

**3 séances consacrées au système respiratoire du plongeur, pour :**

- Connaître le cheminement de l'air propre au plongeur,
- Connaître le rôle et le fonctionnement des poumons,
- Définir son autonomie,
- Connaître comment s'effectuent les échanges de gaz ( $O_2$ ,  $CO_2$  et  $N_2$ ),
- Connaître comment peut survenir l'essoufflement, la surpression pulmonaire, l'intoxication et la noyade.

**Séance 1 (23/01/13, aujourd'hui) : Description et fonctionnement de l'appareil ventilatoire.**

Pourquoi se soucier de cet appareil respiratoire ?

1. Composition de l'appareil respiratoire : Les voies aériennes.
  - 1.1 Les voies aériennes supérieures (les tuyaux du haut).
  - 1.2 Les voies aériennes inférieures (les tuyaux du bas).
2. Composition de l'appareil respiratoire : Les éléments moteurs.
3. La mécanique ventilatoire.
  - 3.1 Motricité de la cage thoracique.
  - 3.2 Régulation de la ventilation.
  - 3.3 Pneumogramme (valse en 4 volumes !).
  - 3.4 Facteurs tendant à accélérer et amplifier le cycle ventilatoire.
  - 3.5 Espace mort (le 5<sup>ème</sup> volume !).
4. La consommation d'air et l'autonomie.
  - 4.1 Loi de Mariotte « classique ».
  - 4.2 Calculs d'autonomie.
5. Au revoir.
6. Pour aller plus loin.

**Séance 2 (30/01/13) : Echanges gazeux et prévention des accidents liés à la ventilation.**

**Séance 3 (06/02/13) : Prévention des accidents sur les voies aériennes.**

**Pourquoi se soucier de cet appareil respiratoire ?**

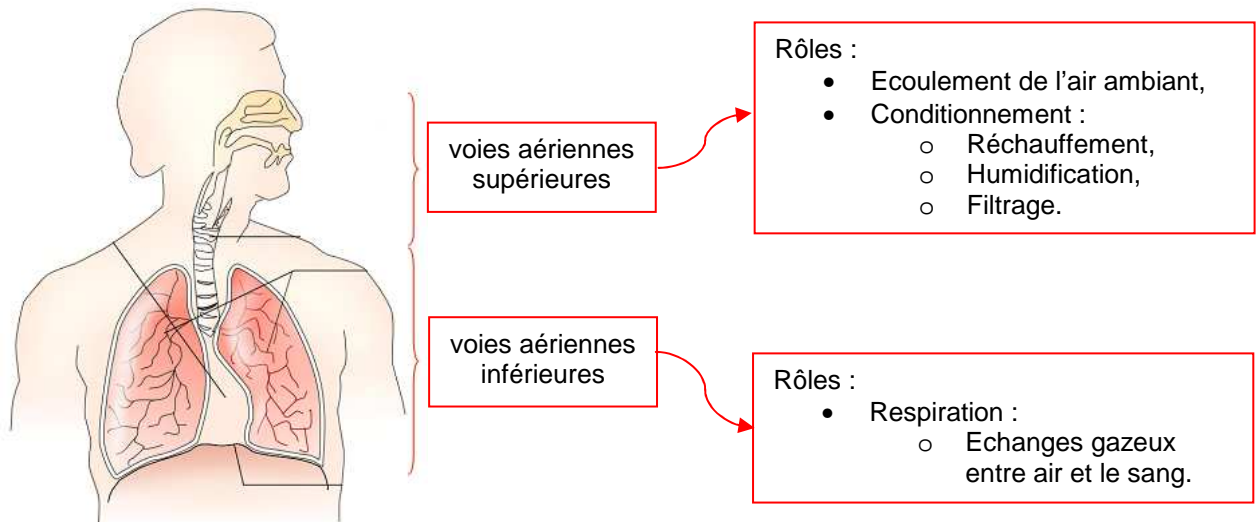
Pour fonctionner, notre corps doit en continu **s'alimenter en oxygène** (puisé dans l'air respiré), et **rejeter le gaz carbonique** et l'eau fabriqués (par production de l'énergie nécessaire au fonctionnement des cellules). C'est le rôle de l'appareil **respiratoire**.

Les organes qui composent cet appareil, sont fortement sollicités en plongée, par l'utilisation du scaphandre, car celui-ci modifie la mécanique ventilatoire.

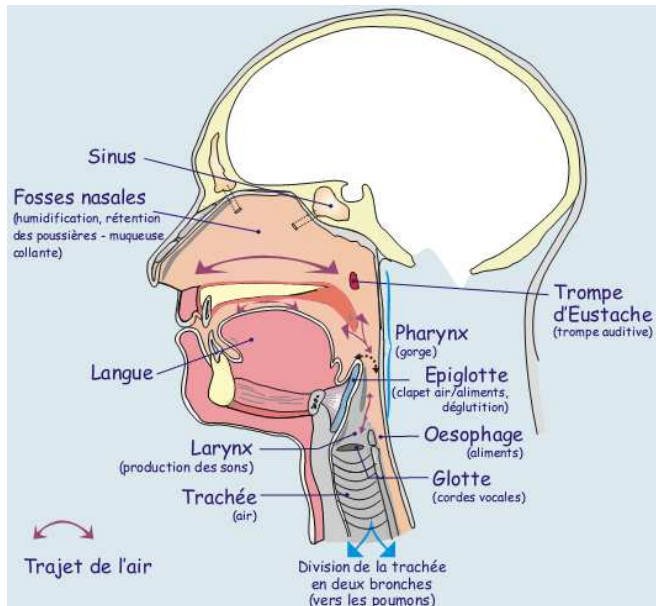
la mécanique ventilatoire modifiée alors, peut entraîner plusieurs risques de plongée (essoufflement, spasme de la glotte, barotraumatismes des sinus, surpression pulmonaire, noyade, toxicité des gaz...).

