

Structure et fonction du système respiratoire

Introduction : les fonctions du système respiratoire

Transfert des gaz respiratoires

O₂ de l'air atmosphérique vers les mitochondries

CO₂ des cellules vers l'atmosphère

Fonction d'épuration

Fonction métabolique

.....

Systématisation pulmonaire

Les voies aériennes

Voies aériennes supérieures

Nez

Pharynx

Larynx

Voies aériennes intra-thoraciques

Systématisation

Zone de convection

Zone de transition

Zone respiratoire

Structure histologique, le tapis muco-ciliaire

Contrôle neuro-humoral

La zone d'échanges

La plèvre

Constitution

La négativité de la pression pleurale

Modèle physique

Mécanique de l'inspiration

Le gradient vertical de pression pleurale

Les muscles respiratoires

Les muscles inspiratoires

Diaphragme

Interscostaux

Externes

Parasternal

Scalènes

Sterno-cléido-mastoïdiens

Trapèze...

Les muscles expiratoires

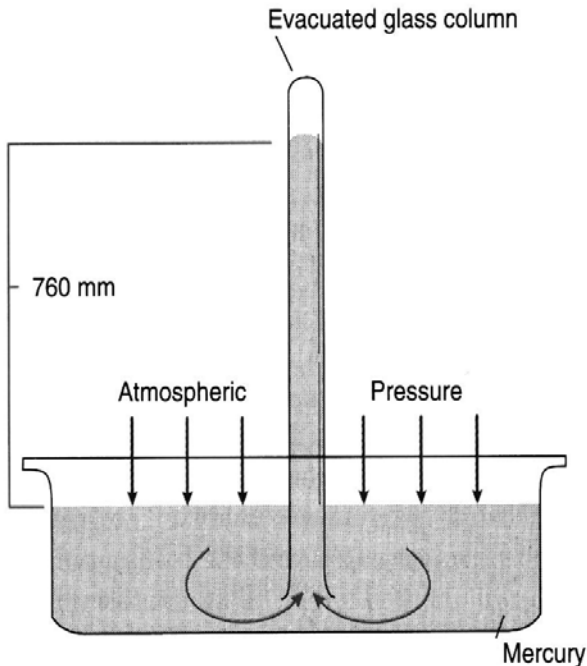
Configuration de la cage thoracique

Rappels de physique et de chimie.

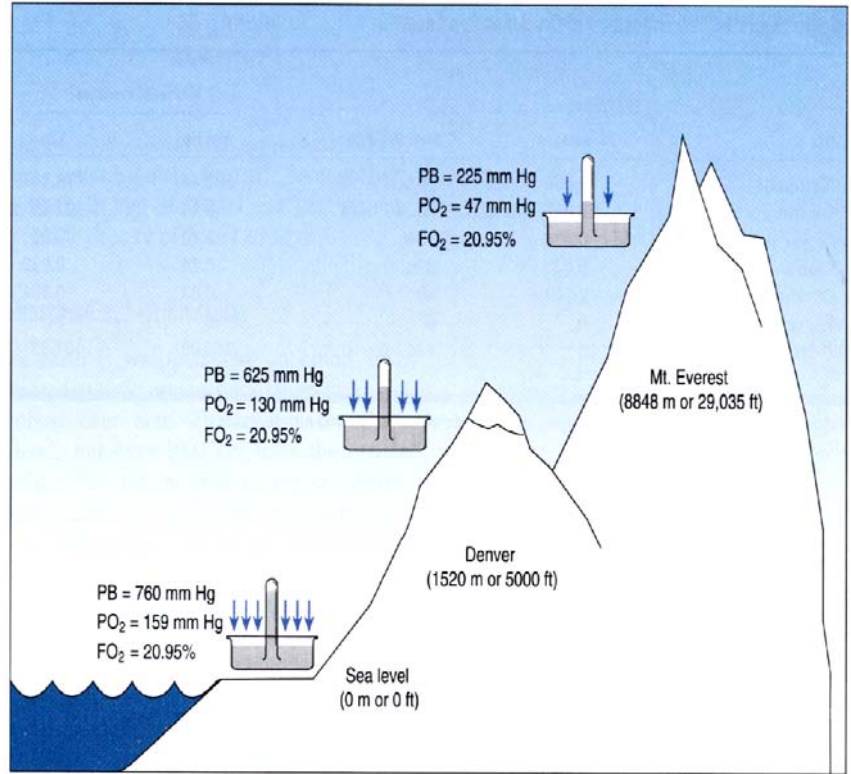
Pression

La pression totale exercée par les molécules gazeuses de l'atmosphère est la pression barométrique (décroît avec l'altitude). Elle est liée au poids de la masse d'air.

Au niveau de la mer environ 760 mmHg (ou torr) ou 1 atm.



Mercury barometer is an instrument that allows direct observation of the total "weight," or pressure, of the atmosphere. At sea level the atmosphere forces mercury 760 mm up into an evacuated glass column.



As one ascends into the atmosphere, the total barometric (*PB*) and partial (*PO₂*) pressures of gases decline whereas the fractional concentration (*FO₂*) remains constant.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.

Dans le Système International Pa (= Newton.m⁻²)
(Newton : poids d'une masse de 1 Kg à pesanteur normale)
Pourquoi des mmHg ou des cmH₂O ?

Pascal

In SI, the unit for pressure and stress, a derived unit. Symbol, Pa. One pascal is the pressure resulting from a force of 1 newton acting uniformly over an area of 1 square meter. Its dimensions in terms of base units are kg.m⁻¹.s⁻²

The 14th CGPM added the pascal to SI in 1971. It is named for Blaise Pascal (1623 – 1662).

Bar

One bar is 100 kPa

Atmosphere

A unit of pressure = 101325 pascals, approximately the value of atmospheric pressure at sea level. Symbol, atm. Also called the standard atmosphere or physical atmosphere.

It was defined in the International Practical Temperature Scale of 1948 and subsequently adopted "for general use" by the 10th CGPM (1954, Resolution 4). Currently use of the standard atmosphere is discouraged in favor of the pascal.

Torr

A unit of atmospheric pressure, = exactly 1/760 atmosphere = exactly 101325/760 pascals or approximately 133.322 368 pascals. Symbol, Torr. It is named for the Italian physicist Evangelista Torricelli (1608 – 1647). (<http://www.npl.co.uk/pressure/punits.html>)

mmHg

A unit of pressure, obsolete since 1960. Symbol, mmHg. (Notice that there is no space between “mm” and “Hg”). One mmHg is the pressure exerted at the bottom of a vertical column exactly 1 millimeter deep of a fluid whose density is exactly 13.5951 grams per cubic centimeter, at a location where the acceleration due to gravity is exactly 980.665 centimeters per second per second. The second exact value is, of course, a value for the density of mercury at 0°C, and the third the conventional value for the acceleration due to gravity at the Earth's surface. The mmHg is often described as synonymous with the torr, but it differs from it, although “by less than 2×10^{-7} Torr.”

cmH₂O

A centimeter (centimetre) of water or cmH₂O is a somewhat outdated unit for pressure. It is used to measure the central venous pressure, the intracranial pressure while sampling cerebrospinal fluid, as well as determining pressures during mechanical ventilation or in water supply networks (then usually in metres water column).

It is defined as the pressure exerted by a column of water of 1 cm in height at 4 °C (temperature of maximum density) at the standard acceleration of gravity.

$$1 \text{ cmH}_2\text{O} = 98.0665 \text{ pascals}$$

	kPascal	Bar	Atmosphere	Torr (ou mmHg)	Pound per square inch	cmH ₂ O
	(kPa)	(bar)	(atm)	(torr)	(psi)	(cmH ₂ O)
1 kPa		10^{-2}	9.8692×10^{-3}	7.5006	145.04×10^{-3}	10.197
1 bar	100		0.98692	750.06	14.504	
1 atm	101.325	1.01325		760	14.696	
1 Torr (mmHg)	0.1333224	1.3332×10^{-3}	1.3158×10^{-3}		19.337×10^{-3}	1.35951
1 psi	6.89476	68.948×10^{-3}	68.046×10^{-3}	51.715		
1cmH ₂ O	0.0980665			0.73556		

Exemple: on passe de kPa à Torr en multipliant par 7.5006

Exemple: on passe de Torr à kPa en multipliant par 0.1333224

La pression barométrique comme pression de référence en Physiologie.

Lois des gaz en phase gazeuse.

Loi des gaz parfaits

$$P.V = n.R.T$$

Loi des gaz parfaits

P : Pression

V : Volume

n: Nombre de moles

R : Constante des gaz parfaits

T : température (K)

Le volume occupé par un gaz ne dépend pas de sa nature.

A 0°C et 760 torr, une mole de gaz (parfait) occupe un volume de 22.4 litre.

Loi de Dalton

La pression d'un gaz dans un mélange (contenu dans une enceinte) est la pression qu'il développerait s'il était seul dans l'enceinte.

La somme des pressions partielles des gaz d'un mélange est égale à la pression totale.

La concentration fractionnelle et la pression partielle des gaz

La concentration fractionnelle C_i , d'un gaz i dans un mélange gazeux est définie par le volume de gaz i par unité de volume de la phase gazeuse sèche. Dans cette définition, c'est une concentration volumique sans dimension (ml/ml). Elle s'exprime souvent en vol% (ml de gaz i pour 100 ml de mélange): l'air atmosphérique sec contient 20,9% d'O₂, 78,1% de N₂, 0,03% de CO₂ et environ 1% de gaz rares.

La pression partielle d'un gaz dans un mélange peut donc être exprimée en terme de fraction de la pression totale (par exemple en physiologie, barométrique)

$$P_i = P_b \times C_i$$

Pour l'oxygène de l'air ambiant sec.

$$P_{\text{ambiant}} = 760 \times 0,21 = 160 \text{ torr.}$$

Pression Barométrique et altitude

Altitude (Mètres)	Pression Barométrique standard (Torr)	Pression Barométrique (réelle) modèle (Torr)	Pression partielle de O ₂ (PiO ₂)	FiO ₂ équivalent au niveau de la mer (%)	FiO ₂ Nécessaire pour PiO ₂ équivalent à celle du Niveau de la mer (%)
0	760	760	149	20.9	20.9
500	716	718	140	19.7	22.3
1000	674	679	132	18.5	23.8
1500	634	641	124	17.4	25.4
2000	596	604	117	16.4	27.2
2500	560	570	109	15.3	29.1
3000	526	537	103	14.4	31.1
3500	493	505	96	13.5	33.4
3800	475	487	92	12.9	34.8
4000	462	475	90	12.6	35.9
4300	445	458	86	12.1	37.5
5000	405	420	78	10.9	41.7
6000	354	369	67	9.5	48.6
7000	308	324	58	8.1	57.1
8000	267	284	50	6.9	67.8
8848	236	253	43	6.0	78.9
10000	199	215	35	4.9	98.1
11000	170	187	29	4.1	-
12000	146	161	24	3.4	-
13000	124	139	19	2.7	-
14000	106	120	15	2.1	-
15000	91	102	12	1.6	-
16000	78	88	8	1.2	-
17000	66	75	6	0.8	-
18000	57	63	3	0.5	-
19000	49	54	1	0.2	-
19200	47	52	1	0.1	-
19800	43	47	0	0.0	-

<http://www.aerospaceweb.org/design/scripts/atmosphere/>

West JB. Prediction of barometric pressures at high altitude with the use of model atmospheres.

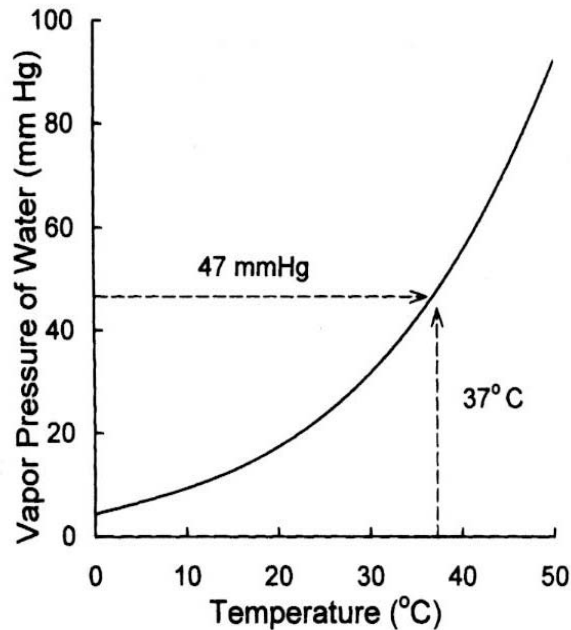
J Appl Physiol 81: 1850-1854, 1996.

Pression de vapeur d'eau

Quand un liquide est exposé à l'environnement, un équilibre se crée entre la phase liquide et la phase gazeuse. Entre 0 et 100 °C, l'eau est présente sous les 2 états. La phase gazeuse développe une pression de vapeur uniquement dépendante de la température (47 torr à 37°C et 760 torr à 100°C)

Quand l'air entre dans les poumons il est réchauffé et humidifié. A 37 °C, la somme des pression partielles des gaz respiratoires est 760-47 torr : Pression totale – pression de vapeur d'eau du gaz (saturé en vapeur d'eau)

Donc au bord de la mer, la pression partielle du gaz inspiré (au moment où il pénètre l'alvéole) est :
 $P_i = (760-47) \cdot 0,21 = 150$ torr, parce qu'à ce moment le gaz est saturé en vapeur d'eau.



Temperature °C	Vapor Pressure mmHg
0	4.6
10	9.2
20	17.5
30	31.8
37	47.0
40	55.3
50	92.5

Hlastala MP and berger AJ. *Physiology of Respiration*. New York: Oxford University Press, 2001.

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau du gaz et la pression saturante. Par exemple si l'humidité relative d'un gaz est de 50% à 37°C, sa pression partielle de vapeur d'eau est $47 \times 0.5 = 18.5$ torr.

Condition d'expression des gaz respiratoires

$PV/T = Cte$, T en Kelvin

ATPS

Ambient temperature (t_a) and pressure (P_b), Saturated.

BTPS

Body temperature (37°C) and pressure (P_b), Saturated.

STPD

Standard temperature (0°C) and pressure (760 torr), dry.

Comment passer de l'un à l'autre ?

Gaz en condition 1 ; pression P1, Température (°C) t1, Volume V1, Pression saturante de vapeur d'eau PH₂O_{t1}
 Gaz en condition 2 ; pression P2, Température (°C) t2, Volume V2, Pression saturante de vapeur d'eau PH₂O_{t2}

$$(P_1 - PH_{2O_{t1}}) \cdot V_1 / (273 + t_1) = (P_2 - PH_{2O_{t2}}) \cdot V_2 / (273 + t_2)$$

par exemple: ATPS et BTPS

$$(P_b - PH_{2O_{t_a}}) \cdot V_{ATPS} / (273 + t_a) = (P_b - PH_{2O_{37^\circ C}}) \cdot V_{BTPS} / (273 + 37^\circ C)$$

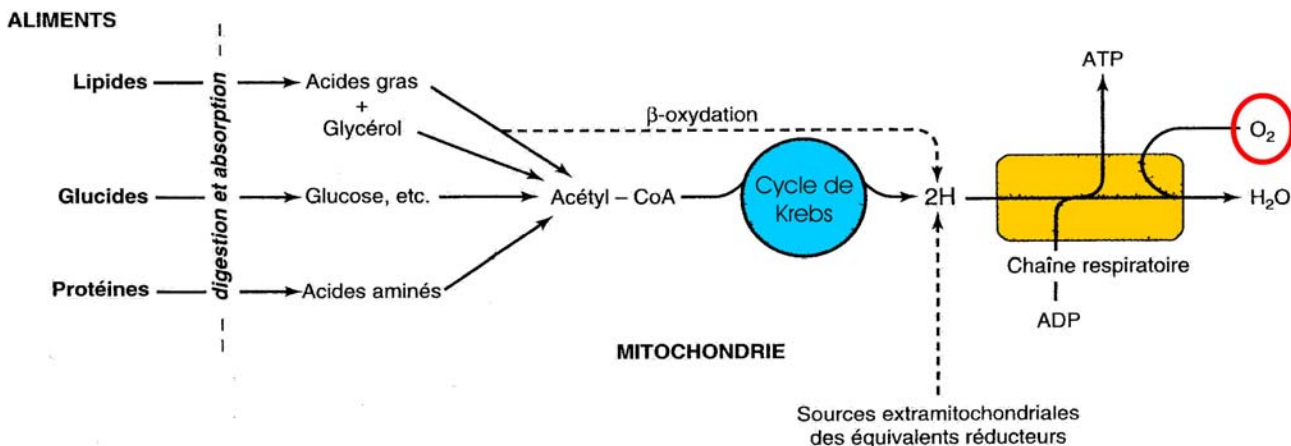
ou

$$(P_b - PH_{2O_{t_a}}) \cdot V_{ATPS} / (273 + t_a) = (P_b - 47) \cdot V_{BTPS} / (310)$$

d'où

$$V_{BTPS} = V_{ATPS} \cdot [(P_b - PH_{2O_{t_a}}) \cdot 310] / [(273 + t_a) \cdot (P_b - 47)]$$

Et ta : température du gaz en conditions ATPS.



