



UNIVERSITÉ
BORDEAUX
S E G A L E N

licence TECSAN

UE Physiologie, physiopathologie et pharmacologie

physiologie respiratoire

Etienne Roux

*Adaptation cardiovasculaire à l'ischémie INSERM U 1034
UFR des Sciences de la Vie Université Bordeaux Segalen*

contact: etienne.roux@u-bordeaux2.fr

le problème du dioxygène (et du dioxyde de carbone)

Pourquoi le dioxygène est-il important pour les animaux ?

production d'énergie par la cellule : respiration cellulaire (mitochondrie)

respiration cellulaire :

consommation d'oxygène et production de CO₂

Quel problème pose le dioxygène ?

apport de dioxygène au niveau des cellules suffisant pour permettre la production d'énergie nécessaire à la couverture des besoins

quel problème pose de dioxyde de carbone ?

élimination par l'organisme du CO₂ produit par la respiration cellulaire

IV. l'appareil respiratoire

- A. structure générale
- B. voies aériennes
- C. paroi thoraco-abdominale

V. la ventilation

- A. mécanique ventilatoire
- B. physiologie et physiopathologie

VI. les échanges gazeux

- A. l'air inspiré
- B. le gaz alvéolaire
- C. la diffusion alvéolo-capillaire

VII. la perfusion

- A. organisation du système circulatoire
- B. transport des gaz dans le sang

VIII. notions de régulation de la respiration

cage thoracique et muscles thoracoabdominaux

→ pompe

voies aériennes

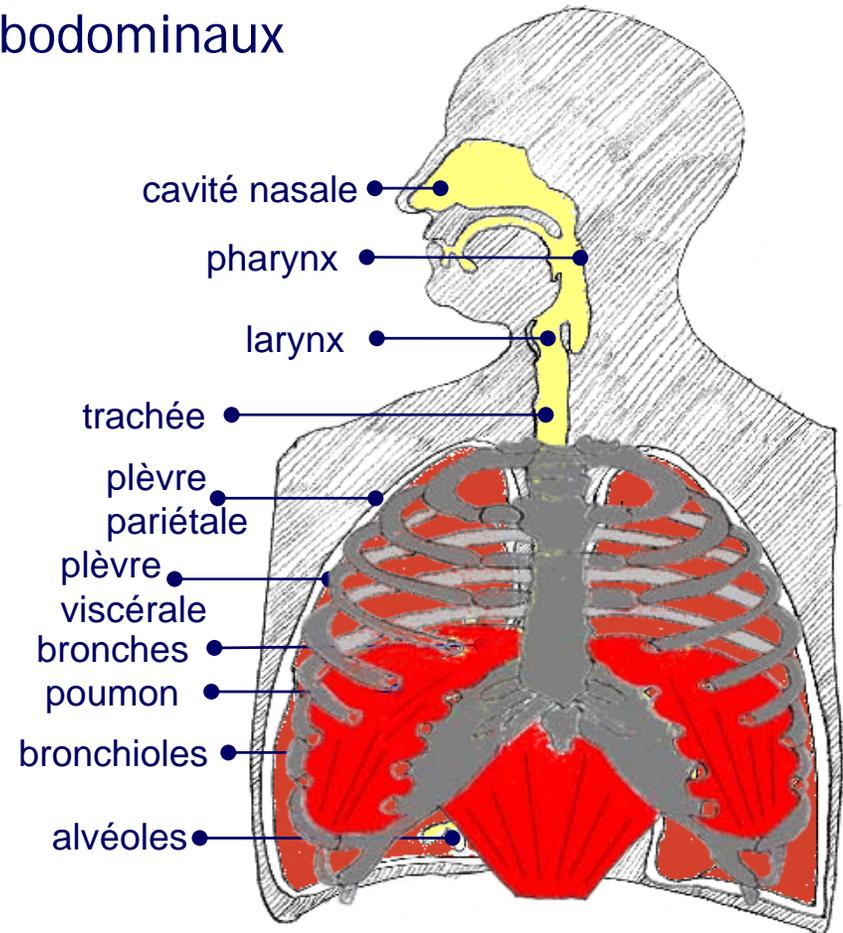
→ tuyauterie

barrière alvéolo-capillaire

→ zone d'échanges gazeux

circulation pulmonaire

→ perfusion sanguine de la zone d'échange



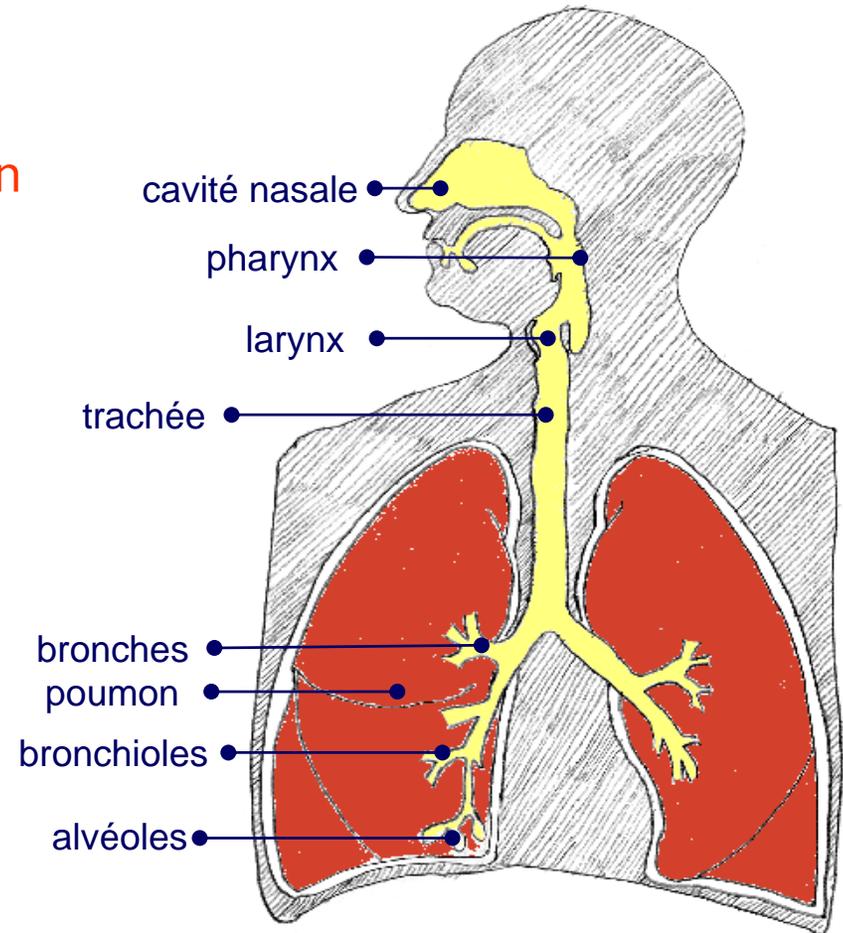
voies aériennes supérieures :
nez, pharynx, larynx

conduction

arbre bronchique :
trachée,
bronches,

bronchioles,
canal alvéolaire,
alvéole

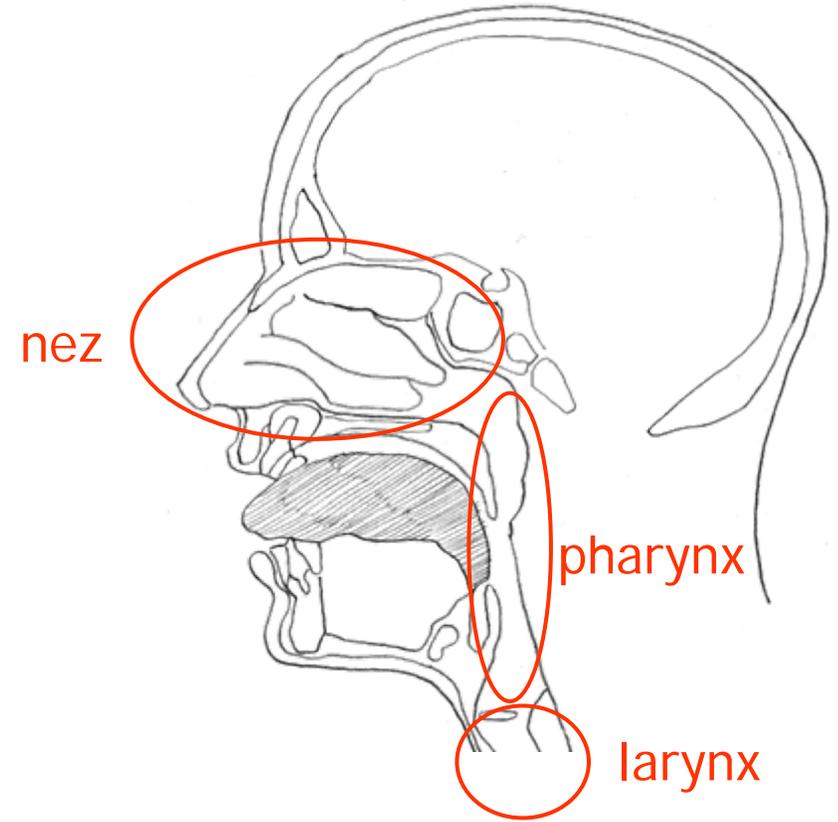
échanges gazeux



l'appareil respiratoire

les voies aériennes

voies aériennes supérieures : nez, pharynx, larynx



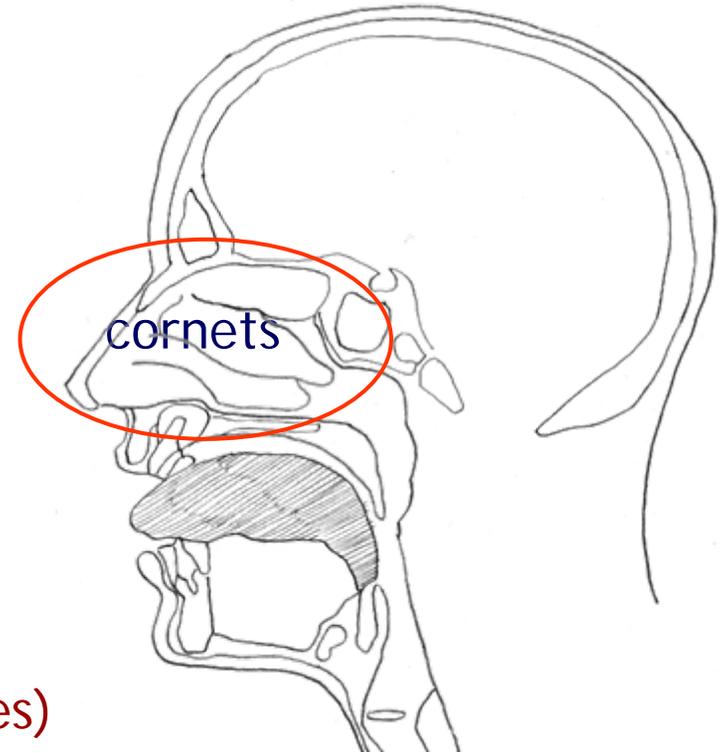
voies aériennes supérieures : nez

volume : 20 cm² surface : 160 cm²

→ zone de conditionnement de l'air inspiré
en température et en humidité

inspiration :
élévation de température,
saturation en vapeur d'eau

expiration : refroidissement de l'air expiré,
rétention partielle de la vapeur d'eau
(limitation des pertes hydriques et caloriques)



résistance à l'écoulement

homme adulte : résistance nasale > résistance buccale

→ hyperventilation : respiration buccale (pb. si air froid ou sec)

nouveau-né, animaux: résistance nasale < résistance buccale

obstruction nasale → gêne à la respiration

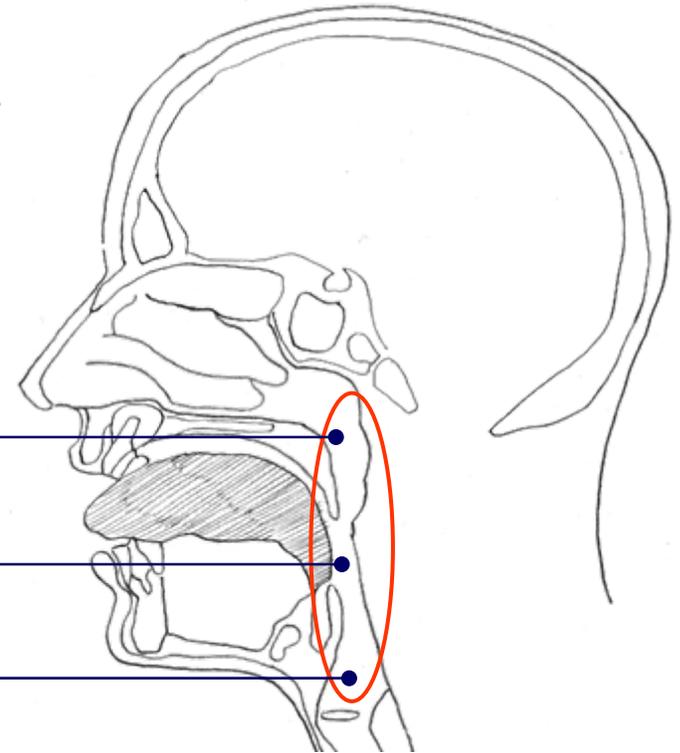
voies aériennes supérieures : pharynx

zone commune au passage des aliments et de l'air
composé de 3 parties:

nasopharynx

oropharynx

laryngopharynx



muscles du pharynx (> 20)

contraction des muscles pharyngés : maintien de l'ouverture du pharynx.

pb. pathologiques : fausses routes, apnée du sommeil

voies aériennes supérieures : larynx

valve qui empêche les aliments de passer dans la trachée

zone de rétrécissement :

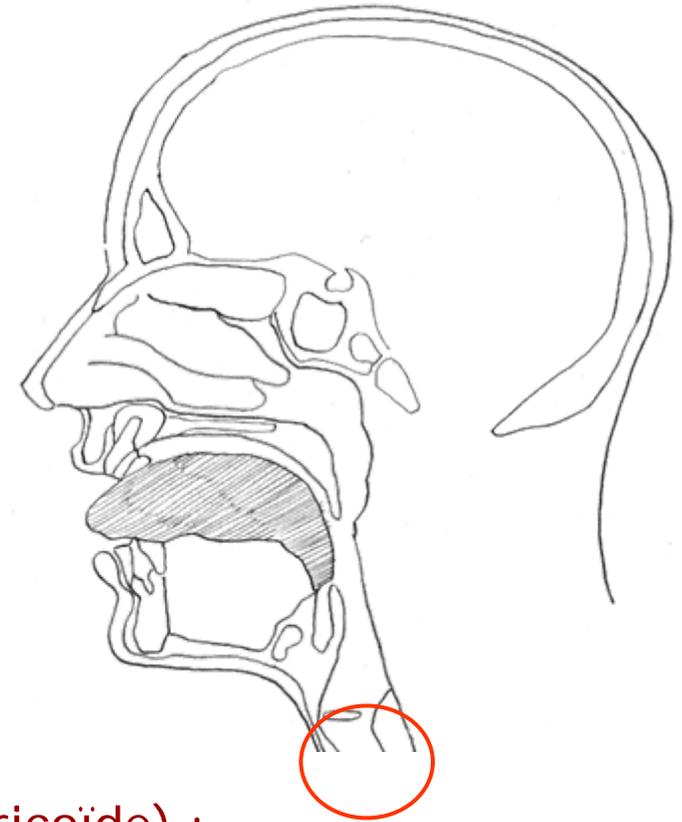
→ contrôle du débit expiratoire

cordes vocales :

→ organe de phonation

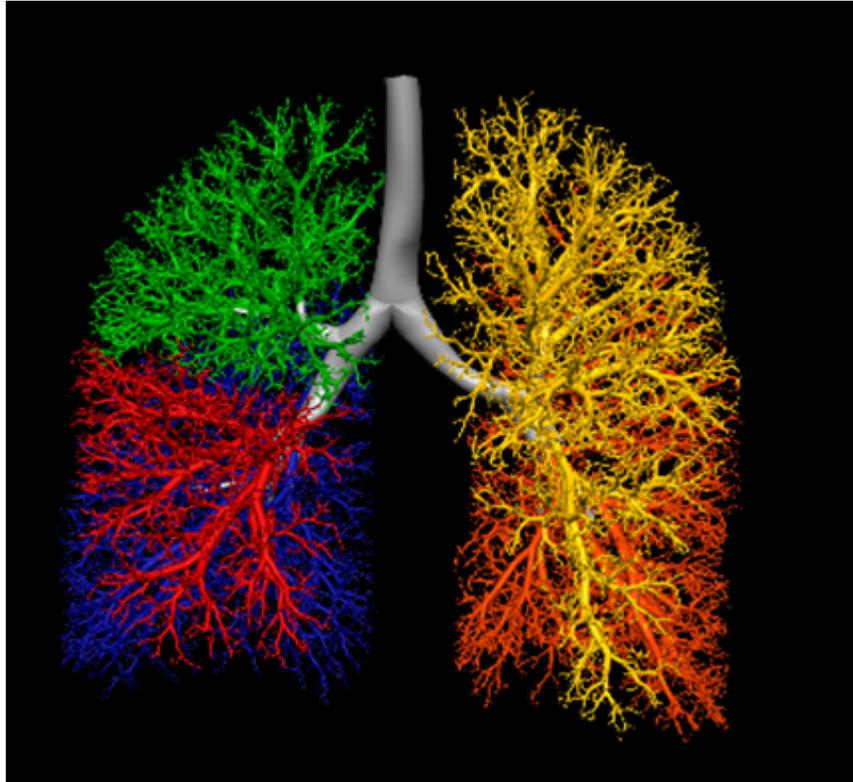
point d'arrimage de la trachée (cartilage cricoïde) :

