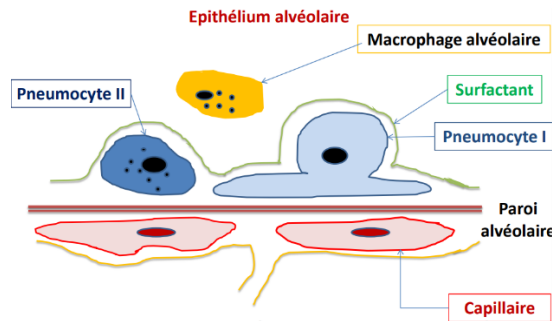
a) - Les alvéoles

- Nombre : 300 à 500 millions d'alvéoles dans le poumon humain
- Surface : **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 :

Pneumocyte type 1

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

Pneumocyte type 2	Cellules cuboïdale avec des microvillosités 3% de la surface alvéolaire Sécrétion du surfactant
Macrophage alvéolaire	Principal système de défense de l'espace alvéolaire Reste dans l'alvéole (cellule à poussière) ou éliminé par le tapis muco-ciliaire



- **Pneumocyte I** : membraneuse (prolongement cytoplasmique)
- **Pneumocyte II** : granuleuse (granules de sécrétion)

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 immunoglobines
- **Surfactant** : au contact de l'air alvéolaire

Surfactant

- Mixture **complexe de lipides et de protéines** sécrétée par les **pneumocytes de type 2**
- 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

• 3 rôles principaux :

- **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

- **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

- **Il permet aux alvéoles de rester au sec :**

Evite la sortie de plasma dans l'alvéole

Diminue la pression autour des vaisseaux

Forces maintenant l'ouverture des alvéoles	Forces favorisant l'affaissement des alvéoles
Pression transmurale Surfactant pulmonaire (réduction de la tension de surface des alvéoles)	Retrait élastique des fibres conjonctives étirées Tension de surface des alvéoles

• En pathologie :

- Le surfactant est sécrété par le poumon du fœtus tardivement au cours de la grossesse, et en cas d'accouchement prématuré :
- Déficit en surfactant : **Maladie des membranes hyalines**.
- Tendance des alvéoles à se collaber.
- Efforts inspiratoires plus importants sont nécessaires pour vaincre la forte tension de surface et gonfler les poumons peu compliants.
- La pression transmurale nécessaire peut atteindre 20 à 30 mmHg (au lieu de 4 à 6 normalement) pour contrebalancer la tendance des alvéoles à se collaber.

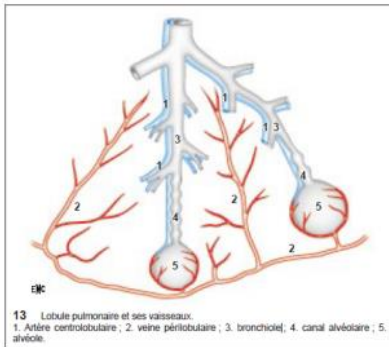
b) – Espace inter alvéolaire :

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 hilaire et base pleurale
- Limité par septas conjonctifs
- Subdivision d'une bronchiole terminale en **3 générations de bronchioles respiratoires**



4)- Les muscles respiratoires :

A. Les muscles inspiratoires :

a) – Le diaphragme :

- Coupole musculo-aponévrotique (2 hémicoupoles)
- Chaque hémicoupole est innervée séparément par un nerf phrénique (provenant de racines de C3, C4 et C5)
- Paroi inférieure de la cage thoracique
- Il sépare la cavité thoracique de la cavité abdominale

• Contraction diaphragmatique :

- Abaisse les coupoles → Augmente le diamètre vertical
- Refoule les côtes inférieures en haut et en dehors → Augmente les diamètres horizontaux
- Augmente la pression intra-abdominale → Déplace les côtes inférieures vers l'extérieur → Augmente les diamètres horizontaux

• Principal muscle inspiratoire

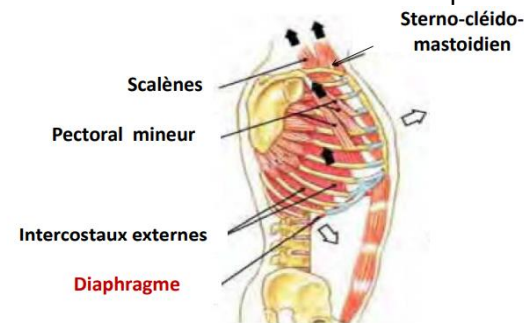
- 75% de la ventilation
- Déplacement de **1cm mobilise 250 cm² d'air**

b) – Les muscles intercostaux externes :

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

c)- Les muscles inspiratoires accessoires :

- **Muscle sterno-cléido-mastoïdien** : relève le sternum
- **Muscles scalènes** : relèvent les côtes supérieures
- **Muscles pectoraux, trapèze, dentelé** :
- Mise en jeu en cas d'inspiration forcée (ventilation $\geq 50L/min$)
- Sollicités en cas d'insuffisance respiratoire chronique



Inspiration	<ul style="list-style-type: none"> - 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
--------------------	---

B. Les muscles expiratoires :

Expiration	<ul style="list-style-type: none"> - Phénomène passif - Devient actif en cas d'expiration forcée - Contraction des muscles intercostaux internes (anse de seau) - Diminution du volume du thorax
-------------------	---

SUM-UP :

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-mastoïdien - Scalènes - Trapèze, dentelé 	Expiration forcée : <ul style="list-style-type: none"> - Muscles intercostaux internes - Muscles de l'abdomen (droit de l'abdomen, oblique interne et externe et le transverse de l'abdomen)