Rôle de la chaîne respiratoire des mitochondries dans la conversion de l'énergie alimentaire en ATP. L'oxydation des principales denrées alimentaires conduit à la production d'équivalents réducteurs (2H) qui sont recueillis par la chaîne respiratoire pour l'oxydation et la formation couplée de l'ATP.

Murray RK, Granner DK, Mayes PA, and Rodwell VW. *Biochimie de Harper*. Bruxelles: De Boeck, 2003.

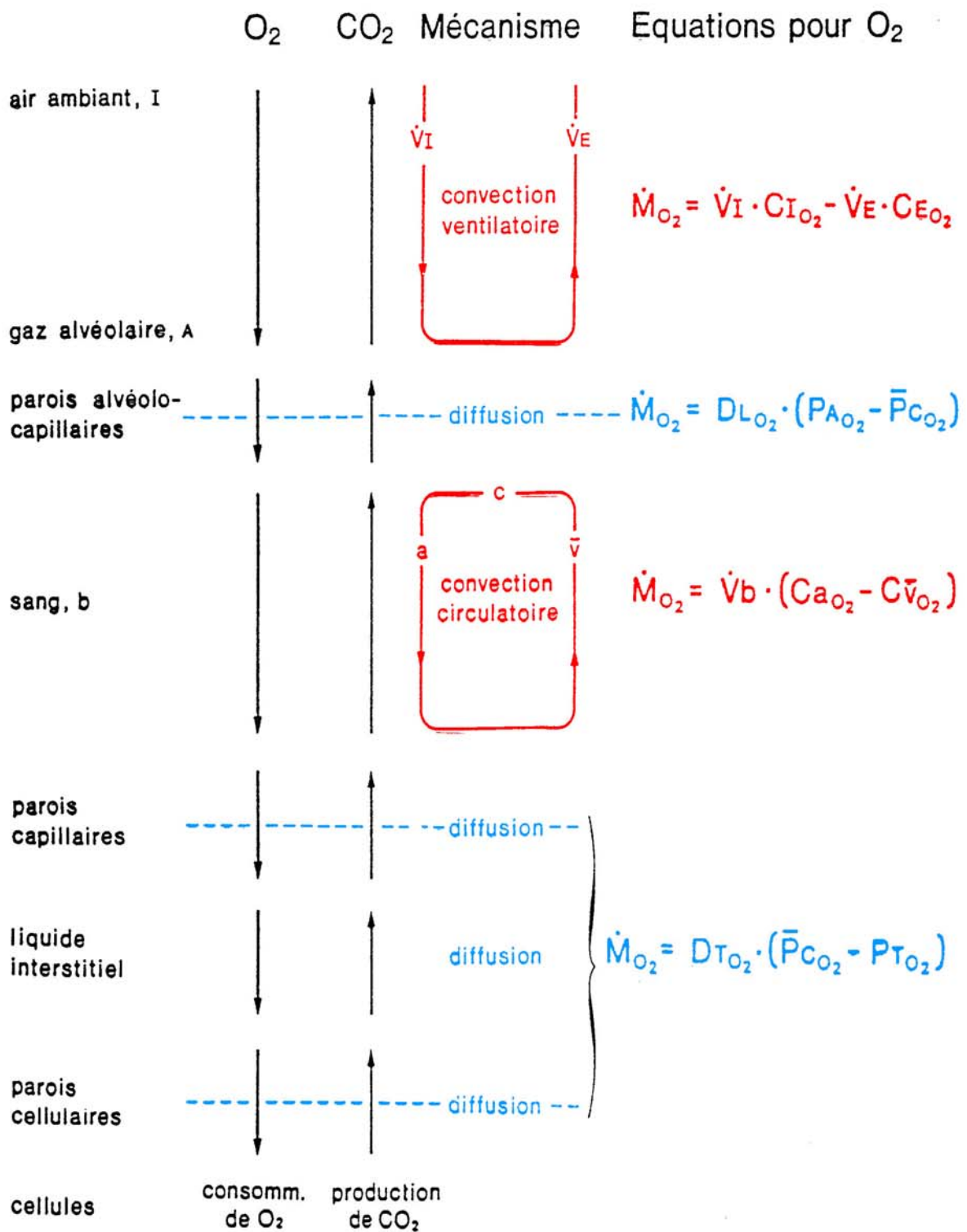
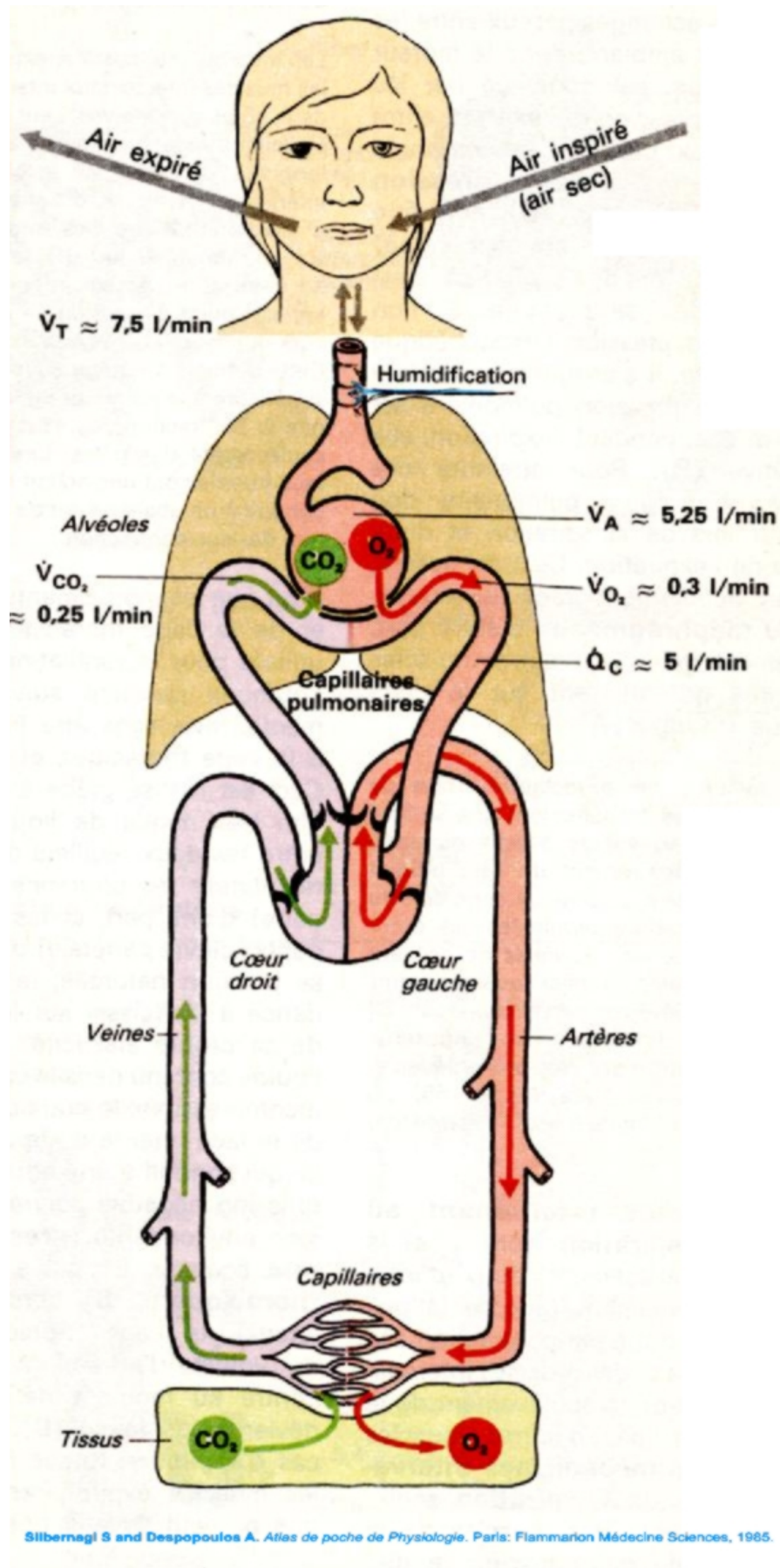
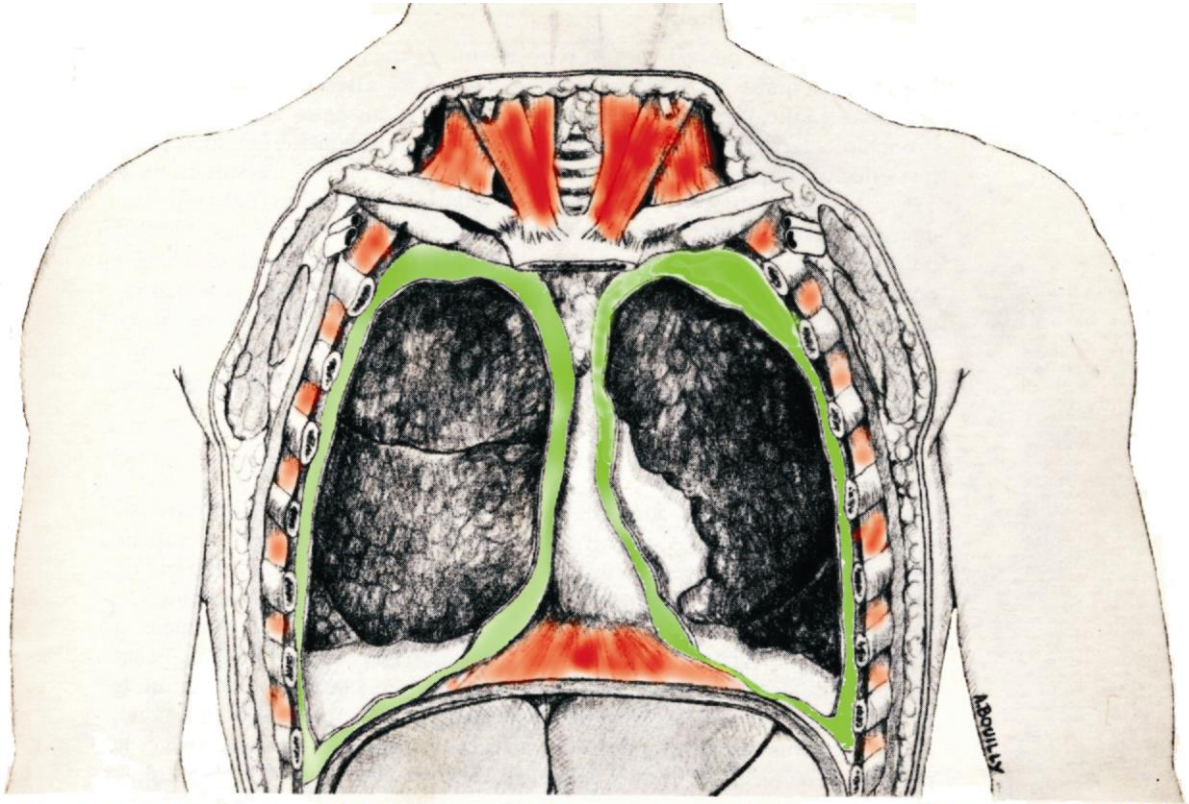
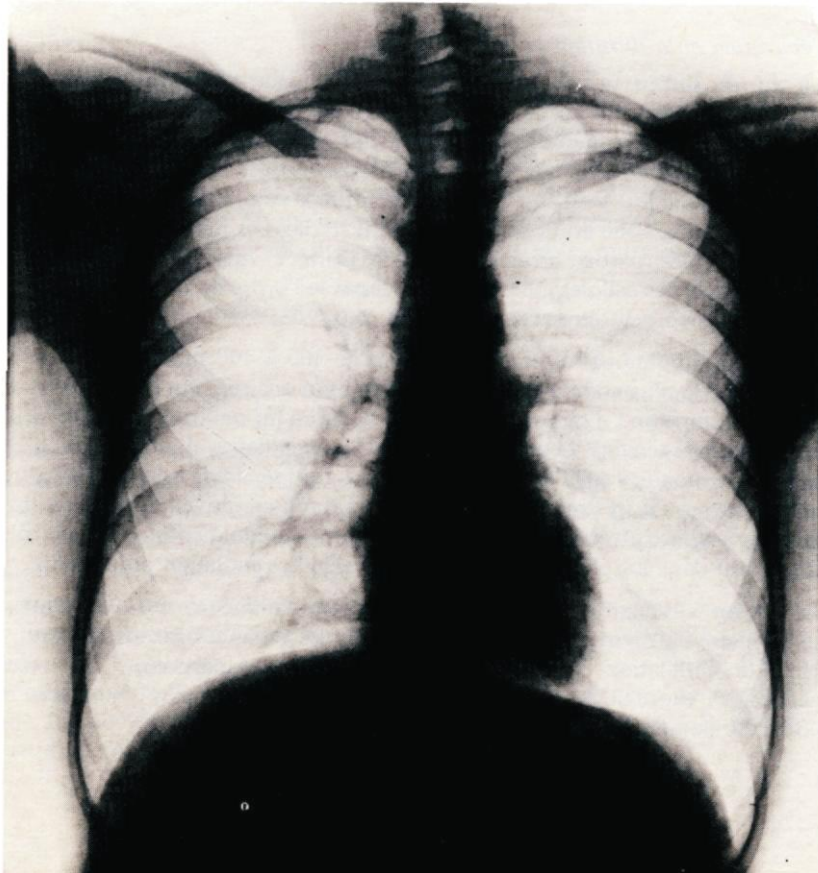


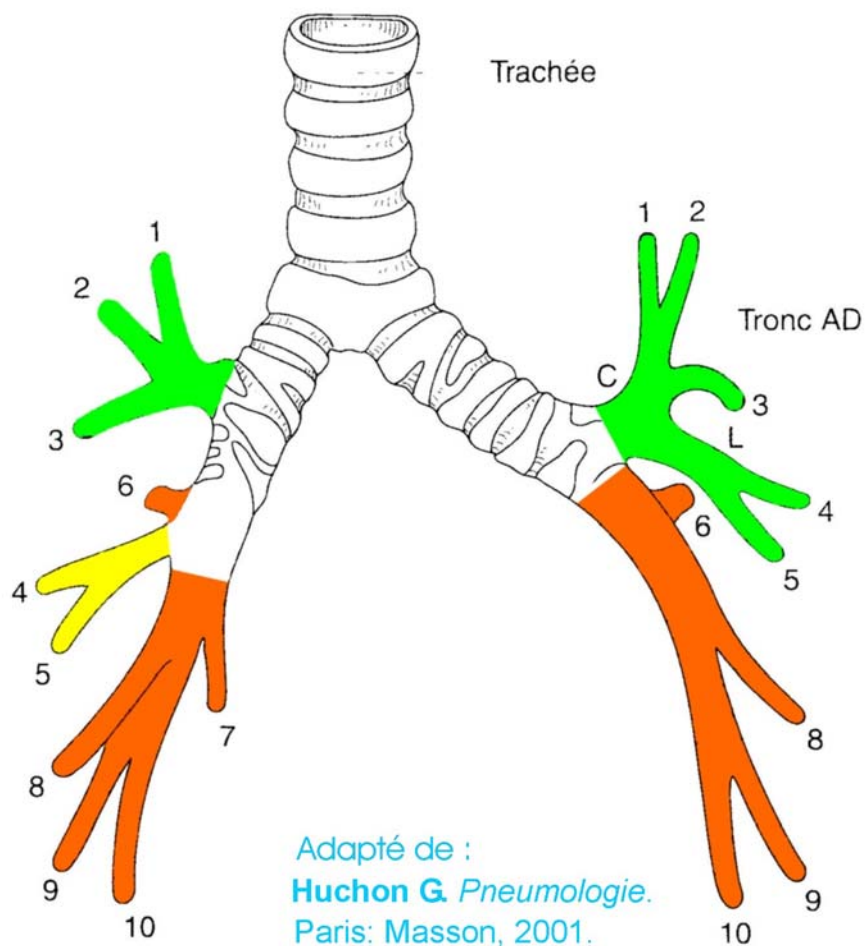
Schéma du système des échanges gazeux et équations fondamentales de convection et de diffusion de l'oxygène et de dioxyde de carbone.



