



Anatomie et Physiologie humaines appliquées à la plongée CoDep93



Plan

- Objectifs / Justification
- L'oreille
- Le système ventilatoire
- l'hématose
- Le système circulatoire
- Références
- Testez vous



Objectifs / Justification

- **Objectifs**

- Faire une présentation de l'impact de la plongée sur le corps humain

- **Justification**

- Introduction à la Physiopathologie du plongeur
- Prérogatives du GP-N4
 - Encadrement sous l'eau de plongeurs
 - Débutants, PE12, Niveau 1 et Niveau 2
 - Adaptation du profil de la plongée en fonction
 - Circonstances (courant, eau trouble, ...)
 - Aptitudes des participants (compétences réelles)

Besoin d'une compréhension fine des sollicitations de la plongée sur le corps humain



Plan

- Objectifs / Justification
- L'oreille
- Le système ventilatoire
- l'hématose
- Le système circulatoire
- Références
- Testez vous



Le système nerveux

- Organisation autour de quatre systèmes :
 - **Système Nerveux Central (SNC)** : Centre de commande
 - ❖ L'encéphale et la moelle épinière
 - **Système Nerveux Périphérique (SNP)** : Centre de transmission
 - ❖ Les nerfs crâniens, les nerfs rachidiens, les nerfs sensitifs et les nerfs moteurs
 - **Système Nerveux Autonome (SNA)** : Régulation des fonctions végétatives
 - ❖ Le système sympathique et parasympathique
 - **Système Hormonal**
 - ❖ Les glandes



Le système nerveux

➤ **Système Nerveux Central**

- **L'encéphale** : contrôle la plupart des fonctions du corps
 - ❖ La perception
 - ❖ Les mouvements
 - ❖ Les sensations
 - ❖ Les pensées
 - ❖ La parole
 - ❖ La mémoire
- **La moelle épinière** : l'autoroute relayant l'encéphale à toutes les parties du corps
 - ❖ Fait circuler les signaux nerveux



Le système nerveux

➤ Système Nerveux Périphérique

- Localisation

- ❖ **Nerfs crâniens** : régions de la tête et du cou
- ❖ **Nerfs rachidiens** : reste du corps

- Fonctions

- ❖ **Nerfs sensitifs** : transmet les informations provenant des capteurs sensoriels (chaud, froid, douleur, ...)
- ❖ **Nerfs moteurs** : transmission des ordres aux muscles squelettiques (marcher, nager, ..)
- ❖ **Nerfs végétatifs** : transmission des ordres aux muscles lisses (viscères, glandes, ...)



Le système nerveux

➤ **Systeme Nerveux Autonome (ou végétatif)**

- Contrôle les fonctions respiratoires, digestives et cardiovasculaires
- Se décompose en :
 - ❖ **Systeme sympathique** : accélère le rythme cardiaque, contracte les vaisseaux, dilate les bronches, ...
 - ❖ **Systeme parasympathique** : produit l'effet inverse
- Ces deux systèmes ont des actions antagonistes



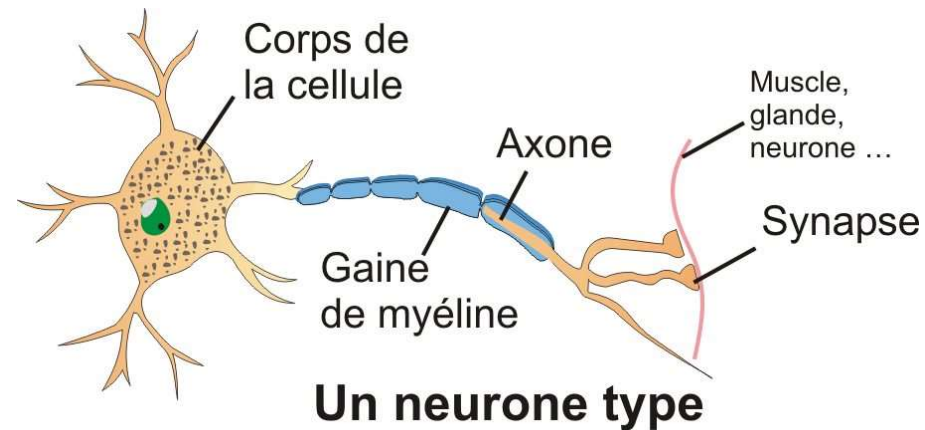
Le système nerveux

Organes innervés	sympatique	parasympatique
Coeur	Tachycardie	Bradycardie
Vaisseaux	Vasoconstriction	Vasodilatation
Bronches	Dilatation	Constriction
Pupille	Mydriase	Myosis
Système digestif	Ralentissement	Accélération
Sphincters	Contraction	Relâchement
Sécrétions	Sécheresse des muqueuses	Salivation Sueur

Le système nerveux

C'est pas sorcier

➤ La brique élémentaire du système nerveux



© Alain Foref, Illustra-Pack II

- Cellule qui a pour but de transmettre **l'influx nerveux** (message électrique)
- La libération de **neurotransmetteurs** dans l'espace synaptique permet de propager le message d'un neurone à l'autre
- Nb neurones dans le cerveau : 86 à 100 milliards
- Nb neurones dans l'intestin : environ 500 millions
- Nb neurones dans le cœur : environ 40 000



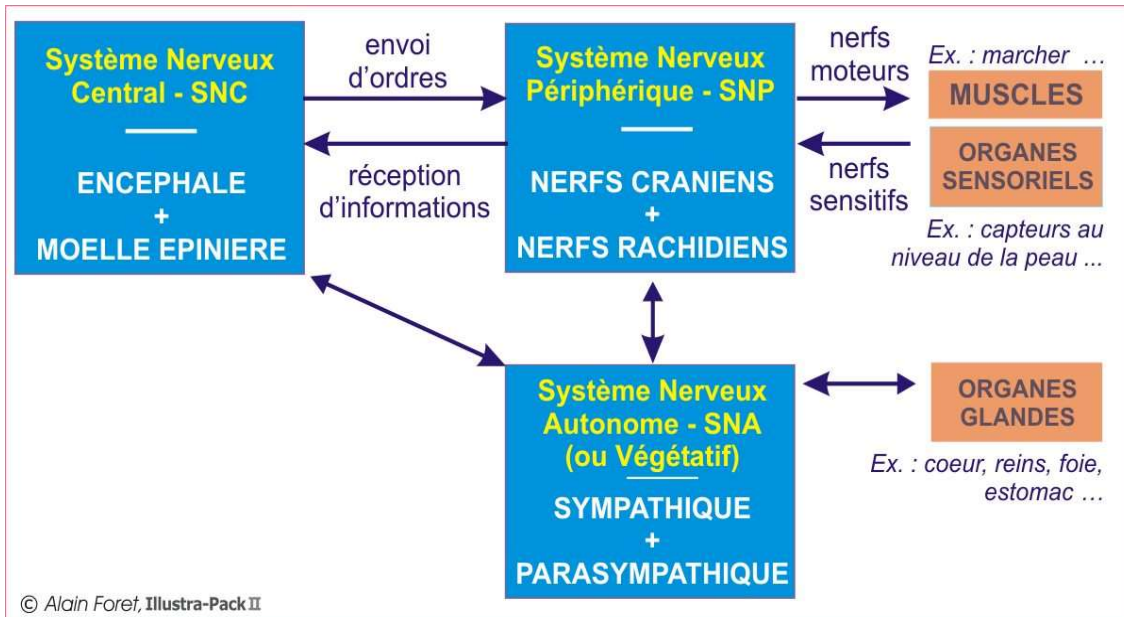
Le système nerveux

➤ **Système hormonal**

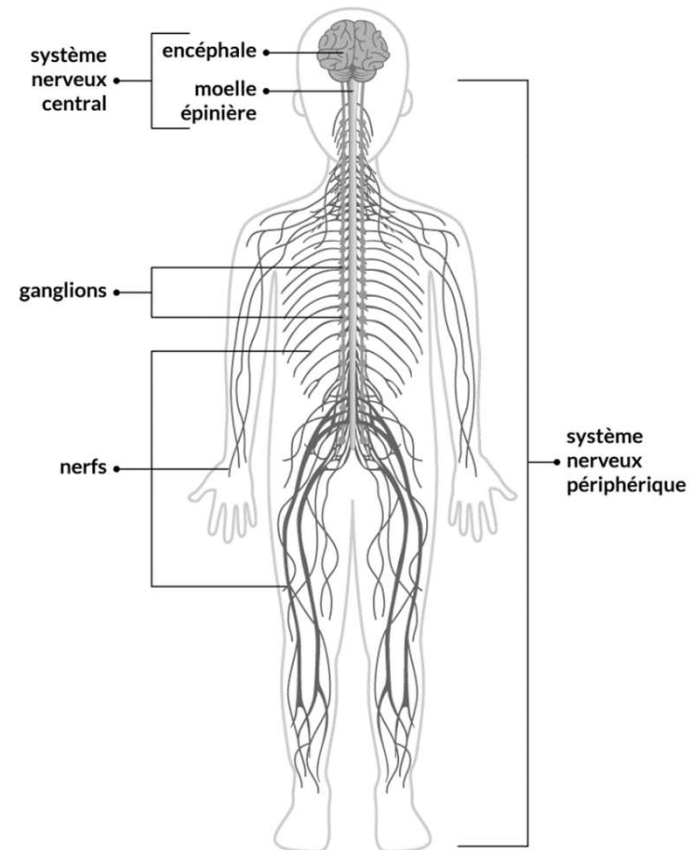
- Prend le relais du système nerveux aux effets rapides
- Composé de 7 glandes qui sécrètent des hormones
- Produit des effets plus durables dans le temps
- Véhiculés par le sang
- Circulent dans tous le corps

