



LA VENTILATION

PHYSIOLOGIE 2

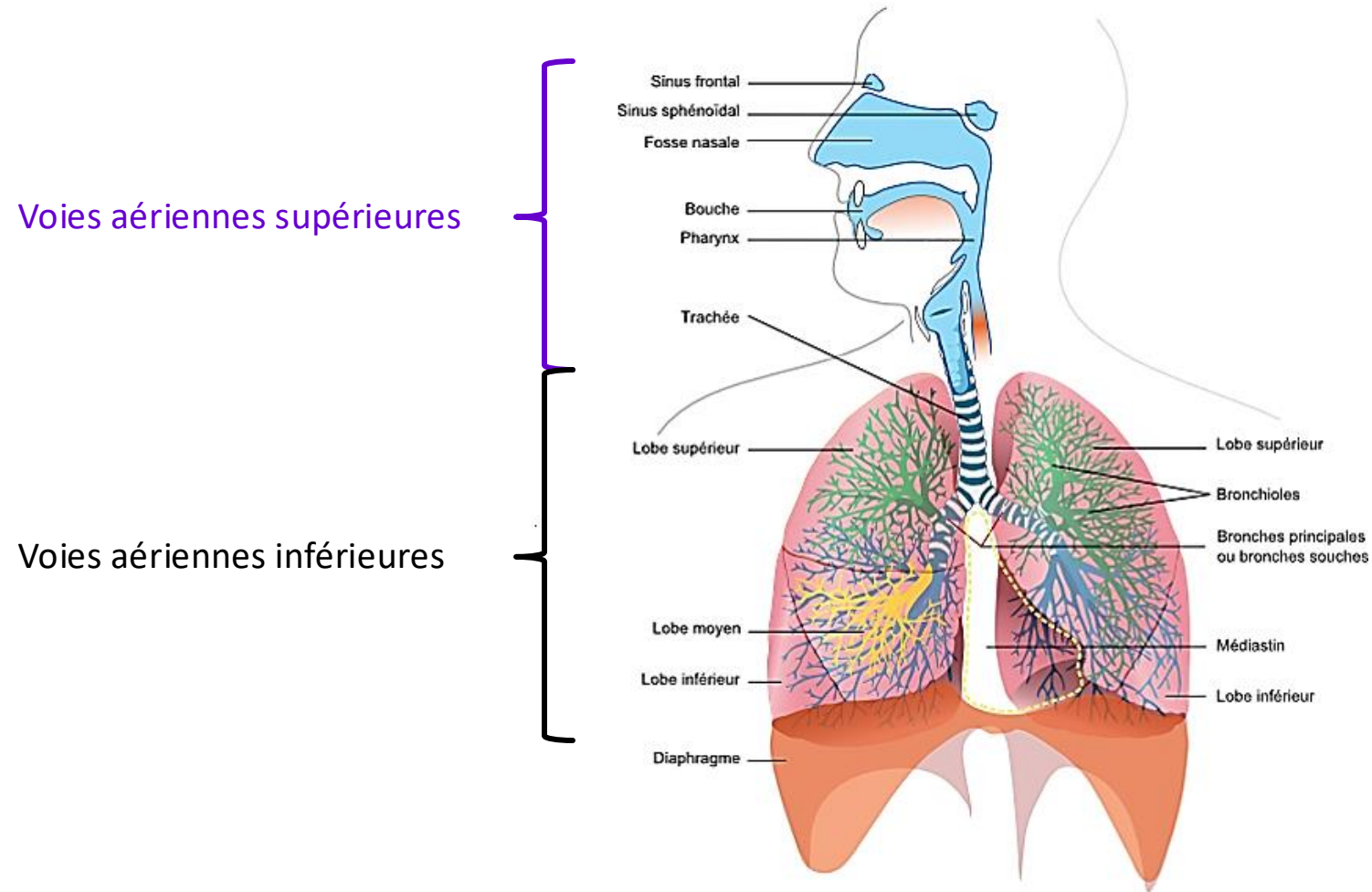
FORMATION GP – SAISON 2024 2025

OBJECTIFS DE CE COURS

- Comprendre les mécanismes ventilatoires
- Notions d'anatomie de l'appareil ventilatoire
- Mécanismes ventilatoires :
 - Inspiration, expiration, muscles concernés.
 - Volumes pulmonaires.
- Échanges gazeux alvéolo-capillaires
- Modifications de la ventilation en immersion et conséquences
- En tant qu'encadrant, vous devez comprendre, expliquer et surtout **prévenir** les possibles complications liées à la pratique de la plongée
- Adapter votre comportement pour vous-même et votre palanquée

L' APPAREIL VENTILATOIRE

- Le système ventilatoire se décompose en 2 parties

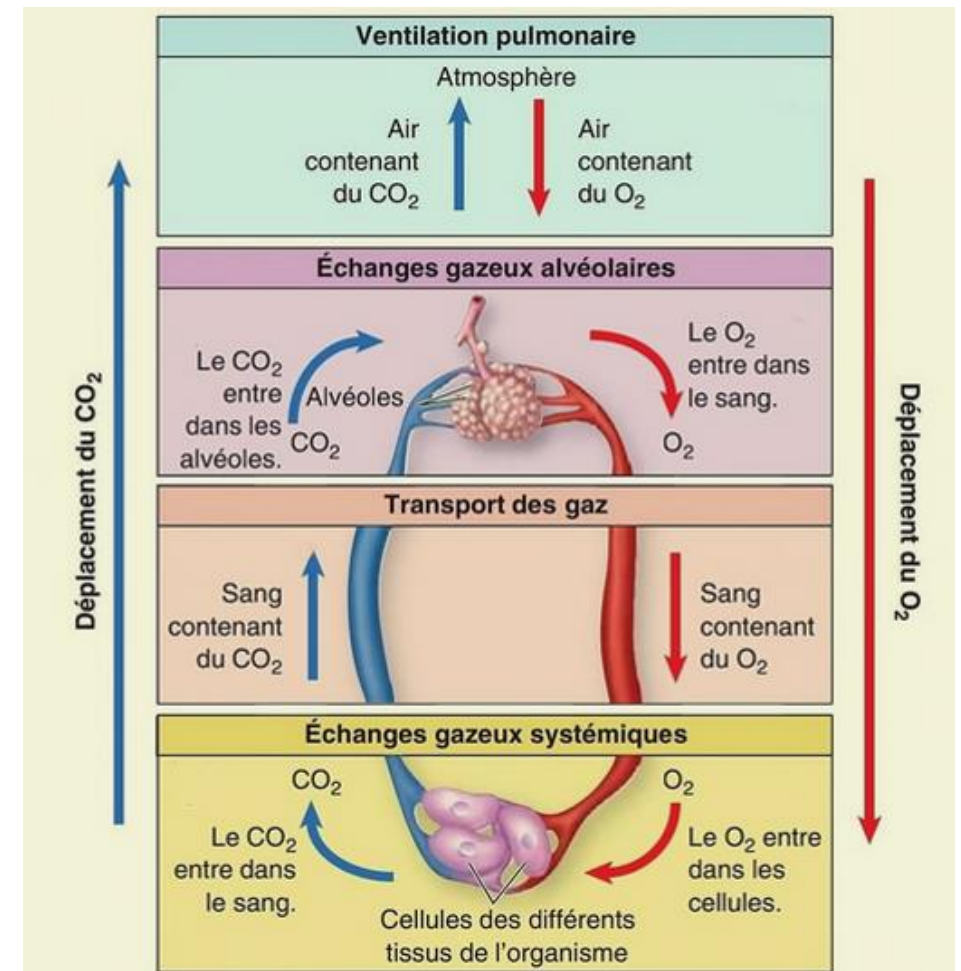


<https://www.youtube.com/watch?v=tYTbbPSGIHk>

VENTILATION ET RESPIRATION

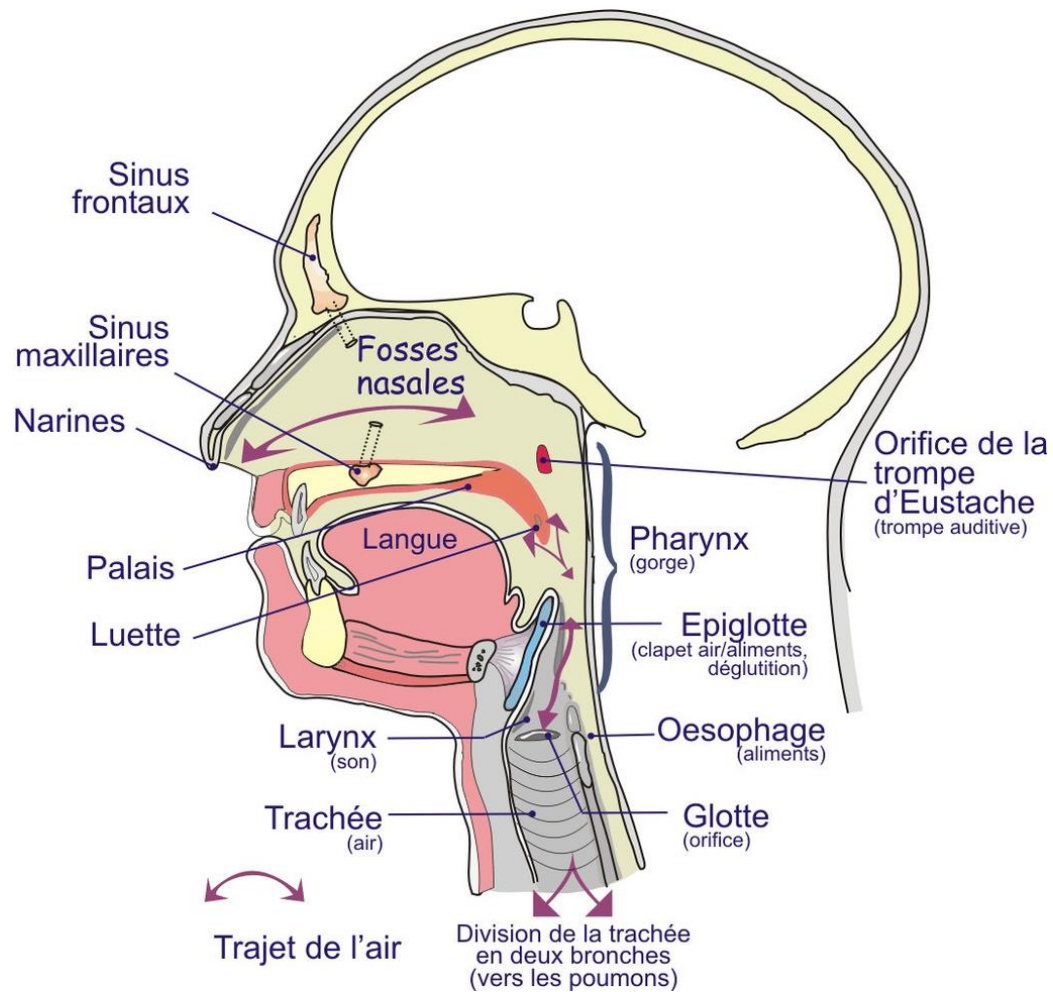
Ventilation et respiration :
2 étapes d'un continuum, 2 processus liés

VENTILATION	RESPIRATION
Processus mécanique	Processus biologique
Assure le renouvellement de l'air dans les poumons.	- Echanges gazeux : Alvéoles ↔ circulation sanguine ↔ cellules
Elle correspond à l'entrée d'air et de sortie de l'air des poumons.	- Processus cellulaire qui conduit à la production d'énergie par consommation de l'O₂ et production de CO₂
Elle comporte l'inspiration et l'expiration.	