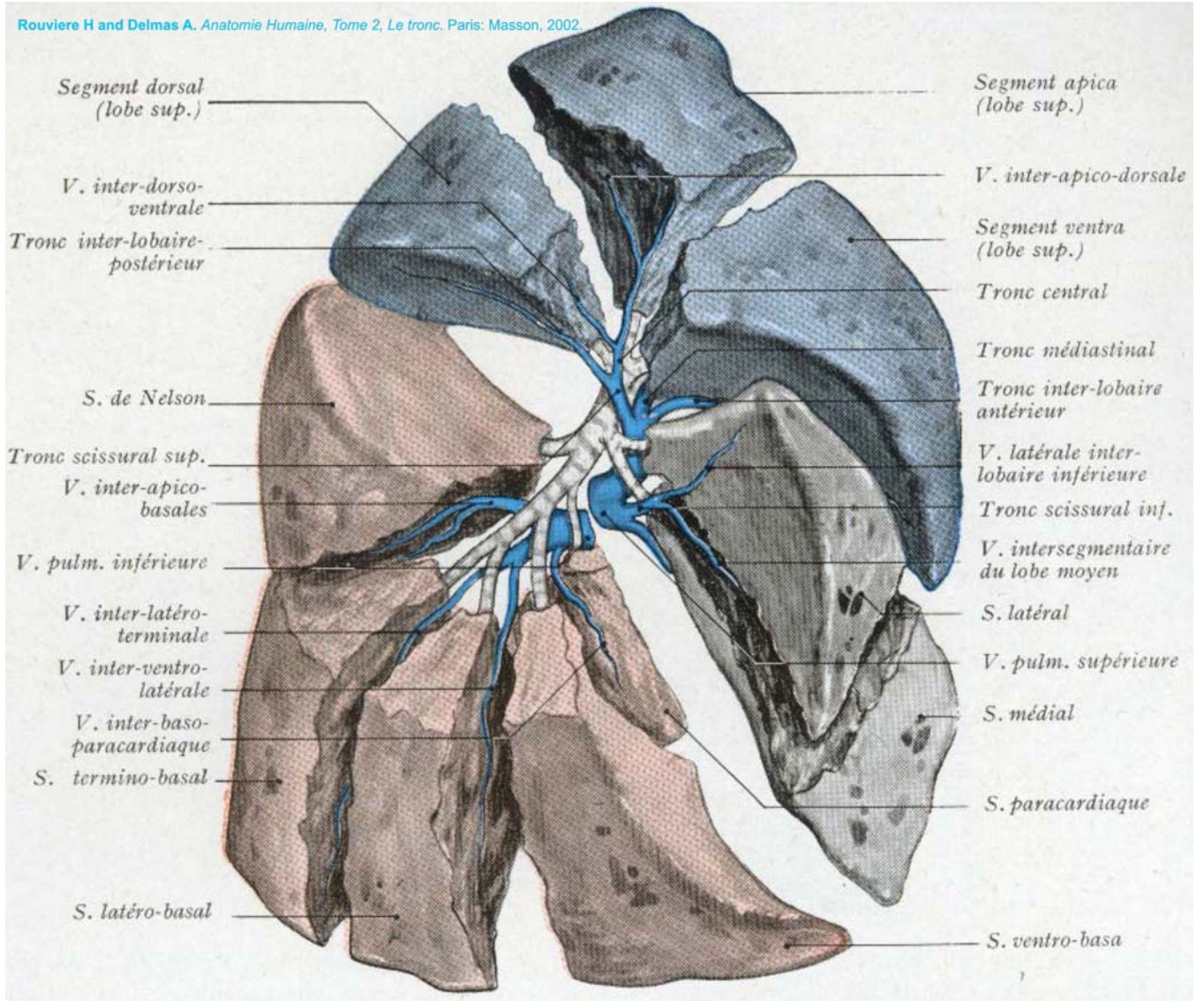


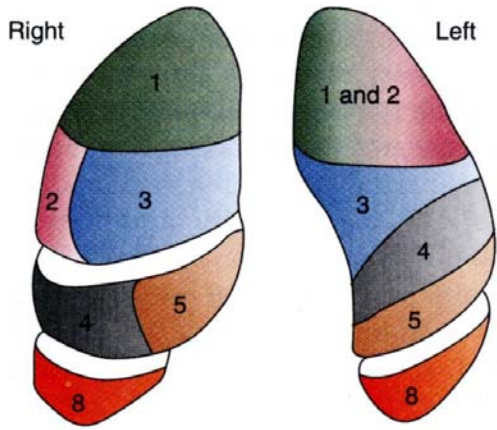
Flandrois R, Brune J, and Wiesendanger T. *La respiration*. Villeurbanne: SIMEP Editions, 1976.



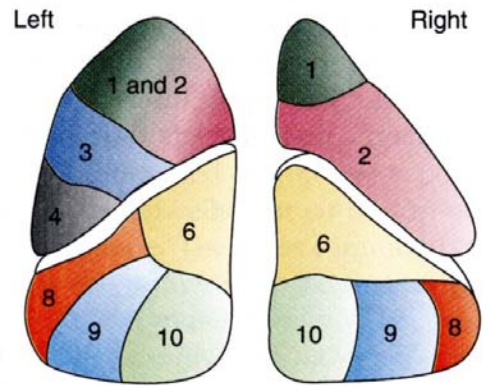


Représentation schématique de face de l'arbre bronchique, divisions droite et gauche. (1) bronche apicale du lobe supérieur ; (2) bronche dorsale du lobe supérieur ; (3) bronche ventrale du lobe supérieur ; (4) bronche latérale du lobe moyen du côté droit et externe de la lingula du côté gauche ; (5) bronche médiale du lobe moyen du côté droit et interne de la lingula du côté gauche ; (6) bronche supérieure du lobe inférieur ; (7) bronche paracardiaque du lobe inférieur ; (8) bronche ventrobasale des lobes inférieurs ; (9) bronche latérobasale des lobes inférieurs ; (10) bronche terminobasale des lobes inférieurs. Tronc AD : tronc apicodorsal.

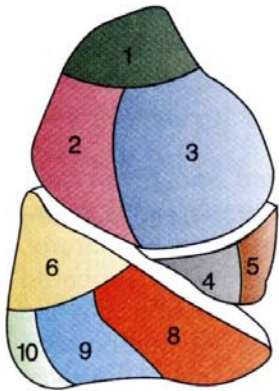




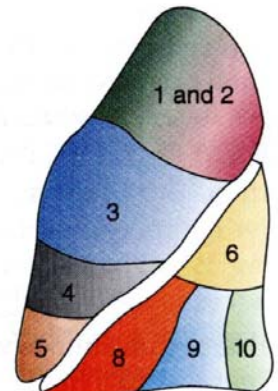
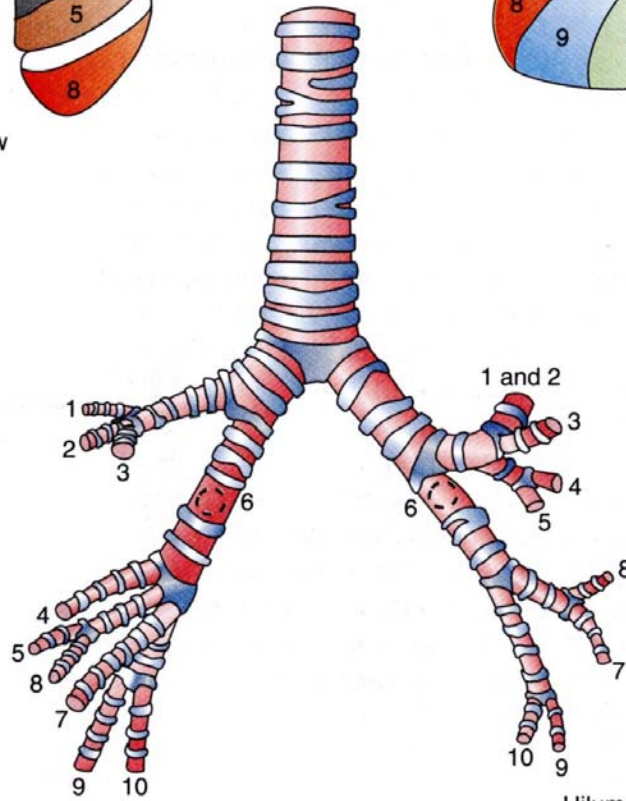
Anterior view



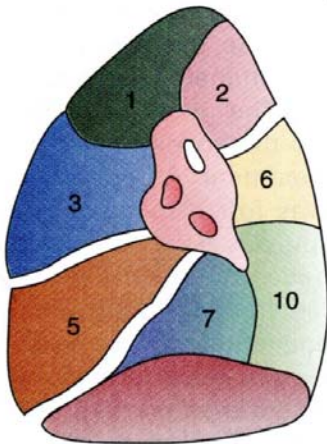
Posterior view



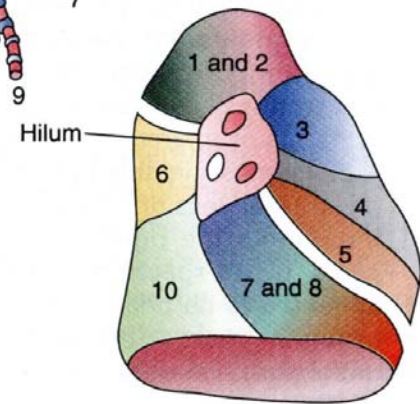
Right lateral view



Left lateral view



Right mediastinal view



Left mediastinal view

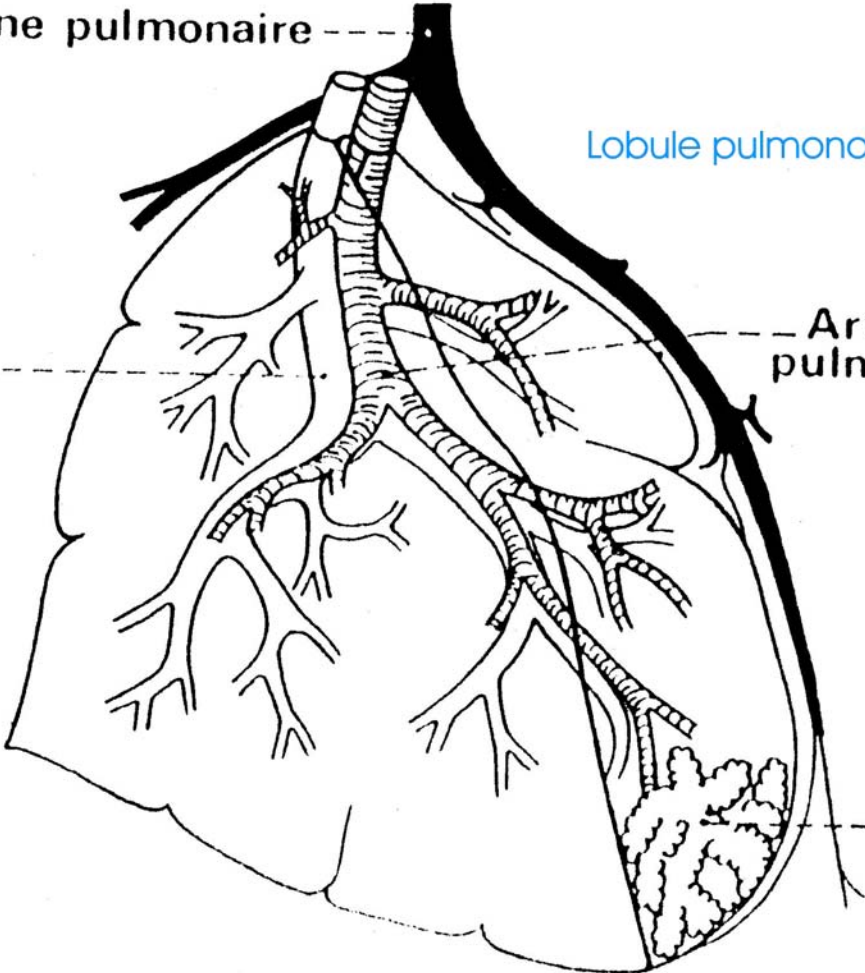
Veine pulmonaire

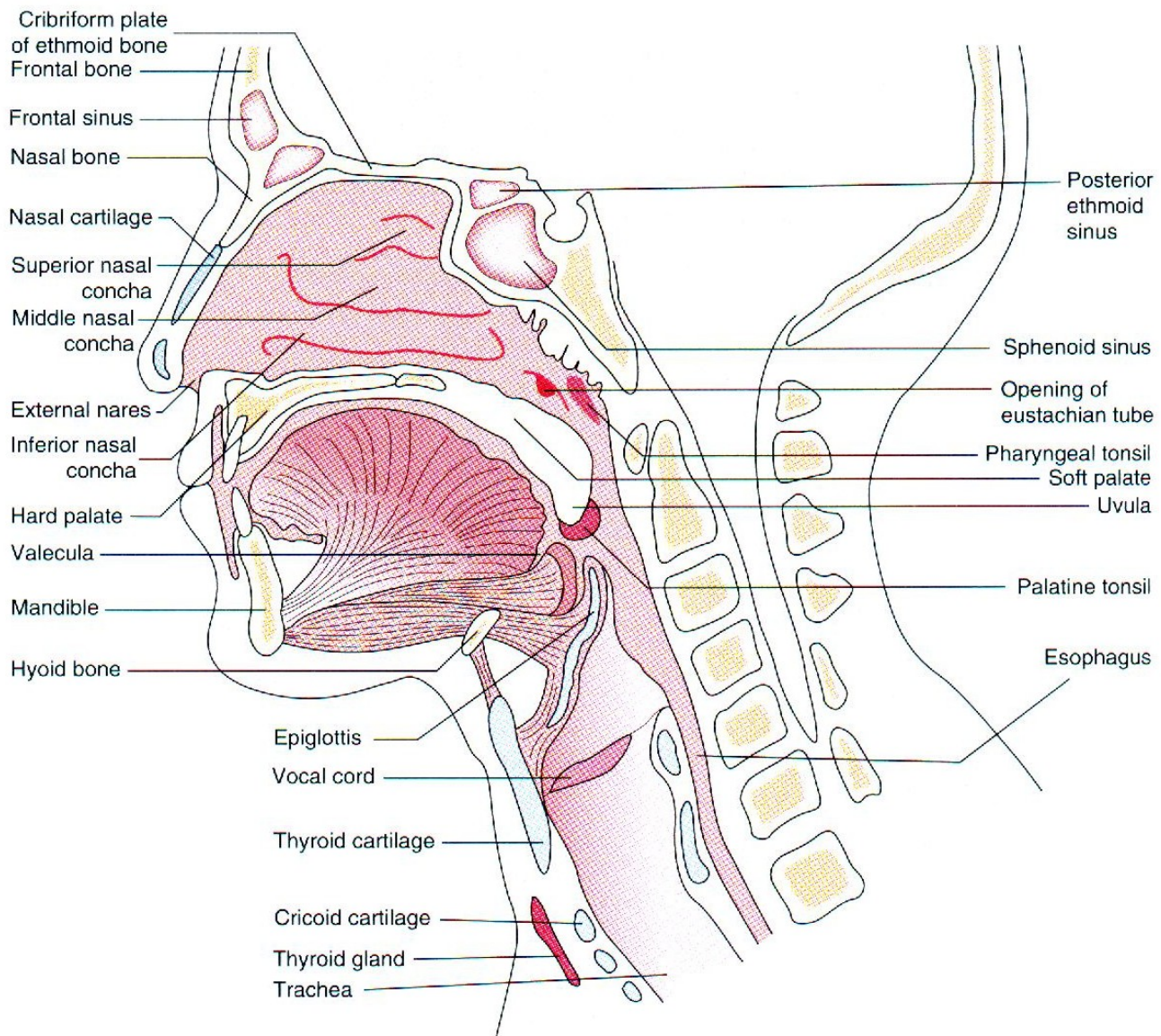
Lobule pulmonaire

Br.

Artère pulmonaire

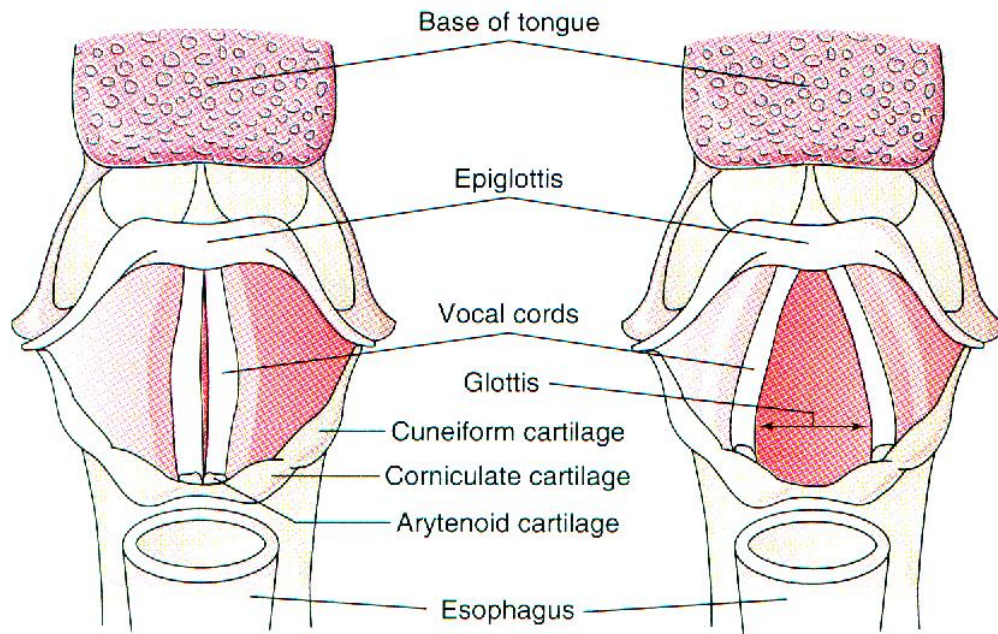
Acinus





Midsagittal section through the upper airway.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.



