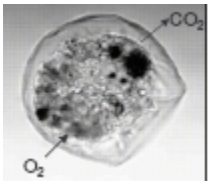
Physiologie générale PCEM1

Physiologie de la respiration.

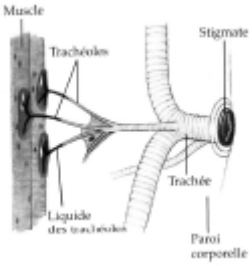
La respiration est un phénomène très répandu au niveau des êtres vivants. Elle se définit par des échanges gazeux entre cellules et atmosphère.

Évolution de l'appareil respiratoire entre les différentes espèces



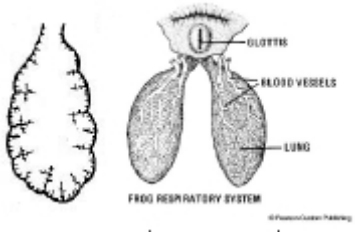
> Chez les **êtres unicellulaires**, il est simple : les échanges se font directement à travers la membrane (très perméable aux gaz). La cellule capte l'O_2 et rejette le CO_2 produit via le métabolisme.

> Chez les **êtres pluricellulaires** (insectes, batraciens, homme), la respiration est plus complexe car il est nécessaire d'avoir plus d'échanges gazeux (surface plus grande). Les cellules sont organisées en organes.



✗ ***Insectes*** : on peut observer les prémisses de l'arbre de Rouchis (= système respiratoire chez l'Homme) puisque la respiration se fait par la peau et il y a déjà une trachée (donnant des trachéoles par divisions successives). Les échanges gazeux se font au niveau des liquides qui existent au bout des trachéoles.

✗ ***Batracien*** : le système est encore un peu plus évolué, on voit apparaître des systèmes multipliant la surface d'échange : présence au niveau de sacs de replis membranaires qui augmentent cette surface; apparition d'alvéoles sur lesquelles cheminent des vaisseaux permettant des échanges entre l'air contenu à l'intérieur du sac et les capillaires sanguins qui parcourent le poumon.



✗ ***Homme*** : système très évolué : le poids et la surface sont très importants,

Il y a besoin de beaucoup d'O_2 pour les organes,

Et d'un système d'élimination du CO_2.

Les échanges entre l'air et le sang dans les parties terminales de l'arbre bronchique (alvéoles) nécessitent la mise en place de systèmes de voies de conduction de l'air :

Voies aériennes supérieures : nez, pharynx, trachée extrathoracique, puis vient la trachée intrathoracique qui donne ensuite par divisions dichotomiques et successives les bronches principales, segmentaires, les bronchioles puis les alvéoles (le parenchyme pulmonaire constituant l'ensemble des alvéoles).

Si on dépliait les alvéoles, on aurait une surface de 100 m² !!

Détail des étapes...

On a décrit ici un système ventilatoire c'est-à-dire comment on est capable d'apporter, de renouveler l'air entre extérieur et intérieur des poumons : système de conduction.

Ce système permet la respiration : échange O_2/CO_2 au niveau des alvéoles.

Il y a donc une étape nécessaire chez l'homme qui est la **ventilation** avant d'arriver à l'étape respiratoire (=étape des échanges gazeux).

Il y a encore une étape avant que cette respiration pulmonaire devienne respiration cellulaire puisque l'O_2 doit être transporté via la ***circulation pulmonaire.***

La circulation pulmonaire se jette au niveau du cœur gauche qui ensuite se distribue au niveau des organes. L'O_2 est transporté à la fois sous forme ***dissous*** et pour une très faible proportion. Le maximum de transport se fait par l'***hémoglobine (Hb).***

Sang artériel	PO_2 90 mmHg	***Sang veineux***	PO_2 40 mmHg
	PCO_2 40 mmHg		PCO_2 45 mmHg