Le système nerveux

➤ Organisation fonctionnelle



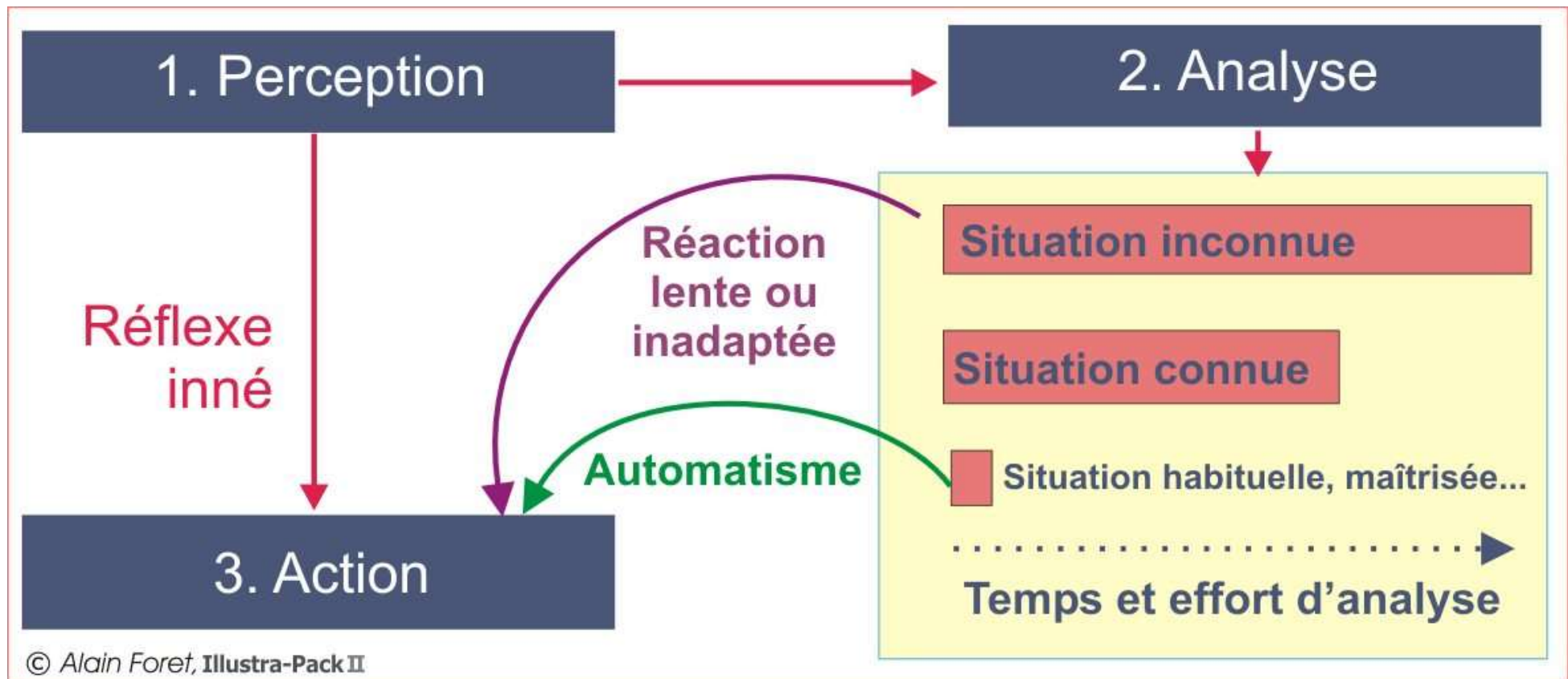
Le système nerveux



Le système nerveux



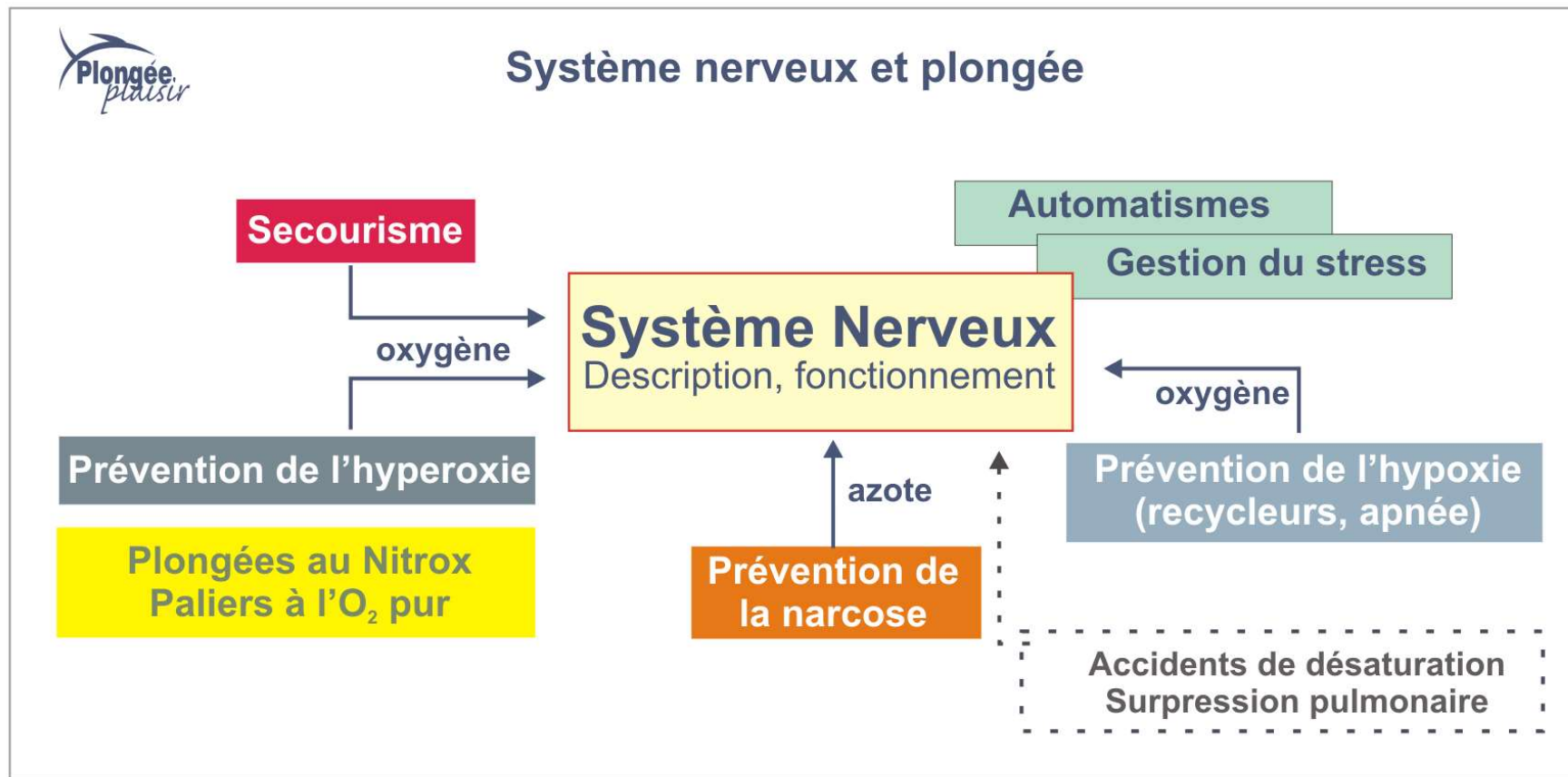
➤ Reflexes et automatismes



Le système nerveux



➤ Impacts sur la plongée

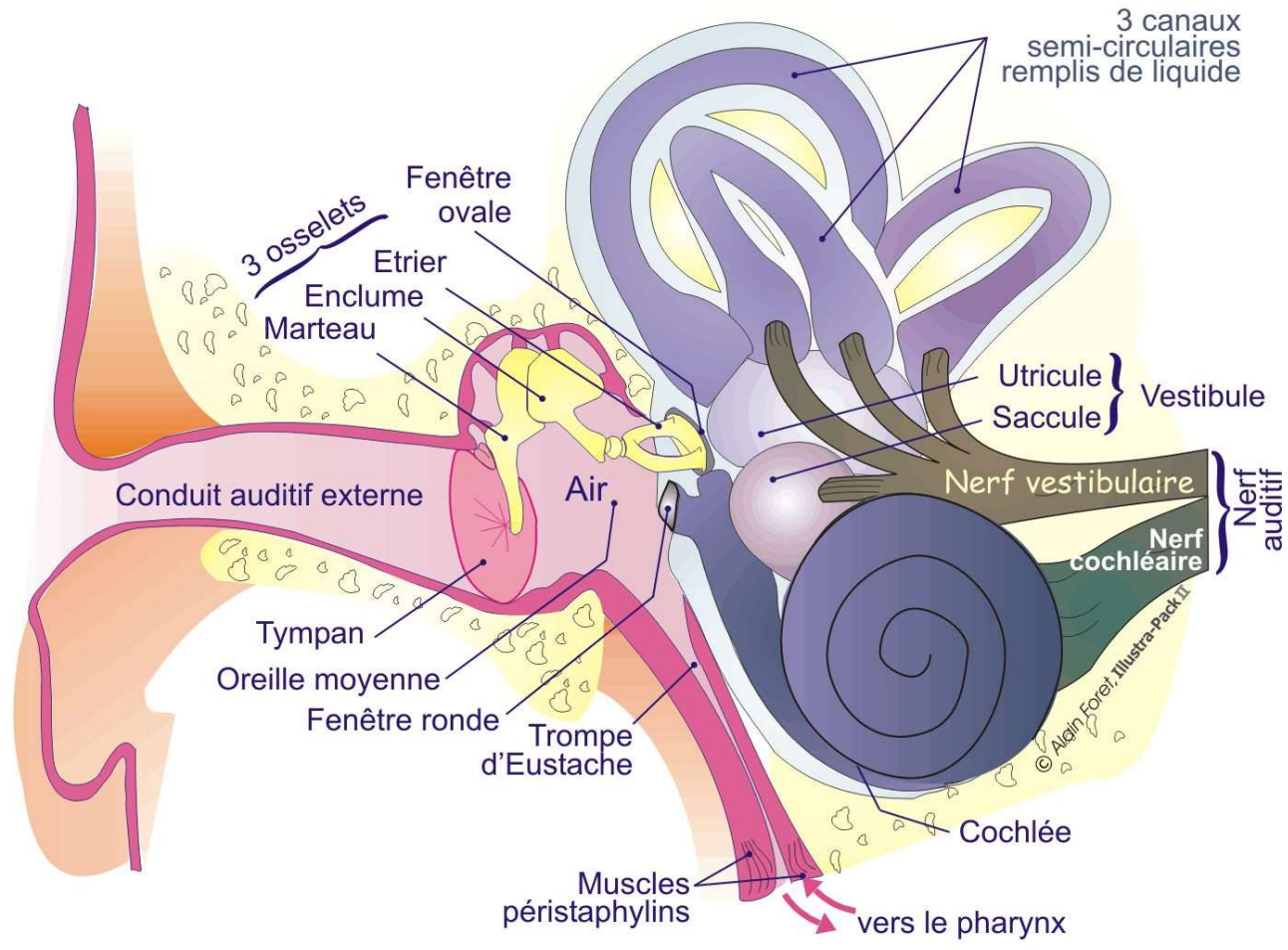




L'oreille

- Organe avec une double fonction :
 - **Audition**: recueillir, transmettre et transformer les vibrations sonores en influx nerveux
 - **Equilibre** et situation dans l'espace
- 3 parties:
 - **Oreille externe**
 - **Oreille moyenne**
 - **Oreille interne**

L'oreille



Vidéo 1



L'oreille externe

- Elle conduit les sons au tympan.
- Elle est composée du:
 - **Pavillon**: capte les sons et les concentre
 - **Conduit auditif externe (2,5 cm)**: amène les sons au tympan. Il produit le cérumen qui a pour fonction d'arrêter les corps étrangers.
 - **Tympan (1cm de diamètre)**: membrane fibreuse transparente, tendue, concave qui vibre et transforme les sons en énergie mécanique.



L'oreille moyenne

- Elle a pour rôle:
 - **D'amplifier les sons et de les transmettre à l'oreille interne**
 - **De permettre l'équilibrage des pressions** de part et d'autre du tympan
- Elle comprend:
 - La chaîne des osselets (**marteau, enclume, étrier**), retenue par des ligaments, qui transmet les vibrations à la **fenêtre ovale** (20x plus petite que le tympan)
 - **L'orifice de la trompe d'Eustache**, qui s'ouvre lorsque les muscles péristaphylins se contractent (environ toutes les 2 ou 3 min)

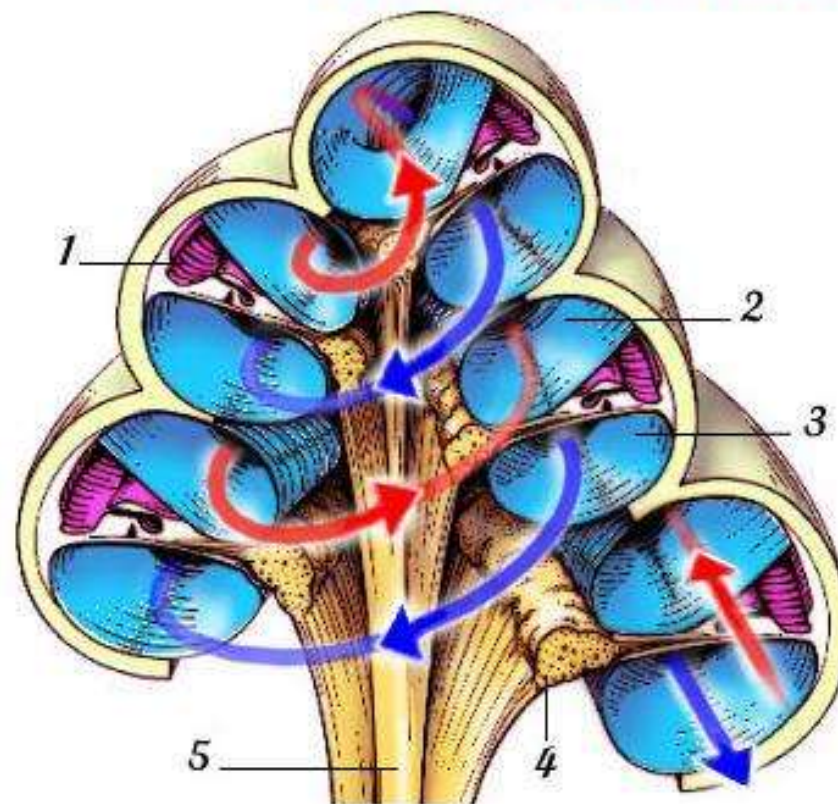


L'oreille interne

- Rôle : elle transforme les vibrations sonores en impulsions électriques et est le centre de l'équilibre
- La fenêtre ovale : transmet les pressions de l'étrier à l'oreille interne (cochlée)
- La cochlée (limaçon): transforme les vibrations en signal électrique
- La fenêtre ronde : agit en opposition de phase au mouvement de « piston » de l'étrier sur la fenêtre ronde
- Le nerf auditif : transmet le signal électrique au cerveau pour « décodage »

La cochlée

Section axiale (modiolaire) de la cochlée



Plan de coupe

Cette section schématise l'enroulement du canal cochléaire (1) contenant l'endolymphe, et celui des rampes vestibulaire (2) tympanique (3) contenant la périlymphe. La flèche rouge vient de la fenêtre ovale et la bleue aboutit à la fenêtre ronde. Au centre, (modiolus) le ganglion spiral (4) et les fibres du nerf cochléaire (5) apparaissent en jaune.

- La rampe vestibulaire va du vestibule au sommet de la cochlée
- La rampe tympanique va du sommet de la cochlée jusqu'à la fenêtre ronde



La cochlée

- C'est le centre de l'audition, où **les sons sont transformés en signaux électriques** au niveau de l'organe de Corti. Il est composé de plusieurs milliers de cellules sensorielles ciliées situées tout le long de la rampe vestibulaire.
- **Cellules sensibles** à des fréquences entre 20 et 20 000 Hz, pour une intensité de 10 à 130 dB.
- Les fréquences élevées (sons aigus) excitent les cellules à **l'entrée de la cochlée** tandis que les fréquences basses (sons graves) excitent les **cellules du sommet**
- **La fenêtré ronde**: membrane qui encaisse les variations de volume dues aux pressions de l'étrier sur la fenêtré ovale.



Le vestibule

- Avec les canaux semi circulaires : il constitue le centre de **l'équilibre**
- Le vestibule se compose de deux poches remplies d'otolithes:
 - **Utricule**: cellules ciliées sur un plan vertical
 - **Saccule**: cellules ciliées sur un plan horizontal
- Donne des informations sur:
 - **Verticalité**
 - **Pesanteur**
 - **Accélérations linéaires**



Les canaux semi-circulaires

- **3 canaux en forme de boucle** disposés dans les **3 plans de l'espace**
- Chaque canal est un cylindre terminé à une extrémité par une ampoule contenant les cellules sensorielles stimulées par le déplacement de l'endolymphe.
- Ils ont pour rôle de **fournir à l'organisme la perception des accélérations angulaires via le nerf vestibulaire**

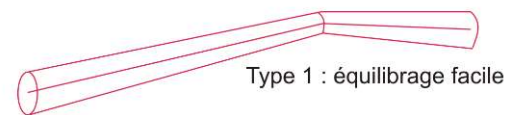
La trompe d'Eustache



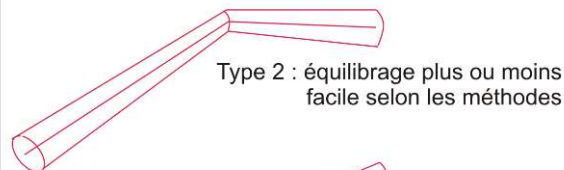
➤ Facteurs de perméabilité

- Sa forme
- La qualité des muscles péristaphylins
- L'état de la muqueuse qui tapisse les parois intérieures
- L'état des fosses nasales

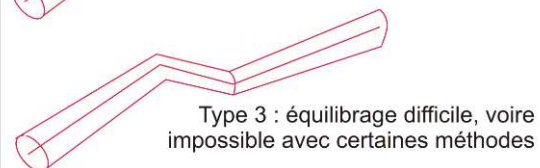
48% des individus



30% des individus



22% des individus



Non symétrie des trompes d'Eustache chez un individu



Atteintes possibles de l'oreille en plongée



➤ **Barotraumatismes**

- Au niveau de l'oreille moyenne: lésion du tympan
- Au niveau de l'oreille interne: « coup de piston » avec lésion de la fenêtré ovale ou de la fenêtré ronde.

➤ **Vertiges alerno-bariques**

- Différence brusque de pressions entre oreilles droite et gauche à la descente ou à la remontée. Désorientation spatiale totale. Pas de séquelle.

➤ **Accidents de décompression de l'oreille interne**

- souvent vestibulaires avec parfois une composante cochléaire.

