

PHYSIOLOGIE DE LA RESPIRATION

La respiration c'est l'ensemble des fonctions assurant l'échange oxygène-gaz carbonique entre l'atmosphère et les cellules de l'organisme.

L'objectif de la respiration est de fournir l'O₂ à toutes les cellules de l'organisme en fonction de leurs besoins et de prendre en charge le CO₂ rejeté.

La respiration se fait en 4 phases:

- La respiration pulmonaire qui permet le renouvellement de l'O₂ et le rejet du CO₂
- Le passage des gaz de l'air des alvéoles vers les capillaires sanguins
- Le transport de l'O₂ et le rejet du CO₂ par le sang ;
- La respiration cellulaire pendant laquelle la cellule utilise l'oxygène et rejette le CO₂.

La physiologie respiratoire des vertébrés aériens et homéothermes, les mammifères et les oiseaux, est dominée par six notions principales. Certaines de ces notions sont applicables pour tous les animaux.

- La ventilation pulmonaire est indispensable à la vie.
- L'organisme consomme de l'O₂ et produit du CO₂
- Le siège des oxydations se trouve dans les cellules
- L'intensité des échanges gazeux et de la dépense d'énergie varie en fonction de l'activité physique, du froid, de la chaleur...
- L'intensité des échanges gazeux varie en fonction des besoins.
- Le régime de fonctionnement des appareils ventilatoire et circulatoire est réglé en fonction des besoins d'échanges gazeux de l'organisme.

I. CHAPITRE 1 : RAPPEL

1. La cage thoracique

La cage thoracique comprend les muscles inspiratoires et les muscles expiratoires

- La cage thoracique est une **enceinte élastique, creuse, étanche et déformable**
- Les Muscles respiratoires : ils représentent 3 % du poids vif (35% m. inspiratoires, 65% m. expiratoires)
- Les mouvements thoraciques et abdominaux participent à la respiration

1.1. Les muscles inspiratoires

Le diaphragme et les muscles intercostaux externes et accessoires sont les muscles inspiratoires. Au cours d'un effort inspiratoire, le pourcentage de la masse musculaire active chez le chien :

- Diaphragme : 44 %
- Intercostaux externes : 32 %
- Scalènes : 24 % en fait le plus actif : diaphragme

1.2. Le diaphragme

- Membrane musculaire et aponévrotique

- Innervation par le nerf phrénique
- Effet d'une section des nerfs phréniques : arrêt de la respiration
- Muscle le plus important de l'inspiration.

Quand le diaphragme se contracte, le contenu abdominal est poussé vers le bas et les côtes sont soulevées vers le haut et l'extérieur.

1.3. Les muscles expiratoires

Ils comprennent les muscles abdominaux, les muscles intercostaux internes et les muscles accessoires.

- Au cours d'un effort expiratoire, le pourcentage (%) de la masse musculaire active chez le chien est :
 - muscles obliques internes et externes : 50%
 - muscles intercostaux internes : 32%
 - muscles transverse de l'abdomen : 18%

Le plus actif par rapport au débit sanguin est le muscle transverse.

Tableau 1:Muscles inspiratoire et expiratoire

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

2. Les poumons

Ils ont structure fibreuse et un surfactant.

2.1. Structure fibreuse

- Fibres : axiales, périphériques, septales alvéolaires
- Caractéristiques :
 - Fibres de collagène et de réticuline
 - Fibres élastiques
 - Protéoglycans

Conséquences :

Notion d'hystérésis (« mémoire ») : quand le poumon se gonfle (inspiration), il suit une courbe différente de celle qu'il suit lorsqu'il se dégonfle (expiration). On dit qu'il y a hystérésis.

• Compliance pulmonaire (C)

C'est la pente de la courbe pression - volume. C'est la variation de volume pour une variation donnée de pression.

$$C \text{ (ml/cm H}_2\text{O)} = \Delta V / \Delta P$$

- Plus C est élevée, plus la distensibilité est grande
- Elastance est l'inverse de la compliance
- Facteurs de variation de la compliance

La compliance est mesurée lors d'un examen pléthysmographique, qui évalue les variations du volume du thorax au cours de la respiration et les pressions correspondantes.

Dans le poumon, l'**élastance** s'oppose à la compliance pulmonaire. Lorsqu'on insuffle un poumon, il gonfle, son volume augmente et l'élastance diminue. En d'autres termes, l'élastance reflète la résistance à l'augmentation du volume du poumon. On parle d'élastance vasculaire pour désigner le même rapport au sein d'un vaisseau.

En physiologie, rapport de la variation de pression (ΔP) et de la variation de volume (ΔV), produite dans une enveloppe à paroi plus ou moins élastique, soit:

$$E = \Delta P / \Delta V$$

Surfactant

C'est un mince film de lipoprotéines tensioactives recouvrant l'épithélium alvéolaire. Il tapisse les alvéoles et réduit la tension de surface. Il est produit par les cellules alvéolaires de type II (pneumocytes de type II) et consiste principalement en un lipide, la dipalmitoyl-phosphatidyl-choline

- Composition : phospholipides, protéines, mucopolysaccharides
- 65% phospholipides = lécithines saturées. Dipalmitoyl-phosphatidyl-choline (DPPC)
- Mise en évidence du rôle tensioactif (Von Neergaard)
- Mécanisme d'action du surfactant
- Conséquences :
 - Augmentation de la compliance pulmonaire
 - Stabilité des alvéoles
 - Prévention de l'œdème pulmonaire

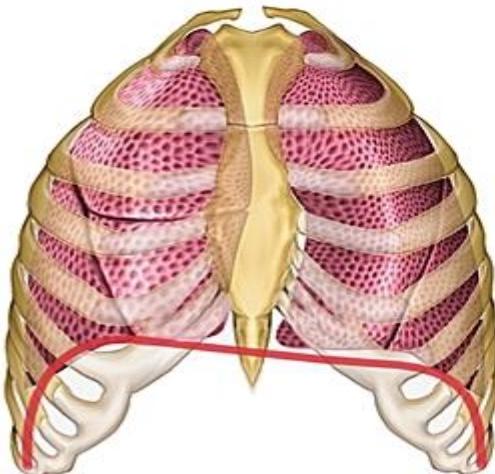
Ex : syndrome de détresse respiratoire chez le nouveau-né

