

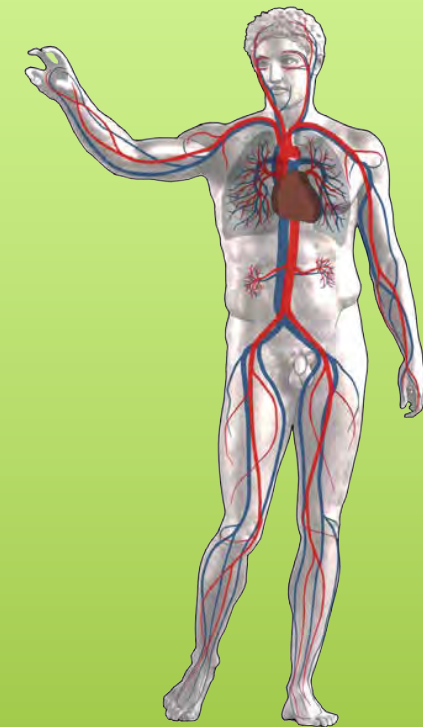


FFESSM

HAUTS-DE  
-SEINE | 92

# Le système ventilatoire

Préparation guide de palanquée niveau 4  
Codep 92



\* **Arnaud Mèlèse** \*  
MF2 n°2032 \*  
Nitrox n°7491 \*

<http://plouf.melese.com>

Version de janvier 2020

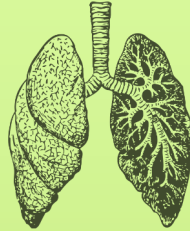
# Objectif

- Le **système ventilatoire** est très sollicité en plongée (ventilation, échanges gazeux, poumon-ballast)
- Il doit s'adapter à des conditions différentes de la surface et variant beaucoup
- Il peut être le siège de divers **accidents** et incidents : ADD, essoufflement, surpression pulmonaire, œdème d'immersion...

*Le **guide de palanquée** doit en comprendre le fonctionnement afin d'adapter son comportement et son briefing lorsqu'il encadre des plongeurs mais aussi lors de son propre entraînement*

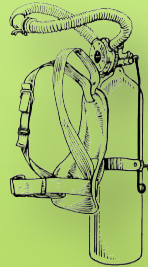


# Le système ventilatoire



## Le système ventilatoire

- anatomie des voies aériennes
- alvéoles pulmonaires
- mécanique ventilatoire
- volumes pulmonaires
- échanges gazeux alvéolaires
- régulation de la ventilation

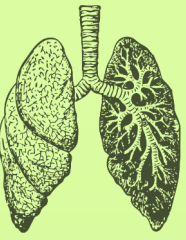


## Adaptation à la plongée

- notion d'espace mort
- shunts pulmonaires
- œdème pulmonaire d'immersion
- les enfants et la plongée
- contraintes et adaptation de la ventilation en plongée

Exemples d'annales d'examen niveau 4





# Le système ventilatoire

- Il permet les **échanges gazeux** avec le mélange respiré :
  - apport d'O<sub>2</sub> à l'organisme
  - évacuation du CO<sub>2</sub> produit
  - élimination du N<sub>2</sub> accumulé en plongée (ou d'autres gaz)

## Définitions

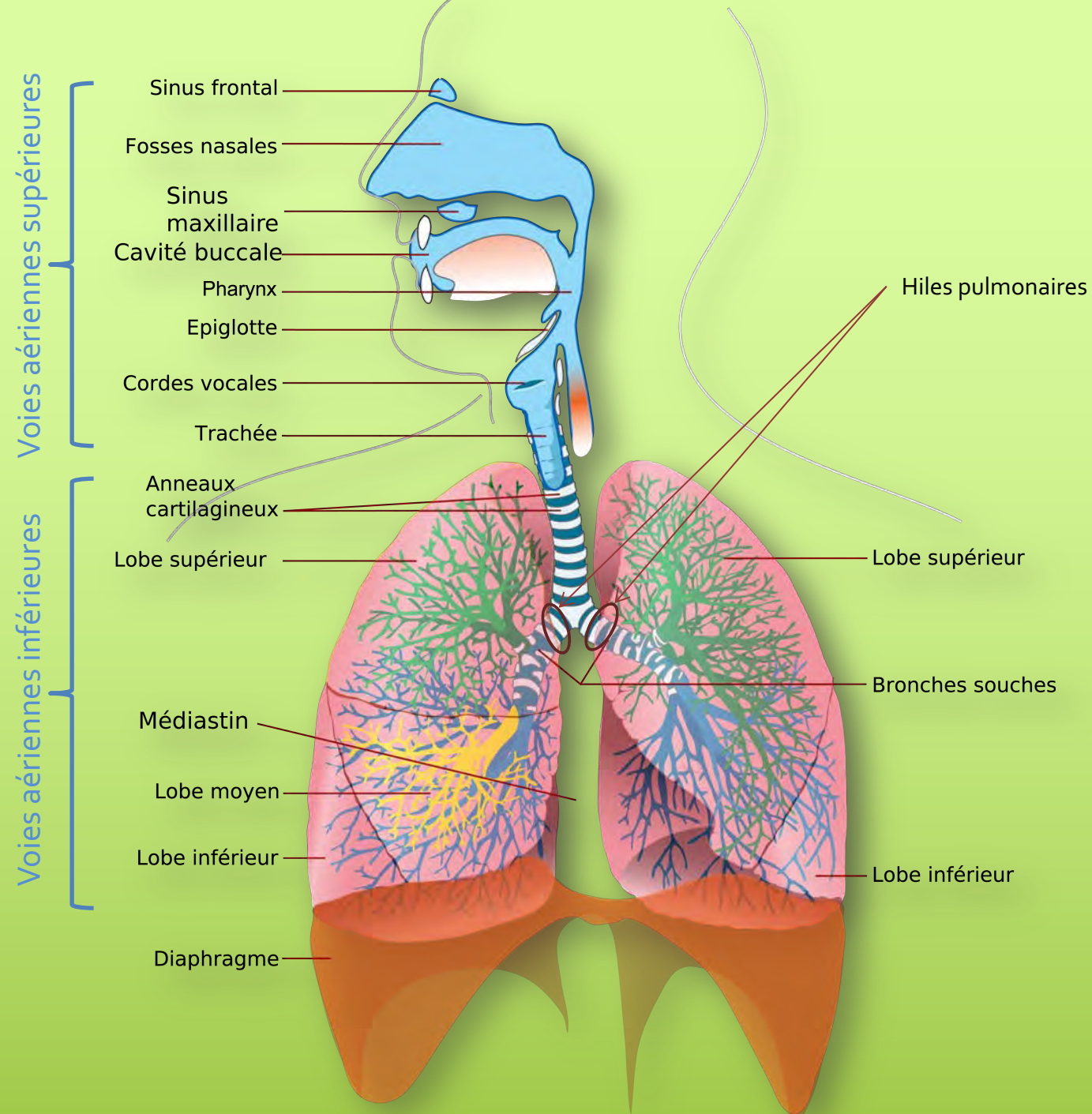
### **Ventilation**

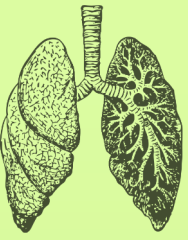
Processus mécanique (soufflet pulmonaire) d'inspiration et d'expiration