➤ **Et bien sûr otites infectieuses (non propres à la plongée)**



Plan

- Objectifs / Justification
- L'oreille
- Le système ventilatoire
- L'hématose
- Le système circulatoire
- Références
- Testez vous

Le système ventilatoire

➤ La ventilation

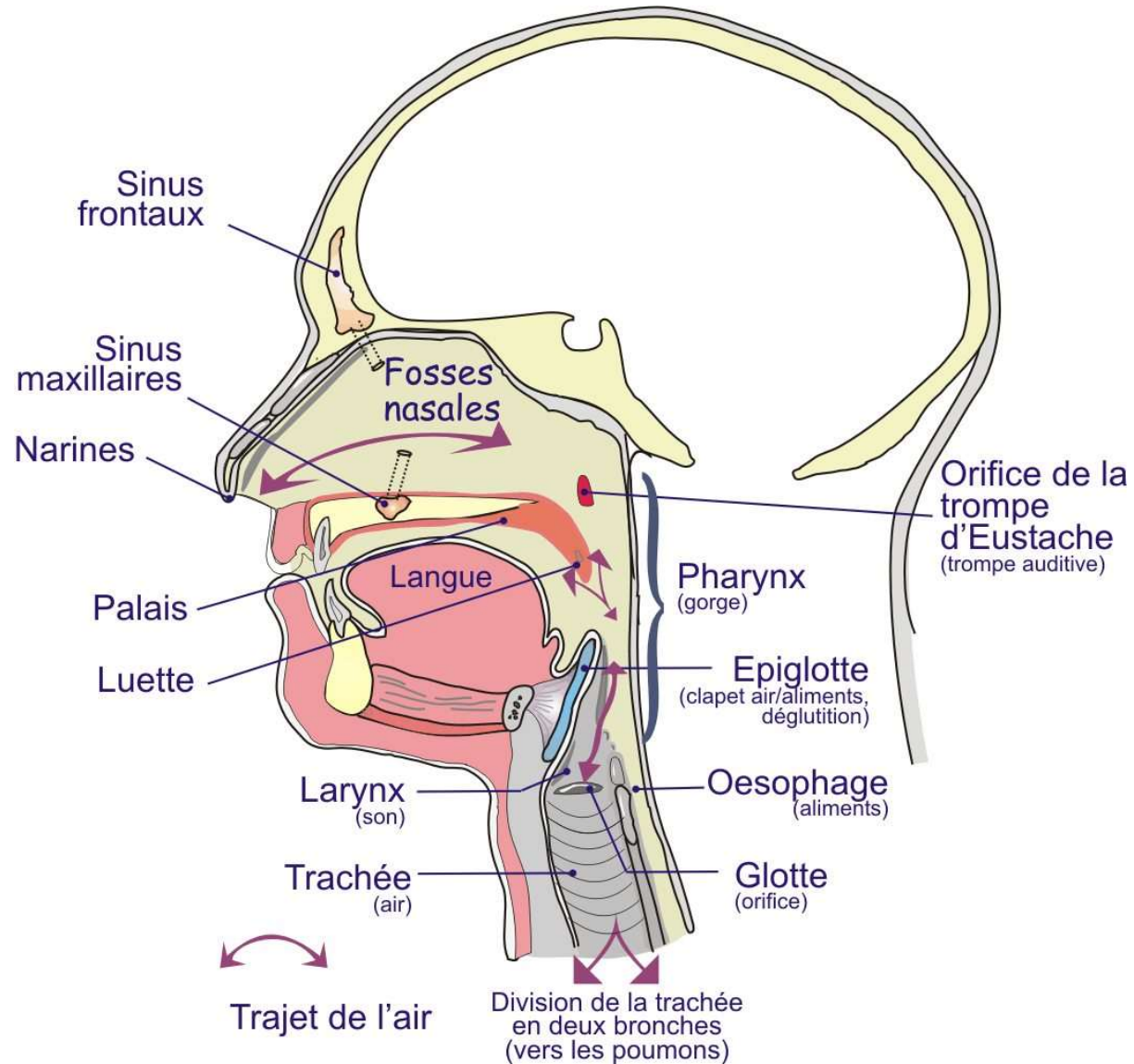
- C'est l'action mécanique permettant l'entrée et la sortie de l'air dans les voies aériennes. Elle assure le renouvellement des gaz, à partir de l'air extérieur, dans les alvéoles pulmonaires, permettant ainsi les échanges gazeux avec le sang.
- Elle est supportée par les voies aériennes supérieures et inférieures ainsi que la cage thoracique

➤ La respiration (hématose)



- C'est l'échange gazeux permettant l'oxygénation (O₂) du corps et le rejet du gaz carbonique (CO₂). Elle se fait en plusieurs étapes

Les voies aériennes supérieures





Les voies aériennes supérieures

➤ **Les cavités nasales** assurent

- Le filtrage des particules, piégées par les poils et le mucus
- Le chauffage et l'humidification de l'air

➤ **Le pharynx**

- zone de tri entre l'air et les aliments au niveau de l'épiglotte qui est ouverte par défaut et se ferme lorsqu'on déglutit

➤ **Le larynx**

- zone des cordes vocales. Amène l'air aux voies aériennes inférieures

Trajet de l'air

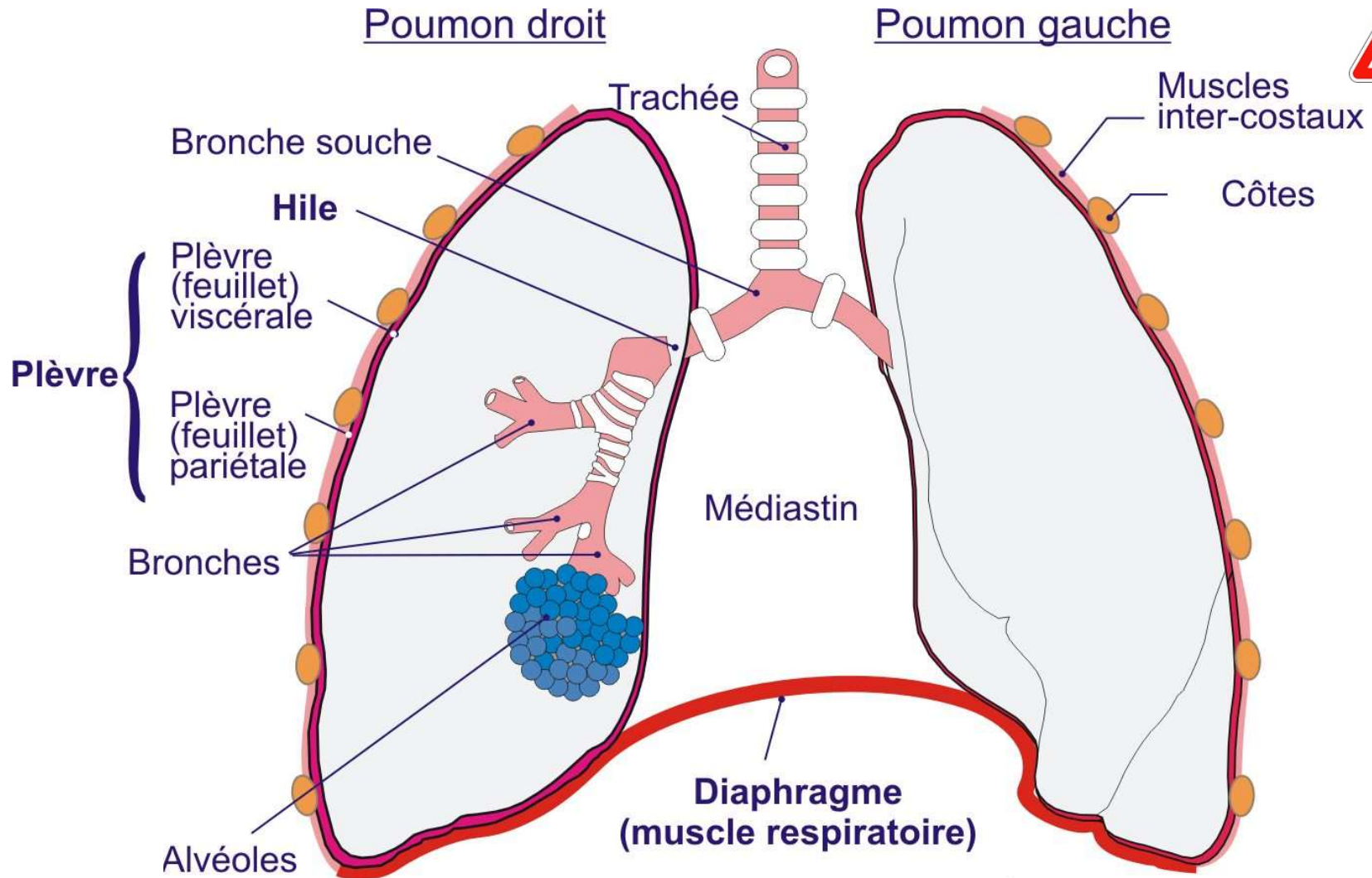


Anatomie	En surface	En plongée
Narines	Oui	Non
Fosses nasales	Oui	Non
Pharynx	Oui	Oui
Larynx	Oui	Oui
Trachée	Oui	Oui
Poumons	Oui	Oui

➤ En plongée, ventilation par la bouche

- Pas de réchauffement de l'air par les fosses nasales => **refroidissement**
- Pas d'humification de l'air => **déshydratation**

Les voies aériennes inférieures





Les voies aériennes inférieures

➤ La trachée

- conduit cartilagineux menant l'air au poumons

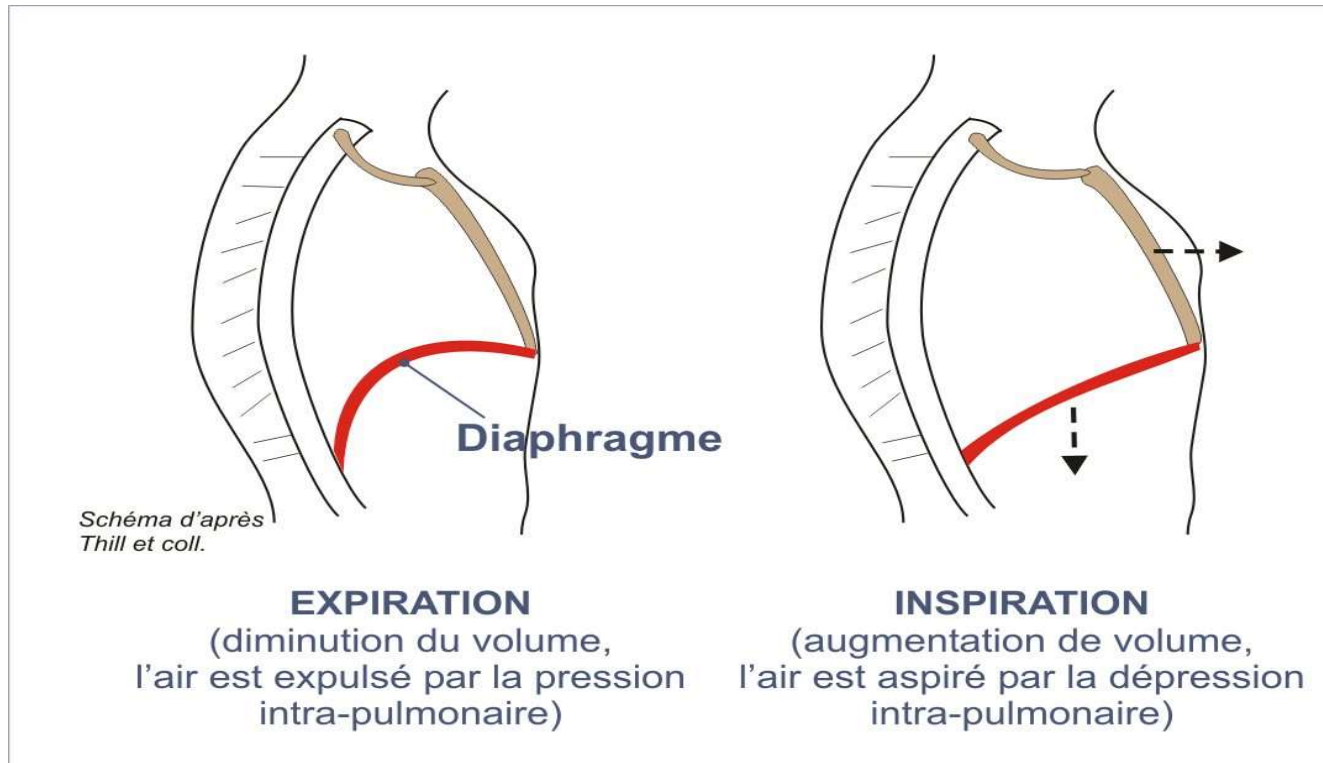
➤ Les poumons

- 3 lobes à droite, 2 à gauche (place du cœur)

➤ Les bronches et bronchioles

- ramifications de plus en plus étroites

La mécanique ventilatoire



© Alain Foret, Illustra-Pack II

- Rythme moyen **au repos** en surface : 15-20 mvts/min
- Débit ventilatoire **au repos** : 7,5 à 10l/min

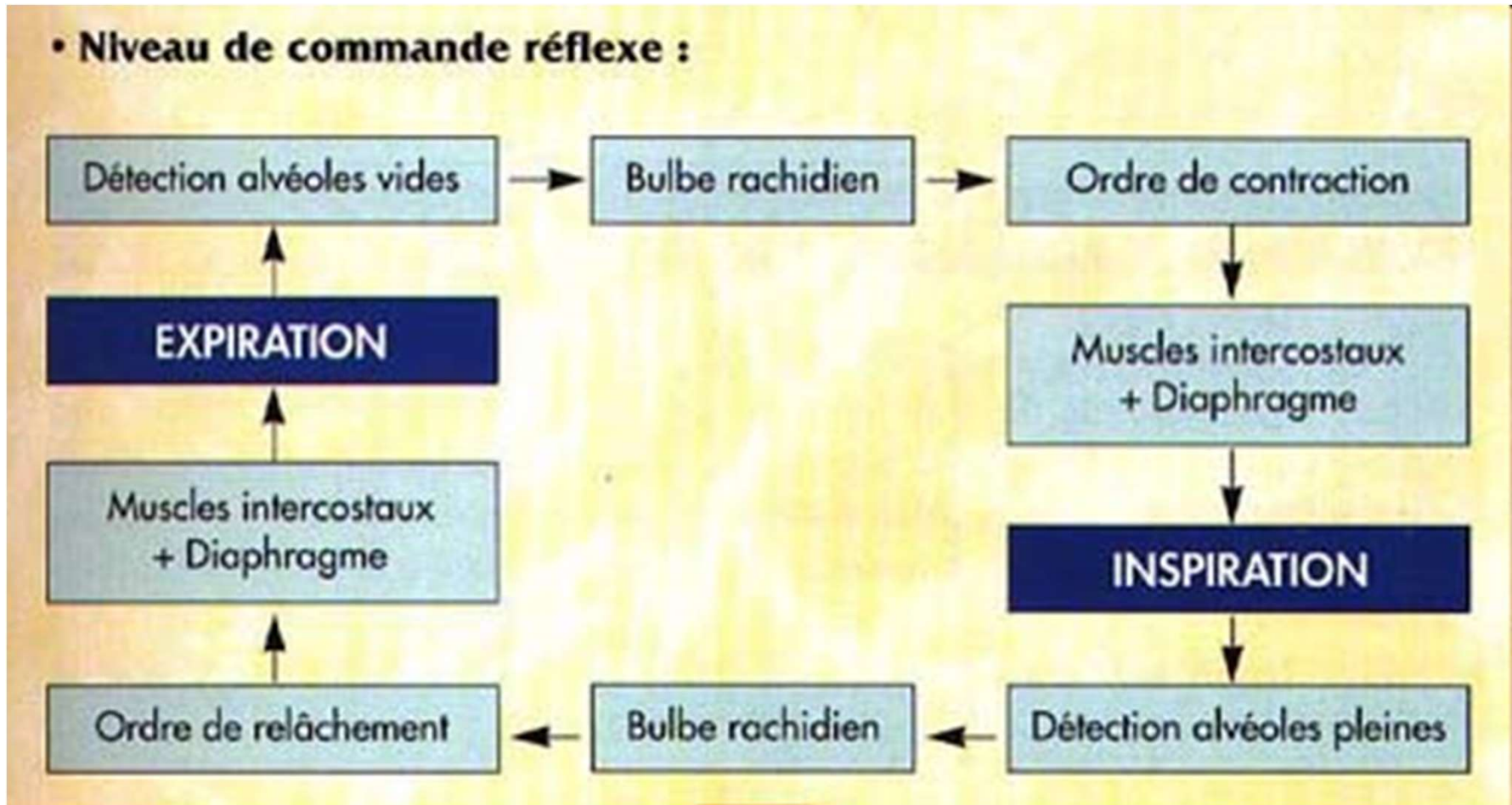


La mécanique ventilatoire

- Les poumons sont solidaires de la cage thoracique par le biais de la plèvre.
- Au repos, les mouvements des côtes produisent des variations de diamètre de la cage thoracique.
- L'augmentation de volume de la cage thoracique crée une dépression et un appel d'air
 - l'inspiration est un phénomène actif
 - l'expiration normale est un acte passif
- **La ventilation forcée met en œuvre le diaphragme en plus des muscles intercostaux**
- **L'inspiration est un acte non volontaire, déclenché par le bulbe rachidien en fonction du taux de CO₂ mesuré dans le sang**