Le guide de palanquée doit connaître les adaptations de la respiration à mettre en œuvre pour prévenir les risques de la plongée en scaphandre.

**1. Composition de l'appareil respiratoire : Les voies aériennes.**



**1.1 Les Voies Aériennes Supérieures (les tuyaux du haut).**



**Les VAS** conduisent l'air de l'extérieur jusqu'à la trachée, et inversement.

Trajet de l'air *en surface* :  
Fosses nasales → Pharynx → Larynx →  
Glotte → Trachée → ...

Trajet de l'air *en plongée* :  
Bouche → Pharynx → Larynx → Glotte →  
Trachée → ...  
**Fosses nasales => absence de filtrage,  
d'humidification et réchauffement !**  
⇒ nécessité d'air pur dans le bloc,  
⇒ déshydratation,  
⇒ refroidissement.

- **Les fosses nasales**, ouvertes sur les narines :

Cavités osseuses tapissées d'une muqueuse collante, très vascularisée et constituée de poils, elles transportent l'air inspiré en l'humidifiant, le réchauffant et le filtrant de ses impuretés.

**En plongée**, elles sont shuntées (respiration par la bouche !).

- **Les sinus** : cavités emplies d'air, reliés aux fosses nasales par de minces canaux.

Ils améliorent le réchauffement et l'humidification de l'air inhalé, amplifient la résonance de la voix, allègent le poids du crâne, amortissent les coups.

- **La bouche** sert de shunt ou d'assistance des fosses nasales en cas d'obstruction de celle-ci. Elle n'humidifie pas, ni ne réchauffe l'air inspiré.

**En plongée**, la respiration est buccale. L'air comprimé inspiré par le détendeur est refroidi (détente) et filtré. Le filtre du détendeur stoppe les impuretés grossières du bloc. Non entretenu il peut générer des efforts inspiratoires non négligeables.

L'air fourni par le compresseur est sec et filtré (si filtre en bon état).

Ceci explique en partie le refroidissement et la déshydratation en plongée. Il faut donc s'hydrater avant la plongée, porter un équipement adapté au froid, entretenir son détendeur (filtre changé régulièrement).

- **Le pharynx ou gorge**, carrefour aéro-digestif, délimité :

- dans sa partie supérieure par l'orifice de la trompe d'Eustache (communication avec l'oreille moyenne nécessaire à l'**équilibre des pressions**), la luette et le palais.

- sa partie inférieure formée en avant par l'orifice du larynx (air) surmontée d'un clapet, l'épiglotte, et en arrière par l'orifice de l'œsophage (aliments et liquides) sans clapet (pourquoi ?)

- **Le larynx**, il assure un rôle dans la respiration, la phonation, la déglutition et dans la défense de l'organisme en cas d'irritation (blocage ou spasme), constitué de :

- **l'épiglotte**, clapet situé dans sa partie supérieure qui ferme l'orifice laryngé au moment de la déglutition pour empêcher le passage d'aliments/liquides dans la trachée.

- **la glotte**, orifice formé de 2 cordes vocales (organe de la phonation) permet l'accès à la trachée.

Elle s'ouvre et se ferme volontairement ou involontairement au moment de la parole, **d'efforts** et de la ventilation !

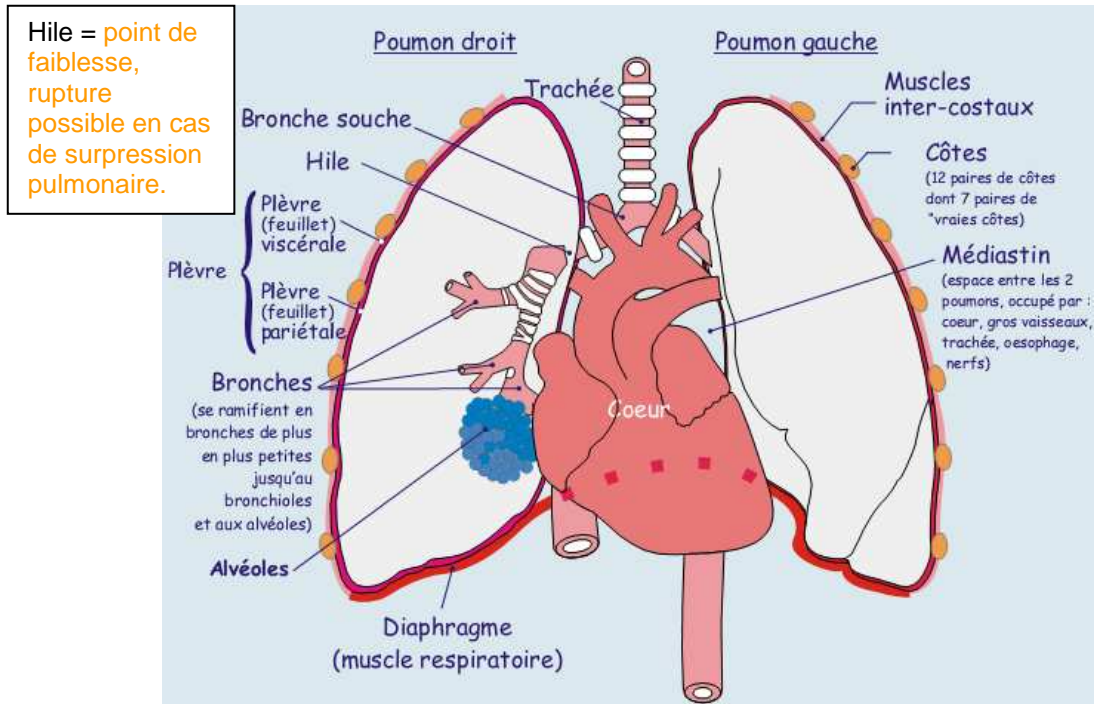
**En plongée**, son ouverture à la remontée garantit l'absence de surpression pulmonaire. Mais en cas d'entrée d'eau dans les fosses nasales, elle peut se fermer par réflexe pour protéger les VAI : c'est le spasme glottique ou laryngospasme.

