

UE12 Appareil respiratoire

Pr Delclaux

Jeudi 2 février 2017 de 13h30 à 15h30

Ronéotypeur : Amélie Noel

Ronéolecteur : Roxane Pasquer

Cours 5 : Mécanique ventilatoire et volumes pulmonaires

Le professeur a indiqué que nous aurons 5 ED à la place des APP mais qui reprendront les mêmes notions. Ces APP ont été supprimés dans le but d'homogénéiser les cours et pour que tout le monde ait accès aux mêmes informations.

L'épreuve se repartira en QR et en QCM (environ 30).

Le professeur a indiqué que son cours ne fera pas l'objet de QR mais uniquement de QCM. Il n'a pas donné ses diapos mais a indiqué qu'elles étaient sur Moodle. Le cours n'a pas changé par rapport à l'année dernière. Le professeur relira la ronéo s'il a le temps.

Plan du cours

I/ Rappel

II/ Le système mécanique ventilatoire

A/ Système passif

1) Système élastique

- ❖ Distensibilité poumon seul
- ❖ Distensibilité paroi thoraco-abdominale seule
- ❖ Distensibilité du système paroi +poumon
- ❖ Les volumes pulmonaires
- ❖ L'espace pleural

2) Système résistif

- ❖ L'arbre aérien
- ❖ Analyse des débits expiratoires

B/ Explorations fonctionnelles respiratoires (EFR) des pathologies respiratoires

C/ Système actif

D/ Pressions au cours de la ventilation courante

La physiologie respiratoire comprend l'étude de :

- La ventilation (commande, effecteurs, mécanique, contrôle) *qui fera l'objet de ce cours.*
- Des échanges gazeux et des transports des gaz dans l'organisme (conduction, convection, diffusion)
- Voies aériennes et fonctions non respiratoires du poumon (épuration, métabolisme, équilibre acido-basique)
- Adaptations à l'environnement et à l'exercice.

Ces 3 derniers points seront vus dans les prochains cours.

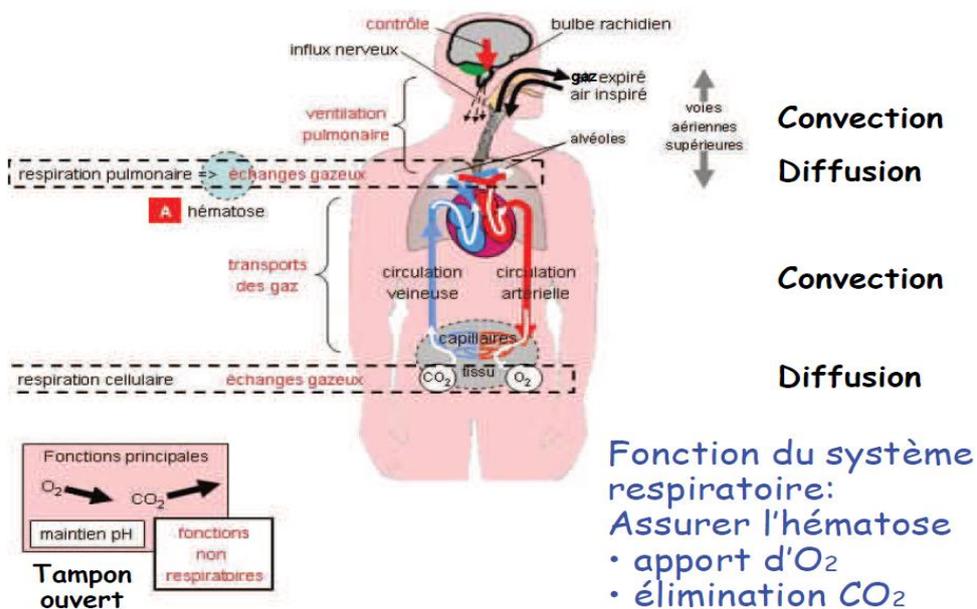
I/ Rappel

La fonction du système respiratoire est d'assurer l'**hématose**, c'est-à-dire les échanges gazeux et donc l'apport d'O₂ et l'élimination de CO₂. Pour effectuer ces échanges gazeux, il existe un système mécanique.

Il a également d'autres fonctions non respiratoires comme le maintien du pH car c'est un tampon ouvert ayant un rôle dans l'équilibre acido-basique.

Le transport des gaz se fait d'abord par convection au niveau des voies aériennes supérieures (c'est le lieu de la ventilation pulmonaire), puis par diffusion à travers la barrière alvéolo-capillaire (cette diffusion est soumise à la Loi de Fick, est le lieu de la respiration pulmonaire et permet des échanges gazeux) puis de nouveau par convection avec un transport des gaz (O₂ et CO₂) par le sang et enfin par diffusion au niveau des tissus pour leur apporter de l'oxygène (on parle de respiration cellulaire).

Il faut savoir qu'on parle d'air inspiré et de gaz expiré et non d'air expiré car il n'y a plus d'O₂.



Dans ce cours nous allons nous intéresser au système de convection allant des gaz de l'air ambiant à la barrière alvéolo-capillaire.

II/ Le système mécanique ventilatoire

Il est constitué d'un **système passif** et d'un **système actif**.

Le système passif est constitué d'un « sac » (le poumon) qui a une fonction de compliance, d'un « tuyau » (qui sont les voies aériennes) qui exerce une résistance à l'écoulement des gaz dans les voies aériennes et d'une paroi (la paroi thoraco-abdominale).