3. Les plèvres

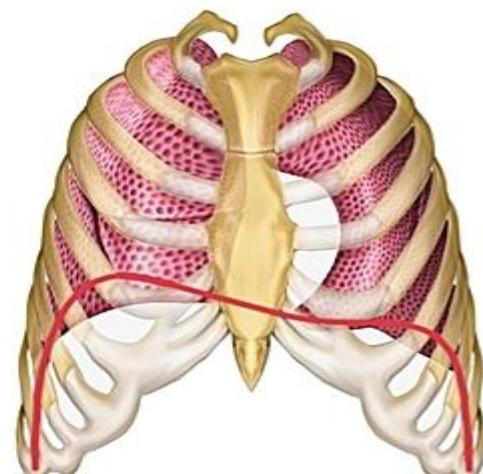
La plèvre est constituée de 2 feuillets ou plèvres (viscéral et pariétal) :

- Plèvre pariétale
 - Unique couche de cellules
 - Transfert de liquide
- Plèvre viscérale
 - Unique couche de cellules
 - Transfert de liquide
- Espace interpleural (virtuel est composé de cellules et de quelques ml de liquide)
- Vide pleural = pression négative intrathoracique (< Pression atmosphérique)

- Inspiration : -10 à -15 cm H₂O
- Expiration : -3 à -8 cm H₂O
- Inspiration forcée
- Origine : surtout propriétés élastiques du parenchyme pulmonaire
- Pneumothorax (il est dû à la présence anormale d'air dans la cavité pleurale. L'origine est spontanée ou traumatique)



À l'inspiration, le diaphragme (ligne rouge) se contracte et s'aplatit.



À l'expiration, il reprend sa position de repos « en dôme ».

Figure 1: Les phases de la respiration : inspiration (à gauche) et expiration (à droite). (Michel Saemann et François Poulain - Archives Larousse)

4. Les voies aériennes

4.1. Anatomie

- Armature cartilagineuse (sauf bronchiole Ø<1mm)
- Système ramifié
- Effet sur la résistance à l'écoulement : maximale au niveau des bronches moyennes

4.2. Bronchomotricité

- Variations de la résistance
- Contrôle par le système nerveux autonome :

Sympathique : bronchodilatation

Parasympathique : bronchoconstriction

4.3. Voies aériennes

✚ Voies aériennes supérieures

- La bouche,
- Le nez,

- réchauffer et filtrer l'air inspiré par les narines ;
- participer au mécanisme de perception des odeurs (olfaction) ;
- contribuer à la production de la voix (phonation) ;
- limiter l'assèchement de l'organisme en récupérant une partie de l'eau du corps pendant l'expiration

- La gorge,

- Le pharynx :

Il relie les fosses nasales au larynx et la cavité buccale à l'œsophage. C'est un carrefour entre les voies aériennes supérieures, qui permettent le passage de l'air et les voies digestives supérieures, qui permettent le passage des aliments. Il est impliqué dans la respiration, dans la phonation et la déglutition

- Le larynx a 3 fonctions principales:

La respiration, la protection des voies respiratoires et la phonation.

- La trachée

Lors de l'inspiration, son rôle est d'apporter de l'air filtré, aux bronches. Lors de l'expiration, elle élimine l'air chargé de CO₂ rejeté par les poumons.

Voies aériennes inférieures

- La trachée
- Les bronches

Les bronches sont les voies acheminant l'air en direction et en provenance des poumons. Ces voies aériennes de plus en plus petites délivrent de l'air riche en oxygène de la trachée aux poumons. Lors d'une activité physique, la relaxation du muscle lisse des bronchioles provoque leur dilatation. Ces branches se subdivisent ensuite en bronches secondaires et tertiaires, puis en bronchioles.

- Les bronchioles
- Les alvéoles

4.4. Distribution de l'air n'est pas homogène

- Répartition non homogène

• Voies de ventilation collatérale :

- **Pores interalvéolaires de KOHN**
- **Canal bronchiolaire de LAMBERT**
- **Canal interbronchiolaire de MARTIN**

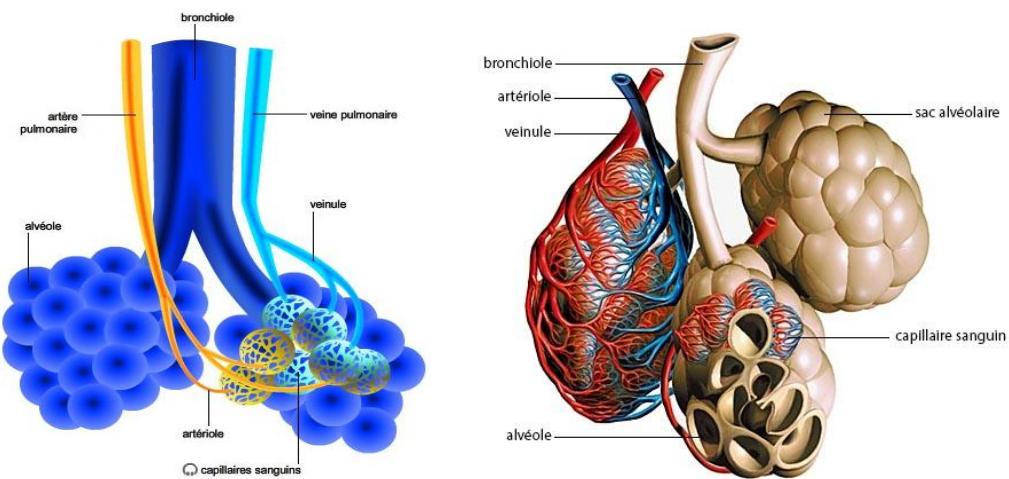


Figure 2 : Les alvéoles pulmonaires (Dessin Michel Saemann - Archives Larousse Médical)

- Absence de ventilation collatérale dans poumon lobulé chez le porc et les bovins
- Ventilation collatérale importante chez le chien (Celle-ci s'effectue d'un segment pulmonaire à l'autre et non d'un lobe pulmonaire à l'autre, lorsque ceux-ci sont nettement séparés par une scission complète)
 - Cheval : intermédiaire
 - Conséquence : physiopathologie respiratoire

La suppléance est à 95 % chez le chien, 16% chez le cheval, nulle chez le bovin.