→ maintien de l'ouverture trachéale lors de l'inspiration



l'appareil respiratoire

l'arbre bronchique



les voies aériennes

structure générale

zone de conduction

voies aériennes centrales :
bronches souches,
bronches lobaires,
bronches segmentaires,
bronches sous-segmentaires,
petites bronches (G10 : \cong 1000)

voies aériennes périphériques :
bronchioles,
bronchioles terminales,
bronchioles respiratoires,
canaux alvéolaires

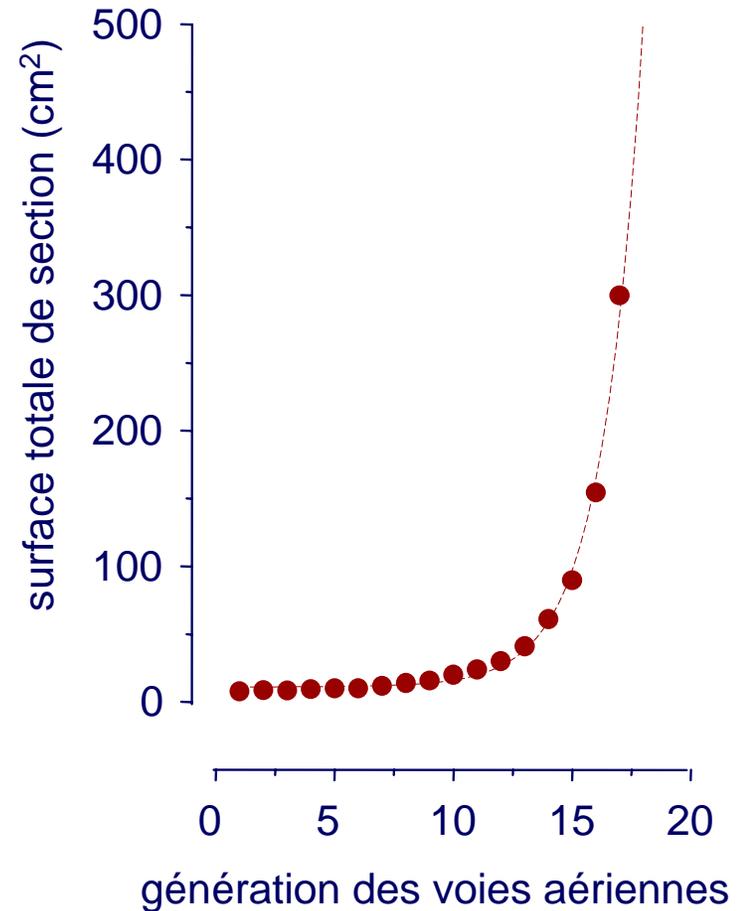
l'appareil respiratoire

les voies aériennes

l'arbre bronchique

structure générale

zone de conduction	trachée	0
	bronches extrapulmonaires	1
	bronches intrapulmonaires	2
		3
	bronches	4 ...
	bronchioles	...
	bronchioles terminales	16
zone de transition et d'échange respiratoire		17
	bronchioles respiratoires	18
		19
		20
	canaux alvéolaires	21
		22
	sacs alvéolaires	23



l'appareil respiratoire

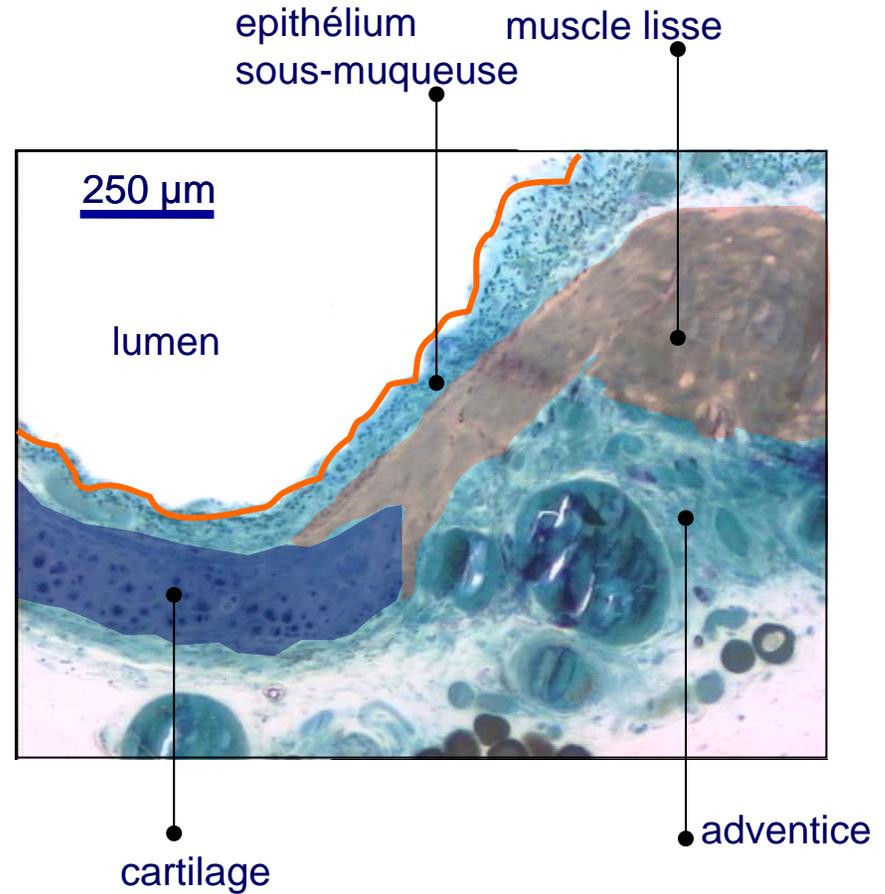
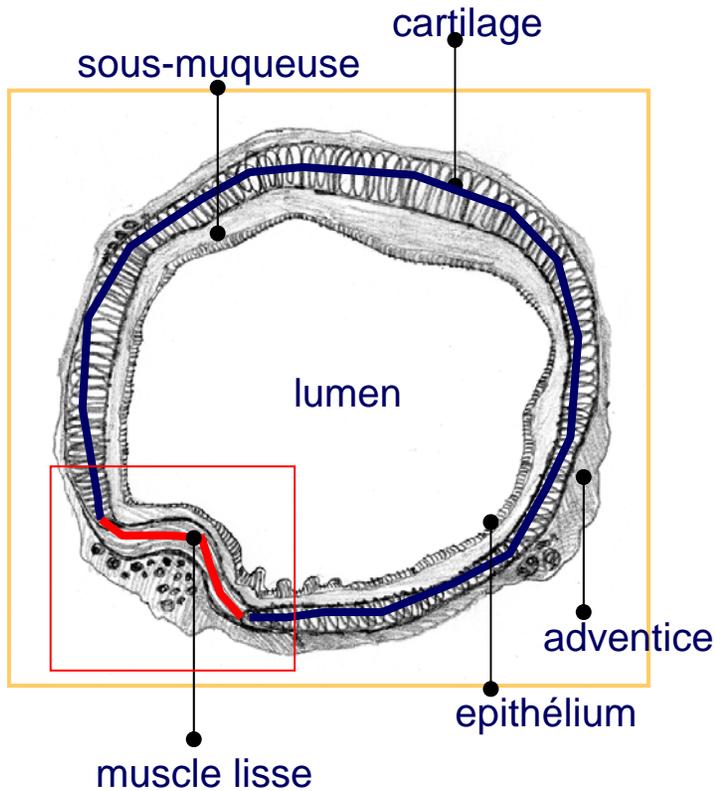
les voies aériennes