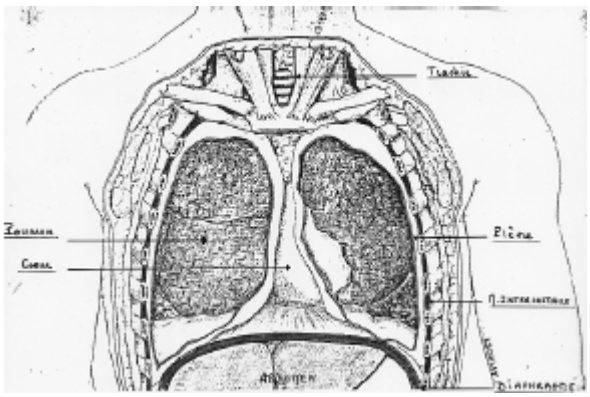
Il y a donc au niveau périphérique un échange gazeux qui sera égal dans des conditions de repos aux échanges gazeux qui se produisent au niveau des poumons.

En fait, c'est l'utilisation de l'O_2 au niveau périphérique qui va régler la respiration pulmonaire. Dans les conditions de repos: $VO_{2\ périphérie} = VO_{2\ bouche}$ (! attention, ce sont des débits, non des volumes!).

Pour que l'air rentre (inspiration) et qu'il sorte (expiration) du corps, on a besoin d'un système mécanique. Ainsi, avant de parler de la ***respiration***, il faut parler de la ***ventilation*** et de la ***mécanique ventilatoire.***

Anatomie du thorax

- L'arbre bronchique se situe dans le thorax, les poumons sont situés de part et d'autre du cœur.



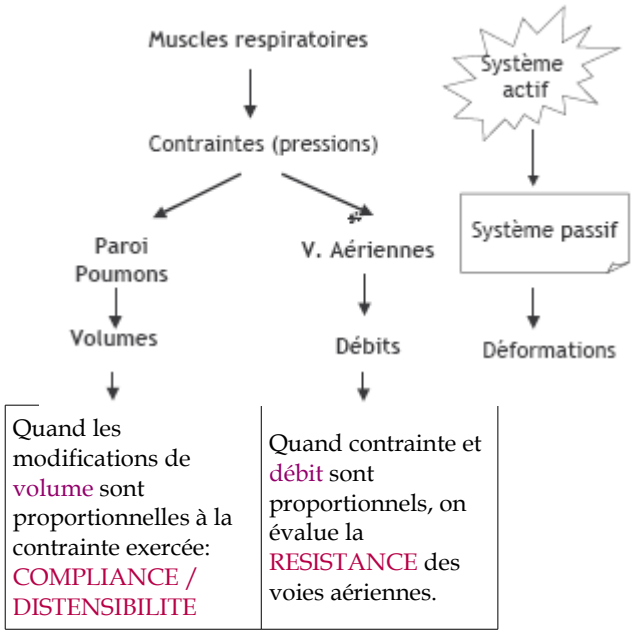
Ce système est clos grâce à la plèvre et aux structures squelettiques et musculaires (cage thoracique, sternum, rachis en postérieur, diaphragme séparant les poumons de l'abdomen en bas, muscles sterno-cléïdo-mastoïdiens s'insérant sur le sternum et la clavicule en haut...).

Ce système est donc fermé, c'est-à-dire que toute augmentation de volume va être générée avec une différence de pression (car PV = cte).

- Les poumons correspondent à la somme des alvéoles pulmonaires, c'est une extrémité de l'arbre aérien de conduction. Sur leur surface se trouve la ***plèvre viscérale*** à laquelle la ***plèvre pariétale*** est accolée. Entre les deux se trouve un espace virtuel: ***l'espace pleural.***

Note: que ce soit le péritoine ou la plèvre, on retrouve deux feuillets: le feuillet viscéral (viscères) du côté de l'organe à protéger et le feuillet pariétal (paroi) du côté de la paroi interne du corps. N'inversez pas les deux, c'est une faute stupide qui peut coûter cher!

Mécanique ventilatoire



Les muscles constituent un système actif qui déforme un système passif en modifiant la pression.
Le système étant fermé, cela entraîne une variation de volume de la cage thoracique (lorsque le système passif est la paroi des poumons) et de débit dans les voies aériennes.
Si les muscles respiratoires sont non fonctionnels, cela entraîne la mort puisque le système passif seul ne peut pas se déformer sans les contraintes de variation de pression -> pas de ventilation possible.