La **ventilation collatérale** (CV) est définie comme le passage d'air d'une zone pulmonaire à l'autre par des voies anatomiques (port de Kohn/Lambert/Martin) et par des ponts parenchymateux interlobaires en cas de scission incomplète (Les scissions pulmonaires divisent les poumons en lobes).

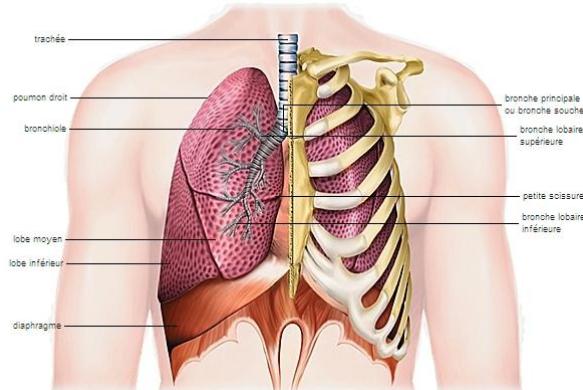


Figure 3: Poumons et bronches (Dessin Michel Saemann - Archives Larousse)

Conclusions

La cage thoracique est une enceinte déformable sous l'action de muscles inspiratoires et expiratoires

Les poumons sont une structure fibreuse, aérée et élastique

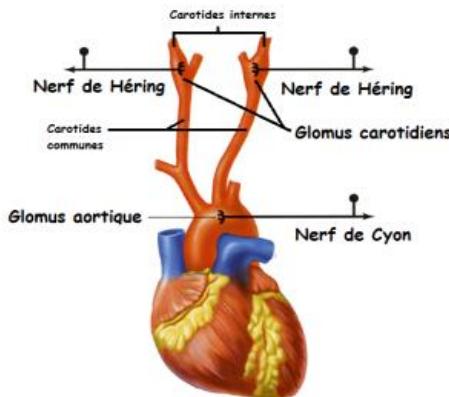
La plèvre : le vide pleural

Les voies aériennes : résistance et distribution de l'air

- La section des nerfs phréniques entraîne un arrêt respiratoire

- Un poumon rempli d'eau est plus compliant qu'un poumon rempli d'air
- Une stimulation parasympathique entraîne une bronchodilatation
- Les bovins et les porcins sont plus sensibles aux pathologies respiratoires que les autres espèces **Pourquoi?**

- **Innervation cœur et poumons**



II. CHAPITRE 2: LA MECANIQUE VENTILATOIRE

IV. Les volumes et les capacités pulmonaires

1. Le volume courant ou volume tidal (VT):

Le volume courant est le volume inspiré ou expiré à chaque mouvement respiratoire normal (VT).

2. Le volume de réserve inspiratoire (VRI)

Le VRI est le volume qui peut être inspiré en plus du volume courant. Il est utilisé pendant l'exercice.

3. Le volume de réserve expiratoire (VRE)

Le VRE est le volume qui reste dans les poumons après une expiration du volume courant.

4. Le volume résiduel (VR)

A la fin d'une expiration forcée, il reste un certain volume dans les poumons appelé volume résiduel (VR) qui peut être apprécié par une méthode de dilution d'un gaz, le plus souvent l'azote pulmonaire ou d'un gaz étranger l'hélium.

Il existe normalement un certain rapport entre la capacité totale pulmonaire et le VR qui, chez l'adulte jeune est d'environ 0,20 à 0,25 mais qui augmente avec l'âge.

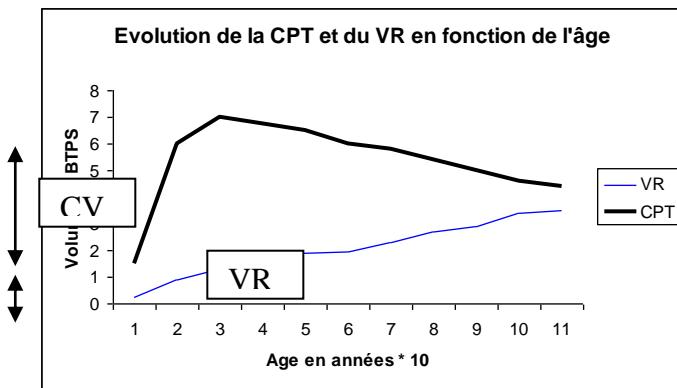


Figure 4: Evolution de la CPT et du VR en fonction de l'âge

Le rapport VR/ CPT augmente avec l'âge par suite d'une diminution de la CPT et d'une augmentation du VR.

$$\text{VR} = \text{VE} * \text{FN}_2 / 0.8$$

5. Les capacités pulmonaires

- **La capacité vitale (CV) :** représente le volume maximum d'air qu'un sujet peut mobiliser volontairement au cours d'un seul mouvement respiratoire.

$$\text{CV} = \text{VRI} + \text{VT} + \text{VRE}$$

La CV constitue un paramètre important toujours recherché en début d'une exploration fonctionnelle ventilatoire. Sa valeur dépend de différents facteurs en particulier l'âge, la taille et le sexe.