l'arbre bronchique

trachée

homme : longueur : $\cong 12$ cm

diamètre : $\cong 2$ cm



coupe transversale de trachée de rat

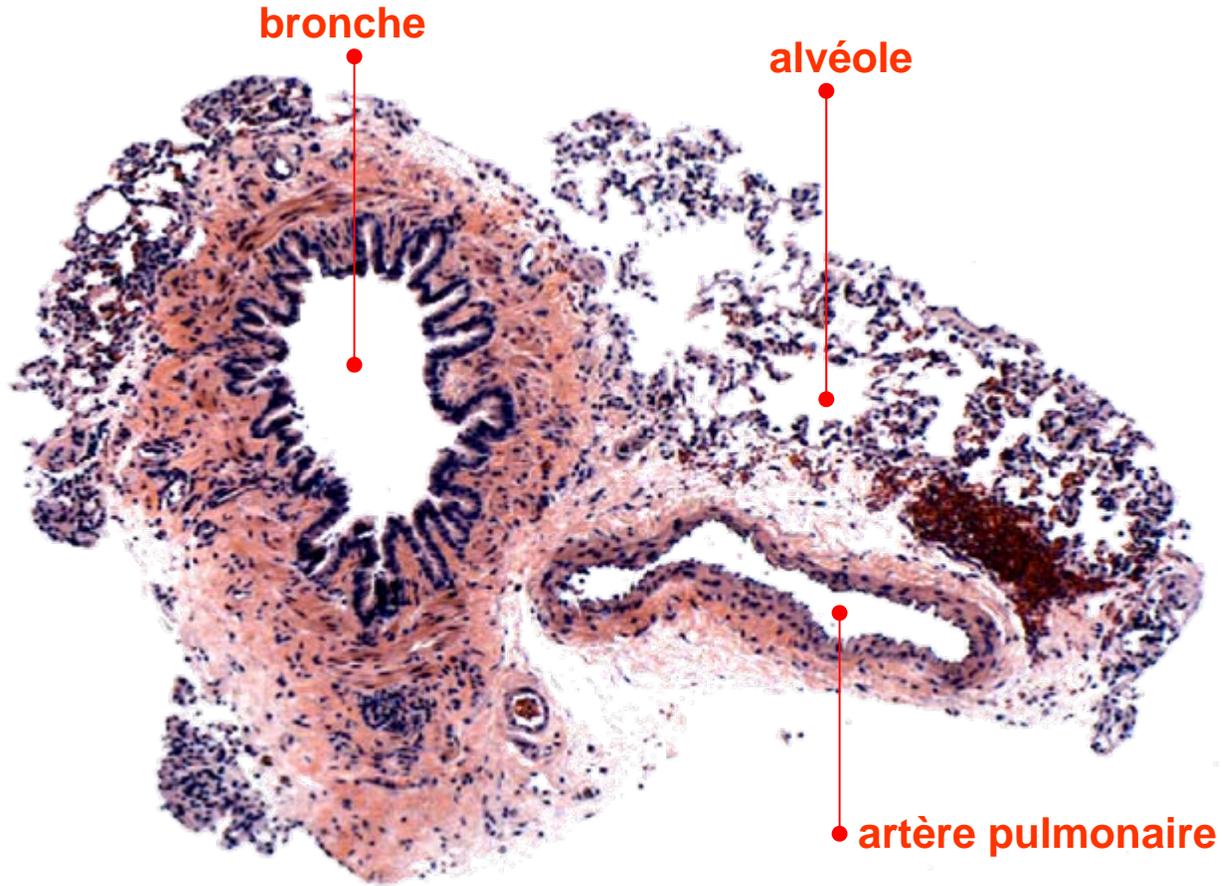
l'appareil respiratoire

les voies aériennes

l'arbre bronchique

bronches et bronchioles

histologie



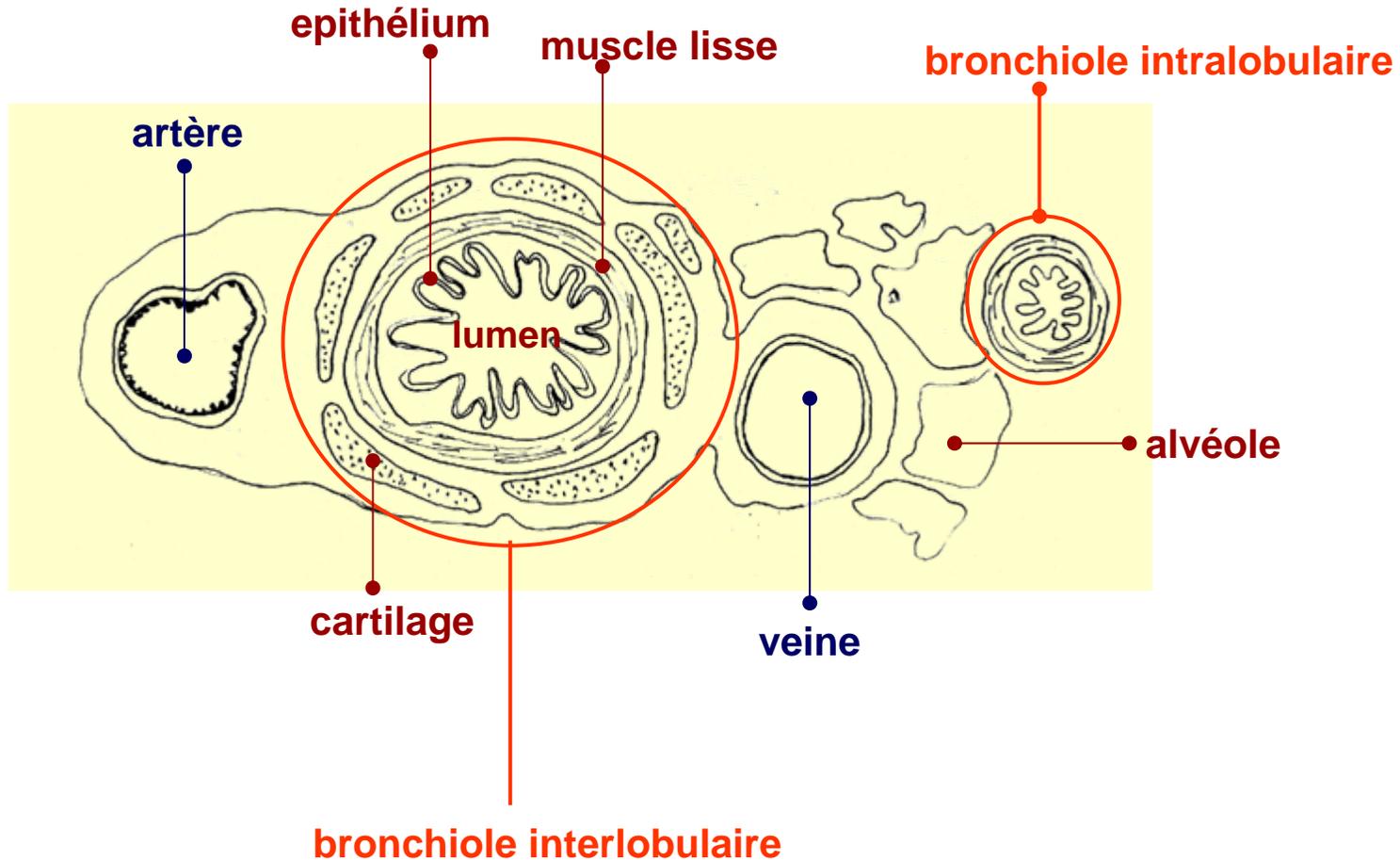
l'appareil respiratoire

les voies aériennes

l'arbre bronchique

bronches et bronchioles

histologie



l'appareil respiratoire

les voies aériennes

l'arbre bronchique

bronches et bronchioles

l'épithélium bronchique : la clairance muco-ciliaire

cellules ciliées

200 cils par cellule 6-7 μm

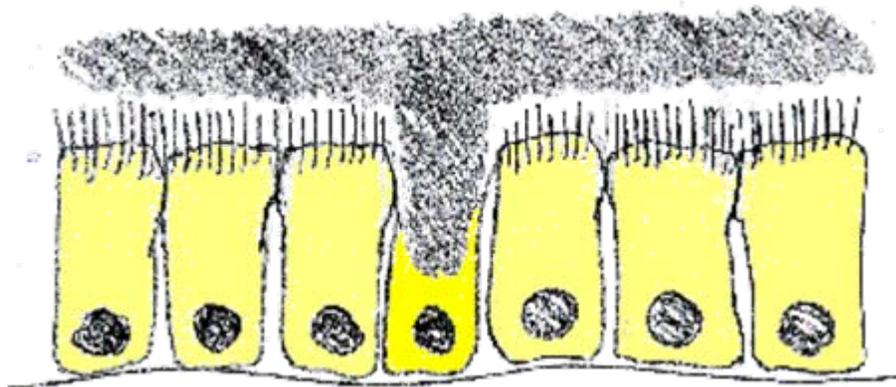
battements : 10-20 Htz

phase active brève vers l'amont

phase longue de retour

cellules productrices de mucus

mucus : eau (95 %), mucines (glycoprotéines), antiprotéases



l'arbre bronchique

bronches et bronchioles

l'épithélium bronchique : la clairance muco-ciliaire

cellules ciliées

200 cils par cellule 6-7 μm

battements : 10-20 Hz

phase active brève vers l'amont

phase longue de retour

cellules productrices de mucus

mucus : eau (95 %), mucines (glycoprotéines), antiprotéases

phase gel (0,5 - 2 μm) visco-élastique : partie apicale des cils

transportée par les battements des cils

→ transport du mucus (5-10 mm/min) : escalator muco-ciliaire

phase sol (6 μm) très liquide : zone dans laquelle battent les cils

transportée par les battements des cils

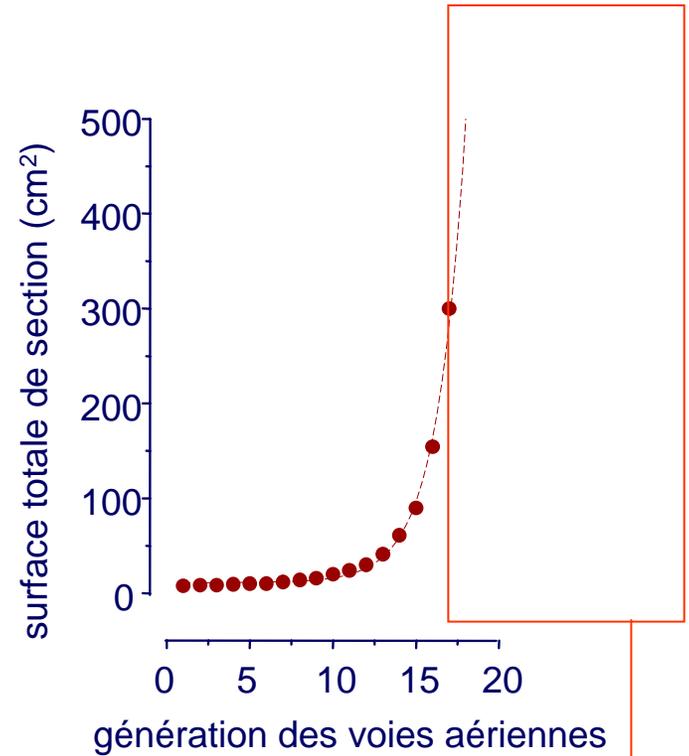
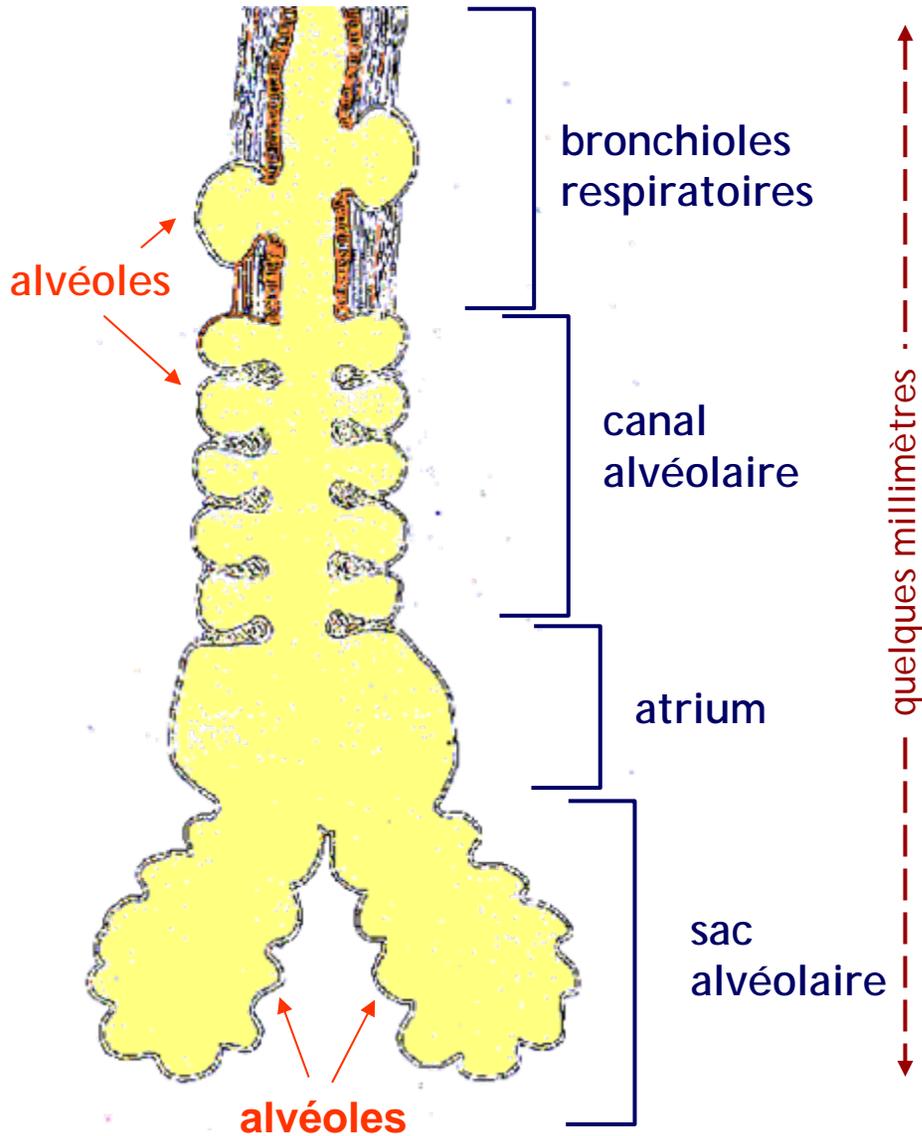
degré d'hydratation → fluidité du mucus = efficacité de la clairance

l'appareil respiratoire

les voies aériennes

l'arbre bronchique

bronches respiratoires, canal alvéolaire et alvéoles



surface cumulée : très grande zone de diffusion des gaz

volume alvéolaire total : 3 L

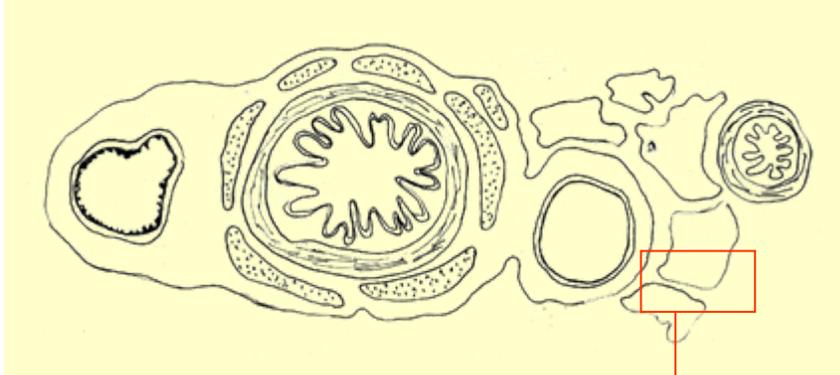
dépôt de particules

l'appareil respiratoire

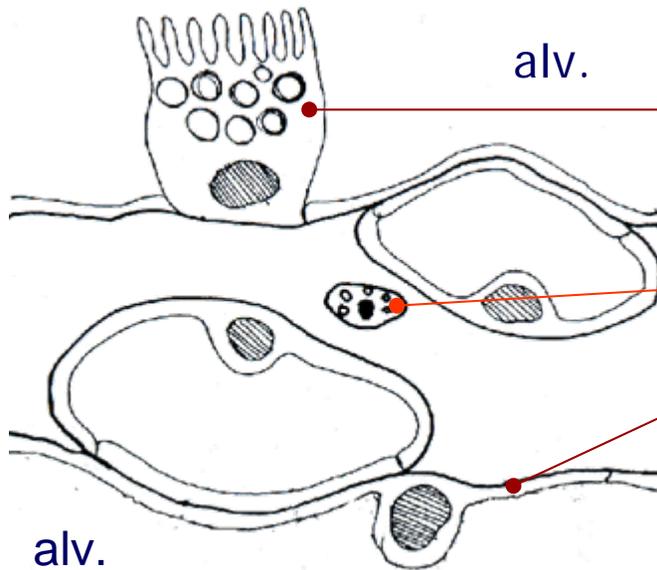
les voies aériennes

l'arbre bronchique

paroi alvéolaire



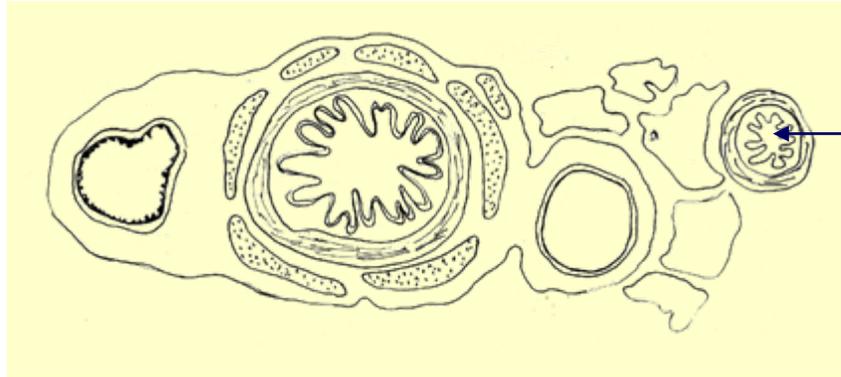
épithélium alvéolaire



• pneumocytes de types II :
production de surfactant (lipoprotéines)

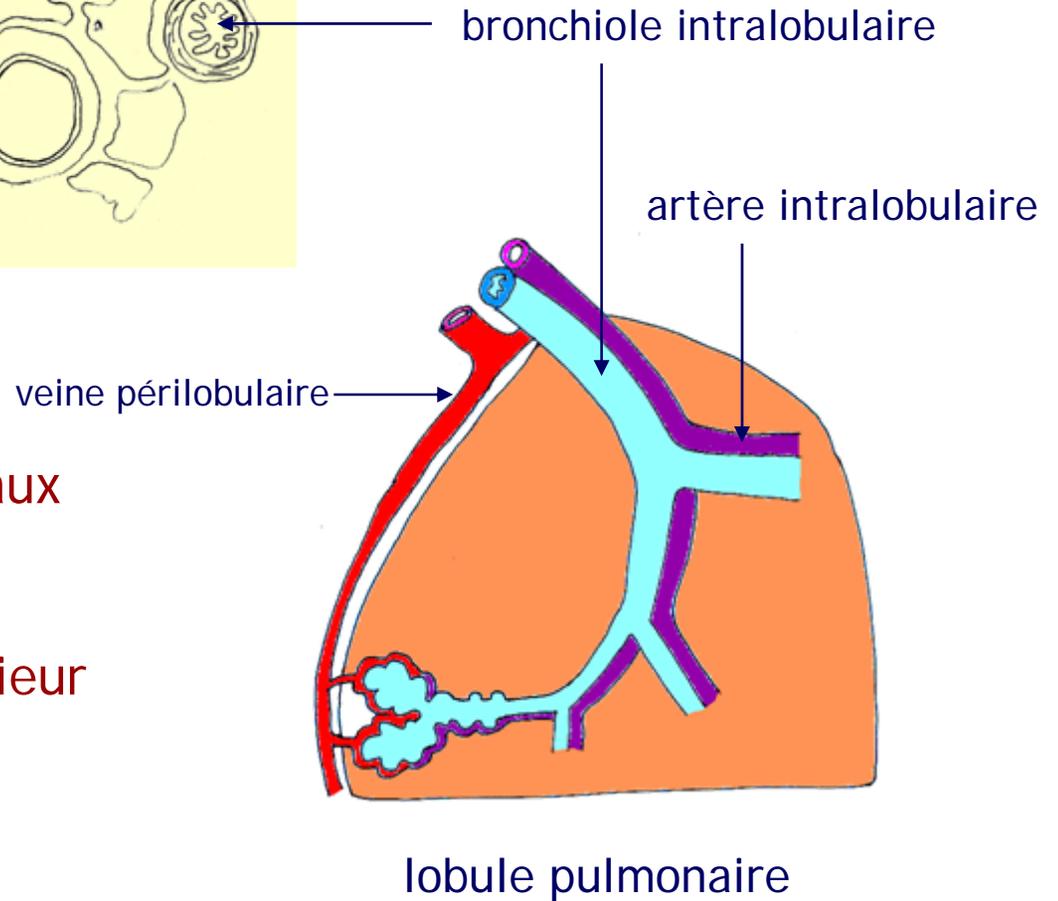
• macrophages

• pneumocytes de type I :
échanges gazeux
rapport surface pulmonaire / surfactant

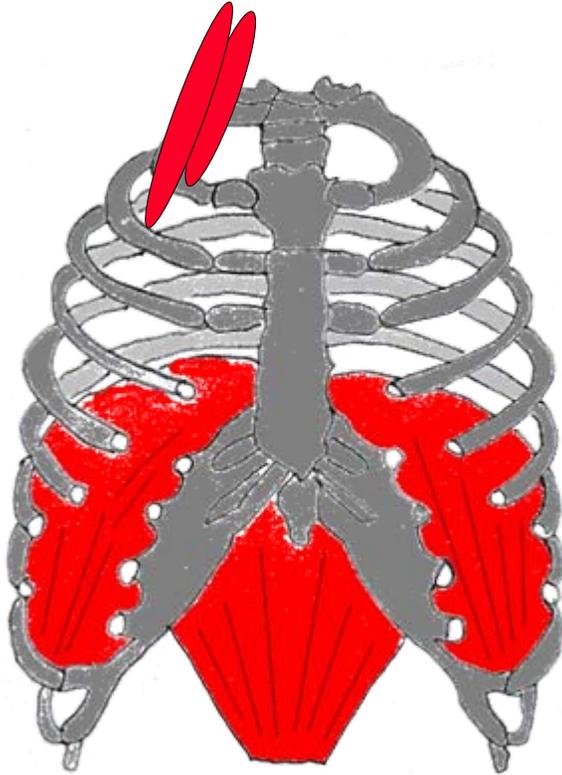


◆ les artères suivent les ramifications des bronches à l'intérieur des lobules jusqu'aux alvéoles.