**Rôle du guide de palanquée :**

Veiller à l'expiration chez les jeunes plongeurs à la remontée (présence de bulles en sortie de détendeur) et aux conditions de plongées rassurantes.

**1.2 Les voies aériennes inférieures (les tuyaux du bas).**

**Les VAI** conduisent l'air de la partie inférieure de la trachée jusqu'aux poumons, et inversement.



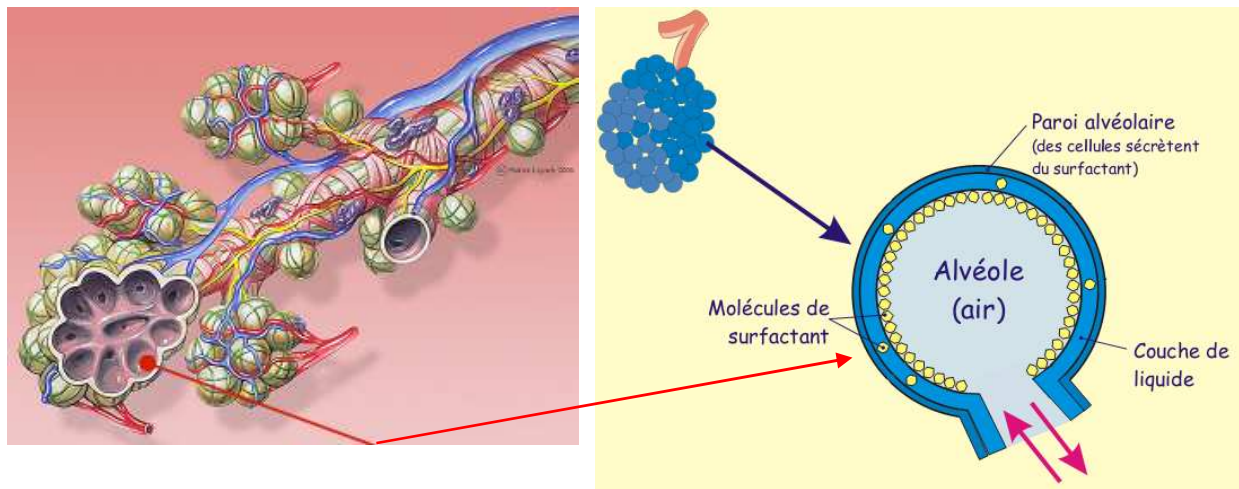
- **La trachée** : conduit aérien formé d'une armature cartilagineuse se terminant par les 2 bronches souches.
- **Les 2 bronches souches** (12 mm) pénètrent dans les poumons par **le hile**, zone d'insertion fragile pour donner naissance à des bronches de plus en plus étroites jusqu'à devenir :
- **Les bronchioles** (0,5 mm) et aboutir aux alvéoles pulmonaires (environ 1 million de bronchioles).
- **Les poumons**, 2 sacs remplis de lobules pulmonaires contenant 700 millions d'**alvéoles** où les échanges gazeux ont lieu.

Siège des échanges gazeux ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ), les alvéoles représentent une surface d'échange de 150 à 200  $m^2$  !

Cavité sphérique de :

- 0,1 à 0,3 mm de diamètre en ventilation normale.
- 0,08 mm en expiration forcée jusqu'à 0,5 mm en inspiration forcée.

Les alvéoles sont entourées d'un filet dense de capillaires où ont lieu les échanges de gaz à travers la membrane alvéolo-capillaire: **entrée d' $O_2$  et d' $N_2$  dans le sang, évacuation de  $CO_2$  et d' $N_2$  dans l'air expiré.**



Leur paroi interne est tapissée **de liquide et de surfactant** :

- Le rôle du liquide est de dissoudre les gaz avant leur diffusion au travers des parois
- Le rôle du surfactant est d'éviter l'affaissement des alvéoles en cas d'expiration forcée et de faciliter les entrées et sorties d'air.

Il autorise l'élasticité de la paroi alvéolaire.

La fabrication du surfactant se fait quelques heures avant la naissance. Les enfants prématurés n'en sont pas pourvus, ce qui rend difficile leur ventilation naturelle et même artificielle...