Détail des muscles respiratoires

Comme nous venons de le voir, lors de la respiration, les structures actives sont les muscles.
C'est leur contraction /activation qui va permettre d'assurer la ventilation.

Muscles inspiratoires	Muscles expiratoires
diaphragme (++)	muscles intercostaux **in**ternes (les seuls au niveau du thorax)
muscles intercostaux **ex**ternes	La plupart sont abdominaux:
muscles sterno-cléïdo-mastoïdiens	muscle oblique interne
muscles scalènes	muscle oblique externe
(permettent élargissement de la cage en supérieur)	muscle grand droit
	Ces trois muscles sont utilisés lorsque l'on veut majorer l'expiration.

Quand on expire calmement, il n'y a pas utilisation des muscles abdominaux mais lorsqu'on veut faire une expiration forcée / prolongée, on est obligé de contracter les muscles abdominaux.

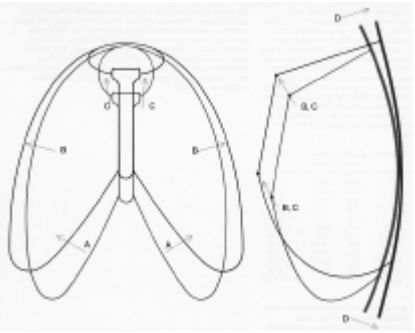
Muscles des voies aériennes supérieures

Situés à l'extérieur du thorax, ils font quand même partie de la mécanique ventilatoire. Ils ont un fonctionnement extrêmement différent des muscles intrathoraciques. Globalement, lors de l'inspiration, la pression à l'intérieur des voies aériennes est ***négative,*** c'est une pression qui a tendance à ***collaber*** la paroi du larynx.
Ainsi, pour la maintenir suffisamment ouverte, on a besoin de ***muscles dilatateurs***. Leur contraction au moment de l'inspiration permet de laisser ouvertes ces voies extrathoraciques avec un diamètre important.

!! Note: On ne peut dissocier voies aériennes extra et intra thoracique malgré la différence de fonctionnement de leurs muscles !! Il faut donc une coordination des muscles dilatateurs avec l'action du diaphragme.

Action des muscles ventilatoires et physiologie du thorax

Ces muscles s'insèrent sur la cage thoracique. Toute modification de la contraction va modifier le volume de la cage (induisent d'abord des modifications au niveau du squelette sur lequel ils sont attachées).



De face: déplacement en dehors de la partie inférieure du thorax (ouverture).
Cet élargissement (grâce aux muscles de la partie supérieure du thorax) intéresse aussi cette partie supérieure mais moins que l'inférieure. Globalement, le volume de la cage thoracique augmente.

En sagittal: la contraction de ces muscles induit une verticalisation du rachis (repoussé vers l'arrière). Le sternum est projeté vers l'avant, la cage thoracique est attirée vers le haut.

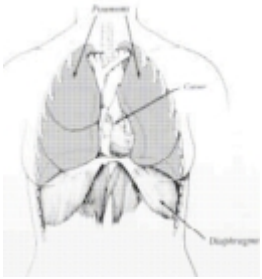
Face *Sagittal*

A: élargissement de l'ouverture thoracique inférieure.
B: élargissement latéral du thorax.
C: déplacement cranial du thorax.
D: extension de la colonne vertébrale.

Finalement, il y a à la fois un élargissement du diamètre transversal, du diamètre antéro postérieur et du diamètre vertical -> ***Augmentation du volume de la cage thoracique.***
En expiration passive, ces muscles reprennent leur position initiale.

Quand il y a une contraction des muscles abdominaux, le contenu abdominal va aller appuyer sur le diaphragme et le faire remonter dans la cage thoracique-> ***Expiration active.***

Détail du diaphragme



C'est le muscle de l'inspiration principal. Il permet d'alterner inspiration / expiration sans qu'on en ait conscience c'est-à-dire que c'est un muscle à ***commande automatique*** (comme le muscle cardiaque).