Contraction des muscles respiratoires

=> Mobilisation de la cage thoracique

Mais : Pas d'adhérence anatomique entre la cage thoracique et les poumons

Comment se fait la transmission des mouvements thoraciques aux poumons ? -> La plèvre

5)- La plèvre

La plèvre est une séreuse qui enveloppe le poumon

• Feuillet viscéral (1) :

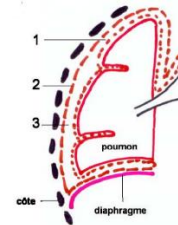
Recouvre la face externe du poumon

• Feuillet pariétal (2) :

Recouvre la face interne de la cage thoracique et le médiastin

• Espace pleural (3) :

Entre les deux feuillets



- Espace pleural : virtuel

- Sécrétion de liquide pleural

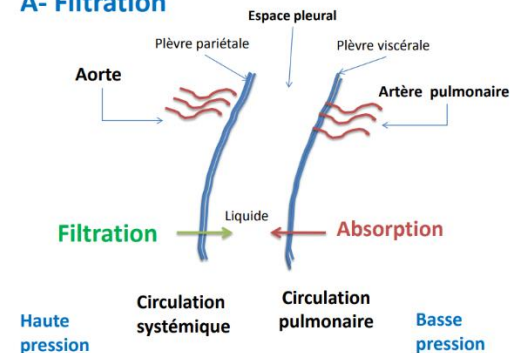
- Sujet normal : environ 2ml de liquide réparti sur toute la surface de la plèvre

- Réabsorption permanente par les lymphatiques

a) - Filtration :

V - La plèvre

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 atmosphérique
- 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
- En pathologie :

Pneumothorax : présence d'air dans l'espace pleural

Pleurésie : présence de liquide dans la cavité pleurale

Chapitre 2 : La ventilation

Définitions :

- La ventilation 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'expansion et de retrait de la cage thoracique.

1)– Structures thoraciques impliquées :

a)– **Le squelette osseux :** les côtes et les vertèbres

- **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

b)– Les muscles respiratoires :

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

c)– Les bronches :

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

d)– Les plèvres :

- Transmission des mouvements de la cage thoracique aux poumons

2)- La mécanique ventilatoire :

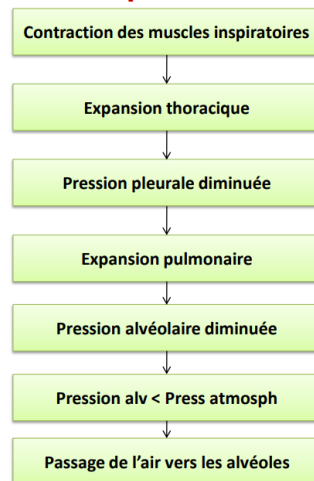
a)- Inspiration :

- 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 250cm² d'air**
- Les muscles intercostaux **externes** :
 - Leur contraction élève la côte en haut et en dedans (Anse de seau)
- Les muscles inspiratoires **accessoires** :
 - **Sterno-cléido-mastoïdien, scalène**, pectoraux, trapèze, dentelé
 - Mis en jeu en cas d'inspiration forcée (ventilation $\geq 50\text{L/mn}$)
 - Sollicités en cas d'insuffisance respiratoire chronique

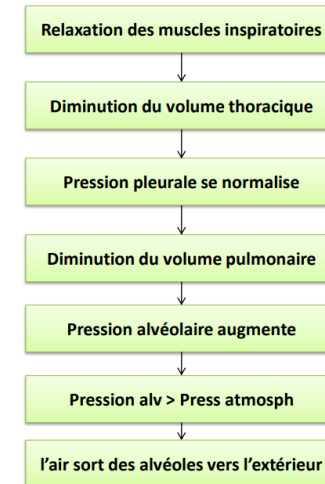
Inspiration



b) - Expiration :

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

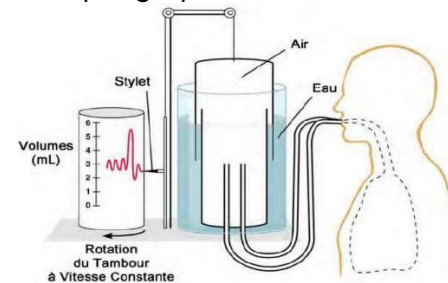
Expiration



3)- Volumes et débits :

a)- Moyens de mesure :

- Le spirographe (courbe volume-temps)



*spiro- : respirer

- Le pneumotachographe
- Le pléthysmographe
- Le minidébimètre de pointe

- Types de spiromètres :