### **Respiration**

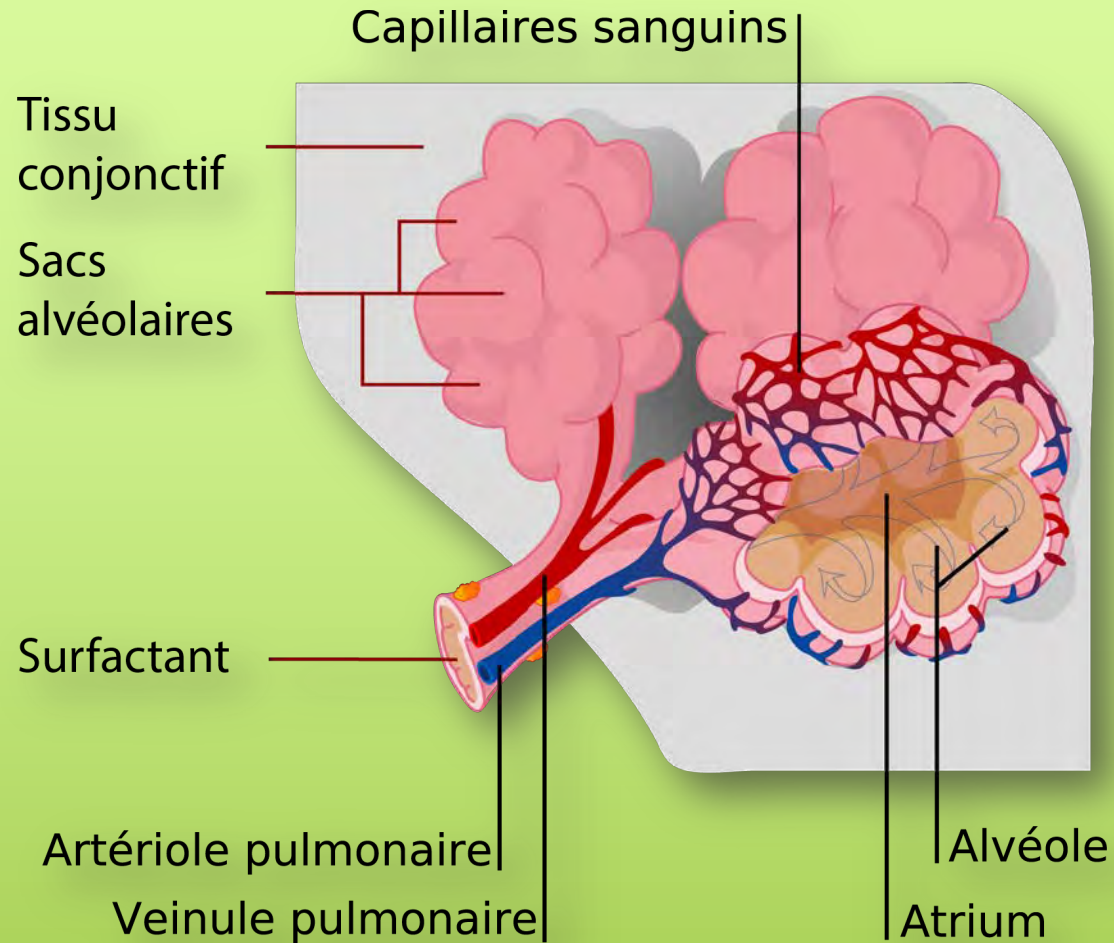
Réaction chimique cellulaire de combustion de l'O<sub>2</sub> produisant de l'énergie et du CO<sub>2</sub>

# Anatomie des voies aériennes

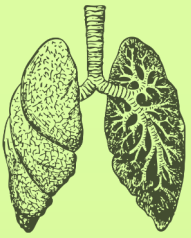




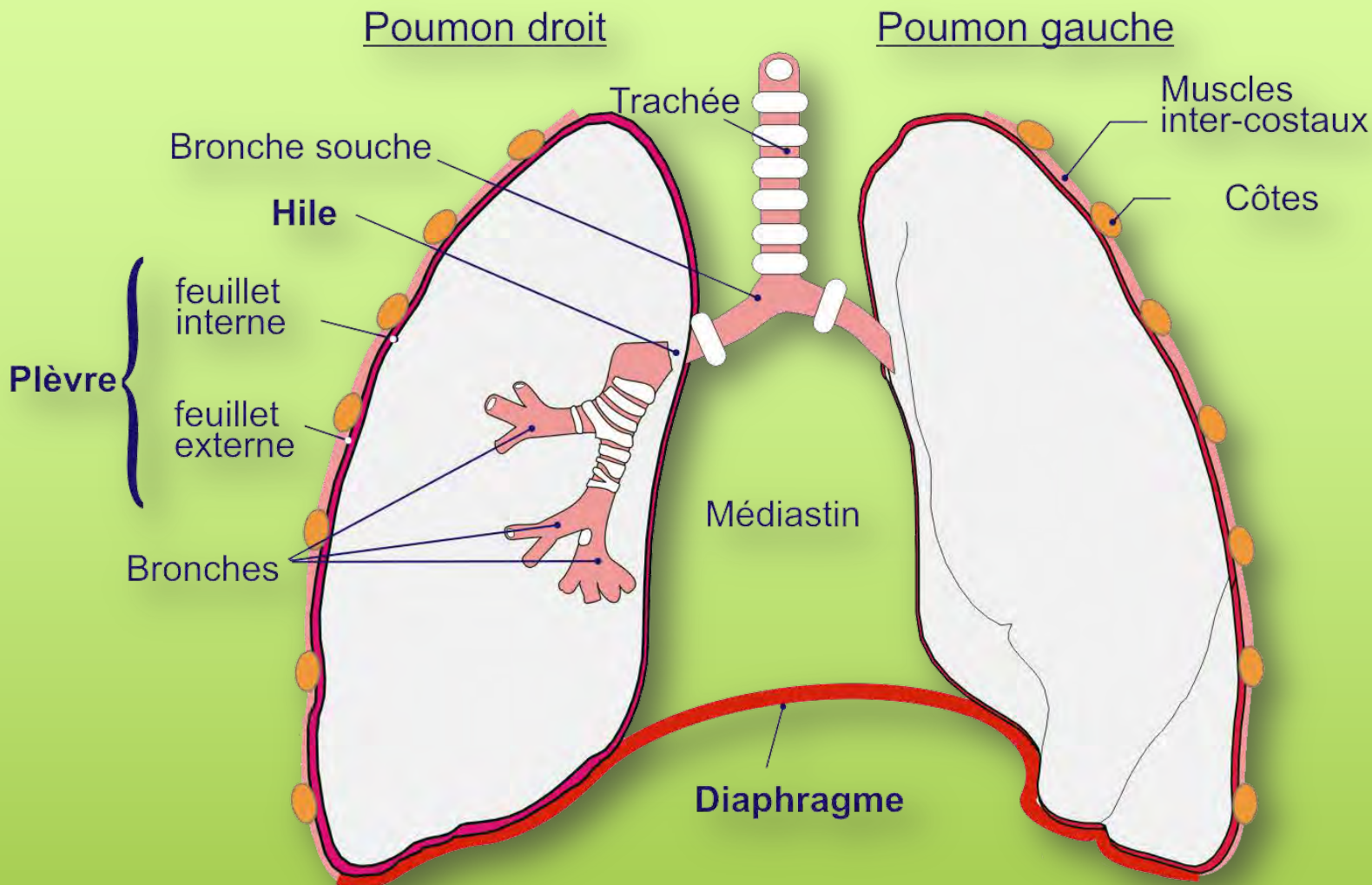
# Alvéoles pulmonaires



- Sièges des échanges entre les gaz de l'air et ceux du sang (**hématose**)
- Situées à l'extrémité des bronchioles et regroupées en sacs alvéolaires elles sont séparées des capillaires par la **membrane avéolo-capillaire**
- Elles sont tapissées de **surfactant** qui assure leur maintien et favorise les échanges gazeux
- Aplatis, elles auraient une surface d'environ  $150 \text{ m}^2$