Il comprend deux hémi-coupoles: une coupole diaphragmatique droite et une gauche. Ces deux coupoles sont convexes vers le haut et la coupole diaphragmatique droite est un peu plus haute que la gauche car sous la droite se trouve le foie qui appuie et la remonte.

Composition macroscopique

Des parties minces s'insèrent à la fois sur le sternum et la partie interne des côtes.
= PARTIE COSTALE, mince, antérieure.

Une partie plus épaisse s'insère sur le rachis au niveau de L1-L2.
= PARTIE CRURALE, postérieure, épaisse.

Les fibres issues à la fois des parties crurale et costale se rassemblent sur le sommet de la coupole diaphragmatique pour donner une PARTIE TENDINEUSE.

C'est un lieu de passage important: aorte, veine cave inférieure, œsophage.
Ce muscle strié est, comme nous l'avons vu, à contrôle automatique: il se contracte à une fréquence respiratoire de ***12 à 14 fois par minute (= fréquence respiratoire)***, mais c'est également un ***muscle à contraction volontaire*** puisqu'on peut augmenter sa fréquence respiratoire (pour augmenter la ventilation).

Innervation

Elle est spécifique pour chaque hémicoupole. Elle se fait à partir des nerfs phréniques issus des motoneurones cellulaires au niveau C3-C4-C5.

L'atteinte d'un seul nerf phrénique n'empêchera pas la poursuite de la ventilation via l'hémicoupole controlatérale. Quand on a une section des deux nerfs phréniques (section de la moelle), il n'y a plus de contraction du muscle diaphragmatique.

Ventilation et muscles correspondants:

Le ***diaphragme*** entraîne une modification de volume et une ventilation dans la partie inférieure du thorax.
Quand on veut ventiler avec la partie supérieure du thorax, il faut utiliser des muscles dits accessoires que sont les ***muscles intercostaux para sternaux*** (=muscles intercostaux externes) et les ***scalènes.***
La contraction de ces muscles augmente le volume de la partie supérieure du thorax.
Lorsqu'il y a vraiment besoin de faire une inspiration forcée (=augmenter le volume inspiratoire), on recrute d'autres muscles= les sterno-cléïdo-mastoïdiens.

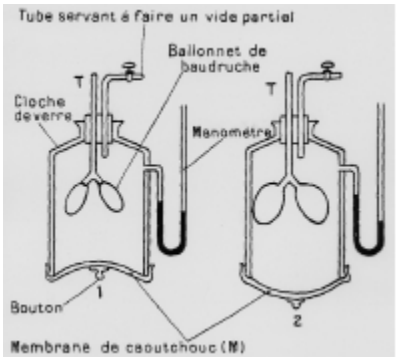
Note: le paragraphe sur ventilation et muscles entre en contradiction avec une des diapos du poly mais correspond à ce que la prof a expliqué en cours. Soyez donc attentif cette année!

Expiration

- Elle est ***passive***: en expiration normale, il y a juste un ***relâchement des muscles inspiratoires*** et notamment du diaphragme, qui revient à sa position initiale. Cela permet l'expiration. Il n'y a donc ***pas de mise en jeu des muscles expiratoires.***
- Par contre, dans certaines conditions où il y a besoin de faire une expiration plus prolongée= ***expiration active*** (lors d'un exercice musculaire par exemple) -> obligé d'utiliser des muscles expiratoires: intercostaux internes, grand droit, obliques interne et externe et le transverse permettant d'augmenter la remontée du diaphragme.

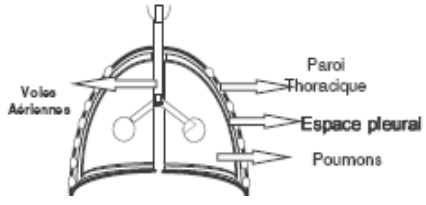
Modèle simplifié de mécanique ventilatoire

Une augmentation de volume dans un espace fermé entraîne une modification de pression au niveau intrathoracique.



Le modèle simplifié est représenté par une cloche de verre fermée en partie inférieure par une membrane en caoutchouc qui représente le diaphragme.
A l'intérieur de la cloche, un tube est relié à deux ballonnets correspondant aux poumons.