Le surfactant se régénère régulièrement.

**La maturité pulmonaire de l'enfant** n'est effective qu'entre 6 et 8 ans.

### **Rôle du guide de palanquée :**

Respecter les conditions de pratique de la plongée enfant.

Une **surpression pulmonaire** cause des lésions de la paroi alvéolaire n'autorisant plus les échanges gazeux.

Une **exposition prolongée (6h à 30h)** à une pression partielle élevée d'oxygène, peut amener à la détérioration du surfactant. C'est l'effet pneumo-toxique décrit par LORRAIN-SMITH, inexistant en plongée loisir.

### **Possibilité de shunt pulmonaire :**

L'augmentation de la pression intra-thoracique peut favoriser l'ouverture de circuits de dérivation (Foramen ovale et capillaires pulmonaires), qui permettent le passage direct de sang veineux dans le sang artériel, et laisser passer des bulles risquant de causer un accident de décompression.

Le shunt, est un espace pulmonaire perfusé mais mal ventilé.

### **Rôle du guide de palanquée :**

Ne pas réaliser d'efforts, d'apnée et de Valsalva à la remontée.



**2. Composition de l'appareil respiratoire : Les éléments moteurs.**

**- La cage thoracique :**

Protégés par les côtes, les poumons occupent la grande partie de la cage thoracique, ils sont solidaires d'elle grâce au vide pleural.

Elle comprend un espace qui sépare les 2 poumons « le médiastin » dans lequel se trouve le cœur, l'œsophage, les gros vaisseaux et les nerfs.

**- La plèvre :**

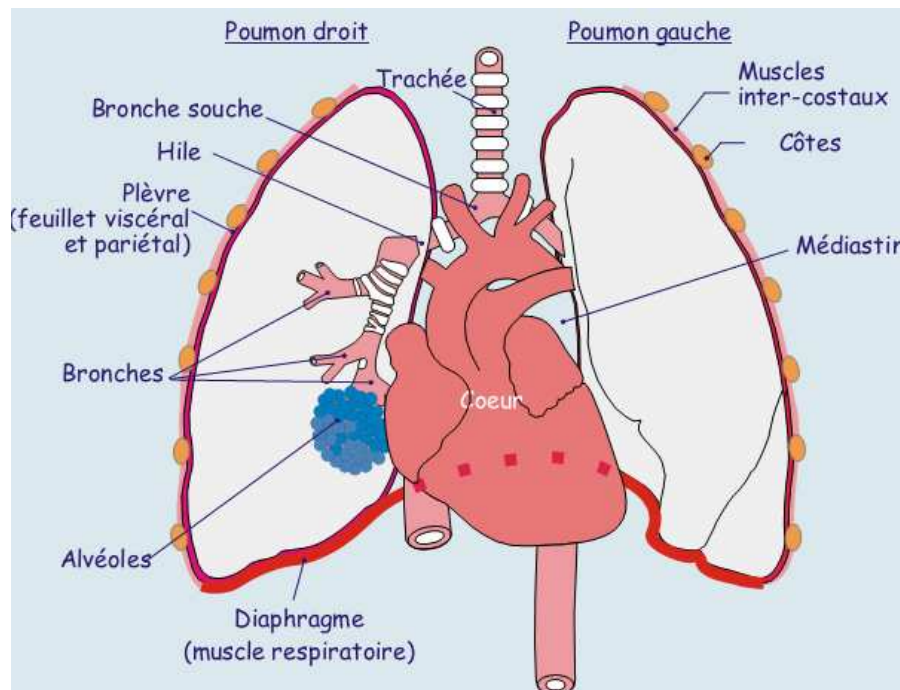
Enveloppe composée d'un feuillet viscéral, interne accolé au poumon et d'un feuillet pariétal, externe accolé à la cage thoracique, au médiastin et au diaphragme. Entre ces 2 feuillets, un liquide lubrifiant permet un glissement l'un sur l'autre des feuillets pendant la ventilation tout en restant solidaires avec les côtés et le poumon : c'est le **vide pleural**.

Si une brèche est créée dans un des feuillets de la plèvre (traumatisme, surpression pulmonaire, bulles d'ADD...), le vide disparaît et l'espace rempli de sang (hémithorax) ou d'air (pneumothorax) va comprimer le poumon, altérer la mécanique ventilatoire et générer des difficultés respiratoires.