En tant que plongeur, se rajoute les échanges gazeux de N₂

LES VOIES ARIENNES SUPERIEURES

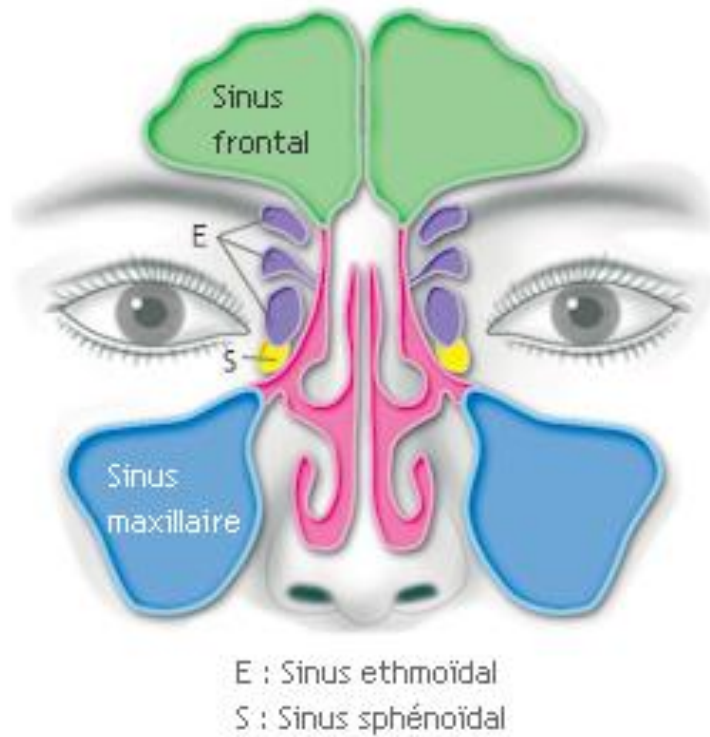


Les voies aériennes supérieures assurent l'écoulement de l'air vers les poumons et inversement

Elles sont composées :

- Les **fosses nasales** : filtrent les particules. Réchauffent et humidifient l'air inspiré.
- Les **sinus**
- Le **pharynx** : zone entre orifice trompe d'Eustache et entrée du larynx / œsophage
A l'extrémité du pharynx se trouve l'**épiglote** : clapet ouvert pendant la respiration. Il ferme la trachée lors de la déglutition
- Le **larynx** : organe cartilagineux. Carrefour entre la trachée et l'œsophage.
- La partie supérieure de la **trachée**

LES SINUS



Les sinus sont des cavités remplies d'air, reliées aux fosses nasales par de minces canaux.

Ils sont tapissés d'une muqueuse vascularisée constituée de cils.

Les sinus allègent la structure osseuse

Les sinus et fosses nasales ont pour fonctions :

- Filtrer les impuretés
- Humidifier l'air respiré
- Réchauffer l'air respiré



Rhume / sinusite : obstruction des canaux.
Risque de barotraumatismes

LES VOIES AERIENNES SUPERIEURES - EN PLONGEE

TRAJET DE L'AIR :

► EN SURFACE :

L'air entre par **les narines** dans les fosses nasales, passe par la gorge (pharynx) avant de passer dans la trachée et atteindre les poumons. L'air est réchauffé et humidifié.

► EN PLONGEE :

L'inspiration se fait **par la bouche**.

L'air n'est ni filtré, ni réchauffé, ni humidifié par la muqueuse nasale et les sinus

L'air contenu dans les des blocs sous pression est sec.
Il est filtré et déshumidifié au niveau du compresseur

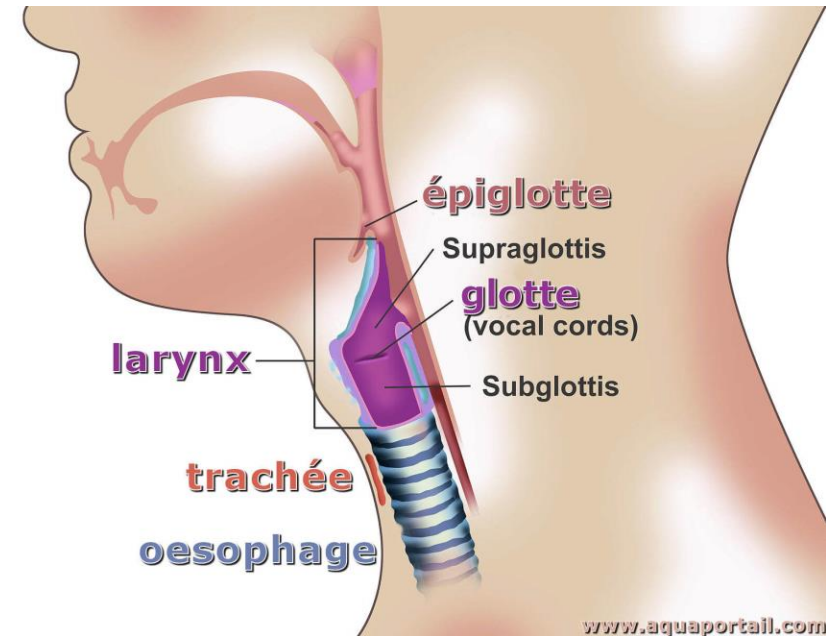
La détente de l'air à pression ambiante produit un air froid

CONSEQUENCES :



- Refroidissement
- Déshydratation
- Sensation de bouche sèche

► FERMETURE DE LA GLOTTE



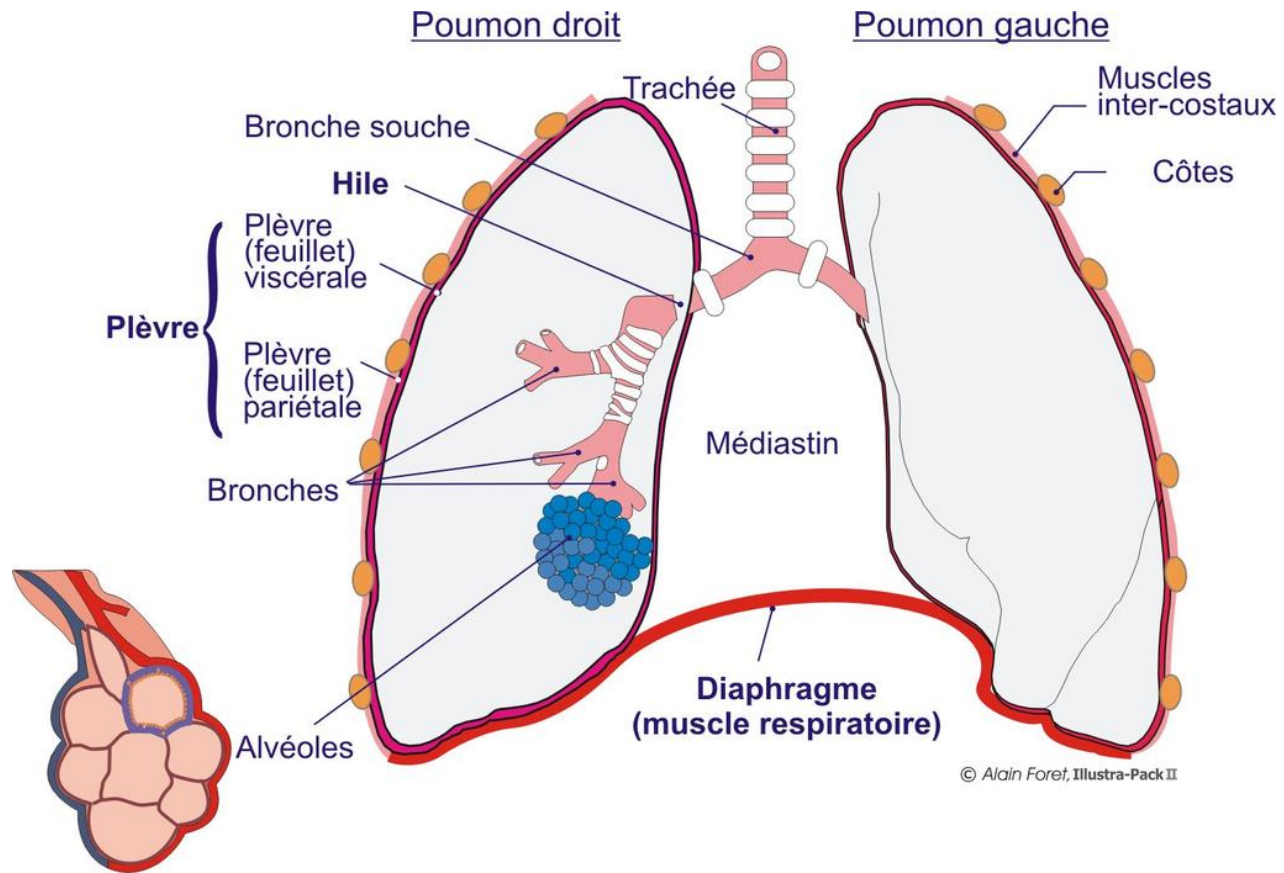
Spasme réflexe qui se produit sous l'effet d'une panique ou d'une entrée d'eau dans le nez