On peut mesurer la pression à l'intérieur de la cloche à l'aide d'un manomètre (mesure de la pression par rapport à la pression atmosphérique). On part d'un état où P_{int}= P_{atm} -> système de repos.
On tire la membrane vers le bas (qui équivaut à une contraction diaphragmatique lors de l'inspiration) -> Augmentation de V-> Diminution de P-> (dépression)-> induit une augmentation du volume des ballonnets.



Au niveau thoracique, c'est un système résultant de l'association de deux composantes différentes: squelette thoracique associé à la cage thoracique à l'intérieur de laquelle se trouvent les poumons (parenchyme pulmonaire) et les voies aériennes. Ces deux systèmes sont liés par l'intermédiaire de la plèvre viscérale et de la plèvre pariétale et finalement toute augmentation ou diminution du volume de la cage thoracique va entraîner des modifications parallèles au niveau du volume des poumons.

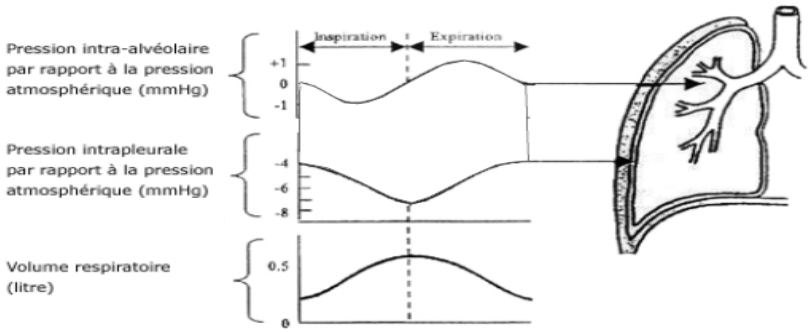
Les pressions

Les pressions mesurées
la pression alvéolaire (P_A)
la pression pleurale (P_{pl})
la pression périthoracique (P_B)

Les pressions calculées
la pression trans pulmonaire (P_{pl}-P_A)
la pression trans thoracique (P_{pl}-P_B)
la pression thoraco pulmonaire (P_A-P_B)

- La pression de référence, périthoracique, barométrique (car mesurée avec un baromètre), notée P_B est égale à 0. Elle est exprimée en cmH_2O, mmHg, kPa. Les autres pressions sont des pressions référencées par rapport à la pression barométrique. Les variations sont relativement faibles et mesurées avec un manomètre.
- Au cours de l'inspiration, augmentation de volume de la cage thoracique: environ +500mL.
  P_A diminue, P_{pl} diminue, ce qui correspond bien à une dépression intrathoracique.

- *Quand la bouche est ouverte et qu'il n'y a pas de débit dans les voies aériennes*: $P_A=P_B=0$
- *A l'inspiration:* P_A= -1mmHg
  La pression pleurale est toujours négative (même en absence de débit), toujours plus basse que la pression thoracique, ce qui explique que les feuillets viscéraux et pariétaux soient accolés (grâce à la dépression).
  A la fin de l'inspiration, en l'absence de débit dans les voies aériennes, P_A=0; la pression pleurale est à son point le plus négatif (-8) et on est au volume maximal de la ventilation
- *Au cours de l'expiration*, P_{pl} remonte à sa valeur initiale (-4): relâchement du muscle diaphragmatique qui remonte dans le thorax; P_A revient à +1mmHg; le volume pulmonaire retourne à sa valeur de base.



Pression pleurale: TOUJOURS NEGATIVE
Pression alvéolaire: négative à l'inspiration et devient positive à l'expiration. C'est ce qui génère le débit ventilatoire.

- C'est la pression négative par rapport à l'extérieur qui permet à l'air d'entrer à l'intérieur du poumon.
  A l'inverse, au cours de l'expiration, l'élévation de la pression alvéolaire fait qu'elle devient supérieure à la pression barométrique-> génère le mouvement expiratoire et la sortie d'air.

Ces variations de pression à l'intérieur du thorax sont possibles car il y a une modification parallèle entre le volume pulmonaire et le volume périthoracique (possible grâce aux deux feuillets de la plèvre qui sont accolés donc les mouvements se répercutent entre cage thoracique et parenchyme pulmonaire).