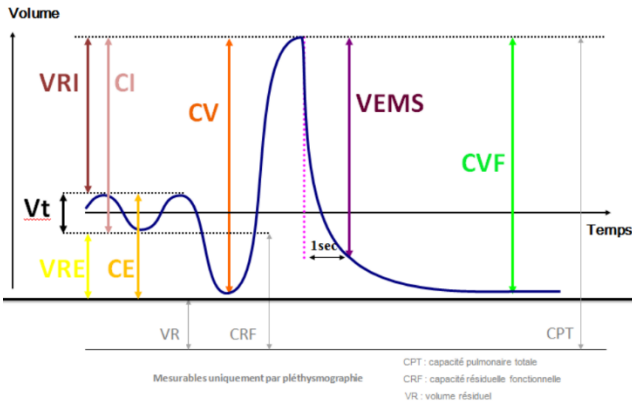


Spiromètre à cloche ou à eau



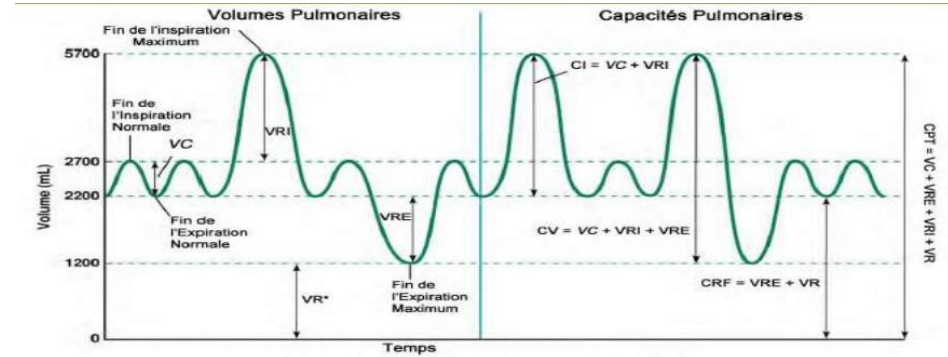
Spiromètre électronique

b)- Les volumes pulmonaires :



Les volumes mobilisables :

- **Volume courant Vt** : ($V_t = 500 \text{ ml}$) - Le volume d'air mobilisé par une inspiration ou une expiration normale.
- **Volume de réserve inspiratoire** ($VRI = 2 \text{ Litres}$) - Le volume d'air mobilisé par une inspiration profonde faisant suite à une inspiration normale.
- **Volume de réserve expiratoire** ($VRE = 1,5 \text{ Litres}$) - Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde faisant suite à une expiration normale.
- **Capacité inspiratoire** ($CI = V_t + VRI$) - Le volume d'air mobilisé par une inspiration profonde faisant suite à une expiration normale
- **Capacité expiratoire** ($CR = V_t + VRE$) - Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde faisant suite à une inspiration normale
- **Capacité vitale** ($CV = V_t + VRE + VRI = 4 \text{ à } 5 \text{ Litres}$) - Le volume d'air mobilisé par une expiration profonde après une inspiration profonde (ou inspiration profonde après expiration profonde)



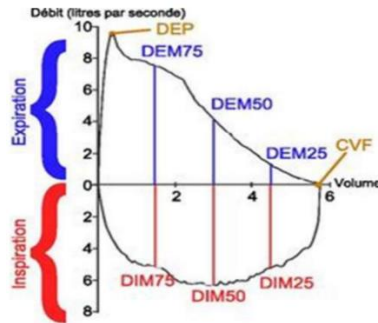
Les volumes non mobilisables :

- **Volume résiduel** ($VR = 1,2 \text{ à } 1,4 \text{ Litres}$) - 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.
- **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)

Les 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



5)- 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)

6)- Le travail respiratoire :

- Force qui **doit vaincre les résistances** :
 - Résistances élastiques du poumon
 - Résistance 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.

7)- 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 :

- 2,6 Litres/mn/m² de surface corporelle.
- 70 à 75 % de la ventilation 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.

+ L'espace mort physiologique :

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

+ Rapport ventilation/perfusion (VA/Q) :

VA = 2,5 Litres/min, Q = 3,2 Litres/min → VA/Q = 0,8

- Zone **mal ventilée**, bien perfusée → Effet **shunt**
 - Zone **mal perfusée**, bien ventilée → Effet **espace mort**
- En position debout :
- + Apex bien ventilés, mal perfusés (VA/Q = 3)
 - + Bases mal ventilées, bien perfusées (VA/Q = 0,6)

8)- Syndromes fonctionnels respiratoires :

Syndrome obstructif

- Défini par le rapport de Tiffeneau (VEMS/CV < 70%)
- Le VEMS est abaissé, en dessous de 80% de la valeur théorique.
- Le DEP est abaissé.
- Les DEM-75, 50 et 25 diminués.
- La CV est normale ou légèrement diminuée.
- La CPT est normale.
- Le VR est augmenté.
- VR/CPT augmenté.
- **Au total :**
 - Les débits sont diminués = DEP, DEM... (+VEMS)
 - Les volumes sont normaux ou augmentés.

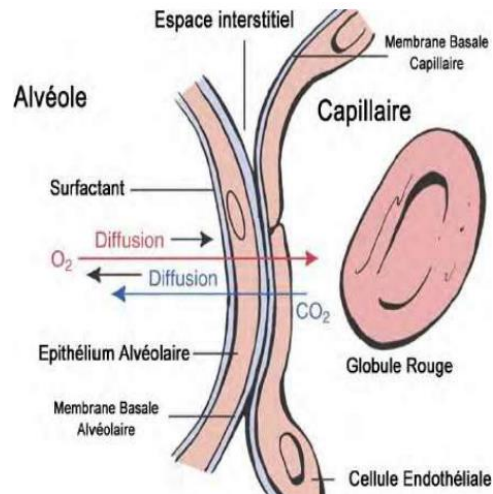
Syndrome restrictif
<ul style="list-style-type: none"> - CPT diminuée. - CV (Vt, VRI, VRE) diminués. - VR diminué. - VR/CPT normal. - VEMS normal (ou légèrement diminué). - VEMS/CV normal ou augmenté. <p>• Au total :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les débits sont normaux. (+VEMS) - Les volumes sont diminués.
Syndrome mixte
<p>Syndrome obstructif (VEMS/CV < 70%)</p> <p>+</p> <p>Syndrome restrictif (CPT < 80%)</p>