◆ les veines passent à l'extérieur des lobules, puis suivent les bronches extralobulaires



muscles inspiratoires



➔ Diaphragme

➔ Muscles intercostaux externes
entre les côtes

➔ muscles scalènes
entre 1^{res} et 2^{es} côtes et les vertèbres cervicales

➔ (+ muscles sternocléido-mastoidiens
*entre le sternum et les clavicules, et la
mastoïde, sur le crâne)*

muscles inspiratoires

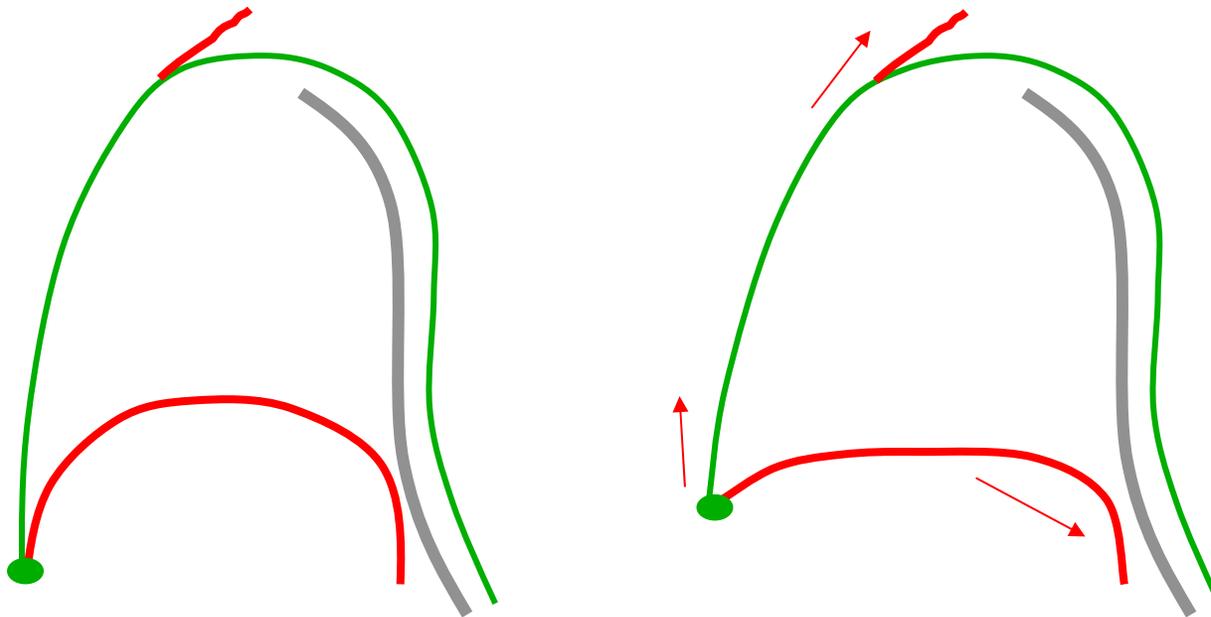
→ Le diaphragme : contraction à l'inspiration

L'inspiration est toujours active : contraction des muscles inspiratoire

descente de la coupole diaphragmatique

augmentation du diamètre de la cage thoracique (partie inférieure)

diminution du diamètre de la cage thoracique dans sa partie supérieure



augmentation
de volume de
la cage
thoracique

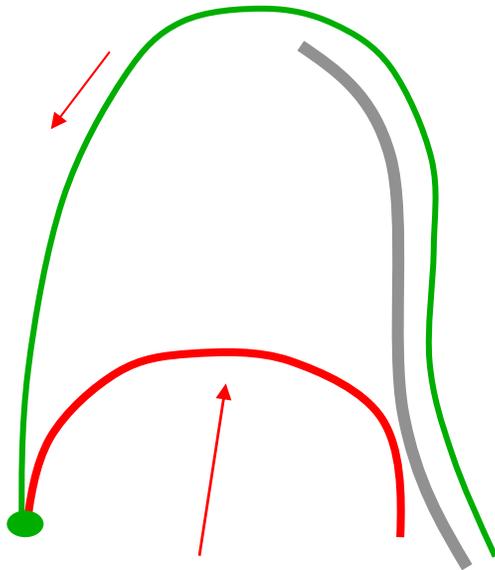
→ Muscles intercostaux externes, muscles scalènes

rigidification de la cage thoracique (partie supérieure)

muscles expiratoires

L'expiration normale est passive : relâchement des muscles inspiratoires

expiration forcée : contraction des muscles expiratoires

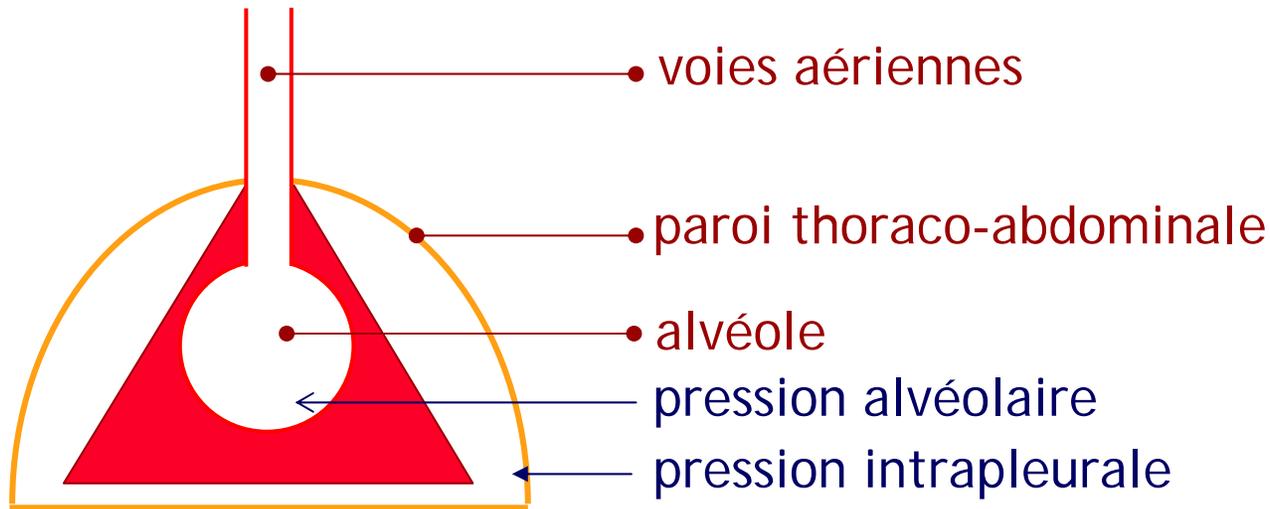


- ➔ Muscles de la paroi abdominale
- ➔ (+ muscles intercostaux internes)

diminution de
volume de la
cage
thoracique

pression, volume et débit

structure mécanique ventilatoire : structure qui, par ses propriétés et son fonctionnement, assure la ventilation

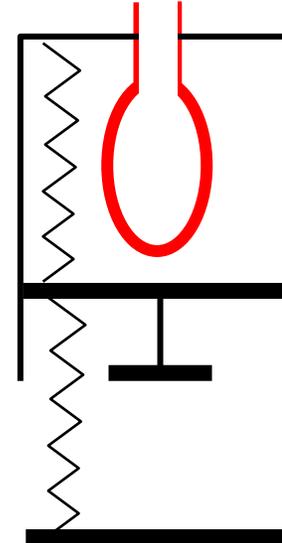
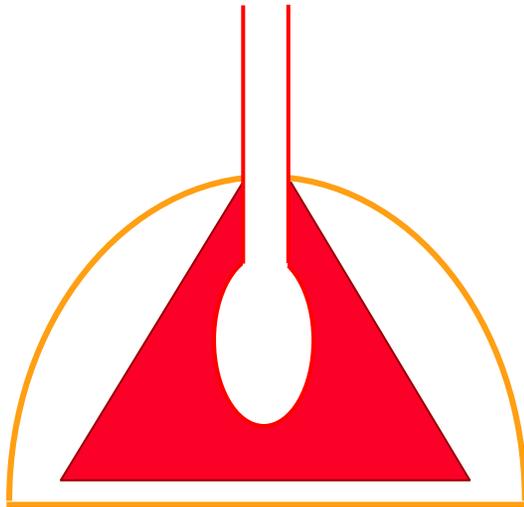


→ ensemble actif : muscles ventilatoires

→ ensemble passif : voies aériennes, poumon, paroi thoraco-abdominale

pression, volume et débit

schéma mécanique fonctionnel : ballon élastique dans un piston

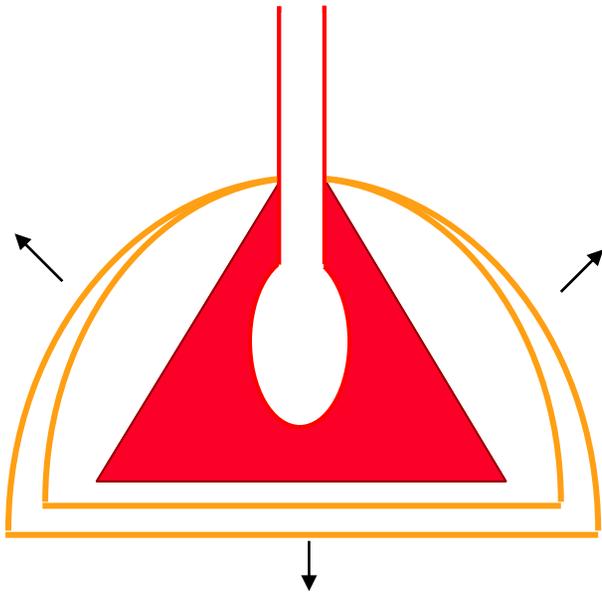


au repos :

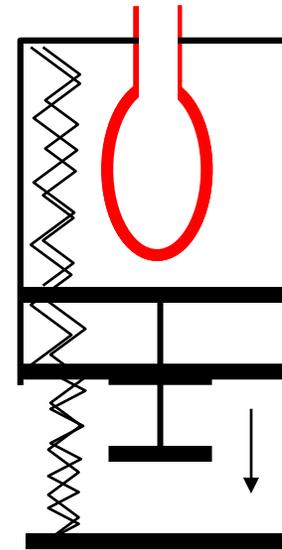
équilibre des forces élastiques (ballon et ressorts)
pression dans le piston négative

pression, volume et débit

schéma mécanique fonctionnel : ballon élastique dans un piston



action du système actif : on tire le piston
→ augmentation du volume du piston
→ diminution de pression dans le piston



$$P \times V = \text{constante}$$

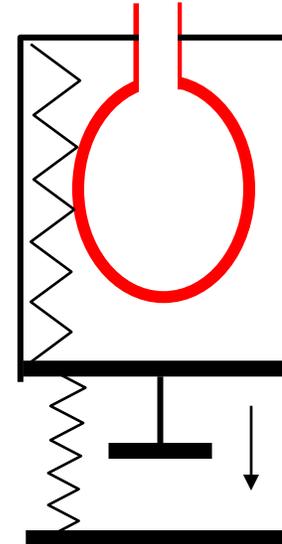
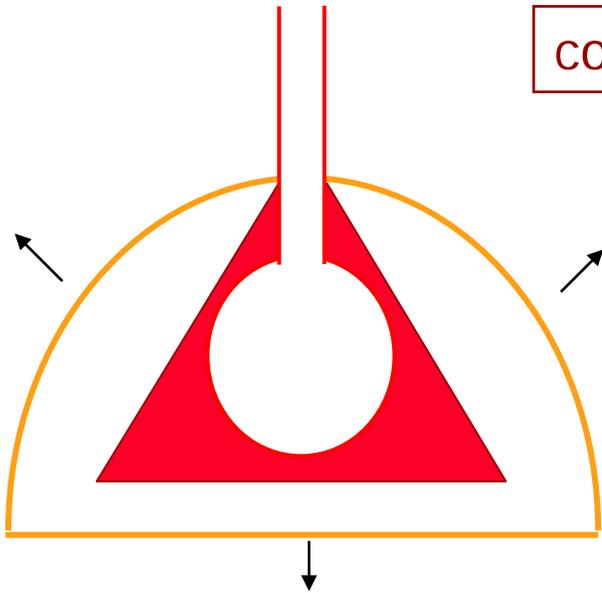
pression, volume et débit

schéma mécanique fonctionnel : ballon élastique dans un piston

relation entre ΔV et ΔP : compliance

$$\text{compliance} : \Delta V / \Delta P$$

élastance = 1/
compliance



action du système actif : on tire le piston

→ augmentation du volume du piston

→ diminution de pression dans le piston

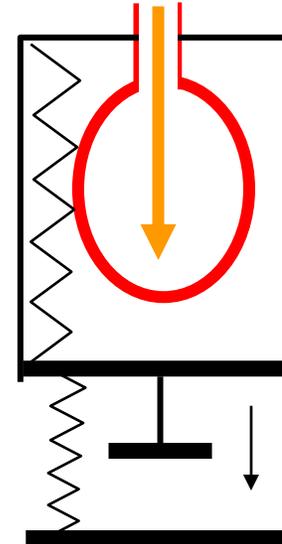
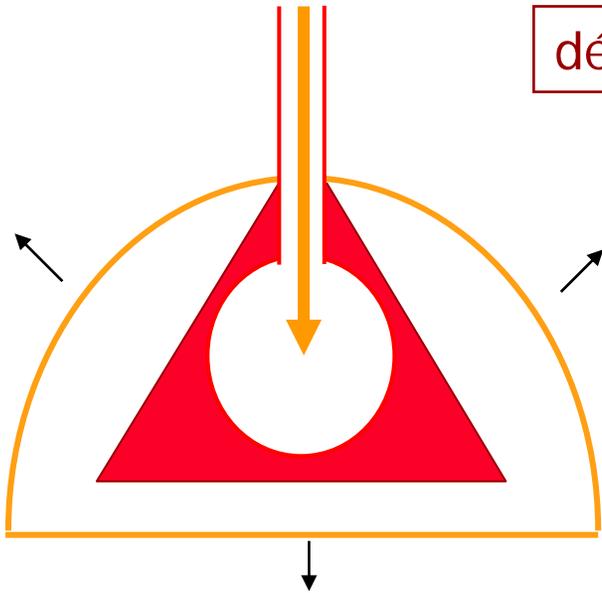
→ augmentation du volume du ballon élastique

pression, volume et débit

schéma mécanique fonctionnel : ballon élastique dans un piston

relation entre ΔP et débit : résistance

$$\text{débit} = \Delta P / \text{résistance}$$



action du système actif : on tire le piston

→ augmentation du volume du piston

→ diminution de pression dans le piston

→ augmentation du volume du ballon élastique

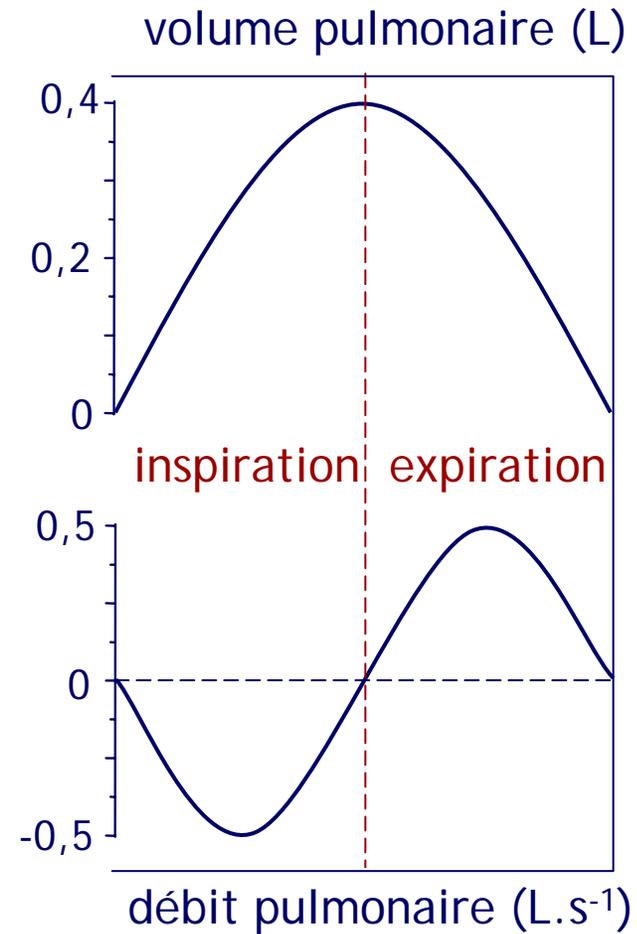
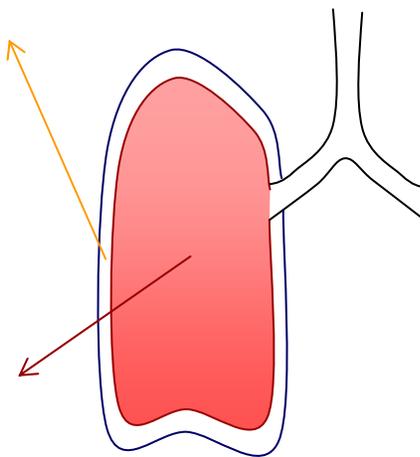
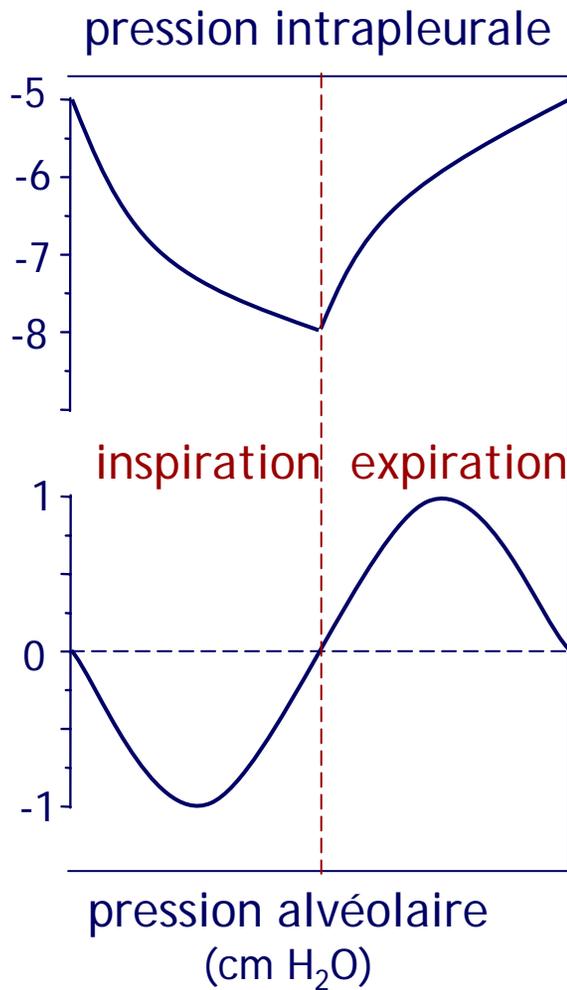
→ diminution de pression dans le ballon