Le réflexe ventilatoire

• Niveau de commande réflexe :





Régulation de la ventilation

- **L'automatisme de la ventilation se situe au niveau du bulbe rachidien**
 - Les nerfs moteurs innervent le diaphragme et les muscles élévateurs des côtes (actif)
 - Les nerfs sensitifs proviennent des alvéoles pulmonaires et de capteurs thoraciques (passif)
 - Alternance inspiration/expiration: l'un provoque l'autre

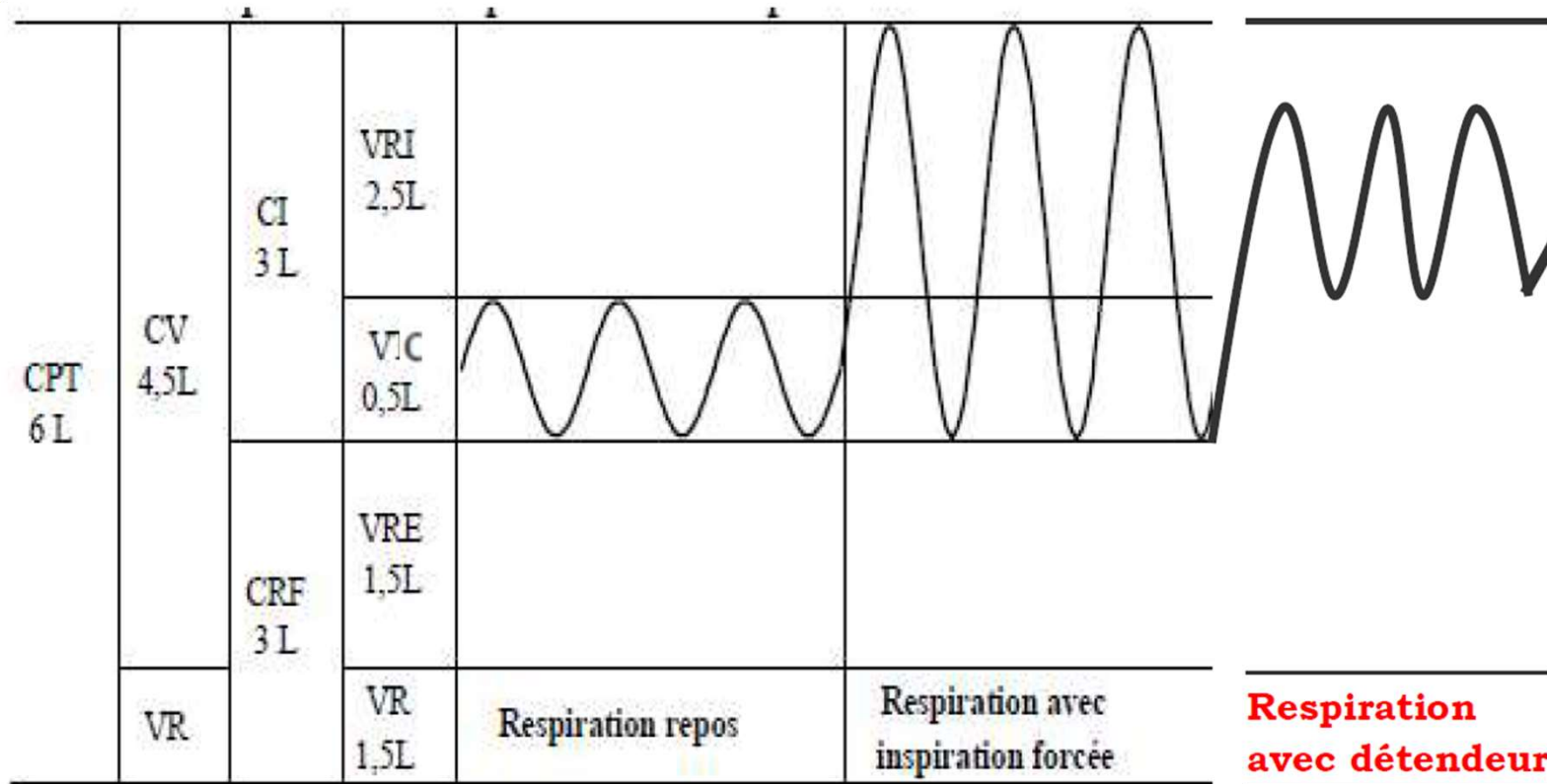
- **Le deuxième circuit de commande est supra bulbaire et intègre:**
 - Des informations nerveuses provenant de la peau et des muqueuses (froid,...)
 - Des informations chimiques: pH sanguin, teneur en CO₂, adrénaline
 - Des informations physiques: température centrale, pression sanguine
 - En fonction des besoins de l'organisme, ce deuxième circuit va prendre le pas sur le premier.

La ventilation en plongée



- La **vasoconstriction périphérique** renvoie une masse importante de sang au niveau des vaisseaux pulmonaires, rendant le **travail des muscles ventilatoires plus difficile**.
- Une **résistance ventilatoire accrue du fait du détenteur**
- La **viscosité de l'air** croît avec la profondeur, le trajet des gaz devient plus difficile et l'effort ventilatoire augmente encore, le taux de CO₂ augmente.
- Pour s'adapter, la ventilation se modifie:
 - Le VC augmente, au détriment du VRI tandis que le VRE augmente
 - Le plongeur respire plus lentement, de manière ample avec une pause après l'inspiration.

Les volumes pulmonaires



➤ Capacité vitale

- 3,5 l chez les femmes
- 4,5 l chez les hommes

➤ A l'effort, le débit peut atteindre

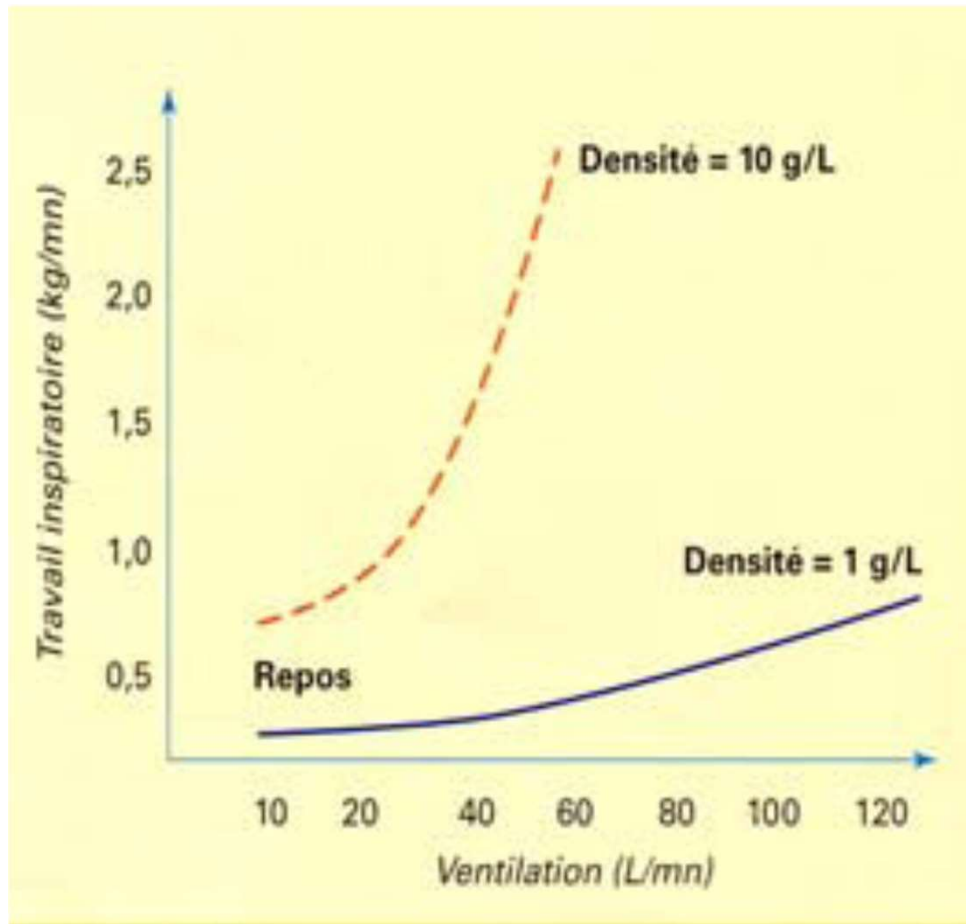
- 100 à 120 l/min pour les sujets non entraînés
- 250 l/min chez certains athlètes

L'espace mort anatomique

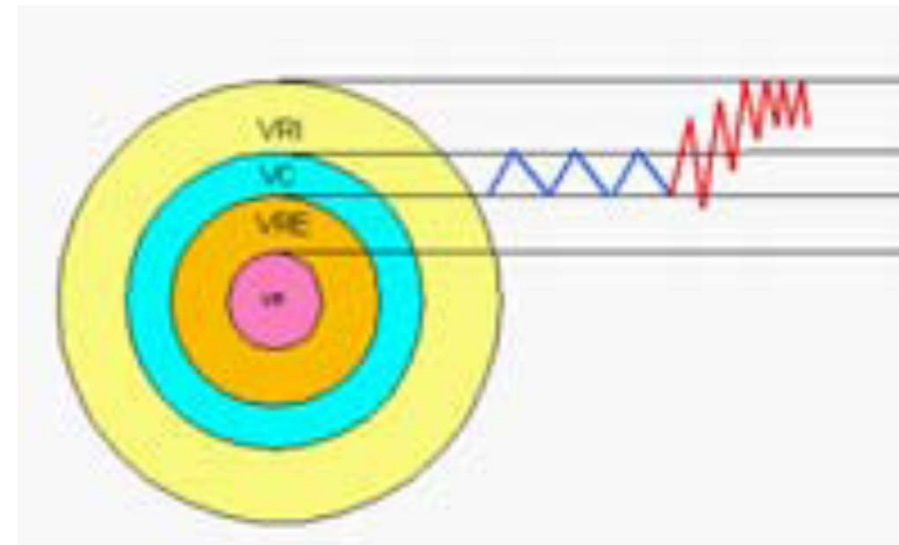


- Cet espace représente le **volume d'air qui ne participe pas aux échanges gazeux**
- Il est localisé entre le nez et les alvéoles
- Il contribue au **non renouvellement de l'air** lors de la ventilation

Le plongeur... un essoufflé en sursis



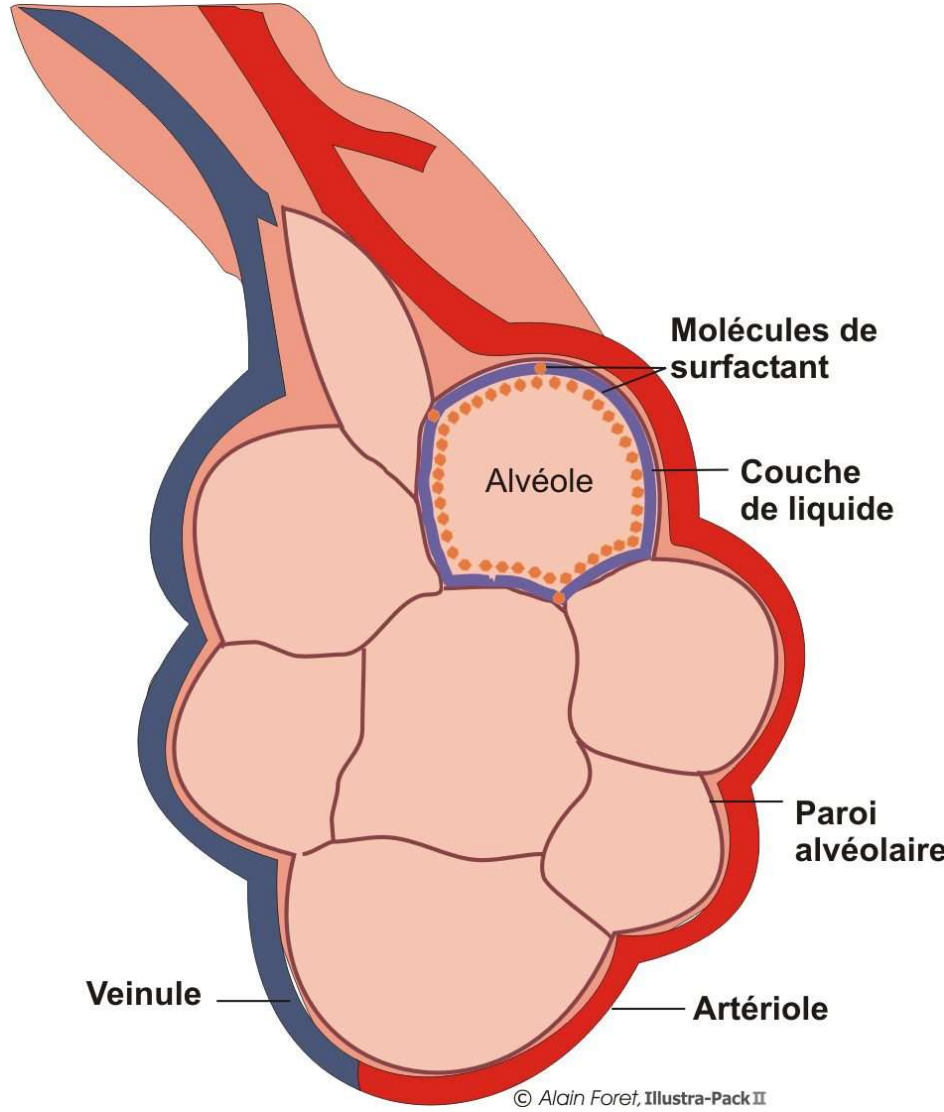
En grande profondeur, nous devenons des déficients ventilatoires



Essoufflement => Perte de l'efficacité de l'expiration (ventilation qui "oublie les alvéoles")

Cercle vicieux

Les alvéoles



© Alain Foret, Illustr-Pack II



- **Les alvéoles:** petits sacs, lieux des échanges gazeux entre l'air alvéolaire et le sang circulant dans les capillaires. Environ 800 millions d'alvéoles chez l'adulte représentent une surface d'échange de 100 m². Elles sont tapissées de surfactant pour faciliter les échanges gazeux et les maintenir ouvertes.
- Il existe des **shunts pulmonaires**, pouvant s'ouvrir lors d'hyperpressions thoraciques



Plan

- Objectifs / Justification
- L'oreille
- Le système ventilatoire
- l'hématose
- Le système circulatoire
- Références
- Testez vous