Chapitre 3 : La diffusion alvéolo-capillaire ou Hématose

1)- Généralités :

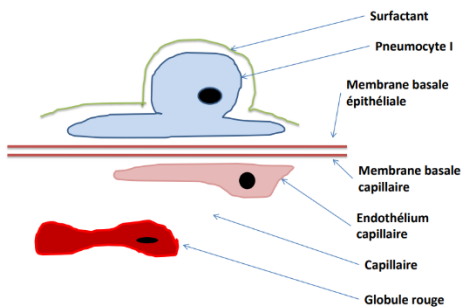
- Correspond aux échanges gazeux à travers la **membrane alvéolo-capillaire**.
- Passage de l'oxygène (O₂) de l'alvéole vers le capillaire pulmonaire (sang).
- Passage du dioxyde de carbone (CO₂) du sang vers l'alvéole.
- Phénomène qui dépend de plusieurs facteurs.
- La structure de l'appareil respiratoire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

2)- 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. Epithélium alvéolaire (pneumocyte I)
7. Surfactant



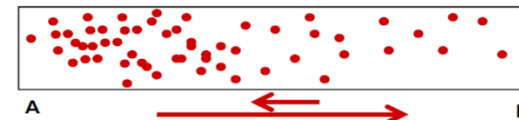
3)- Rappel sur les lois de la diffusion :

- 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**.

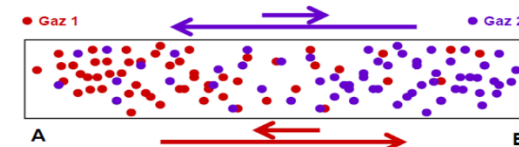
+ Le phénomène est similaire à celui observé pour la diffusion des molécules en solution dans un liquide, mais on n'exprime pas la quantité de gaz en concentration, mais en pression.

- 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.

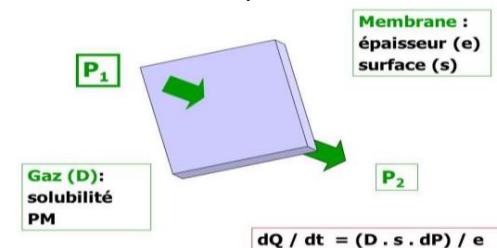


- Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte de façon indépendante.



- 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)



- La diffusion d'un gaz à travers un tissu :

- Proportionnelle au **gradient de concentration** (ou de *pression* : $P_1 - P_2$) 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**.

4)- Facteurs de la diffusion :

1- Nature du gaz

2- Le gradient de pression au niveau de la MAC

3- L'épaisseur de la MAC

4- La surface de contact air-sang

5- Le temps de contact air-sang

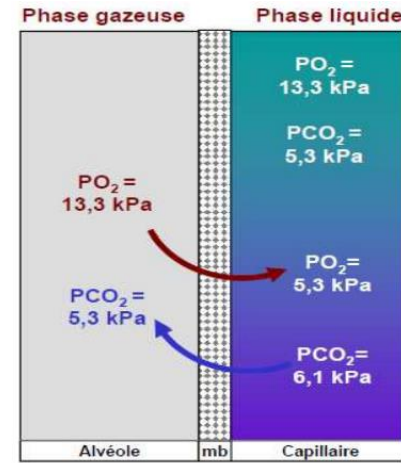
a) - Nature du gaz :

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

b) - 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.

- Le CO₂ diffuse du sang vers l'alvéole, car sa pression partielle au niveau du sang est plus élevée.

	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)

c)- L'épaisseur de la MAC : "e"

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

Exp : épaissement de la MAC entraîne une diminution de la diffusion (en cas de fibrose pulmonaire)

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

- Correspond à la surface des alvéoles ventilés et perfusés (75 m²)

- La diffusion est **proportionnelle à la surface d'échange**.

e) – 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 la 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 1mmHg.
 - > unité : ml/mn/mmHg

- Diffusion de l'O₂ : la diffusion de l'O₂ est de 20ml/min/mmHg.
- Diffusion du CO₂ : Le CO₂ est 20 fois plus diffusible que l'O₂.

- **Diffusion de l'O₂** : Grand 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)

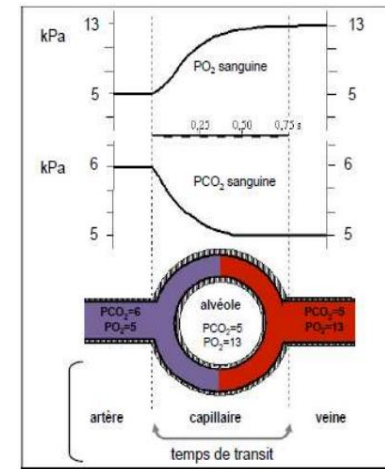
- Mesure de la diffusion alvéolo-capillaire : Diffusion libre du CO (DLCO)

- Pour l'O₂, la diffusion est de 20ml/mn/mmHg.
- Le CO₂ est 20 fois plus diffusible que l'O₂.
- La diffusion libre de CO dépend de :

1. L'âge (DLCO diminue avec l'âge)
2. Le sexe
3. La surface corporelle

4. La fixation du CO sur l'hémoglobine Hb

PAS DE LA FREQUENCE CARDIAQUE OU TEMPERATURE OU TENSION ARTERIELLE !!