→ entrée d'air dans le ballon

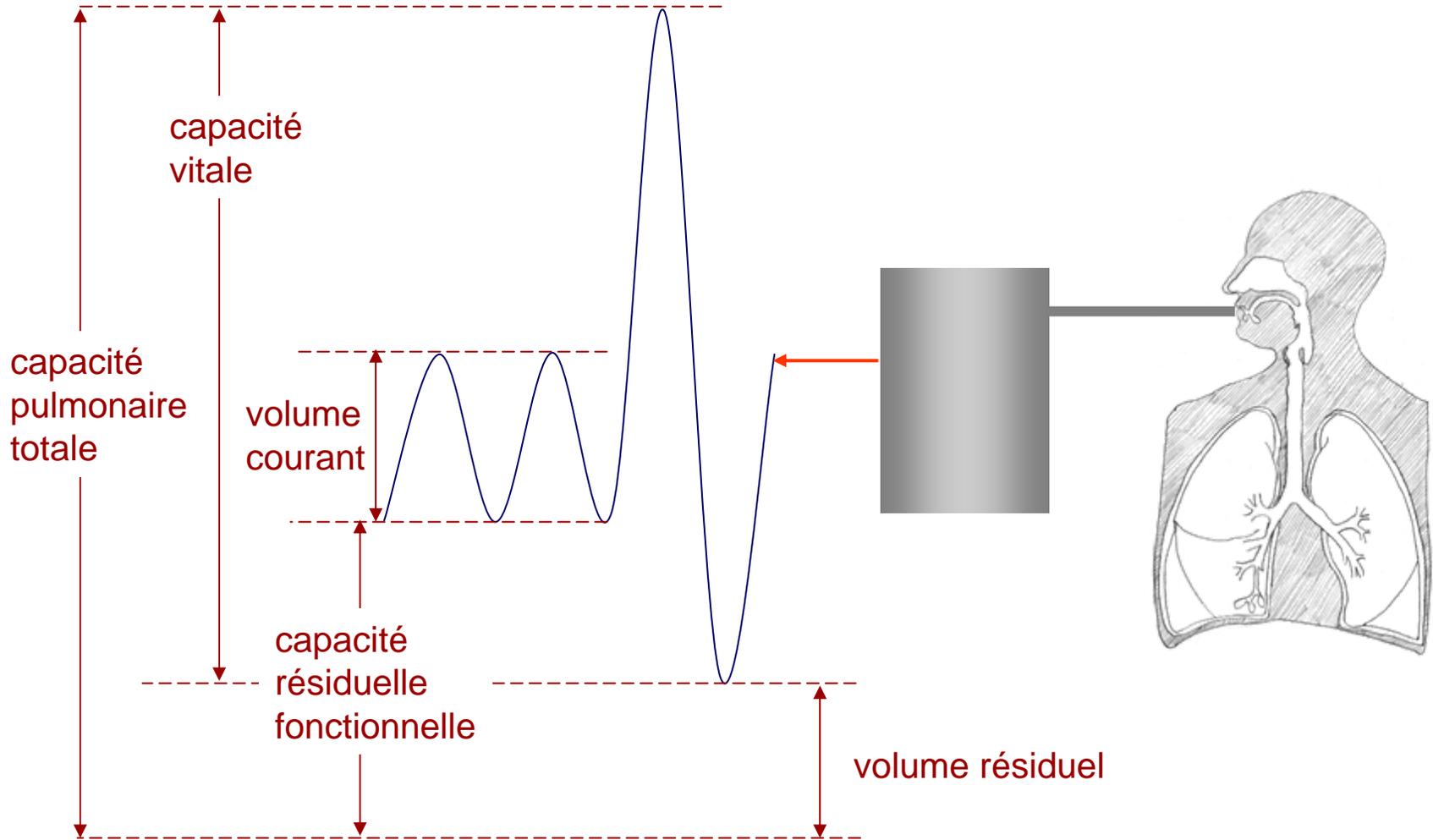
la ventilation

mécanique ventilatoire

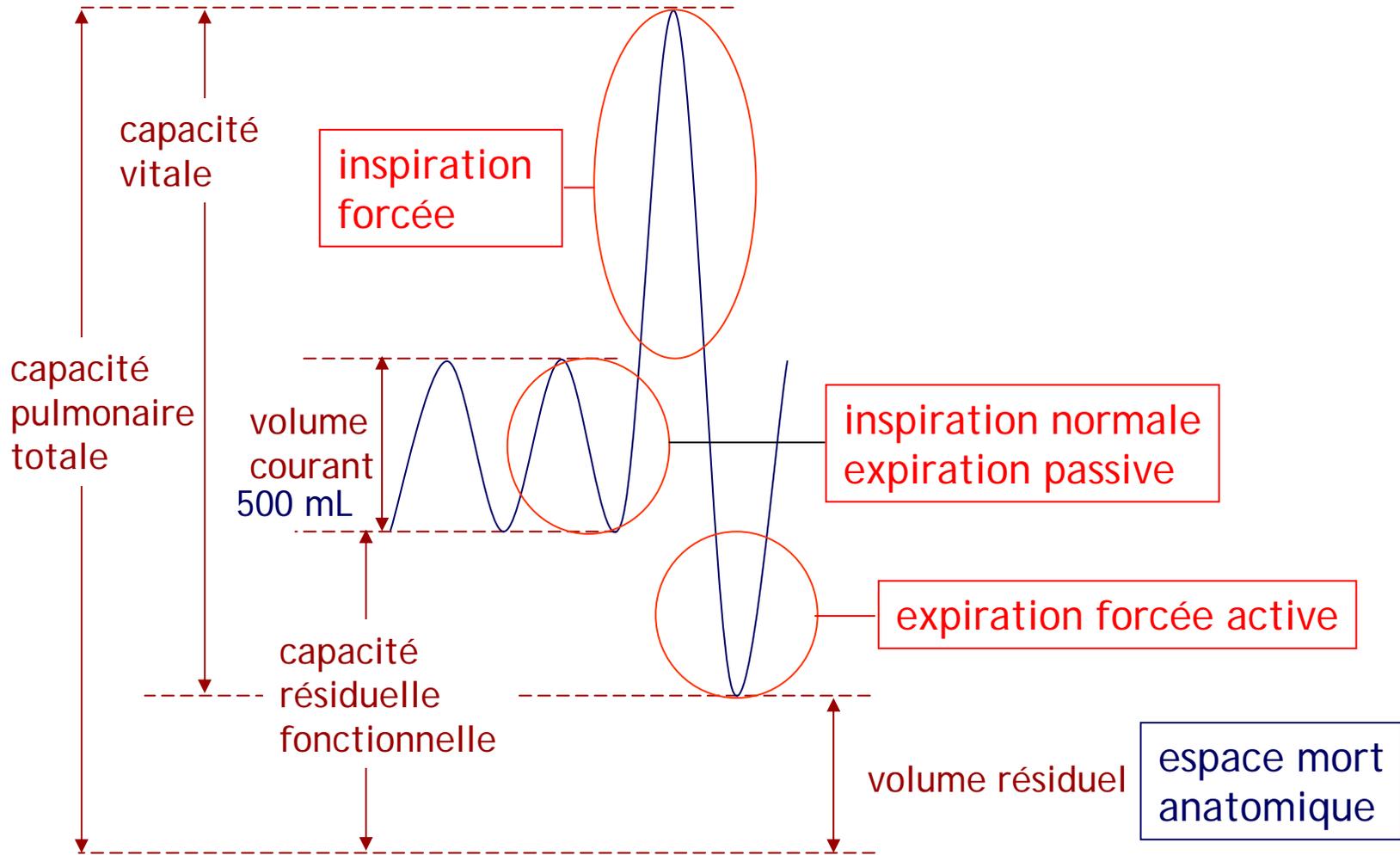
pression, volume et débit



les volumes respiratoires



les volumes respiratoires



compliance

distensibilité : capacité du poumon à augmenter de volume lors de variation de pression

compliance : mesure de la variation de volume en fonction de la variation de pression

compliance pulmonaire statique = $V_{\text{poumon}} / \text{pression de distension}$
(à la fin de l'inspiration)

valeur normale : 200 mL / cm H₂O

compliance statique ; compliance dynamique

élastance = 1/compliance

élastance pulmonaire

élastance de la paroi thoraco-abdominale

élastance totale

résistance

résistance des voies aériennes

$$\text{débit} = \frac{\Delta P}{R}$$

cause des résistances :

- Diamètre de débit
- Types d'écoulement :
laminaire ou turbulent

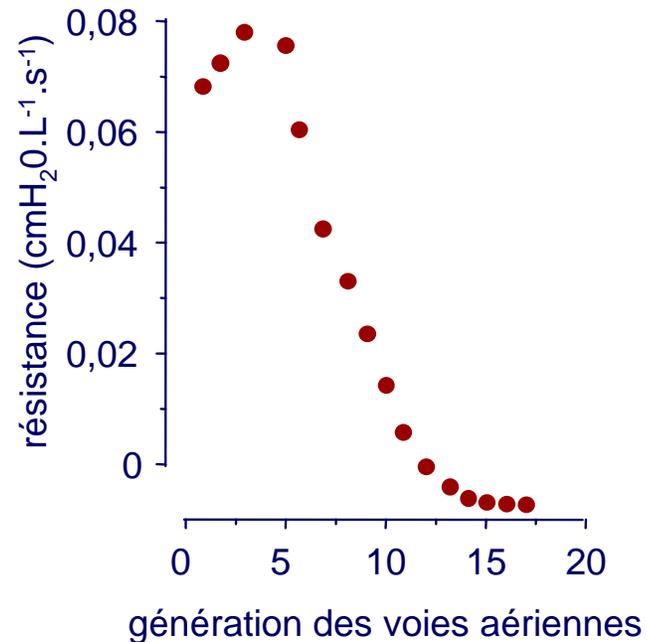
sièges des résistances

$$R = \frac{8\eta L}{r^4} \quad (\text{flux laminaire})$$

η : viscosité

L : longueur

r : rayon



ventilation, compliance et résistance

la ventilation dépend :

→ de l'activité des muscles respiratoires

→ de la compliance du système respiratoire

perte d'élasticité : maladies restrictives

alvéolites, fibroses

→ des résistances des voies aériennes

augmentation des résistances : maladies obstructives

asthme, mucoviscidose, bronchopathies obstructives chroniques

composition gazeuse de l'air en %

<i>composant</i>	<i>%</i>
O ₂	20,95
CO ₂	0,05
N ₂	78,09
Argon	0,93

pression partielle en O₂ = fraction d'O₂ x pression en air

pression atmosphérique au niveau de la mer : 760 mm Hg (101,3 kPa)

pression partielle en O₂ ?

composition gazeuse de l'air en %

<i>composant</i>	<i>%</i>
O ₂	20,95
CO ₂	0,05
N ₂	78,09
Argon	0,93

pression partielle en vapeur d'eau

<i>température</i>	<i>pression de vapeur saturante</i>
0°C	4,6 mmHg
37°C	47 mmHg

notion d'humidité relative

pression partielle en vapeur d'eau

pression de vapeur saturante : pression partielle maximale en vapeur d'eau

humidité relative : rapport entre la pression partielle et la pression de vapeur saturante

la pression de vapeur saturante augmente avec la température

composition gazeuse de l'air en %

<i>composant</i>	<i>%</i>
O ₂	20,95
CO ₂	0,05
N ₂	78,09
Argon	0,93

pression partielle en vapeur d'eau

<i>température</i>	<i>pression de vapeur saturante</i>
0°C	4,6 mmHg
37°C	47 mmHg

pression partielle en vapeur d'eau et pression partielle en O₂ dans l'air inhalé

Dans un poumon humain :

pression de vapeur d'eau = pression de vapeur saturante à 37°C = 47 mmHg

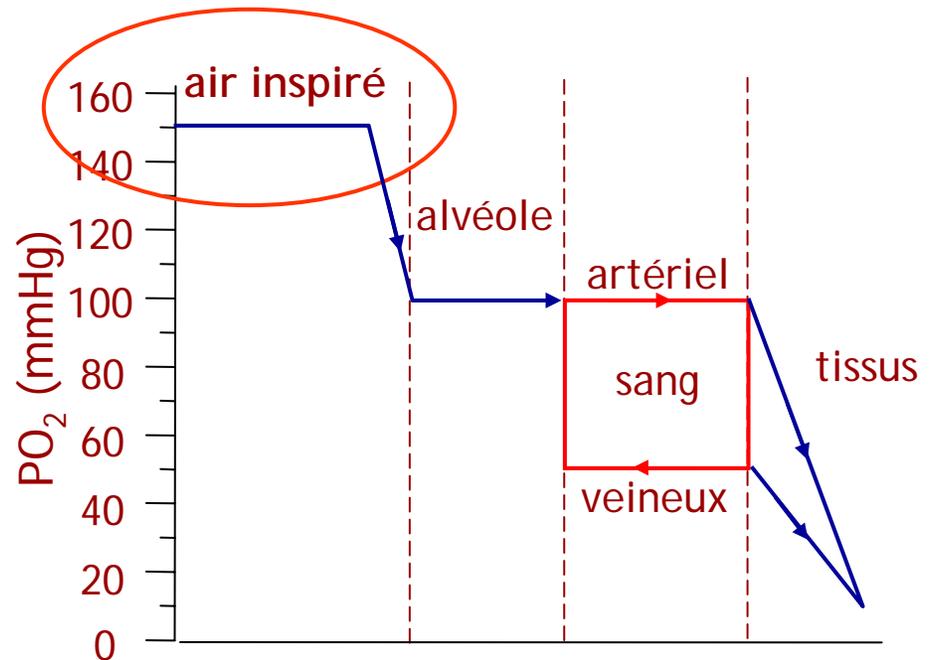
La pression de l'air sec est de 760 - 47 = 713 mmHg.