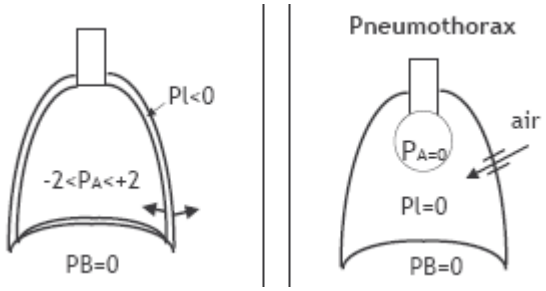
Si l'espace pleural n'avait pas une pression négative , les mouvements de la cage thoracique ne pourraient pas induire les mouvements du parenchyme pulmonaire.

- Prenons le cas d'un ***pneumothorax*** (=air à l'intérieur du thorax) à cause par exemple d'une brèche au niveau de l'espace intercostal.
  L'introduction d'air au niveau de l'espace pleural désolidarise totalement le poumon de la paroi thoracique car cette pression négative fait que les structures pulmonaires et thoraciques ne sont pas à ce que

l'on appelle le ***volume de relaxation*** (=volume de la structure lorsqu'aucune pression ne s'exerce sur elle).

Dans le cas du pneumothorax, la pression à l'intérieur de la plèvre est égale à 0 (puisque l'air extérieur rentre à l'intérieur de la cavité pleurale).

- Le volume de relaxation du poumon est un volume qu'on n'observe jamais dans les conditions normales (inférieur pour la relaxation).
- Le volume de relaxation de la paroi est plus important que son volume habituel.



On en conclue deux choses:

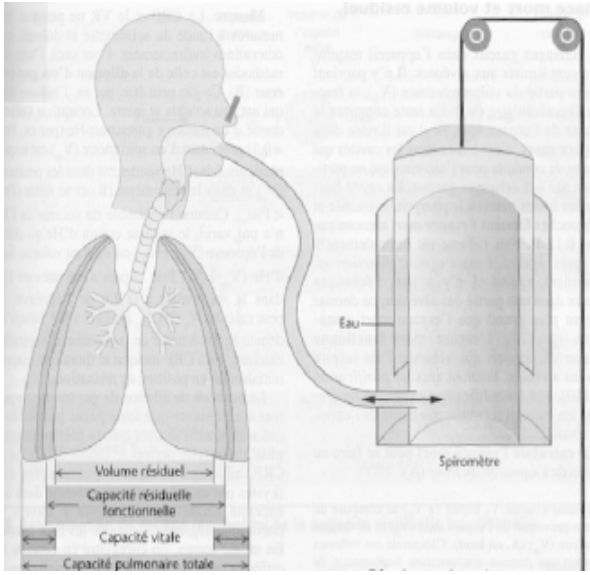
- ➔ dans des conditions normales, le poumon exerce une ***force de rétraction*** qui tend à le ramener vers son volume de relaxation.
- ➔ Alors qu'en ventilation courante, la force qui s'exerce sur la paroi thoracique est une ***force d'expansion*** qui tend à ramener la cage thoracique vers son volume de repos, de relaxation (qui est supérieur).

Spirométrie, Capacités et Volumes

Spirométrie et volume pulmonaire mobilisable

- La ***spirométrie*** est la mesure de l'air des différents volumes mobilisés au cours de la ventilation.

On pince le nez du sujet, on le fait respirer dans une cloche.



- Un sujet qui ventile calmement, fait une expiration et une inspiration de l'ordre de ***500mL=Volume courant ou VC.***
- Ensuite, on lui demande une expiration forcée (=expulsion du maximum d'air). Le volume qu'il est capable de mobiliser entre une expiration normale et une expiration forcée ***=Volume de réserve expiratoire ou VRE.***
- On lui demande de mobiliser le maximum d'air à l'inspiration ***=Volume de réserve inspiratoire ou VRI***(volume entre inspiration normale et forcée).
- Au cours de l'inspiration, on peut mobiliser environ ***3L***. Pour l'expiration, c'est un petit peu moins: ***environ 1,5L.***