SUM-UP : La diffusion

Proportionnelle	Inversement proportionnelle
<ul style="list-style-type: none"> - Gradient de concentration - Constante de diffusion qui caractérise les gaz - Solubilité du gaz - Gradient de pression de part et d'autre de la membrane alvéolo-capillaire - Surface d'échange - Temps de contact 	<ul style="list-style-type: none"> - Masse moléculaire du gaz - e² de la MAC - Poids moléculaire

Chapitre 4 : Transport des gaz

1) - 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%)

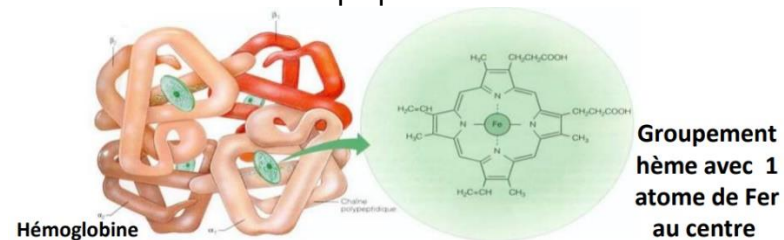
b. Transport du gaz carbonique

- 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%)

2)- Structure et propriétés de l'hémoglobine :

A) - 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.
- 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.

SUM-UP - Affinité: CO₂ < O₂ < CO

B)- Fer :

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

3)- 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 : 0,10 ml/100 ml
- Forme de passage **obligatoire** qui permet la diffusion pour les **échanges gazeux**.
- Pour PaO₂ = 13 kPa (100 mmHg) -> Volume d'O₂ dissout = 0,003 ml/ml de sang artériel donc **0,3 ml/100 ml sang artériel**.
- Consommation d'O₂ = 300 ml/min
- => **Insuffisant pour oxygéner les tissus correctement.**

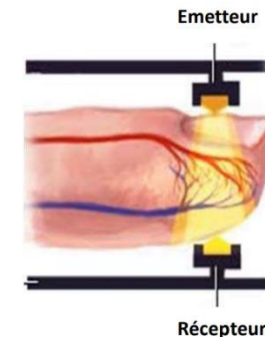
b)- Forme combinée :

- 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.
- Il y'a 15g d'Hb pour 100 ml de sang
- 1g d'Hg fixe = 1,34 ml d'O₂ en conditions réelles
- **Capacité totale de fixation : 20 ml d'O₂/100 ml de sang.**
- > **Le contenu total du sang en O₂ dépend principalement de la forme combinée de l'O₂.**

c)- Saturation de l'Hb :

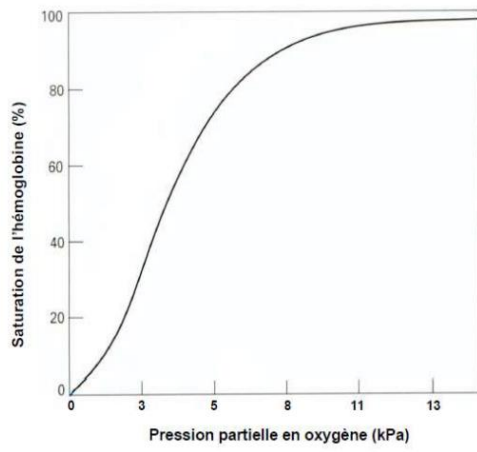
- 1 molécule d'Hb = 4 chaînes comprenant un atome de fer qui fixe l'O₂.
 - > 1 molécule d'Hb peut fixer 4 molécules d'O₂.
 - La capacité maximale n'est pas atteinte systématiquement.
 - Saturation de l'Hb en O₂ (SaO₂)
- $$SaO_2 = \left(\frac{\text{Quantité d'O}_2 \text{ liée à l'Hb}}{\text{quantité maximale}} \right) \times 100$$
- >> **SaO₂ = 95%** (saturation artérielle)
 - >> SvO₂ = 70% (saturation veineuse)

c)- Saturation en O₂ : 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 (mais proportionnel à l'affinité)
- ↓ pH → ↑ P50 : et donc diminution de l'affinité.

3. 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.

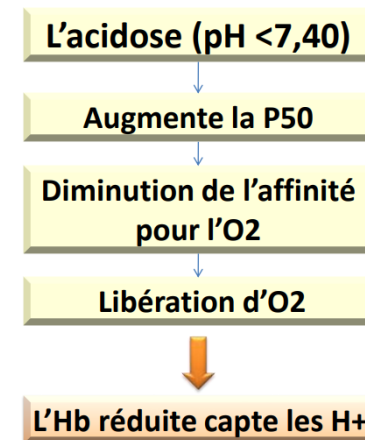
5. Le 2-3 DPG :

- DPG : métabolite de la glycolyse dans les GR.
- L'augmentation du 2-3 DPG 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 aux variations de pH
+ pH diminue donc P50 augmente



SUMP-UP : Affinité

Proportionnel	Inversement proportionnel
pH	P50, PCO ₂ , T°, 2-3 DPG

4)- 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

- Coefficient de solubilité du CO₂ > celui de l'O₂ (près de 20 fois)
- CO₂ dissout représente 5% du CO₂ total dans le sang veineux