Le système actif est constitué des muscles respiratoires/ventilatoires dont notamment du diaphragme qui a un rôle dans l'inspiration.

Les propriétés mécaniques du système respiratoire font appel à des notions de physiques. En effet, on va représenter le « sac » donc le poumon comme un compartiment expansible qui a une certaine compliance, un certain volume initial et le « tuyau » comme un élément résistif.

A/ Le système passif

On a un système mécanique très simple : un tuyau, un sac et une paroi.

Concernant le tuyau : quand on respire on a un écoulement des gaz dans les voies aériennes. Il existe différentes pressions entre l'entrée et la sortie qui crée donc une perte de charge. Celle-ci va être fonction de la résistance (qui est exercée par ce tuyau à l'écoulement) et du débit des voies aériennes. On peut utiliser de manière équivalente la résistance ou bien la notion de conductance, quand on veut évoquer la notion de difficulté de passage, car celle-ci est l'inverse de la résistance.

$$\Delta P = R \times \dot{V} = 1/G \times \dot{V}$$

résistance - conductance

R : Résistance
V° : Débit
G : Conductance

Concernant le sac : il est marqué par la notion de distensibilité, celui-ci va gonfler en fonction des différences de pressions entre l'intérieur c'est-à-dire l'alvéole et l'extérieur qui est la pression atmosphérique. Cette différence de pression va dépendre de l'élastance et du volume gagné par le sac. On peut utiliser de manière équivalente l'élastance ou bien la notion de compliance car celle-ci est l'inverse de l'élastance.

$$\Delta P = E \times V = 1/C \times V$$

élastance - compliance

V : Volume
E : Elastance
C : Compliance

Grace à ces deux formules on peut comprendre ce qu'on va mesurer pour les Explorations Fonctionnelles Respiratoires (EFR).

Donc quand on respire, les muscles respiratoires vont exercer un certain travail musculaire qui va nécessiter de vaincre ces forces résistives et de faire gonfler ce sac (poumon) qui a une composante élastique. Le travail musculaire est donc la somme de ces deux différences de pression, c'est l'équation du mouvement respiratoire.

→ **Travail muscle = dissipation résistive + stockage élastique**

1) Système élastique

C'est l'ensemble **poumon + paroi thoraco abdominale**

$$\Delta P = E \times V = 1/C \times V$$

élastance - compliance

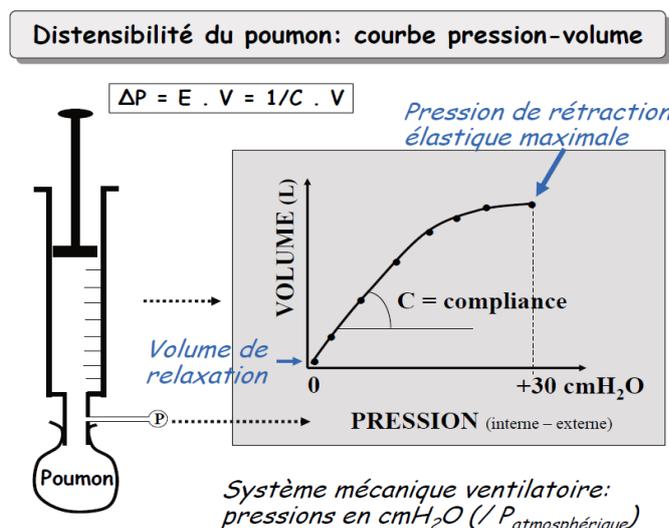
On peut caractériser ce système en mesurant la compliance et le volume quand ce système est à l'équilibre. Avec les EFR, on utilise souvent la mesure du volume.

❖ Pour caractériser la notion de distensibilité du poumon sans paroi:

On considère qu'on a enlevé le poumon de la paroi thoracique. On a donc le **poumon sans la paroi**.

A l'état basal, quand le poumon est relâché (sans aucune pression), on obtient le volume de relaxation, c'est-à-dire le volume que prend spontanément le poumon quand on le laisse seul, sans la paroi. En clinique on peut voir cela, on a alors un pneumothorax.

On gonfle le poumon avec une seringue, on mesure la différence de pression (en cmH₂O) et on obtient le volume. On peut faire une courbe dont la pente sera la compliance. **La distensibilité du poumon est donc caractérisée par la compliance**. A force de gonfler le poumon, on va arriver à une pression de rétraction maximale (30 cmHg), où le volume va rester constant et la compliance va chuter. C'est la pression qui peut rompre le poumon.



Pour comprendre la notion de compliance :

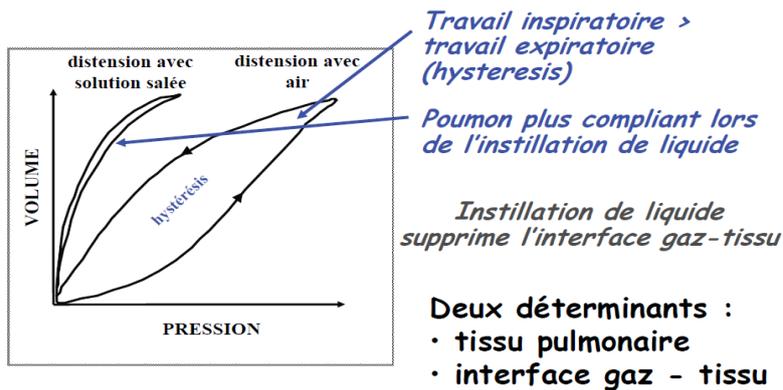
On reprend la courbe pression-volume.