Conduit à la fermeture de la glotte et blocage de la ventilation



A la remontée -> Risque de surpression pulmonaire

LES VOIES AERIENNES INFERIEURES

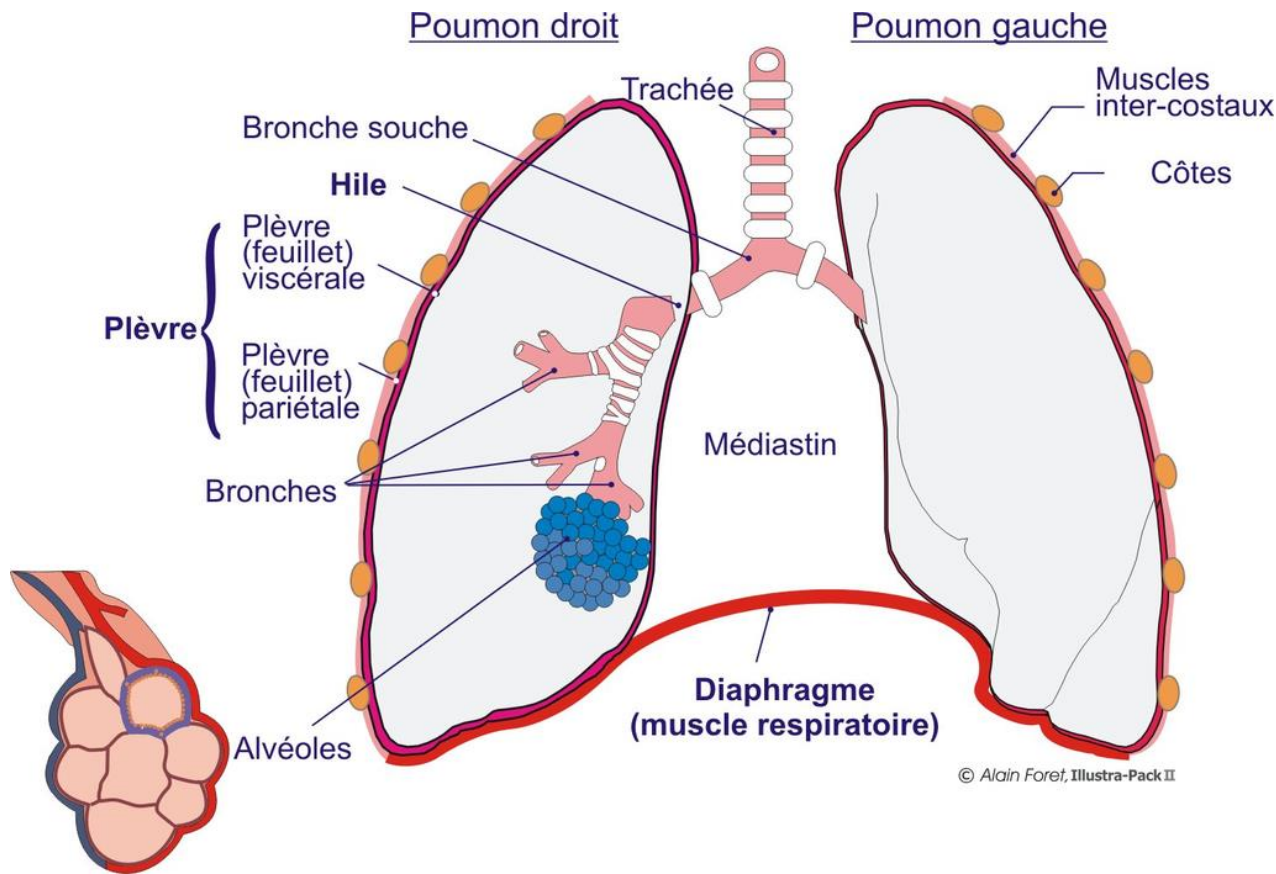


Les voies aériennes inférieures débutent par la partie inférieure de la trachée et se terminent par les poumons

Se composent de :

- La partie inférieure de la trachée
- 2 bronches souches droite et gauche qui pénètrent dans les poumons par le hile
- Les bronches souches se ramifient jusqu'à former des bronchioles
- Les alvéoles : zone d'échanges gazeux

LES VOIES AERIENNES INFERIEURES



► Plèvre : enveloppe qui entoure les poumons.

Constituée de 2 feuillets

- Feuillet interne (viscéral) : solidaire des poumons
- Feuillet externe (pariétal) : accolé à la paroi intérieure de la cage thoracique.

Entre les 2 feuillets de la plèvre se trouve une infime quantité de liquide (liquide pleural) qui assure la solidarité et la lubrification permet à ces 2 feuillets de glisser l'un sur l'autre

► Le diaphragme : muscle respiratoire

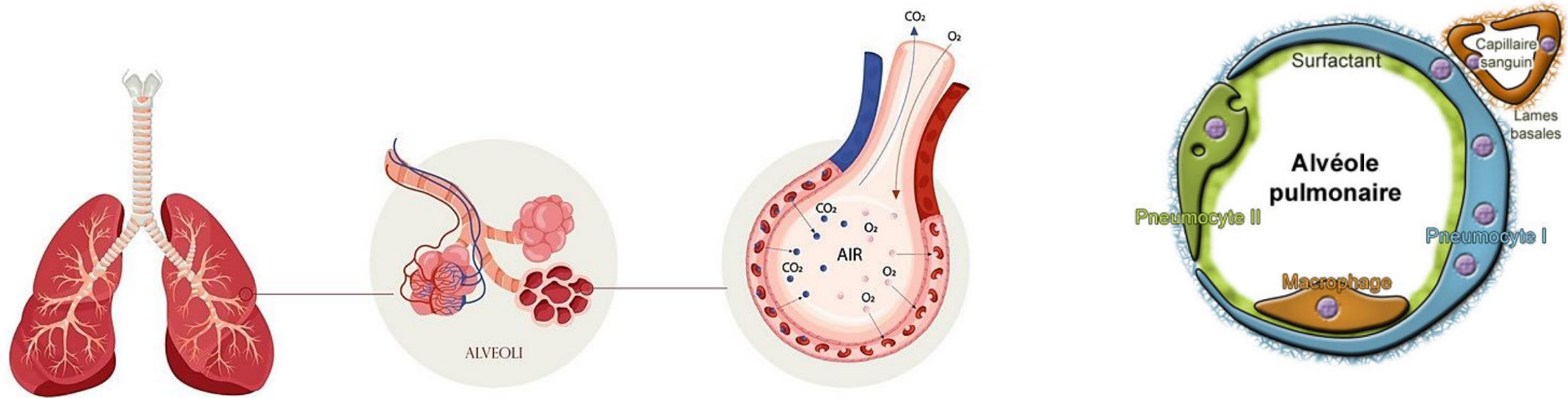
En se contractant, il crée une dépression dans la cavité thoracique qui permet l'entrée d'air dans les voies respiratoires. Cette contraction est périodique et automatique . Sa décontraction permet l'expiration.

► Les alvéoles

Structure terminale des voies respiratoires. Sont regroupées en grappe.

Surface d'échange des gaz entre l'air et le sang

LES ALVEOLES



L'arbre bronchique se termine par des sacs alvéolaire qui regroupent une dizaine d'alvéoles et ressemble à une grappe de raisin .
La paroi est extrêmement fine (0,5 à 1 μm), entouré d'un réseau de capillaires pulmonaires (veinules et artérioles) = membrane alvéolo-capillaire

800 millions d'alvéoles soit 150 m² (surf terrain tennis)

Siège des échanges gazeux.

Echanges au travers de la membrane alvéolo-capillaire entre les gaz de l'air et ceux du sang : O₂, CO₂, N₂

Elles se gonflent à l'inspiration et se vident en partie à l'expiration.

L'intérieur des alvéoles est recouvert de **surfactant** indispensable à la ventilation : liquide qui tapisse la face interne des alvéoles

Empêche l'affaissement des alvéoles en fin d'expiration

En diminuant la tension superficielle le travail nécessaire pour les distendre à chaque inspiration est réduit

Grande élasticité qui a ses limites



SURPRESSION PULMONAIRE

LA MECANIQUE VENTILATOIRE – hors plongée

► L'INSPIRATION

C'est une phase **active**.

A l'inspiration le diaphragme se contracte, s'abaisse, écarte les parois thoraciques. Les muscles intercostaux se contractent et relèvent les côtes.

L'ensemble est solidaire, il crée une augmentation du volume pulmonaire, ce qui engendre une dépression à l'intérieur des poumons par laquelle l'air s'engouffre.

► L'EXPIRATION

C'est une phase **passive**.

Relâchement musculaire

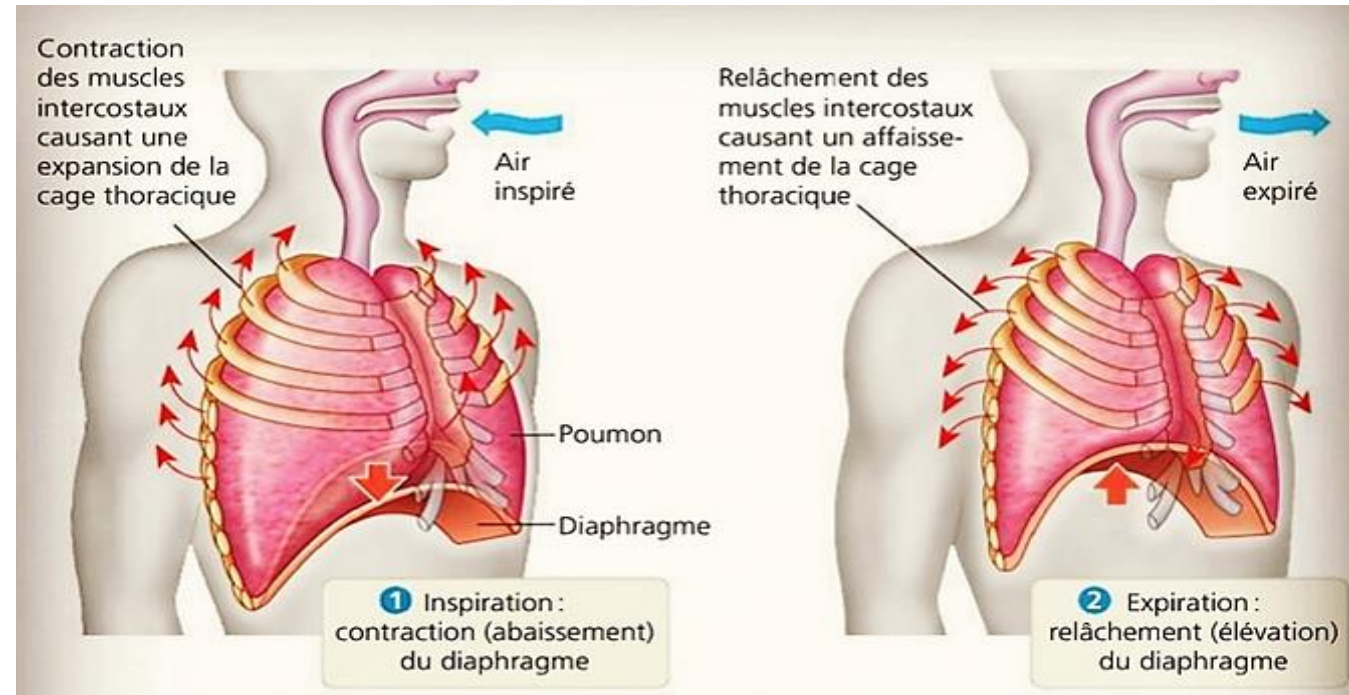
Les muscles intercostaux se relâchent, le diaphragme se relâche et remonte ce qui va diminuer le volume à l'intérieur des poumons.