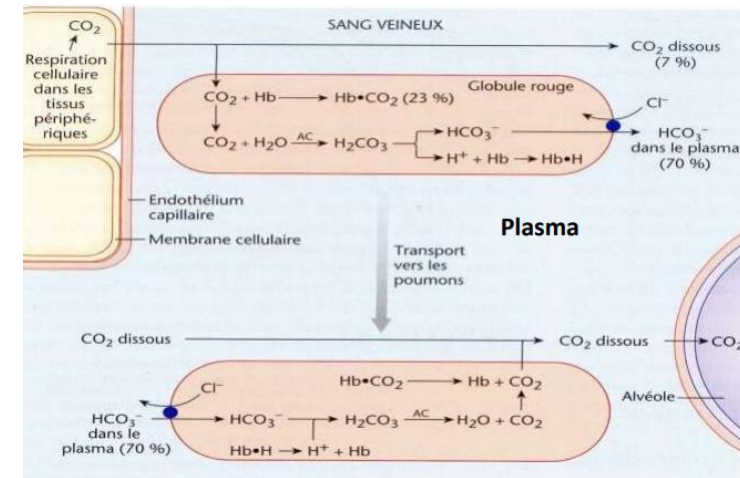
b)- Forme combinée

1. Après réaction chimique : Les bicarbonates



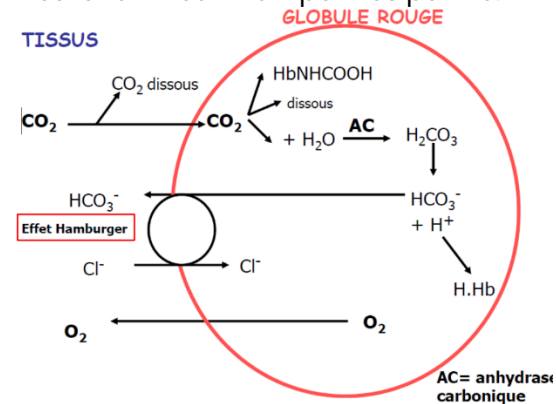
AC

- 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



• 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.



• Dans le plasma :

- Les ions HCO₃⁻ sont abondants ++

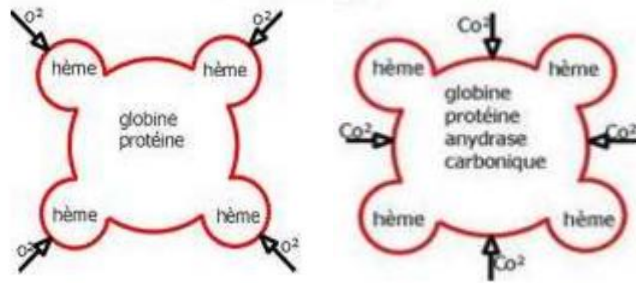
2. Combinée à l'hémoglobine : L'hémoglobine carbaminée

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

HbNH₂ + CO₂ ⇌ HbNHCOOH (carbamates)

Représente 5% du CO₂ transporté dans le sang veineux.

La liaison est facilitée par la forme réduite de L'Hb = **Effet Haldane.**

5)- 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 < pH < 7.42

- Acidose ou Alcalose = DANGER

- Vie possible si 6.8 < 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) :



$$pH = 6.10 + \log (HCO_3^-) / (CO_2)$$

b)- Acidose respiratoire :

- Réduction de l'élimination pulmonaire du CO₂.
- Augmentation de la PCO₂

Rappel : $[H^+] = K \cdot PCO_2 / HCO_3^-$



- ↑ PCO₂ => CO₂ et H₂CO₃, donc **d'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 :

- Augmentation d'acides dans le sang ou perte de base
 $[H^+] = K \cdot PCO_2 / HCO_3^-$ (**diminution de HCO_3^-**)
- Les bicarbonates plasmatiques diminuent
- Charge acide tamponnée :
 + 40% de la charge est tamponnée dans le milieu extracellulaire (HCO_3^- / CO_2)
 + 60% par le secteur cellulaire (dont 8% par Hb) et l'os.
- PCO_2 augmente dans un premier temps puis le CO_2 est éliminé par une hyperventilation $\Rightarrow PCO_2$ chute (15 - 20 mmHg) \rightarrow ce qui normalise le pH
 \Rightarrow **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 CO_2 .

\Rightarrow Acidose métabolique compensée

Exp 2 : Acidose respiratoire

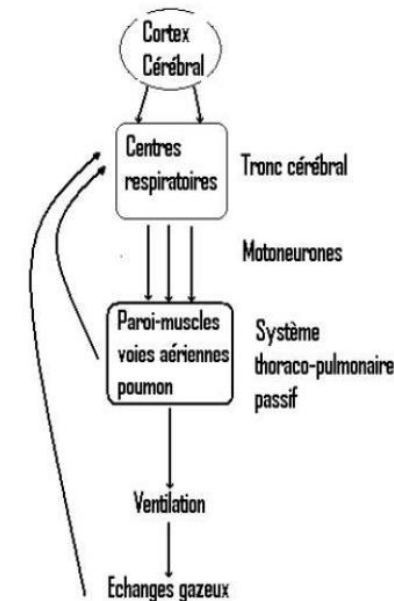
- Diminution de l'élimination du CO_2 \rightarrow Augmentation du CO_2 et PaO_2
- Le rein réagit en 48h \rightarrow réabsorbe les bicarbonates et H^+ contre Na^+
- H^+ se combine à NH_3 fournis par la glutamine $\rightarrow NH_4^+$ augmente dans les urines
- Si le mécanisme est débordé, le pH reste bas

\Rightarrow Acidose respiratoire décompensée

Chapitre 5 : Contrôle de la respiration

1)- Généralités :

- Activité respiratoire rythmique, automatique et permanente.
- Prend naissance dans des réseaux neuronaux du tronc cérébral.
- Modifiée par de multiples facteurs.
- Le contrôle de la respiration se fait au niveau des centres respiratoires, dans le 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.



