

LES POUMONS PERMETTENT LA RESPIRATION EN MILIEU AÉRIEN (Complément BCPST 1)

Poumon : organe différencié, localisé et enfoui dans l'organisme, orifice de petit diamètre avec l'extérieur.
Invaginations épithéliales endodermiques (poumon des vertébrés)
Mélange gazeux saturé en vapeur d'eau → perte d'eau car ψ de l'atmosphère plus faible.
Présence de cavités respiratoires → nécessité d'une mécanique ventilatoire.

I. ORGANISATION FONCTIONNELLE DES ÉCHANGEURS EN LIEN AVEC LE MILIEU DE VIE

I.1. Un organe internalisé relié au milieu extérieur

L'appareil respiratoire est formé par les voies aériennes, extra-pulmonaires et intra-pulmonaires, qui assurent l'acheminement de l'air ambiant jusqu'à l'échangeur. Ce dernier est formé d'une multitude de sacs, les alvéoles pulmonaires. Les voies aériennes intra-pulmonaires et les alvéoles forment les poumons, logés dans la cage thoracique dont ils sont solidaires par l'intermédiaire des deux plèvres, enveloppes accolées par le liquide pleural.

➤ Resp 1a

Les voies aériennes s'ouvrent à l'extérieur par les narines, étroits orifices qui débouchent dans les fosses nasales en relation avec le pharynx, carrefour entre les voies digestive et aérienne, d'où part la trachée. Elle se divise ensuite en deux bronches extra-pulmonaires, qui deviennent intra-pulmonaires, puis se ramifient en bronchioles qui débouchent dans les canaux alvéolaires et finalement les alvéoles.

La trachée et les bronches extra-pulmonaires sont maintenues béantes grâce à des anneaux cartilagineux qui empêchent leur écrasement. Les bronches intra-pulmonaires ont des plaques cartilagineuses discontinues. Les voies aériennes sont tapissées d'un épithélium simple cilié. Au cours du passage dans les voies aériennes, l'air extérieur est réchauffé, humidifié et nettoyé.

Présence de cils + mucus permettant remontée vers le pharynx de particules diverses. Cet « escalator ciliaire » est altéré par la cigarette.

Mucoviscidose ou fibrose kystique. Présence de couche de mucus deshydraté (anomalie des canaux Cf les sécrétant normalement activement dans la lumière).

I.2. Un réseau d'alvéoles tapissées de surfactant

Les alvéoles sont des sacs d'un diamètre de 250 μm environ. L'architecture des voies aériennes intra-pulmonaires, puissamment ramifiées, de l'ordre de 25 fois, est telle que le nombre d'alvéoles est très élevé, environ 300 millions par poumon chez l'homme adulte. La surface alvéolaire cumulée des deux poumons, chez l'homme, est estimée autour de 100m², dont environ 70 m² de contact avec les capillaires sanguins : la surface de l'échangeur respiratoire pulmonaire est donc très étendue et très densément irriguée.

➤ Resp 1b

Les échanges entre l'air et le sang ont lieu à travers la **barrière alvéolo-capillaire**. Elle est formée par l'épithélium pulmonaire et l'endothélium qui forme la paroi des capillaires sanguins pulmonaires. Particulièrement mince, son épaisseur est de l'ordre de **0,2 à 0,3 μm** .

L'épithélium alvéolaire, reposant sur une lame basale très résistante, riche en collagène IV, est formé par deux sortes de cellules, les pneumocytes I, aplatis, qui couvrent environ 96% de la surface alvéolaire, et les pneumocytes II, à rôle sécréteur, qui couvrent les 4% restant. L'espace entre deux alvéoles voisines est occupé par une mince cloison de tissu conjonctif.

La surface alvéolaire des mammifères est recouverte d'une couche fine d'eau associée à un film lipo-protéique, le **surfactant**, d'une épaisseur de quelques dizaines de nm. Le surfactant est un mélange de molécules sécrétées par les pneumocytes II. Présent chez tous les vertébrés. Demi-vie d'environ une demi-journée donc production continue.

Synthèse dans le RE, formation de corps lamellaires, véritable réservoir de matériel tensioactif. Il sera incorporé dans la couche monomoléculaire à l'interface avec l'air pour former le film de surface. Il est formé de lipides (à 90%), -phospholipides surtout, et cholestérol essentiellement-, et de protéines. Il a des propriétés tensio-actives essentielles au maintien de l'étalement de la surface alvéolaire, donc à son état fonctionnel. Le phospholipide majeur du surfactant est une phosphatidyl-choline, à acides gras saturés.