On va gonfler le poumon avec de l'air puis le dégonfler. La pression mise pour gonfler et la pression mise pour dégonfler à un volume donné est différente. Il faut plus de pression pour gonfler le poumon lors de l'inspiration que pour le dégonfler lors de l'expiration. Il faut donc plus de travail à l'inspiration qu'à l'expiration. C'est ce qu'on appelle l'**hystérésis**.

Si on gonfle le poumon avec du sérum physiologique (eau salée), il faut, pour un volume donné, mettre moins de pression pour gonfler et dégonfler le poumon que si on gonflait le poumon avec de l'air. Il est donc plus facile de gonfler un poumon avec de l'eau salée plutôt que de l'air. On remarque que le poumon est plus compliant. Ceci s'explique pour le fait que l'eau salée supprime l'interface gaz-tissu.

De plus quand on gonfle et dégonfle un poumon avec de l'eau salée, il n'y a **pas d'hystérésis**. Il y a le même travail.

Déterminants de la compliance pulmonaire



Il y a **deux** déterminants de la compliance pulmonaire, elle est liée :

- **au tissu pulmonaire.** Dans le tissu pulmonaire on retrouve des éléments cellulaires, et une matrice extra-cellulaire qui comprend de l'élastine (qui donne l'élasticité du poumon) et du collagène fibrillaire (qui donne la limite de distensibilité du poumon pour que ça ne casse pas). C'est cette **matrice extra-cellulaire** qui joue un rôle et non les cellules !

Il existe des maladies tel que l'emphysème qui détruit l'élastine et donne donc plus de volume et tel que la fibrose qui donne une accumulation de collagène. Ces deux maladies vont donc modifier la compliance du poumon.

- **à l'interface gaz-tissus.** A l'interface gaz-tissus il existe une tension superficielle qui est une force à la surface d'un liquide qui exprime que les interactions entre molécules de liquides sont supérieures aux interactions entre un liquide et un gaz. Ceci explique notamment le phénomène de la goutte d'eau.

Dans le tissu respiratoire, l'eau du tissu est autour du gaz alvéolaire et donc cette interface va créer une pression à l'intérieur des alvéoles qui dépend du rayon des alvéoles (d'après la loi de Laplace) et de la tension superficielle.

Le tissu pulmonaire va sécréter du surfactant qui va se poser sur le bord de l'alvéole (sur le fluide alvéolaire). Il a un pôle hydrophile et un pôle hydrophobe et va permettre de diminuer la tension superficielle. Le surfactant est constitué de phospholipides (85%) et de protéines (13%) et est synthétisé par les pneumocytes de type II qui représentent 60% des cellules épithéliales alvéolaires et forment uniquement 10 % de la surface alvéolaire. Les pneumocytes de type II contiennent des corps lamellaires (vésicules d'exocytose du surfactant).

→ Rôle du surfactant :

-**diminuer la tension de superficielle** et donc d'augmenter la compliance pulmonaire ce qui permet une économie d'énergie pour la respiration en diminuant le travail respiratoire.

Exemple en pédiatrie : si un bébé nait prématuré, il n'a pas encore fini de synthétiser son surfactant et sera alors en détresse respiratoire car son travail respiratoire sera énorme. Le traitement est l'administration de surfactant.

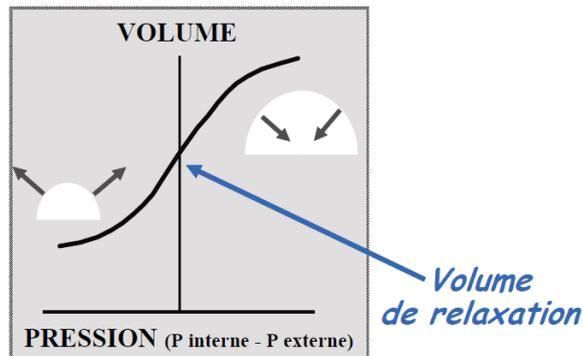
-**permet la coexistence d'alvéoles de tailles différentes**. En effet, normalement, d'après la loi de Laplace, la différence de rayon des alvéoles devrait entraîner une pression différente et donc des mouvements de gaz entre alvéoles. Mais grâce au surfactant ce n'est pas le cas. Il participe ainsi à la stabilisation alvéolaire c'est à dire qu'il adapte la tension de surface à la taille alvéolaire.

❖ Pour caractériser la distensibilité de la paroi thoraco-abdominale uniquement (sans le poumon)

La paroi a un certain volume de relaxation.

- Lors d'une expiration maximale, la paroi va diminuer de volume, se comprimer. Dans une situation de compression, la paroi va spontanément vouloir retourner vers son volume de relaxation. Elle exerce donc une force pour se distendre.
- Lors d'une inspiration maximale, la paroi va se distendre. On va avoir une augmentation du diamètre antéro-postérieur et latéral du tiers inférieur du thorax. La paroi va aussi vouloir retourner à son volume de relaxation.

Distensibilité de la paroi: courbe pression-volume



❖ Pour caractériser la distensibilité du poumon + paroi (les deux ensembles)

La compliance (pente) de la paroi et la compliance du poumon sont assez similaire.

Par rapport à ces deux éléments séparés (compliance poumon seule et compliance paroi seule) on observe que le **compliance** (pente) de la courbe pression-volume **de l'ensemble poumon + paroi va diminuer**. En effet les deux compliances ne s'additionnent pas. C'est les élastances qu'on additionne.