L'air sec contenant 21% de dioxygène, la PIO₂ (PO₂ dans l'air inhalé) est de :

$$PIO_2 = 20,95 \% \times 713 \text{ mmHg} = 150 \text{ mmHg}$$

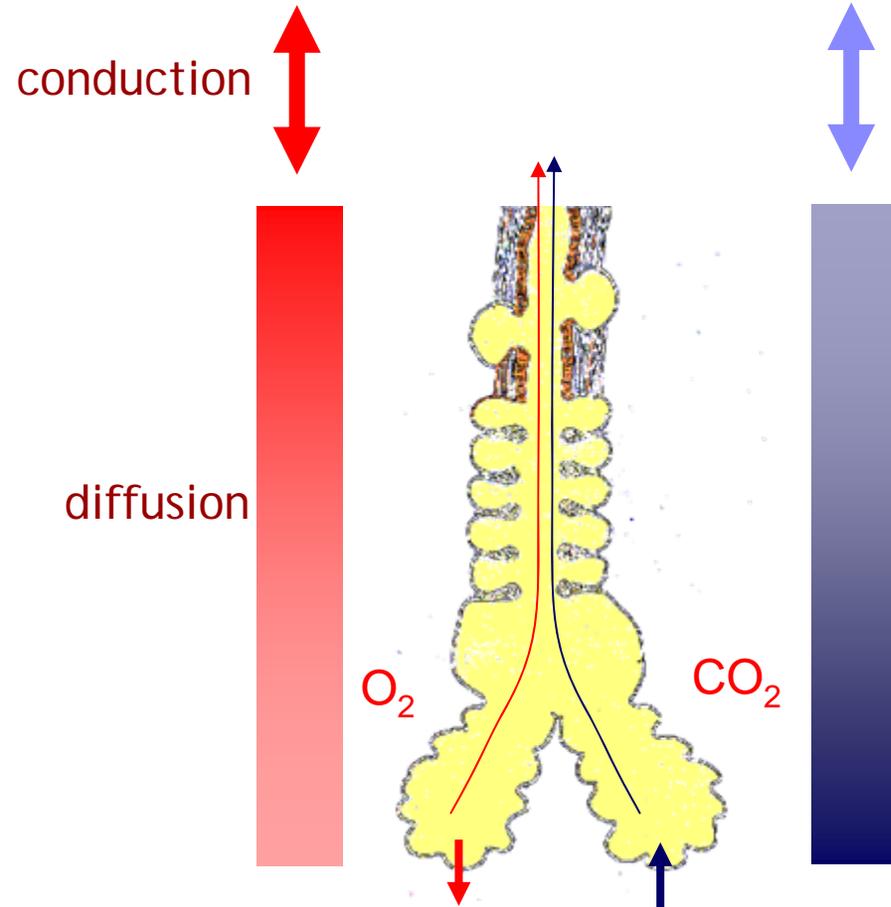
composition gazeuse de l'air en %

composant	%
O ₂	20,95
CO ₂	0,05
N ₂	78,09
Argon	0,93



diffusion de l'O₂ dans l'organisme : cascade de pression décroissante entre les différents compartiments

diffusion alvéolaire



fraction	O ₂	CO ₂
gaz inspiré	0,21	0
gaz expiré	0,175	0,035
gaz alvéolaire	0,14	0,055

pression (mm Hg)	O ₂	CO ₂
gaz inspiré	150	0
gaz alvéolaire	100	40

déplacement des gaz par diffusion
gradient de pression partielle en O₂ et en CO₂

l'équation de l'air alvéolaire

gaz alvéolaire : $P_A N_2$ $P_A O_2$ $P_A CO_2$

$P_A CO_2$: ne dépend pas de l'air inspiré
dépend de la production de CO_2

$$P_A CO_2 = (\dot{V}CO_2 / \dot{V}_A)K$$

K : constante

$\dot{V}CO_2$: débit de CO_2 produit

\dot{V}_A : débit alvéolaire

$$P_A CO_2 = 40 \text{ mmHg}$$

l'équation de l'air alvéolaire

$$P_A\text{CO}_2 = (\dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}_A)K$$

K : constante $\dot{V}\text{CO}_2$: débit de CO_2 produit \dot{V}_A : débit alvéolaire

la production de CO_2 et la consommation d' O_2 sont liées

$$\dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}\text{O}_2 = \text{quotient respiratoire } R$$

R dépend du type d'aliments métabolisés par les tissus périphériques
si $R < 1 \rightarrow$ volume expiré < volume inspiré

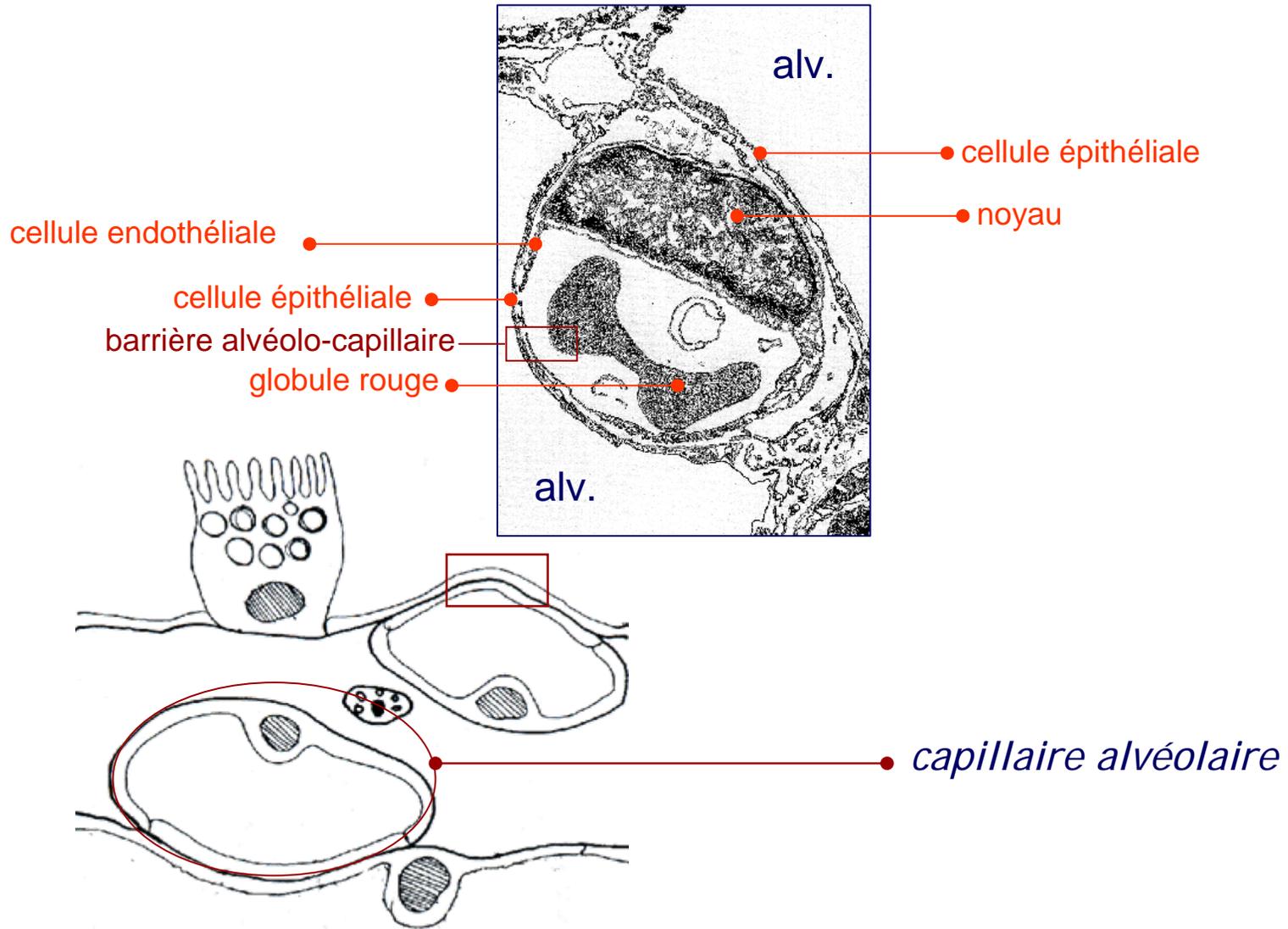
$$\text{PAO}_2 = (\text{PIO}_2 - (\text{PACO}_2/R) + F$$

R : quotient respiratoire F : constante (F = 0 si R = 1)

$$P_A\text{O}_2 = 100 \text{ mmHg}$$

les échanges gazeux

la diffusion alvéolo-capillaire



principes physiques

- passage de la barrière alvéolo-capillaire
- échange entre milieux gazeux et liquide

◆ diffusion à travers une paroi : Loi de Fick

$$dV/dt = (S/E) \times D(P1-P2)$$

D : coefficient de diffusion
proportionnel à la solubilité du gaz
inversement proportionnel à la racine carrée de son PM

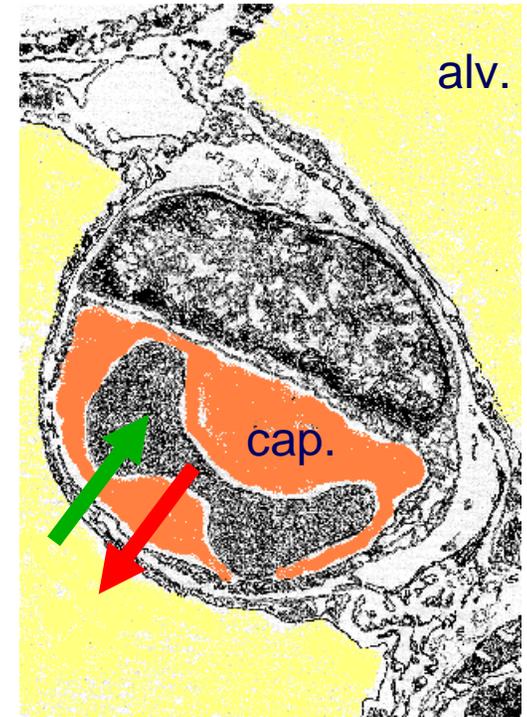
définition de la capacité de diffusion D_L :

$$D_L = (S/E) \times D$$

$$dV/dt = D_L(P1-P2)$$

◆ solubilité d'un gaz dans un liquide : Loi de Henry

$$C_{\text{gaz}} = \text{Sol}_{\text{gaz}} \times P_{\text{gaz}}$$



dioxygène

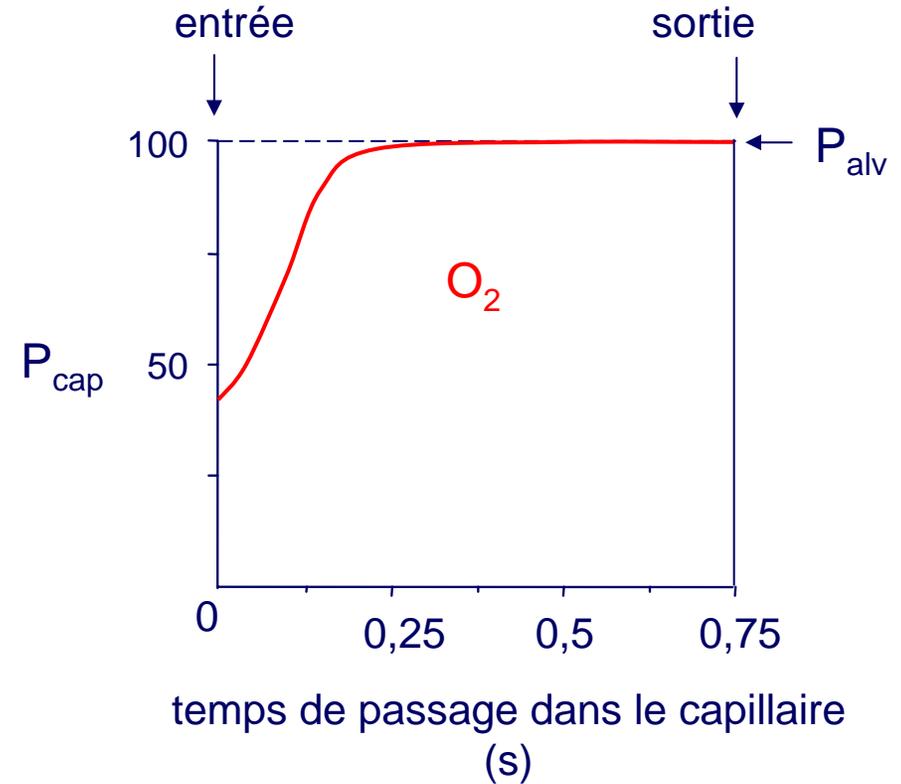
$$P_{Alv} = 100 \text{ mm Hg}$$

$$P_{veineux} = 40 \text{ mm Hg}$$

$$P_1 - P_2 = 60 \text{ mm Hg}$$

transfert limité par la perfusion

réserve de diffusion (effort)