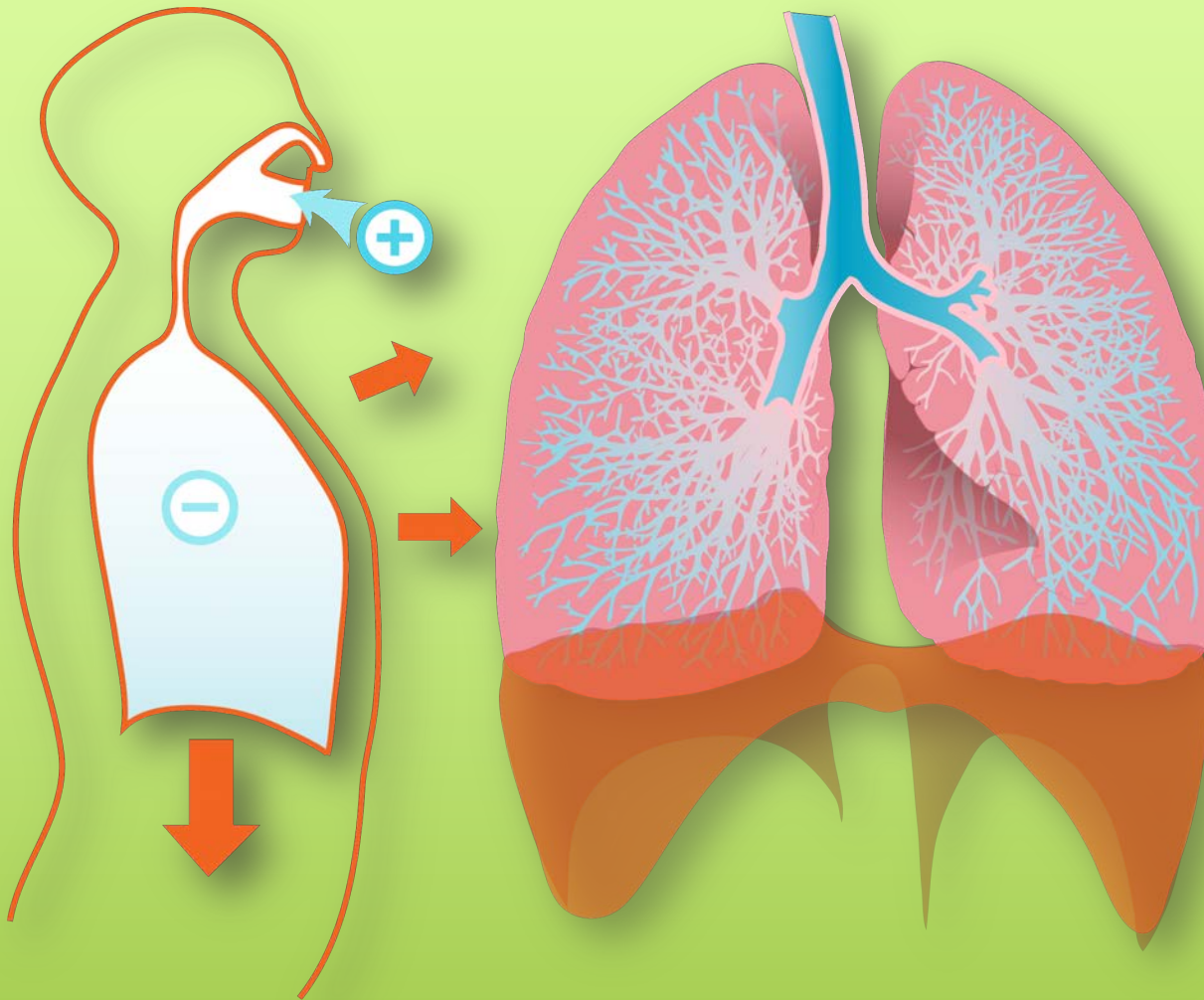
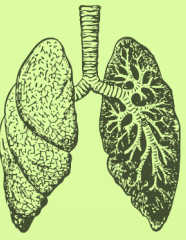


# Mécanique ventilatoire



- **Cage thoracique**  
Délimitée par les côtes, la colonne vertébrale et le diaphragme
- **Hile**  
Orifice de passage des vaisseaux sanguins pulmonaires, bronches, vaisseaux lymphatiques et nerfs ; zone de fragilité
- **Plèvre**  
Composée de 2 feuillets (viscéral et pariétal) séparés par un liquide assurant solidarité et lubrification

# Mécanique ventilatoire : inspiration

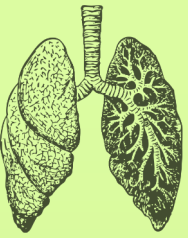


- Elle est **active** : contraction du diaphragme et des muscles intercostaux créant une dépression qui fait pénétrer l'air dans les poumons

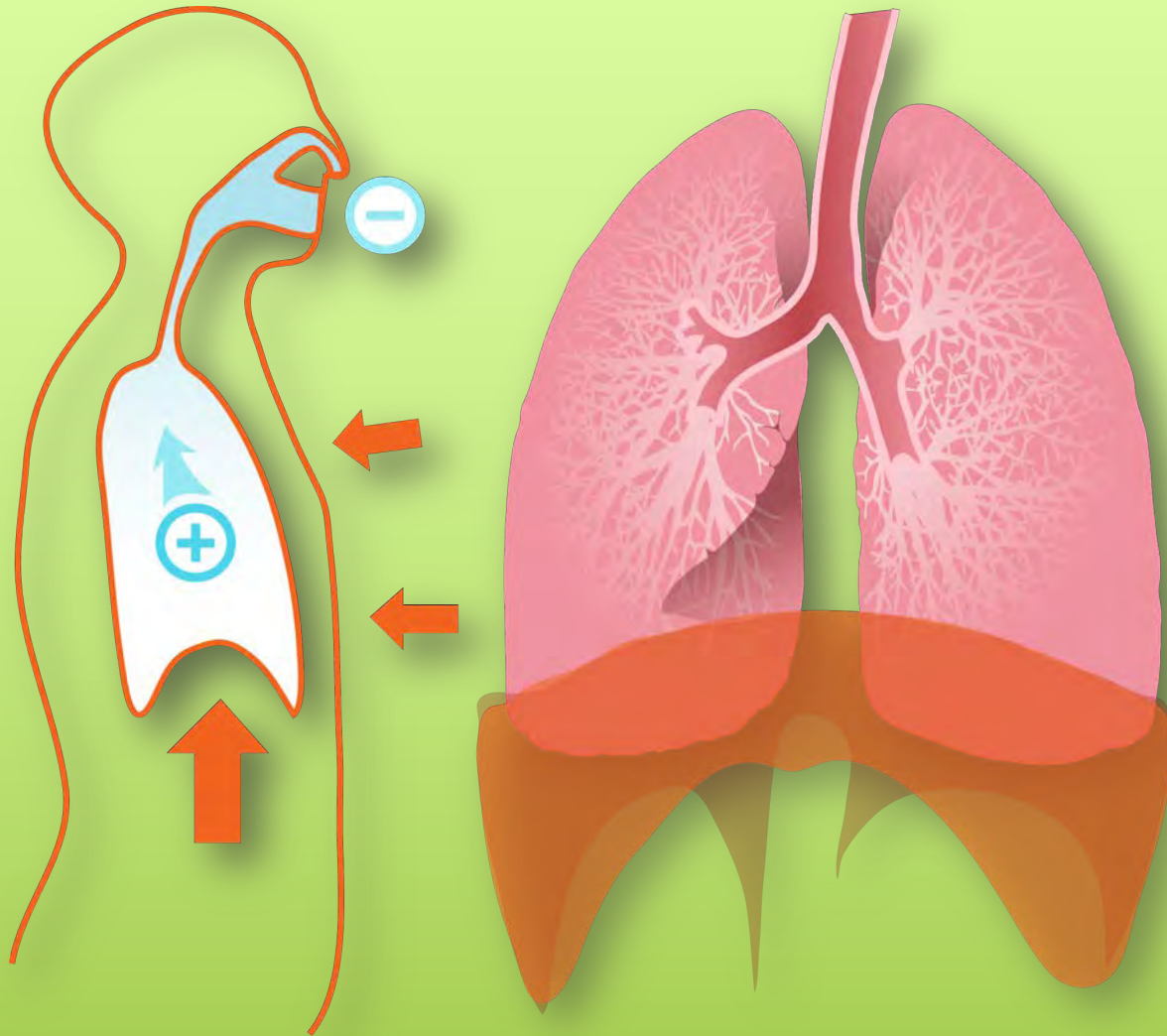
L'air inspiré est réchauffé et humidifié par les fosses nasales, puis arrive aux bronches, bronchioles et alvéoles pulmonaires