Looking into the larynx from above and behind with the vocal cords closed and open.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.

	génération	dénomination	diamètre (cm)	longueur (cm)	surface de section totale (cm ²)	nombre par génération
zone de convection	0	Trachée	1,8	12	2,5	1
	1	Grosses bronches				
	7	Petites bronches				
	10	Bronchioles	0,15	0,5	13,5	1 000
zone de transition	14	bronchioles terminales	0,07	0,2	70	16 000
	15	Bronchioles respiratoires				
	18	bronchioles resp. terminales	0,05	0,1	530	260 000
zone respiratoire	19	Canaux alvéolaires				
	23	Alvéoles	0,04 244 μm	0,05 238 μm	12 000 ≈ 80 m ²	8 000 000

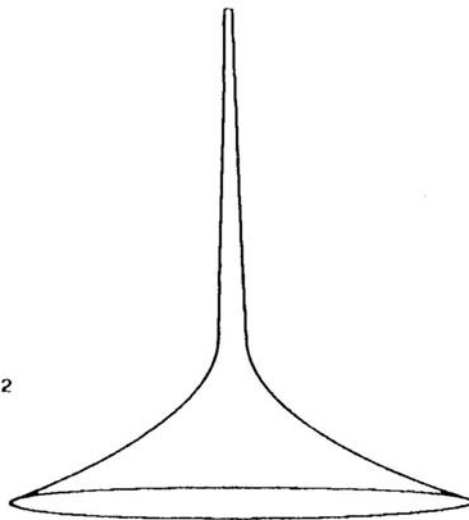
Trachée : 2,5 cm²

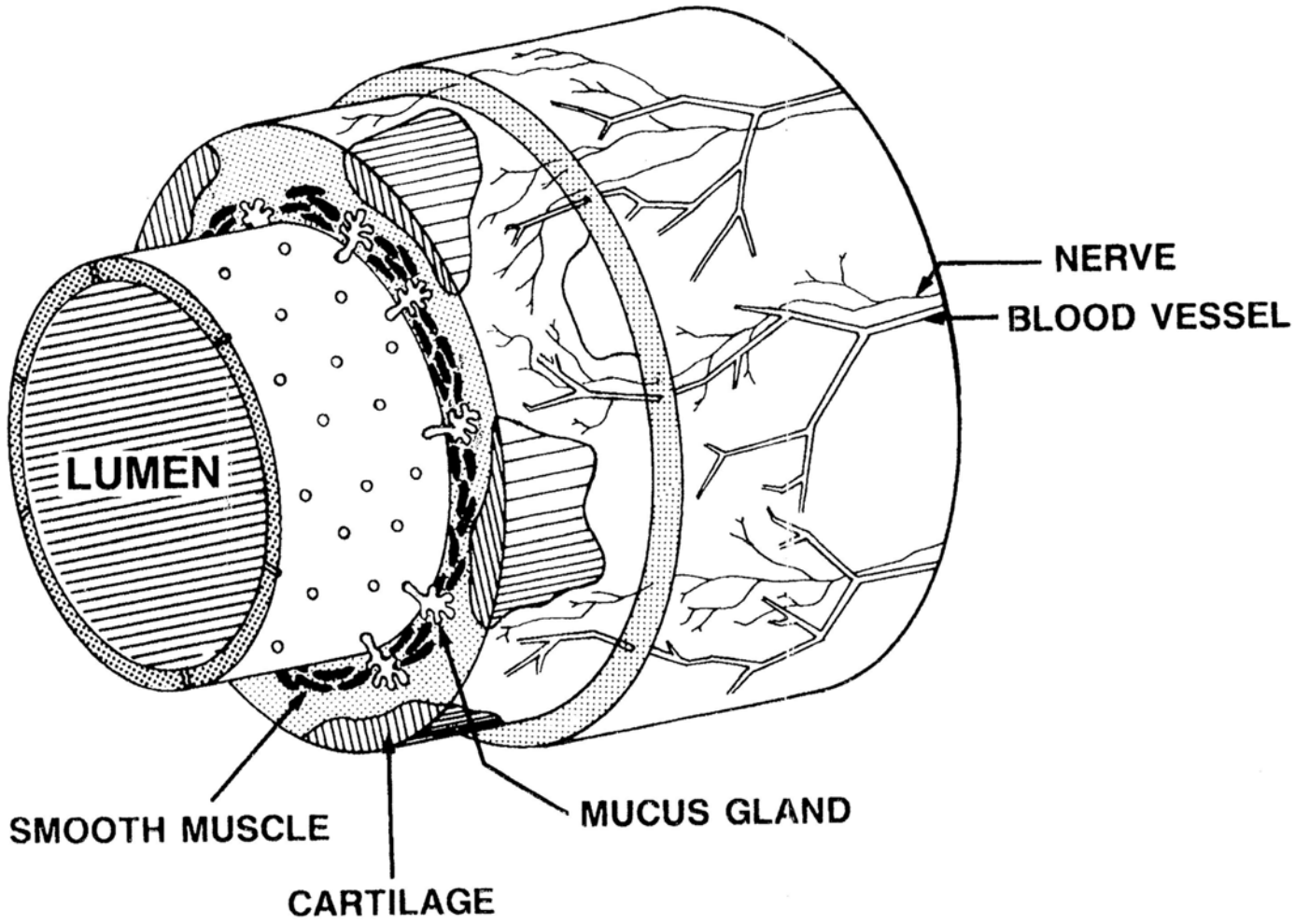
Génération 3 : 5 cm²

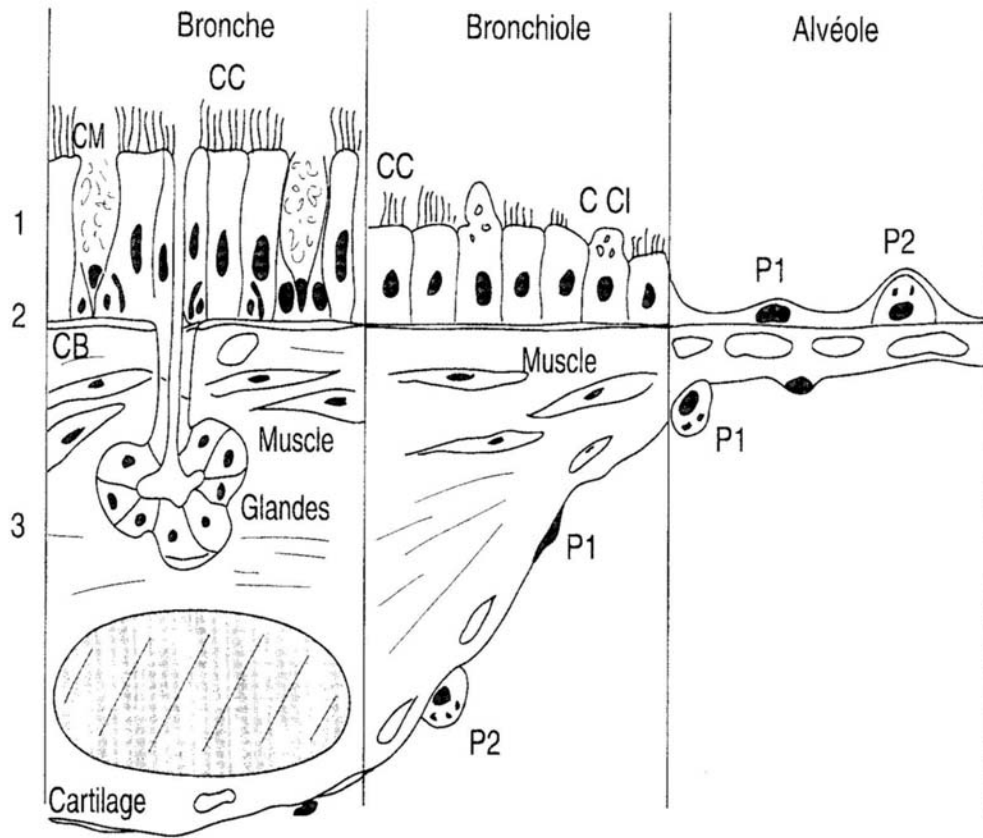
Génération 10 : 10 cm²

Génération 15 : 100 cm²

Génération 23 : 1 m²

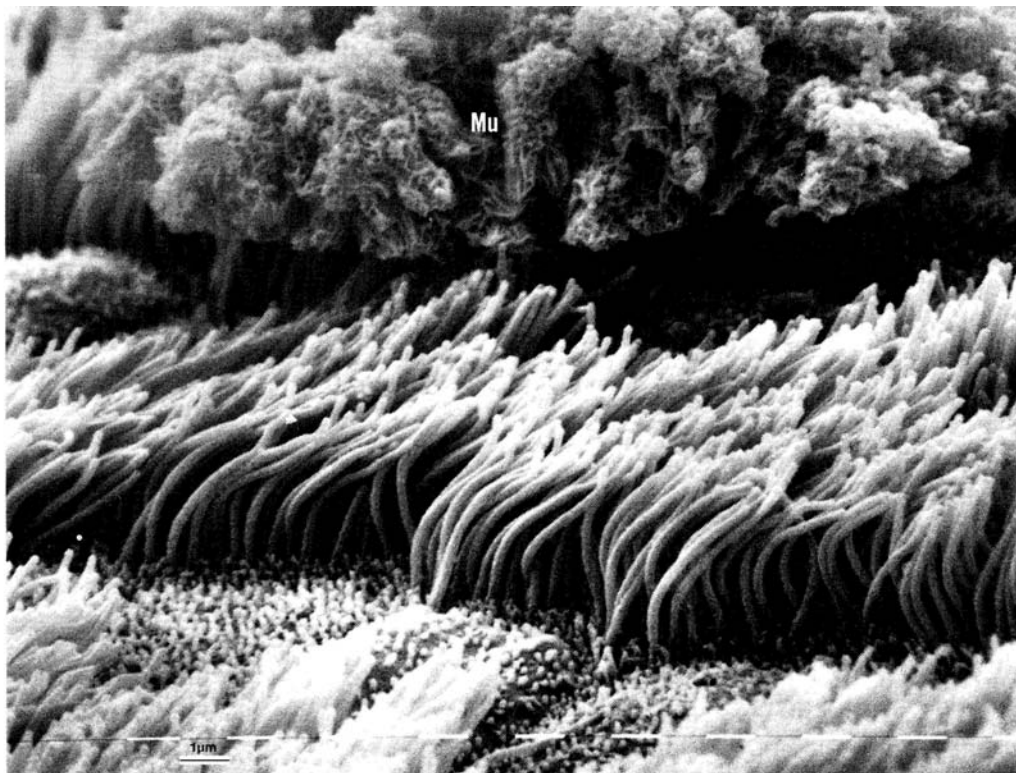






Représentation schématique du revêtement épithélial tapissant les voies respiratoires intrapulmonaires :
 CC : cellule ciliée ; CM : cellule à mucus ; CB : cellule basale ; C Cl : cellule de Clara ; P1 : pneumocyte I ; P2 : pneumocyte II ; 1 : épithélium ; 2 : membrane basale ; 3 : sous-muqueuse.

Huchon G. *Pneumologie*. Paris: Masson, 2001.

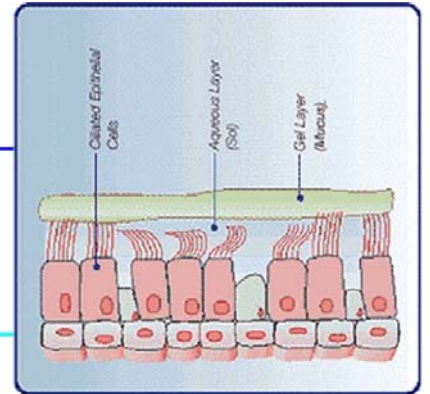
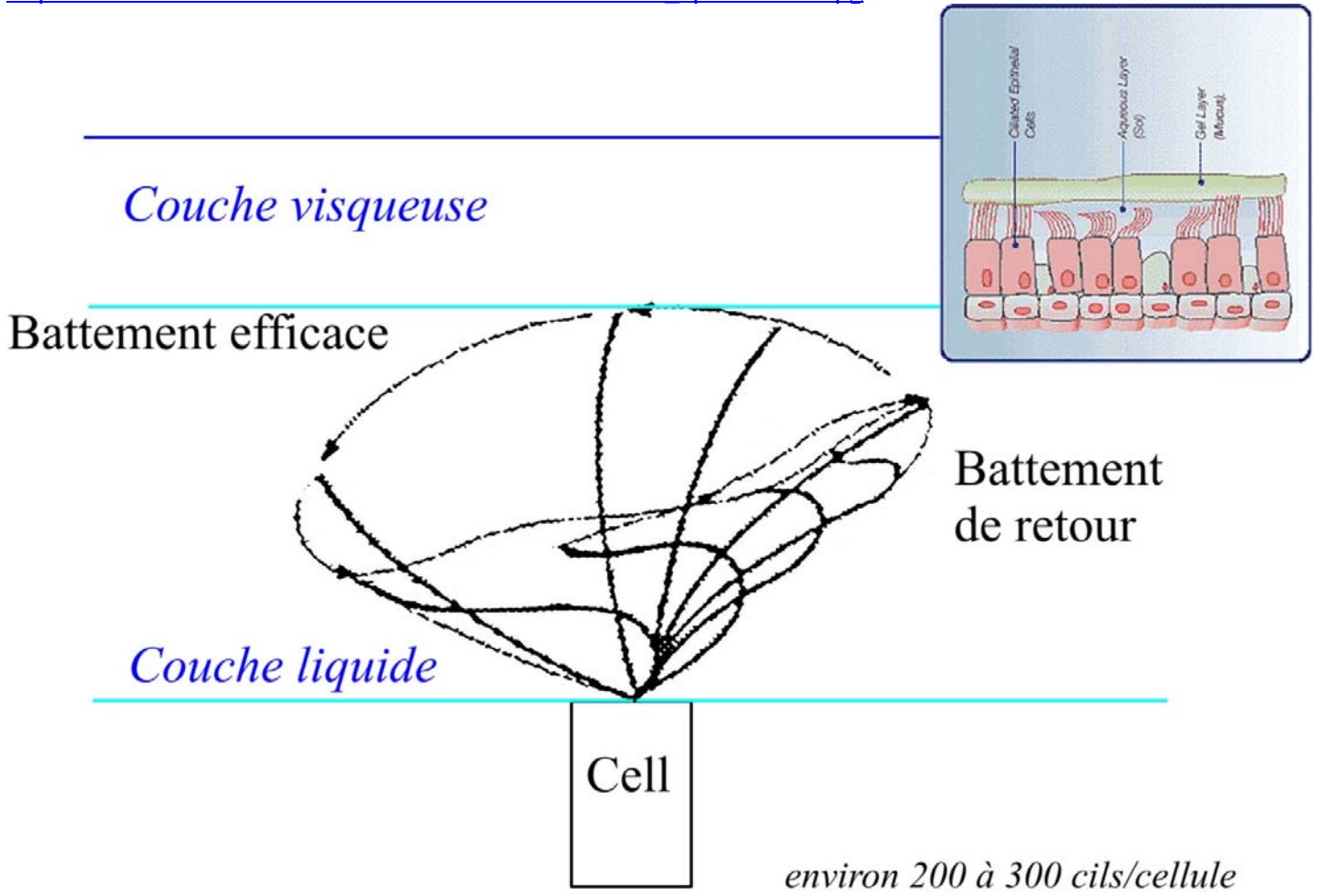


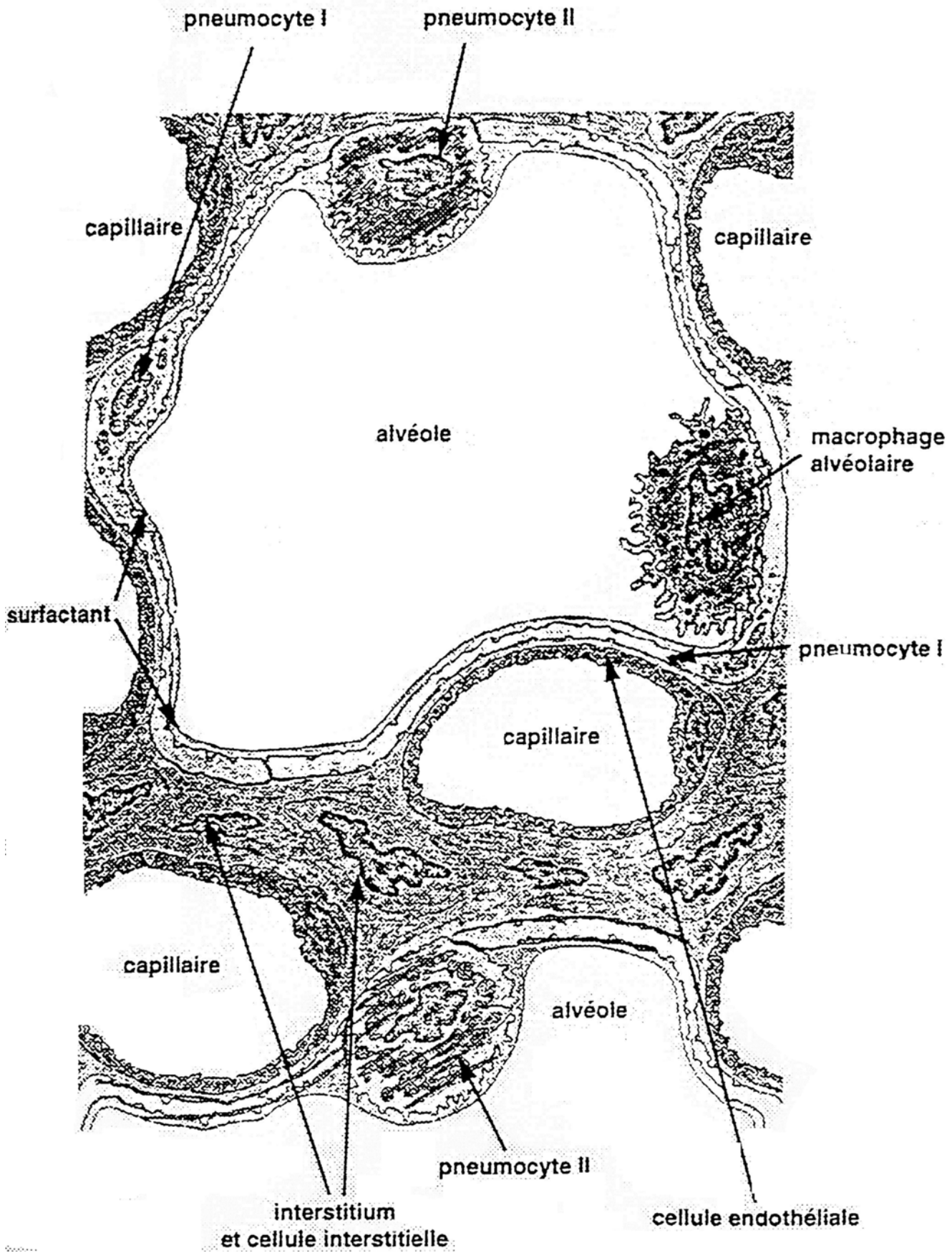
Scanning electron micrograph of ciliated epithelial cells beating in the fluid layer beneath the mucus (Mu). (Reproduced by kind permission of Dr PK Jeffery, Imperial College School of Science, Technology and Medicine, London, and the publishers of *Respiratory Medicine*¹⁴.)