Une surpression se crée, ce qui expulse l'air vers l'extérieur.

2 phases

INSPIRATION ACTIVE

EXPIRATION PASSIVE



LA MECANIQUE VENTILATOIRE – en plongée

- ➡ L'INSPIRATION et L'EXPIRATION sont **ACTIVES**

La ventilation sur détendeur implique une expiration active afin de contrer la résistance mécanique du détendeur, même équipé de détendeur souple

Accroissement de l'effort inspiratoire et expiratoire



Plus il y a d'effort musculaire, plus on produit de CO₂

2 phses

INSPIRATION
ACTIVE

EXPIRATION
ACTIVE



LES VOLUMES PULMONAIRES

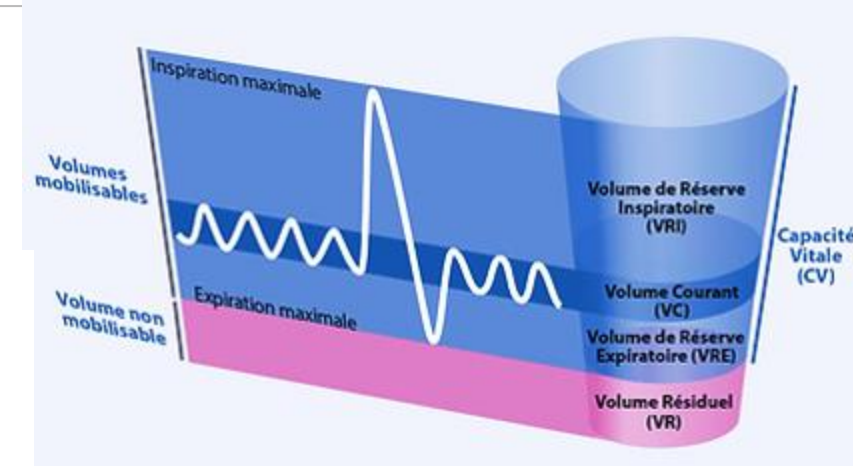
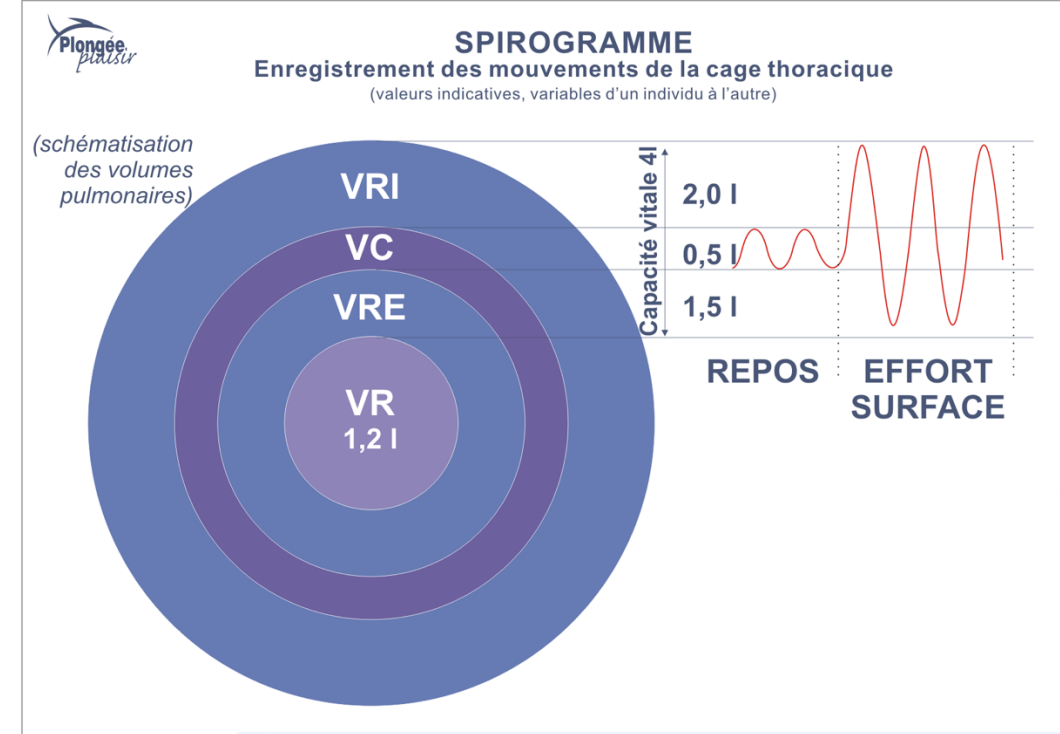
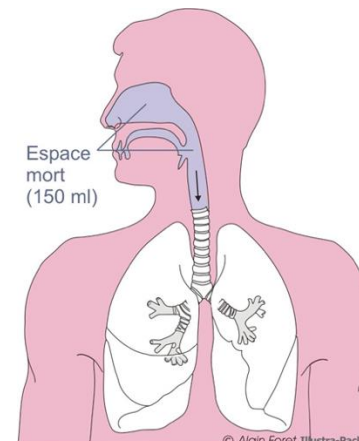
- **Volume courant (VC)** : volume mobilisé au cours d'un cycle ventilatoire. Un adulte au repos et en surface inspire et expire **0,5 L** d'air
- **Volume de réserve inspiratoire (VRI)** : **2L**. Volume mobilisé au cours d'une inspiration forcée
- **Volume de réserve expiratoire (VRE)** : **1,5 L**. Volume mobilisé au cours d'une expiration forcée
- **Capacité vitale (CV)** : $VC + VRI + VRE$: de **3,5 L à 4,5 L**
- **Volume résiduel (VR)**: **1,2 L** . Volume incompressible et non mobilisable. Reste dans les poumons après une expiration forcée
- **Capacité totale (CT)** : $CV + VR$.

Fréquence : chez l'adulte : 15 à 20 cycles / min

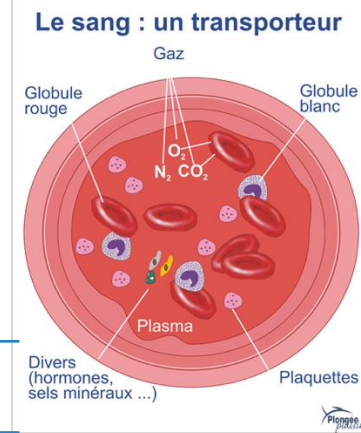
Débit : 7,5 L à 10 L

Volume et fréquence varient en fonction du sexe, de la taille et de l'âge.

- **Volume mort** : espace anatomique, contenu dans les voies aériennes qui ne participent pas aux échanges gazeux. Volume situé en dehors des alvéoles. Environ 150 mL
- En plongée ce volume mort est augmenté par le matériel : tuba, détendeur



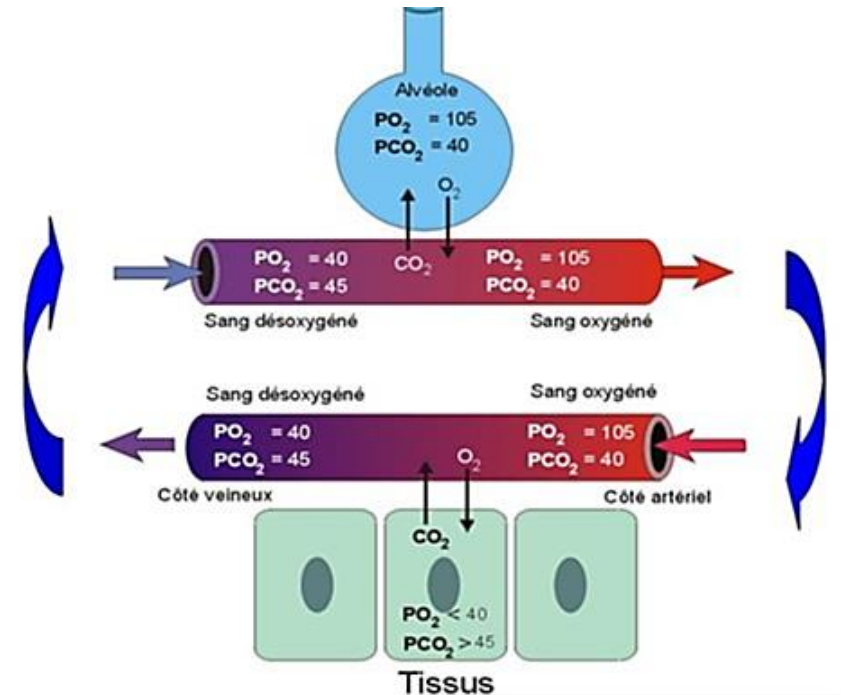
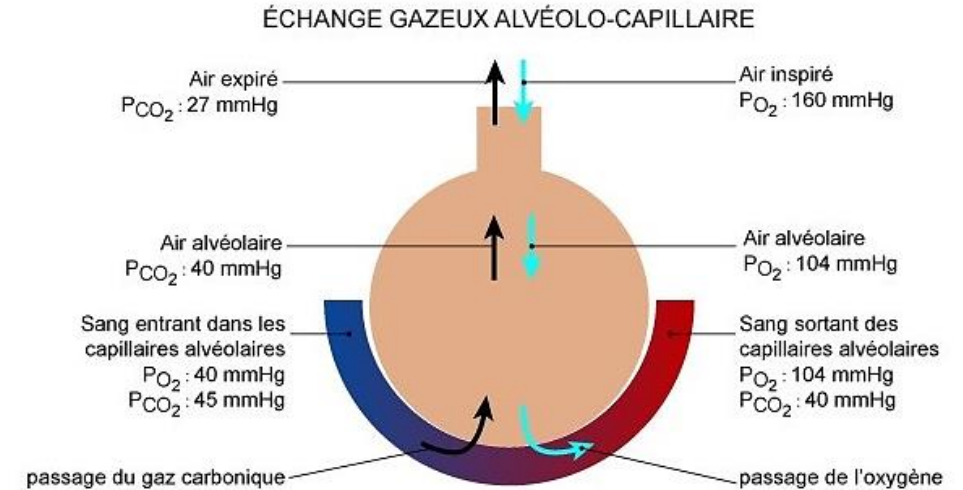
TRANSPORT DE GAZ :