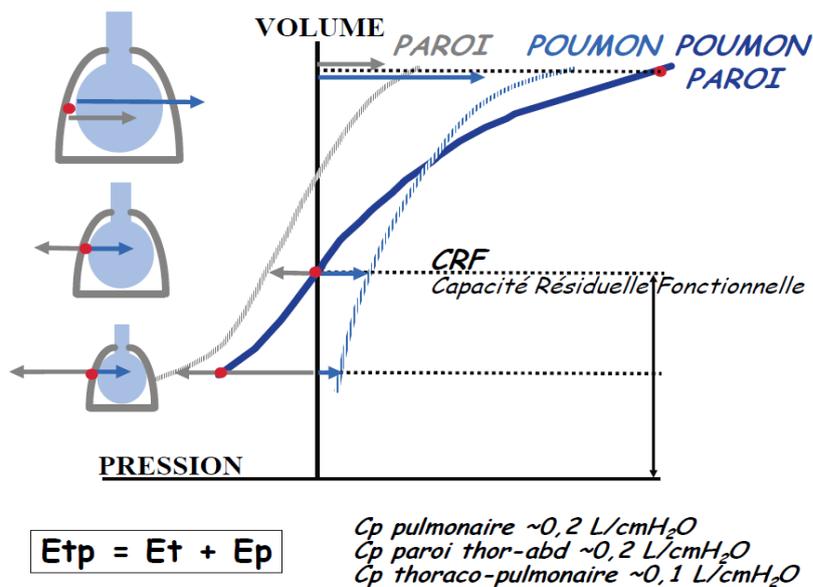
Ordres de grandeur :

-la compliance du poumon est de 0,2L par cm d'H2O.

-la compliance de la paroi est similaire et donc de 0,2L par cm d'H2O.

-la compliance de l'ensemble poumon + paroi est de 0,1L par cm d'H2O.

La nouvelle position d'équilibre du volume du système respiratoire passif poumon-paroi est la **capacité résiduelle fonctionnelle** (CRF) qui donne une idée de la compliance du poumon lorsque la compliance de la paroi est normale.

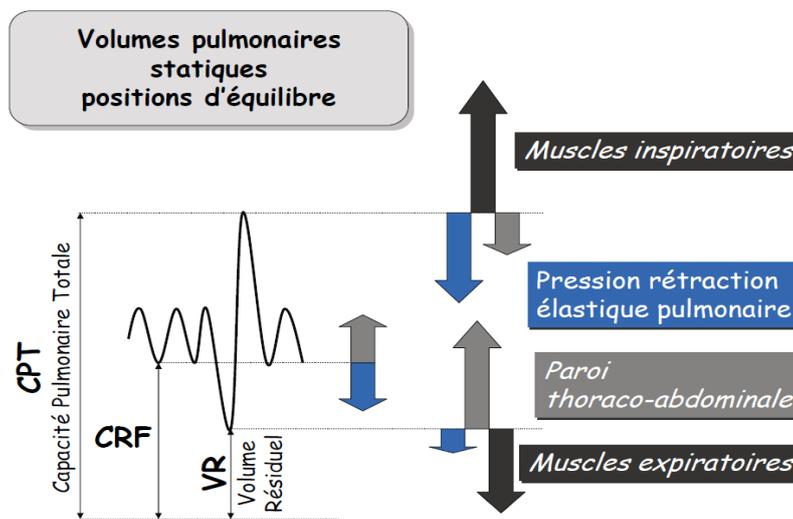


Avec E l'élastance.

❖ Les volumes pulmonaires

Ils sont utilisés pour faire des mesures en exploration (EFR). On peut mesurer des volumes pulmonaires **statiques** et des volumes **mobilisables**.

- Volumes pulmonaires statiques et positions d'équilibre.



Ici on enregistre un patient qui inspire et expire d'abord calmement. Puis il va expirer au maximum et re-inspirer au maximum. Il va donc mobiliser différents volumes.

Les volumes statiques ne bougent pas, il n'y a donc pas d'entrée ni de sortie, pas de débit dans les voies aériennes. Ce sont des volumes mesurés à la transition entre l'inspiration et l'expiration. Quand le débit est nul, le **système poumon + paroi est à l'équilibre**.

Il y a 3 volumes pour lesquels c'est le cas :

CRF = Capacité résiduelle fonctionnelle	CPT=Capacité pulmonaire totale	VR=Volume résiduel
<p>C'est le volume à la <u>fin d'une expiration calme</u>.</p> <p>Il y a un équilibre car le poumon tire vers le bas (il souhaite avoir un volume de 0L et exerce donc une pression de rétraction élastique pulmonaire) et la paroi tire vers le haut pour rejoindre son volume de relaxation.</p> <p>S'il y a une rupture d'équilibre, le poumon va se rétracter et la paroi se distendre, c'est le pneumothorax.</p>	<p>C'est le volume à la <u>fin d'une inspiration forcée</u> et donc le maximum de gaz que peut contenir le poumon.</p> <p>La paroi est passée au dessus de sa position d'équilibre et va donc tirer vers le bas. Le poumon s'est distendu et va donc également vouloir tirer vers le bas car il est à sa pression de rétraction maximale. On n'a pas ici d'équilibre car les deux vecteurs vont vers le bas. Mais du fait de l'effort pour gonfler le poumon, les muscles inspiratoires vont être recrutés et vont exercer une force vers le haut qui va permettre cet équilibre.</p>	<p>C'est le volume à la <u>fin de l'expiration forcée</u>. C'est le volume qui reste dans le poumon quand on a tenté de le vider au maximum.</p> <p>Le poumon tire légèrement vers le bas car il est proche de son volume de relaxation (de 0L).</p> <p>La paroi tire fortement vers le haut car on s'éloigne de sa position d'équilibre. Enfin des muscles expiratoires vont être recrutés et vont exercer une force vers le bas qui va permettre l'équilibre.</p>