BTPS : Body Temperature and Pressure, Dry

Femme : $\text{CV ml BTPS} = (21.78 - 0.101 * \text{âge}) * \text{taille en cm}$

Homme : $\text{CV ml BTPS} = (27.63 - 0.112 * \text{âge}) * \text{taille en cm}$

- **La capacité inspiratoire (CI) :**

Elle correspond au volume maximal d'air que l'on peut inspirer depuis la position de fin d'expiration.

$$\text{CI} = \text{VT} + \text{VRI}$$

- **La capacité résiduelle fonctionnelle (CRF) :**

Elle correspond au volume pulmonaire en fin d'expiration normale. Au point de vue physiologique, elle a une signification importante car elle correspond au volume pulmonaire dans lequel se dilue l'air inspiré ; le renouvellement du gaz contenu dans les alvéoles est d'autant meilleur que ce volume (CRF) est plus petit.

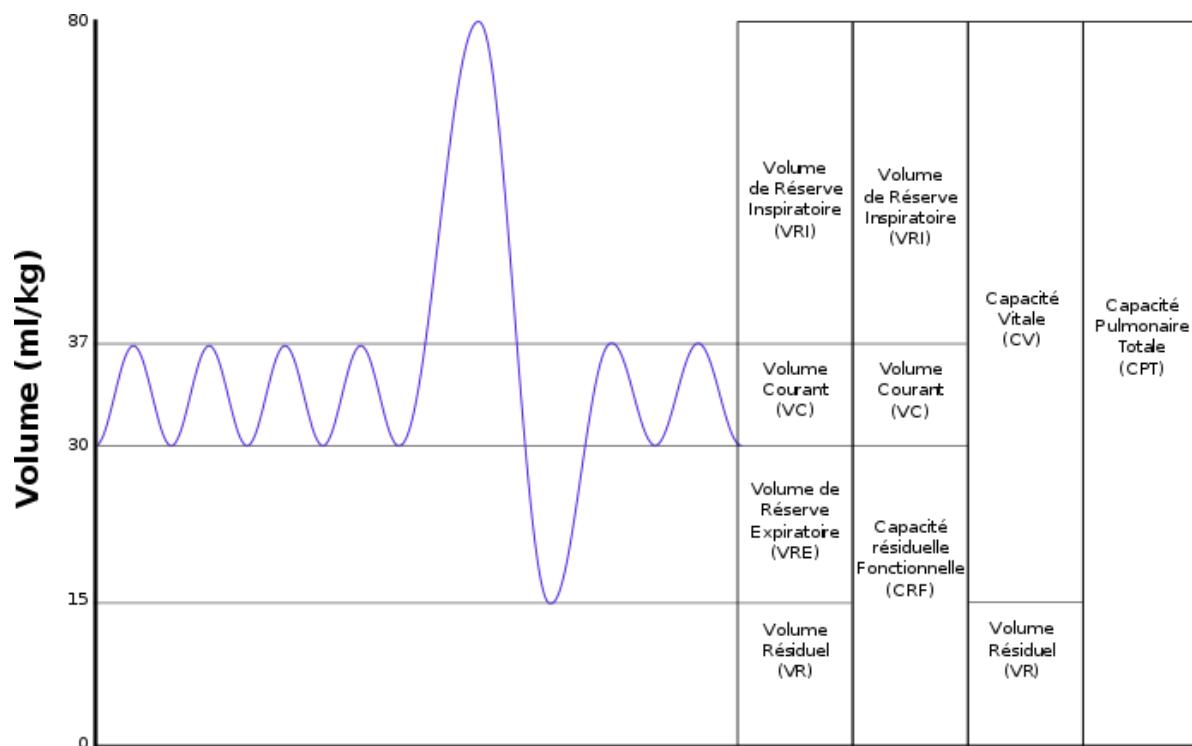


Figure 5 : Volume et capacité pulmonaires

- **La capacité pulmonaire totale (CPT) :**

$$\text{CPT} = \text{CV} + \text{VR}$$

III. PRODUCTION DE CO₂, CONSOMMATION D'O₂ ET QUOTIENT RESPIRATOIRE

Les différents tissus de l'organisme consomment en permanence l'O₂ et éliminent du CO₂. Ces échanges tissulaires se reflètent au niveau du poumon à l'état stationnaire et en l'absence de déséquilibre du transport de l'O₂ et du CO₂.

1. La production de CO₂

$$\text{VCO}_2 = \text{VE} * \text{FE CO}_2 - \text{VI} * \text{FI CO}_2$$

$$\text{VI} * \text{FI CO}_2 = 0 \text{ d'où } \text{VCO}_2 = \text{VE} * \text{FE CO}_2$$

FI: fraction inspirée

FE: fraction expirée

VI: volume inspiré

VE: volume expiré

2. La consommation d'O₂

La consommation d'O₂ est égale à la différence entre le débit d'O₂ inspiré et le débit d'O₂ expiré.

$$\text{VO}_2 = \text{VE} * \text{FE O}_2 - \text{VI} * \text{FI O}_2$$

3. Le quotient respiratoire

Connaissant VCO_2 et V O_2 mesurés à la bouche, on peut calculer R.

$$R = \text{V CO}_2 / \text{V O}_2 \quad R \text{ est différent de 1}$$

A l'état stationnaire R mesuré au niveau de la bouche correspond au R métabolique. Est compris entre 0,7 et 1 chez l'homme. R moyen = 0,80

4. Le débit expiratoire maximal (DEM) = VEMS

Le **VEMS** : le volume expiré maximal seconde

Il faut après une inspiration forcée, expirer la capacité vitale (CV) aussi rapidement que possible. Seul est mesuré le volume expulsé au cours de la 1^{ère} seconde. Le VEMS varie avec la taille, l'âge et le sexe.

5. Les pressions

Les pressions créées par la contraction des muscles respiratoires sont responsables de la mobilisation du thorax et de la circulation de l'air dans les voies aériennes respiratoires.

Chaque gaz contenu dans l'air exerce une pression appelée pression partielle

L'atmosphère qui entoure la Terre est un mélange de gaz en différentes proportions et d'eau.