→ *pas en plongée !*

*En plongée, l'effort inspiratoire est augmenté par la ventilation sur détendeur, la combinaison, la ceinture de lest*



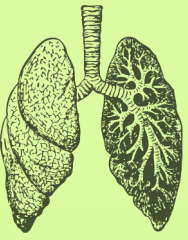
# Mécanique ventilatoire : expiration



- Elle est **passive** en surface (relâchement des muscles)

→ *pas en plongée*

*Elle devient **active** à cause de la résistance du détenteur*



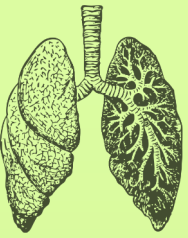
# Les volumes pulmonaires

La fréquence de la ventilation chez l'adulte est de 15 à 20 cycles par minute au repos et 40 à 50 à l'effort. Elle met en jeu les volumes suivants :

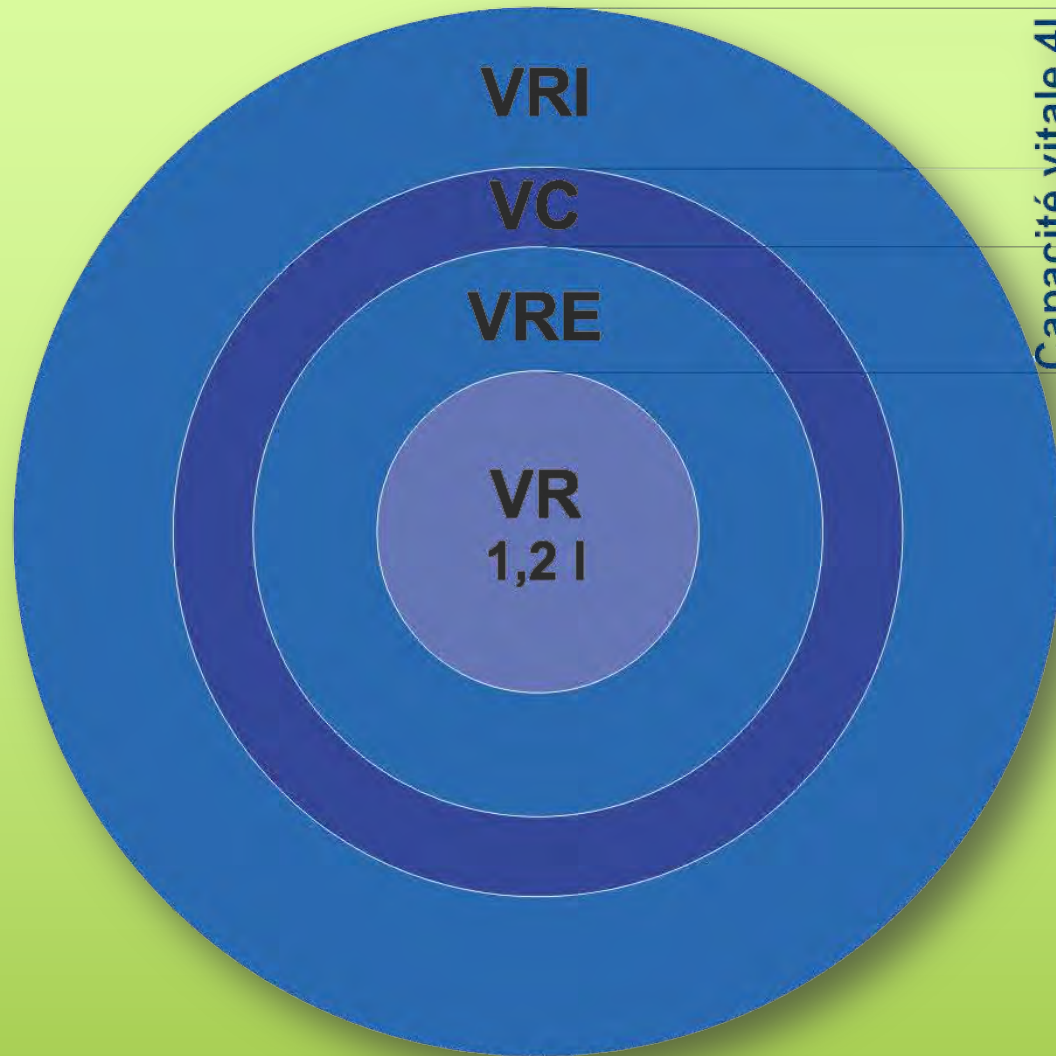
- **Volume courant (VC)** : quantité d'air inspiré ou expiré lors d'une ventilation normale
- **Volume de réserve inspiratoire (VRI)** : volume maximal inspiré après le volume courant lors d'une inspiration forcée
- **Volume de réserve expiratoire (VRE)** : volume maximal d'air rejeté après le volume courant par une expiration forcée
- **Volume résiduel (VR)** : volume restant après une expiration maximale

- **Capacité pulmonaire totale (CT)**

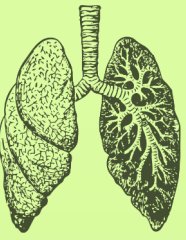
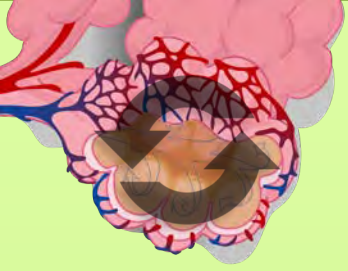
- |   |               |                         |
|---|---------------|-------------------------|
| ↶ | – VRI : 2 l   | } capacité vitale : 4 l |
| → | – VC : 0,5 l  |                         |
| ↷ | – VRE : 1,5 l |                         |
| – | – VR : 1,2 l  |                         |