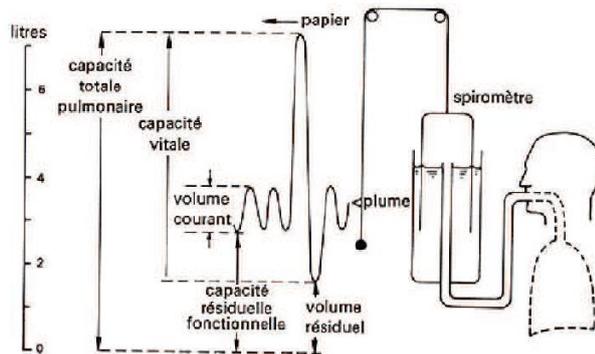
Une diminution de la CPT peut créer des troubles restrictifs (*on reverra cela en ED*).

On ne peut pas les mesurer de façon simple. On utilise soit la dilution, soit le pléthysmographe comme technique.

- Volumes pulmonaires mobilisables

On peut les mesurer par spirométrie.

Spirométrie: mesure des volumes mobilisables



VT=Volume courant	CV=Capacité vitale
C'est le volume mobilisé quand on respire calmement.	C'est le volume mobilisé entre une inspiration forcée et une expiration forcée. On a gonflé et dégonflé à fond.

- Ordres de grandeur des volumes

Pour un adulte de taille normale :

-la CPT est de 6L

-la CRF est de 3L

-le VR est de 1,5L. C'est le volume de gaz qu'il reste dans les poumons après l'expiration forcée.

-le VT est de 0,5L

-la CV est de 4,5L. C'est le volume entre le Volume résiduel et la Capacité pulmonaire totale.

❖ L'espace pleural

C'est l'espace entre le poumon et la paroi qui est virtuel. Il y a deux fluides accolés qui vont glisser les uns contre les autres. Au sein de l'espace virtuel, **à la CRF**, on a le poumon qui veut se rétracter vers le bas et la paroi qui voudrait aller vers le haut : on a donc une **pression négative** dans cet espace par rapport à la pression atmosphérique. Elle est de l'ordre de -5cm d'H₂O.

Plus on gonfle le poumon et donc plus on inspire plus la pression pleurale sera négative.

2) Système Résistif

Il correspond à l'arbre aérien avec les **voies aériennes** (système de convection qui regroupe les voies aériennes supérieures et les voies aériennes inférieures).

On va considérer que ces voies aériennes sont résistives (*même si les « tuyaux » ne sont pas complètement rigides en réalité*).

$$\Delta P = R \times \dot{V} = 1/G \times \dot{V}$$

résistance - conductance

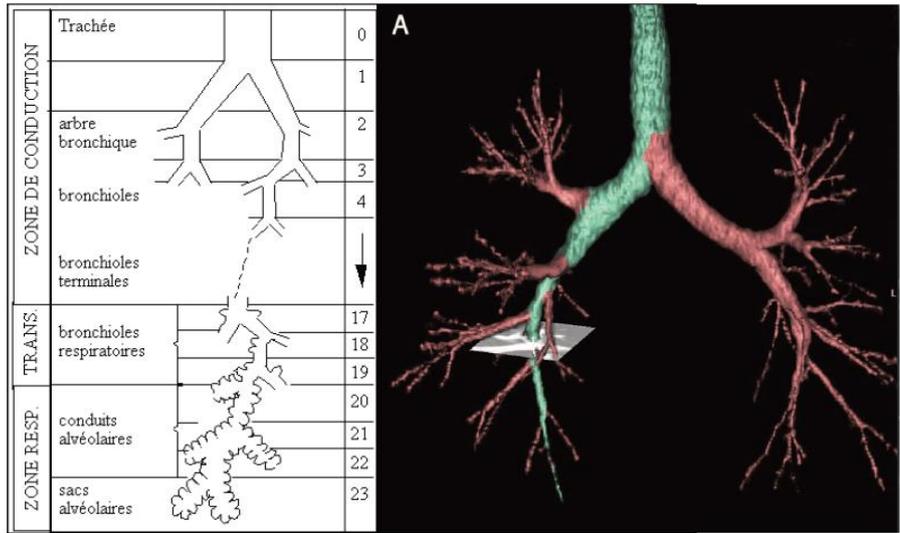
Il existe une différence de pression entre l'entrée et la sortie de ces tuyaux qui sera fonction de la résistance des voies aériennes (tuyaux) et du débit à l'intérieur de ces tuyaux.

❖ L'arbre aérien se divise en :

- voies aériennes supérieures avec le **nez**, le **pharynx** et le **larynx**.
- Le nez va permettre le conditionnement du gaz en température (donc le réchauffement du gaz inspiré) et en humidité. Sa surface de 150 cm² étant grande pour un petit volume de 20 cm³, il est donc difficile de respirer par le nez. Le nez représente en effet 50% de la résistance du système respiratoire. C'est un système résistif. (Ceci explique le fait qu'à l'effort, on respirera par la bouche plutôt que par le nez. Mais le gaz ne sera pas réchauffé).
- Le pharynx est relativement compliant mais il est bordé par une vingtaine de muscles pharyngés qui vont dilater, maintenir ouvert le pharynx. Si ces muscles se relâchent, le calibre de pharynx va diminuer (collapsus). C'est notamment le cas dans l'apnée obstructive du sommeil. Mais l'organisme perçoit cette diminution du calibre et va faire un effort afin de rouvrir ces tuyaux.
- Le larynx est l'organe de la phonation qui contient les cordes vocales. La trachée va s'insérer sur ce larynx.
- Voies aériennes inférieures avec la trachée et les bronches/bronchioles.

