PHYSIOLOGIE DES GRANDES FONCTIONS

CHAPITRE III : Physiologie Respiratoire

PLAN DU CHAPITRE



1. Introduction;
2. Mécanique respiratoire;
3. Echanges gazeux pulmonaires;
4. Transport des gaz;
5. Contrôle de la respiration.

I- INTRODUCTION

- Métabolisme est synonyme de vie.
- Métabolisme aérobie: demande permanente en O_2 et une production continue de CO_2.
- Animaux inférieurs: faible distance à parcourir: simple diffusion des gaz respiratoires.
- Animaux supérieurs: énorme distance à parcourir: nécessité d'un appareil spécialisé (associé à l'ap. circulatoire). L'appareil respiratoire permet alors de:
  - Procurer l'O_2 aux cellules de l'organisme.
  - Eliminer le CO_2 produit.

Fonctions non respiratoires de l'ap. respiratoire

- Homéostasie du pH sanguin: les poumons contrôlent le pH sanguin en ajustant les quantités de CO_2 retenues ou éliminées.
- Protection contre les germes pathogènes inhalés: l'épithélium pulmonaire élimine et détruit les substances dangereuses avant leur entrée dans le corps.
- La vocalisation: l'air qui pénètre dans le voies aériennes crée des vibration au niveau des cordes vocales et qui sont utilisées pour la parole.

La respiration interne

- La respiration: échange de gaz entre l'atmosphère, le sang et les cellules.

Respiration cellulaire (interne): au niveau des mitochondries.

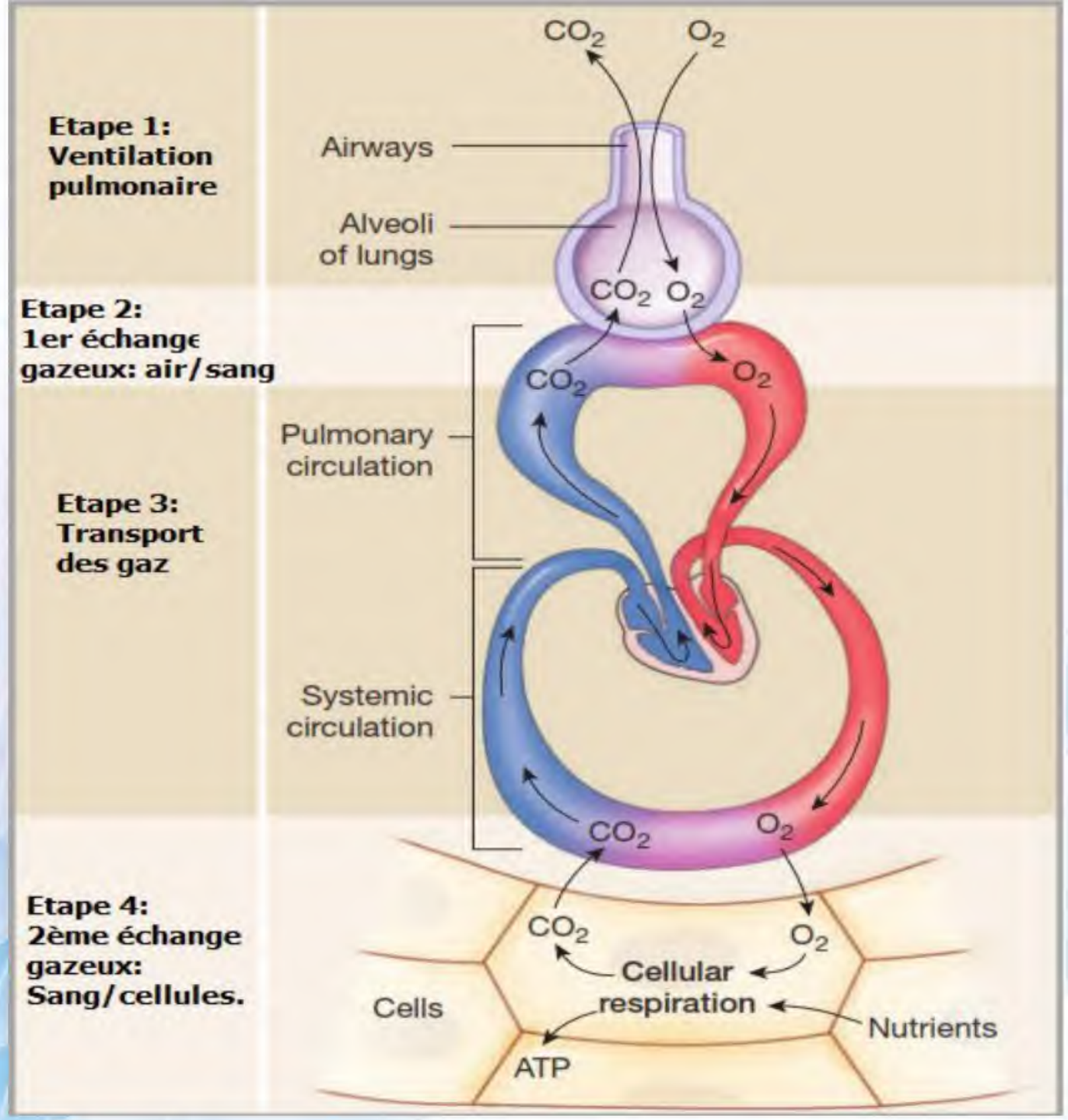
Ensemble des événements métaboliques intracellulaires qui consomment de l'O_2 et produisent le CO_2 lors de la production de l'énergie à partir des nutriments.

La respiration externe

Échange O_2/CO_2 entre l'atmosphère, le sang et les cellules de l'organismes.

1. Ventilation: alternance d'entrée et de sortie de l'air (échange d'air entre l'atmosphère et les alvéoles) dans les poumons.
2. Echanges gazeux (1): entre l'O_2 et le CO_2 entre le gaz alvéolaire et le sang.
3. Transport: l'O_2 et le CO_2 sont transportés par le sang circulant entre les poumons et les tissus.
4. Echanges gazeux (2): l'O_2 et le CO_2 sont échangés entre les capillaires et les cellules des tissus.

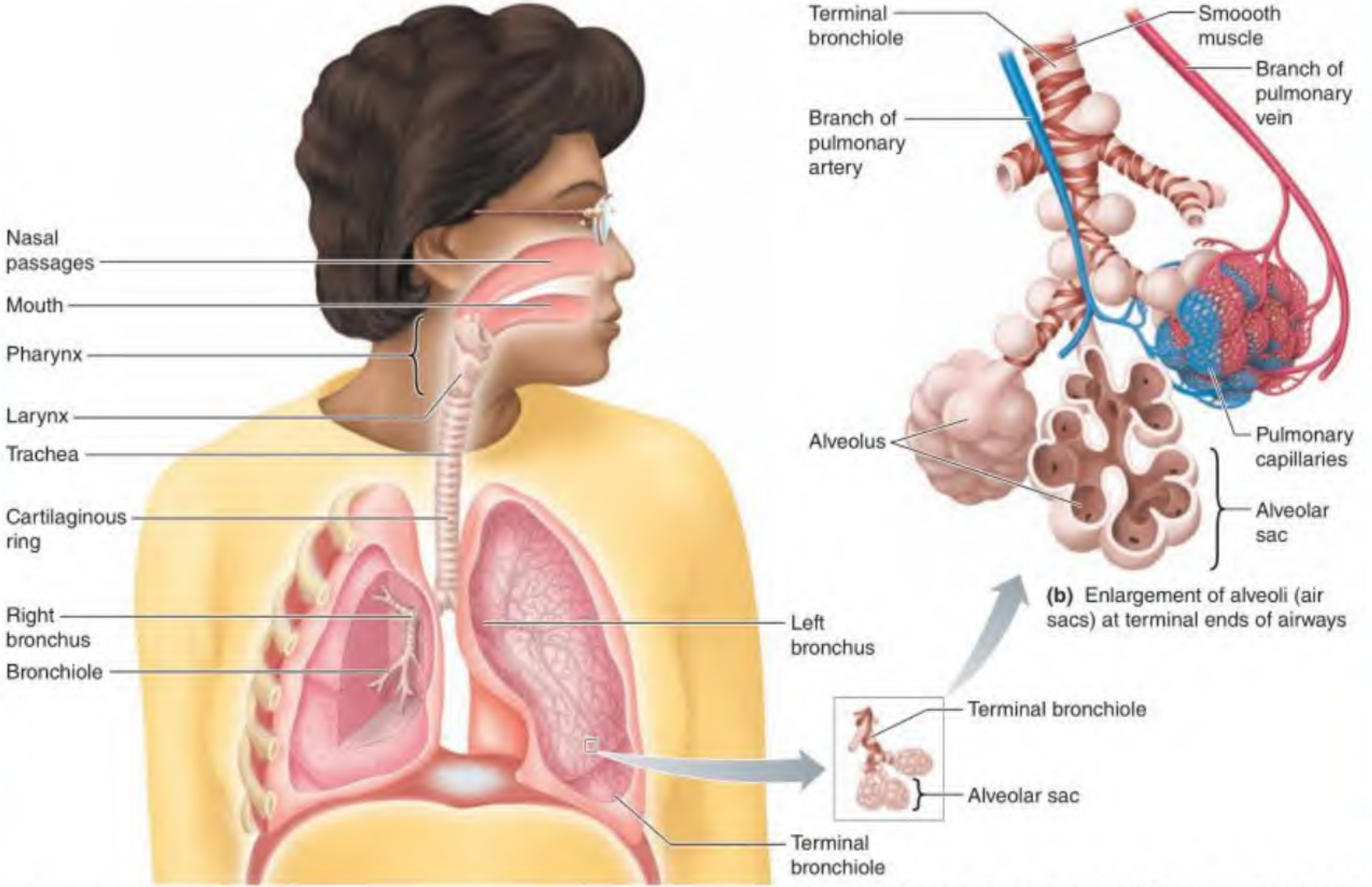
Etapes de la respiration externe



II- ANATOMIE DE L'APPAREIL RESPIRATOIRE

L'appareil respiratoire comprend:

- Voies aériennes extra pulmonaires: canalisations menant l'air de l'atmosphère jusqu'aux alvéoles.
- Pharynx: un passage commun aux appareils respiratoire et digestif et d'où partent la trachée (vers les poumons) et l'œsophage (vers l'estomac).
- Trachée: qui prolonge le larynx, se divise en deux bronches droite et gauche qui entrent dans le poumon correspondant.
- Bronchioles: les plus petites ramifications des bronches à l'intérieur du poumon.



Anatomie du système respiratoire

▪ Alvéoles:

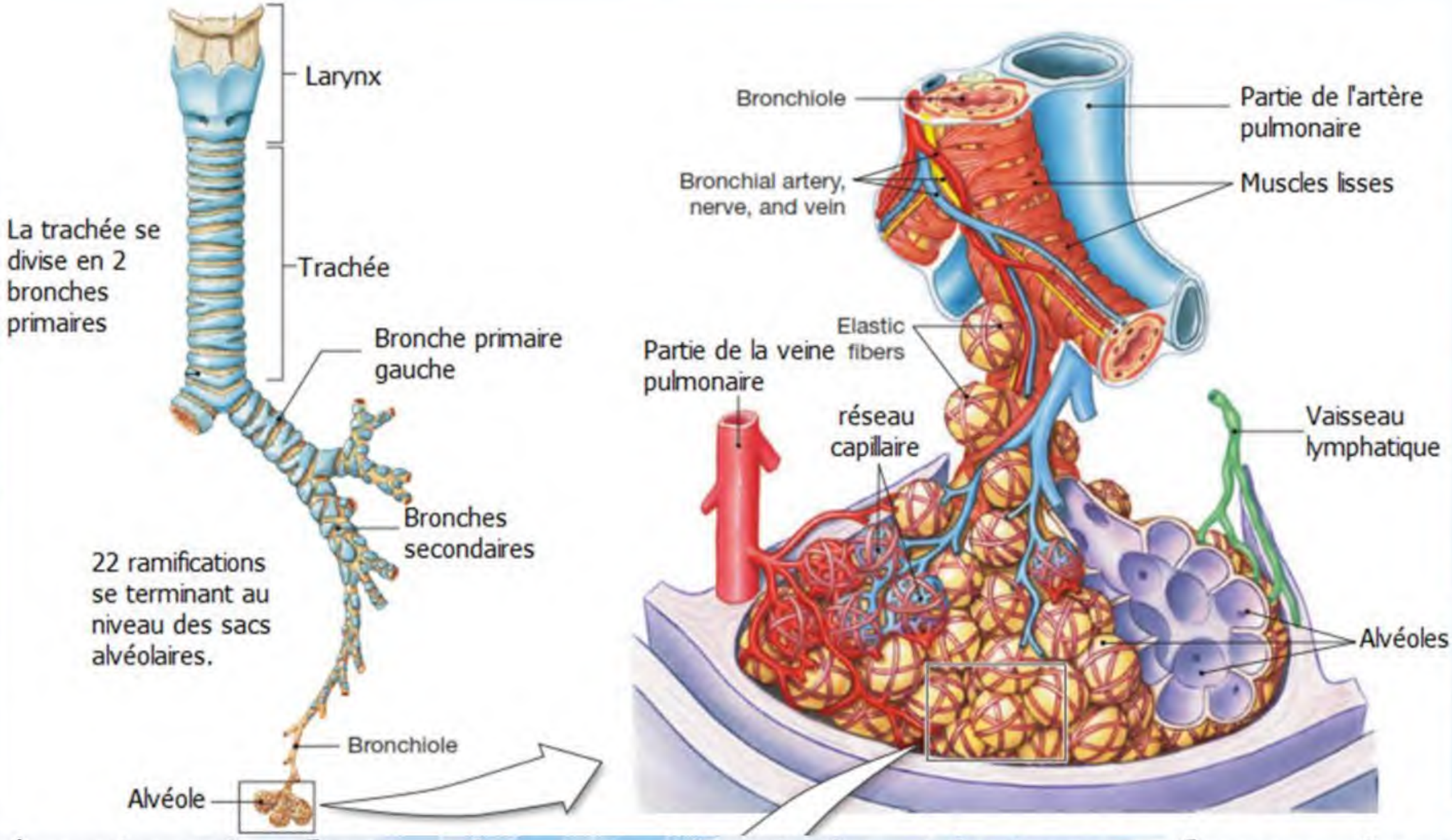
Siège d'échange air/sang, petites cavités gonflables disposées à l'extrémité des bronchioles.

Paroi mince faite d'une seule couche de 02 types de cellules:

- Pneumocytes de type I: cellules plates constituant les principales cellules de la paroi alvéolaire (93% de la surface alvéolaire).