	HEMOGLOBINE	PLASMA	AUTRES
O ₂	Combiné à 98 %	2 % sous forme dissoute Forme qui participe aux échanges gazeux	
CO ₂	Combiné à 8 % Site différent de celui de l'O ₂	5 % sous forme dissoute	87 % sous forme de bicarbonates
N ₂		100 % sous forme dissoute Fonction de la profondeur (Pp N ₂)	
CO	Se fixe ++++ sur l'hémoglobine à la place de l'O ₂		

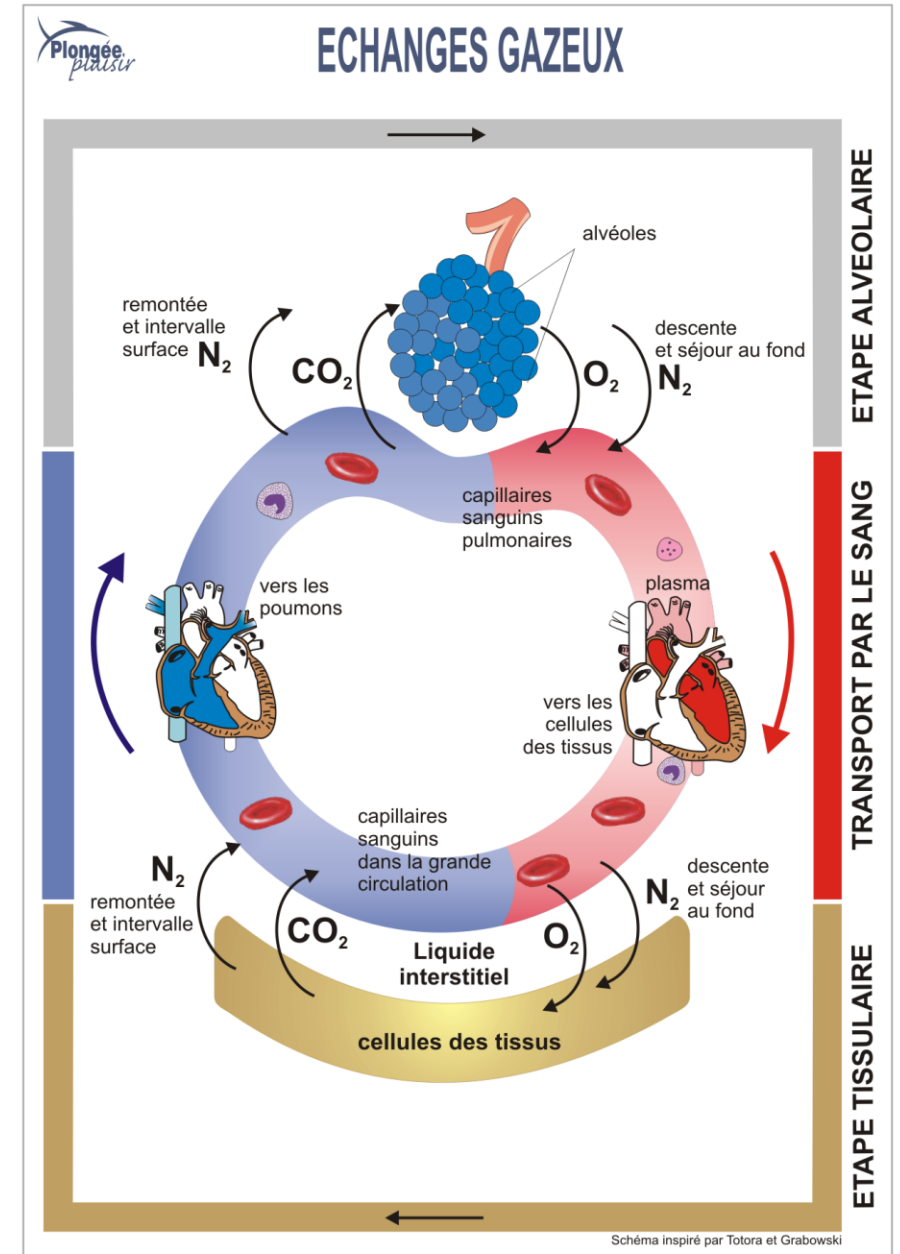
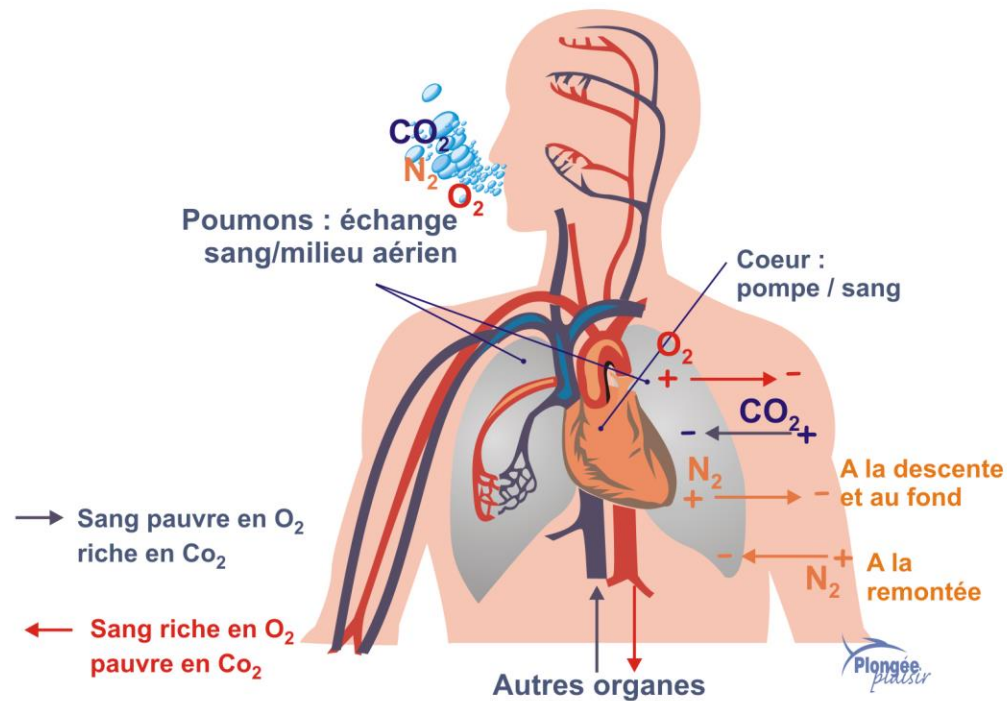
LES ECHANGES GAZEUX

- 2 phases :
 - Phase alvéolaire** : phase alvéolo capillaire
 - Phase tissulaire**
- Sang = transporteur
- Les échanges gazeux se font **par diffusion** du tissu le plus concentré en gaz vers le tissu le moins concentré en gaz.
 - La diffusion se fait par différences de Pp**
- L'O₂ fixé aux globules rouges, passe sous forme dissoute dans le sang et diffuse à travers la paroi capillaire vers les cellules.
 - La forme dissoute conditionne les échanges gazeux
- En plongée, la PpO₂ augmente avec la profondeur. Il va saturer l'hémoglobine à 100% puis augmenter sa fraction dissoute à la descente et, inversement, à la remontée.
- La PpCO₂ est uniquement liée à la production de CO₂ par les cellules et cette production est stable quelle que soit la valeur de la pression ambiante à effort identique.
 - Le gaz carbonique ne voit pas sa Pp varier avec la profondeur.**
 - La quantité de CO₂ rejeté par nos cellules dépend de l'activité musculaire et non de la profondeur