**- Les muscles respiratoires**

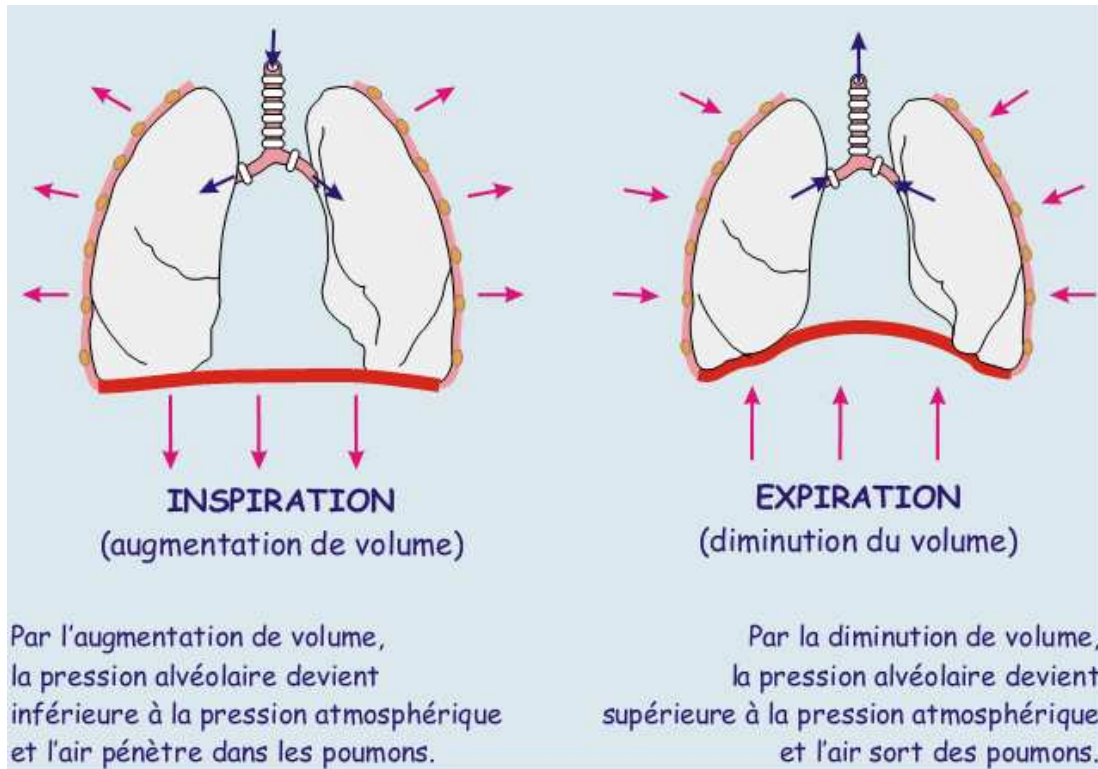
Le **diaphragme** est le muscle inspiratoire principal (60% du travail !).

Dans l'inspiration forcée, il intervient avec les muscles intercostaux externes (relevateurs des côtes) et les muscles du cou (scalènes, SCM, ailes du nez...). Dans l'expiration forcée, il intervient avec les muscles abdominaux, intercostaux internes (abaisseurs des côtes)...



**3. La mécanique ventilatoire.**

**3.1 Motricité de la cage thoracique.**



Voir : <http://www.biologieenflash.net/animation.php?ref=bio-0028-3>

- **L'inspiration** : La hausse du taux de  $\text{CO}_2$  artériel stimule les chémorécepteurs qui informent les centres respiratoires bulbaires. Ces derniers commandent au diaphragme de s'abaisser et aux muscles intercostaux externes de se contracter. La solidarité de l'ensemble poumons-côtes-muscles crée ainsi une augmentation de volume de la cage thoracique ce qui fait baisser la pression dans les poumons où l'air s'engouffre, aspiré par dépression. C'est **une phase active**.

- Lors de **l'expiration**, les muscles et le diaphragme se relâchent. La baisse du volume thoracique entraîne une augmentation de pression qui expulse l'air vers l'extérieur. C'est une **phase passive** pour un individu au repos en surface.

A la fin de l'expiration, il existe une pause ventilatoire.

L'expiration devient **active** par la contraction des muscles abdominaux et intercostaux internes (abaisseurs des côtes) en cas d'effort, d'essoufflement ou en situation de plongée (ventilation sur détendeur). La pause respiratoire de fin de cycle disparaît.

**En plongée, l'expiration est active et nécessite un apprentissage et une adaptation :**

- Pour s'immerger par la technique du phoque, il faut expirer rapidement et profondément
- Pour vaincre la résistance du mécanisme du détendeur, il faut expirer activement, plus qu'en surface,

**Rôle du futur guide de palanquée :**

- Pour l'exercice de la remontée sans embout, il faut contrôler l'expiration, ne pas relâcher le diaphragme d'un seul coup.

Le travail des muscles *en plongée* est important, car :

**En plongée, la masse volumique de l'air augmente :**

La loi de Mariotte illustre l'augmentation du nombre de molécule d'air par litre. Le travail des muscles pour inspirer, pour remplir les poumons, est donc augmenté ! De même, l'expiration devient active. Les muscles doivent travailler pour expulser l'air des poumons. Les débits d'échange d'air sont donc diminués. Phénomène amplifié avec la profondeur !



Ceci crée une fatigue.

**En plongée, le détendeur crée une résistance ventilatoire.**

La légère différence de pression ambiante entre la bouche (détendeur) et le centre des poumons, entraîne une légère difficulté :

- ⇒ à l'inspiration tête haute,
- ⇒ à l'expiration tête basse.



Ceci crée une fatigue.

**En plongée, le volume des poumons est diminué :**

Par la nouvelle répartition du sang dans le corps (afflux sanguin vers le thorax) et la pression sur le bas du ventre qui tend à remonter un peu le diaphragme.

**En plongée, la souplesse du thorax est diminuée :**

Par l'afflux sanguin vers le thorax et le port de la combinaison.

Pour remplir les poumons, les muscles doivent fournir un travail supplémentaire.



Ceci crée une fatigue.