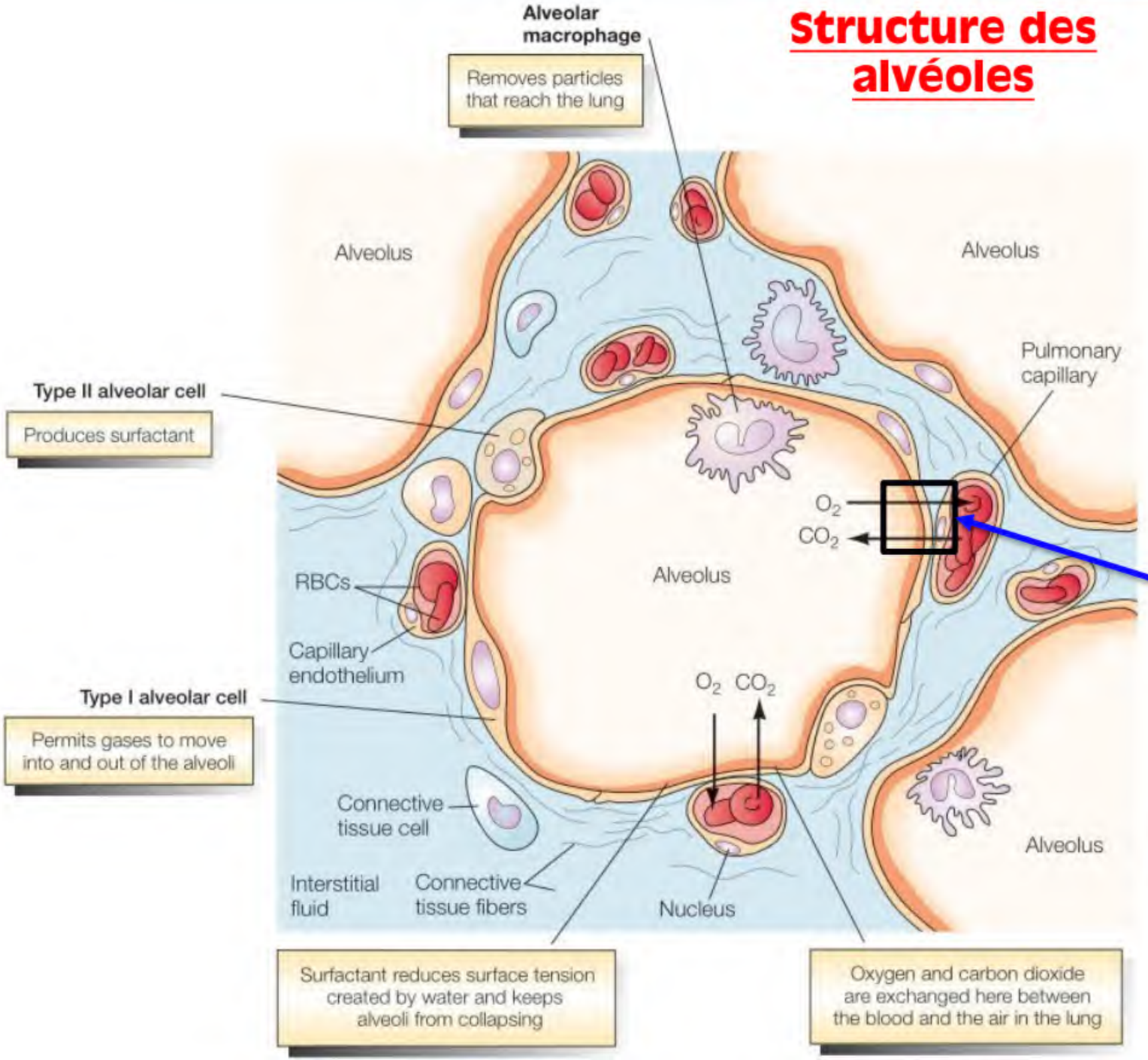
- Pneumocytes de type II: cellules granuleuses plus épaisses. Ces cellules secrètent le surfactant qui est un agent lipidique qui:

  - réduit la tension superficielle à la fin de l'expiration,
  - augmente la compliance des poumons et empêche les alvéoles de se fermer.

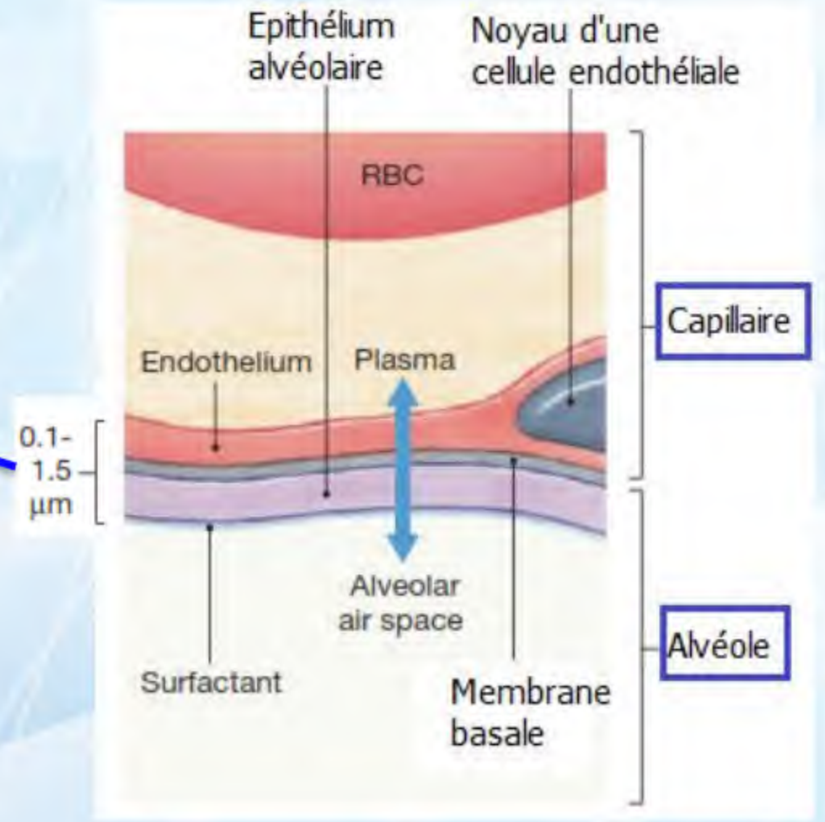


Anatomie des voies respiratoires intra pulmonaires

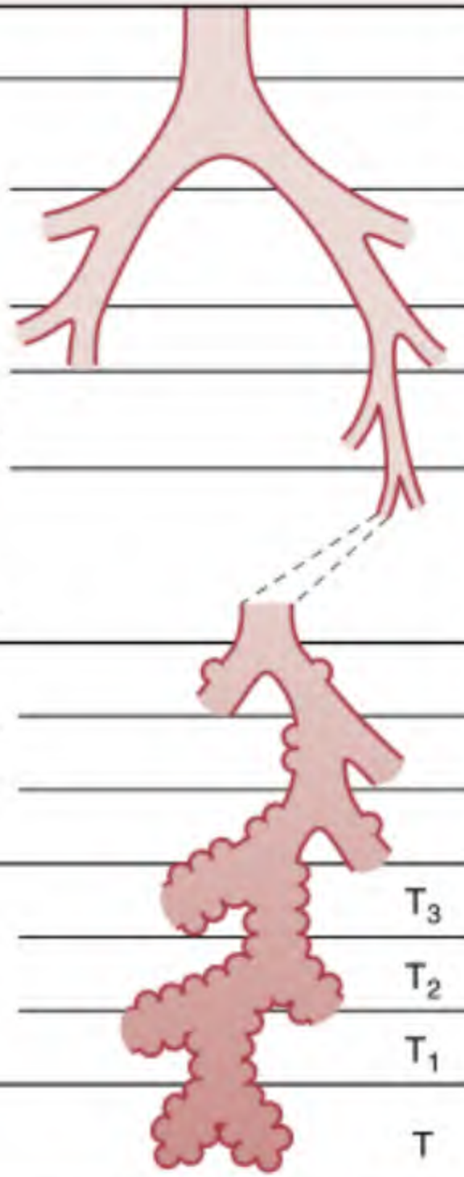
Structure des alvéoles



Surface alvéolaire d'échange: environ 75m2

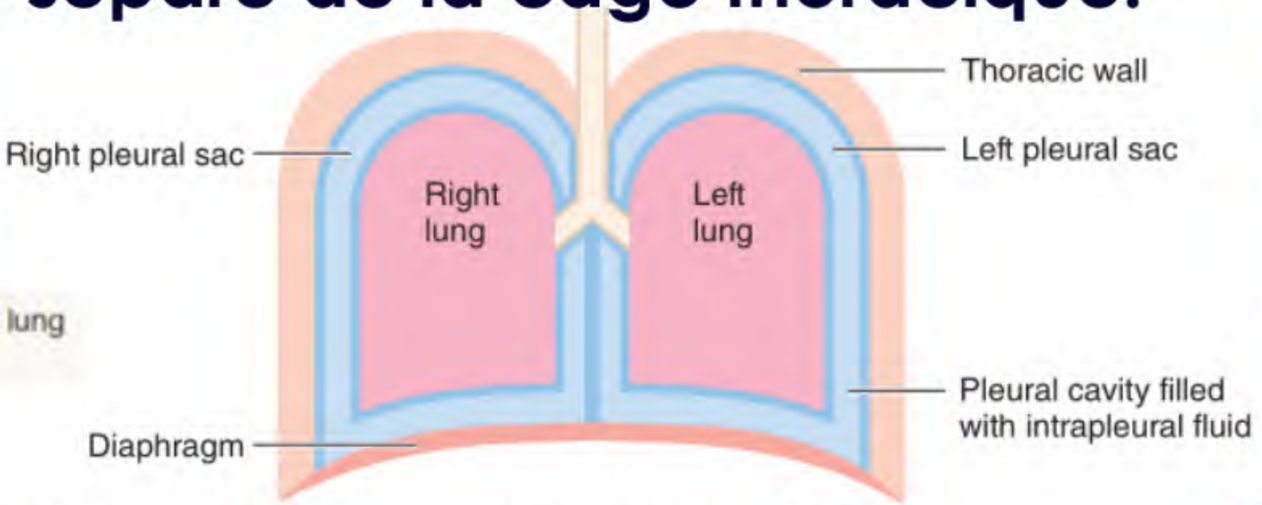


	Generation		Diameter, cm	Length, cm	Number	Total cross sectional area, cm^2
Conducting zone	Trachea	0	1.80	12.0	1	2.54
	Bronchi	1	1.22	4.8	2	2.33
		2	0.83	1.9	4	2.13
		3	0.56	0.8	8	2.00
	Bronchioles	4	0.45	1.3	16	2.48
	Terminal bronchioles	5 ↓ 16	0.35 ↓ 0.06	1.07 ↓ 0.17	32 ↓ 6×10^4	3.11 ↓ 180.0
Transitional and respiratory zones	Respiratory bronchioles	17	↓	↓	↓	↓
		18				
		19	0.05	0.10	5×10^5	10^3
	Alveolar ducts	T_3 20	↓	↓	↓	↓
		T_2 21				
		T_1 22				
	Alveolar sacs	T 23	0.04	0.05	8×10^6	10^4

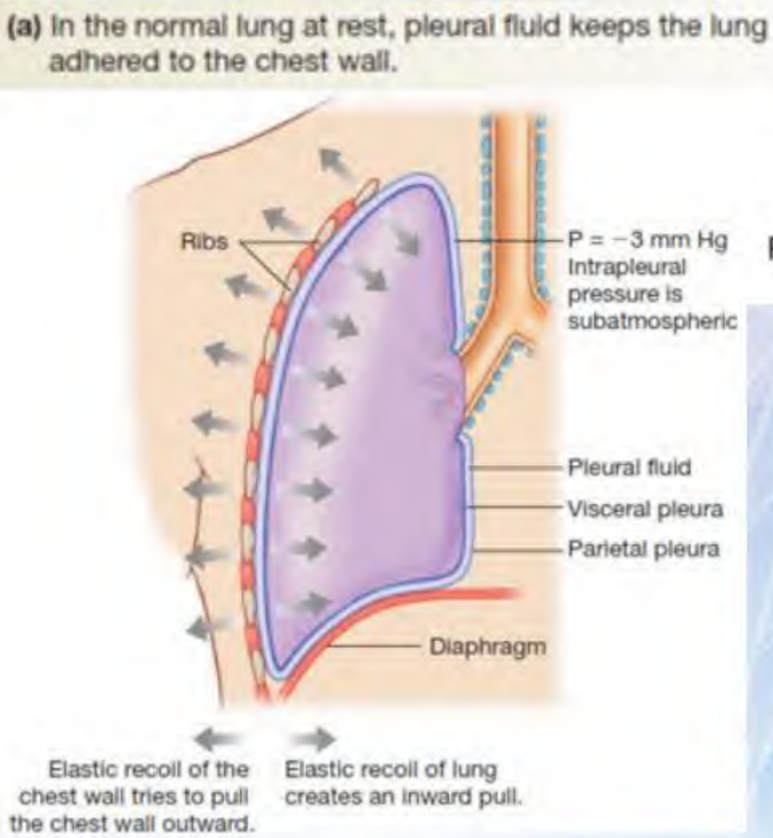


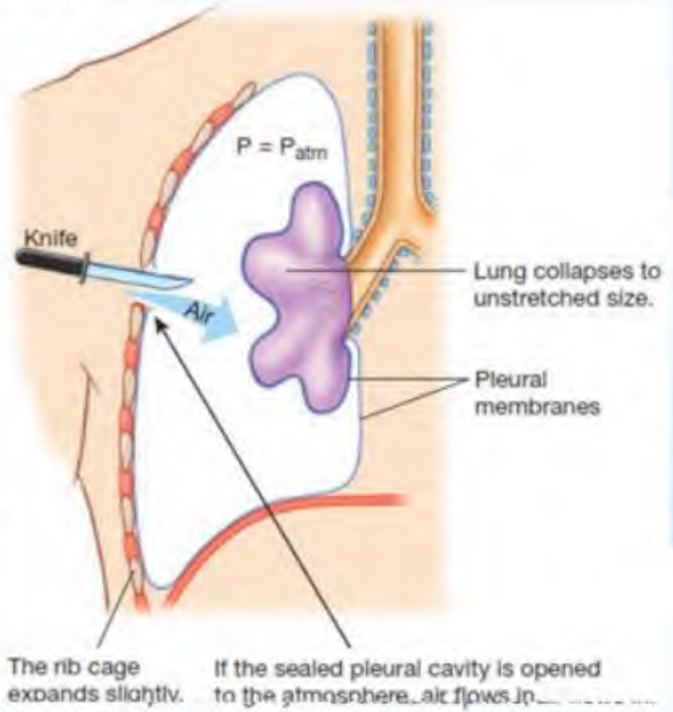
Ramification des voies aériennes

Cavité pleurale: formée par un sac fermé constitué d'un feuillet double, appelé plèvre et qui enveloppe chaque poumon et le sépare de la cage thoracique.



Relationship of lungs to pleural sacs, thoracic wall, and diaphragm





III- LA MÉCANIQUE RESPIRATOIRE

1- Etude des pressions:

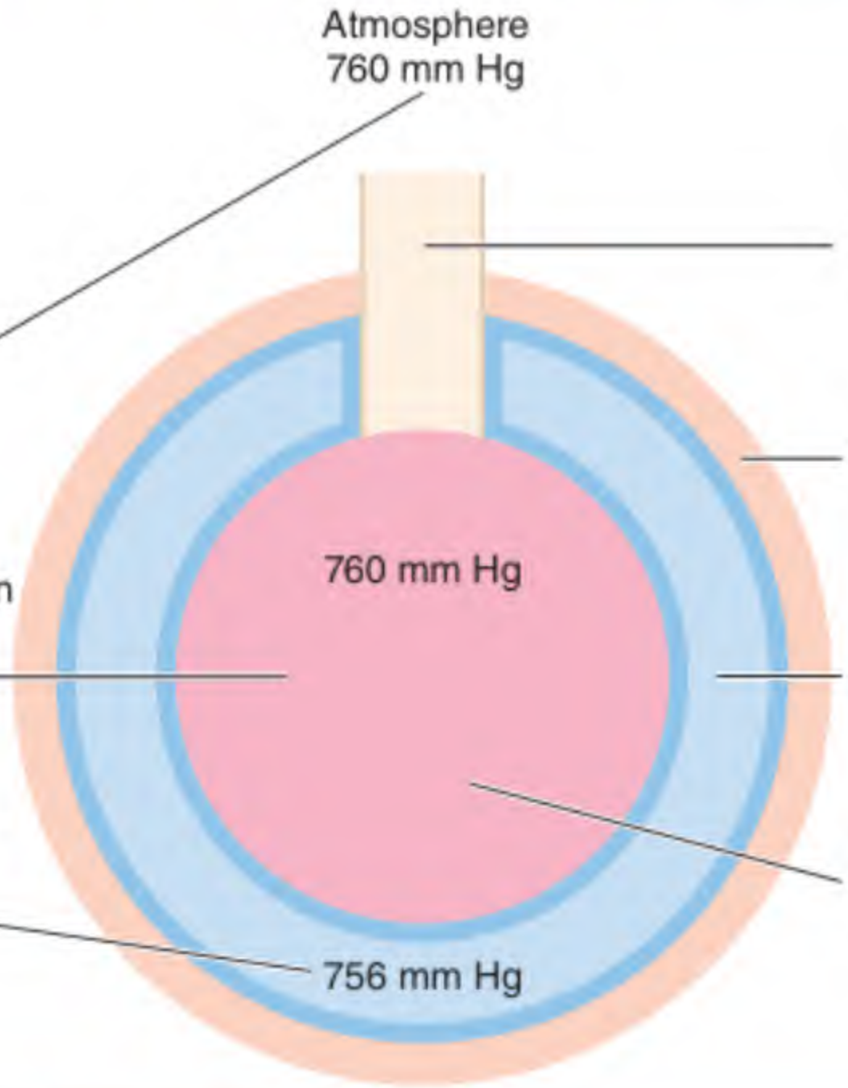
- Force motrice de l'écoulement de l'air : différences de pression entre l'atmosphère et les alvéoles.
- Le sens de l'écoulement de l'air s'inverse périodiquement sous l'effet de l'activité cyclique des muscles respiratoires.