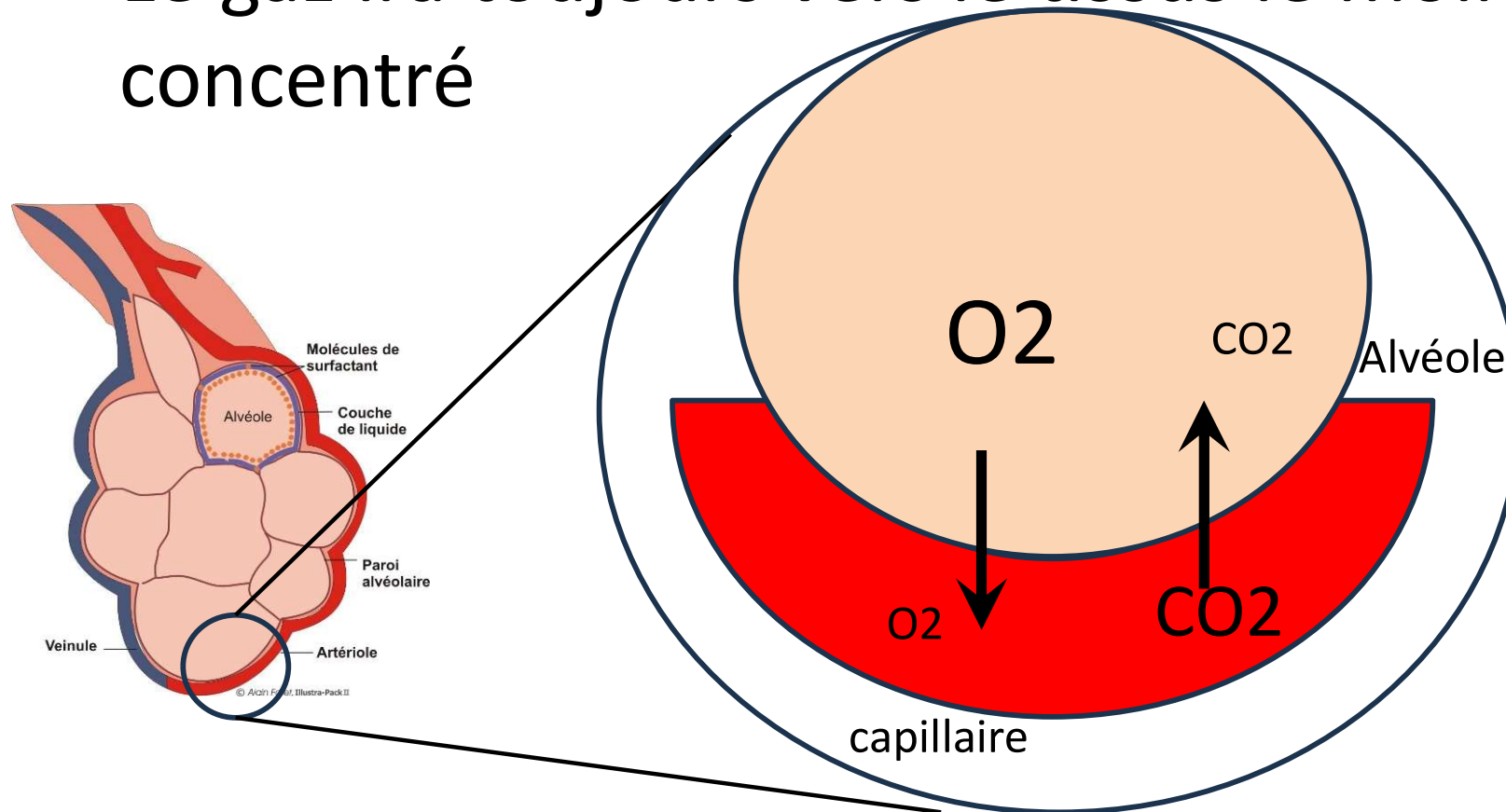
L'hématose

- Rappel: les échanges gazeux ou hématose sont régis par:
 - Les loi de Dalton et de Henri (perfusion)
 - La composition de l'air
 - L'affinité de l'hémoglobine pour l'O₂ et le CO₂
- Composition de l'air:

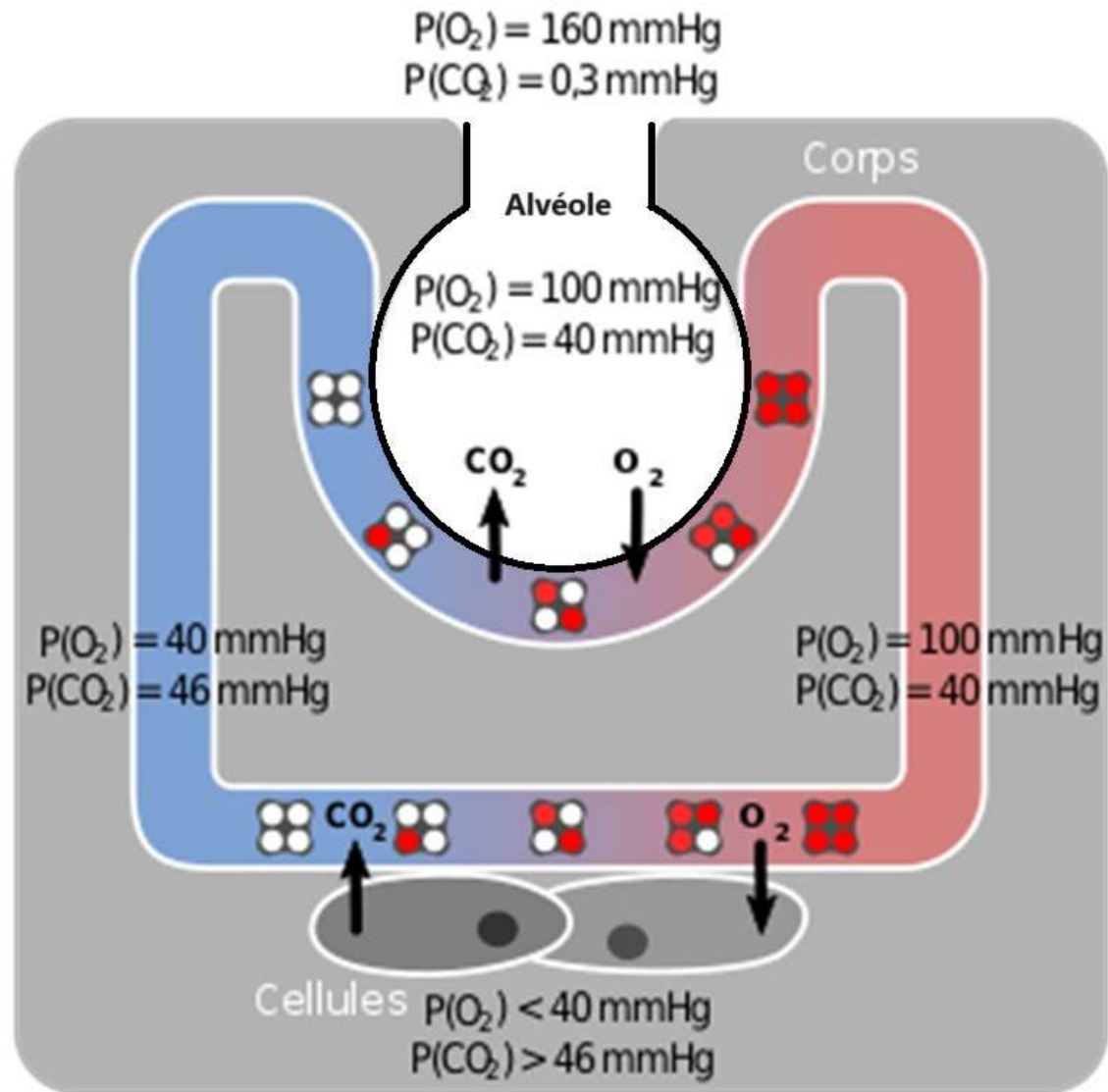
Gaz	Air inspiré	Air expiré	Air alvéolaire
O ₂	20%	16%	14%
CO ₂	0,03%	4%	5,6%
N ₂	79,9%	79,9%	79,9%

L'hématose

- Les échanges gazeux se font en fonction du gradient de pression
- Le gaz ira toujours vers le tissus le moins concentré



L'hématose



Les concentrations ne sont pas à apprendre

* Pressions et Tensions en mmHg
1 bar = 760 mmHg



La respiration cellulaire

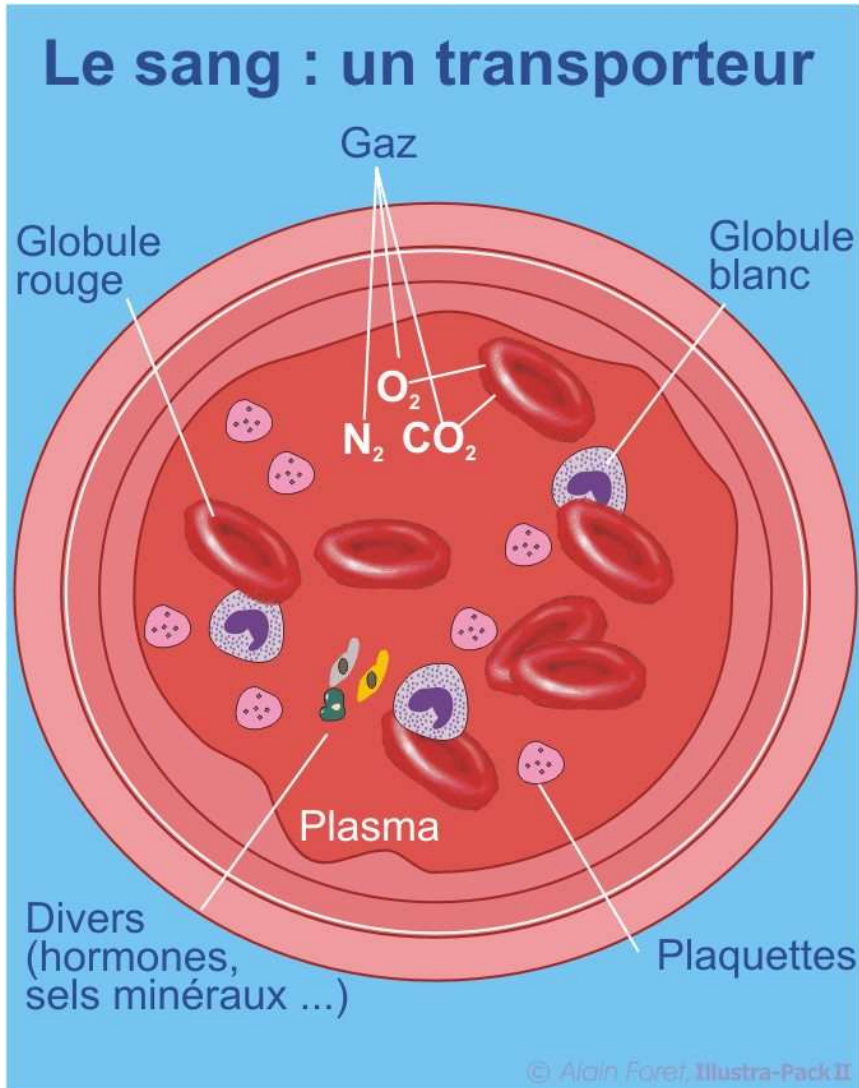
- Dans la cellule, l' O_2 (avec le glucose) est utilisé par les cellules pour fabriquer de l'énergie (ATP), il est donc un carburant énergétique des cellules.
- Les déchets produits sont le gaz carbonique (CO_2) et de l'eau



Plan

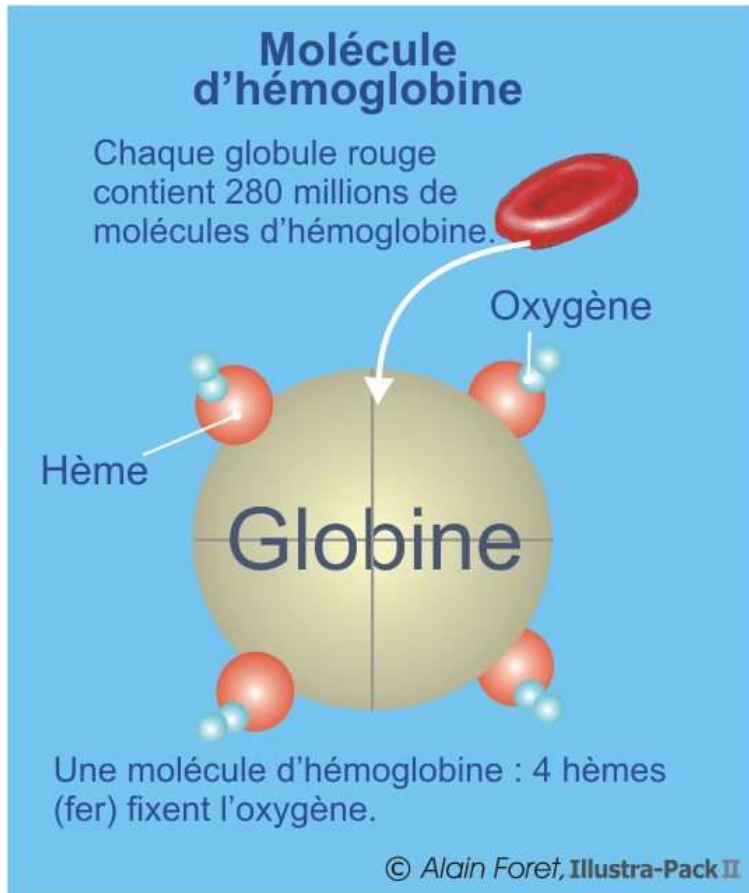
- Objectifs / Justification
- L'oreille
- Le système ventilatoire
- L'hématose
- Le système circulatoire
- Références
- Testez vous

Le sang



- Il permet le transport
 - Des gaz
 - Des nutriments et des déchets
 - Des hormones
 - Des systèmes de défense de l'organisme (globules blancs, plaquettes)
- Il est composé de:
 - Plasma (eau+ sels minéraux+ protéines), environ 5 litres.
 - Éléments figurés (**globules rouges**, globules blancs, plaquettes)

Le transport de gaz



- O₂ transporté sous forme:
 - **98% combinée à l'hémoglobine**
 - Dissoute dans le plasma à 2%
- CO₂ transporté à la fois sous forme:
 - 8% combinée à l'hémoglobine
 - **87% sous forme de bicarbonates**
 - 5% sous forme dissoute dans le plasma (participe à la formation de noyaux gazeux)
- Le N₂ (azote) n'est pas métabolisé et reste sous forme **dissoute**

En plongée ou en oxygénothérapie hyperbare, PpO₂ augmente et donc aussi la quantité d'O₂ dissous

Le transport de gaz



- Le monoxyde de carbone (CO) :

C'est un gaz inodore et extrêmement dangereux

Provient d'une combustion incomplète (gaz d'échappement)