**En plongée, risque d'essoufflement**



**3.2 Régulation de la ventilation.**

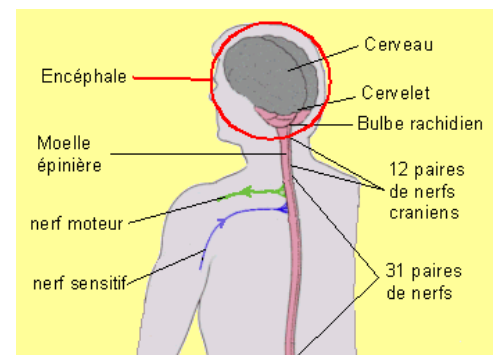
Lors d'un effort :

- ⇒ La consommation d'O<sub>2</sub> augmente, qu'il faut acheminer,
- ⇒ La production de CO<sub>2</sub> augmente, qu'il faut évacuer.

La surproduction de CO<sub>2</sub> est détectée par les **chémorécepteurs du bulbe rachidien**.

Le cerveau déclenche alors la régulation :

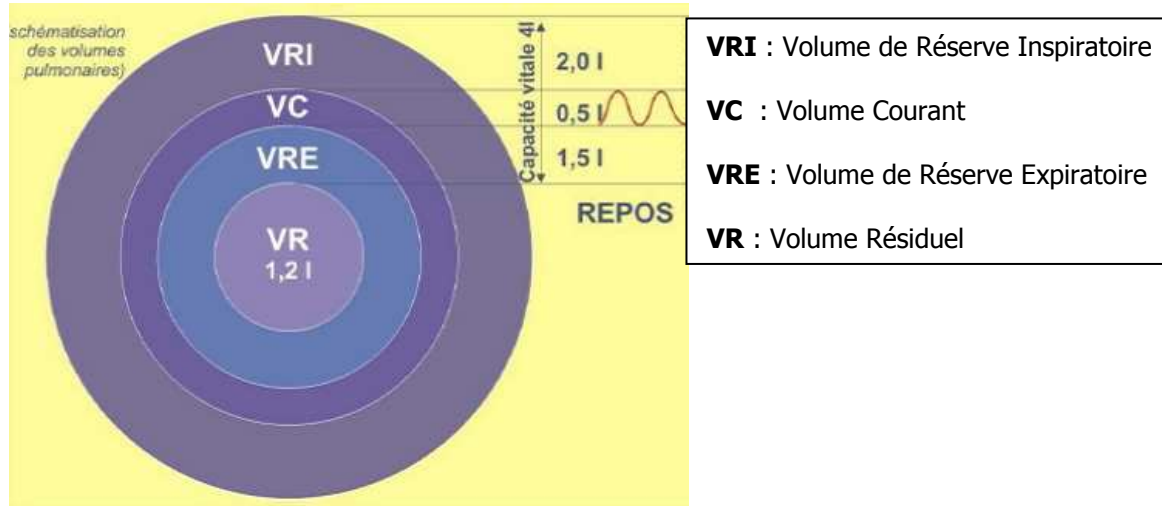
- ⇒ Hausse de la fréquence de ventilation,
- ⇒ Hausse de l'amplitude ventilatoire.





**3.3 Pneumogramme (valse en 4 volumes !).**

Le volume total des poumons (**Capacité Totale**), peut se décomposer en 4 :