# Les volumes pulmonaires

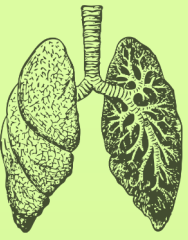
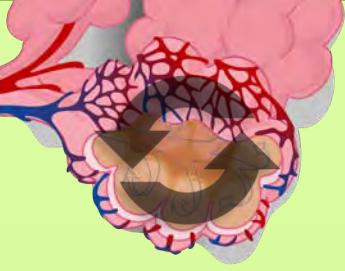


*En plongée, pression ambiante, densité de l'air, dureté du détendeur font que l'on ventile beaucoup sur la capacité vitale, **comme à l'effort en surface...** (mais à une fréquence inférieure)*



# Les échanges gazeux

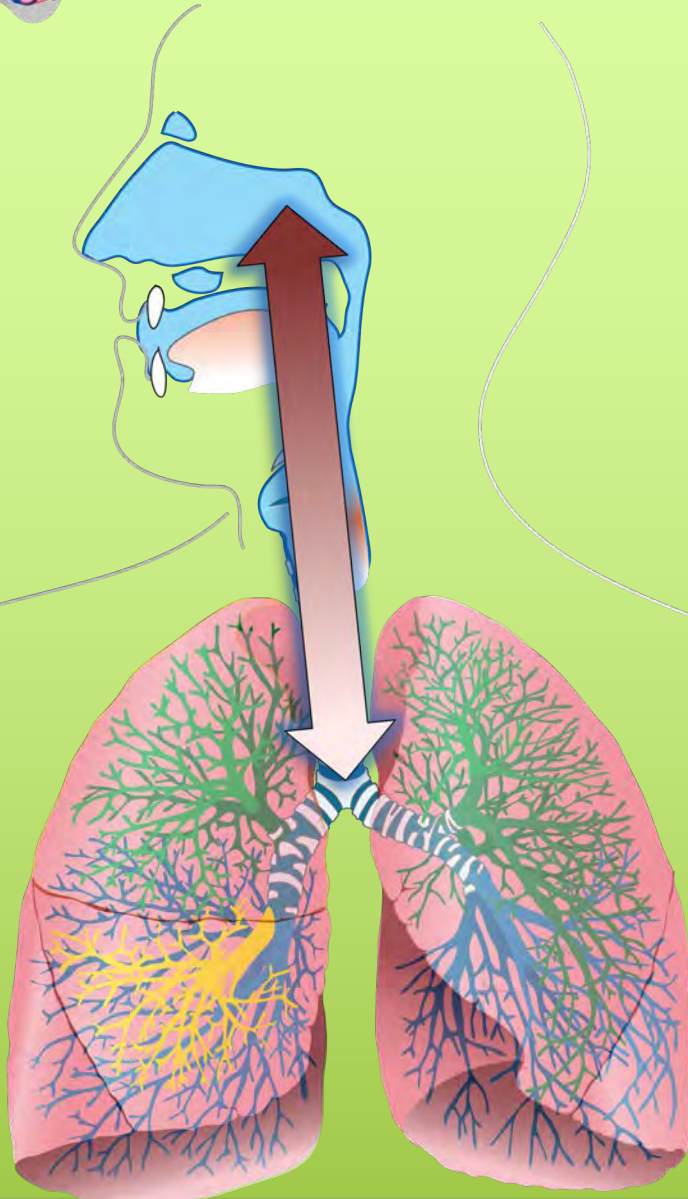
- Les **alvéoles** sont le siège des échanges entre les gaz ventilés et ceux du sang
- Le moteur de ces échanges est la **diffusion** :
  - un gaz diffuse d'une zone de pression partielle élevée vers une zone de pression partielle plus basse
  - les différents gaz d'un mélange se comportent indépendamment les uns des autres
- La diffusion des gaz dépend notamment des gradients de pression, de la surface d'échange, de la nature des gaz, du temps d'exposition
- Les gaz qui auront diffusé dans le sang seront apportés aux organes par **perfusion**



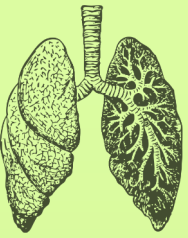
# Espace mort anatomique

- L'espace mort anatomique crée un gradient entre l'air inspiré et l'air alvéolaire
- À pression constante, la composition de l'air alvéolaire est constante (mais différente de l'air inspiré)

*La  $P_{pCO_2}$  alvéolaire, qui ne provient que de l'organisme, est constante en fonction de la profondeur*



# Espace mort anatomique et composition de l'air alvéolaire



## Air atmosphérique

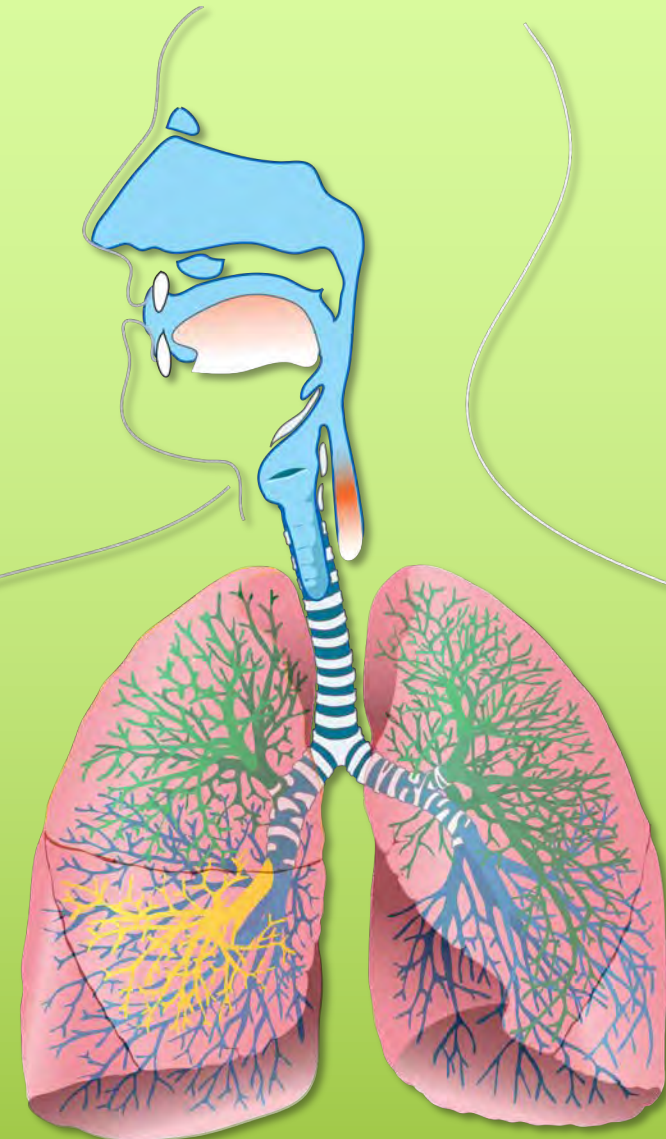
$O_2 = 160 \text{ mmHg (21 \%)}$   
 $CO_2 = 0,2 \text{ mmHg (0,03 \%)}$   
 $N_2 = 600 \text{ mmHg (79 \%)}$

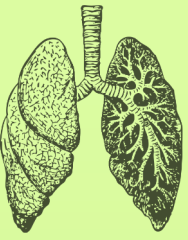
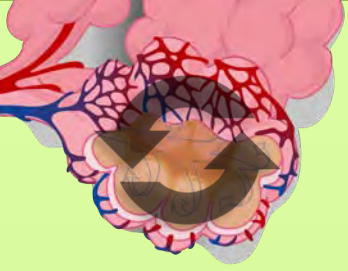
## Air expiré