Quatre protéines caractéristiques, SP-A, B, C et D, interagissent avec les lipides. Les lipides du surfactant sont des molécules amphiphiles qui s'orientent spontanément pôle hydrophile du côté cellule alvéolaire et pôle hydrophobe vers l'air. Cet édifice moléculaire abaisse la tension superficielle de la paroi alvéolaire, ce qui d'une part diminue le travail mécanique de la ventilation et d'autre part réduit les risques de collapsus (loi de Laplace, cf plus loin).. L'épaisseur de la couche de surfactant est plus importante dans les petites alvéoles que dans les grandes. Ainsi, la tension superficielle dans les petites alvéoles est davantage abaissée, ce qui évite qu'elles ne se vident dans les grandes. Cela maintient une surface d'échange importante. Chez l'homme, le déficit en surfactant est la cause du syndrome de détresse respiratoire du nouveau-né prématuré.

I.3. Un organe dédié aux échanges

L'échangeur pulmonaire d'un mammifère est donc formé par la surface cumulée de l'épithélium des alvéoles pulmonaires au contact des capillaires sanguins. Cette surface, particulièrement étendue pour le volume de l'organe, est développée dans une

cavité qui ne communique avec l'air environnant que par des orifices réduits, grâce aux voies aériennes : l'échangeur respiratoire est **internalisé**.

Le maintien de cette vaste surface d'échange internalisée sous forme étalée donc fonctionnelle est possible, d'une part grâce au surfactant qui recouvre l'épithélium alvéolaire, d'autre part grâce aux plèvres qui rattachent les poumons à la cage thoracique.

L'épaisseur de la barrière alvéolo-capillaire à travers laquelle se font les échanges gazeux respiratoires entre air et sang est par ailleurs très réduite. Comme dans les exemples précédents, les valeurs élevée du paramètre « S » et faible de « e » (loi de Fick) permettent d'optimiser les flux de gaz respiratoires.

➤ **Resp 1c**

II. RENOUELEMENT DU FLUIDE RESPIRATOIRE PAR VENTILATION PULMONAIRE

La mise en mouvement des fluides respiratoires par ventilation permet leur renouvellement au niveau de l'échangeur. Il en résulte des gradients de pression partielle, moteur des échanges gazeux respiratoires.

II.1. La diffusion alvéolaire

Volume de poumon de mammifère représente environ 5% du volume total du corps quelque soit la taille de l'animal.

Echanges au niveau des alvéoles, trachées, bronches et bronchioles ne font qu'acheminer l'air.

L'épaisseur de la barrière alvéolaire séparant air-sang = fraction de μm .

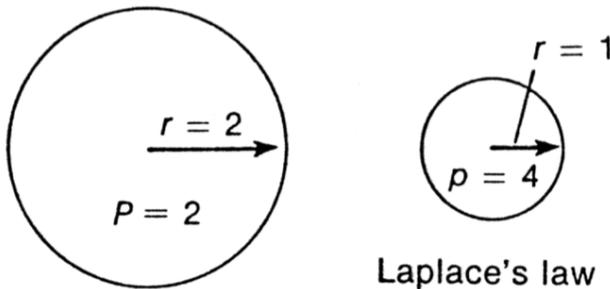
Au nombre d'environ 100 millions, de forme quasi sphérique, les alvéoles représentent une surface d'environ 100 m^2 . Leur rayon est compris entre 0,05 et 0,1 mm. Les alvéoles se contractent en moyenne 15000 fois par jour. Au cours d'un cycle respiratoire, la variation de surface pulmonaire est évaluée à environ 7 m^2 .

Or l'air alvéolaire est saturé en vapeur d'eau qui se condense au contact de la paroi alvéolaire. Ainsi, des molécules d'eau tapissant sa surface interne tendent à provoquer la contraction de la bulle alvéolaire à et diminuer sa surface.