3 pressions importantes

1 **Atmospheric pressure** (the pressure exerted by the weight of the gas in the atmosphere on objects on Earth's surface—760 mm Hg at sea level)

2 **Intra-alveolar pressure** (the pressure within the alveoli—760 mm Hg when equilibrated with atmospheric pressure)

3 **Intrapleural pressure** (the pressure within the pleural sac—the pressure exerted outside the lungs within the thoracic cavity, usually less than atmospheric pressure at 756 mm Hg)



Airways (represents all airways collectively)

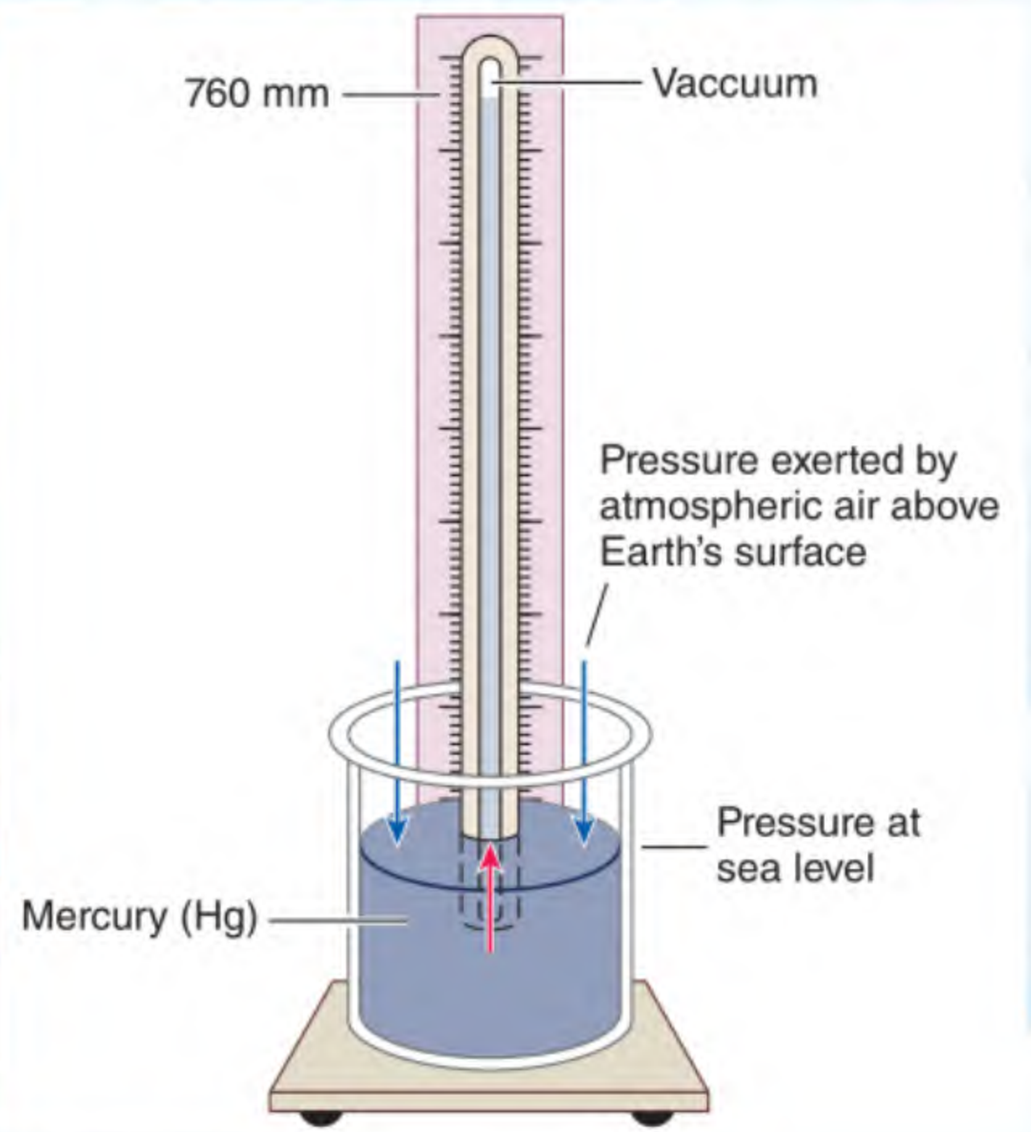
Thoracic wall (represents entire thoracic cage)

Pleural sac (space represents pleural cavity)

Lungs (represents all alveoli collectively)

1- Pression atmosphérique:

- La pression exercée par le poids de l'air sur les objets situés à la surface de la terre (760mmHg).
- 1 mmHg: pression exercée par 1 mm d'une colonne de Mercure sur une surface de 1cm².



2- Pression intra-alvéolaire:

Pression du gaz contenu dans les alvéoles.

- Les alvéoles communiquent avec l'atmosphère, il y a écoulement du gaz chaque fois que la pression dans les alvéoles diffère de la pression atmosphérique.

3- Pression intra-pleurale:

- Pression dans la cavité pleurale.
- C'est la pression exercée à la surface des poumons à l'intérieur de la cage thoracique (plus basse que la pression atmosphérique: 756 mmHg).
- La cavité pleurale est close, elle n'est pas en équilibre avec les pressions atmosphérique et alvéolaire, l'air ne peut ni y entrer ni en sortir quelque soit la différence de pression.

2- Variation des pressions au cours de la ventilation pulmonaire.

Loi de BOYLE MARIOTTE:

La pression d'un gaz, à température constante, varie inversement avec le volume du gaz.

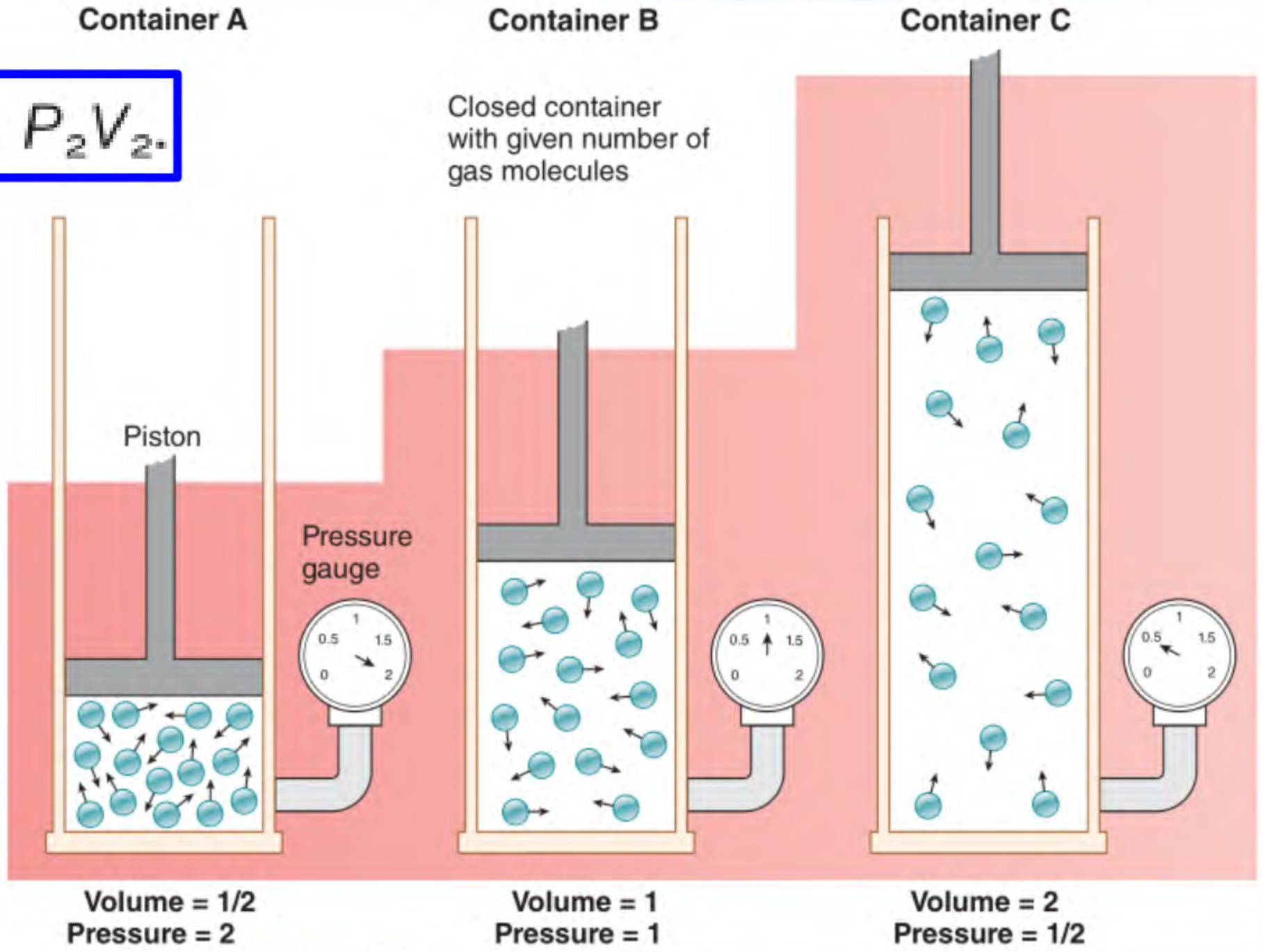
Inspiration: pression intraalvéolaire est inférieure à la pression atmosphérique. L'air entre dans les poumons

Expiration: pression intraalvéolaire est supérieure à la pression atmosphérique. L'air sort des poumons.

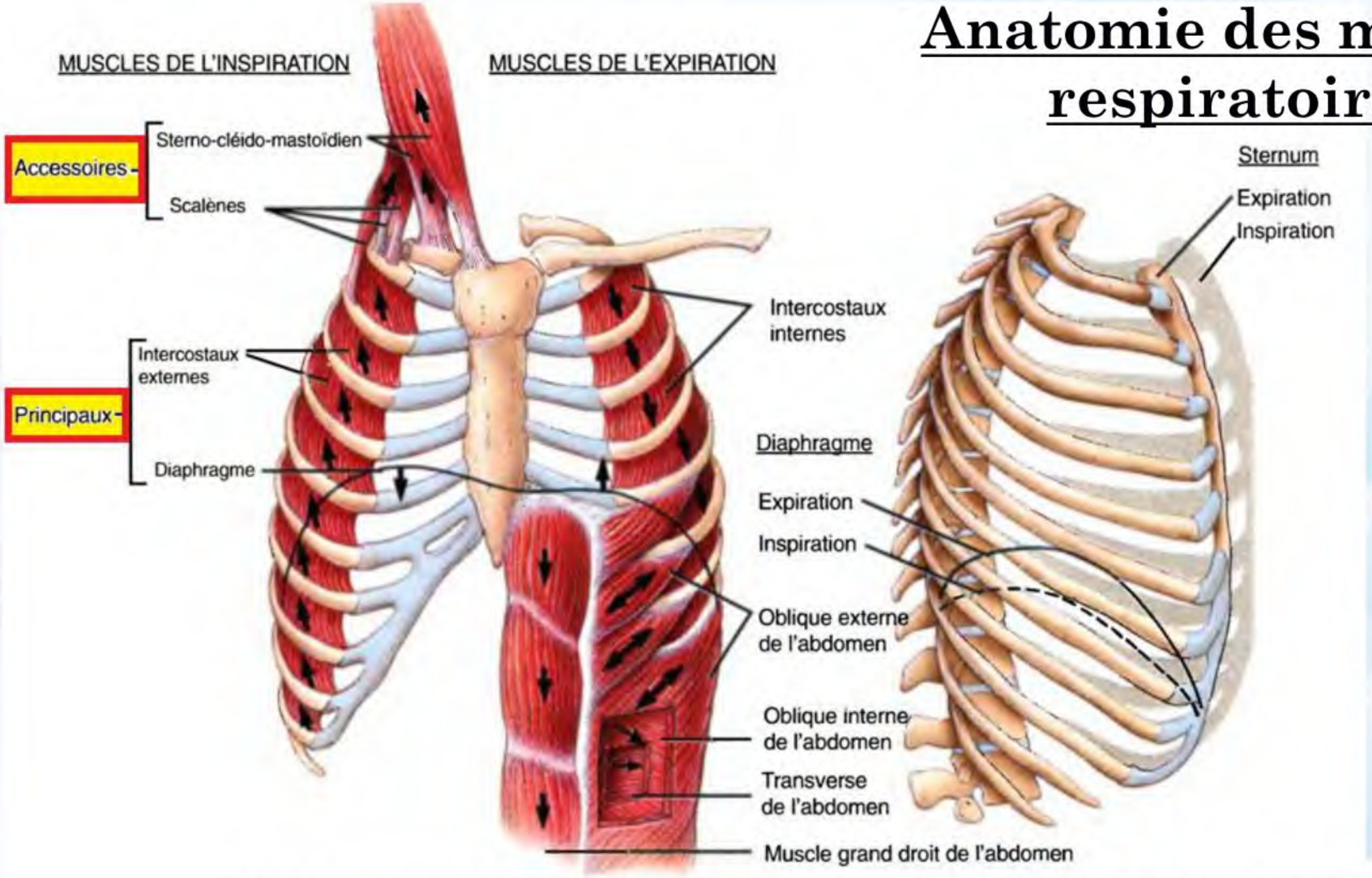
L'activité des muscles respiratoires entraine le changement du volume pulmonaire (indirectement la pression intra alvéolaire).

Ces muscles n'agissent pas directement sur le poumon mais ils modifient le volume de la cage thoracique.

$$P_1V_1 = P_2V_2.$$


Container A
Container B
Container C
Closed container with given number of gas molecules
Piston
Pressure gauge
Volume = 1/2
Pressure = 2
Volume = 1
Pressure = 1
Volume = 2
Pressure = 1/2

Anatomie des muscles respiratoires.



a) Muscles inspiratoires et leurs actions (à gauche)
Muscles expiratoires et leurs actions (à droite)

b) Changements dans la taille de la cavité thoracique durant l'inspiration et l'expiration

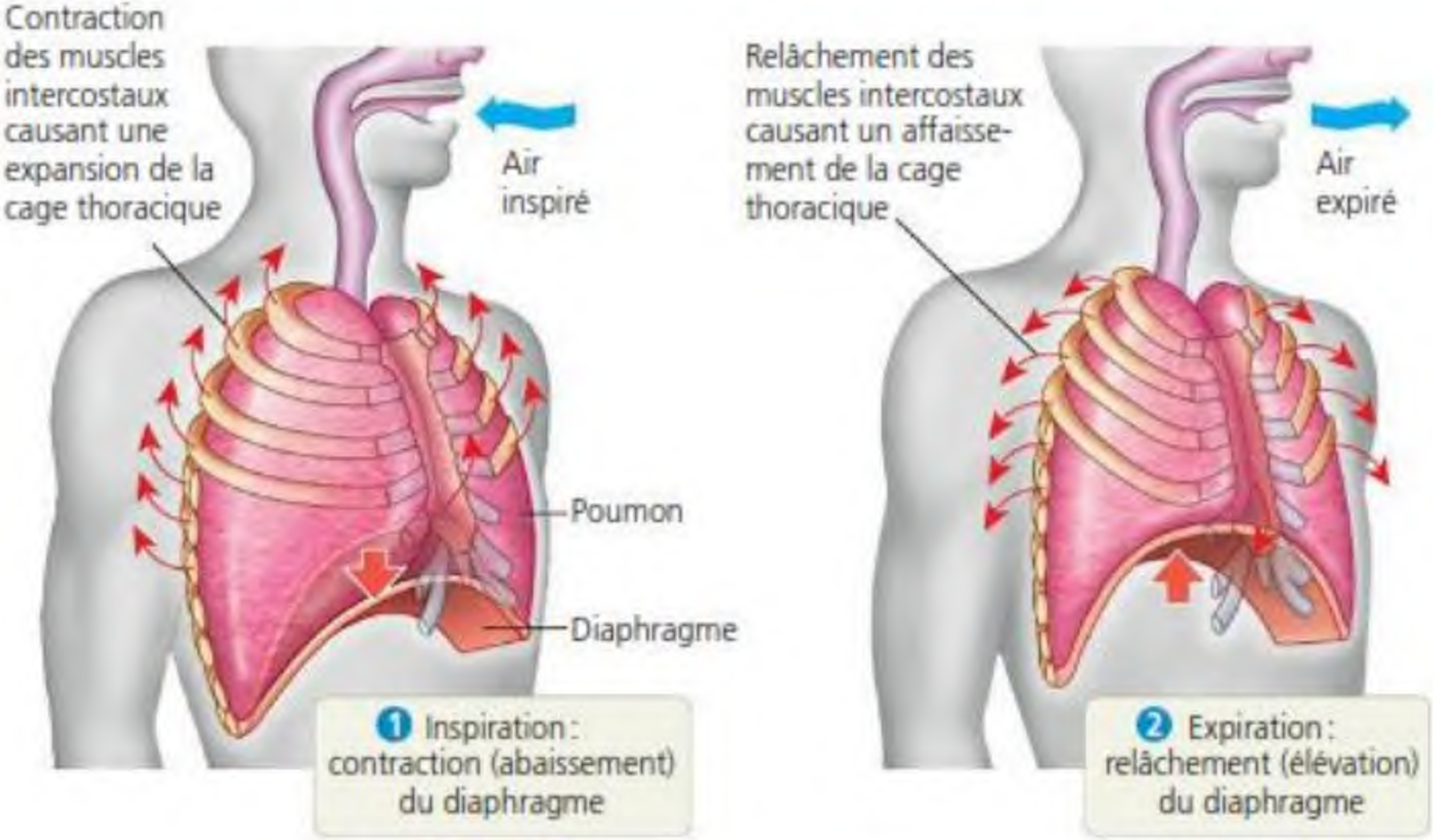
3- Cycle respiratoire

a-Inspiration

i. Avant le début de l'inspiration: les muscles respiratoires sont relâchés et il n'y a pas d'écoulement d'air (pression alvéolaire = pression atmosphérique).

ii. Au cours de l'inspiration: les principaux muscles inspiratoires: diaphragme et muscles intercostaux externes se contractent (stimulés par le nerf phrénique et le nerf intercostal) ce qui entraine l'augmentation du volume pulmonaire et donc la diminution de la pression intraalvéolaire et l'écoulement de l'air.