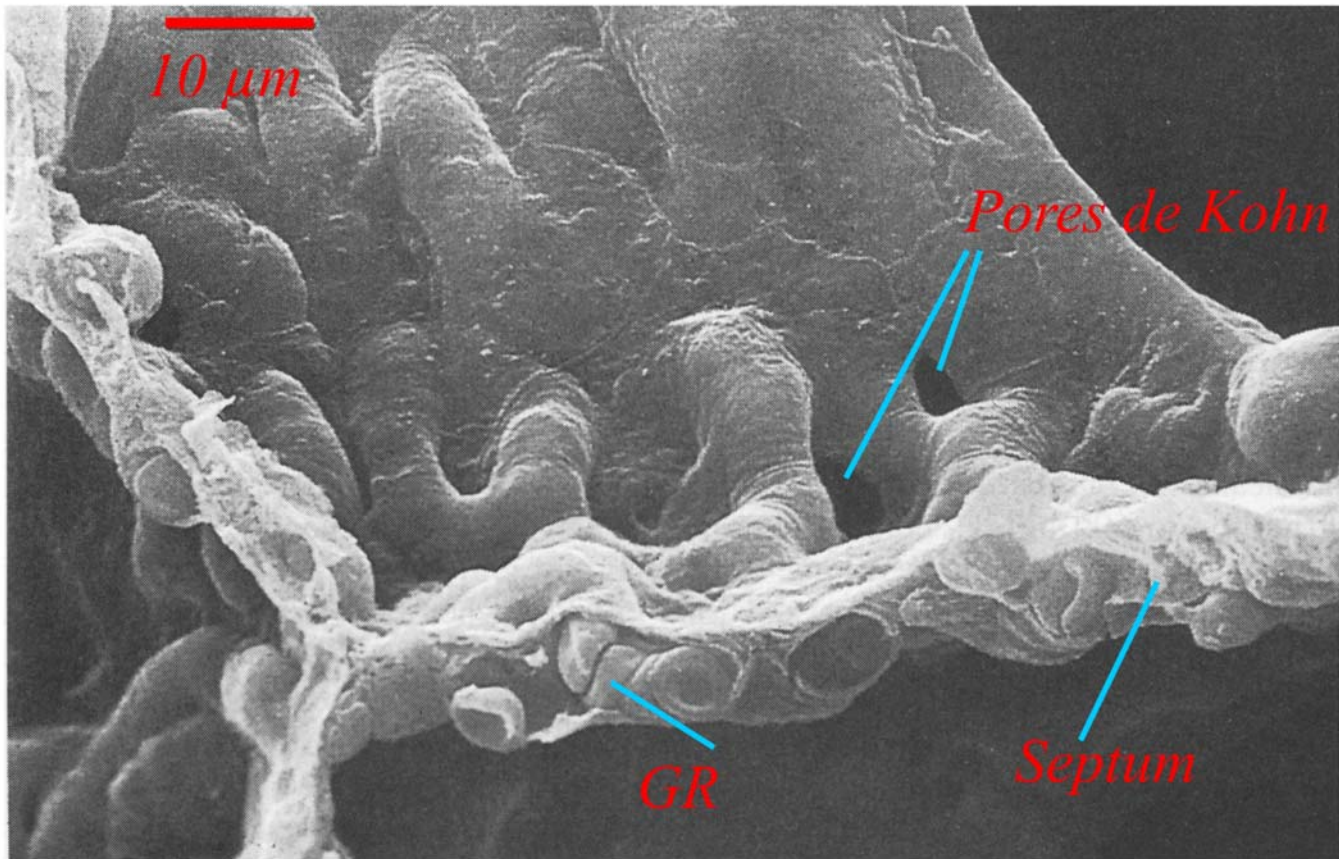
Lumb A. *Nunn's Applied Respiratory Physiology*. Edinburgh: Butterworth-Heinemann, 2000.

voir également :

http://helios.univ-reims.fr/Labos/INSERM514/Video/cil_epithelium.mpg





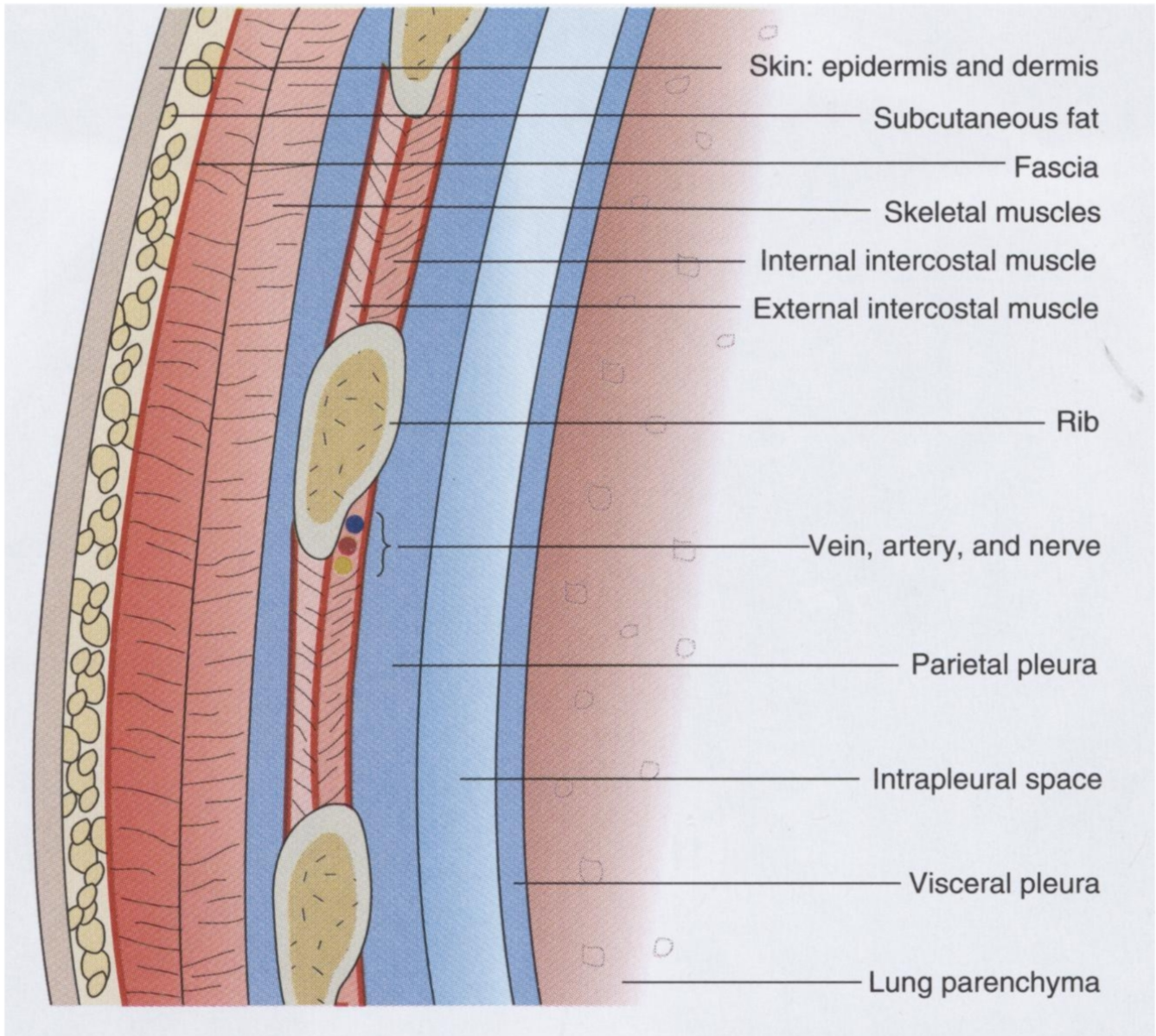


Lumb A. *Nunn's Applied Respiratory Physiology*. Edinburgh: Butterworth-Heinemann, 2000.

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES PRINCIPALES CELLULES IDENTIFIÉES DANS L'ÉPITHÉLIUM RESPIROATOIRE CHEZ L'ADULTE

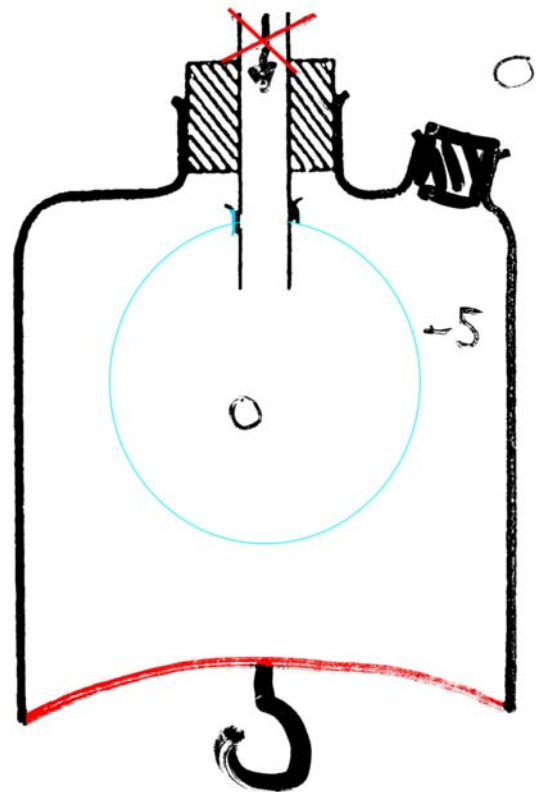
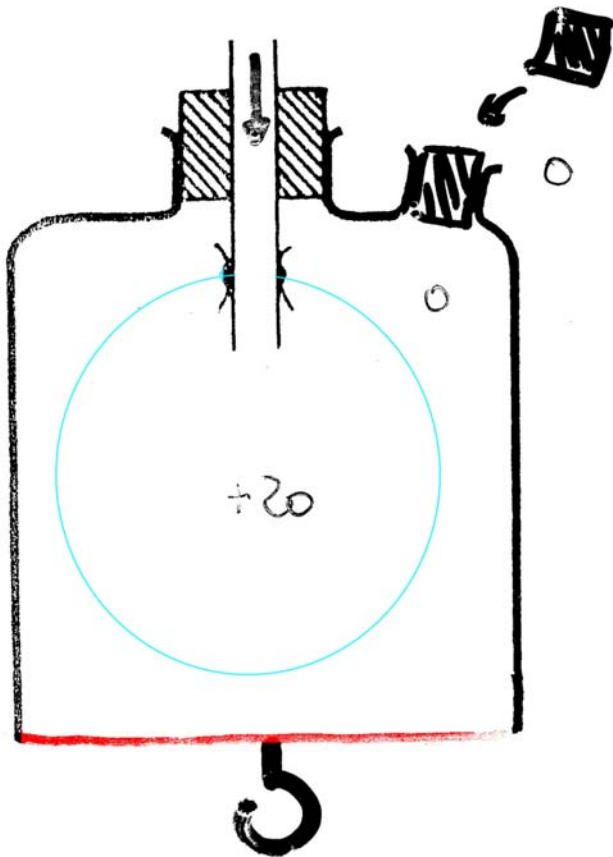
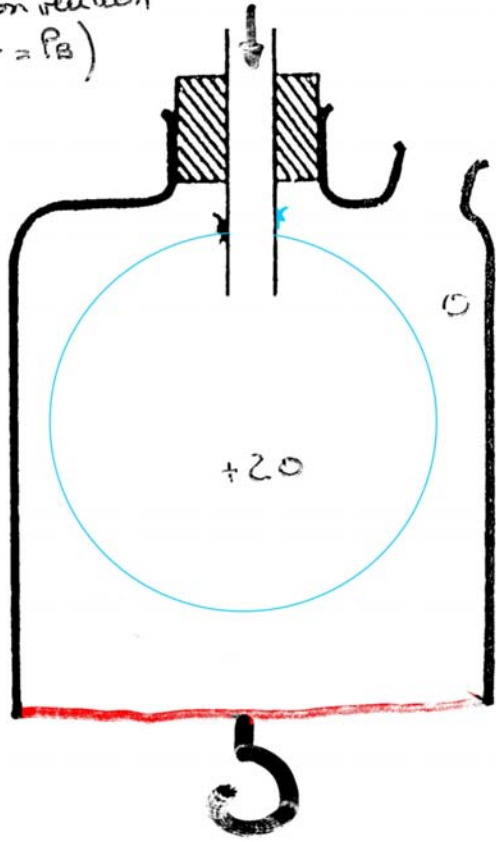
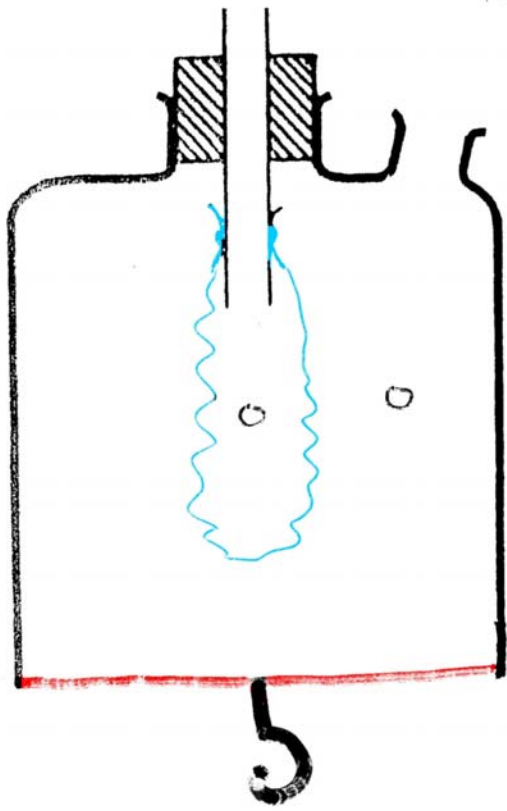
Type cellulaire	Proportions	Localisation	Principales caractéristiques morphologiques			Fonction
			Histologie	Ultrastructure	Immunohistochimie	
Cellules ciliées	1/3 dans les bronches 50 % dans les bronchioles	Des bronches aux bronchioles respiratoires	Cellules ciliées de forme cylindrique dans les bronches ou cubique dans les bronchioles	20 μm de hauteur, mitochondries au pôle apical, jonctions serrés, cils	Cytokératines en particulier 18	Cellules différenciées ne se divisant plus
Cellules basales	< 10 % Rares dans les bronchioles	Leur nombre diminue des bronches aux bronchioles terminales où elles sont rares	Petite taille, noyau basophile, haut rapport nucléocytoplasmique	Peu d'organites, ribosomes et tonofilaments, desmosomes et hémidesmosomes	Cytokératines, en particulier 5 et 14	Capacité de division, renouvellement des cellules bronchiques
Cellules caliciformes	10 % dans les bronches 3 % dans les bronchioles	Leur nombre diminue des bronches aux bronchioles	Cytoplasme clair, nombreuses vacuoles	Vacuoles de mucus, Golgi et réticulum endoplasmique rugueux		Production de mucus (10 %) (glandes sous-muqueuses en produisent 90 %)
Cellules neuroendocrines	Rares < 1 % dans les bronches Absentes dans les bronchioles	Dans les bronches, très rares dans les bronchioles	Cytoplasme clair, taille variable en position basale ou atteint la surface	Grains neurosécrétoires denses	NSE, synaptophysine et chromogranine + sérotonine bombésine calcitonine	Fait parti du système neuroendocrine diffus
Cellules de Clara	Absentes dans les bronches < 1/3 dans les bronchioles	Uniquement dans les bronchioles en particulier respiratoires	Plus haute que les cellules ciliées, apex en forme de dôme, grains PAS+ au pôle apicale	Réticulum endoplasmique, mitochondries et grains sécrétoires au pôle apical	CC10 + anti-apoptotéine A, B ou C	Renouvellement des cellules bronchiolaires et alvéolaires et production de surfactant
Pneumocytes de type I	40 % des cellules du revêtement alvéolaire mais recouvrent 90 % de la surface alvéolaire.	Alvéoles	Peu visible	50 μm de diamètre, 0,1 μm d'épaisseur ; jonctions serrées membrane basale	EMA et cytokératines TTF ₁	Cellules différenciées ne se divisant pas
Pneumocytes de type II	60 % des cellules du revêtement alvéolaire mais recouvrent seulement 5 % de la surface alvéolaire	Alvéoles	Large noyau, forme plate ou cubique	15 μm de diamètre, inclusions lamellaires, microvillosités de surface, jonctions serrées	EMA et cytokératines Anti-apoptotéine A, B ou C	Renouvellement des cellules alvéolaires, augmentation de la taille et du nombre lors des agressions