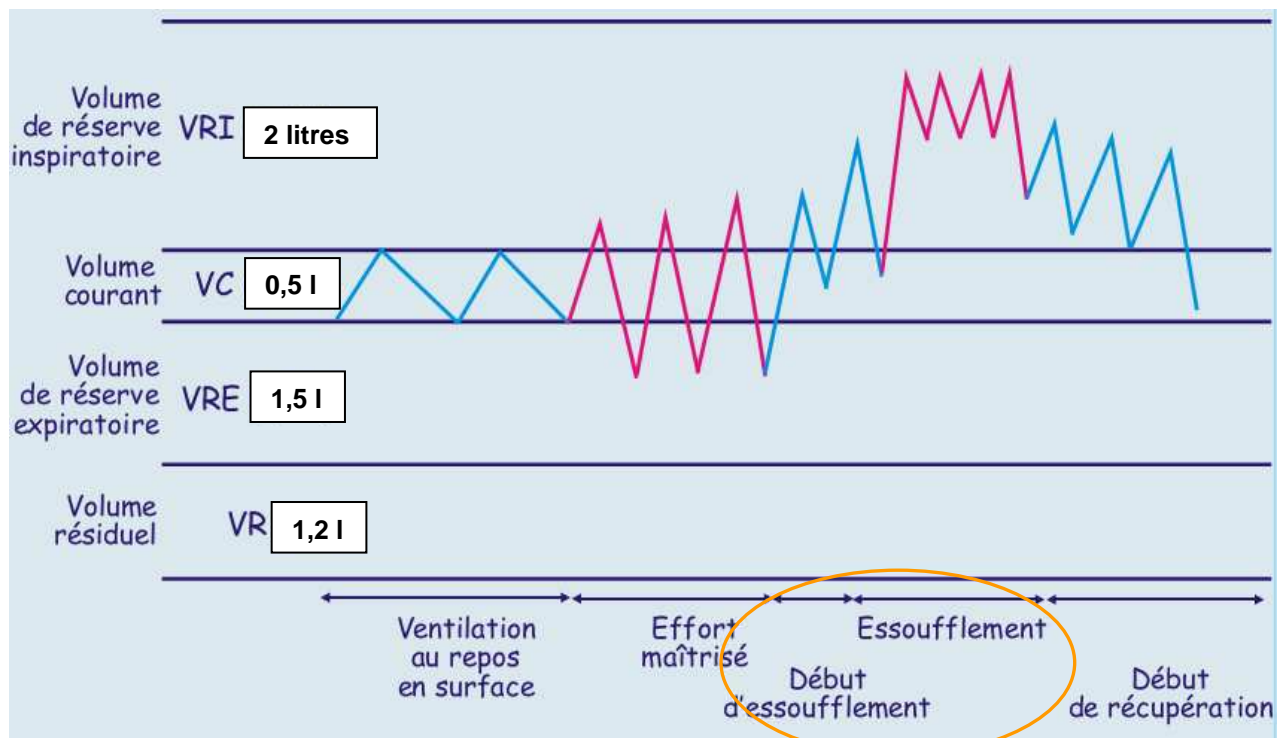


La **fréquence respiratoire (FR)** = 12 à 20 cycles/min soit un débit ventilatoire de 7,5 à 10 L/min.

**VRI** et **VRE** sont très utilisés en plongée :

- ⇒ Adaptation de la ventilation,
- ⇒ Stabilisation à l'aide de la technique dite du poumon-ballast.

Adaptation de la ventilation (de l'utilisation des 4 volumes), suivant la plongée :



A l'**inspiration**, après un bref effort nécessaire pour ouvrir les clapets, le détendeur délivre un air à la pression ambiante ; l'inspiration reste légèrement active.

A l'**expiration**, il faut fournir un effort pour lutter contre la valve d'évacuation du détendeur. La seule élasticité pulmonaire ne suffit pas, **l'expiration devient active ayant pour effet la réduction des débits expiratoires (VRE)) et l'augmentation du VR ; la ventilation se fait dans le VRI.**

La **pause respiratoire** de fin de cycle est faite ici **en inspiration.**

Il existe donc en plongée **des modifications du cycle ventilatoire** que le plongeur doit connaître afin de bien **gérer sa respiration** et prévenir un essoufflement. En cas d'essoufflement débutant, il devra lutter contre les réflexes "terrestres", en limitant le déplacement du **VC** vers le **VRI**.

### **3.4 Facteurs tendant à accélérer et amplifier le cycle ventilatoire, donc la consommation !**

Le niveau de stress, généré par exemple par des conditions de plongée difficiles (faible visibilité, courant), **augmente la consommation d'air.**

La lutte contre le froid a aussi un effet sur notre ventilation et **augmente la consommation d'air.**

Un lestage mal adapté, une combinaison ou un gilet stabilisateur trop serré **augmente la consommation d'air.**

Une condition physique médiocre, **augmente la consommation d'air.**

Un comportement "nerveux", palmage inefficace ou rapide, mouvements de bras... **augmente la consommation d'air.**

Une mauvaise maîtrise de son équilibre et de sa flottabilité **augmente la consommation d'air.**

### **3.5 Espace mort (le 5<sup>ième</sup> volume... !).**

**Nez + Bouche + Pharynx + Trachée =  
espace mort ! = 0,15 litre.**

En début d'inspiration, ce volume d'air entre en premier dans les poumons.

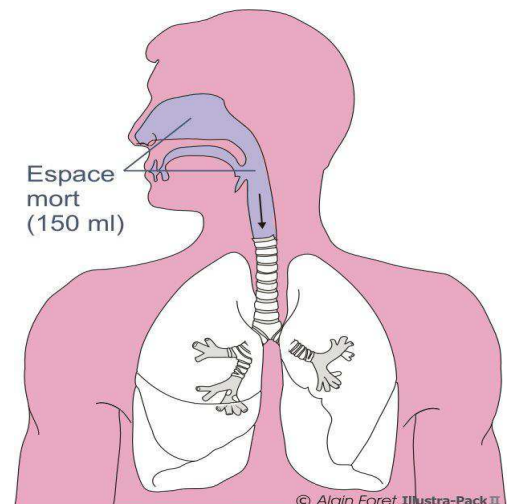
Or, il est composé d'air expiré au cycle précédent.

Ce volume est donc composé d'air pauvre en O<sub>2</sub> et riche en CO<sub>2</sub>. Ceci défavorise la ventilation ! : en ventilation de surface calme, seul 0,35 litre d'air frais arrive aux poumons.

En plongée, cet espace est augmenté :

- ⇒ Du volume du tuba (en nage PMT),
- ⇒ Du volume du 2<sup>nd</sup> étage du détendeur.

**Ceci défavorise encore plus la ventilation !**



### **Rôle du futur guide de palanquée :**

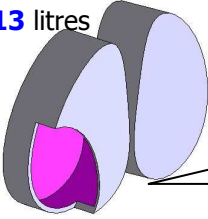

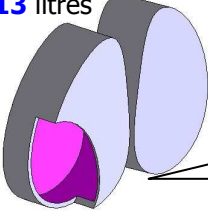

Pour le 800 m PMT...prévoir un tuba avec soupape expiratoire ou expirer par le nez pour réduire le risque d'essoufflement !