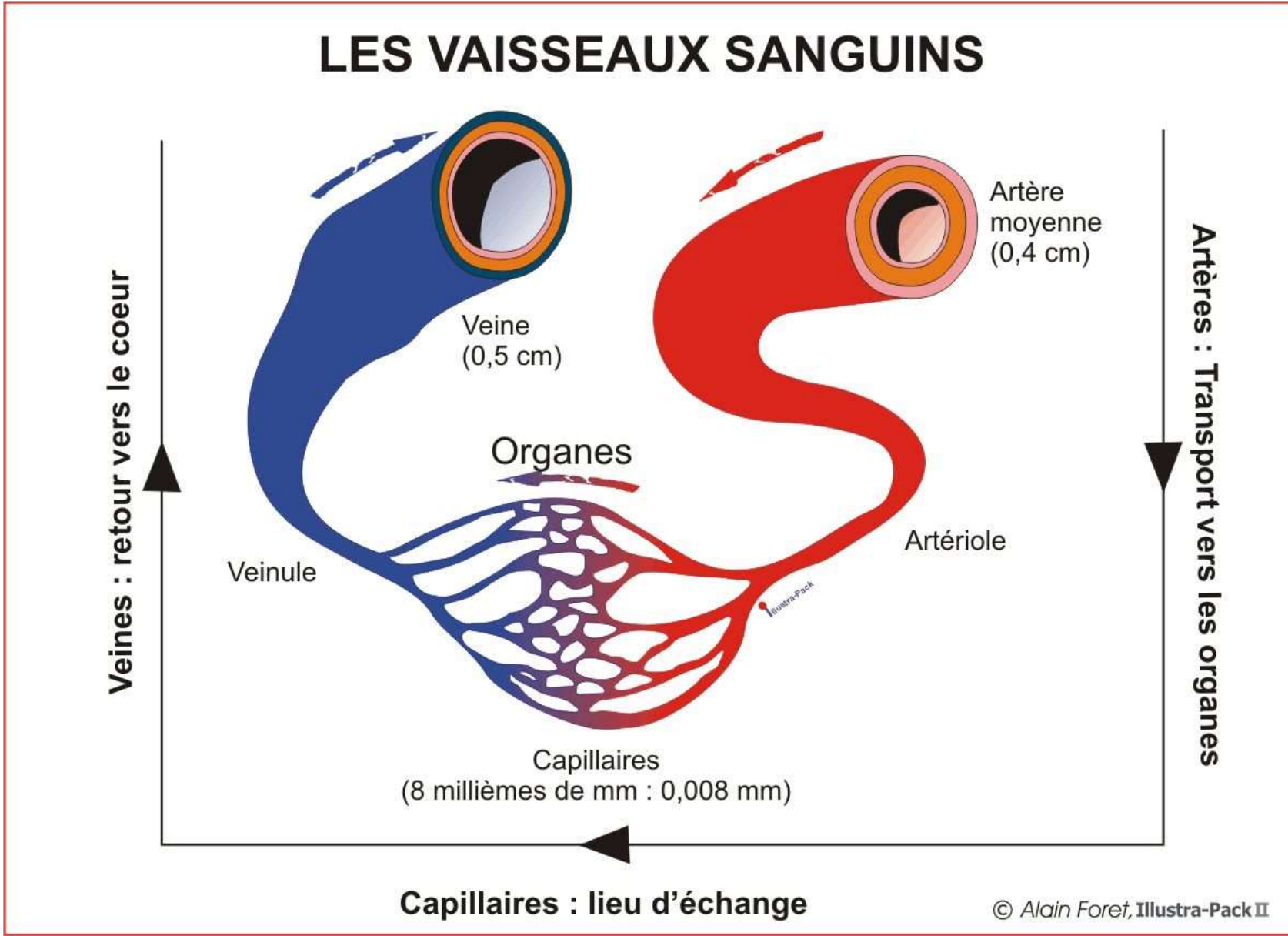
Il se fixe sur l'Hémoglobine aux mêmes endroits et de manière plus stable et indissociable que l'oxygène.

Une faible quantité suffit à faire chuter drastiquement la tension d'O₂ dans le sang.

Risque d'asphyxie

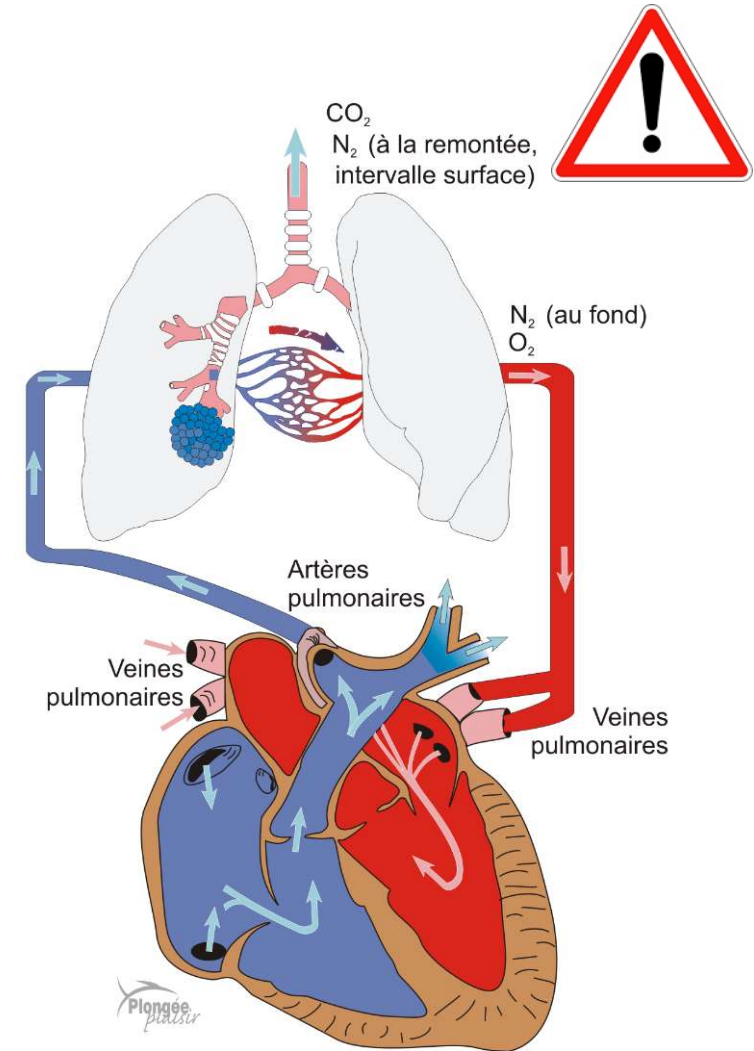
Vigilance par rapport à la prise d'air du compresseur !

Les vaisseaux



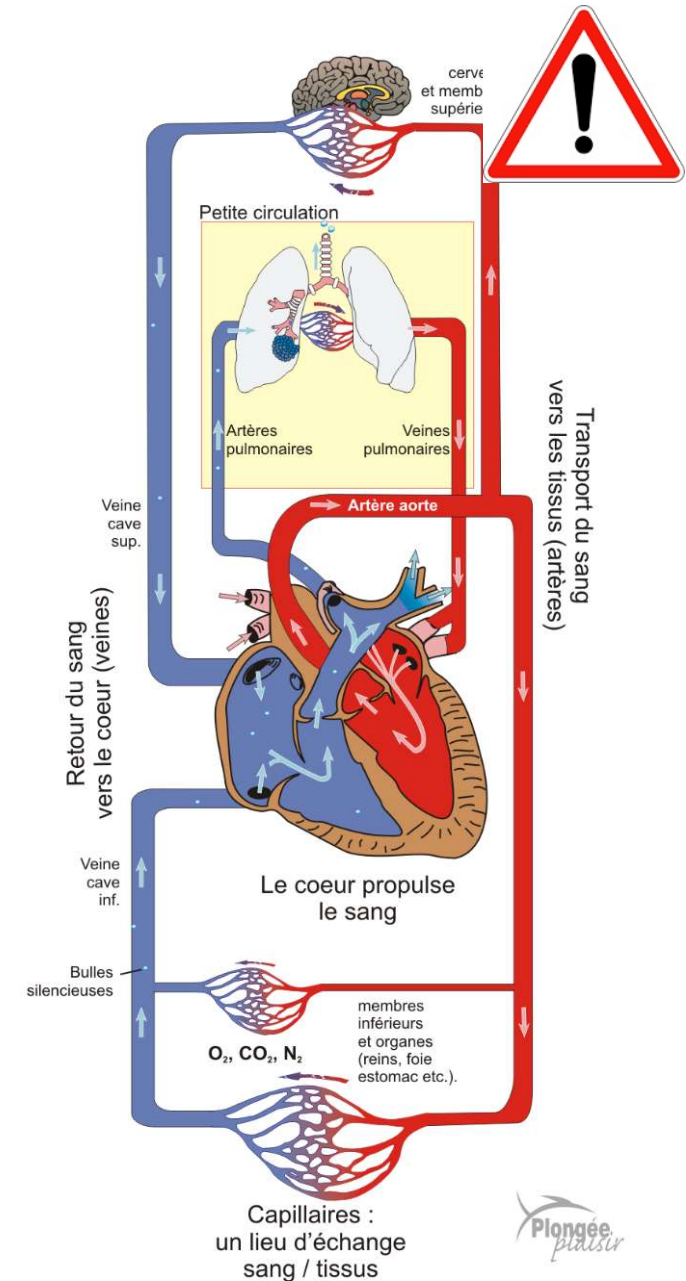
La circulation pulmonaire

- La petite circulation ou circulation pulmonaire permet l'oxygénation du sang
- C'est le siège de l'hématose
- *Nota* : du fait de l'air comprimé, l'azote intervient aussi dans les échanges gazeux



La circulation générale

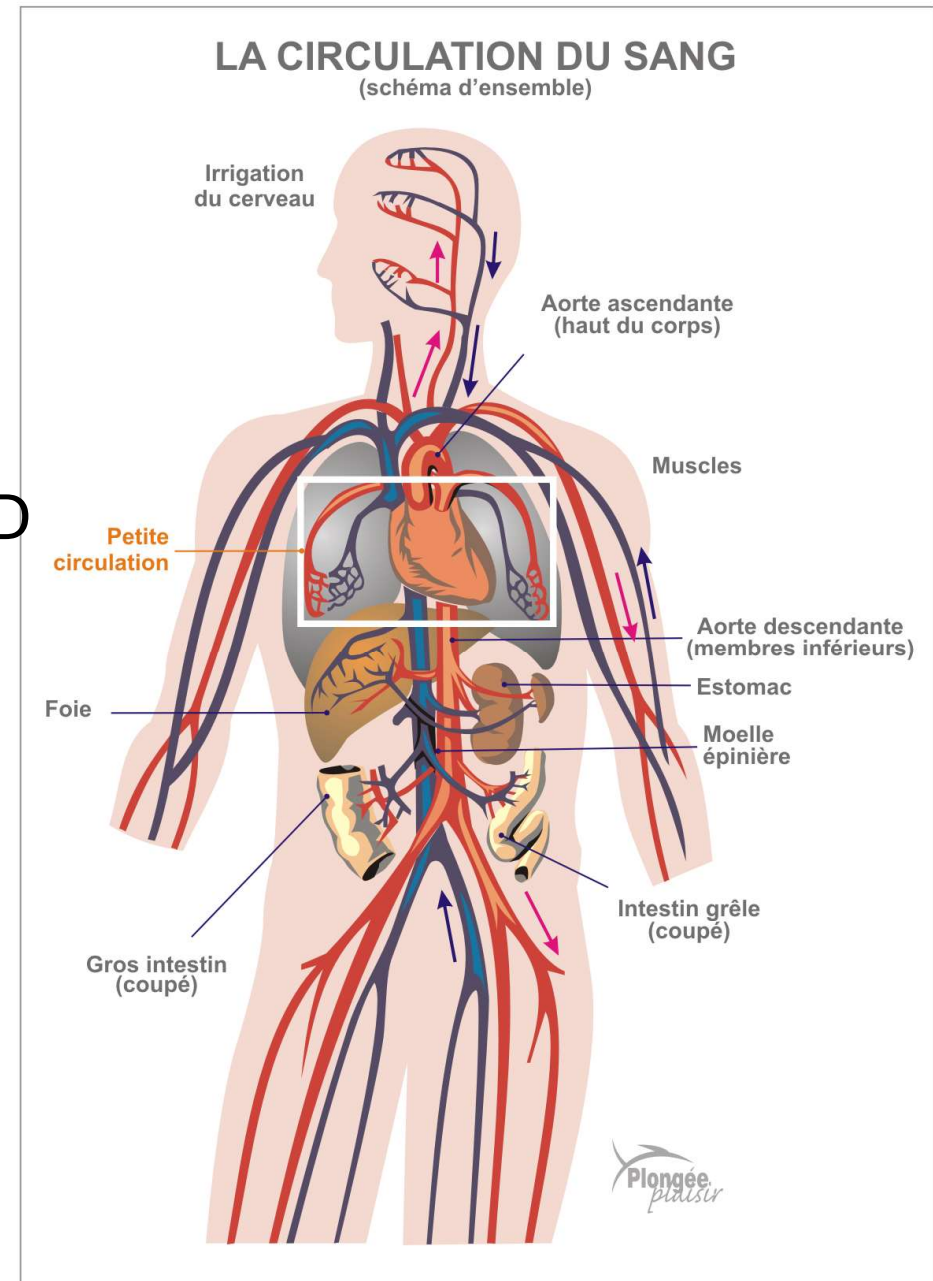
- La grande circulation ou circulation générale amène le sang riche en O_2 à toutes les parties de l'organisme
- Les échanges gazeux se font au niveau des capillaires : libération de l' O_2 et captation du CO_2 pour être transporté vers la circulation pulmonaire



Les circulations sanguines

- Moelle épinière
- Le système veineux de la moelle épinière est à faible débit
- Création d'engorgements favorisant potentiellement les ADD de type médullaire

La circulation sanguine



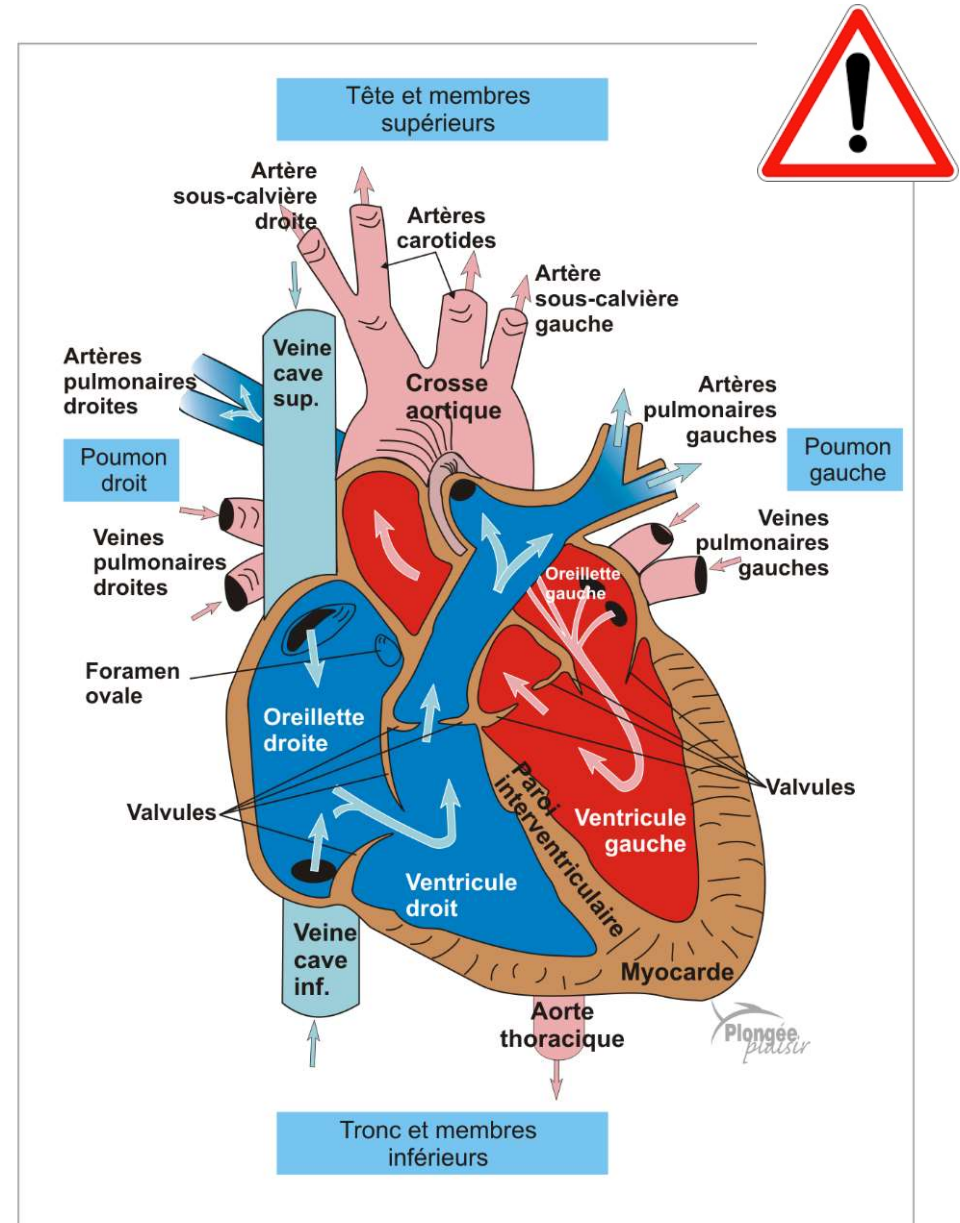


Le cœur

- Muscle creux de la grosseur du poing situé dans le médiastin, composé de 3 couches (péricarde, myocarde, endocarde)
- Pompe aspirante et refoulante qui doit assurer un débit circulatoire à une pression suffisante et adaptée aux besoins de l'organisme
- Composé de 2 parties indépendantes l'une de l'autre: cœur droit et cœur gauche (plus gros)
- Chaque partie possède 2 cavités: l'oreillette et le ventricule
- Rythme: 60-80 pulsations/min au repos
- Brasse près de 10 tonnes de sang par jour