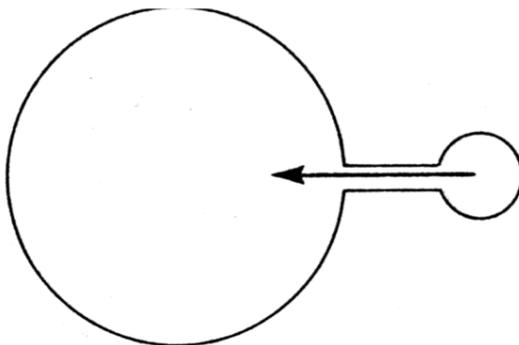
On peut faire l'analogie avec une bulle de savon quand intérieur de la bulle en relation avec l'extérieur, tend à se rétracter et à chasser l'air.

Il y a donc beaucoup d'alvéoles de diamètre différent.

Loi de Laplace $P = 2\gamma/r$ montre que P augmente quand r diminue à tension superficielle égale. Le poumon devrait donc s'affaisser. C'est le collapsus.



A Two bubbles in air



B Bubbles joined

Le surfactant, produit par le pneumocyte II, tapisse l'épithélium sur 50 à 100 nm d'épaisseur. Il permet de réduire considérablement la tension superficielle et d'éviter le collapsus. La tension superficielle $\gamma = dW/dS$ représente le travail nécessaire par unité de surface pour déplacer les particules d'un liquide de volume à la surface.

➤ **Feuille spécifique**

II.2. La mécanique ventilatoire pulmonaire

A. Le moteur des échanges est un gradient de pO_2 et pCO_2 .

✓ Resp 2

Sujet au repos et au niveau de la mer (760 mm de Hg) donc : $pO_2 = 21\% \times 760 = 160$ mm de Hg

$pCO_2 = 0,035\% \times 760 = 0,3$ mm de Hg

Valeur de pO_2 alvéolaire contrôlée par pO_2 atmosphérique, consommation d' O_2 par les cellules et la ventilation pulmonaire.

$pO_2 = 105$ mm de Hg

$pCO_2 = 40$ mm de Hg

Chez un sujet normal, pO_2 et pCO_2 dans les alvéoles déterminent les valeurs de pO_2 et pCO_2 dans le sang artériel systémique.

Le sang qui pénètre dans les capillaires pulmonaires est le sang systémique veineux qui revient des tissus.

pO_2 basse = 40 mm de Hg

pCO_2 élevée = 46 mm de Hg

La diffusion nette des gaz a lieu jusqu'à l'équilibre des pressions partielles de part et d'autre de la membrane alvéolo-capillaire.

B. La ventilation pulmonaire

Chez les vertébrés, la ventilation s'effectue par pompage refoulant (Grenouille) ou aspirant (Reptiles, Oiseaux, Mammifères).

1. Une inspiration active et une expiration passive

L'inspiration active permet une entrée d'air tandis que l'expiration passive permet sa sortie. Noter que ces deux mouvements peuvent être accrus par une contraction musculaire active.

Inspiration nécessite une cage thoracique close dans laquelle la pression devient $< P. atm.$

Le diaphragme participe à ces mouvements

➤ Resp 3a

Coût énergétique de la ventilation $< 3\%$ de la consommation d' O_2 de l'organisme # des poissons (10 à 30 %)

Le trajet de l' O_2 atm \rightarrow tissu (inversement pour le CO_2) suit deux étapes :

1. atmosphère \rightarrow alvéole = convection puis diffusion
2. alvéole \rightarrow sang capillaire pulmonaire = diffusion

2. Les données de spirométrie et ses enseignements

La réalisation d'un spirogramme permet de définir un certain nombre de grandeurs physiques indicatrices de l'efficacité ventilatoire.

➤ Resp 3b

Rythme tidal. 12 cycles Insp/exp par minute en moyenne (10 à 15).

Volume courant = 0,5 L = volume inhalé lors d'une inspiration normale au repos. Seuls 0,35 L (0,5 – 0,15) arriveront aux poumons à cause de l'espace mort qui représente 1/3 du volume courant

Espace mort (0,15 L). A la fin de l'expiration, trachée et bronches sont remplies d'air vicié (peu d' O_2 et beaucoup de CO_2) venant des poumons lequel est ramené dans les poumons lors de l'inspiration suivante avant que l'air frais venant de l'extérieur y pénètre à son tour.

Cet air présent dans les voies respiratoires réduit l'arrivée d'air frais \rightarrow Lors d'un exercice physique, une inspiration profonde de 3 L par exemple \rightarrow Volume mort = 1/20^e de l'air courant (3/0,15). Ainsi, l'importance relative de l'espace mort diminue donc au cours de l'effort physique.