Elles ont une description assez complexe. Elles partent de la trachée qui correspond à la génération zéro et vont se diviser de façon **dichotomique** jusqu'à la 23^{ème} division. Pour les divisions de 0 à 16 on a une **zone de conduction** où se font les transports. Puis il y a une **zone de transition** pour les divisions 17 à 19 et enfin une **zone respiratoire** où se font les échanges gazeux pour les divisions 20 à 23. On retrouve les conduits et les sacs alvéolaires dans cette zone.

Voies aériennes inférieures



Cet arbre bronchique va être responsable d'une certaine résistance, exprimée en cm d'H₂O, qui va dépendre de la différence de pression et du débit :

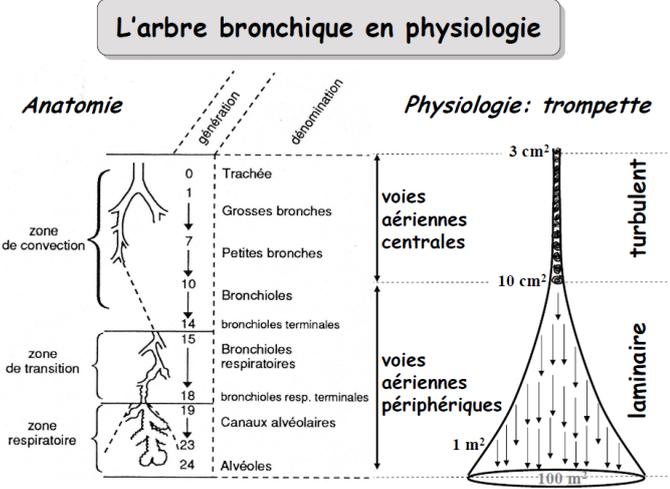
$$R = \frac{(P_1 - P_2)}{\text{débit}} \quad R = \frac{8 \cdot l \cdot \eta}{\pi \cdot r^4} \quad \text{Loi de Poiseuille}$$

cmH₂O / (L/s)

Cette perte de charge va également dépendre de :

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

A chaque génération bronchique donnée, on va additionner la section totale donc la résistance ne dépendra plus que d'une section mais de la somme des sections. Le système bronchique est ainsi très fin aux premières générations et va de plus en plus s'élargir. On parle d'une forme en « trompette ». Les bronches seront de plus en plus petites mais de plus en plus nombreuses donc la somme totale des calibres va augmenter.



Ainsi dans les voies aériennes centrales, le débit sera turbulent et la section totale sera faible.

A l'inverse, dans les voies aériennes périphériques le débit sera laminaire et la section totale sera plus importante.

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

- Résumé de la répartition des résistances dans les voies aériennes :
 - Nez : 50% des résistances
 - Voies aériennes centrales : 40% des résistances
 - Voies aériennes périphérique : 10% des résistances

❖ Analyse des débits expiratoires

On peut mesurer le débit qui est lié à la résistance pour évaluer le système résistif. *En pratique on mesure plus souvent le débit au lieu de la résistance directement.*

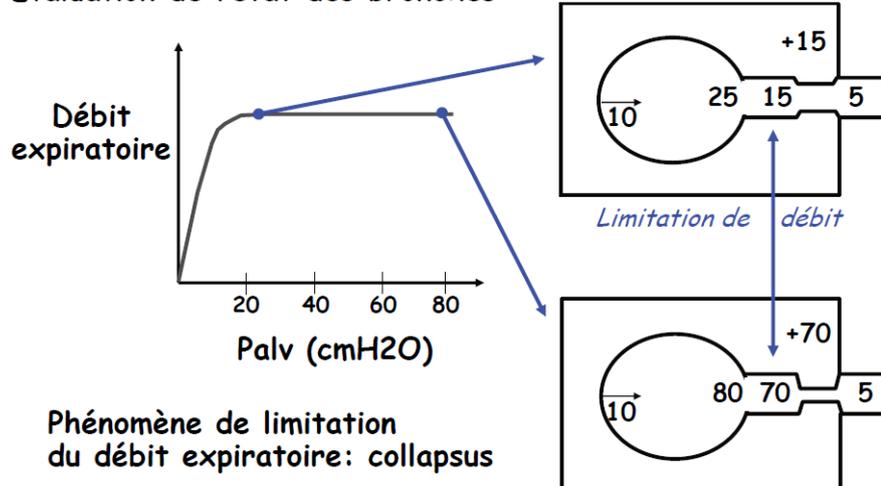
Un **débit reflète le calibre** des voies aérienne **uniquement** si le calibre est limitant pour le débit c'est-à-dire à **l'expiration forcée**. Cette expiration forcée va donc être mesurée aux EFR.

Pour évaluer l'état des bronches, on va étudier l'expiration forcée qui a une limitation du débit, c'est-à-dire que quand je souffle j'ai une pression à l'intérieur des poumons qui est positive et qui va permettre de faire sortir le gaz. Cependant à partir d'une certaine pression, le débit ne sort pas plus vite, il y a une limitation du débit expiratoire.