Le cœur

- Bradycardie : Ralentissement du rythme cardiaque en-dessous de 60 p/min
- Bradycardie reflexe : Le contact des narines et le pourtour des narines provoque un ralentissement du rythme cardiaque
- Apnée : Constation d'une bradycardie et d'une vasoconstriction périphérique liées à l'apnée -> adaptation pour apporter de l'O₂ en quantité suffisante
- Tachycardie : Accélération durable ou permanente de la fréquence cardiaque, au-delà des 100 p/min





Le cycle cardiaque

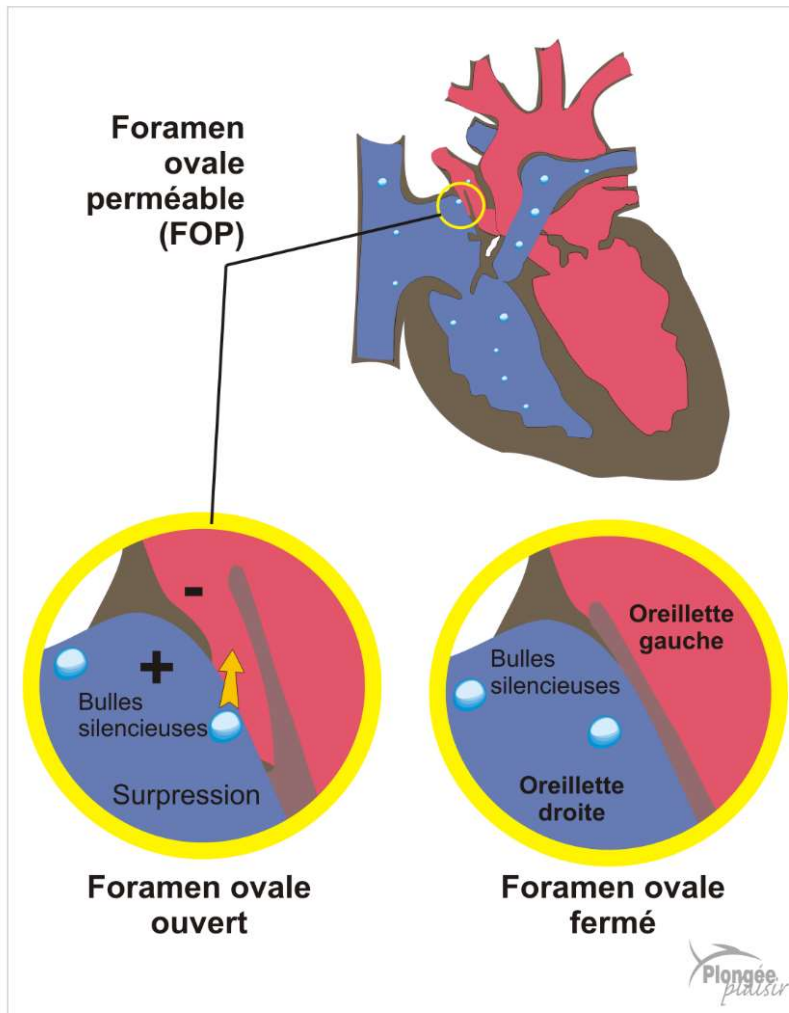
- Les oreillettes Droite et Gauche se contractent en même temps, puis les ventricules Droit et Gauche
- Cycle en 3 phases:
 - **Systole (contraction) auriculaire:** le sang est chassé vers les ventricules
 - **Systole ventriculaire:** le sang est chassé du cœur.
 - **Diastole:** repos, remplissage
- Le ventricule gauche expulse du sang riche en oxygène tandis que le ventricule droit expulse du sang chargé en dioxyde de carbone
- Les valvules empêchent le retour du sang vers le compartiment précédent



La régulation du cycle cardiaque

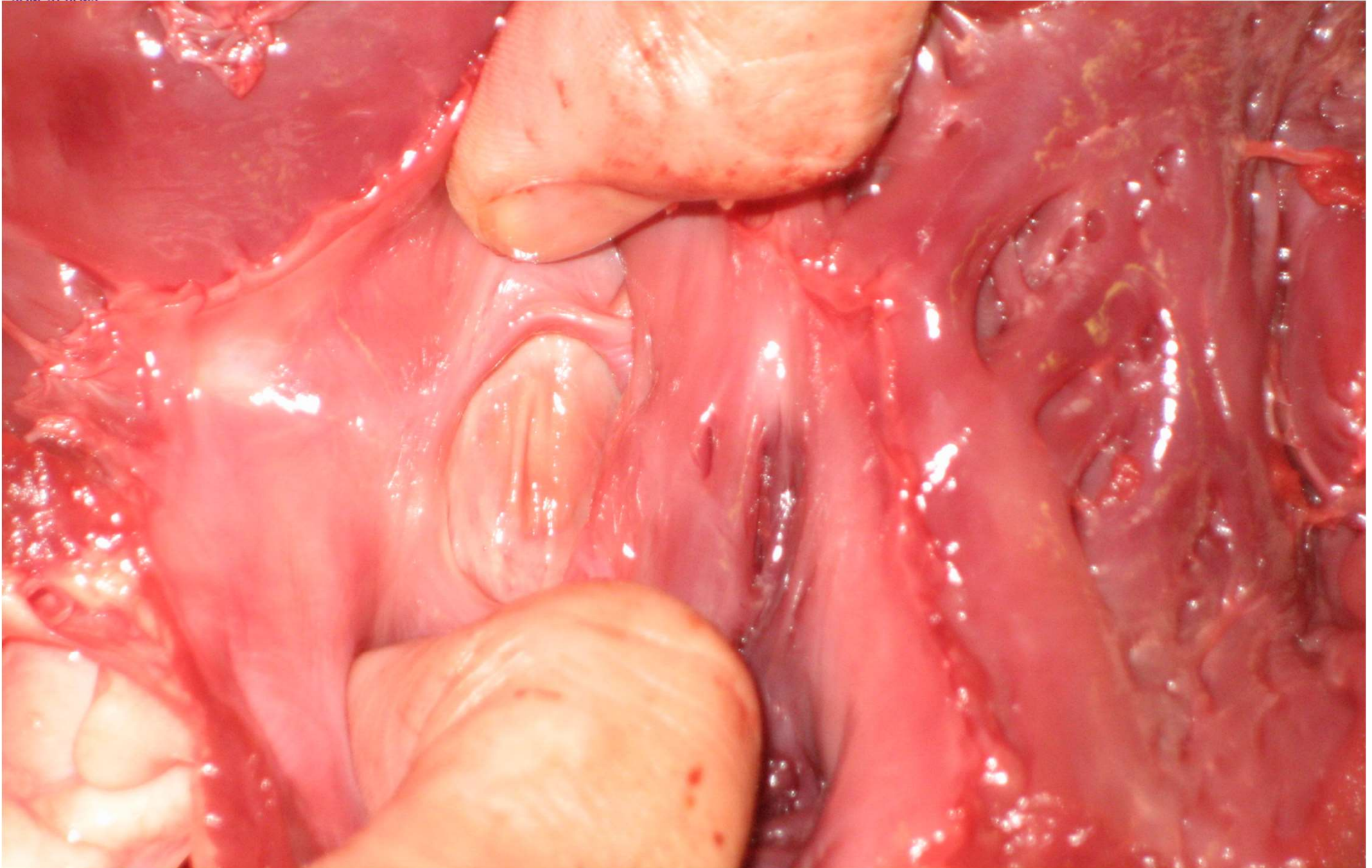
- Le cœur possède son propre système nerveux d'activation de la contraction, il n'a pas besoin du cerveau ni de la moelle pour fonctionner (mais pour le réguler)
- L'organisme a besoin de moduler le débit sanguin en fonction de ses besoins. Ceci ne peut s'effectuer que par une variation du rythme cardiaque
- La modification du rythme nécessite l'intervention:
 - Des nerfs sympathiques pour l'accélérer
 - Des nerfs parasympathiques pour le ralentir
- Il est ainsi en étroite relation avec le système nerveux et le système ventilatoire (chémo-récepteurs au CO_2 au niveau de la crosse aortique et des sinus carotidiens)

Le foramen ovale perméable (FOP)

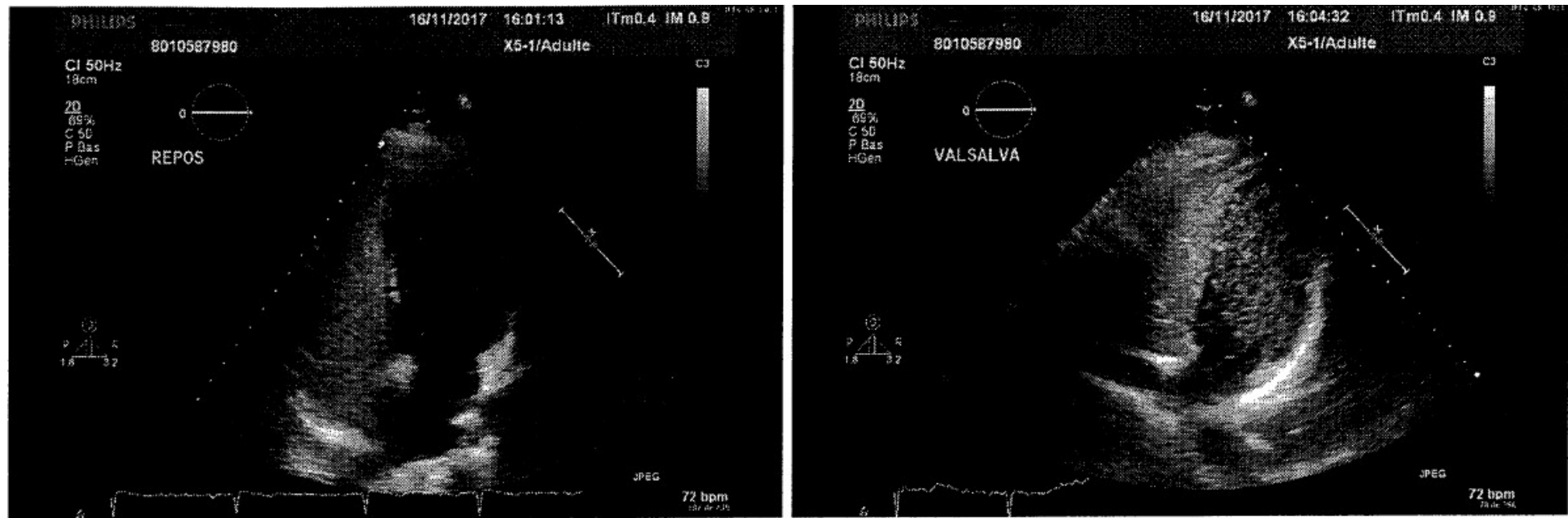


- Communication entre les 2 oreillettes pendant la vie fœtale qui se ferme à la naissance.
- Pour 25-35% des personnes, la fermeture reste imparfaite
- Durant la désaturation en azote, risque de passage des bulles du cœur droit vers le cœur gauche
- Pas d'élimination au niveau du filtre pulmonaire, accès des bulles au cerveau et à l'oreille interne
- Phénomène facilité par des hyperpressions thoraciques (Valsalva) qui ouvrent le FOP
- Risque d'ADD faible de l'ordre de 1 à 3 pour 10 000

Le foramen ovale perméable de porc



Echographie d'un FOP



Repos

valsalva

En plongée loisir, l'existence d'un FOP n'est recherchée qu'en cas d'accident de désaturation neurologique cérébral ou vestibulaire avec respect des procédures et non de manière préventive



Effets physiologiques de l'immersion sur le système cardio-ventilatoire

➤ A l'immersion...

- Déplacement sanguin: 700 ml de sang supplémentaire se retrouvent répartis dans les poumons et le cœur (vasoconstriction périphérique)
- Le volume des poumons est également réduit par le déplacement du diaphragme vers le haut (la poussée d'Archimède compense le poids de l'abdomen).
- Le tissu pulmonaire gorgé de sang perd de sa souplesse.



➤ On voit donc que le simple fait de s'immerger modifie:

- le travail du cœur (plus important) -> bradycardie
- l'efficacité respiratoire (volume pulmonaire moindre)
- l'effort inspiratoire (poumons moins souples)

➤ Ces phénomènes sont amplifiés par le froid



Effets physiologiques de l'immersion: la diurèse

- L'afflux sanguin dû à l'immersion augmente donc la pression dans les veines, entraîne un bon remplissage du cœur et facilite son travail.
- Le résultat est une **augmentation de la pression sanguine** dans les artères. La pression dans les artères est contrôlée en permanence. Comme celle-ci augmente trop, un mécanisme de régulation entre en jeu : le **rythme cardiaque diminue** et le diamètre des artères augmente.
- Quand le volume plasmatique augmente, il y a plus de sang qui passe par le filtre rénal et la **diurèse** (production d'urine). Le débit urinaire qui est normalement de 1 ml /min passe à 6 ml/min en immersion !