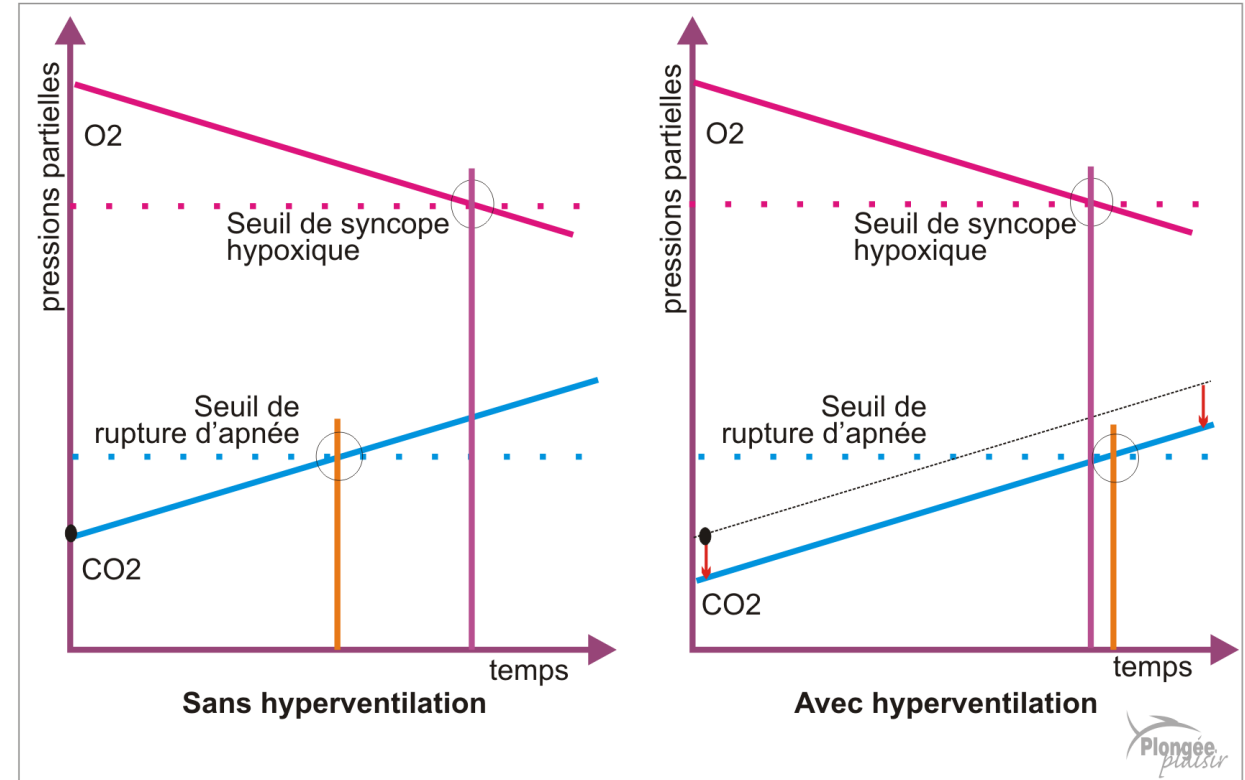
LES ECHANGES GAZEUX – EN IMMERSION

- Les détendeurs fournissent de l'air à pression ambiante.
- Les Pp de gaz inhalés ↗ avec la profondeur
- L'O₂ est consommé et ne pose pas de problème jusqu'à une certaine Pp (hyperoxie)
- La quantité N₂ dissoute augmente à la descente (augmentation de la PpN₂) et diminue à la remontée. Les échanges gazeux liés à l'N₂ imposent le respect des vitesses de remontée et des procédures de décompression



ECHANGES GAZEUX ET APNEE - ROLE DE LA PRESSION PARTIELLE DE CO2

- Au cours d'une apnée, la Pp d'O₂ diminue progressivement. La Pp de CO₂ augmente
- Le manque d'O₂ n'alerte pas les centres respiratoires
- En deçà d'une certaine Pp O₂, le corps tente de réserver ce qu'il reste au fonctionnement des organes essentiels : cerveau, cœur -> syncope : seuil de syncope hypoxique
- La Pp CO₂ déclenche le reflexe inspiratoire (seuil rupture d'apnée). Il survient avant que la PpO₂ ne soit trop basse, avant le seuil de syncope hypoxique qui conduit à une perte de conscience
- Sans hyperventilation : la rupture d'apnée survient avant la syncope hypoxique
- Avec hyperventilation : le taux de CO₂ est abaissé anormalement en début de plongée. Le seuil de rupture d'apnée est décalé, il survient après le seuil de syncope hypoxique. L'apnéiste ne ressent pas l'envie de respirer
- L'inspiration réflexe survient alors que l'apnéiste est inconscient ce qui conduit à un risque de noyade



MODIFICATION DE LA VENTILATION EN IMMERSION

➤ MILIEU HYPERBARE : ↗ pression ambiante

- Compression thoracique et abdominale : ↘ élasticité de la cage thoracique
- ↗ masse volumique de l'air proportionnelle à la profondeur
↗ résistance à l'écoulement de l'air et présence de turbulences dans les voies aériennes
- Redistribution de la masse sanguine vers les organes centraux dont les poumons (bloodshift) : ↗ du volume sanguin intra thoracique :
↘ de la souplesse pulmonaire (vaisseaux gorgés). Volume pulmonaire diminué

➤ EQUIPEMENT

- Détendeur : résistance mécanique / dureté du détendeur -> inspiration + active et expiration active
- Combinaison, gilet : compression de la cage thoracique et gêne respiratoire

➤ ↘ de la fréquence ventilatoire, ventilation plus lente et plus ample

➤ Petite pause entre inspiration et expiration

➤ En plongée VRI et VRE sont particulièrement sollicités:

- Adaptation à la ventilation
- Stabilisation à l'aide du « poumon ballast »

DIMINUTION DE LA CAPACITE VENTILATOIRE

AUGMENTATION DU TRAVAIL VENTILATOIRE (muscles ventilatoires)

AUGMENTATION DE LA PRODUCTION CO2

RISQUE D'ESOUFFLEMENT ACCRU, D'AUTANT PLUS IMPORTANT AVEC LA PROFONDEUR

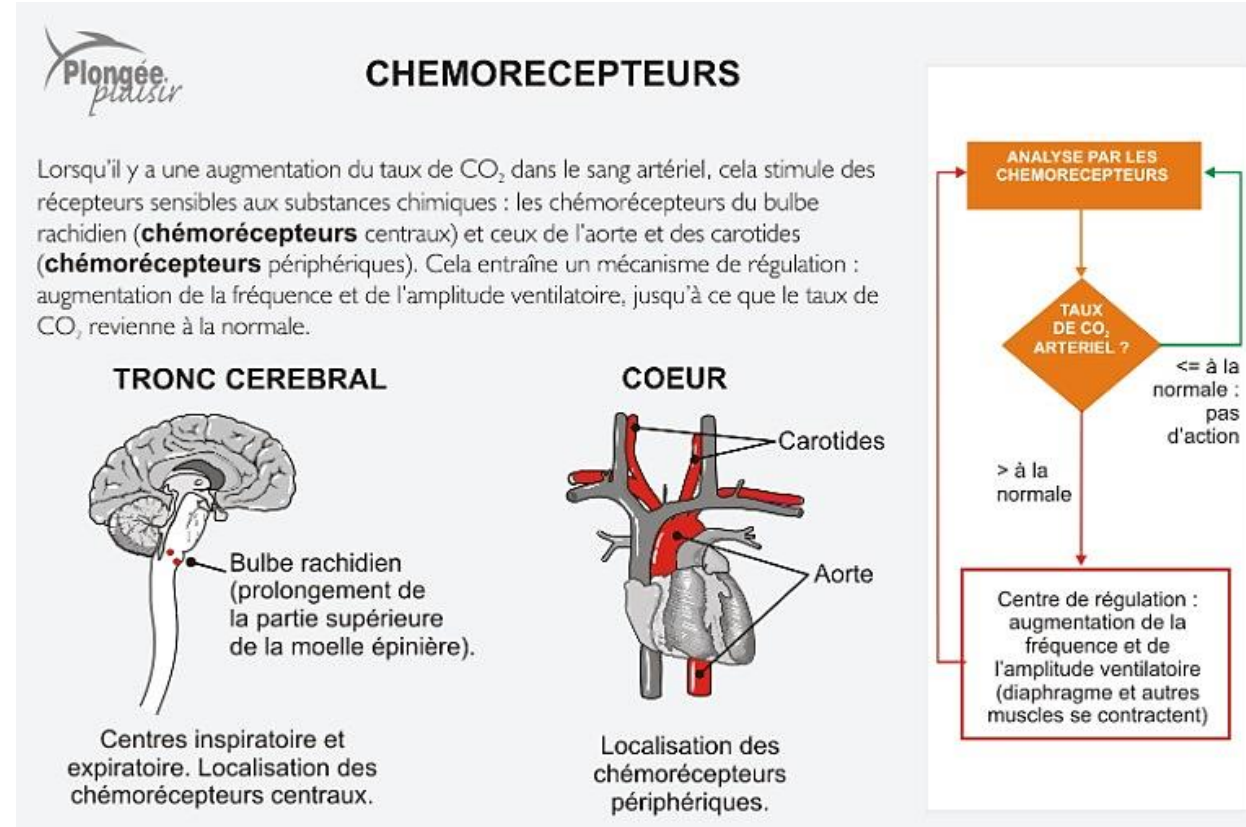


CONTRÔLE ET REGULATION VENTILATOIRE

LE CO2 EST LE STIMULUS ESSENTIEL DE LA VENTILATION

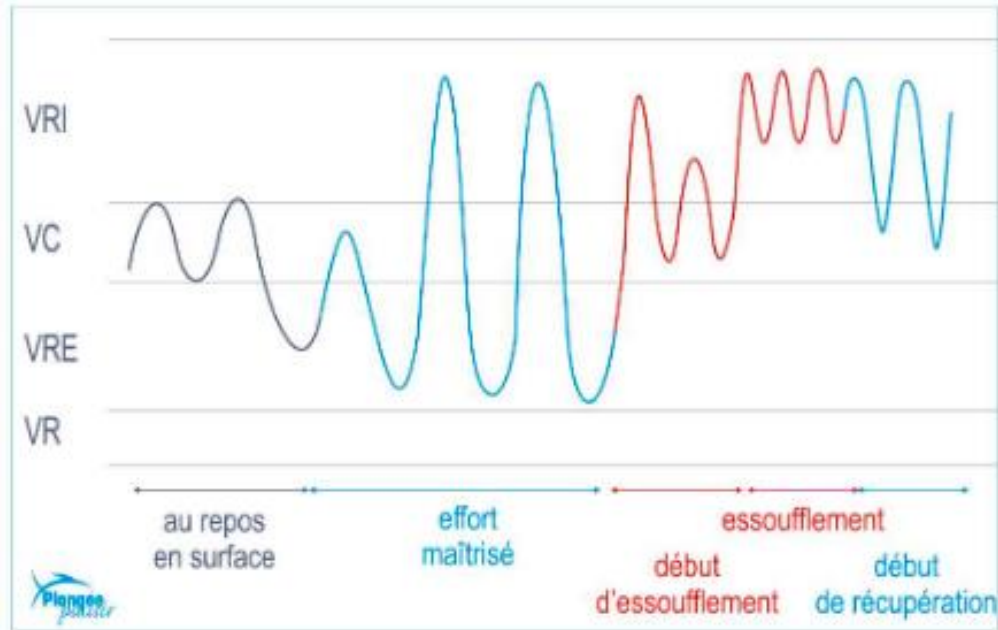
- La ventilation au repos est réflexe mais gérée par le système nerveux central (SNC). On peut ainsi provoquer les mouvements ventilatoires de façon consciente.
- Le déclenchement du **réflexe inspiratoire est commandé par l'excès de CO2** (hypercapnie) et non par le manque d'O2.
- Le taux de CO2 dans le sang est **mesuré par des chémorécepteurs** situés à la périphérie du cœur et de bulbe rachidien
- Ils surveillent Le taux CO2 dans le sang et peuvent déclencher l'augmentation du rythme et de l'amplitude de la ventilation.
- La régulation commande un accroissement de l'apport O2 et non réduction du CO2.