Les gaz les plus présents dans l'atmosphère sont :

- l'azote ($\approx 78\%$),
- l'oxygène ($\approx 21\%$),
- le dioxyde de carbone ($\approx 0.04\%$)
- des gaz rares dont principalement l'argon ($\approx 0.96\%$)

Selon **la loi de Dalton**, la pression totale exercée par un mélange de gaz est égale à la somme des pressions de chacun des gaz composant ce mélange :

$$P_{\text{atm}} = P_{\text{O}_2} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{N}_2} + P_{\text{gaz rares}} + P_{\text{H}_2\text{O}}$$

Ainsi, la pression de chacun des gaz de l'air atmosphérique sera donc égale au produit entre le pourcentage du gaz présent dans l'air et la pression atmosphérique.

Au niveau de la mer, la pression atmosphérique étant de **760 mmHg**

En mécanique ventilatoire il existe 4 pressions (P) fondamentales :

- La pression barométrique (P_B)
- La pression buccale (P_{Bb})
- La pression alvéolaire (P_A)
- La pression intra thoracique (P_L)

1. Au repos (avant le début de l'inspiration)

- La P alvéolaire est égale à la P atmosphérique
- La P intrapleurale est négative
- Le volume du poumon est la capacité résiduelle fonctionnelle (CRF)

2. Pendant l'inspiration

- Les muscles inspiratoires se contractent et provoquent l'accroissement du volume du thorax.
- La P intrapleurale devient encore plus négative pendant l'inspiration.
- Le volume du poumon s'accroît d'un volume courant (CRF+VT)

3. Pendant l'expiration

- La P_{Alv} devient supérieure à la P atmosphérique
- La P intrapleurale revient à sa valeur de repos pendant une expiration normale
- Le volume du poumon retourne à la CRF avant qu'un autre cycle ne commence.

4. L'élasticité du thorax

L'élasticité de la paroi thoracique dépend de l'élasticité des divers éléments de la cage thoracique (muscle au repos, ligaments...). Il s'agit de déterminer les forces élastiques développées par les muscles respiratoires à l'état de relaxation totale par inhibition volontaire de l'activité musculaire.

IV. LES ECHANGES GAZEUX PULMONAIRES

Généralités

La loi de Dalton sur les pressions (P) partielles peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$P_{partielle} = P_{totale} \times \text{concentration fractionnaire}$$

1. Dans un air inspiré sec : La PO_2 est calculée comme suit :

$$PO_2 = 760 \text{ mmHg} \times 0,21 = 160 \text{ mm Hg}$$

2. Dans un air trachéal humidifié, à 37 °C, le calcul est modifié pour tenir compte de la P partielle d' H_2O à 47 mm Hg.

$$P_{totale} = 760 \text{ mm Hg} - 47 \text{ mm Hg} = 713 \text{ mm Hg}$$

$$PO_2 = 713 \text{ mm Hg} \times 0,21 = 150 \text{ mm Hg}$$

Le gaz qui est rejeté à chaque expiration n'a pas la même composition que l'air ambiant : il est plus pauvre en O_2 et plus riche en CO_2 .

Ce processus d'échange gazeux s'effectue au niveau de la surface d'échange alvéolo-capillaire entre le gaz alvéolaire et le sang.

Le facteur essentiel des échanges est la différence de pression régnant entre les 2 milieux. Celle-ci provoque un courant gazeux à travers la membrane qui les sépare par simple processus de diffusion.

Tableau 2: Fraction et pression des gaz

		Sang veineux mêlé %	Sang artériel %
Fraction des gaz	[O ₂]	14.2	19.2
	[CO ₂]	53	49
Pression partielle en Torr	O ₂	38	92
	CO ₂	46.5	40.05

V. MESURE DES ECHANGES GAZEUX

Les 2 techniques les plus habituellement utilisées chez l'homme sont la spirographie en circuit fermé, type Benedict et le circuit ouvert.

Le spirographe de Benedict

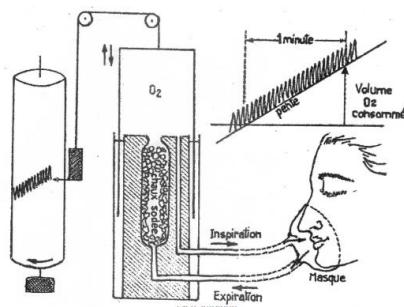


Figure 6 : Le spirographe de Benedict

La consommation d' O₂.

$$\text{VO}_2 = H * S * Fc$$

H : dénivellation

S : section de la cloche

Fc : facteur de correction

$$\text{VO}_2 = \text{VIO}_2 - \text{VEO}_2 = \text{VI} * \text{FIO}_2 - \text{VE} * \text{FEO}_2 / \text{mn}$$

$$\text{VCO}_2 = \text{VECO}_2 - \text{VICO}_2$$

$$\text{VCO}_2 = \text{VE} * \text{FECO}_2$$

$$\text{VICO}_2 = 0$$

FE: fraction du gaz à l'inspiration

FI: fraction du gaz à l'expiration

VE : volume du gaz à l'inspiration

VI : volume du gaz à l'expiration

VI. VALEURS DES ECHANGES GAZEUX PULMONAIRES

Les échanges gazeux pulmonaires sont directement liés au métabolisme énergétique. Il est variable sensiblement chez l'homme au repos, de taille et de poids moyens.

STPD: Standart Temperature and Pressure, Dry

La consommation d' O₂ varie autour de 0.25 à 0.30 1STPD / mn

La production de CO_2 varie de 0.20 à 0.24 1STPD / mn

Les échanges gazeux respiratoires ne peuvent pas être abaissés au-dessous d'une certaine limite qui correspond **au métabolisme basal**.

La consommation d' O_2 peut être augmentée dans des proportions importantes quand l'organisme doit mettre en jeu les processus de thermorégulation :

- Lors d'exposition au **froid** : la production de chaleur (thermogenèse) pour compenser les pertes caloriques, augmente le métabolisme énergétique et en conséquence la consommation d' O_2 . Il existe cependant une limite des processus de thermogenèse à laquelle correspond le métabolisme de sommet où la consommation d' O_2 représente environ 6 fois la valeur de repos. Au-delà la température corporelle n'est plus maintenue. **Voir p18**

Lors d'exposition à la **chaleur** : la consommation d' O_2 augmente modestement. Cette augmentation correspond au coût des processus thermolytiques.