**4. La consommation d'air et l'autonomie.**

**4.1 Loi de Mariotte « classique ».**

$$P \text{ à la profondeur } 1 \times V \text{ à la profondeur } 1 = P \text{ à la profondeur } 2 \times V \text{ à la profondeur } 2$$

Cette relation explique la variation de consommation entre la surface et le fond :

	Il faut remplir les poumons avec <b>13</b> litres d'air / min	Pression ambiante	Volume d'air à prendre dans le stock
en surface		$p = 1 \text{ bar}$	$1 \times 13 = 13$ litres <b>13 litres</b> 
à - 40 m		$p = 5 \text{ bar}$	$5 \times 13 = 65$ litres <b>65 litres</b> 

**4.2 Calculs d'autonomie.**

**Exemple 1 :** Calculons l'autonomie à 30 mètres de profondeur d'un plongeur respirant 15 litres d'air par minute, et disposant d'un bloc de 12 litres à 200 bars. (Sans tenir compte de la réserve).

**Méthode 1 :** calculer sa consommation en litres *équivalent surface* à la profondeur donnée.

Une consommation de 15 litres par minute d'air, à 30 mètres (4 bars), correspond à :  $15 \times 4 = 60$  litres par minute d'air, en *équivalent surface*. Il suffit alors de diviser le volume d'air disponible en *surface* par 60 soit :  $(12 \times 200) / 60 = 2400 / 60 = 40$  minutes. Le plongeur pourra rester 40 minutes.

**Méthode 2 :** calculer le volume d'air disponible à la *profondeur* donnée. Les 2400 litres d'air disponibles en surface dans le bloc correspondent à  $2400 / 4 = 600$  litres d'air à disponibles à 30 m (4 bars). Le plongeur consommant 15 litres d'air par minute, on obtient une autonomie de  $600 / 15 = 40$  minutes.

**Exemple 2 :** Calculons, pour être plus complet, son autonomie en tenant compte de la marge de sécurité. En effet tout plongeur doit remonter en surface en ayant conservé **une pression de 50 bars dans sa bouteille** : c'est ce qu'on appelle communément la réserve.

Retirons donc de la pression initiale de la bouteille les 50 bars de la réserve. Le volume d'air disponible en surface pour un bloc de 12 litres gonflé à 200 bars est alors de  $(200 - 50) \times 12 = 1800$  litres d'air. On obtient alors les calculs d'autonomie suivants :

**Méthode 1 :** Le plongeur consomme 60 litres d'air par minute en équivalent surface. Son autonomie est de  $1800 / 60 = 30$  minutes.

**Méthode 2 :** Les 1800 litres d'air disponibles en surface correspondent à  $1800 / 4 = 450$  litres disponibles à 30 mètres. Le plongeur consomme 15 litres d'air par minute, son autonomie est donc de  $450 / 15 = 30$  minutes.

**Exercice 1 :**

Calculer l'autonomie en cas de consommation de 30 l/min. Bloc de 12 litres gonflé à 200 bar Conclure.

**Solutions :** -10 m ► 40 min, -20 m ► 26 min, -40 m ► 16 min

**Exercice 2 :**

Les membres de votre palanquée sont équipés de bloc 15 litres gonflés à 200 bar. Ils consomment 30 l/min. La plongée se fait sur un fond de 40 m. Le DP vous demande d'entamer la remontée à 80 bar. Calculer combien de temps vous pourrez rester en plongée (descente et remontée négligées).

**Solution :**

120 bar disponibles ► 1800 litres disponibles en surface.

Plongée à -40 m donc à 5 bar.

1800 litres disponibles en surface ► 360 litres à -40 m.

360 litres à 30 l/min ► 12 min

**Exercice 3 :**

Un plongeur sort de 50 min de plongée à -30 m avec 20 bar dans sa bouteille 15 l initialement gonflée à 220 bar. Calculer sa consommation en litre/min (descente et remontée négligées).

**Solution :**

200 bar consommé ► 3000 litres consommés en surface.

Plongée à -30 m donc à 4 bar. 3000 litres consommés en surface ► 750 litres à -30 m.

750 litres en 50 min ► 15 l/min.

**5. Au revoir.**

**Rôle du guide de palanquée :**

- Contrôler régulièrement le manomètre des membres de la palanquée,
- Rappeler les signes de « mi- pression » et « je suis sur réserve » au briefing pour les débutants et N1,
- Se méfier de la consommation en profondeur, avec des novices N2,
- Prévenir l'essoufflement (débuter la plongée face au courant, trajet cours et lent),
- Prévenir l'essoufflement en contrôlant la ventilation des membres de sa palanquée : quantité de bulles expirée, position dans l'eau, équilibre et utilisation du poumon ballast...
- Soigner et vérifier le bon fonctionnement du matériel et l'ouverture des blocs,
- Rappeler le signe « je suis essoufflé » et insister sur son alerte précoce,
- Rester près des plongeurs N1 particulièrement à la remontée, pour pouvoir les stopper à tout moment.

Vous voici équipé pour expliquer, calculer, évaluer :

- la respiration correcte de « vos » plongeurs,
- l'évolution du stock d'air à leur disposition.

**Ceci dans le but de guider vos plongeurs en toute **sécurité**.**

**6. Pour aller plus loin.**

Respirer en plongée par Dr Bruno Lemmens ; Subaqua n°245 novembre-décembre 2012 – page 82

Plongée et système respiratoire par Alain Foret et Pablo Torres ; Plongée plaisir 4 – page 142 (6<sup>ème</sup> édition)