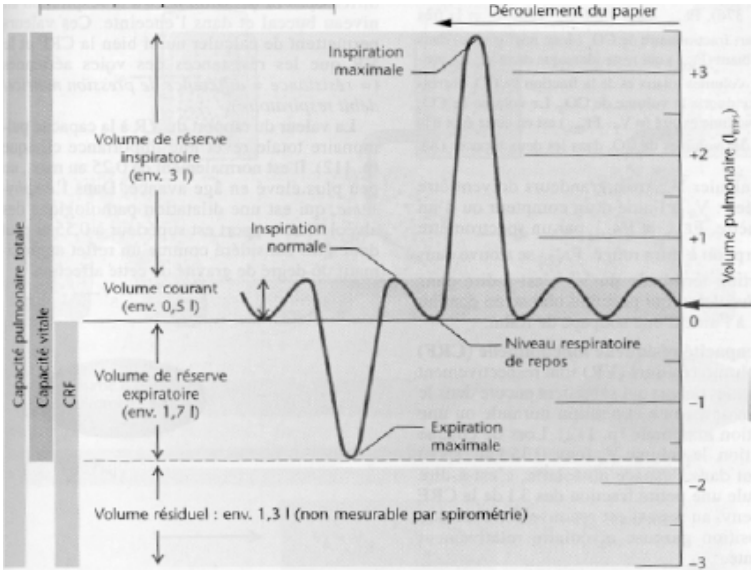
Quand on fait une expiration forcée, le poumon n'a pas expulsé la totalité de l'air (c'est pour cette raison qu'il n'est jamais à son volume de relaxation en conditions normales!): il reste encore un volume d'air à l'intérieur des poumons ***= Volume résiduel= 1,5L.***

Volumes et capacités

Le volume pulmonaire mobilisable permet de définir d'autres volumes ou des capacités:

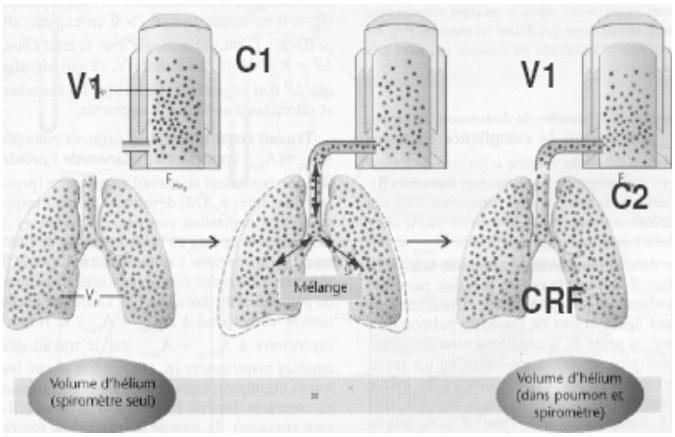
- ***VC+VRE+VRI= Capacité vitale (CV)***, c'est -à-dire le volume que l'on peut utiliser au cours de la respiration normale et forcée.
- Quand on prend en compte le volume résiduel, on peut déterminer la ***Capacité résiduelle fonctionnelle***, qui correspond au volume d'air qu'il reste à l'intérieur du poumon à la fin d'une expiration normale.

  CRF= VR+VRE.
- ***Capacité pulmonaire totale***: volume qu'on a dans les poumons à la fin d'une inspiration forcée ***CPT=CV+VR.***



Détermination du volume résiduel VR et de la capacité résiduelle fonctionnelle CRF

Comme c'est un volume qui n'est pas mobilisable, il faut utiliser un gaz qui va se diluer dans l'espace pulmonaire (et non toxique) et surtout qui ne passe pas la barrière pulmonaire pour aller au niveau du sang. Ce gaz, non diffusible vers le système sanguin c'est-à-dire qui reste à l'intérieur des alvéoles, est ***l'Hélium.***



On met le patient en contact avec un sac (contenant une concentration connue C1 d'hélium de volume V1) à la fin d'une expiration normale c'est-à-dire au niveau de la CRF. L'hélium va aller se diluer dans le poumon dans un volume qui correspond à la capacité résiduelle fonctionnelle.