Evolution de la consommation d' O_2 lors de l'exercice : la consommation d' O_2 augmente dès le début de l'exercice, rapidement d'abord, plus lentement et progressivement ensuite jusqu'à une valeur d'équilibre qui n'est atteinte qu'après un délai variable avec l'intensité de l'exercice (phase d'installation). L'énergie mécanique qui est produite provient d'énergies chimiques produites essentiellement par les oxydations cellulaires.

La capacité d' O_2 : c'est la quantité maximale d' O_2 qui peut se combiner chimiquement avec l'hémoglobine dans une unité de volume du sang.

Homme adulte : Hb 15.3 g/ 100 ml de sang correspond à une capacité d' O_2 de 21 ml d' O_2 /100 ml de sang. 1 g d'Hg fixe 1.389 ml d' O_2 .

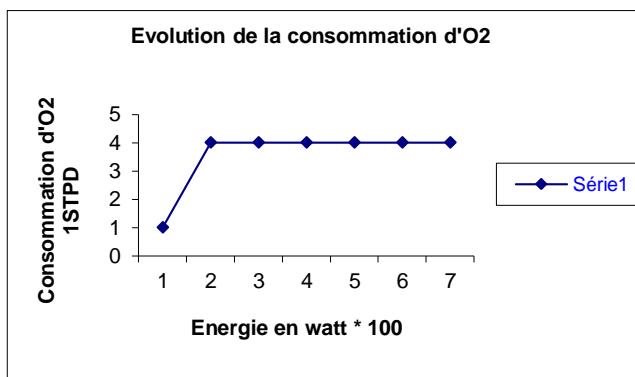


Figure 7: Evolution de la consommation d' O_2

STPD : Standard, Température and Pressure Dry, volume mesuré à 0°C (273°K), 1013 hPa, sec.

1 hPa (hectoPascal) = 1.020 cm d' H_2O = 0.750 mm Hg = 0.750 torr

1 hPa = 10^2 Pascal et 1 Pascal = 1 Newton / m^2 .

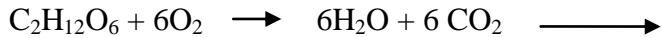
Le quotient respiratoire (R) voisin de 1

$$R = \text{Production d}'\text{O}_2 / \text{consommation d}'\text{O}_2$$

La teneur en O₂ n'étant pas la même dans les glucides, les lipides et les protides, le R varie suivant la proportion de ces éléments intervenant dans les processus d'oxydation.

Le R dépend donc de la nature des substances oxydées dans l'organisme pour la production d'énergie. Au cours de l'exercice musculaire R peut varier.

- Soit du fait de l'utilisation préférentielle des glucides où il se rapproche de 1, c'est le cas de l'exercice musculaire modéré



Oxydation du glucose

$$R = 6 \text{ volumes de CO}_2 / 6 \text{ volumes O}_2 = 1$$

- Soit du fait de l'utilisation des lipides où il tend à diminuer, c'est le cas de l'exercice musculaire intense et prolongé après épuisement des réserves glucidiques

• Oxydation des graisses pauvres en O₂



Tripalmitine

$$R = 51 \text{ volumes CO}_2 / 72.5 \text{ volumes O}_2 = 0.7$$

Exercice sub maximal entraîne une production de métabolites acides d'où hyperventilation pulmonaire (**équilibre acido-basique**) ce qui entraîne un rejet excessif de CO₂. R peut dépasser 1.

Consommation d'O₂ : évolution au cours de l'exercice

La consommation d'O₂ augmente du début de l'exercice rapidement d'abord, plus lentement et progressivement ensuite jusqu'à une valeur d'équilibre qui n'est atteinte qu'après un délai variable avec l'intensité de l'exercice. Environ 1 mn si celle-ci est légère, environ 10 mn si celle-ci est sub maximale.

Ce délai est nécessaire pour que le système de prélèvement et de transport de l'O₂, c'est-à-dire les fonctions respiratoires et circulatoires, se soient adaptées et atteignent un niveau de fonctionnement compatible avec le besoin d'échange gazeux.

Arrêt de l'exercice donc diminution de la consommation d'O₂ instantanément d'abord, rapidement puis beaucoup plus lentement pour atteindre sa valeur de repos dans un délai ou temps de récupération qui dépend aussi de l'intensité de l'exercice.

Quotient respiratoire

Rapport entre le volume de dioxyde de carbone (CO₂) rejeté et le volume d'oxygène (O₂) consommé : chez le sujet normal la valeur moyenne du quotient respiratoire est :

$$R = V'\text{CO}_2 / V'\text{O}_2 = 0.8 \text{ au repos.}$$

L'assimilation par Lavoisier de la respiration à une combustion du carbone, selon la formule globale

C + O₂ → CO₂, montre qu'à une molécule d'O₂ consommée correspond une molécule de CO₂ produite.

Selon l'hypothèse d'Avogadro-Ampère on peut déterminer ce quotient par le rapport des volumes ou des débits gazeux pendant une durée donnée.

Sa valeur moyenne varie selon la nature des aliments consommés par l'organisme et la valeur «instantanée» (mesurée sur moins d'une minute) dépend des conditions physiopathologiques, d'où son intérêt en anesthésiologie et en réanimation.

Par ex. lors de la contraction musculaire rapide, qui consomme essentiellement des glucides, R tend vers 1, au contraire dans le jeûne lorsque le sujet brûle ses lipides, R tend vers 0,7. Comme il sort des poumons R fois moins de CO₂ qu'il n'entre d'O₂, il en résulte que, pour R = 0,8, l'organisme «aspire» un débit d'air égal à 0,6 L/min. De ce fait cette «pompe» diminue la pression qui règne dans l'organisme : elle devient plus faible d'environ 10% que la pression atmosphérique (A. Strohl, 1922) : c'est le mécanisme du vide pleural. De même, si l'on injecte un gaz dans l'un des espaces virtuels de l'organisme (plèvre, péricitone, cavité articulaire), ce gaz est rapidement résorbé.