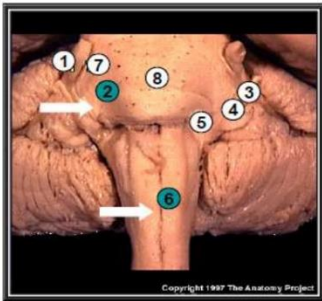
- Système automatique qui est modulé par un certain nombre de signaux :
- + L'efficacité des échanges gazeux est perçue par :
 - **Chémorécepteurs périphériques** (carotide et aorte)
 - **Chémorécepteurs centraux** (centres respiratoires)
- + Qui sont sensibles au niveau d'O₂ et de CO₂.
- En fonction 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.

2)- Centres respiratoires :

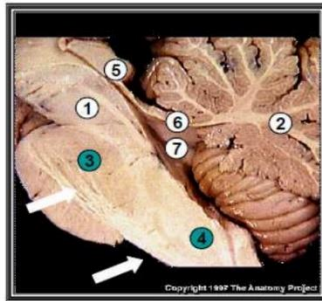
- Les principaux centres nerveux qui contrôlent la respiration sont situés dans :

+ Le bulbe rachidien

+ La protubérance annulaire



1&7 racine du V
2 protubérance
3 nf vestibulochochléaires
4 VII
6 bulbe rachidien
8 sillon basilaire



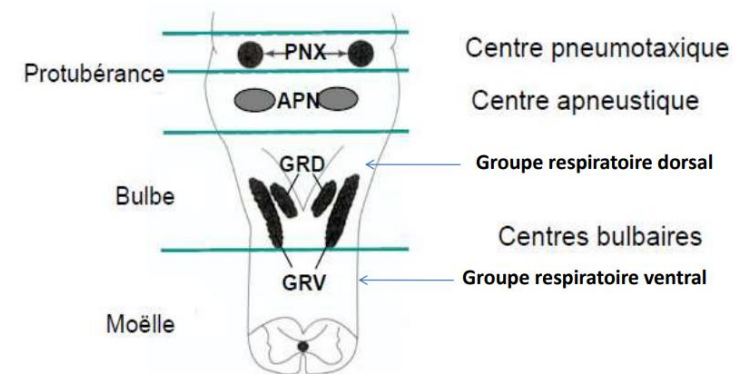
1 mésencéphale
2 cervelet
3 protubérance
4 bulbe rachidien
5 tubercules quadrijumeaux
6 voile médullaire supérieur
7 4^{ème} ventricule

Centres bulbares :

- 1- Centres inspiratoires
- 2- Centres expiratoires

Centre pneumotaxique

Centre apneustique



A- Centres bulbares :

2 amas de neurones respiratoires :

- **Groupe respiratoire dorsal** : neurones inspiratoires
- + intégration des infos périphériques
- + efférences vers les motoneurones phréniques et GRV
- **Groupe respiratoire ventral GRV** : neurones inspiratoires et expiratoires

B- Centre pneumotaxique (PNX) :

- Situé dans la partie supérieure du pont.
- Module l'activité des centres bulbares en fonction des informations centrales et périphériques.

C- Centre apneustique (APN) :

- Excitateur des centres bulbares.
- Rôle mal connu.

3)- Automatisme respiratoire :

- Automatisme respiratoire assuré par les centres bulbaire -> 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.

4)- 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 rétrocontrôle négatif.

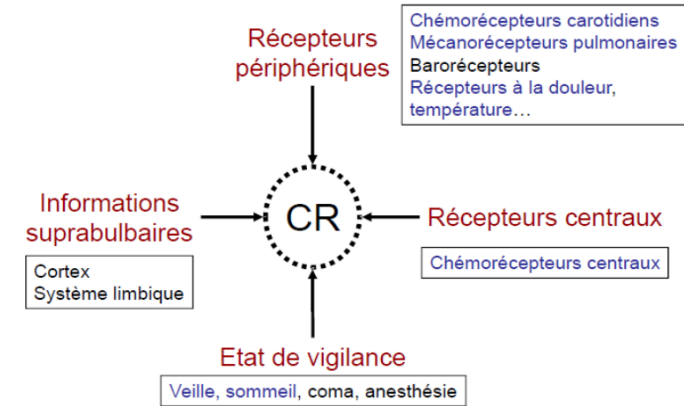
a) - Régulation chimique :

- PaO_2 et $PaCO_2$ doivent rester **constantes**.

- Le système réagit de telle manière que :

+ si $PaO_2 \downarrow$ ou $PaCO_2 \uparrow$: Hyperventilation

+ si $PaO_2 \uparrow$ ou $PaCO_2 \downarrow$: Hypoventilation



- Régulation chimique de la ventilation :