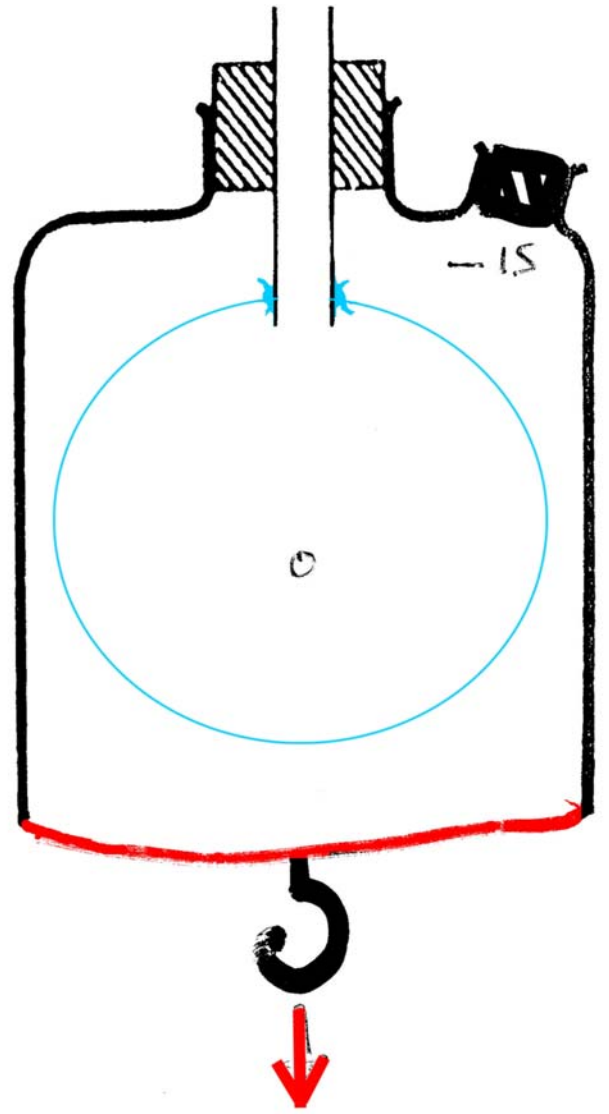
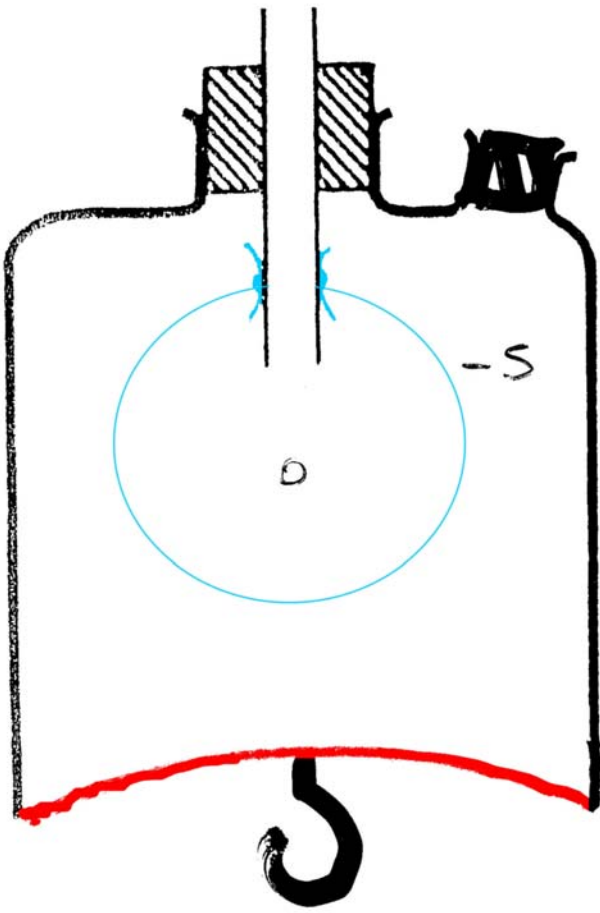
Huchon G. *Pneumologie*. Paris: Masson, 2001.



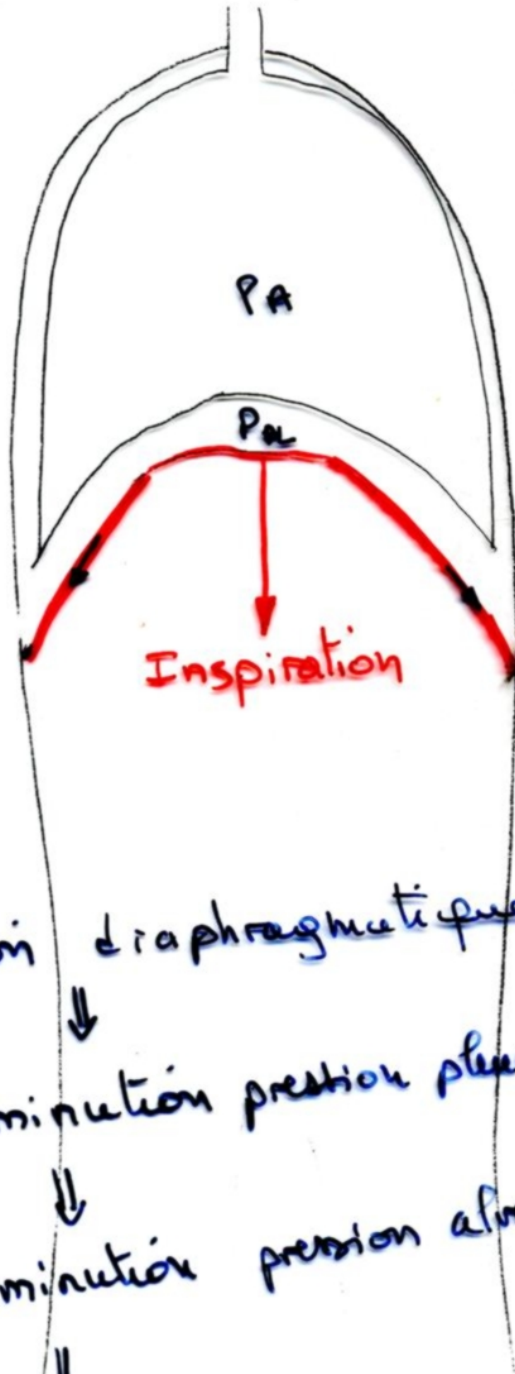
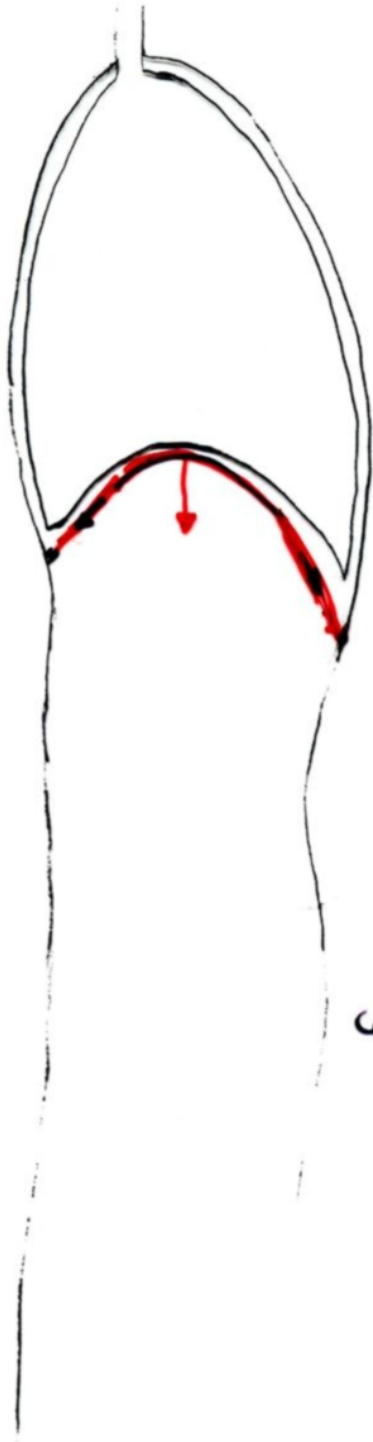
Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.

$P = 0$ (par convection
en fait = P_B)





P_B



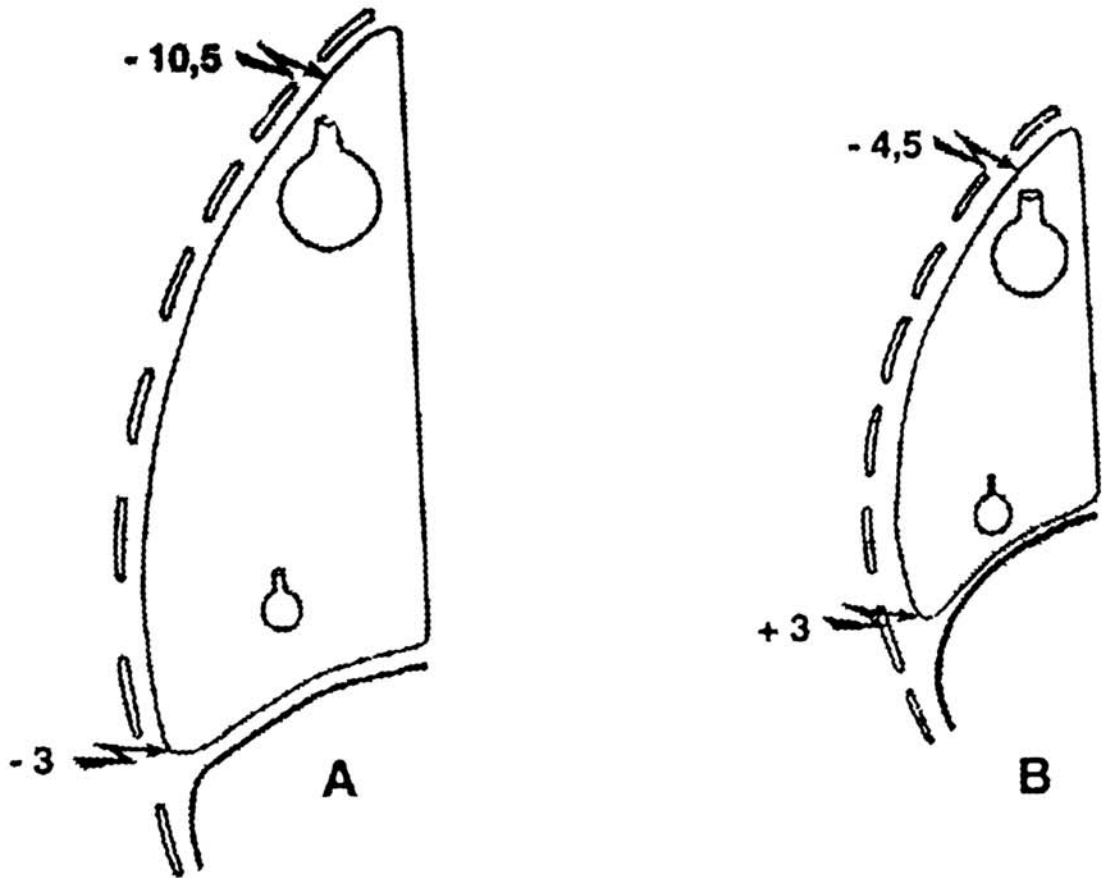
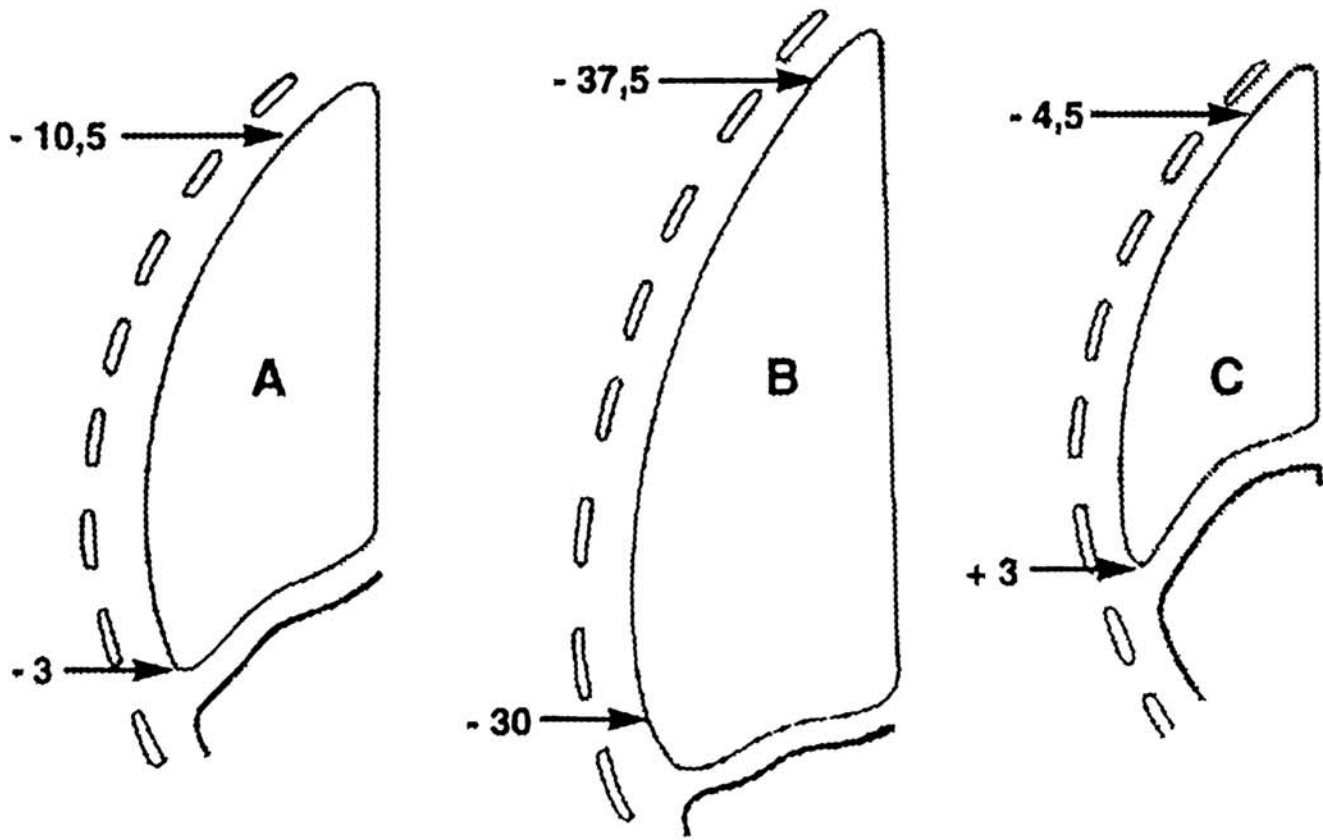
contraction diaphragmatique