$PpO_2 = 115 \text{ mmHg}$   
 $PpCO_2 = 33 \text{ mmHg}$   
 $PpH_2O = 47 \text{ mmHg}$   
 $PpN_2 = 565 \text{ mmHg}$

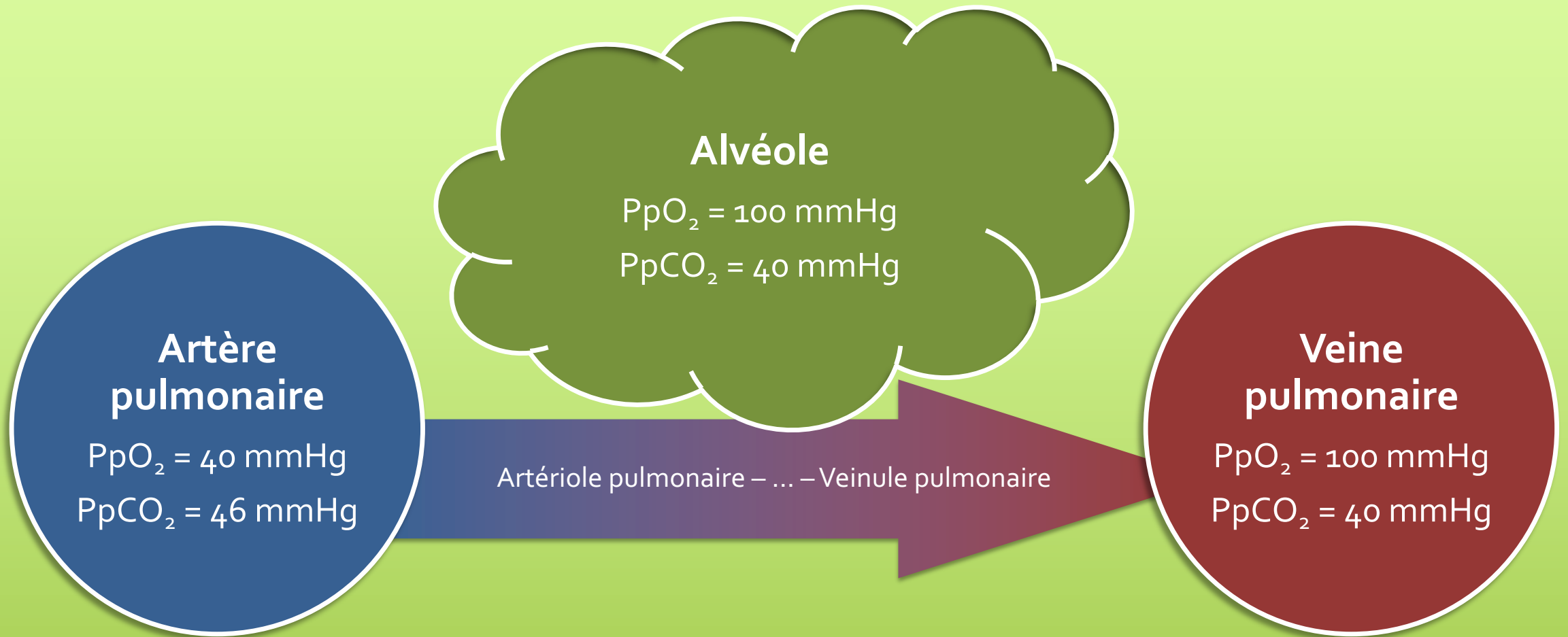
## Air alvéolaire

$PpO_2 = 100 \text{ mmHg}$   
 $PpCO_2 = 40 \text{ mmHg}$   
 $PpH_2O = 47 \text{ mmHg}$   
 $PpN_2 = 573 \text{ mmHg}$

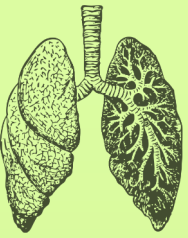




# La diffusion alvéolo-capillaire



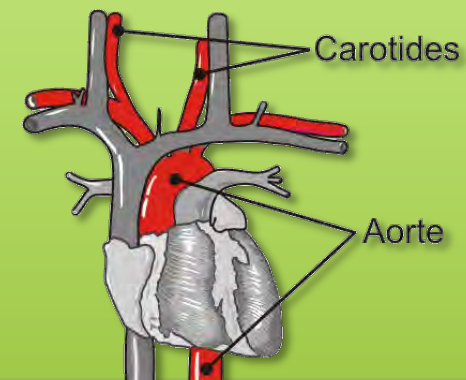
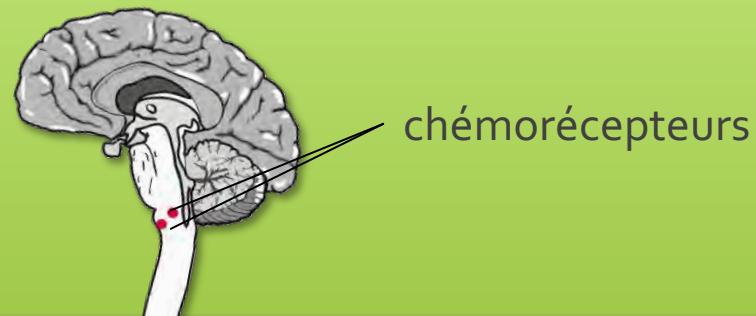
Durée des échanges : ~0,75 sec



# Régulation de la ventilation

Automatisme contrôlé par le **bulbe rachidien** (BR) et qui peut être modulé

- Les **chémorécepteurs** centraux (BR) et périphériques (artère aorte et carotides) sont sensibles aux variations de  $PCO_2$  et  $PCO_2 + PO_2$  : une augmentation de la  $PCO_2$  ou une diminution de la  $PO_2$  stimule la ventilation et provoque une vasodilatation périphérique ; une augmentation de la  $PO_2$  la ralentie et provoque une vasoconstriction
- L'**exercice**, par augmentation de la température stimule la ventilation (tout comme le **froid**)
- Les **réflexes** peuvent interrompre momentanément la ventilation (éternuement, émotions...)
- La **volonté**, lors d'une apnée par exemple, peut contraindre, dans une certaine limite, la ventilation

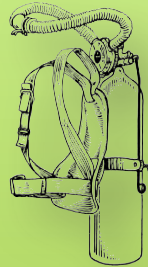


# Le système ventilatoire



## Le système ventilatoire

- anatomie des voies aériennes
- alvéoles pulmonaires
- mécanique ventilatoire
- volumes pulmonaires
- échanges gazeux alvéolaires
- régulation de la ventilation