L'écoulement s'arrête lorsque les deux pressions s'équilibrent.


Contraction des muscles intercostaux causant une expansion de la cage thoracique
Air inspiré
Poumon
Diaphragme
1 Inspiration : contraction (abaissement) du diaphragme
Relâchement des muscles intercostaux causant un affaisse-ment de la cage thoracique
Air expiré
2 Expiration : relâchement (élévation) du diaphragme

3- Cycle respiratoire

b-Expiration

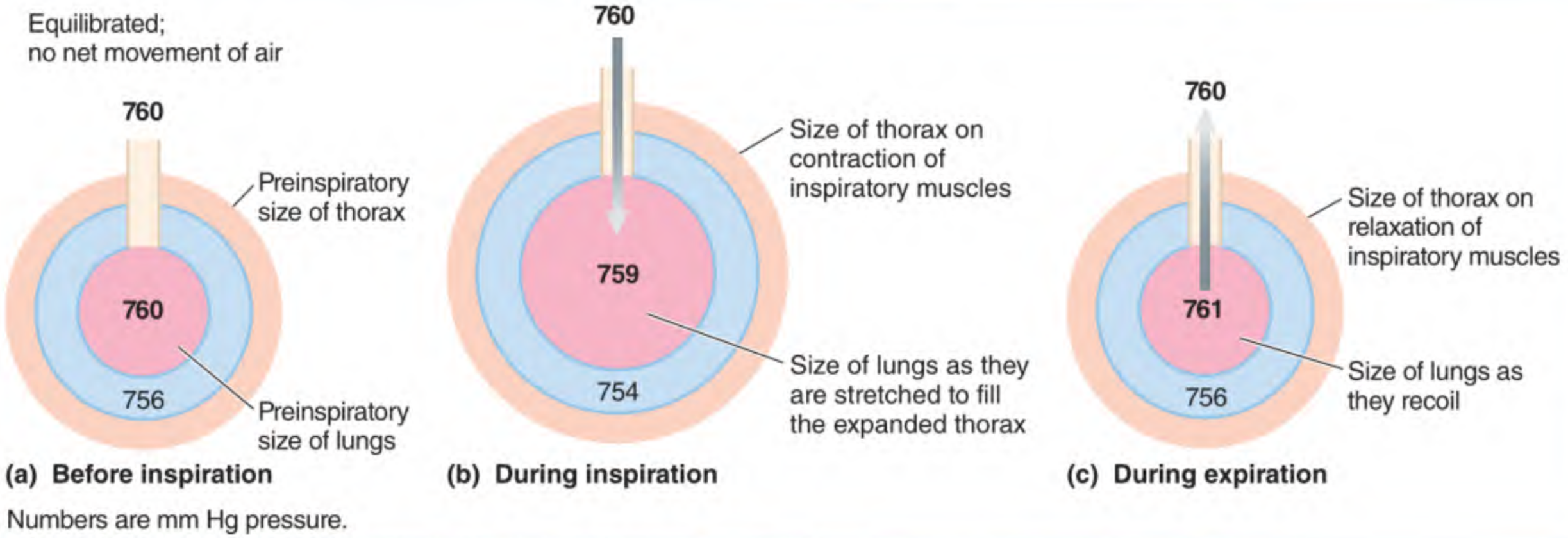
► Respiration calme: l'expiration est un phénomène passif.

i. Muscles inspiratoires relâchés: diminution du volume de la cage thoracique (reprend son volume normal) et par conséquent celui des poumons.

ii. Augmentation de la pression intraalvéolaire: l'air s'écoule hors des poumons vers l'atmosphère:

[ΔP: alvéoles 761 mmHg, atmosphère 760 mmHg].

► Exercice physique: Expiration active. La contraction des muscles EXPIRATOIRES devient nécessaire pour qu'il y ait réduction supplémentaire du volume de la cage thoracique (permet un écoulement plus important).



Volume pulmonaire et pression alvéolaire durant le cycle respiratoire

III- LES ÉCHANGES GAZEUX

1- Loi de fick

La quantité de matière qui diffuse en un temps donné est d'autant plus grande que la surface à parcourir est plus faible et la surface à travers de la quelle se fait la diffusion est plus grande.

La structure des poumons est idéalement adaptée aux échanges des gaz (simple diffusion).

i. Distance alv.- cap. pulmonaires : **0,5 µm**.

ii. Surface d'échange sang-gaz est très grande, **75m²** (300 millions alvéoles, ayant chacune un diamètre de 300µm).

2- Loi de DALTON: Notion de pression partielle

La pression totale exercée par un mélange de gaz est la somme des pressions partielles exercées par chacun des gaz constituants.

i. La pression exercée par chaque gaz est appelée la pression partielle: P_{gaz}.

ii. L'air atmosphérique est un mélange de gaz (79% de N_2, 21% d'O_2, % négligeable de CO_2 et d'autres gaz rares).

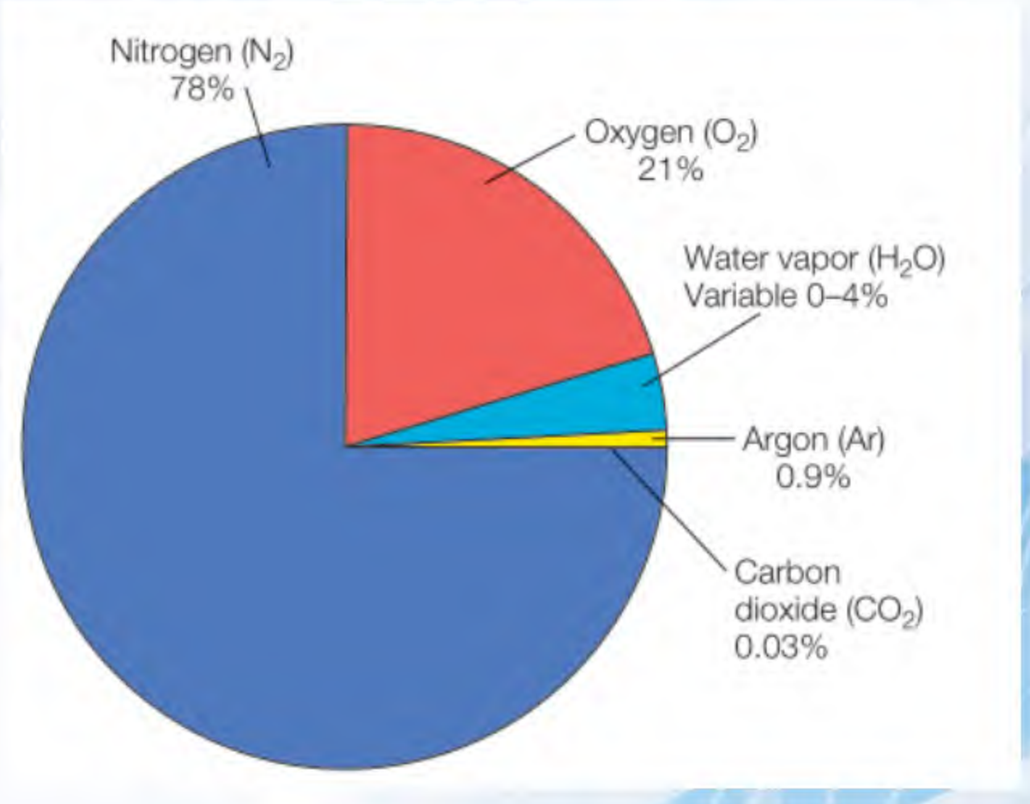
$$P_{atm} = 760 \text{ mmHg.}$$

$$P_{o_2} = 160 \text{ mmHg.}$$

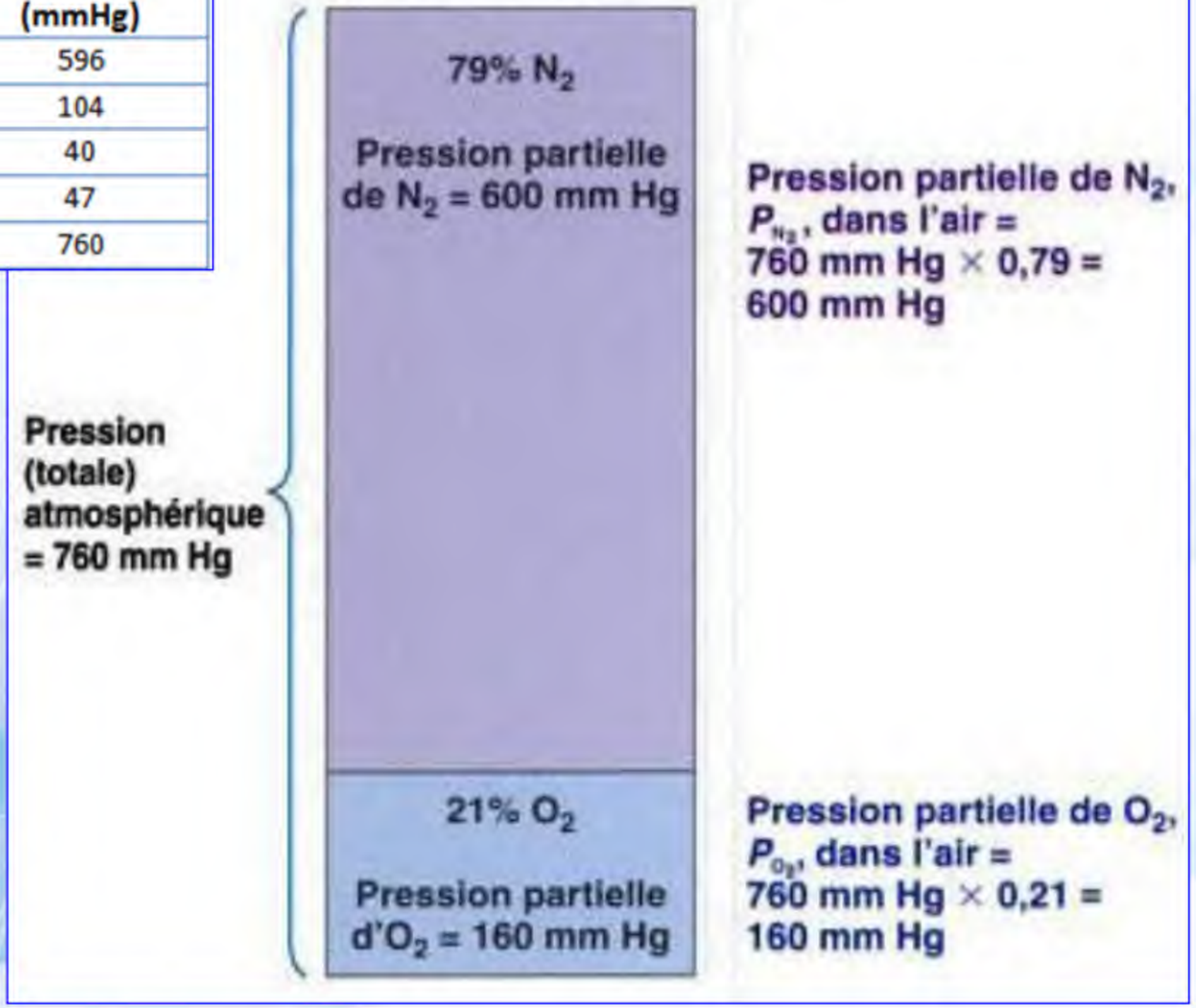
$$P_{co_2} = 0{,}23 \text{ mmHg (négligeable).}$$

Notion de pression partielle:

	Atmosphère		Alvéoles	
Gaz	% approx.	Pression partielle (mmHg)	% approx.	Pression partielle (mmHg)
N_2	78.6	597	74.9	596
O_2	20.6	159	13.7	104
CO_2	0.04	0.3	5.2	40
H_2O	0.47	3.7	6.2	47
Total	100	760	100	760



Composition et pressions partielles dans l'air atmosphérique



- Les différences de pressions partielles constituent la force motrice des échanges gazeux: Un gaz diffuse toujours d'une zone de forte à une zone de faible pression partielle.
- Les gaz dissouts dans un liquide (ex le sang) exercent une pression partielle. Cette pression dépend de la quantité du gaz dissous dans le liquide. Plus la quantité dissoute est grande, plus la pression du gaz est grande.

3- Composition du gaz alvéolaire

Composition en O_2:

La P_{O_2} = **100mmHg** (alvéoles) et **160 mmHg** (air atmosphérique) à cause de:

✓ **Humidification de l'air:**

Au passage dans les voies aériennes l'humidification réduit la pression partielle initiale des composants de l'air inspiré.

✓ **Renouvellement partiel du gaz alvéolaire**: mélange du gaz frais nouvellement inspiré (10% du volume pulmonaire) avec le gaz restant dans les alvéoles à la fin de l'expiration précédente.

Dans l'atmosphère (P_{atm} = 760 mmHg, sec)

21 % O_2 - 0,03 % CO_2

- $P_{atm}O_2$ = 21% x 760 = **160 mmHg**
- $P_{atm}CO_2$ = 0,033% x 760 = **0,25 mmHg**

Air Inspiré Trachéal Réchauffé et Saturé en Vapeur d'eau

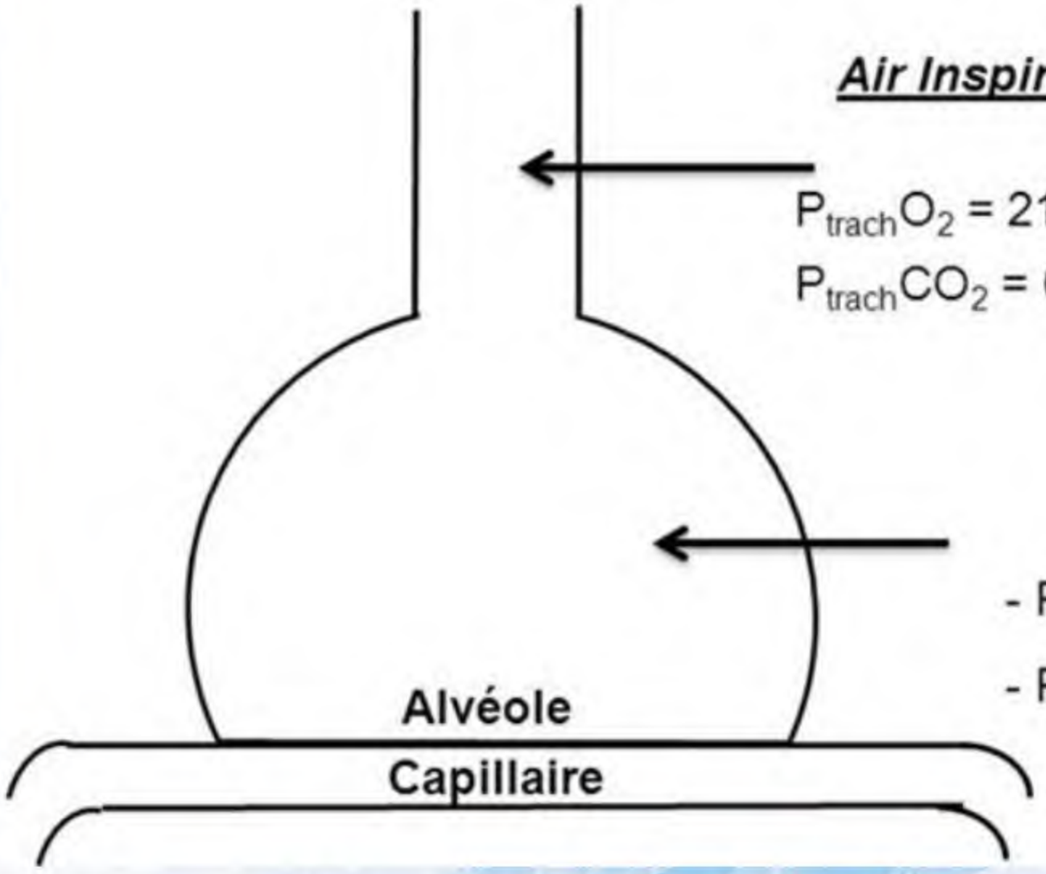
$P_{trach}O_2$ = 21% x (760 – 47) = **150 mmHg**