On a augmentation de l'inspiration alors qu'il faut **expirer pour évacuer le CO2**



L'ESSOUFFLEMENT = HYPERCAPNIE

Une respiration superficielle et inefficace

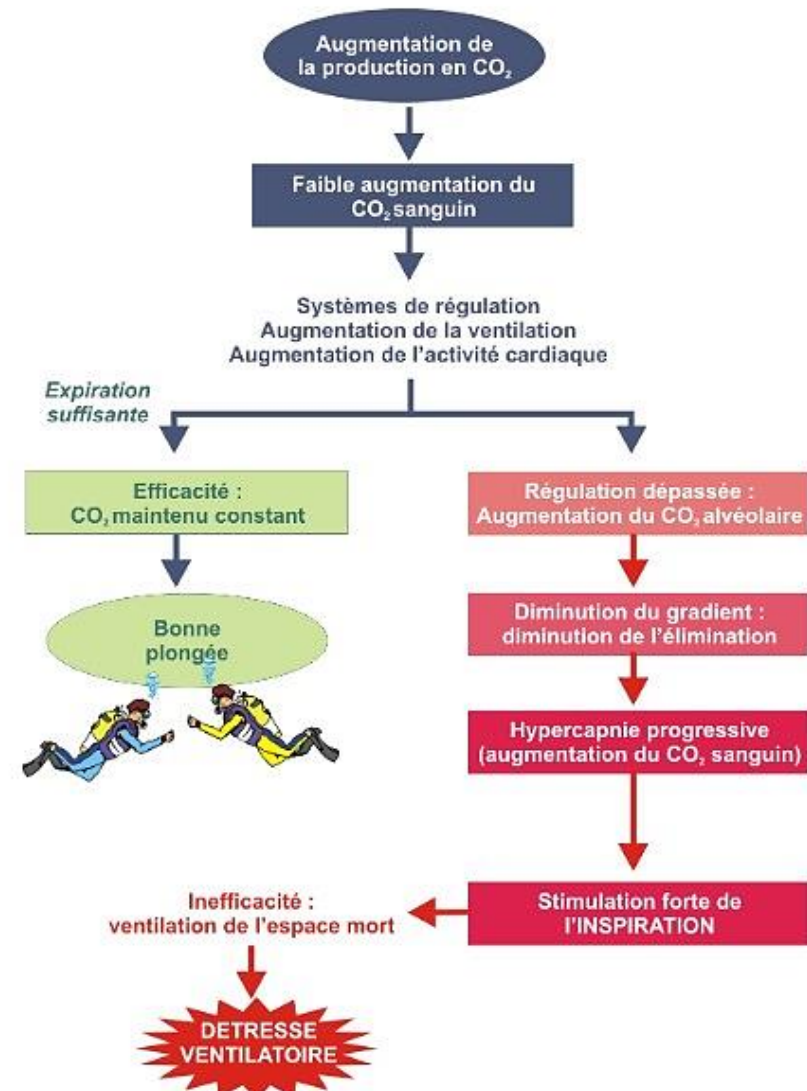


Essoufflement conduit à une respiration sur l'espace mort



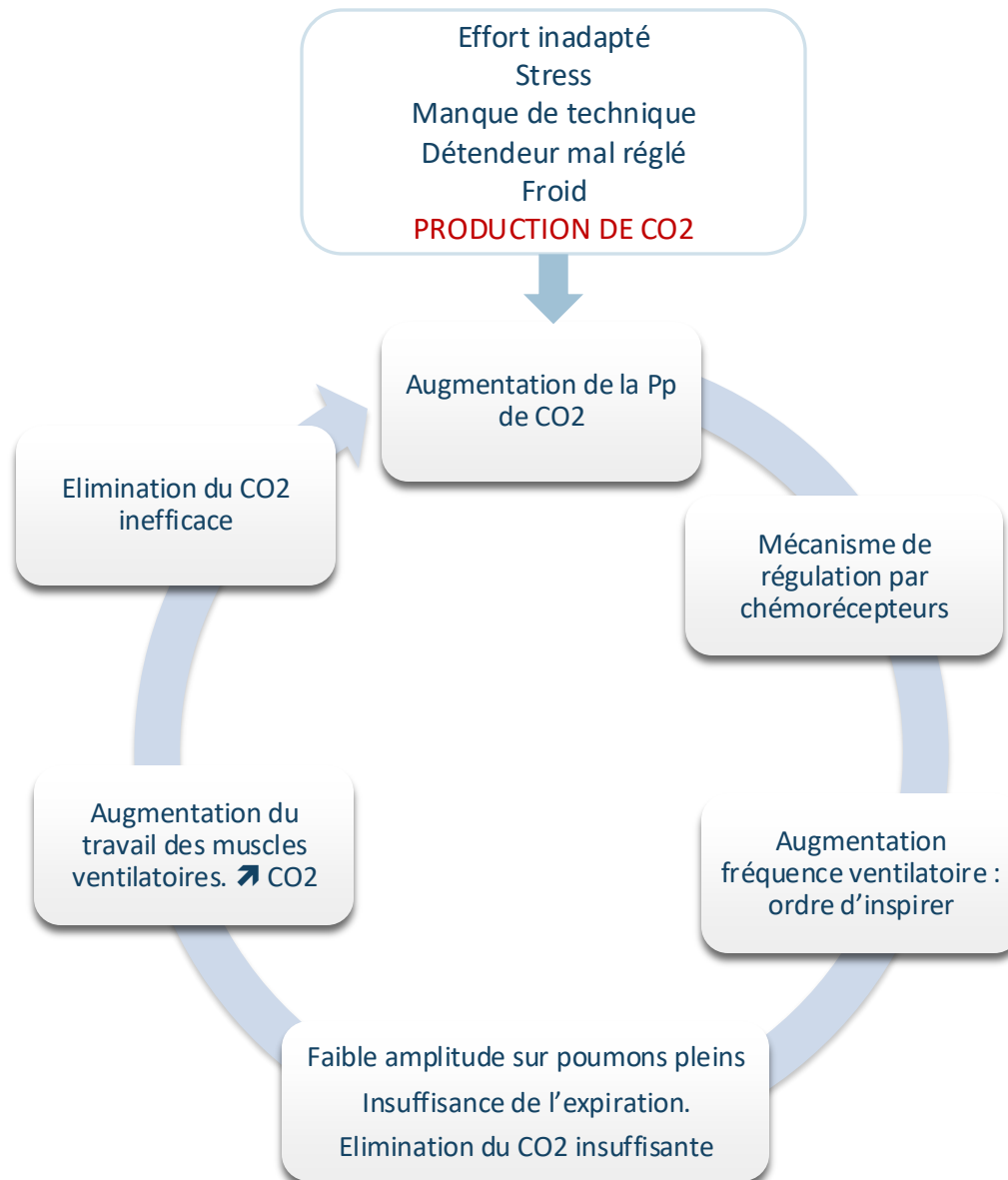
LA MONTEE VERS L'ESSOUFFLEMENT

Tableau d'après Claude Duboc, revue SUBAQUA (FFESSM) n° 172



L ESSOUFFLEMENT = HYPERCAPNIE

LE CERCLE VICIEUX DE L'ESSOUFFLEMENT



RISQUES LIES A L'ESSOUFFLEMENT :

- Risque de panique avec remontée rapide
-> Risque de surpression pulmonaire
- Risque de noyade par retrait du détendeur
- Augmentation du risque d'ADD par augmentation des noyaux gazeux de CO2
- Risque de panne d'air

L'ESSOUFFLEMENT

PREVENTION DU GP :

- Vérification du lestage, ouverture des blocs
- Immersion sans précipitation, après récupération
- Adapter votre palmage aux plongeurs que vous encadrez
- Surveillance des plongeurs
 - Quantité de bulles expirée, rythme élevé
 - Position des plongeurs de votre palanquée
- Eviter les situations stressantes qui conduisent à une augmentation de la ventilation
- Adaptation des paramètres de la plongée
- Ligne de vie en cas de courant
- Inciter à une bonne condition physique

CONDUITE A TENIR :

- Cesser ou faire cesser tout effort immédiatement. Faire signe d'expirer
- Assister et amorcer la remontée. Rassurer. Si nécessaire maintenir le détendeur. Vérifier le stock d'air
- Mettre fin à la plongée -> pas de ré immersion
- Augmenter la durée des paliers si besoin