Mais, lorsqu'on considère les échanges respiratoires locaux, la valeur instantanée du rapport entre l'O₂ absorbé et le CO₂ rejeté peut être notablement supérieur à l'unité, notamment au niveau des lobules des sommets des poumons, très ventilés et peu irrigués, où il est de l'ordre de 3 chez le sujet debout. Ce rapport intervient dans le calcul du métabolisme basal pris dans certaines conditions.

Aliments brûlés	Quotient respiratoire
Valeurs moyennes à l'équilibre	
Glucides	R = 1
Protides	R = 0,8
Lipides	R = 0,7
Valeurs «instantanées»	
Jeûne, dénutrition	R tend vers 0,7
Exercice musculaire modéré, frisson	R tend vers 1
Ventilation/Perfusion	R varie dans le même sens

A. L. de Lavoisier, physicien français (1743-1794), A. Avogadro, chimiste italien (1776-1856), A. M. Ampère, physicien et mathématicien français (1775-1836)

VII. MECANISME DES ECHANGES GAZEUX : LA DIFFUSION PULMONAIRE

PO₂ alvéolaire = 102 torr

PO₂ sang veineux mêlé = 38 torr

La différence de Pr pour O₂ est de 64 torr à l'entrée du capillaire

PCO₂ alvéolaire = 40 torr

PCO₂ sang veineux mêlé = 46.5 torr

La différence de Pr pour le CO₂ est de 6 torr à l'entrée du capillaire

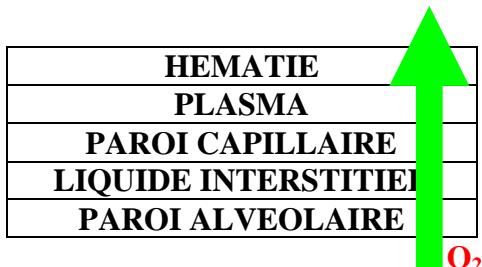
L'épaisseur de la paroi de la surface de séparation est très mince environ 1 μ et très étendue entre 60 et 200 m². La surface effective des échanges est de 65 à 80 m² (selon WEIBEL) ce qui est important.

La paroi est constituée de différentes couches :

- **Un film liquide alvéolaire (surfactant)**

- Liquide interstitiel
- Endothélium capillaire
- Un film plasmatique

Les différentes couches sont riches en eau ce qui permet une bonne diffusion des gaz O₂ et CO₂ qui sont solubles dans l'eau.



2. La Diffusion de l' O₂

L'O₂ traverse les différentes couches, pénètre dans le capillaire, se dissout dans le plasma et se fixe sur l'hémoglobine des GR.

A l'entrée du capillaire, la différence de Pr est élevée (60 à 65 torr) donc la diffusion est importante.

La PO₂ au niveau du capillaire augmente et la différence de Pr alvéolo-capillaire diminue ce qui ralentit la diffusion.

Dans les conditions normales PO₂ sang = PO₂ alvéolaire, donc le processus d'échange s'arrête avant la fin du capillaire (0.7 s).

3. La diffusion de CO₂

C'est dans le capillaire que PCO₂ a la valeur la plus élevée. Le CO₂ va donc diffuser du sang vers les alvéoles. La différence de Pr est faible 6 torr dans les conditions normale de repos, mais la diffusion est facilitée par une solubilité plus élevée de ce gaz (20 fois plus que O₂).

A l'entrée du capillaire le rejet de CO₂ est le plus rapide, il se ralentit ensuite à cause de la diminution de la différence de Pr de part et d'autre de la membrane.

PCO₂ du sang capillaire s'équilibre avec PCO₂ alvéolaire avant la sortie du capillaire.

4. La capacité de diffusion pulmonaire (DL)

La capacité de diffusion pulmonaire (DL) est le volume d'un gaz exprimé en ml STPD qui diffuse entre le sang et le gaz alvéolaire (ou inversement) par mn et par torr de différence de Pr entre les deux milieux.

DLO₂ ml STPD/ mn/torr = consommation d'O₂ / PAO₂ - PCO₂ PA = Pr capillaire

DLCO₂ ml STPD/ mn/torr = production de CO₂ / PCCO₂ - PACO₂ PC = Pr alvéolaire

Pour une même différence de Pr, la diffusion de gaz est d'autant plus grande que la capacité de diffusion est plus grande.

La capacité de diffusion correspond donc à la conductance du système de diffusion inverse de la résistance. Si la résistance offerte par la membrane au passage des molécules augmente, la capacité de diffusion diminue.

4.1. Signification de la capacité de diffusion

Il y a 2 milieux : le gaz alvéolaires et le sang qui sont de composition différente et séparés par une membrane. Les mouvements de l'eau et du CO₂ sont régis par le principe de Fick redéfini par Krogh (1911). **Fick (principe de)**

Fick's law diffusion

Principe expliquant les rapports entre la consommation d'oxygène et le débit cardiaque.

Dans un échangeur, le passage d'un gaz entre la phase gazeuse et le sang est régi par le principe de conservation de la masse : la quantité de gaz échangée en régime stable est égale à la différence de quantité entre l'entrée et la sortie du gaz fixé sur le sang.