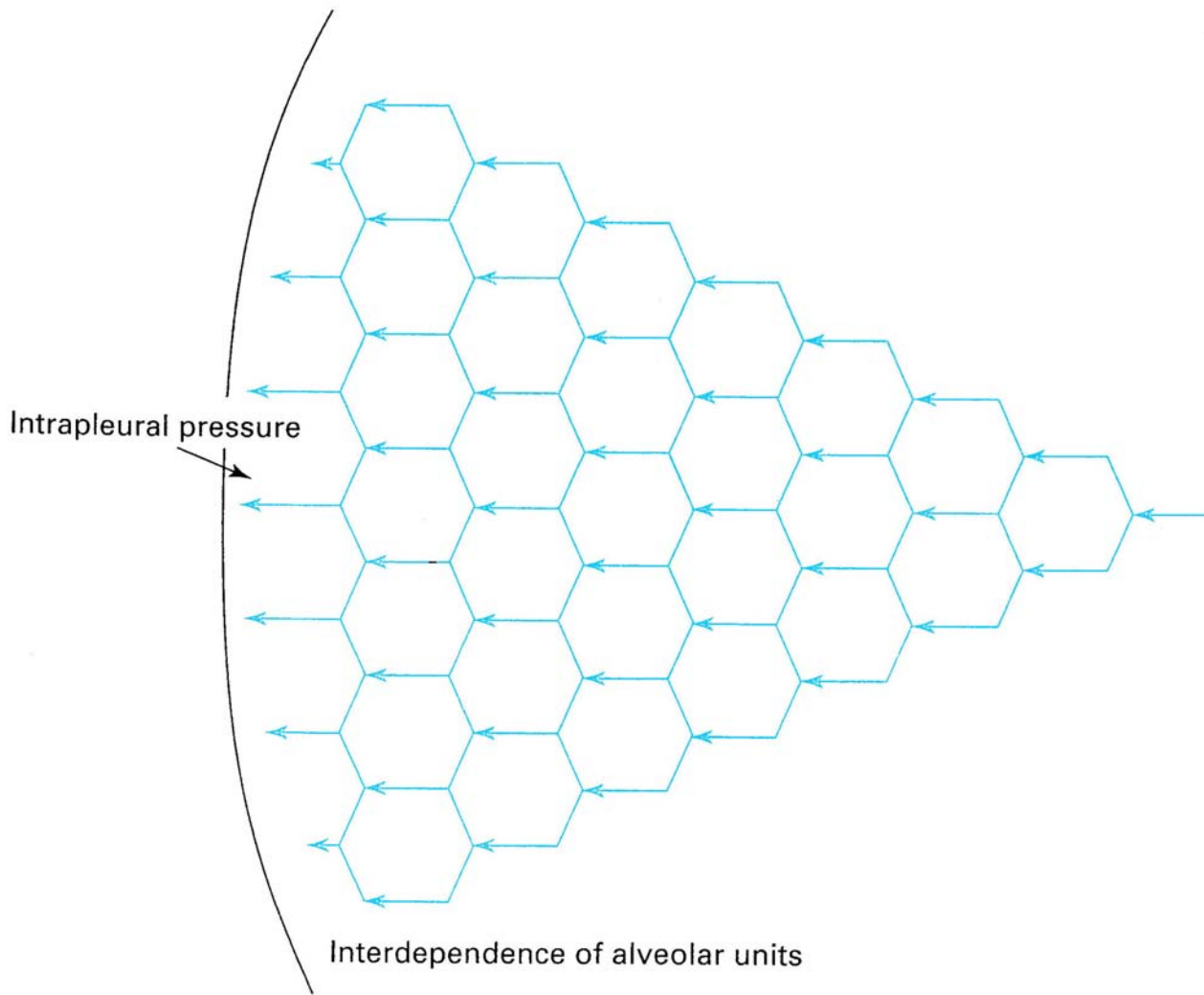
↓
↓ diminution pression pleurale

↓
↓ diminution pression alvéolaire

↓
 $P_A < P_B$

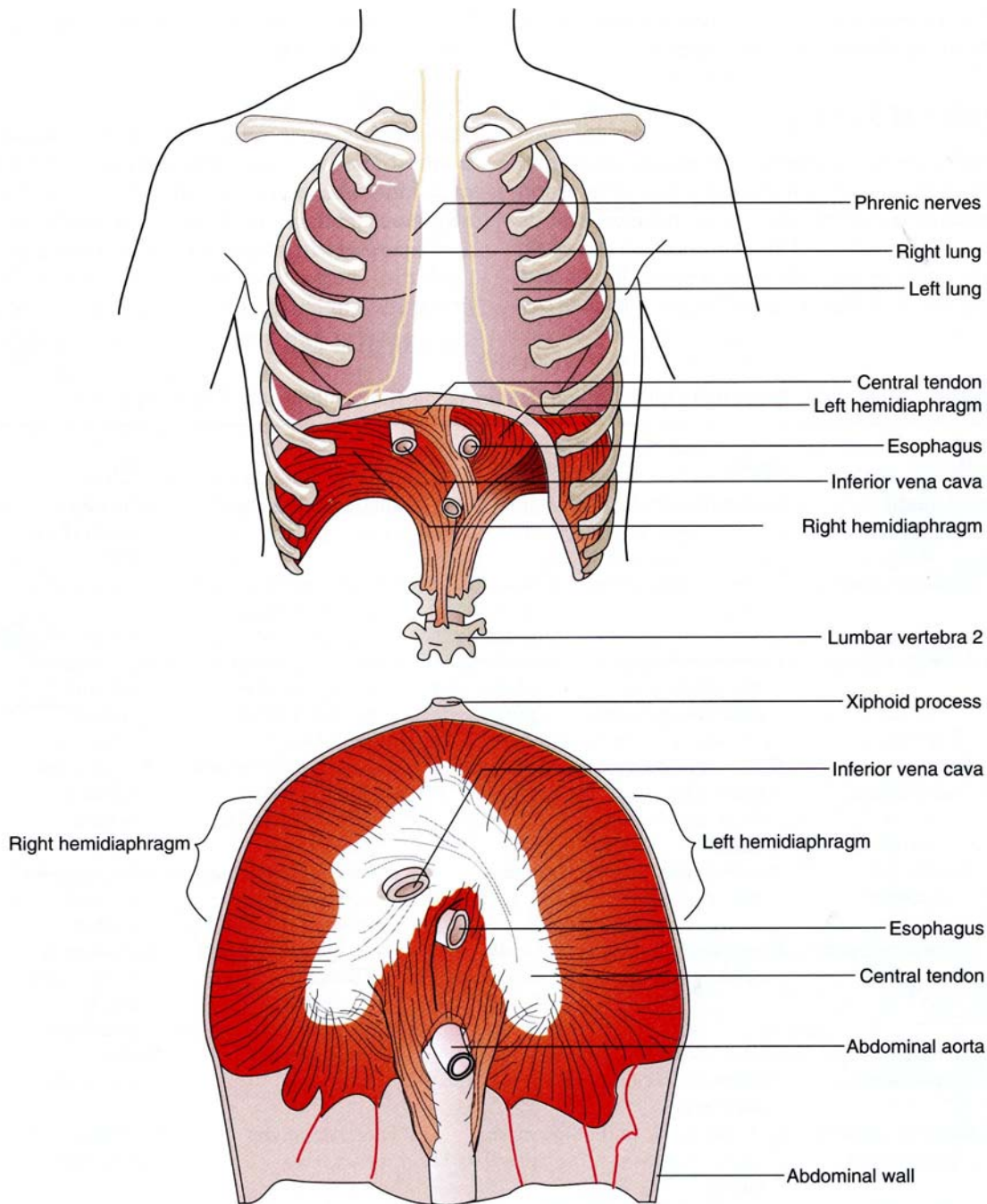
↓
Entrée d'air dans le
poumon.





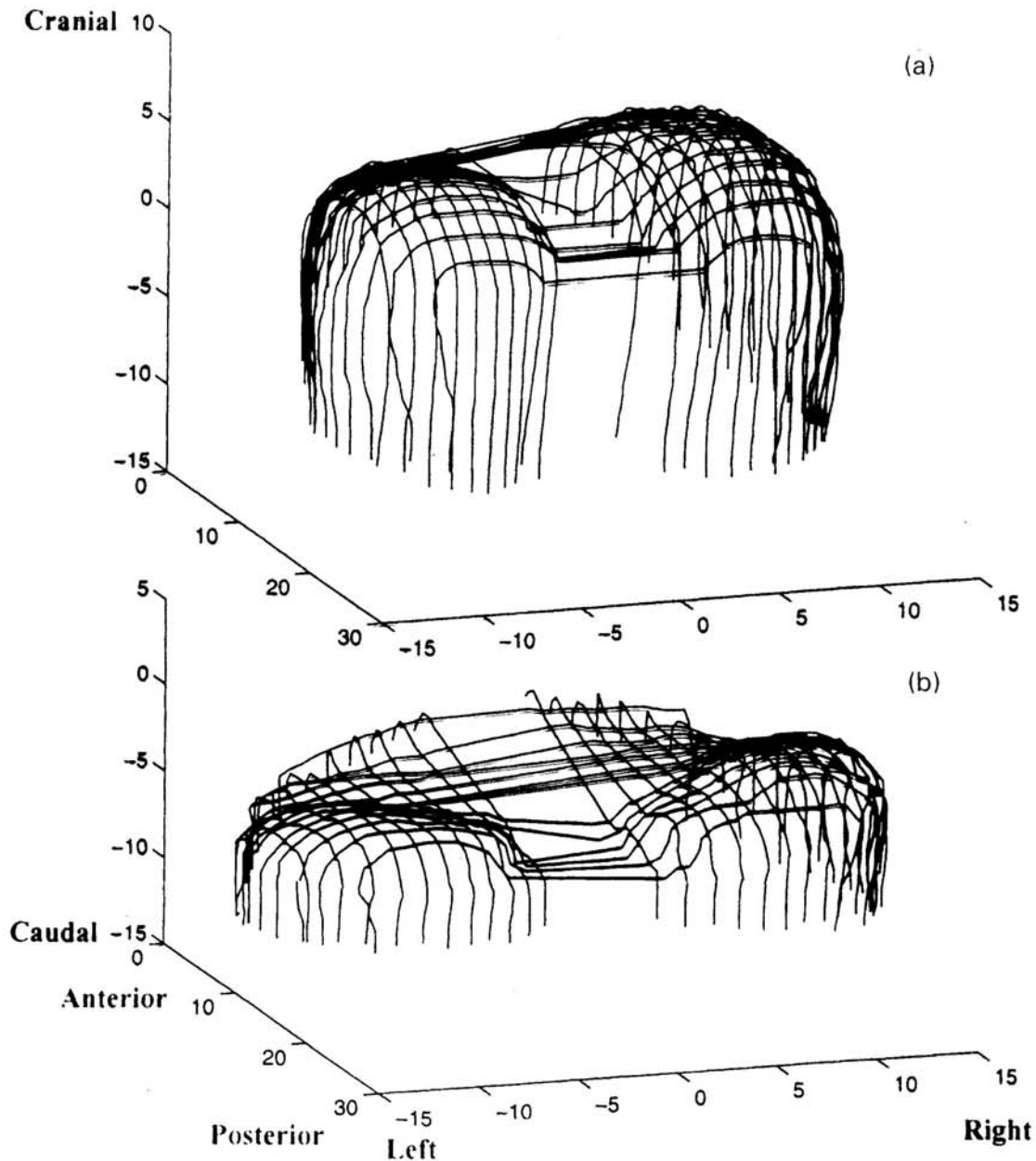
Structural interdependence of alveolar units. The pressure gradient across the outermost alveoli is transmitted mechanically through the lung via the alveolar septa.

Levitsky MG. *Pulmonary Physiology.* New York: Mc Graw Hill, 2003.

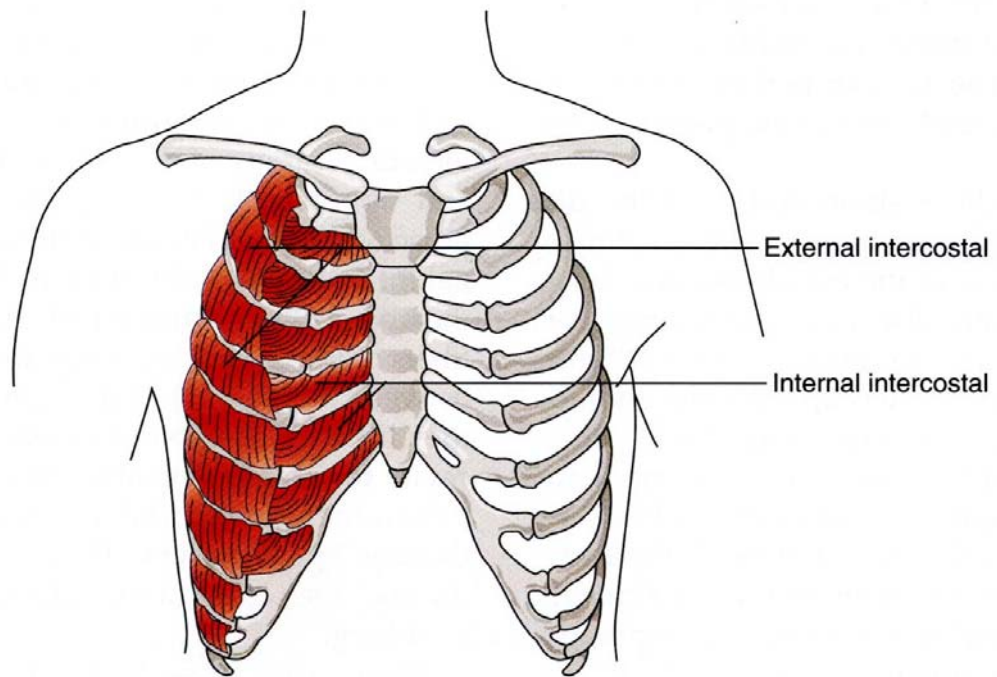


Diaphragm originates from lumbar vertebra, lower ribs, sternum, and abdominal wall and converges in a central tendon. It enlarges the thoracic cavity and compresses the abdominal cavity when stimulated by the phrenic nerves.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.

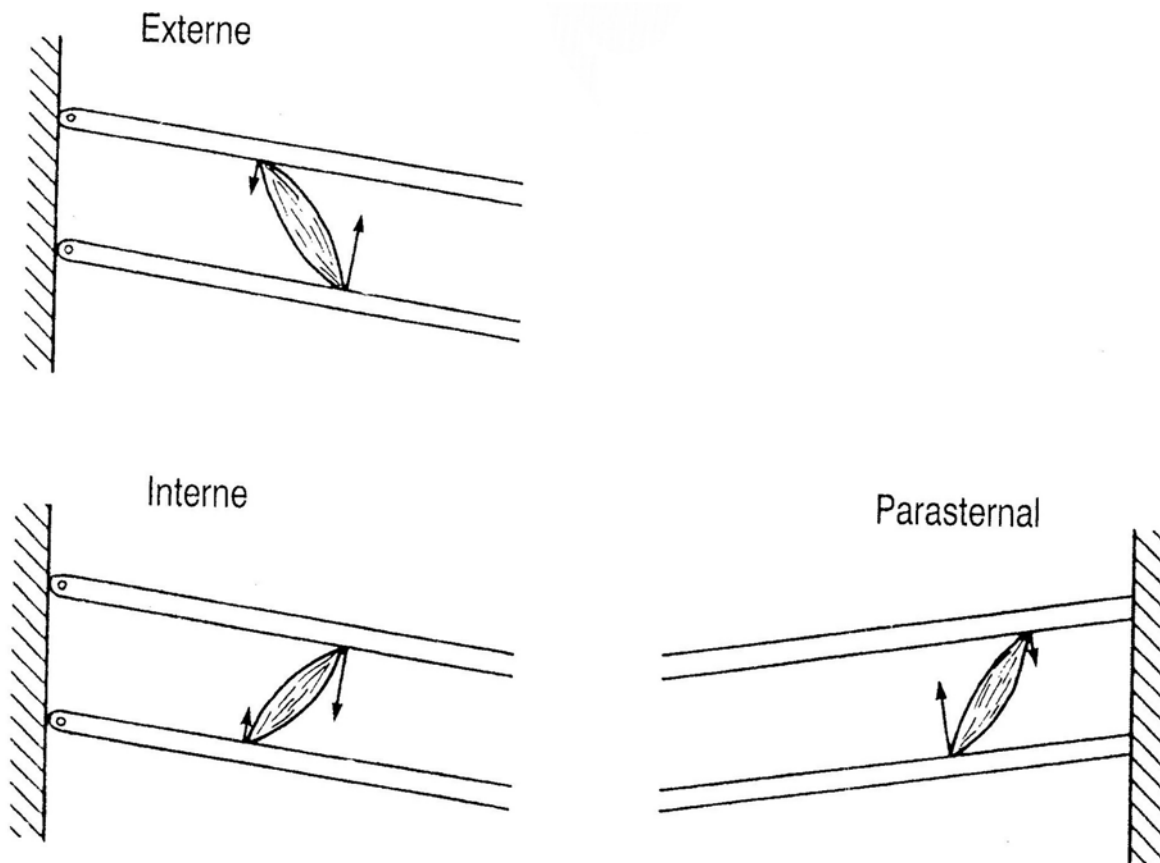


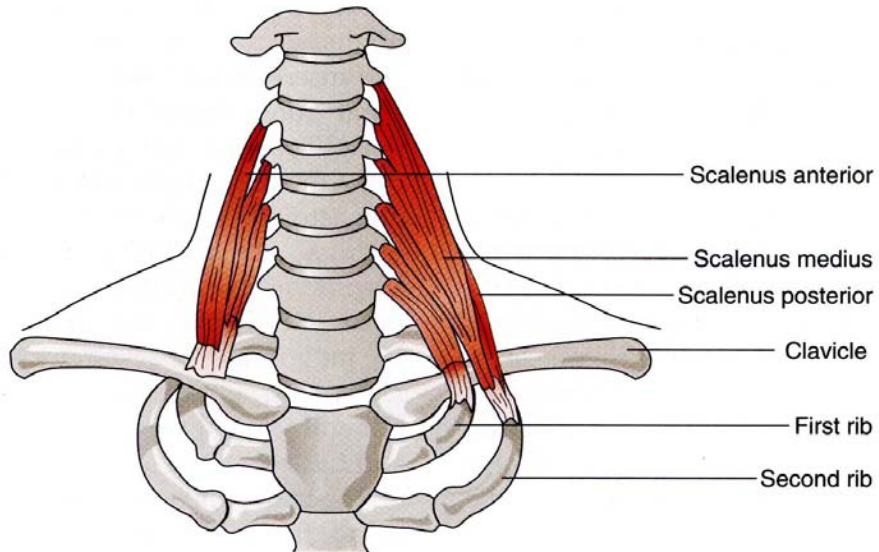
Three-dimensional reconstructions of the human diaphragm at FRC using fast CT scanning (dimensions in cm). (a) Normal subject showing extensive zone of apposition and normal curvature of the diaphragm domes. (b) Patient with hyperinflated chest as a result of chronic obstructive pulmonary disease (page 533). Note the reduced zone of apposition and the flattened diaphragm domes. (After reference 18 by permission of the authors and the publishers of *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*.)