## Adaptation à la plongée

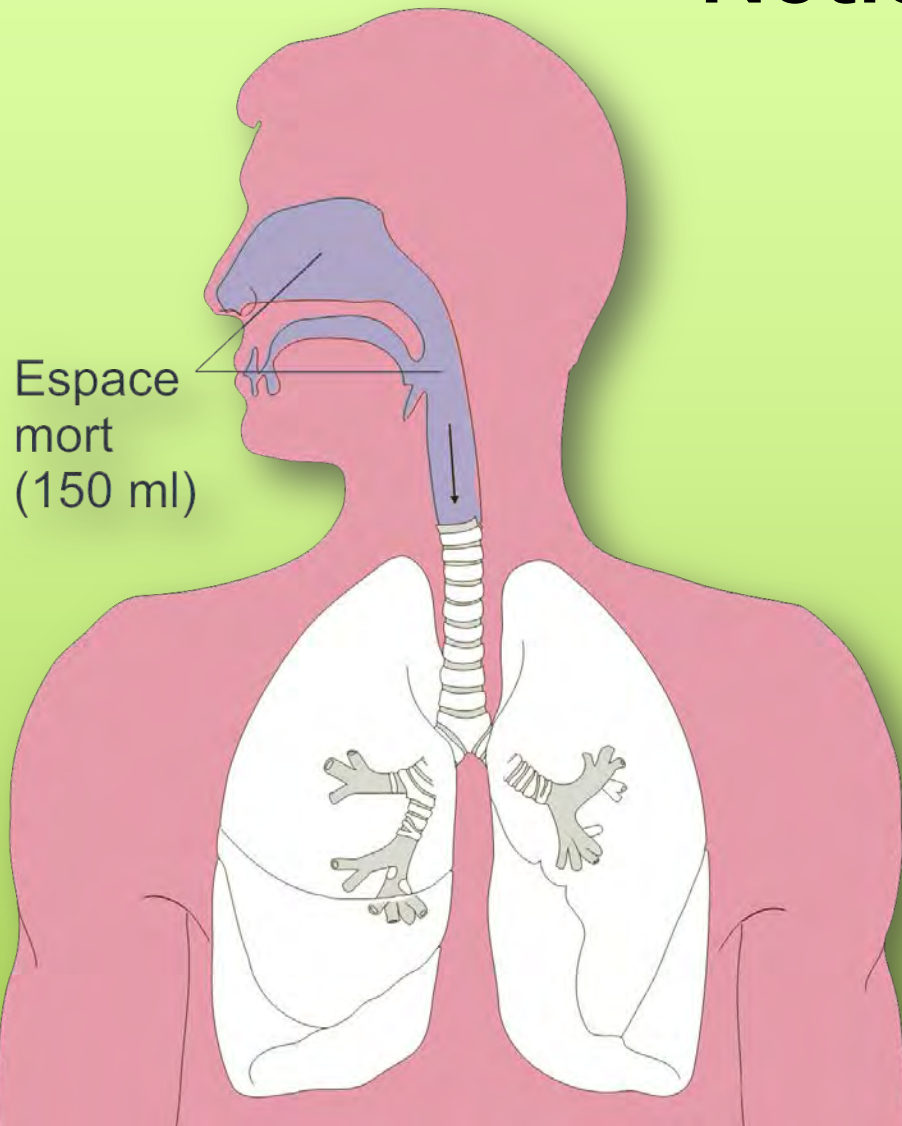
- notion d'espace mort
- shunts pulmonaires
- œdème pulmonaire d'immersion
- les enfants et la plongée
- contraintes et adaptation de la ventilation en plongée

Exemples d'annales d'examen niveau 4





# Notion d'espace mort

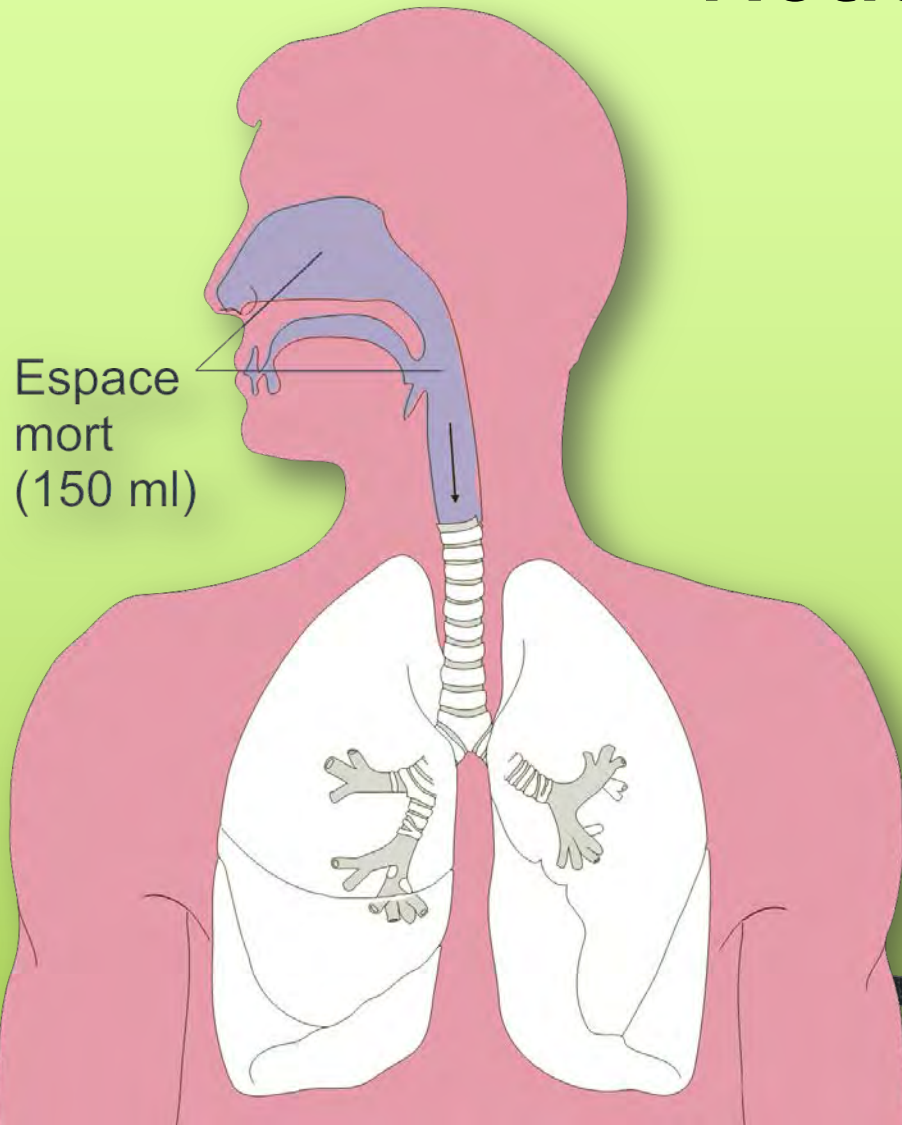


- L'air contenu dans l'espace mort anatomique n'est pas complètement renouvelé... et c'est celui qu'on inspire en premier
- Il représente 0,15 l d'air sur les 0,5 l du volume courant

→ *il y a seulement 0,35 l d'air « frais » disponible à l'inspiration*



# Notion d'espace mort



Espace mort  
(150 ml)

- En plongée s'y ajoute l'air contenu dans le détendeur ou dans le tuba

**→ pour éviter l'essoufflement, privilégier l'expiration nasale et une ventilation de grande amplitude avec un rythme lent**





# Shunts pulmonaires

Au niveau de la petite circulation, il arrive parfois que le sang provenant du cœur ne soit pas perfusé. On parle de shunt artériovoineux ou **shunt pulmonaire**.