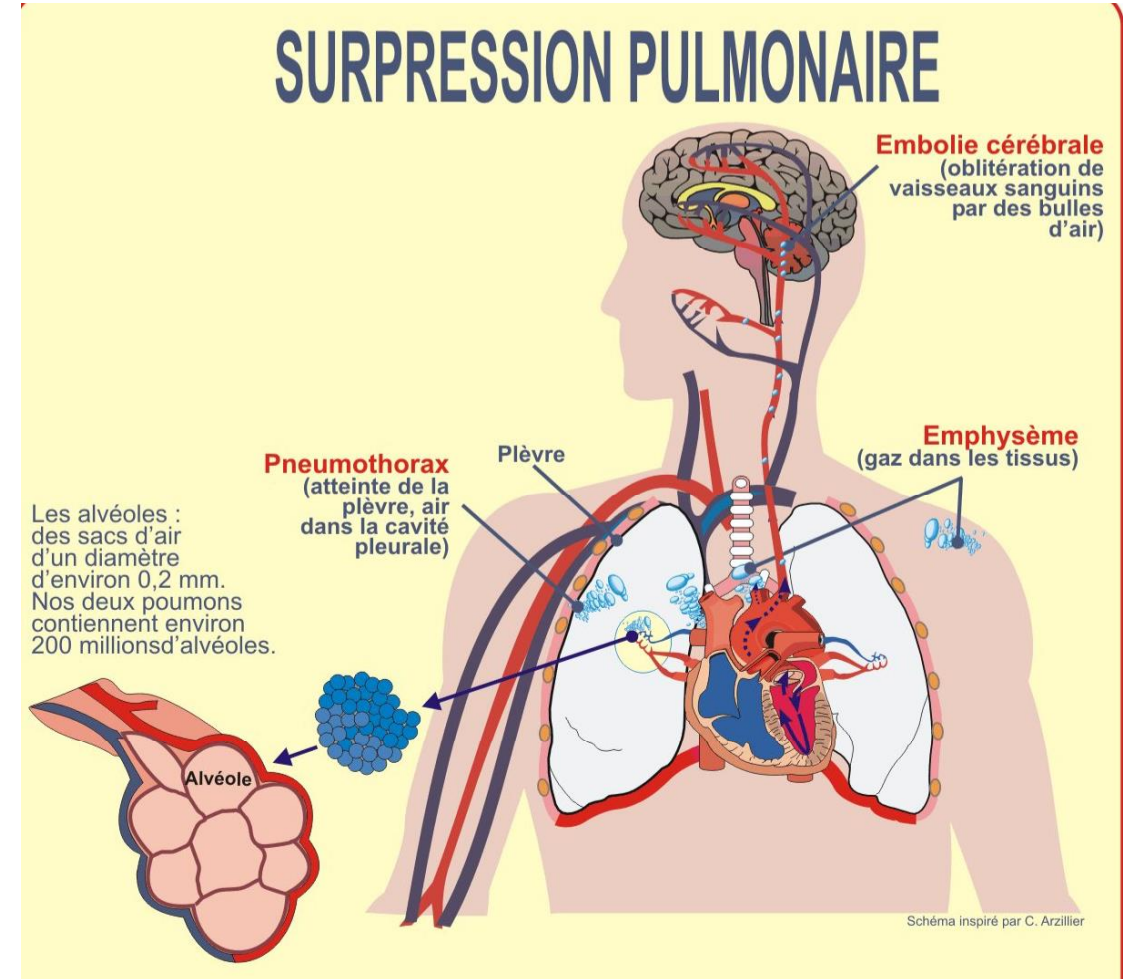
LA SUPPRESSION PULMONAIRE

- Barotraumatisme peu fréquent mais qui peut être mortel et simple à éviter

- Survient plutôt près de la surface où les variations pression / volume sont les plus importantes
- En cas de blocage de la respiration ou d'expiration insuffisante à la remontée, l'air dans les poumons se dilate jusqu'à la limite d'élasticité des poumons ce qui entraîne des ruptures ou lésions
- L'air sort alors de l'alvéole. Les échanges gazeux ne peuvent plus s'effectuer correctement. L'air contenu dans les alvéoles pénètre dans la circulation sanguine
- Le seuil de rupture d'une alvéole est de 0,3 bars

- **3 complications graves**

- Embolie cérébrale / ADD
- Emphysème sous cutané du médiastin ou sous cutané
- Pneumothorax



LA SUPPRESSION PULMONAIRE

► EMBOLIE GAZEUSE CEREBRALE

Passage d'air dans la circulation sanguine et atteinte du cerveau

Air des alvéoles passe par effraction dans circulation sanguine -> veines pulmonaires
-> OG -> OD -> les bulles repartent dans la grande circulation -> carotides -> cerveau
=> **embolie gazeuse cérébrale** : obstruction des vaisseaux sanguins du cerveau
perturbant son fonctionnement : signes ADD central

► EMPHYSEME

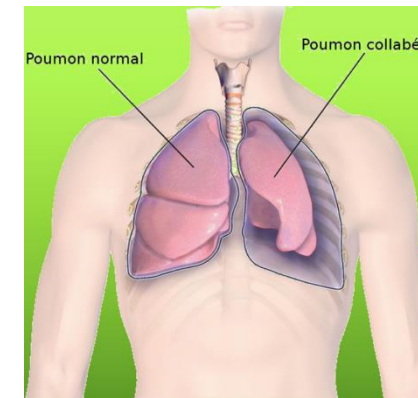
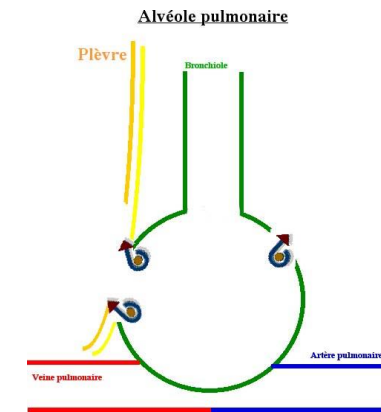
L'air s'échappe des alvéoles et va préférentiellement être évacué par le hile et remonter jusqu'à la base du cou : **EMPHYSEME SOUS CUTANE**

De l'air se retrouve autour du cœur entraînant une compression et une détresse cardiaque : **EMPHYSEME DU MEDIASTIN**

► PNEUMOTHORAX

Irruption d'air entre les 2 feuillets de la plèvre, envahit la cavité pleurale -> désolidarisation de l'ensemble poumons / cage thoracique

Le lobe pulmonaire s'affaisse et n'est plus fonctionnel



LA SUPPRESSION PULMONAIRE

PREVENTION

- Réflexe d'expiration à la remontée
- Eviter toute remontée rapide
- En cas de remontée rapide, insister sur l'expiration
- Ne pas bloquer sa respiration
- Vitesse de remontée LENTE, surtout dans la zone proche de la surface
- Ventilation régulière

CONDUITE A TENIR

- RIFAP

Plongée
plaisir

SURPRESSION PULMONAIRE

1. Embolie cérébrale (oblitération de vaisseaux sanguins par des bulles d'air)

2. Lésions alvéolaires (air dans la petite circulation)

3. Pneumothorax (atteinte de la plèvre, air dans la cavité pleurale)

4a. Emphysème du médiastin (gaz dans les tissus)

4b. Emphysème sous-cutané

Sang mêlé à la salive

Schéma inspiré par C. Arzillier

CAUSES

Blocage expiration

Expiration insuffisante

PREVENTION

Pour soi :

- Ne jamais bloquer l'expiration
- Insister sur l'expiration si remontée rapide
- Développer de bons automatismes

Guide :

- Vitesse de remontée (9 à 12 m/min)
- Vigilance accrue dans les 10 derniers mètres
- Jamais plus vite que le guide
- Empêcher remontée panique
- Si eau trouble, limiter le nombre de plongeurs

ALERTER

En mer : VHF-16 ou ASN-70 (CROSS)*
A terre : Téléphone 15 (SAMU)

* Conformément au décret 68-531 du 2 mai 1968

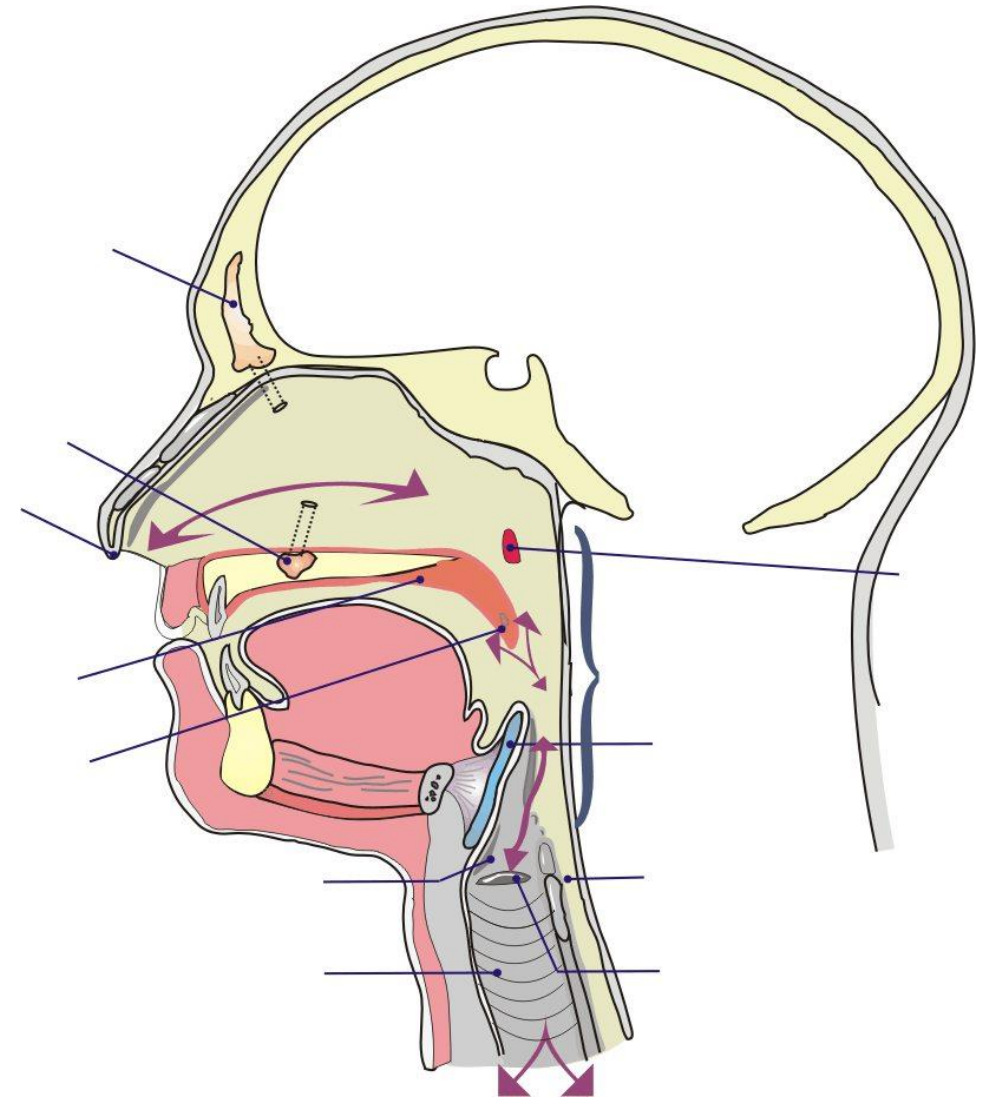
SECOURIR

OXYGENE 100%
REHYDRATER (eau, jus de fruit : 1 litre)
ASPIRINE* (proposer : 500 mg maximum pour un adulte)
ALLONGER ET RECHAUFFER

* Conformément aux dispositions du code du Sport
Sujets conscients ni allergiques ni intolérants. L'aspirine est un médicament, il doit donc être prescrit par un médecin ou donné à la demande expresse de la victime.

EN CONCLUSION – VOTRE ROLE DE GP

- ▶ Votre rôle sera d'assurer une prévention **effective** et être expliquer **simplement** le pourquoi de cette prévention.
- ▶ Préserver une bonne ventilation chez le plongeur que vous encadrer
 - Vérifier l'équipement (surlestage, combinaison adapté, ouverture des blocs...)
 - Limiter les efforts avant l'immersion : réserver la ventilation avant l'immersion
 - Plonger en limitant tout effort
 - Apnées expiratoires de contrôle de 3 secondes en maintenant son niveau d'immersion.
 - Déceler et réagir **immédiatement** en cas d'essoufflement





Questions ??