External intercostal muscles lift the inferior ribs and enlarge the thoracic cavity. Internal intercostal muscles compress the thoracic cavity by pulling the ribs together.

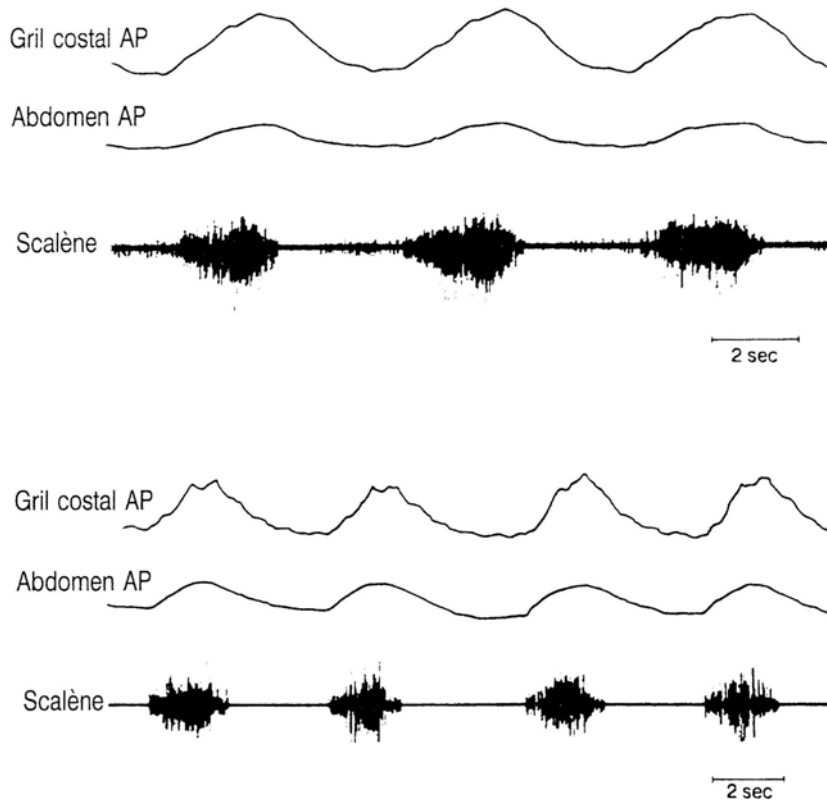
Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.



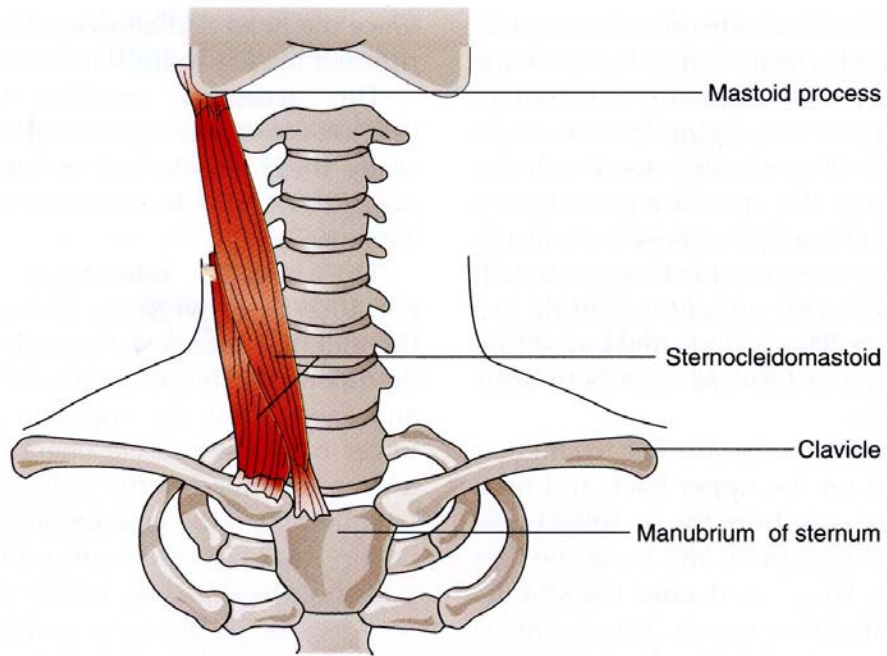


Scalene muscles originate from the lower cervical vertebrae and lift the clavicle and first two ribs.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.

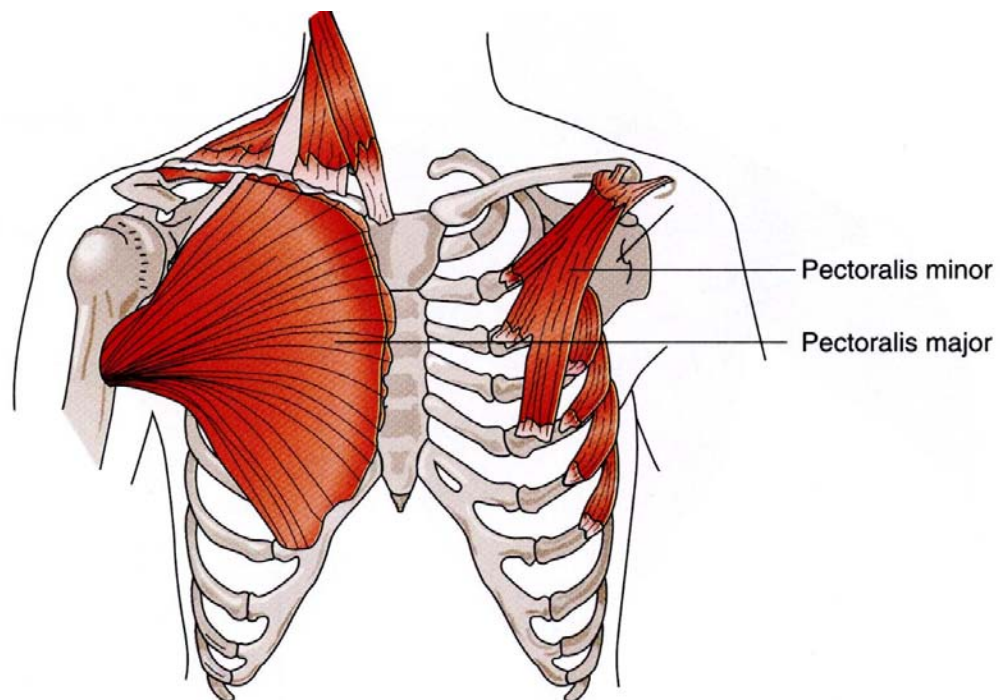


Enregistrements électromyographiques des muscles scalènes réalisés chez deux individus normaux respirant calmement en position assise. Ces muscles se contractent lors de la phase inspiratoire, représentée ici par l'augmentation des diamètres antéro-postérieurs du gril costal et de l'abdomen.



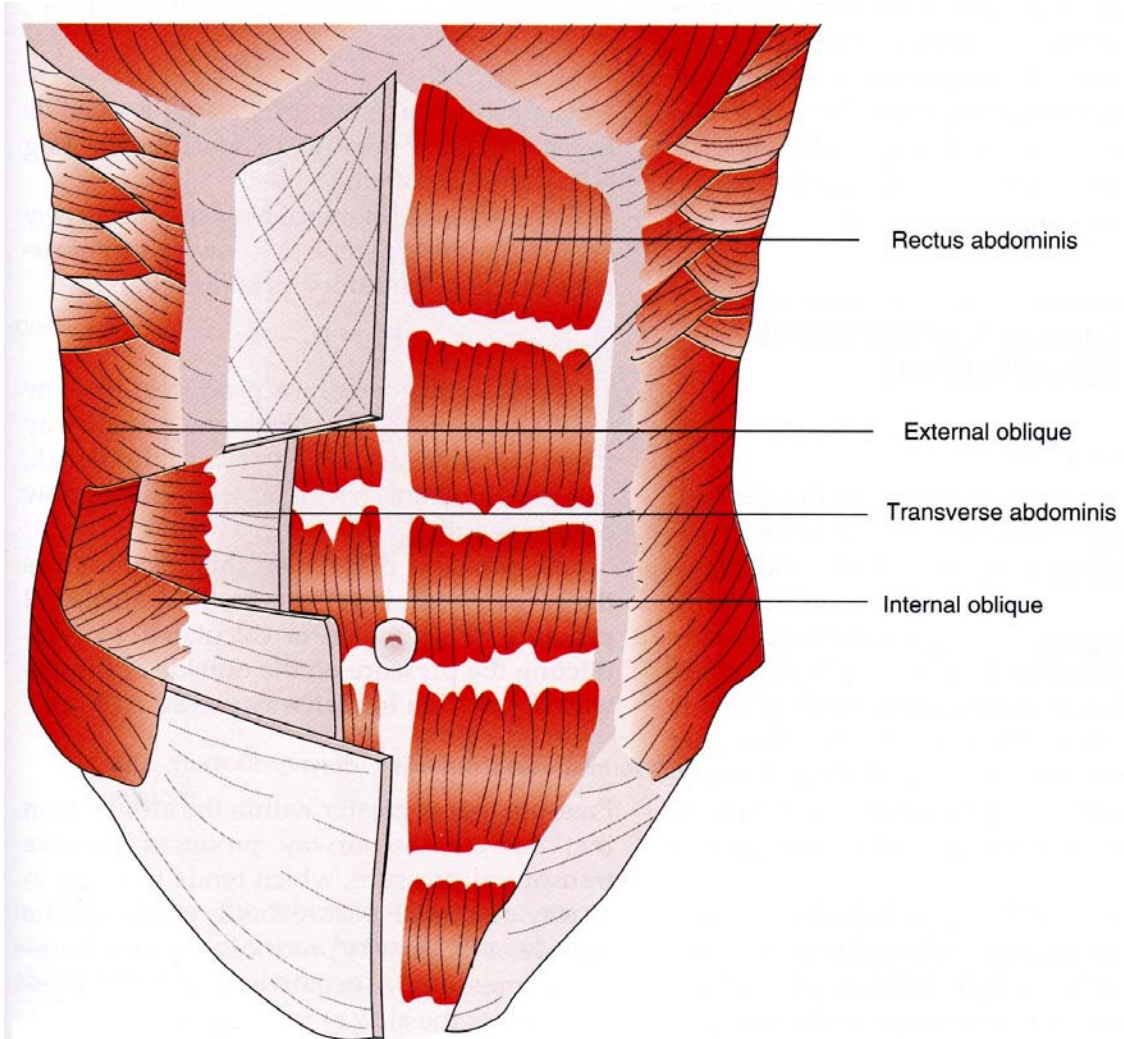
Sternocleidomastoid muscles originate from the manubrium and clavicle and insert on the mastoid process of the temporal bone. They lift the upper thorax when the trapezius stabilizes the head.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.



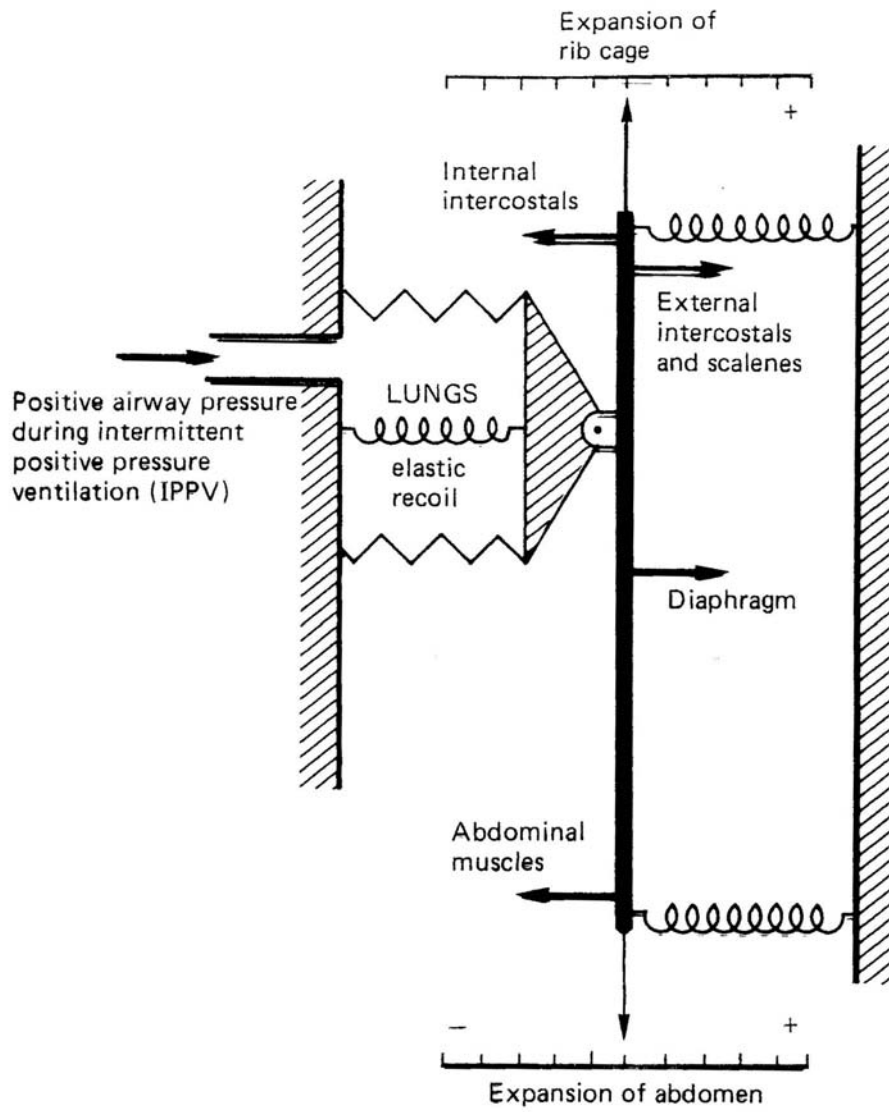
Pectoralis major and minor can lift and enlarge the thorax when the arms are braced by leaning forward on the elbows.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.

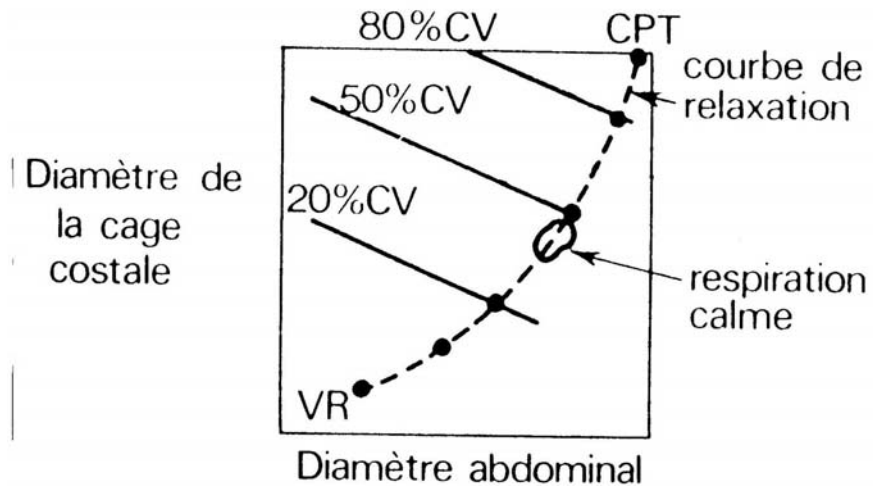


Abdominal wall muscles compress the thoracic cavity by compressing the abdominal wall and forcing the diaphragm upward.

Hicks G. *Cardiopulmonary Anatomy and Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 2000.



Lumb A. *Nunn's Applied Respiratory Physiology*. Edinburgh: Butterworth-Heinemann, 2000.



Meyer P. *Physiologie Humaine*. Paris: Flammarion Medecine Sciences, 1982.