les échanges gazeux

la diffusion alvéolo-capillaire

dioxyde de carbone

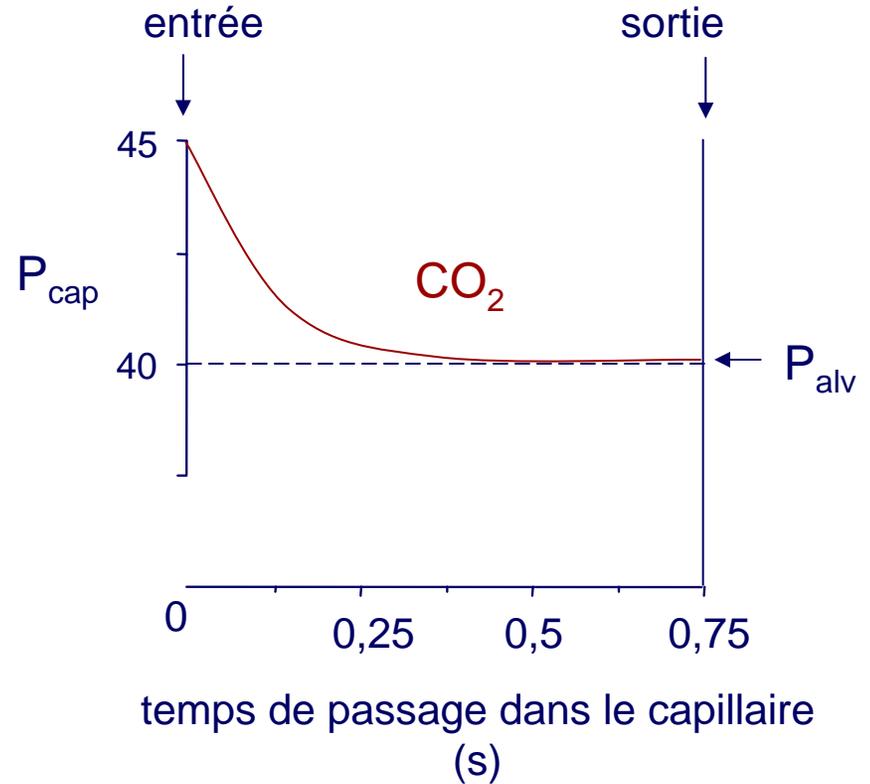
$$P_{Alv} = 40 \text{ mm Hg}$$

$$P_{veineux} = 45 \text{ mm Hg}$$

$$P_1 - P_2 = -5 \text{ mm Hg}$$

limitation par la perfusion

limitation possible par la diffusion si barrière alvéolo-capillaire épaissie



composition gazeuse du sang artériel et veineux

dioxygène

$$PAO_2 = 100 \text{ mm Hg}$$

$$PaO_2 = 100 \text{ mm Hg}$$

$$PvO_2 = 40 \text{ mm Hg}$$

dioxyde de carbone

$$PACO_2 = 40 \text{ mm Hg}$$

$$PaCO_2 = 40 \text{ mm Hg}$$

$$PvCO_2 = 45 \text{ mm Hg}$$

A : alvéole

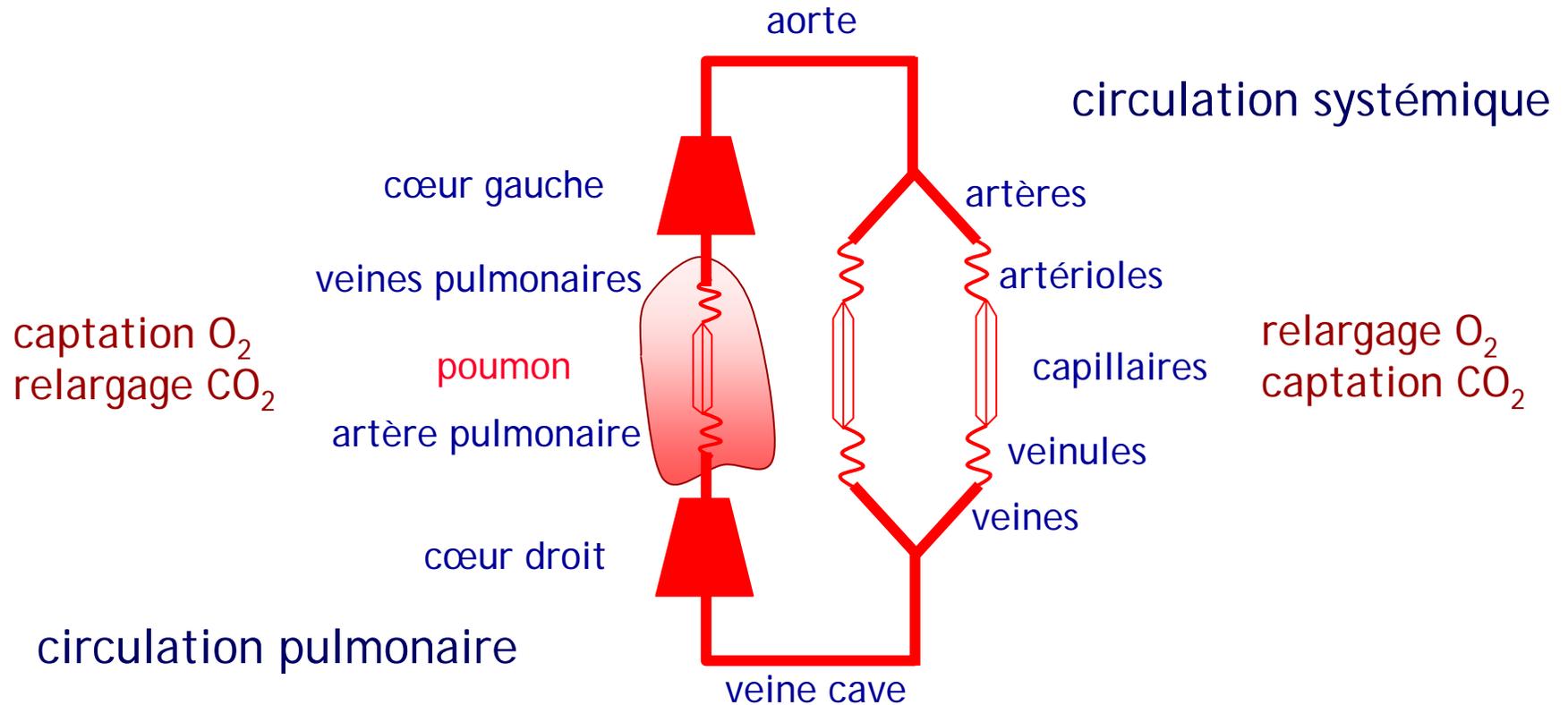
a : artère

v: veine

la perfusion

organisation du système circulatoire

schéma fonctionnel général

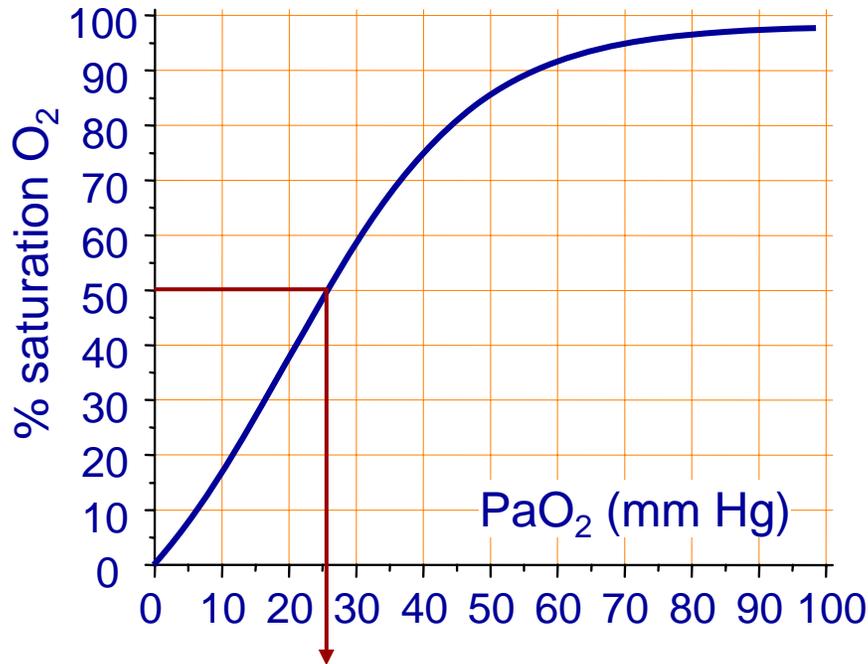


la perfusion

transport des gaz dans le sang

dioxygène

hémoglobine : la courbe de dissociation de l'O₂



capacité de fixation d'O₂ =
pouvoir oxyphorique

capacité maximale de fixation :
environ 1,39 ml d'O₂ par g d'Hb

P₅₀ : pression pour laquelle le
degré de saturation est de 0,5
(50 %)

P₅₀

quantité de dioxygène dans le sang : dissous + lié à Hb

$$\text{Concentration O}_2 \text{ (ml/L}_{\text{sang}}) = (1,39 \times \text{Hb} \times \text{Sat}) + 0,03 \text{ PO}_2$$

Hb : concentration en hémoglobine (g/L)

Sat : degré de saturation

valeur physiologique artérielle : 208 mL + 3 mL = 211 mL O₂/L sang

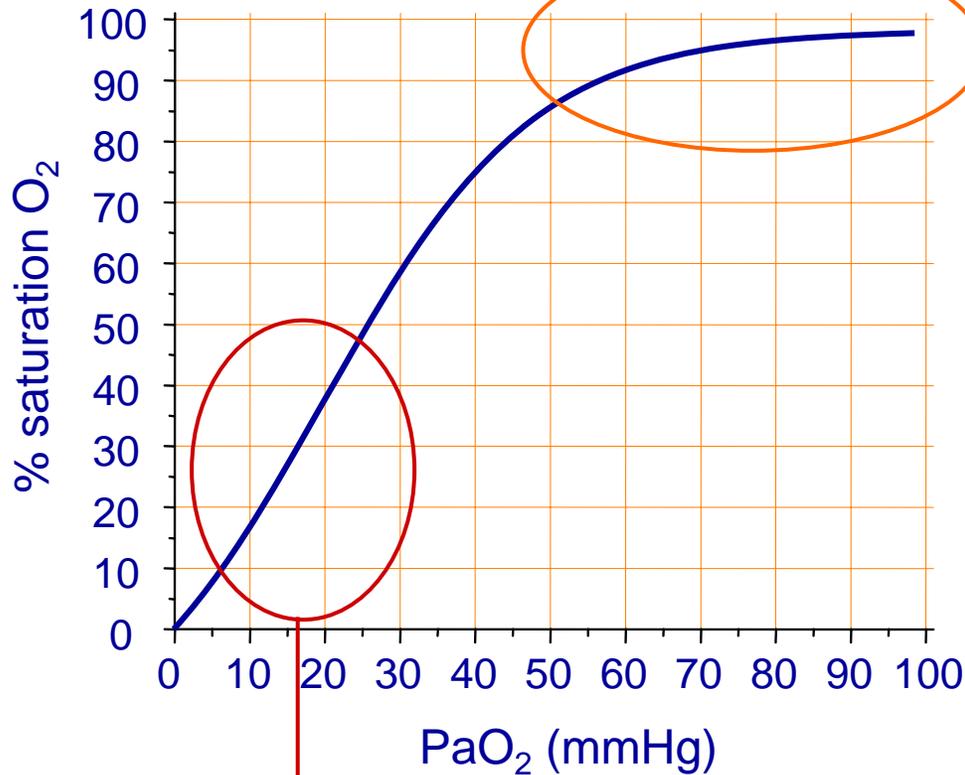
la perfusion

transport des gaz dans le sang

dioxygène

hémoglobine et gradient de PO_2

captation au niveau pulmonaire



relargage au niveau tissulaire

$$\text{Concentration } O_2 \text{ (ml/100ml sg)} = (1,39 \times \text{Hb} \times \text{Sat}) + 0,003 PO_2$$

$[O_2]$ artérielle : 211 mL/L

$[O_2]$ veineuse : 158 mL/L

$[O_2]$ délivrée aux tissus : 53 mL/L

débit cardiaque au repos : 5 L.min⁻¹

débit d' O_2 aux tissus : 265 mL.min⁻¹

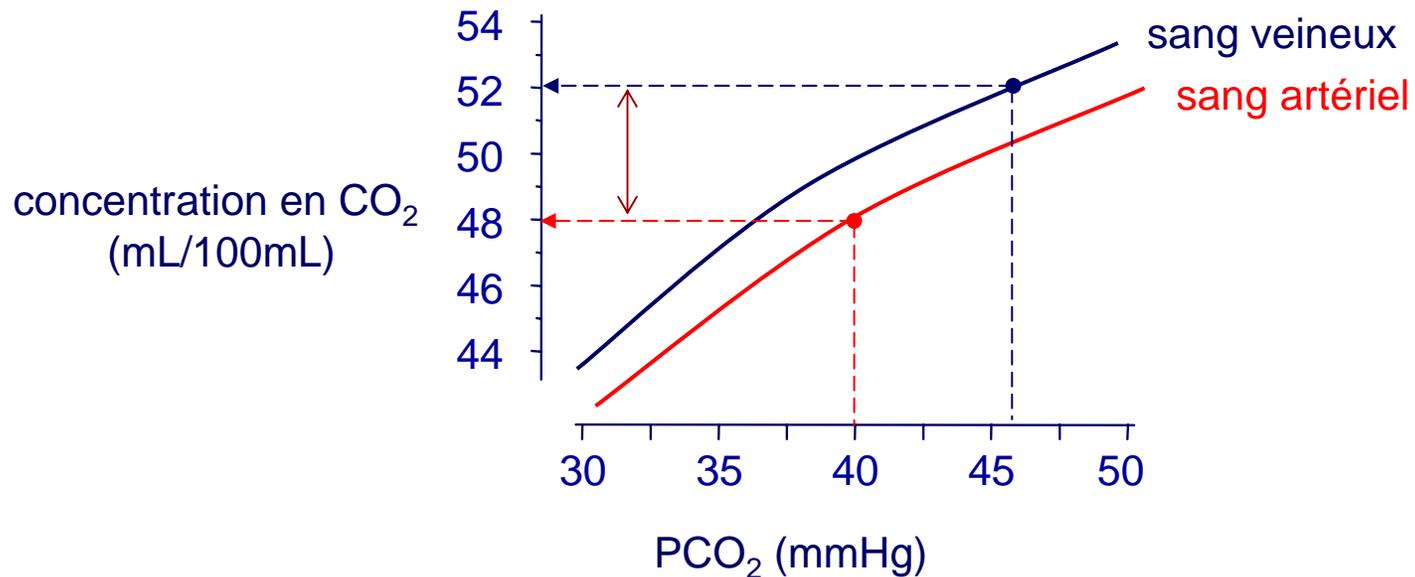
la perfusion

transport des gaz dans le sang

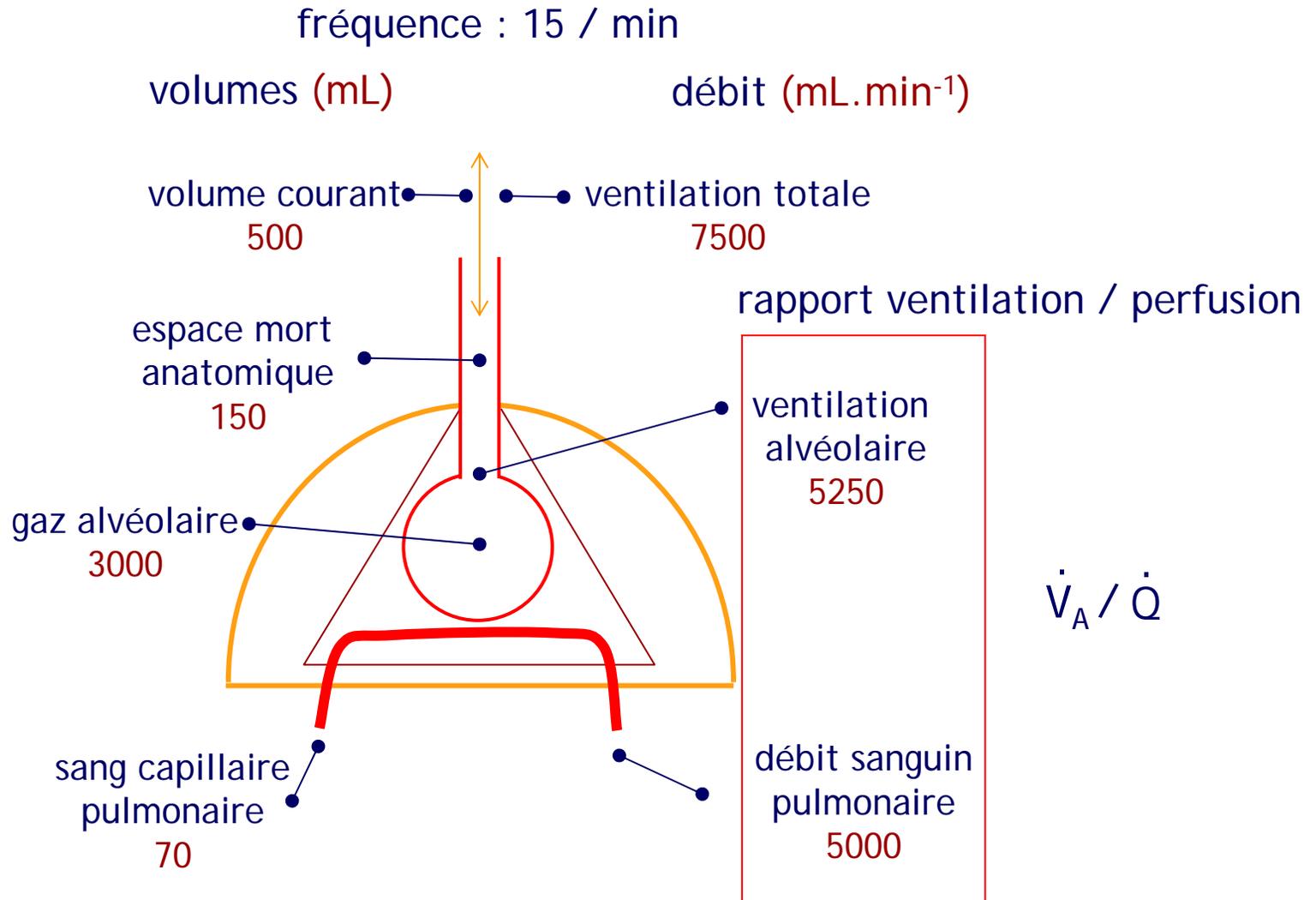
dioxyde de carbone

transporté sous 3 formes : dissous ; bicarbonates ; composés carbaminés

composés carbaminés (liaison avec protéines)



plus grande affinité pour l'hémoglobine réduite que pour l'oxyhémoglobine



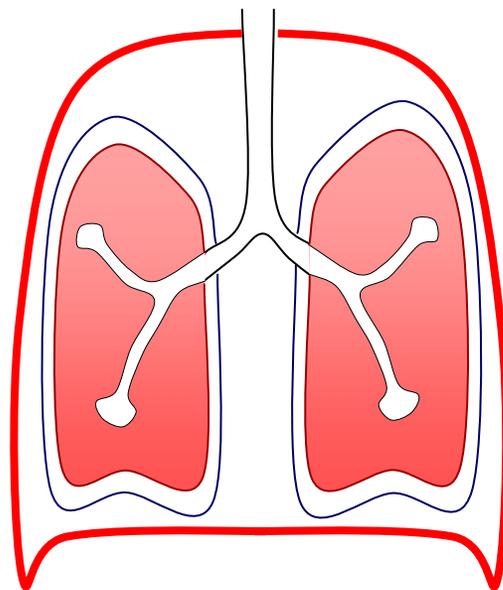
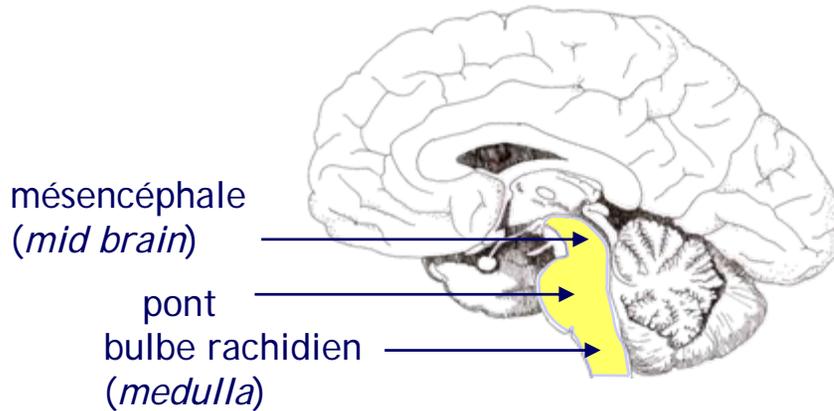
ventilation trop faible :

diminution de la PO_2 (hypoxie)
diminution de la concentration sanguine en O_2
augmentation de la PCO_2 ; diminution du pH
hypercapnie ; acidose)

ventilation trop forte :