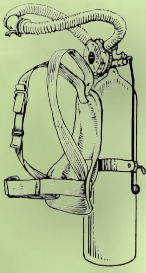
Causes anatomiques

Cela apparaît dans plusieurs cas :

- lésion du tissu pulmonaire → l'alvéole est irriguée mais n'est pas ventilée
- vascularisation imparfaite des alvéoles → les capillaires n'irriguent pas les alvéoles
- ouverture de shunts veineux causée par une augmentation de la pression intrathoracique

Cause comportementale

*Le sang retournant au cœur n'est pas hématosé et les bulles de circulantes retournent dans la grande circulation au lieu d'être évacuées ce qui peut favoriser l'apparition d'ADD*



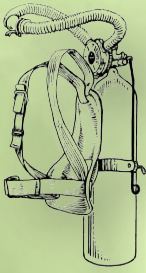
# Œdème pulmonaire d'immersion



L'**OPI** est dû à une défaillance de la barrière alvéolo-capillaire avec passage du contenu des capillaires pulmonaires (plasma ou même éléments figurés) dans les alvéoles, engendrant une détresse respiratoire

- **Causes**

- Augmentation de pression dans les capillaires (« blood shift », effort, Valsalva) combinée à une **faiblesse des parois pulmonaires** (O<sub>2</sub>, froid, Nitrox, aqua-stress...)
- Favorisé par l'**âge** (>45 ans), le tabac, individualité (faiblesse cardiaque ou pulmonaire)



# Œdème pulmonaire d'immersion

- **Symptômes**

Ils peuvent apparaître à n'importe quel moment de la plongée.

Ils sont similaires à ceux de la SP (dyspnée, toux, crachats de sang), mais, à la différence de la SP, il n'y a pas de symptôme neurologique

- **Conduite à tenir**

Sortie d'eau, prévenir le DP, mise sous O<sub>2</sub> et appel des secours

*Essoufflement au palier ??  
SP sans mauvais paramètres ???*



# Les enfants et la plongée

Les poumons des enfants ne sont complètement développés que vers 18 ans.

Ils sont plus résistants à l'écoulement des gaz et moins bien ventilés, augmentant les risques d'essoufflement et de surpression pulmonaire.

*(Sans parler de la sensibilité au froid...)*

**→ Limitation des conditions de plongée des enfants et attention particulière**



# Les contraintes de la ventilation en plongée

- **Plongeur**
  - « blood shift » (limite l'amplitude ventilatoire)
  - condition physique et physiologique (entraînement, fatigue...)
  - stress
- **Matériel**
  - résistance du détendeur
  - ventilation buccale (air froid et sec)
  - combinaison (compresse la poitrine)
  - ceinture de lest (limite l'inspiration)
  - espace mort augmenté
- **Milieu**
  - froid
  - pression ambiante plus importante qu'à la surface
  - densité de l'air en profondeur (limite le débit des voix aériennes)



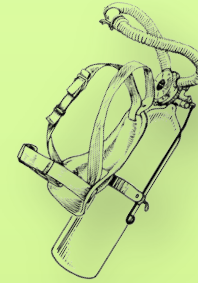
# Adapter sa ventilation à la plongée

*Le travail ventilatoire est plus important durant la plongée, et encore plus pendant un effort en immersion*

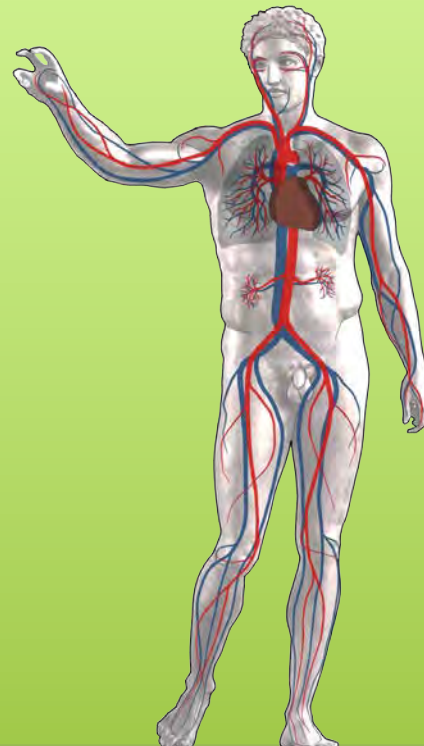
## → Adaptations et optimisations nécessaires

- pratiquer un entraînement régulier (sport, nage et plongée)
- optimiser son équipement (taille, poids)
- adapter ses efforts (courant)
- adapter sa ventilation aux efforts et à la profondeur : rythme ample et lent, forcer sur l'expiration

**Le guide de palanquée doit transmettre les bons messages**



# Exemples de sujets d'examen



# Exemples de sujets d'examen

## Question 4 : 3 pts

En quoi la plongée modifie-t-elle la ventilation ?

Quelles sont les perturbations ventilatoires que l'utilisation du détendeur provoque ?

Quelles perturbations sont dues à l'effet de la pression ?

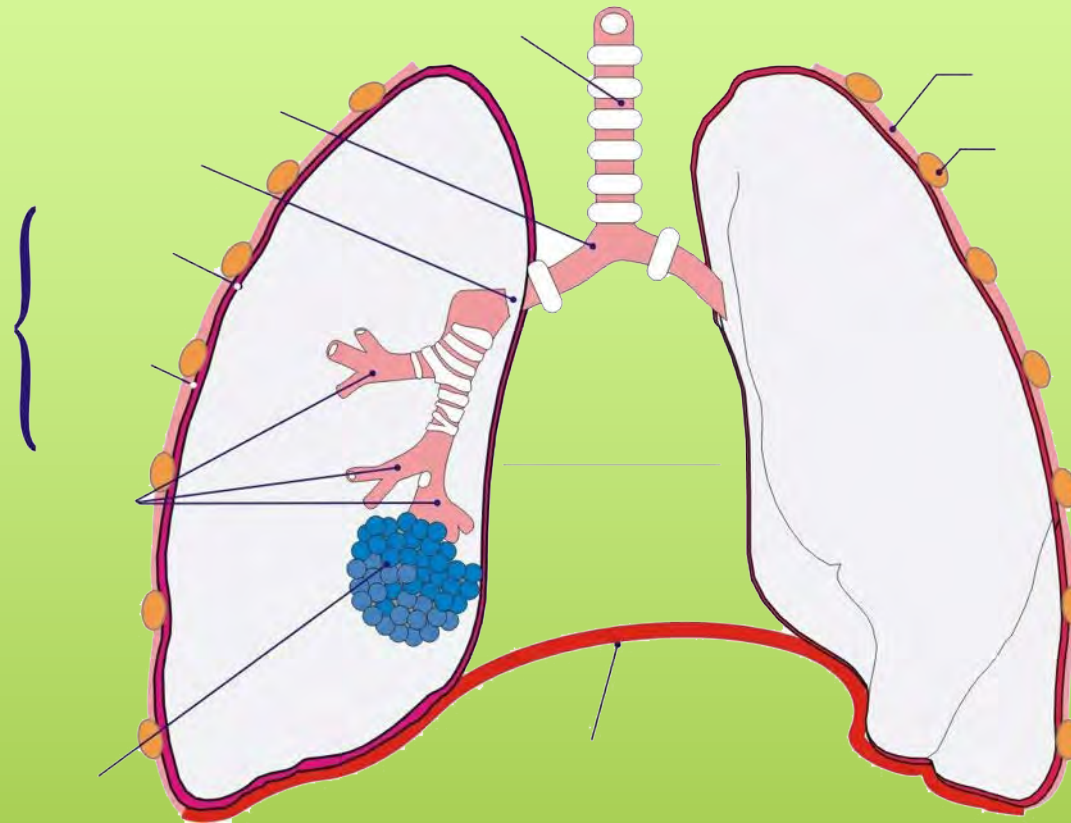
Comment le plongeur doit-il adapter sa ventilation pour diminuer ses perturbations ?



# Exemples de sujets d'examen

Question n°1 (6 points)

Annoter et commenter le schéma suivant :





C'est fini, merci !