Le débit inspiratoire est lui non limité par le calibre car quand on inspire on agrandit les voies aériennes. De plus il y a une limitation par l'effort musculaire.

**Expiration forcée :
la limitation de débit**

Evaluation de l'état des bronches



- Explication de cette limitation de débit (*qui est un peu fausse d'après le prof*).

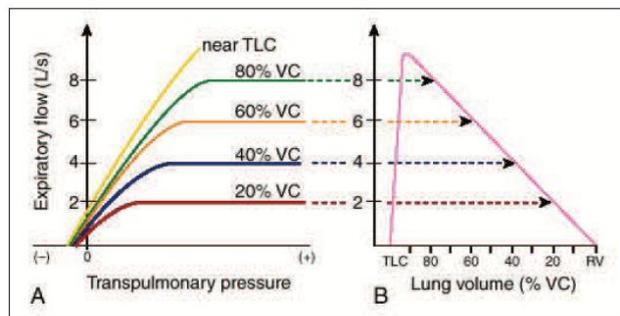
On considère le système respiratoire formé d'une paroi (espace pleural), du « sac » et du « tuyau ».

Sur le premier schéma en haut, le sac est un peu distendu (de 10 cm de pression de rétraction élastique). Puis on fait un effort expiratoire et on souffle et met 15 cm d'H₂O de pression musculaire.

En additionnant les deux forces cela fait que la pression est de +25 cm d'H₂O dans les alvéoles. Lorsque le gaz va passer dans les tuyaux, il y aura une certaine résistance. On exprime ici le fait que les tuyaux ne sont pas totalement rigides et cette pression qui va s'exercer dans les tuyaux va tendre à diminuer un peu le calibre. On a ici un certain débit.

Sur le deuxième schéma, le sac est distendu de la même manière mais on va ici souffler plus fort (70 cm d'H₂O), ce qui fait que la pression totale est alors de 80 cm d'H₂O. Il n'y a pas plus de débit car les bronches se compriment. Les bronches ne sont pas complètement rigides. Les résistances seront plus importantes et donc le débit ne va pas augmenter.

$\dot{V} = \Delta P/R$
Analyse des débits expiratoires



Le point de collapsus bronchique se déplace vers la « périphérie » au cours de l'expiration forcée

Quand on fait souffler fort le patient, son débit va augmenter de façon maximale. De plus quand la CPT=Capacité Pulmonaire Totale est maximale (c'est-à-dire que le volume est maximal dans le poumon), le débit est important. Plus le volume du poumon diminue, plus débit diminue et est limité. A bas volumes pulmonaires on obtient des débits moins importants.

On dit que le point de collapsus bronchique se déplace vers la périphérie (vers des bronches plus petites) au cours de l'expiration forcée.

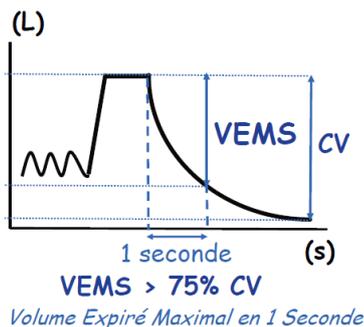
- On mesure différents paramètres de façon quotidienne :

CV forcée = Capacité vitale forcée	VEMS	Débit expiratoire de pointe
On peut le représenter sur une courbe avec le temps en x et le volume en y. Le sujet va respirer normalement, puis va gonfler à fond ses poumons et va expirer le plus fort possible et le plus longtemps possible.	C'est le volume expiré maximal en 1 seconde. On va prendre l'échelle de temps de 1sec et on va regarder ce que le patient a soufflé. Normalement : VEMS > 75% de la CV forcée Si VEMS < 75% de la CV forcée, on a une obstruction des bronches avec une diminution du rayon des bronches.	On peut le représenter sur une courbe avec le volume en x et le débit en y. C'est le moment où va débiter l'expiration forcée (juste après une inspiration forcée). Il va permettre de mesurer l'obstruction chez les asthmatiques ou en cas de BPCO.

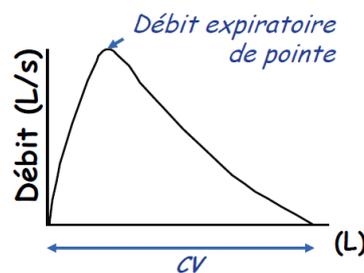
$$\dot{V} = \Delta P/R$$

Analyse des débits expiratoires

• Temps - Volume



• Volume - Débit



B/ Explorations fonctionnelles respiratoires (EFR) des pathologies respiratoires

Elles permettent d'étudier :

- Des maladies obstructives des voies aériennes comme le BCPO (qui est une obstruction permanente des bronches) ou l'asthme (qui est une obstruction transitoire).
On mesurera en exploration fonctionnelle des débits en expiration et des résistances.
- Des maladies atteignant le parenchyme pulmonaire comme l'emphysème (destruction des fibres élastiques) ou la fibrose (dépôts de collagène fibrillaire qui empêche la distensibilité du poumon).
On mesurera en exploration des volumes statiques et la compliance du poumon.