$P_{trach}CO_2$ = **0,235 mmHg**

Air Alvéolaire

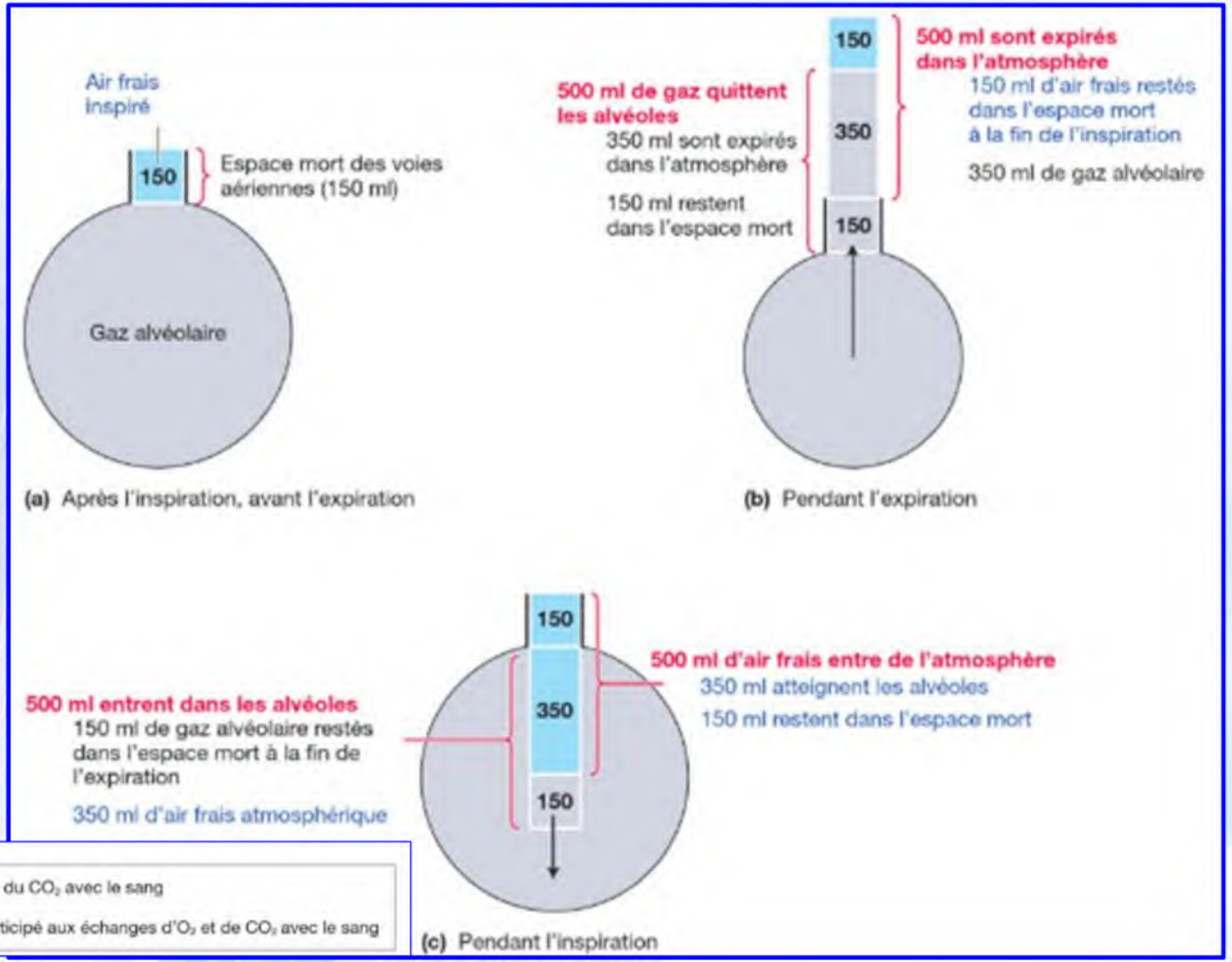
14 % O_2 - 5,6 % CO_2

- $P_{Alv}O_2$ = 14% x (760 – 47) = **100 mmHg**
- $P_{Alv}CO_2$ = **40 mmHg**



Air atmosphérique et alvéolaire.

Renouvellement partiel du gaz alvéolaire.



Composition en O_2:

P_{CO_2} = 40mmHg (alvéoles) et 0.25 mmHg (négligeable, air atmosphérique) à cause de:

i: Production permanente du CO2 par les tissus:

le CO2 est ajouté continuellement au sang capillaire de la circulation systémique. Dans les poumons le CO2 diffuse du sang vers le gaz alvéolaire du fait de la différence de pression partielle et est finalement rejeté lors de l'expiration.

ii: Renouvellement partiel du gaz alvéolaire.

4- Echanges de gaz dans les capillaires pulmonaires

- Dans les capillaires pulmonaires (coté artère pulmonaire):

P_{O_2}= 40mmHg, P_{CO_2}= 46mmHg.

Au passage du capillaire alvéolaire, le sang est en contact avec le gaz alvéolaire:

- La P_{O_2}= 100mmHg, l'O_2 diffuse du gaz alvéolaire vers le sang.
- La P_{CO_2}= 40 mmHg, le CO_2 diffuse du sang vers le gaz alvéolaire.

- À la sortie du poumons (P_{O_2} =100mmHg; P_{CO_2}= 40mmHg): le sang est devenu du sang artériel riche en O_2 et pauvre en CO_2.

5- Echanges de gaz dans les capillaires systémiques

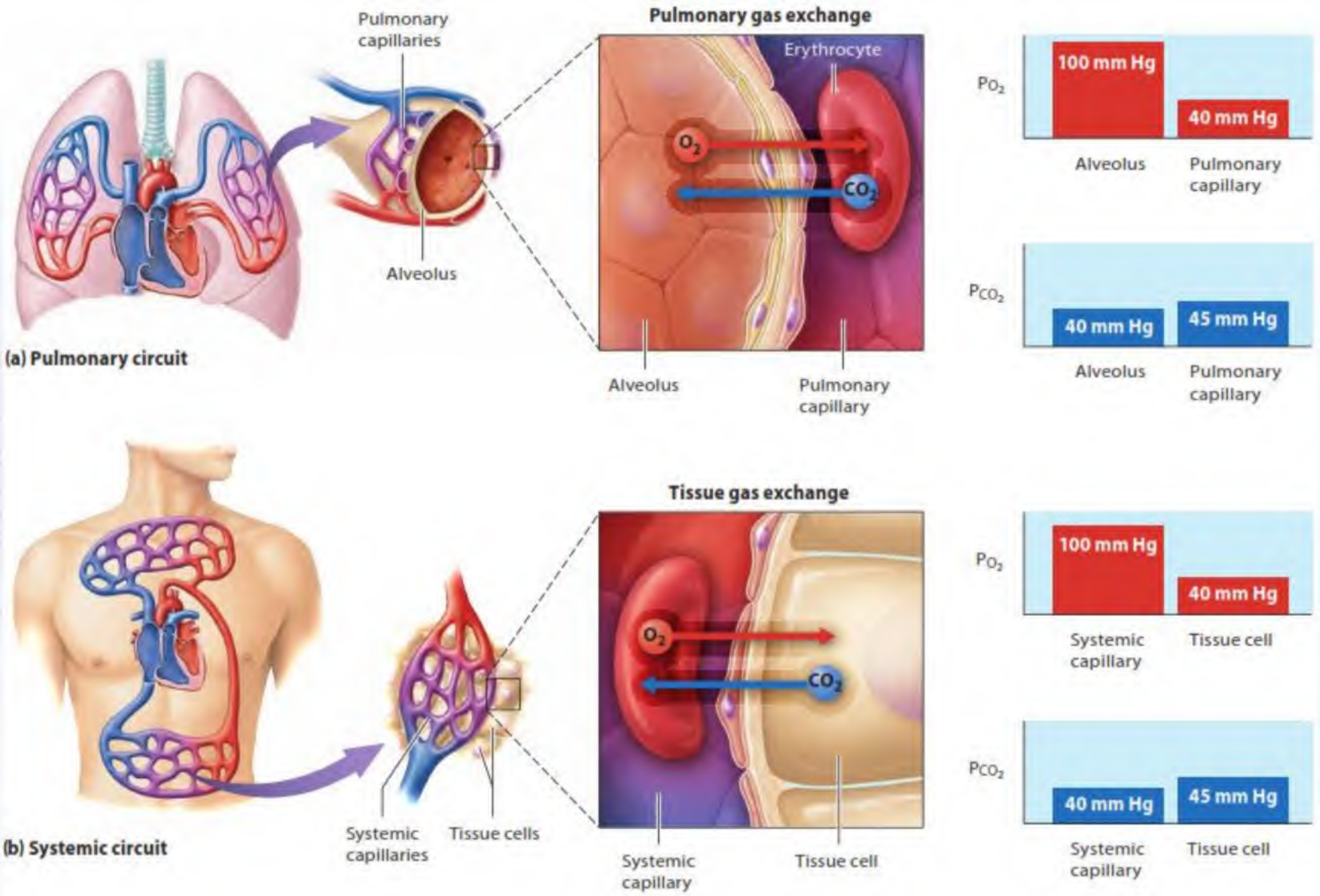
- À l'entrée des capillaires systémiques: composition identique à celle à la sortie des poumons:

P_{O_2}= 100mmHg et la P_{CO_2}= 40mmHg.

- Au niveau des tissus, La P_{O_2}= 40mmHg et la P_{CO_2}= 46mmHg.

i. L'O_2 diffuse vers les tissus sous l'effet de la différence des P_{O_2} entre le sang artériel (100 mmHg) et le sang des cellules adjacentes (40 mmHg) .

ii. Le CO_2 diffuse hors des cellules (P_{CO_2}= 46mmHg) vers le sang entrant dans les capillaires (P_{CO_2}= 40mmHg).


Pulmonary capillaries
Alveolus
(a) Pulmonary circuit
Pulmonary gas exchange
Erythrocyte
O_2
CO_2
Alveolus
Pulmonary capillary
P_{O_2}
100 mm Hg
40 mm Hg
Alveolus
Pulmonary capillary
P_{CO_2}
40 mm Hg
45 mm Hg
Alveolus
Pulmonary capillary
Tissue gas exchange
O_2
CO_2
Systemic capillaries
Tissue cells
(b) Systemic circuit
Systemic capillary
Tissue cell
P_{O_2}
100 mm Hg
40 mm Hg
Systemic capillary
Tissue cell
P_{CO_2}
40 mm Hg
45 mm Hg
Systemic capillary
Tissue cell

IV- TRANSPORT DES GAZ

- L'O_2

Dans le sang, l'O_2 existe sous 2 formes:

- Dissous: environ 1,5%.
- Combiné: à l'hémoglobine 98,5%.

❖ L'hémoglobine (Hb) est une ferroprotéine contenue dans les globules rouges, capable de combinaison, facilement réversible, avec l'O_2:

$$Hb + O_2 \rightleftharpoons HbO_2$$

❖ Chaque atome de fer de l'hème de l'hémoglobine est capable de fixer 1 molécule d'O_2.

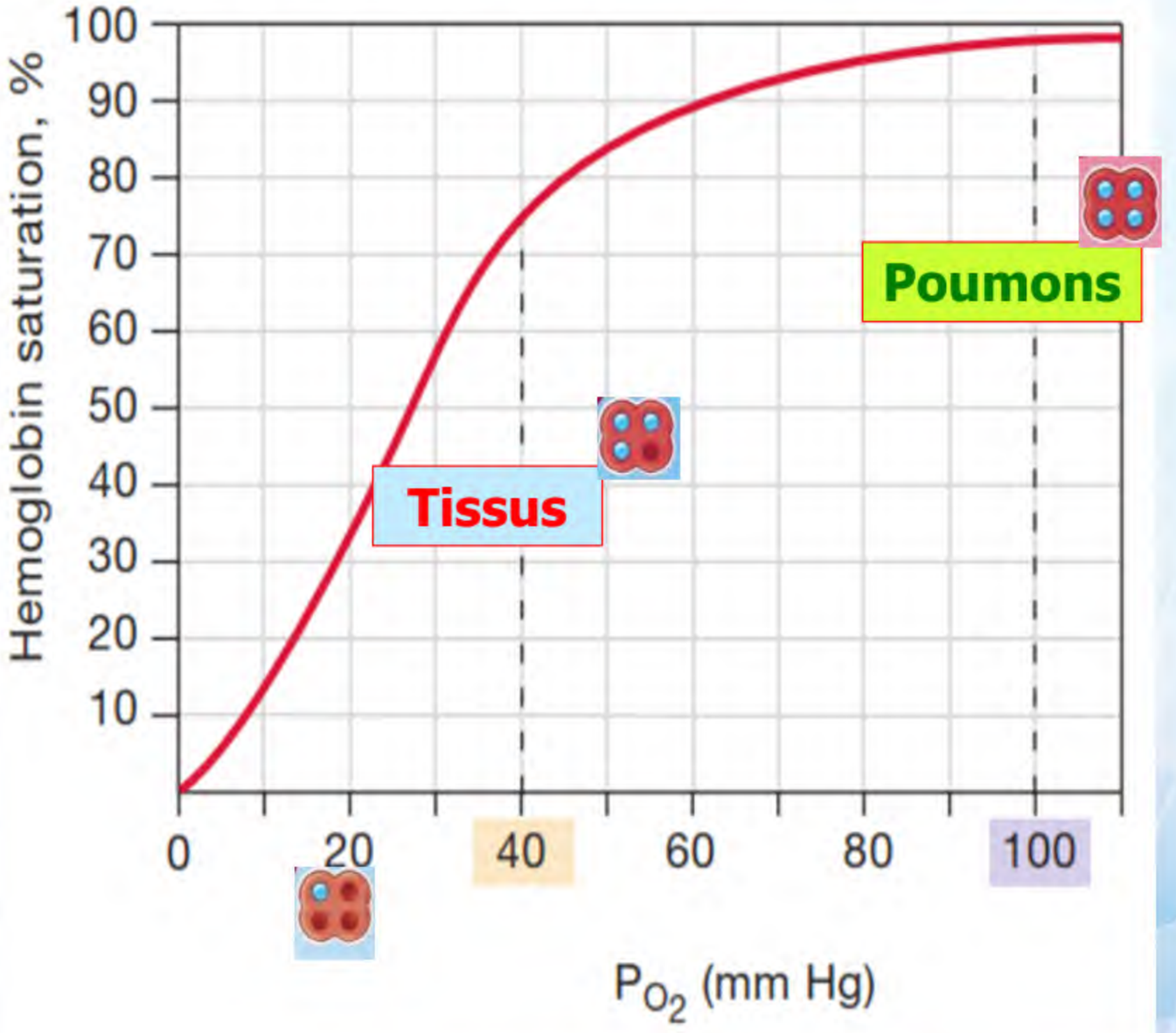
❖ Saturation complète de l'Hb: quand elle est chargée d'O_2 au maximum (4 molécules d'O_2).