Plan

- Objectifs / Justification
- L'oreille
- Le système ventilatoire
- l'hématose
- Le système circulatoire
- Références
- Testez vous



Références

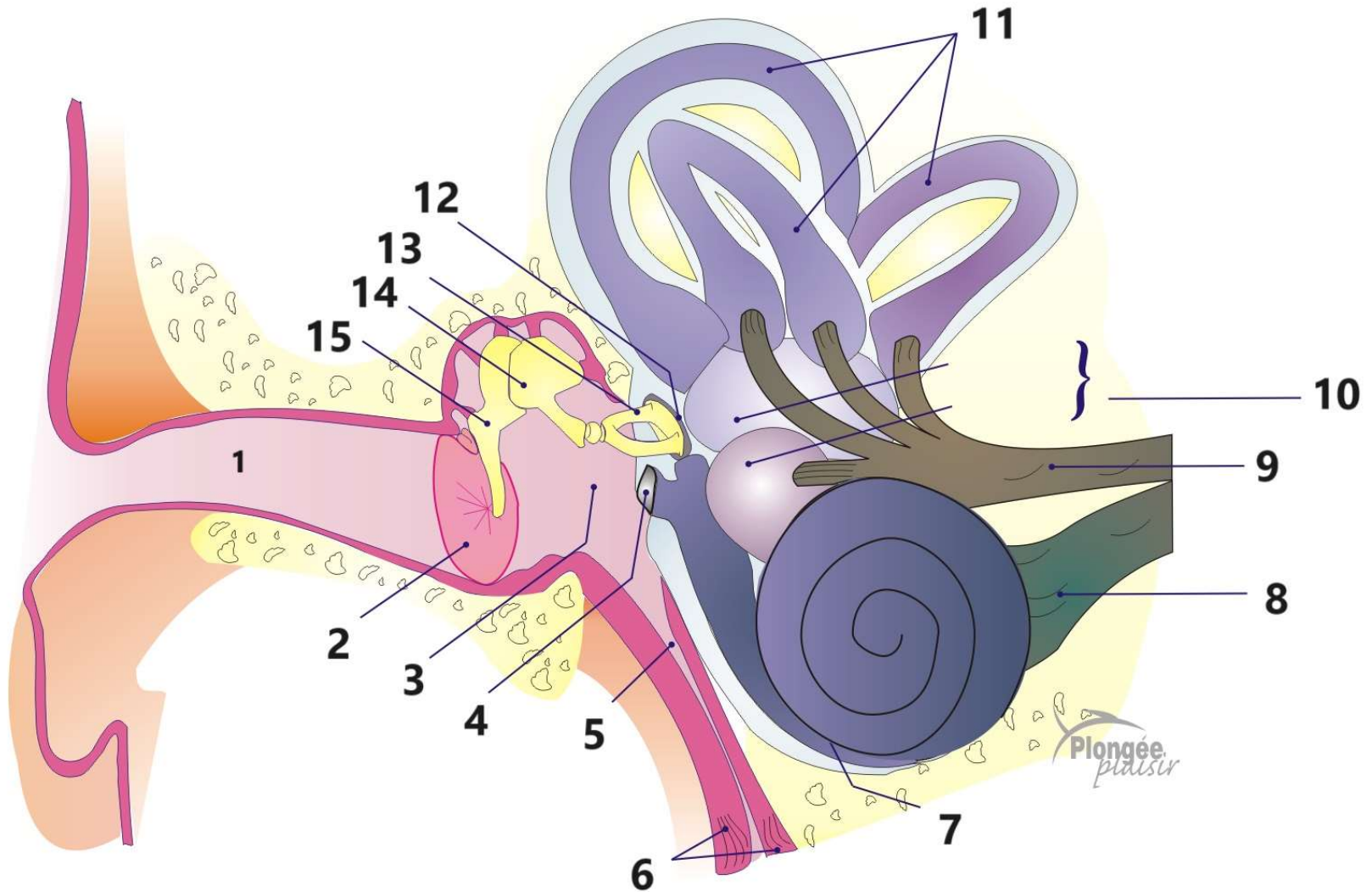
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Neurone>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Appareil_respiratoire
- Plongée plaisir 4, 10ème éditions GAP
- Coeur et plongée, Ed. Ellipses
- Physiologie & médecine de la plongée, 2ème édition. Broussole, Méliet, Coulange. Ed. Ellipses
- La plongée – anatomie et physiologie du corps humain. Splichal. Ed. Amphora
- Plongée – santé et sécurité. Fructus, Sciarli. Ed. Maritime
- www.aresub.org
- www.medsubhyp.com/
- http://www.codep93.fr/?page_id=167



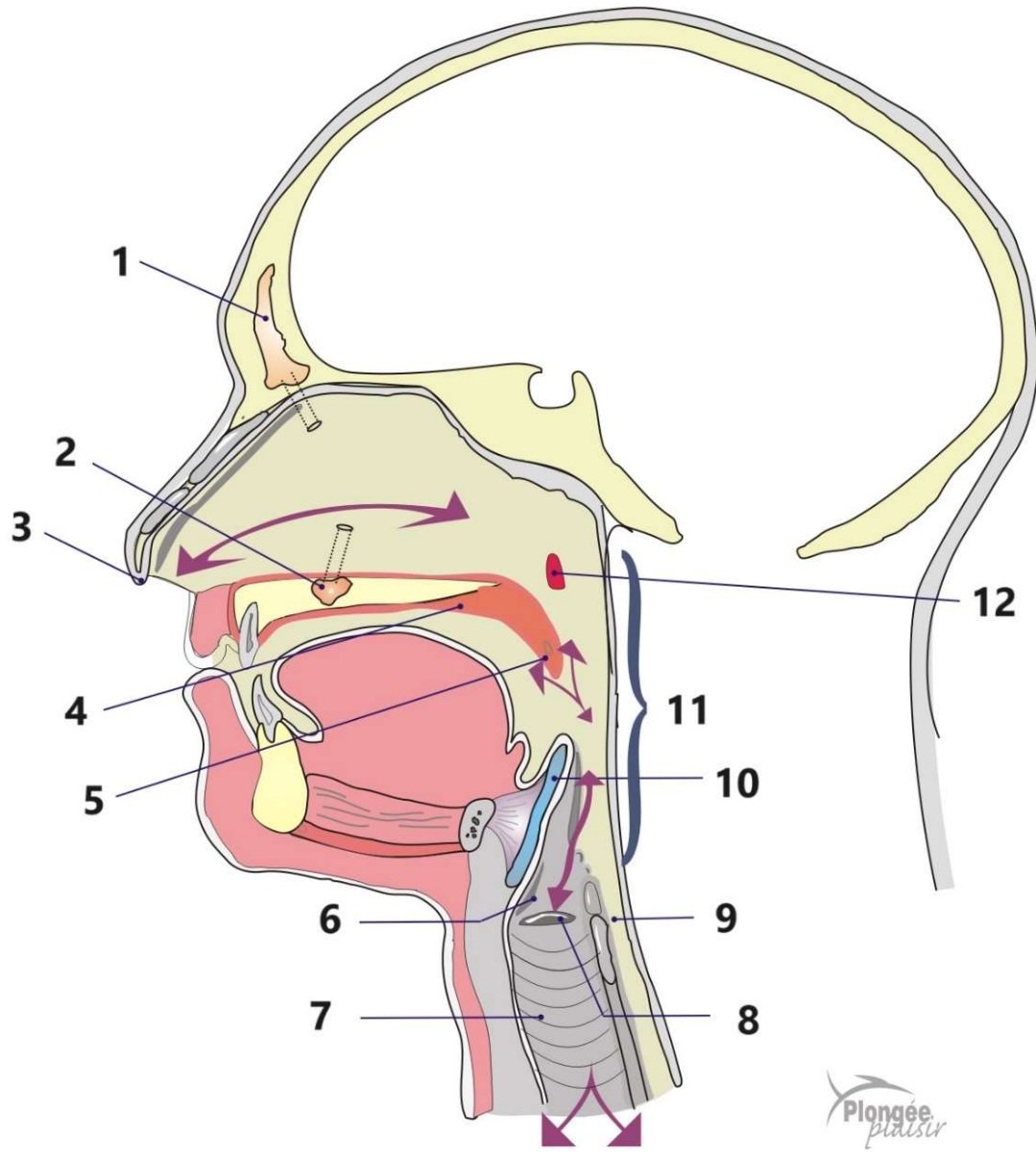
Plan

- Objectifs / Justification
- L'oreille
- Le système ventilatoire
- L'hématose
- Le système circulatoire
- Références
- Testez vous

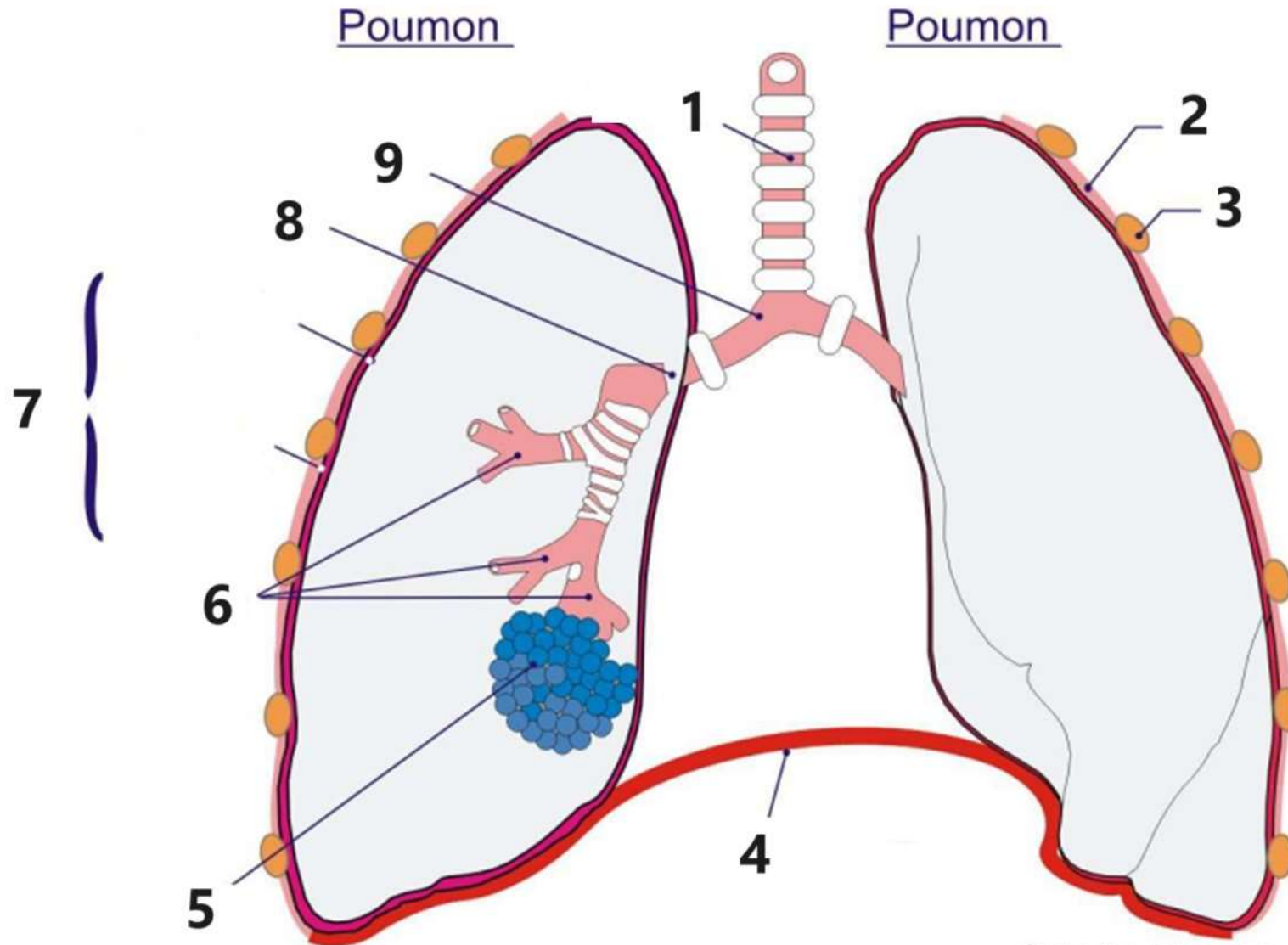
Testez vous



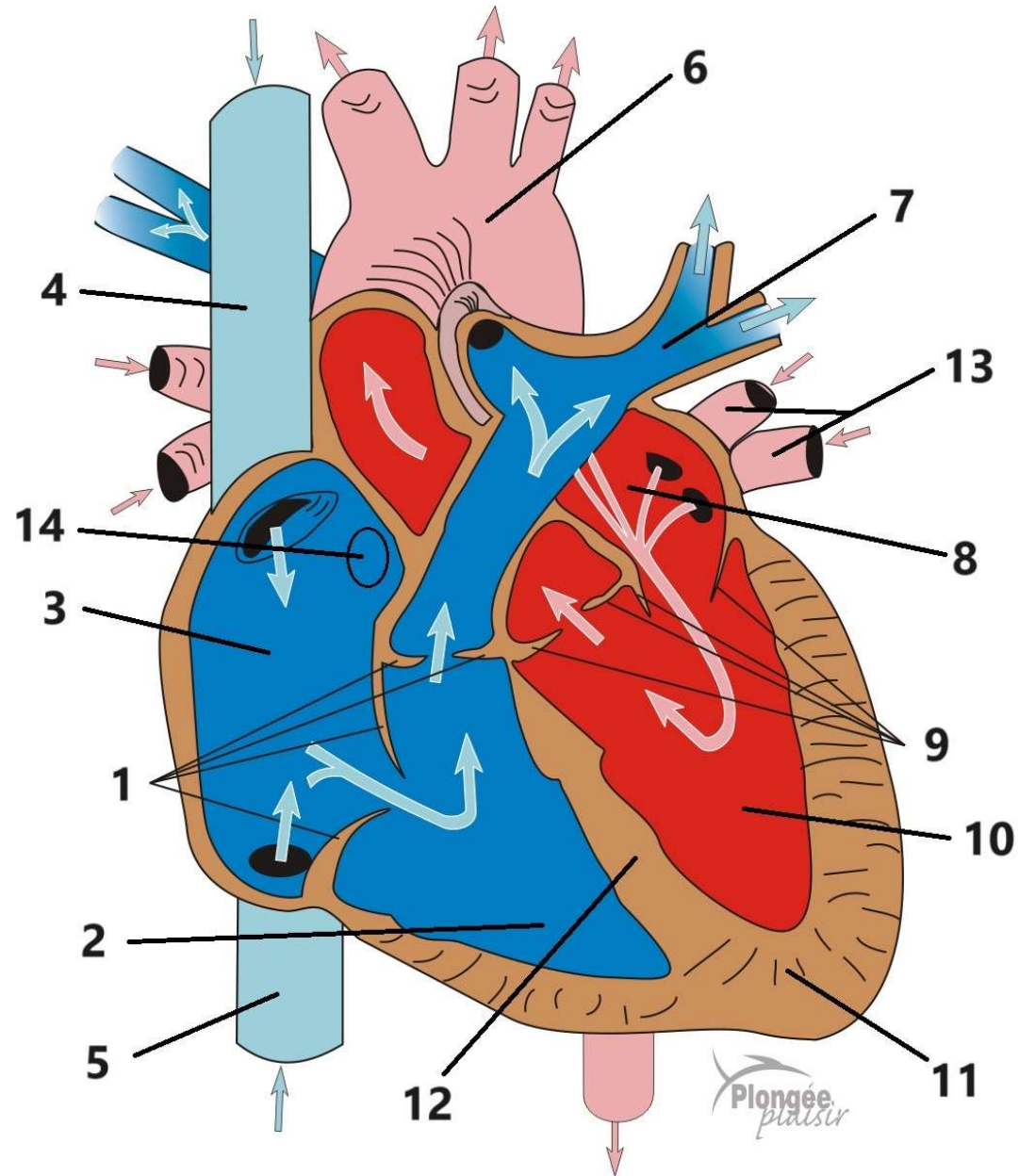
Testez vous



Testez vous



Testez vous





FIN

Merci de votre attention