Le patient ventile pendant plusieurs minutes. Au bout d'un certain temps, il y a un équilibre entre les deux concentrations. On peut mesurer C2, on connait V1 et C1, donc on peut déterminer V2 puisque:
C1V1=C2V2=C2(V1+CRF)

Les modifications de pression ont engendrées des modifications de volume que l'on a mesuré et lorsqu'on évalue la modification de volume générée en fonction de la pression, on étudie la ***distensibilité*** du système (ou ***compliance).***

Le poumon est un système distensible car il comprend des fibres élastiques situées dans le tissu de soutien entre les alvéoles (responsable de la distension du poumon et sa rétraction).

On peut mesurer cette distensibilité en faisant le rapport entre la variation de volume générée par la variation de pression. De plus, la pression qui s'exerce sur les structures de conduction (voies aériennes) entraîne une modification de débit.

$$R = \delta P / Q$$

Rappel sur la mécanique ventilatoire

$P_{alvéoles} = P_{atmosphérique}$ -> pas de débit dans les voies aériennes.
$P_{alvéoles} < P_{atmosphérique}$ -> débit d'air vers intérieur du poumon = inspiration.
$P_{alvéoles} > P_{atmosphérique}$ -> débit d'air vers extérieur du poumon = expiration.

Note: ***Ce sont les variations de pression qui génère les variations de débit et non l'inverse!*** *Cf schéma page 3 de ce cours.*

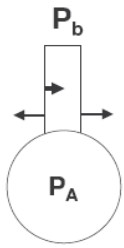
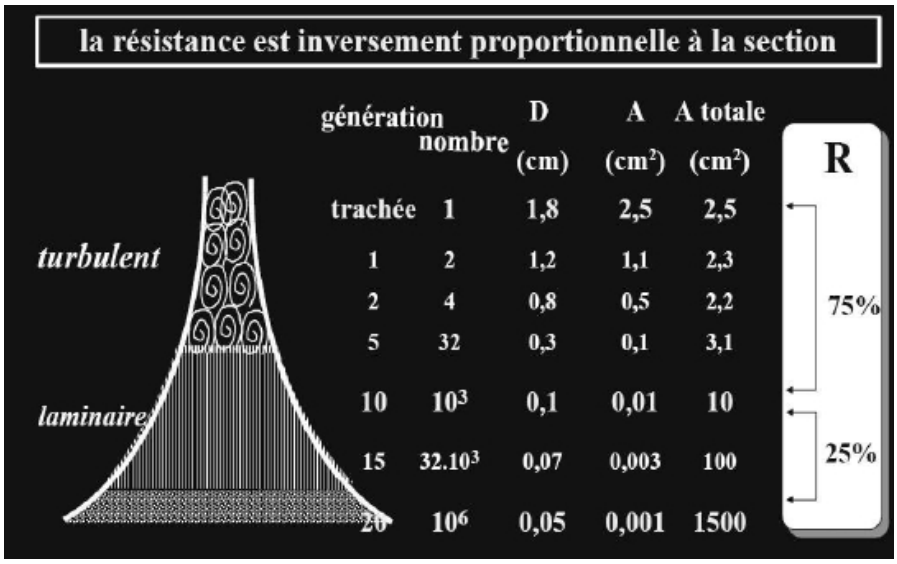
Résistances des voies aériennes

Le rapport de la perte de charge (différence de pression) sur le débit est lié à:
- la géométrie (section totale des voies aériennes),
- conditions d'écoulement (turbulent ou laminaire).

Le régime turbulent (débit « aléatoire ») se trouve dans les vaisseaux de gros diamètre (comme la trachée) et au niveau des divisions bronchiques.
Le régime laminaire pour les diamètres plus petits. Le débit est plus important dans la région centrale. Plus le diamètre est petit, plus R est élevée.

$P_A - P_B$ = Résistances . Débit

- Réduction du diamètre bronchique
  -> augmentation des résistances,
  ->diminution du débit.
- Augmentation du diamètre bronchique
  ->diminution des résistances,
  ->augmentation du débit.



Résistance et géométrie