- Le % de saturation de l'hémoglobine: dépend de la P_{O_2}, mais influencé par différents facteurs physiques et métaboliques: pH, température, activités métaboliques des globules rouges…
- L'Hb se charge automatiquement en O_2 au niveau des poumons et décharge l'O_2 au niveau des tissus:

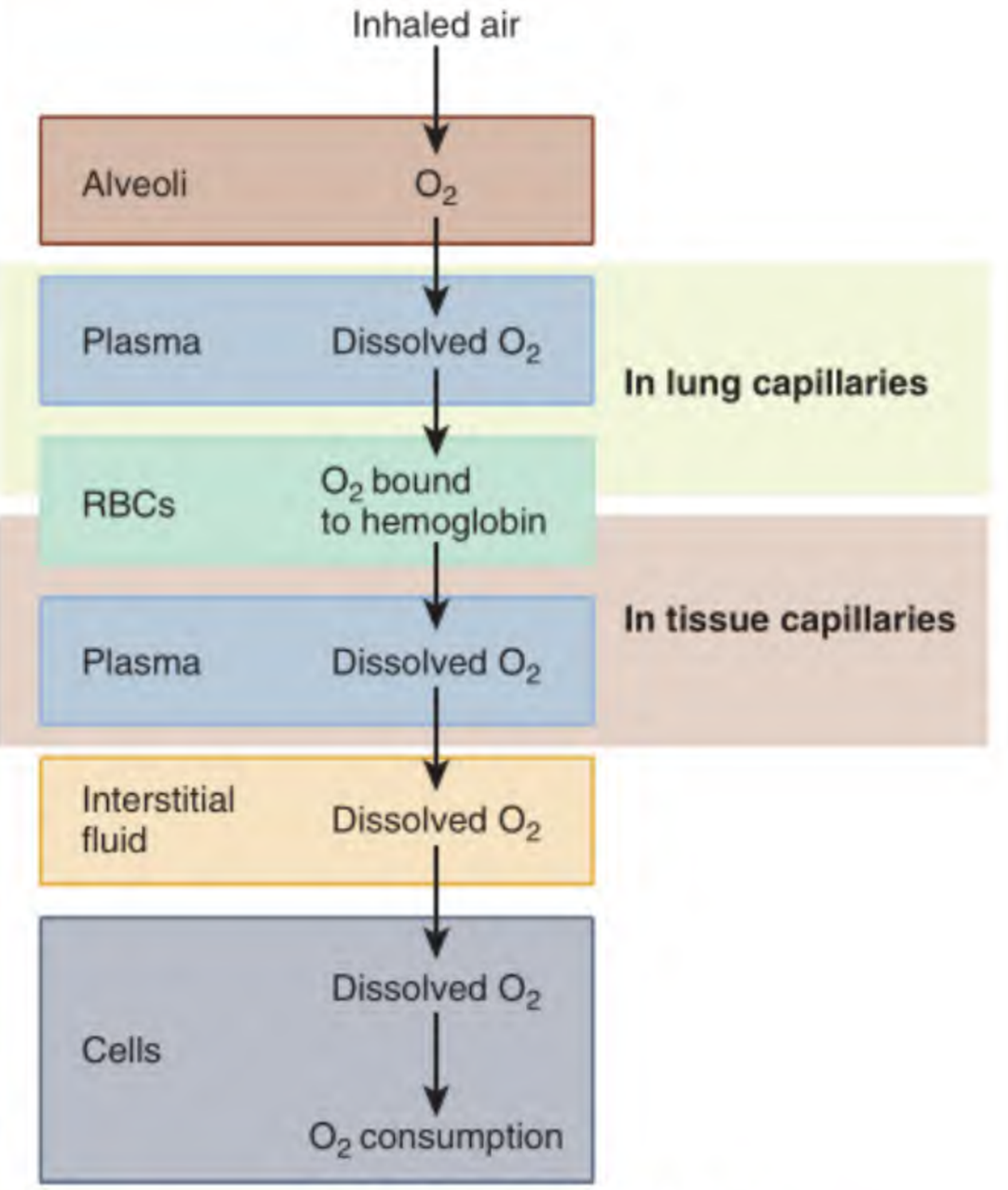
i. Capillaires pulmonaires: P_{O_2} du sang élevée, la réaction se fait vers la droite (augmentation de la saturation de l'Hb).

ii. Capillaires systémiques: P_{O_2} du sang diminue, la réaction se fait à gauche et l'O_2 quitte l'hémoglobine.

$$Hb + O_2 \rightleftharpoons HbO_2$$



Courbe de saturation de l'oxyhémoglobine (Hb)



Diffusion de l'O_2

IV- TRANSPORT DES GAZ

- CO_2

Le CO_2 est transporté sous 3 formes:

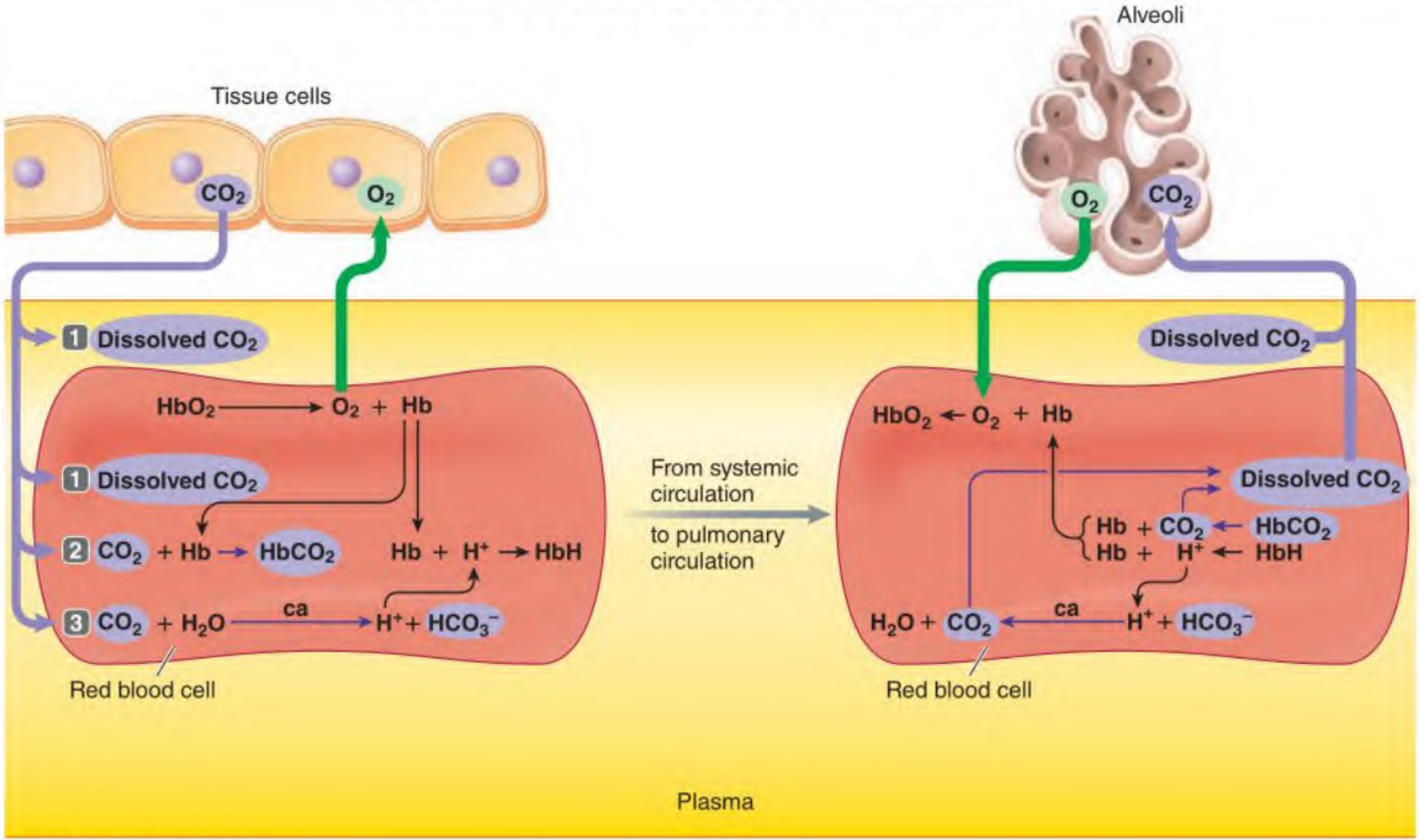
a. Dissous (10%): la quantité dissoute dépend de la PCO2.

b. Lié à l'hémoglobine (30%): le CO2 se lie à la globine, contrairement à l'O2 qui se lie à l'hème.

$$CO_2 + Hb \rightleftharpoons HbCO_2 \text{ (carbaminohemoglobin)}$$

c. Bicarbonate (HCO3-) (60%): l'essentiel du CO2 est transporté dans le sang sous forme de HCO3-.

Transport du CO2 dans le sang



ca = Carbonic anhydrase

V- CONTRÔLE DE LA RESPIRATION

Principes généraux:

- La respiration: activité rythmique, spontanée , permanente et inconsciente.
- Elle ressemble à l'activité cardiaque, mais pas de contraction spontanée pour les muscles respiratoires.
- les structures responsables de l'automatisme respiratoire se trouvent en dehors des poumons.
- L'activité pacemaker de certains neurones dans le cerveau est à l'origine des contractions des muscles respiratoires.

Le contrôle de la respiration

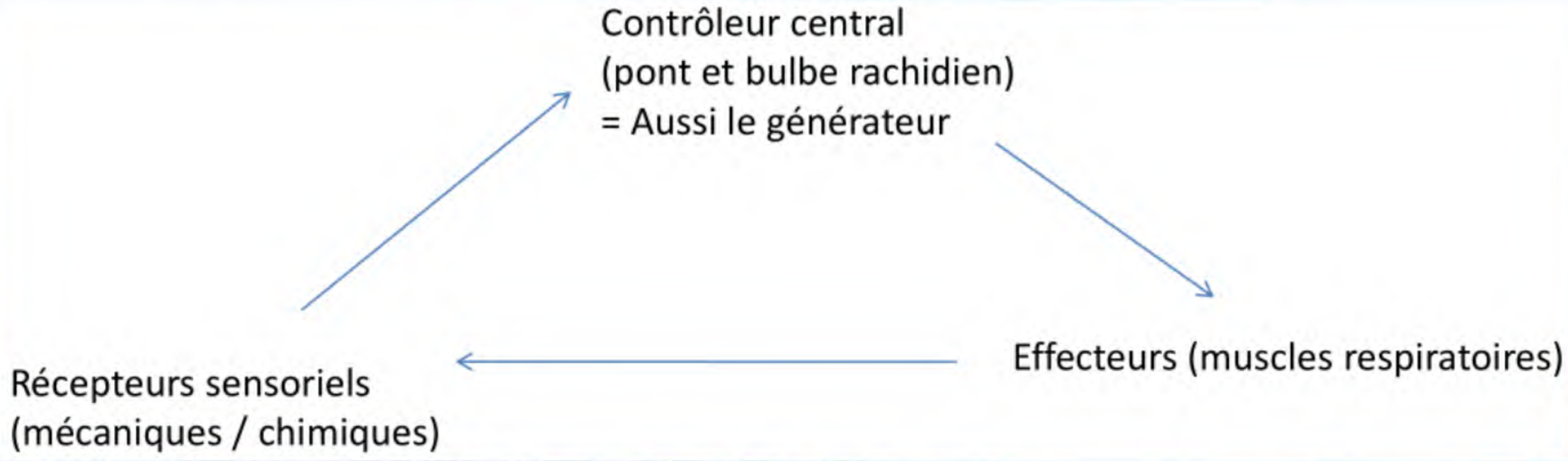
- Inconscient: dyspnée (haute altitude par ex).
- Conscient: plongeurs, chanteurs,....
- Vital: arrêt respiratoire = début de la mort cérébrale.

Deux tâches importantes:

i. Rythmogenèse: Etablir/maintenir une rythmicité automatique pour contracter les muscles respiratoires.

ii. Adaptations physiologiques: Ajuster ce rythme aux demandes: métaboliques (gaz du sang, pH)/mécanique (posture)/ comportements épisodiques non-ventilatoires (parler, manger, chanter...)

Éléments de base du système de régulation de la respiration

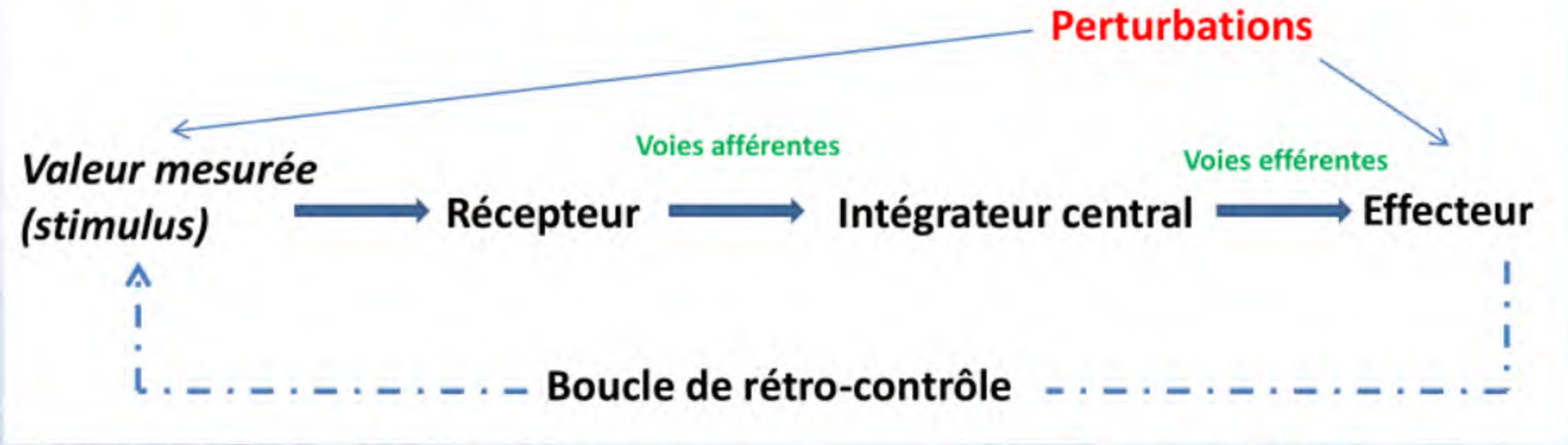


La respiration est une fonction autonome de nature rythmique et contrôlée par deux mécanismes de régulation:

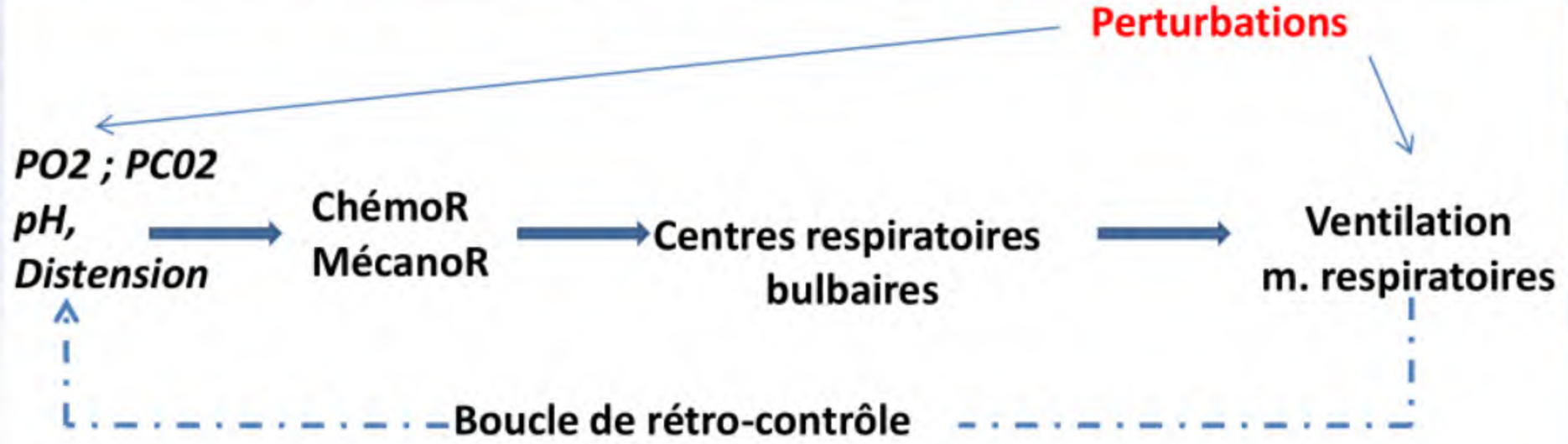
i. **Une régulation nerveuse**

ii. **Une régulation chimique**

Contrôle par des arcs reflexes

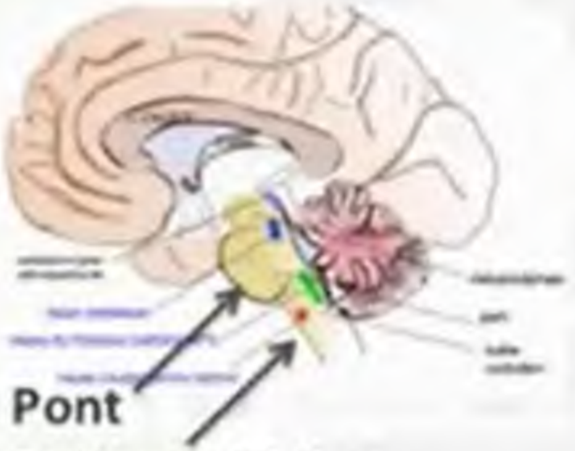


En terme de respiration



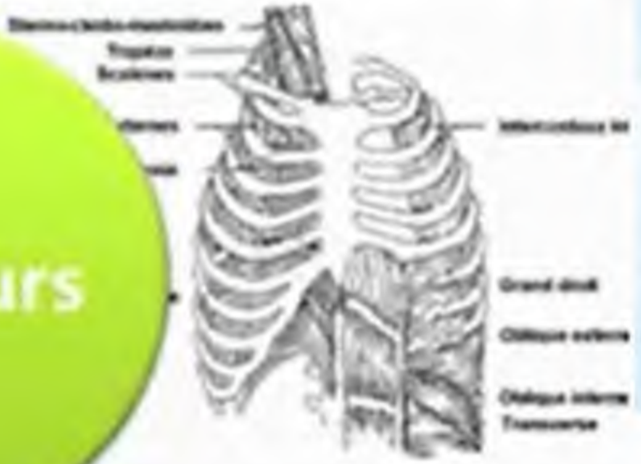
Structures impliquées:

Contrôleurs centraux = Centres respiratoires



- Chémorécepteurs (pH, PO_2, PCO_2)
- Mécanorécepteurs

Récepteurs → Effecteurs → Δ Ventilation



Muscles respiratoires

Contrôle nerveux de la respiration:

Centres respiratoires du tronc cérébral Situé dans le tronc cérébral.