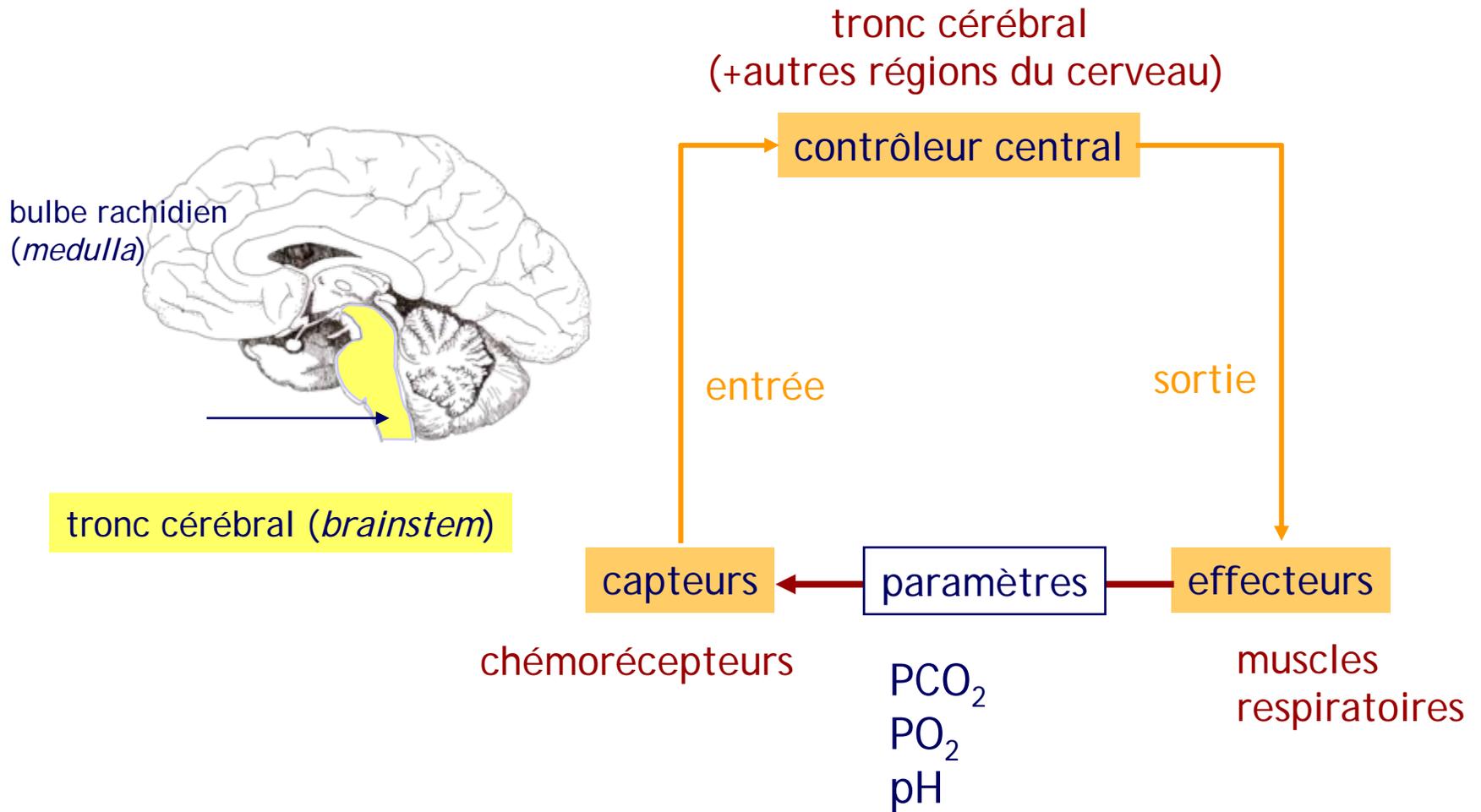
augmentation de la PO_2 (hyperoxie)
peu d'effet sur la concentration sanguine en O_2
diminution de la PCO_2 ; augmentation du pH
hypocapnie ; alcalose)

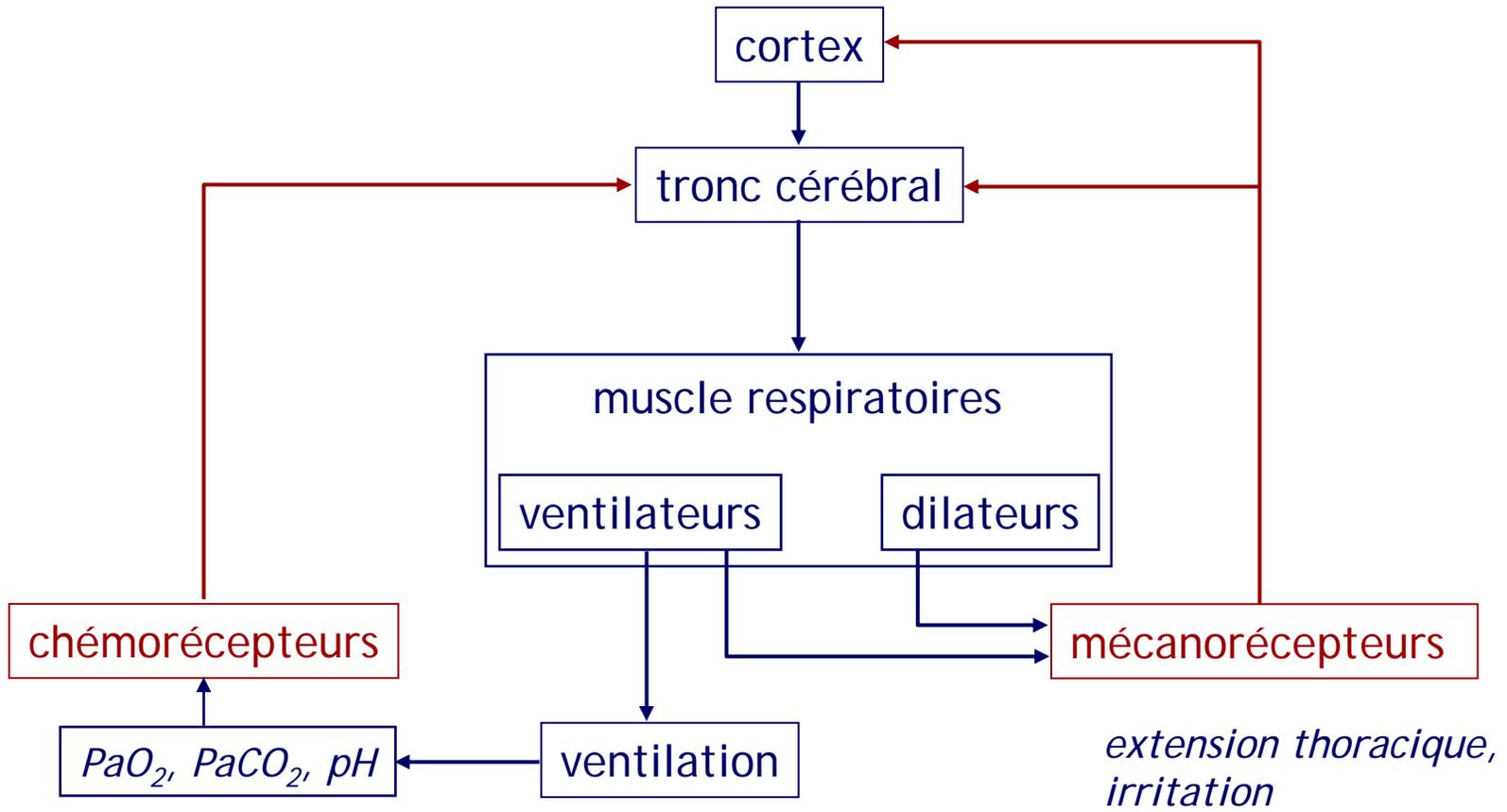
tronc cérébral (*brainstem*)



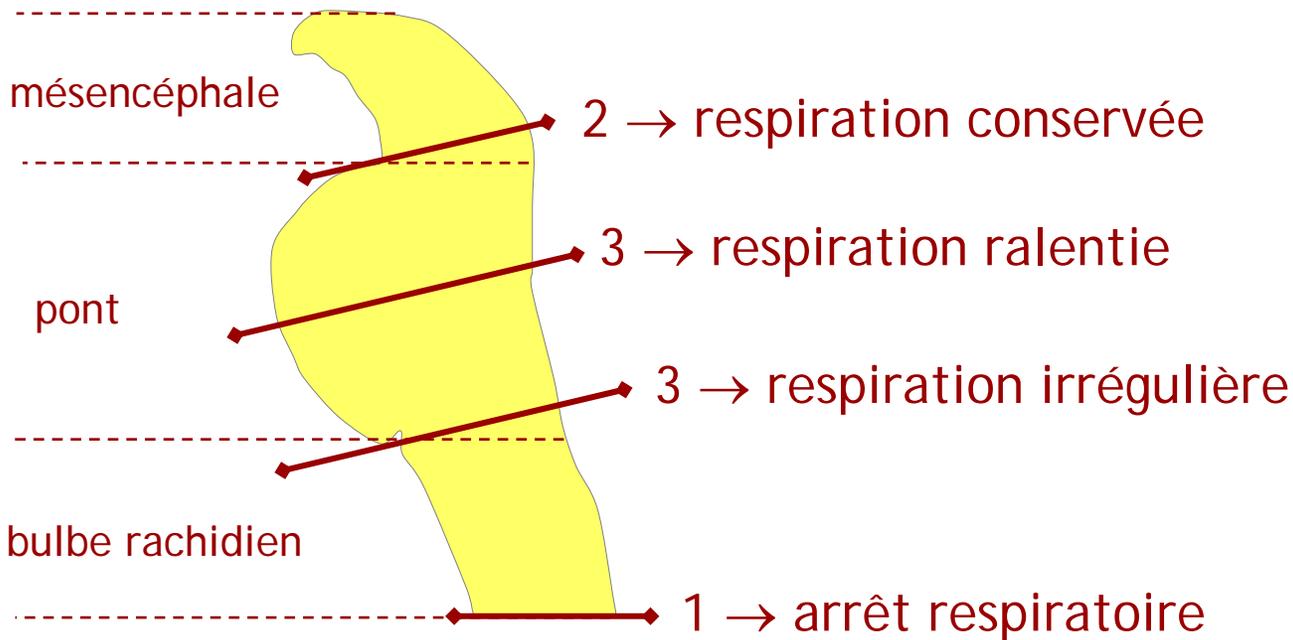
contrôle de la ventilation :
tronc cérébral
(+autres régions du cerveau)

ventilation
*variation de volume de la cavité
thoracique*
amplitude
fréquence





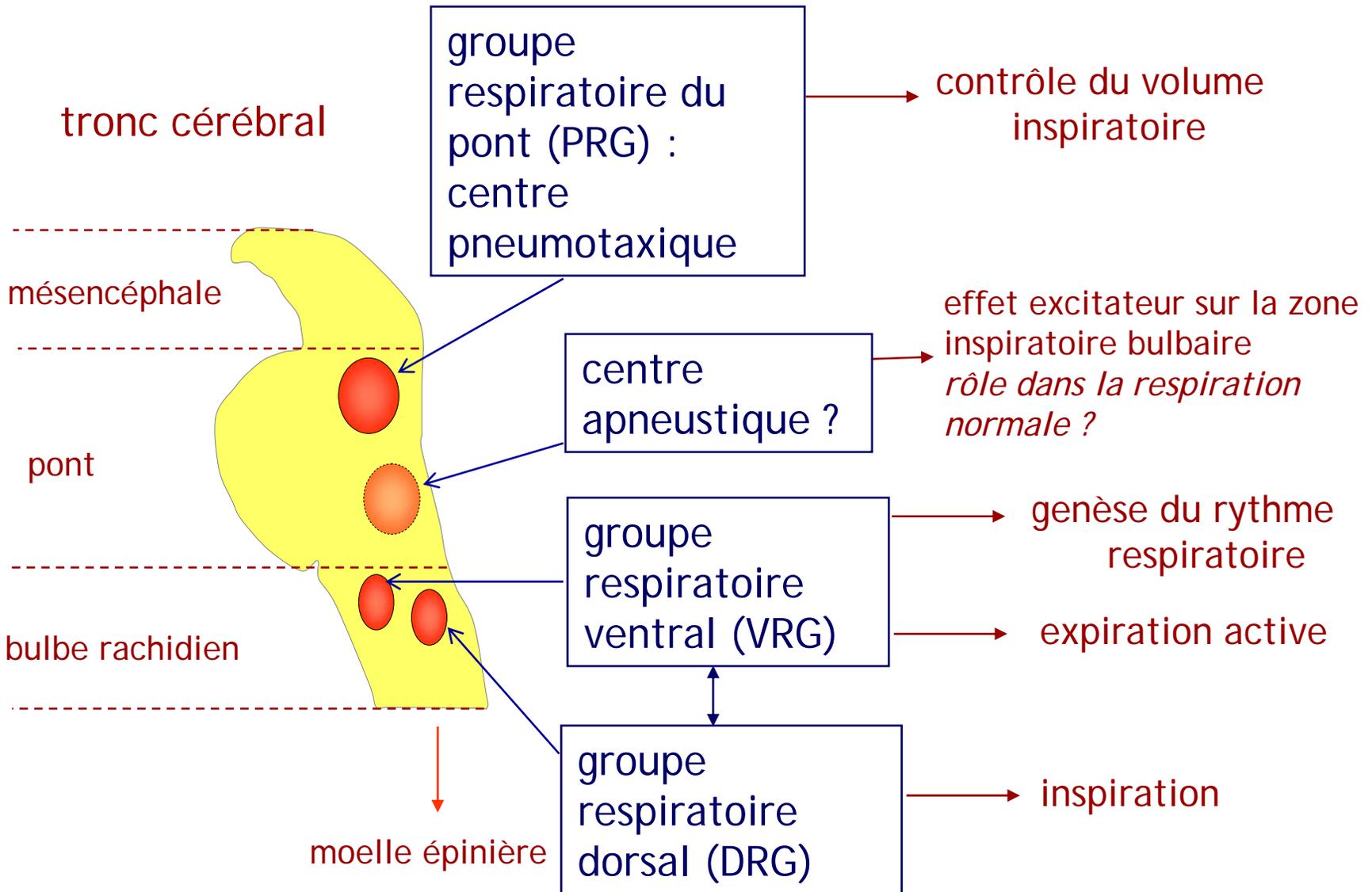
expériences de sections



➔ bulbe rachidien : génèse du rythme respiratoire

➔ pont : modulation du rythme respiratoire

contrôle bulbopontique



variables régulées	capteurs	effecteurs
PO_2	chémorécepteurs périphériques <i>(aorte, carotides)</i>	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PCO_2	chémorécepteurs périphériques <i>(aorte, carotides)</i>	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PCO_2	chémorécepteurs centraux <i>(tronc cérébral)</i>	ventilation

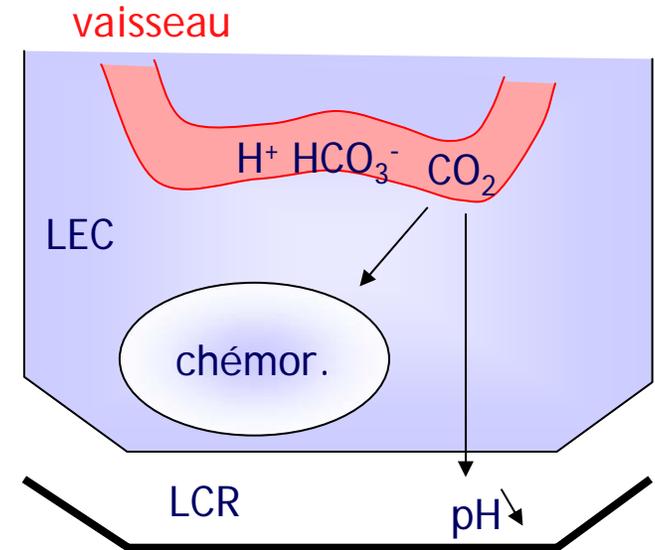
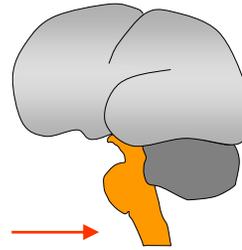
chémorécepteurs centraux

localisation

face ventrale du bulbe

effets

modulation de la ventilation



sensibilité et nature des capteurs

pH, pCO_2

CO_2 : passage dans le LCR → effet sur le pH du LCR → effet sur le pH du LEC

diminution pH ; augmentation PCO_2 → hyperventilation

augmentation pH ; diminution PCO_2 → hypoventilation

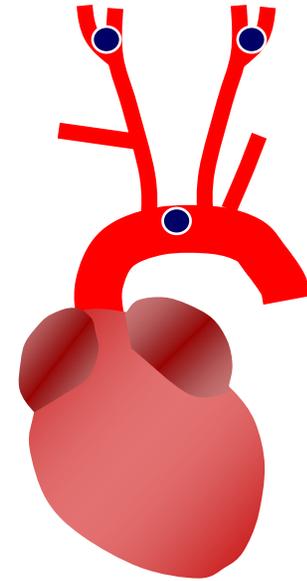
chémorécepteurs périphériques

corpuscules carotidiens (bifurcation artères carotides)

sensibles à PaO_2 , $[\text{O}_2]$, (PaCO_2)

corpuscules aortiques (crosse aortique)

sensibles à PaO_2 , $[\text{O}_2]$, (PaCO_2)



chémorécepteurs périphériques :

sensibilité à la PaCO_2 : moins grande que celle des récepteurs centraux

- ◆ récepteurs des voies aériennes
sensibilité : distension bronchique ; irritation bronchique
- ◆ récepteurs alvéolaires
sensibilité : dilatation des capillaires ; pression intersticielle
- ◆ récepteurs proprioceptifs de la paroi thoracique
sensibilité : variation de la paroi thoracique (muscle, tendon, articulation)