C/ Le système actif

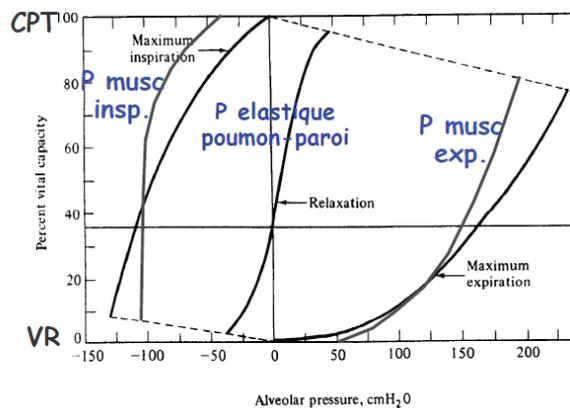
Ce sont les muscles ventilatoires.

On peut mesurer des pressions maximales en demandant au patient de gonfler au maximum ses poumons puis de souffler le plus fort possible contre un obstacle à la bouche. On a ainsi mesuré la force des muscles expiratoires. Si au contraire on inspire contre un obstacle, on obtient la mesure de la force des muscles inspiratoires

Systeme actif: muscles respiratoires

Pressions maximales

Effort maximal contre obstacle à la bouche à différents volumes pulmonaires



Cette échelle de pression montre que le système respiratoire est capable de générer des pressions importantes. (La pression maximale inspiratoire est ici de -150 cm d'H₂O et de + 200 cm d'H₂O quand je souffle fort donc à la capacité expiratoire totale.)

Ce qui est **important de retenir** c'est ce que les muscles sont capables de générer des forces de l'ordre de plusieurs centaines de cm d'H₂O et que la mesure de ces pressions maximales peuvent nous donner une idée de la fonction du muscle respiratoire, à la fois l'inspiration et à l'expiration.

- ❖ Il y a plusieurs muscles inspiratoires : (*retenir les noms des muscles accessoires !*)
 - Le **diaphragme** : C'est un muscle strié ayant un double contrôle automatique et volontaire (on peut arrêter de respirer spontanément). Il a un **rôle essentiellement inspiratoire**. Il est formé de deux héli-diaphragmes : une coupole et un dôme aplati. Le diaphragme a deux muscles : une partie costale antérieure, mince et plate et une partie crurale postérieure, para-vertébrale et épaisse. Celui-ci est composé de fibres lentes oxydatives (40%) qui permettent de faire des efforts prolongés. La commande nerveuse est effectuée par les nerfs phréniques dont l'origine est au niveau de C3, C4 et C5. Cela veut dire que si on est traumatisé médullaire en C6 on va pouvoir respirer. Ce qui n'est pas le cas si C3 est touché.
Le diaphragme va effectuer un mouvement de piston :
 - Lors de l'inspiration, on a une contraction du diaphragme qui va s'abaisser et repousser les parois. On aura une distension passive des parois abdominales.

- **Les muscles intercostaux parasternaux et les muscles scalènes** qui vont rigidifier la cage thoracique en se contractant.
- **Les muscles accessoires : intercostaux externes et sternocléidomastoidien** qui sont recrutés en cas de besoin c'est-à-dire quand le travail inspiratoire augmente (en cas de défaillance respiratoire).

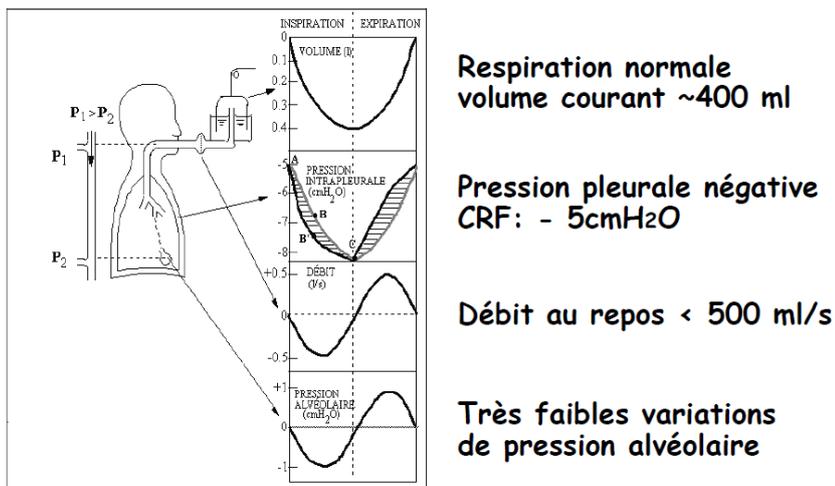
❖ L'expiration :

Elle est passive au cours de la respiration calme et normale. Elle devient active lors de l'exercice musculaire liée à l'action des muscles expiratoires de la paroi abdominale. *Les muscles expiratoires (pas à retenir) sont : les muscles obliques externes, le muscle grand droit et le muscle transverse.* Leur contraction refoule le diaphragme vers le haut.

-Lorsqu'on expire on observe un relâchement du diaphragme, il remonte et la paroi abdominale va se contracter.

D/ Pressions au cours de la ventilation courante

Pressions au cours de la ventilation courante



A l'inspiration : le diaphragme part vers le bas et l'abdomen part en avant. La pression pleurale devient plus négative et diminue, la pression alvéolaire devient négative (à - 1cm d'H₂O ici).

A l'expiration ; le diaphragme se relâche, la pression alvéolaire va devenir positive, la pression pleurale retourne à sa position de repos à -5cm d'H₂O.

Important :

Pour une respiration normale : le volume courant est de 400 ml, la pression pleurale est négative et égale à -5cm d'H₂O, le débit de repos est < 500 mL/s (il varie entre l'inspiration et l'expiration) et il y a de très faibles variations de pressions alvéolaires.