Deux localisations distinctes:

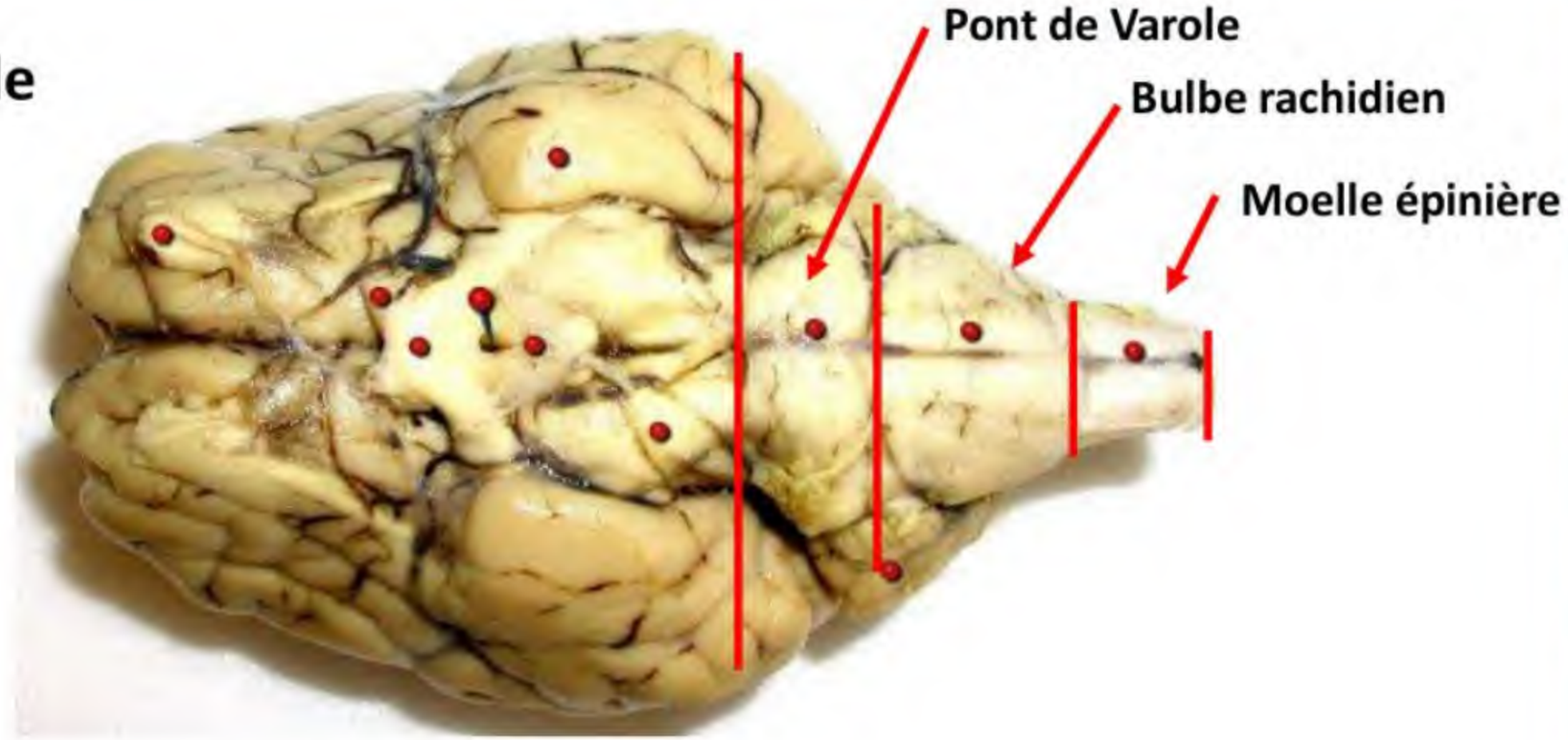
i- Bulbe rachidien (centres bulbaires):

- Groupe respiratoire dorsal.
- Groupe respiratoire ventral.

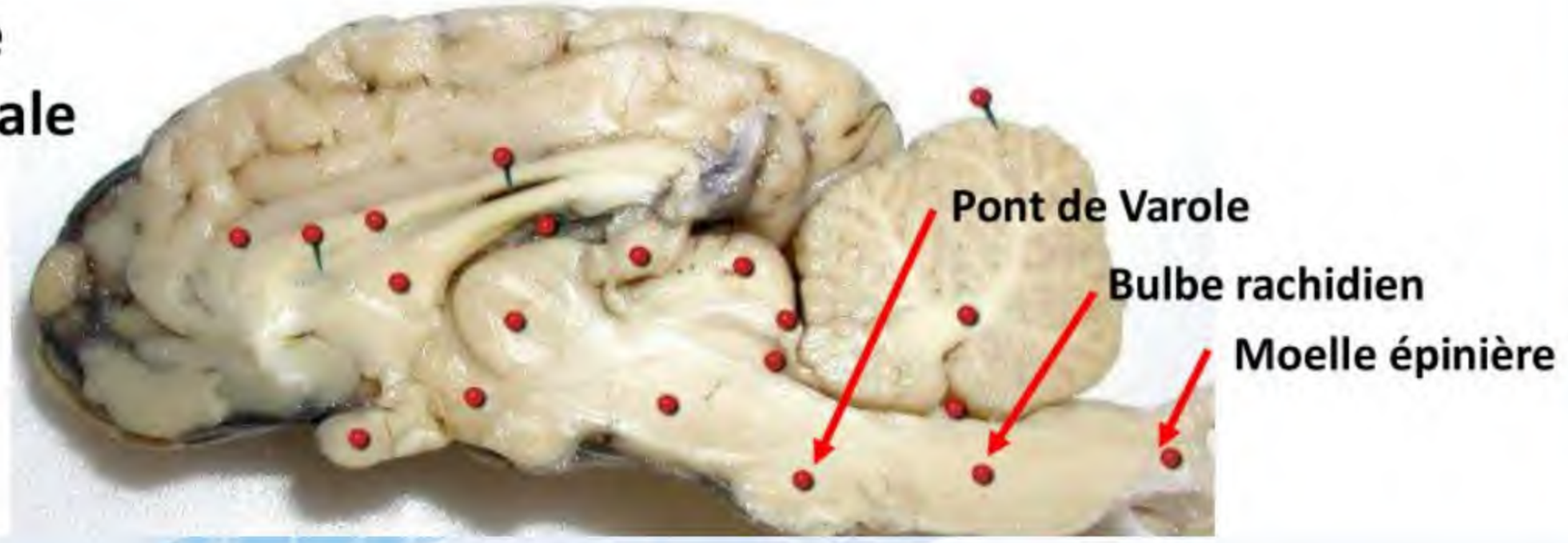
ii- Pont (centres de la protubérance):

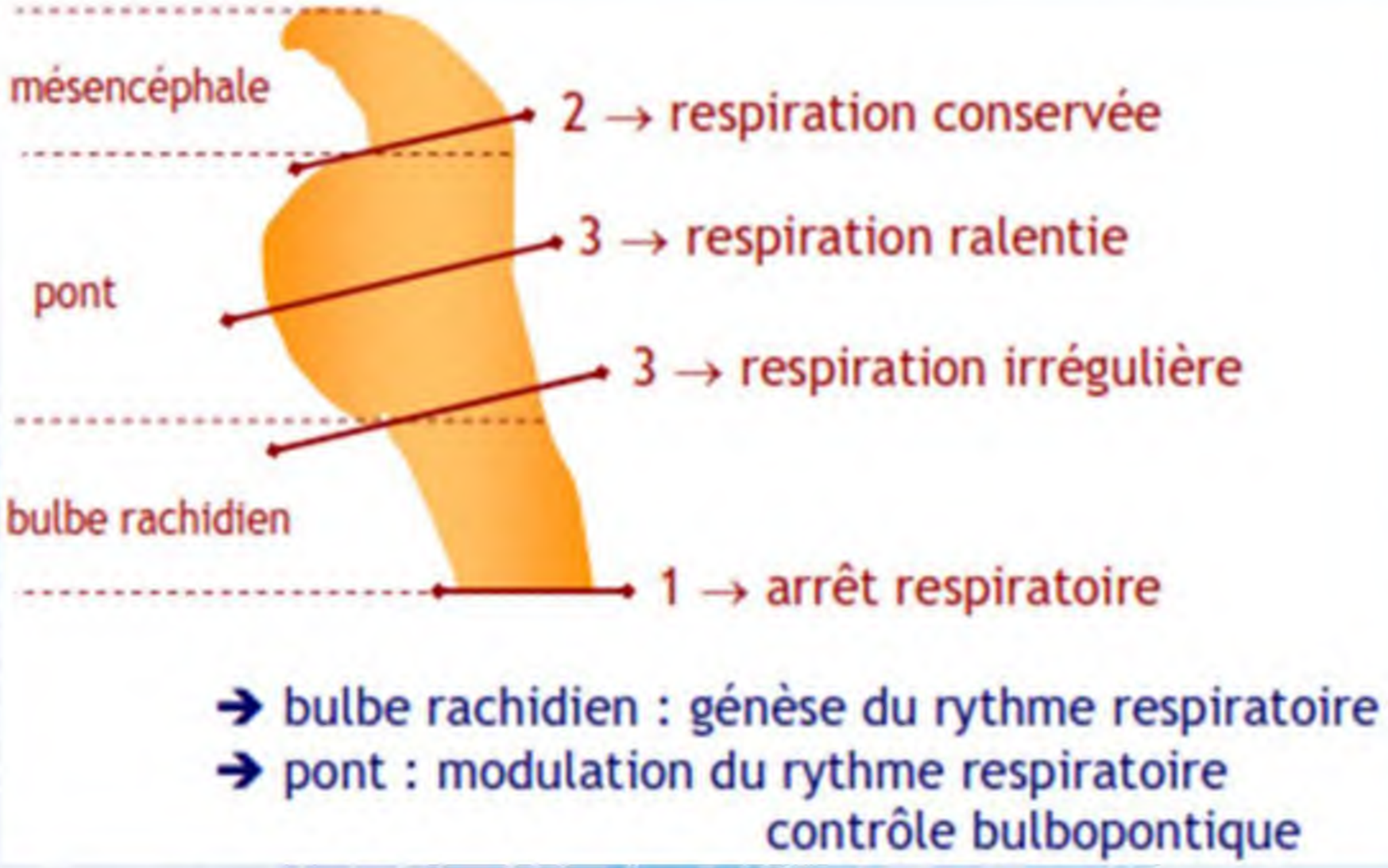
- Centre apneustique,
- Centre pneumotaxique.

Vue Ventrale



Coupe Saggitale





Mise en évidence des centres respiratoires: les expériences des sections étagées (LUMSDEN, 1923)

1- Centres respiratoires bulbaires:

Groupe respiratoire dorsal (GRD):

i. Neurones inspiratoires (innervent les muscles inspiratoires: Diaphragme (nerf phrénique) muscles intercostaux (nerf intercostal).

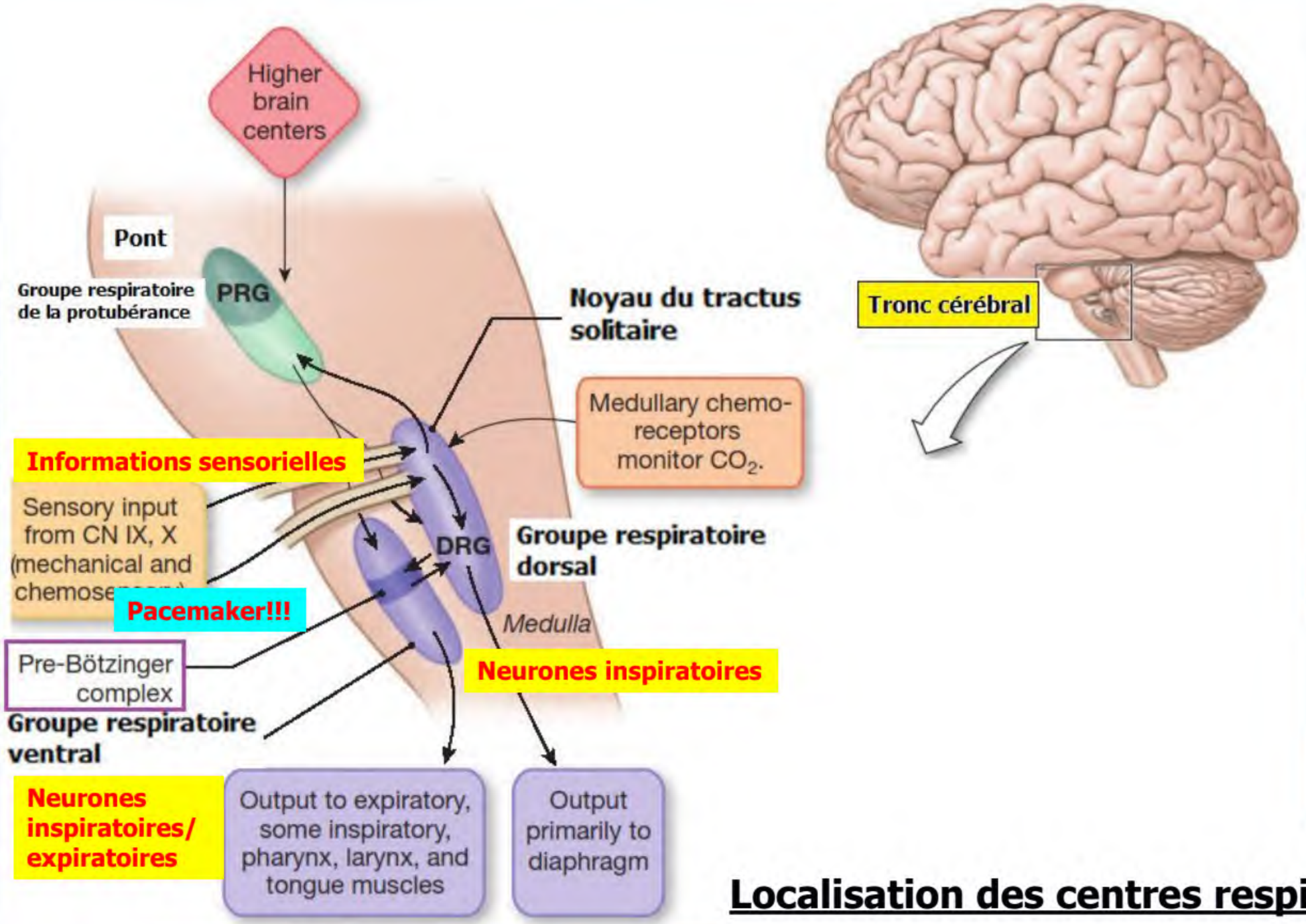
ii. Reçoivent des informations sensorielles à partir des chémo et mécanorécepteurs périphériques.

Groupe respiratoire ventral (GRV):

i. Complexe de pré-Bötzinger: Activité pacemaker .

ii. Neurones inspiratoires et expiratoires.

iii. Actif uniquement pendant la respiration forcée.