Appliqué à la consommation d'oxygène, V'O₂, dans les poumons et au débit de sang qui emporte cet O₂ dans les veines pulmonaires, ce principe permet la mesure du débit cardiaque

A. Fick, physicien et physiologiste allemand (1829-1901)

Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine – version 2022

V= quantité de gaz considéré qui diffuse par mn

ΔP = différence de Pr partielle du gaz entre les 2 milieux

e = épaisseur de la membrane

S = surface qui sépare les 2 milieux en présence

K = est proportionnel au coefficient de solubilité du gaz et inversement proportionnel à la racine carrée du PM de ce gaz (loi de Graham).

$$V = KS * \Delta P / e$$

S * K/ e = DM = capacité de diffusion pour la membrane alvéolo-capillaire

La capacité de diffusion à travers la membrane dépend :

- De la surface d'échange
- Du coefficient de solubilité
- Du PM de ce gaz
- De l'épaisseur de la paroi

D'après la relation S * K/ e = DM ; plus la capacité de diffusion est élevée et plus le gaz diffuse facilement.

Si e augmente ou si S diminue, la résistance au passage diminue et DM diminue.

• le simple processus physique de diffusion est insuffisant à expliquer à lui seul les échanges gazeux-respiratoire.

Une fois la membrane traversée, la diffusion dans le plasma est de 20 m/s mais ensuite l'O₂ doit pénétrer dans le globule rouge (GR) pour se fixer sur l'Hémoglobine.

La résistance offerte par le GR au passage des molécules d'O₂ est importante.

R = résistance totale

R = résistance membranaire + résistance sanguine d'où

$$1/DL = 1/DM + 1/\theta * Vc$$

θ = volume de gaz en ml STPD/ml de sang en mn/ torr de Pr partielle de gaz déterminé in vitro

Vc = volume de sang capillaire

2. La valeur de la capacité de diffusion

Chez un homme au repos $DLO_2 = 20 \text{ ml STPD / mn / torr}$

$$DLCO_2 = 400 \text{ ml STPD / mn torr}$$

La capacité de diffusion diminue avec l'âge, elle augmente avec l'exercice musculaire pour atteindre au maximum 3 fois la valeur de repos. La diffusion peut être entravée par suite d'un épaissement anormal de la paroi (exemple œdème) ou une relative imperméabilité de celle-ci (différenciation de structure). Dans ces cas PO_2 issu du sang du capillaire peut rester inférieur à $P O_2$ alvéolaire. De même dans le cas d'une différence de Pr anormalement basse à l'entrée du capillaire, comme cela peut se produire lors de l'hypoxie d'altitude ou $P O_2$ alvéolaire peut être très bas.

3. La différence alvéolo-artérielle de l' O_2

Chez le sujet normal au repos et au niveau de la mer, il y a équilibre à la sortie des capillaires entre PO_2 et PCO_2 dans le gaz alvéolaire et le sang. Cependant dans le sang artériel périphérique (artère humérale ou fémorale) si PCO_2 est comparable à sa valeur alvéolaire ; PO_2 en diffère de quelques torr (3 à 5). Cette différence s'explique par l'existence d'une non uniformité du rapport ventilation-perfusion et d'un shunt **veino-artériel** physiologique.

VII. CHAPITRE : LA VENTILATION ALVEOLAIRE : GENERALITES

1. L'espace mort et le volume alvéolaire

A l'inspiration l'air pénètre dans les voies aériennes, trachée, bronches et bronchioles pour arriver enfin au niveau des alvéoles. Donc 2 parties très distinctes peuvent être envisagées :

- Les voies aériennes jusqu'aux bronchioles terminales. L'air contenu dans cette partie ne participe pas aux échanges des gaz. Il s'agit d'une voie de conduction dans la traversée par l'air inspiré permet son humidification et son réchauffement
- Les alvéoles pulmonaires qui constituent la zone d'échange gazeux lorsqu'un VT est inspiré, **une fraction de celui-ci ne pénétrera jamais dans les alvéoles** : c'est celle qui remplit les voies aériennes à la fin de l'inspiration. Elle sera rejetée la 1^{ère} au début de l'expiration suivante.
 - 1- une partie seulement de l'air inspirée ira dans les alvéoles et participera effectivement au renouvellement du gaz contenu
 - 2- cette 2^{ème} notion est que, dans un volume courant (VT) rejeté lors d'une expiration, la composition en O_2 et en CO_2 n'est pas constante.
- Puis qu'une 1^{ère} partie correspond à l'air de la fin d'inspiration précédente.

- Et la 2^{ème} partie au gaz issu des alvéoles.

Une partie du VT inspiré est appelée volume alvéolaire, une autre partie restant dans les voies aériennes ou ne se produisent pas d'échanges gazeux correspond à l'espace mort.

L'espace mort physiologique

L'espace mort anatomique ne suffit pas à expliquer la composition du gaz alvéolaire. Il existe des alvéoles contenant du gaz qui ne participent pas aux échanges, par suite d'une inégalité dans la distribution soit du **gaz ventilé soit du gaz perfusé (sang)**. Cet espace mort surajoute est quelque fois appelé alvéolaire et l'espace mort total est appelé l'espace mort physiologique.

$$\text{VD physiologique} = \text{VD anatomique} + \text{VD alvéolaire}$$

BIBLIOGRAPHIE

1. Archives du Larousse médical (2006). "Appareil respiratoire".
2. Bensouag. "Physiologie respiratoire". Cours UFAS, Faculté de médecine. <https://fmedecine.univ-setif.dz> > Cours.
3. Constanzo L.S. (1995). « Physiologie respiratoire », Chap 4 in PHYSIOLOGIE, PCEM intensif. 114-145.
4. Dee Unglaub Silverthorn (Auteur), Andrew C Silverthorn, Bruce R Johnson (2007). « Physiologie humaine : Une approche intégrée ».
5. Guyton AC. Overview of the circulation; medical physics of pressure, flow, resistance, and vascular compliance. Human physiology and mechanisms of disease. Fifth ed. Guyton AC. Philadelphia: Saunders; 1992. p. 110-116.
6. Raoul Peromet R (2016). "La Ventilation Pulmonaire Collatérale: (Etat Actuel De La Question)". Pages 325-335. <https://doi.org/10.1080/17843286.1949.11716523>

Représentation schématique des relations entre thermogenèse, thermolyse et température ambiante.

TCI : température critique inférieure, TCS : température critique supérieure, MS : métabolisme de sommet.