+ PaO_2

+ $PaCO_2$

+ pH

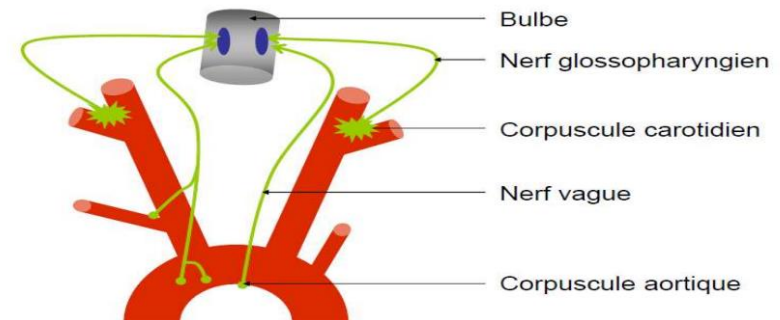
- Récepteurs périphériques et centraux

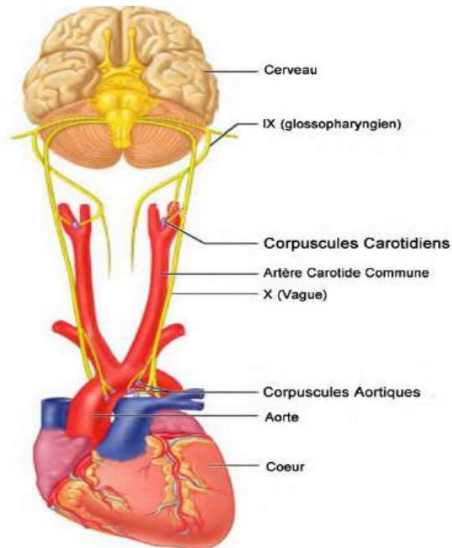
- Importance pendant le sommeil

- Chémorécepteurs périphériques

+ situés dans les **corpuscules carotidiens**

+ **sensibles surtout aux variables de PaO_2** (mais aussi de pH et à l'augmentation de la $PaCO_2$) : influx transite par le IX, arrive aux centres bulbaires.





- Chémorécepteurs centraux

- + situés à la surface ventrale du bulbe.
- + stimulés par les ions H^+ (PCO_2) présent dans le LCR.
- + **ne sont pas sensibles à la PaO_2 .**
- + stimulent les neurones inspiratoires.

- Mécanorécepteurs pulmonaires

- + 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.

N'INFORMENT PAS SUR LE NIVEAU DE PAO_2 !!

- Mécanorécepteurs pharyngés

- + situés dans la paroi pharyngée.
- + sensibles à l'étirement.
- + **réflexe dilatateur du pharynx** : activation réflexe des muscles pharyngés dilatateurs en réponse à une pression intraluminaire négative.

A)- Par les chémorécepteurs centraux :

- Proches des centres respiratoires bulbaires
- Sensibles aux variations de la $PaCO_2$ et du pH du sang artériel et du LCR.
- Lorsque la $PaCO_2$ augmente, le CO_2 diffuse dans le LCR et forme rapidement H_2CO_2 qui se dissocie en H^+ et HCO_3^-
- Les ions H^+ stimulent les chémorécepteurs et induisent **une hyperventilation réactionnelle.**

B)- Par les chémorécepteurs périphériques :

- Détectent une diminution de la PaO_2 .
- Situés au niveau de la division des artères carotides et de la crosse de l'aorte.

C)- Réponse ventilatoire à l'Oxygène :

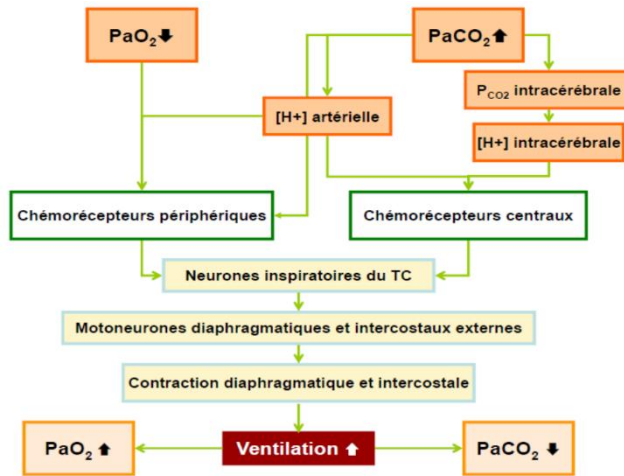
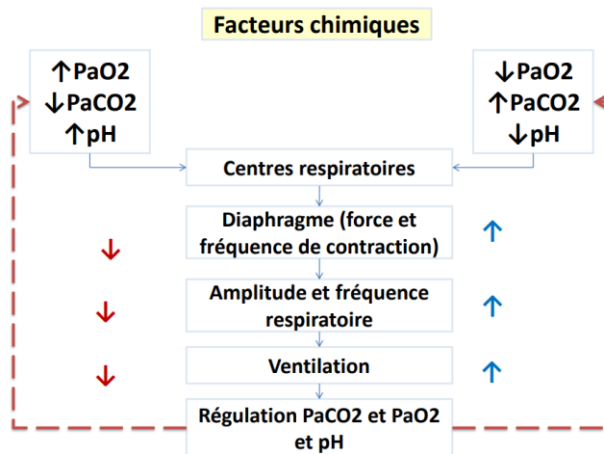
- Une diminution de la PaO_2 entraîne une augmentation de la ventilation.
- Alors que l'augmentation de la PaO_2 n'affecte pas la ventilation.

D)- Réponse ventilatoire au CO_2 :

- Une diminution de la $PaCO_2$ (hypocapnie) entraîne une diminution de la ventilation.
- Une augmentation de la $PaCO_2$ (hypercapnie) entraîne une hyperventilation.

E)- Réponse ventilatoire au pH :

- Une injection intra veineuse (IV) de HCl à un chien entraîne une augmentation de la ventilation.
- La diminution du pH (acido-cétose diabétique) entraîne une hyperventilation alvéolaire.
- Fait intervenir les chémorécepteurs périphériques.



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.