Air résiduel (1 L) Les poumons ne se vident jamais complètement \rightarrow lors d'une inspiration mélange air inspiré/air résiduel/air de l'espace mort \rightarrow Impossible de remplir complètement le poumon d'air frais.

Un poumon au repos contient environ 1,65 L d'air au début de l'inspiration.

Au cours de l'inspiration \rightarrow + 0,35 L se mélange \rightarrow Taux de renouvellement de 1/5^e \rightarrow

Composition de l'air alvéolaire reste sensiblement constante (15% d' O_2 et 5% de CO_2) même au cours de l'exercice physique \rightarrow

Ventilation accrue au cours de l'effort répond exactement à la consommation d' O_2 .

La ventilation totale par minute est appelée **ventilation minute**

$$\text{Ventilation} = \text{volume courant} \times \text{fréquence respiratoire}$$

$mL \cdot \text{min}^{-1} \qquad mL/\text{resp} \qquad \text{resp} \cdot \text{min}^{-1}$

Exple d'un homme normal : $0,5 \text{ L} \times 12 = 6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Il faut en réalité enlever le volume mort soit environ $1/3 \rightarrow$ seuls 4 L d'air frais sont disponibles. C'est la **ventilation alvéolaire**.

$$\text{Ventilation alvéolaire} = (\text{volume courant} - \text{volume mort}) \times \text{fréquence respiratoire}$$

➤ **Resp 4a**

3. Distensibilité et efficacité ventilatoire

Le système mécanique ventilatoire qui permet le renouvellement des gaz dans les alvéoles peut être groupé en 2 ensembles :

- actif : muscles ventilatoires
- passif : voies aériennes, poumon et paroi thoraco-abdominale.

Le premier (actif) crée des pressions qui s'appliquent sur le second (passif)

➤ **Resp 4b**

Lorsqu'une structure est résistante, il y a proportionnalité entre pression appliquée et débit obtenu = cas des voies aériennes.
Lorsqu'une structure est distensible, il y a proportionnalité entre pression appliquée et le changement de volume obtenu = cas du poumon et de la paroi thoraco-abdominale .

Mesure de la courbe P-V chez l'homme.

La pression qui distend le poumon = différence P interne (alvéolaire) et P externe (pleurale).

P alvéolaire = P buccale en absence de débit respiratoire.

P pleurale = P oesophagienne dont variation équivalente à celles de la pression pleurale

Distensibilité évaluée par deux paramètres :

La pente $\Delta V/\Delta P$ dans la partie linéaire est la compliance = capacité d'une structure à être étirée. Plus elle est grande, plus il est facile de l'étirer. Elle est de $0,2 \text{ L/cm H}_2\text{O}$ pour un sujet jeune. La pression maximale de rétraction pulmonaire ($30 \text{ cm H}_2\text{O}$) = pression transpulmonaire lors de l'inspiration maximale.

➤ **Resp 4c**

Compliance déterminée par le tissu élastique conjonctif et le surfactant. Plus il y a du surfactant, plus la compliance est grande.
Faible compliance signifie qu'il faut une pression transpulmonaire supérieure à la normale pour atteindre un degré donné de distension pulmonaire \rightarrow contractions plus énergétiques des muscles intercostaux inspiratoires et du diaphragme \rightarrow coût énergétique plus important.

Req : maladie des mineurs, de fumeurs = baisse de compliance \rightarrow difficulté à respirer.

Bilan :

- ✓ **La ventilation assure un renouvellement des fluides respiratoires externe, eau ou air. Le coût énergétique de ce renouvellement dépend du milieu de vie.**
- ✓ **Les échanges gazeux respiratoires ont lieu au travers des échangeurs respiratoires par diffusion. Ces échangeurs, internalisés ou externalisés, sont de faible épaisseur et de grande surface, répondant ainsi à deux impératifs de la loi de Fick.**
- ✓ **Le troisième impératif est le maintien des gradients de pression partielle, moteur des échanges. La convection du fluide externe d'une part et du fluide interne, le sang, d'autre part, permettent la réalisation de ce 3eme impératif.**
- ✓ **Il se pose toutefois la question de la prise en charge du dioxygène par le fluide interne et de son acheminement jusqu'aux tissus utilisateurs.**