Localisation des centres respiratoires

2- Centres respiratoires de la protubérance:

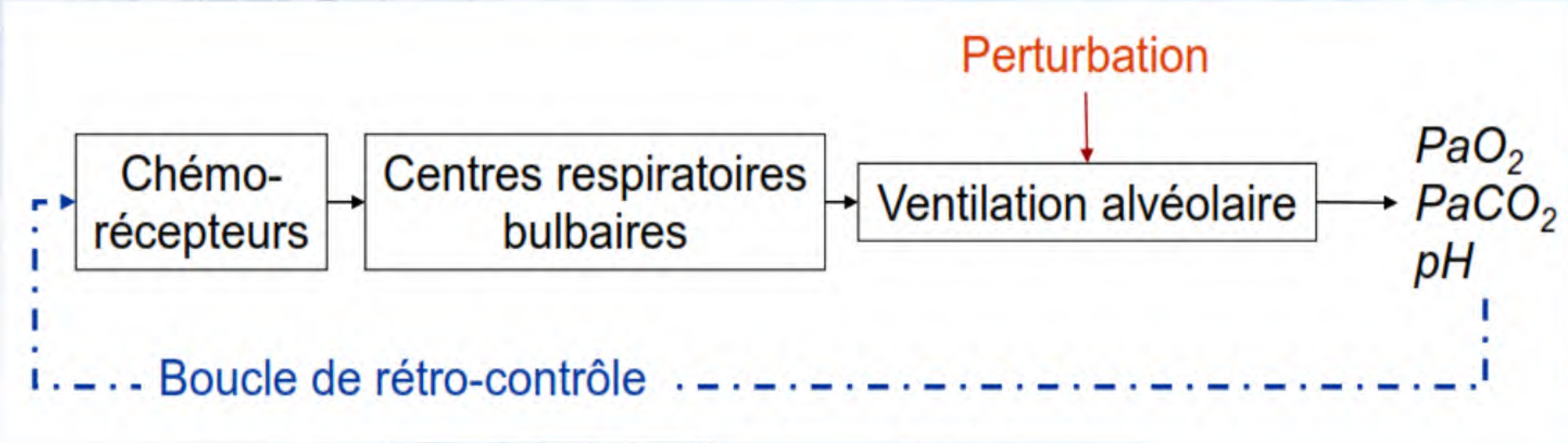
Assurent le réglage précis des centres bulbaires pour une ventilation harmonieuse.

1. Centre pneumotaxique: module l'activité des centres bulbaires en fonctions d'informations centrales et périphériques.

2. Centre apneustique: qui s'oppose à l'inhibition des neurones inspiratoire (prolonge l'inspiration).

Contrôle chimique de la ventilation:

- La ventilation est ajustée d'une façon reflexe aux besoins de l'organisme.
  - Trois facteurs chimiques: P_{O_2}, P_{CO_2} et le pH influencent la réponse respirafoire.



a: variation du pH sanguin.

équation d'Henderson-Hasselbalch

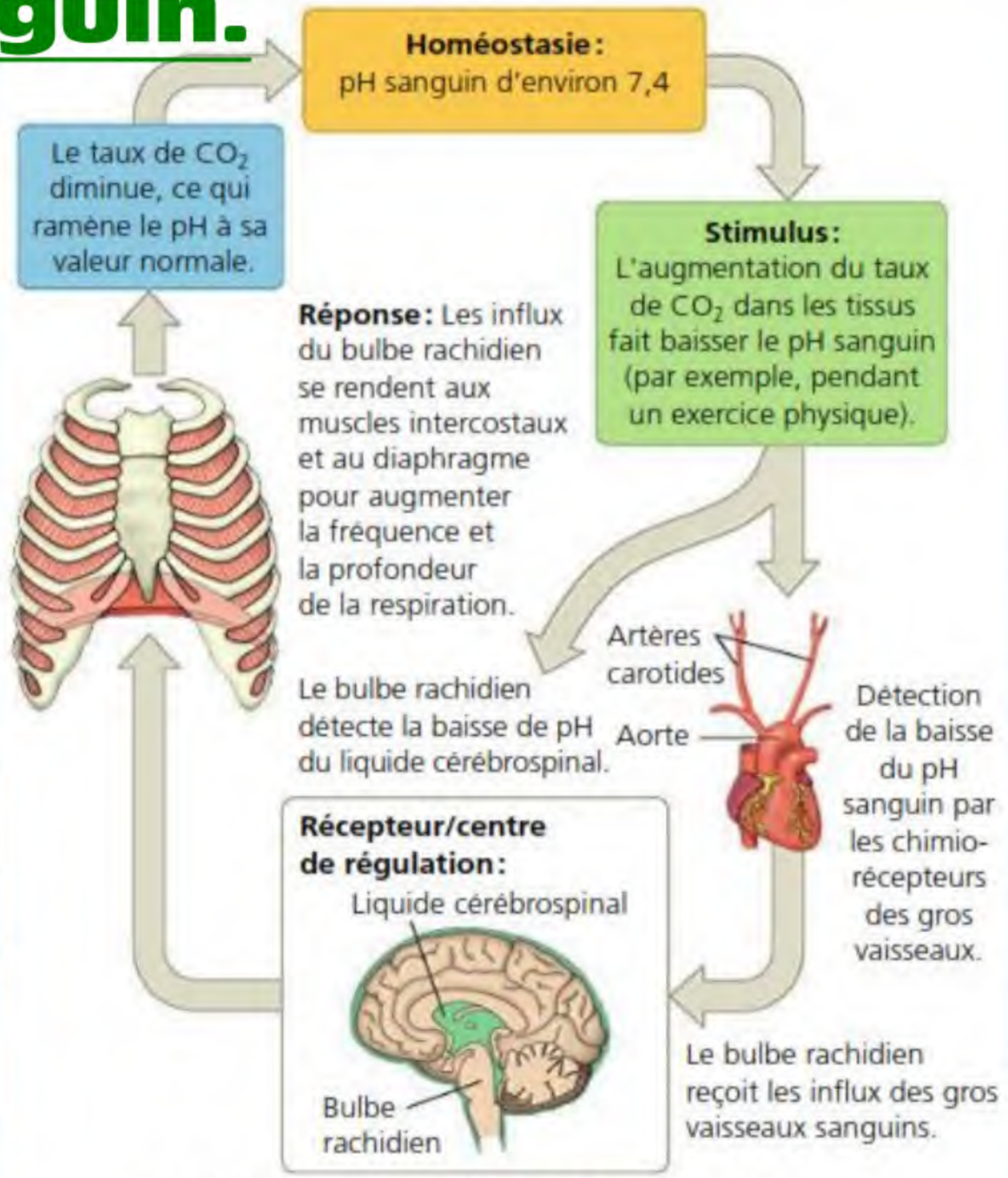
$$pH = 6{,}1 + \log \frac{[HCO_3^-]}{PCO_2 \times 0{,}03}$$

si $PaO_2 \downarrow$ ou $PaCO_2 \uparrow \rightarrow$ Hyperventilation

si $PaO_2 \uparrow$ ou $PaCO_2 \downarrow \rightarrow$ Hypoventilation

si pH $\downarrow \rightarrow$ Hyperventilation

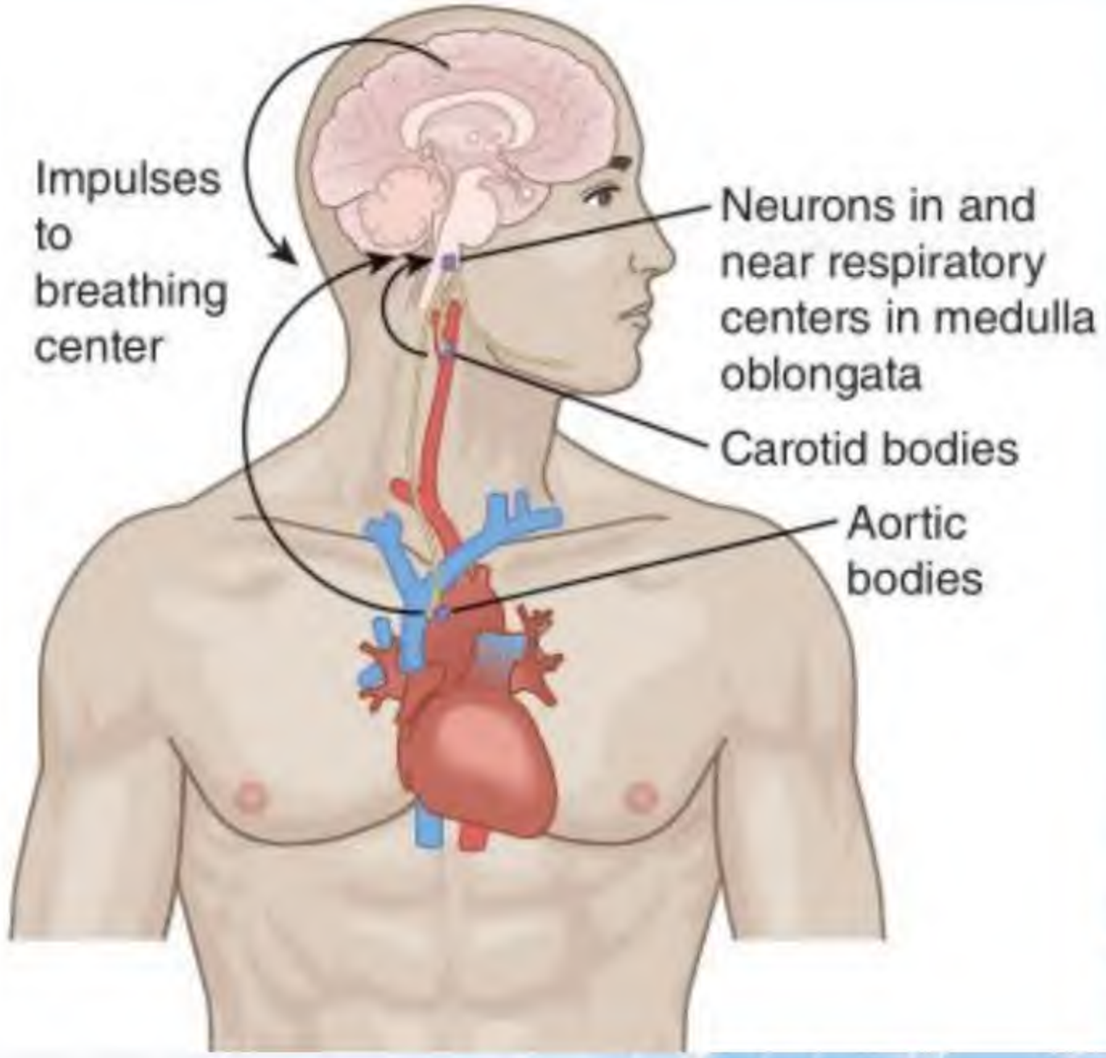
si pH $\uparrow \rightarrow$ Hypoventilation

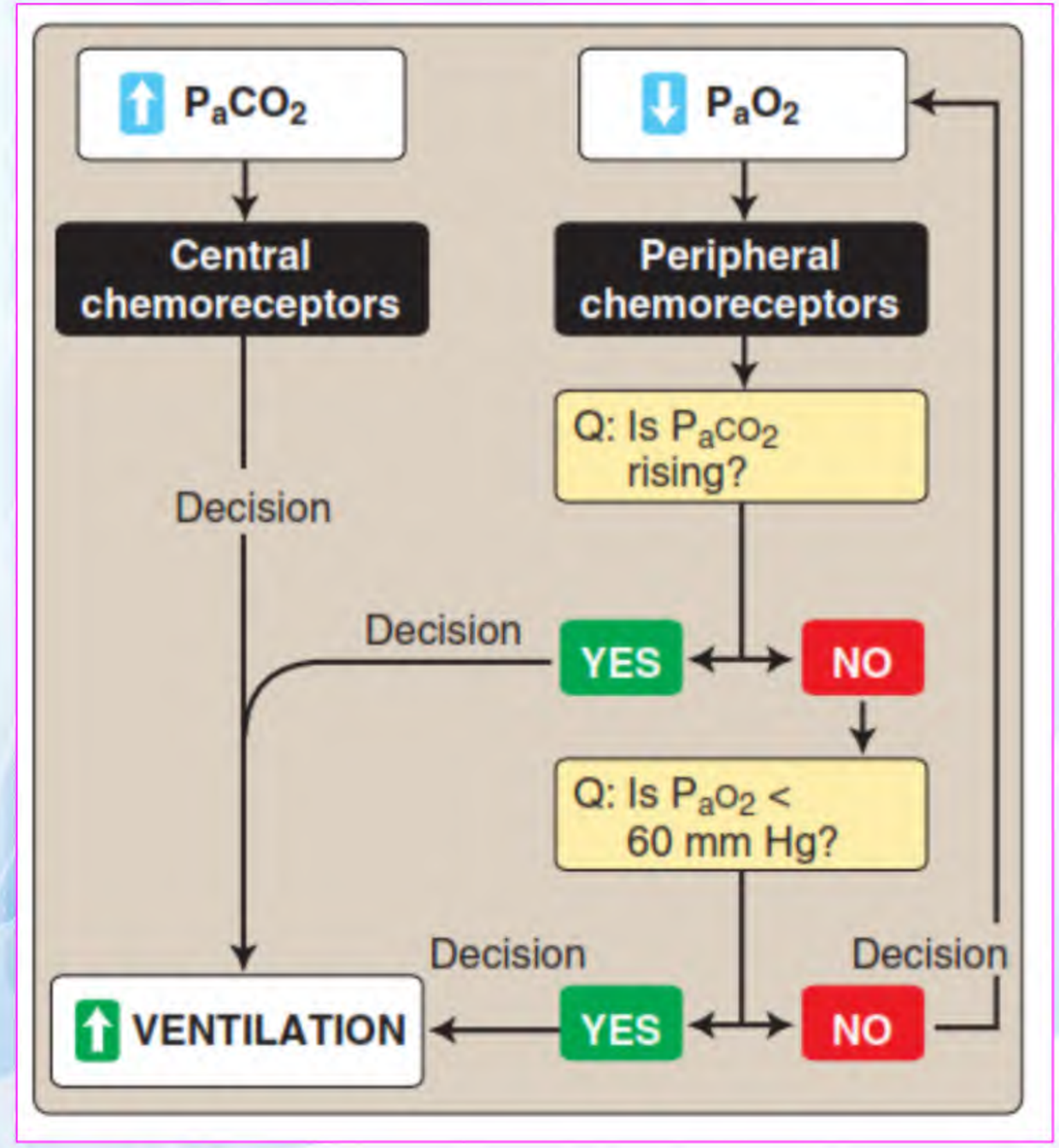


La régulation homéostatique de la respiration.

b: Forte baisse de la P_{O_2}

- Chémorécepteurs périphériques (carotide et crosse aortique): surveillent en permanence la P_{O_2}.
- Ces chémorécepteurs ne sont stimulés que si la P_{O_2} baisse en dessous de 60 mmHg. Ils envoient des influx afférents aux neurones inspiratoires du bulbe entrainant l'augmentation de la ventilation.
- Ce reflexe constitue un mécanisme d'urgence quand la P_{O_2} est dangereusement abaissée et ne joue pas un rôle dans la régulation permanente de la ventilation.


Impulses to breathing center
Neurons in and near respiratory centers in medulla oblongata
Carotid bodies
Aortic bodies


P_aCO_2
P_aO_2
Central chemoreceptors
Peripheral chemoreceptors
Q: Is P_aCO_2 rising?
Decision
Decision
YES
NO
Q: Is P_aO_2 < 60 mm Hg?
Decision
Decision
VENTILATION
YES
NO

c: Forte augmentation de la PCO2

La P_{CO_2} artérielle est le signal le plus important dont dépend l'importance de la ventilation au repos.

i. Chémorécepteurs périphériques:

- peu sensibles aux changements de la P_{CO_2} ,
- pas de rôle important dans la stimulation reflexe de la ventilation.

ii. Chémorécepteurs centraux:

- Situés prés du bulbe et jouent un rôle crucial dans le contrôle de la ventilation en relation avec la P_{CO_2} artérielle.
- Les ions H^+ formés dans le cerveau à partir du CO_2 sont le principal régulateur de la ventilation.
- L'augmentation de la $[H^+]$ stimule directement les chémorécepteurs centraux, qui à leurs tour stimulent les centres respiratoires.

Barrière hémato-encéphalique: imperméable aux ions H + , les H + du plasma ne peuvent stimuler les chémorécepteurs centraux, qui répondent exclusivement aux ions H^+ formés dans le cerveau à partir du CO_2.

Chémorécepteurs centraux

- Situés à la surface ventrale du bulbe
- Stimulés par les ions H^+ (PCO_2) présent dans le LCR
- Ne sont pas sensibles à la PO_2
- Stimulent les neurones inspiratoires

