C'est la pression qui est lue sur le profondimètre (ou gauge pressure des Anglo-Saxons). La plupart des profondimètres sont étalonnés pour lire zéro à la pression atmosphérique standard.

Sous l'eau, la pression **absolue** s'exerçant sur la surface d'un corps immergé est égale à la pression hydrostatique, additionnée à la pression atmosphérique. La pression absolue s'exprime en **ATA**: ATmosphère Absolue ou atm.

1 ATA = 1013,25 hPa = 1013,25 mbar = 1,013 bar = 1 atm

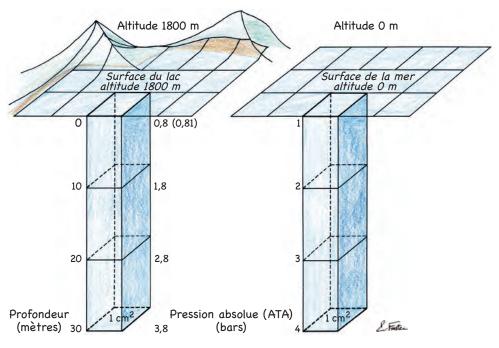


Figure 2.4 - La pression absolue

L'homme est naturellement soumis de façon physiologique à la pression ambiante atmosphérique (ou barométrique) d'1 ATA au niveau de la mer. Il est important de connaître la pression atmosphérique en ATA car l'homme, pendant la plongée, sera soumis à la résultante de la pression hydrostatique et de la pression atmosphérique. Au niveau de la mer, l'évaluation de la pression absolue s'effectue très simplement :

 $P_{abs\ 10\ m}=P_{10\ m\ (eau\ de\ mer)}+P_{atm}=10\ MEM+1\ ATA=(1+1)\ en\ bar=2\ bars$ Pour déterminer la valeur de la pression absolue, lors d'une plongée dans un lac de montagne, il est nécessaire d'effectuer un ajustement. Par exemple, à 10 m de profondeur, la pression absolue se calcule de la façon suivante :

$$P_{abs 10 m} = P_{10 m (eau douce)} + P_{atm surface lac} = (0.98 + P_{atm surface lac})$$
 en bar

3 - ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE

3.1 - Introduction

La troisième partie comporte une description des éléments essentiels d'anatomie. Elle contient un bref rappel des notions indispensables à la compréhension de la physiologie de l'homme sous l'eau et de la pathologie de la plongée sous-marine.

Elle se limite volontairement aux appareils ou aux organes qui participent plus précisément à cette physiologie et à ceux qui seront mis en cause dans cette pathologie. Ne sont pas mentionnées des fonctions ou particularités d'organes non-impliquées directement dans la médecine de plongée.

3.2 - L'OREILLE

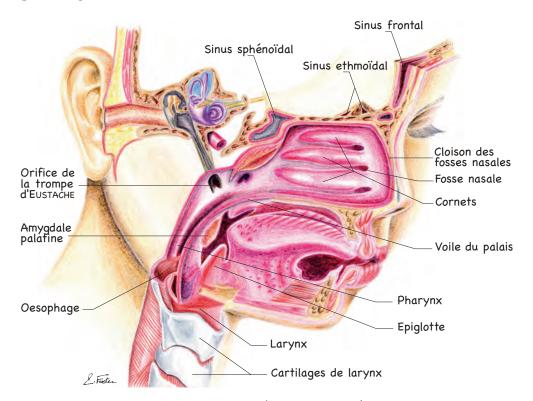


Figure 3.1 - La tête et ses cavités

MÉCANIQUE VENTILATOIRE

Elle assure les mouvements d'entrée de l'air frais et de sortie de l'air vicié.

Eléments de cette mécanique

L'appareil ventilatoire est constitué des poumons et de la cage thoracique. La cage thoracique est formée des côtes et du sternum, des muscles respiratoires et du diaphragme. Les poumons et la cage thoracique sont associés d'un point de vue mécanique. Les deux feuillets de la plèvre les solidarisent.

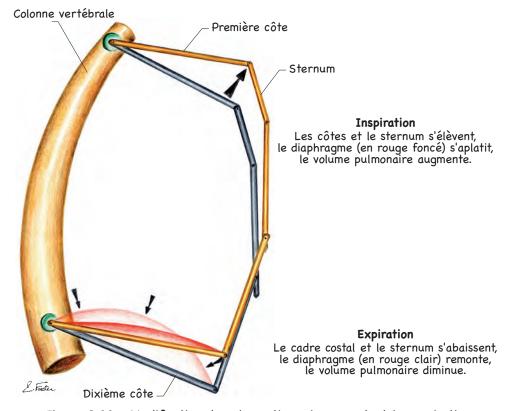
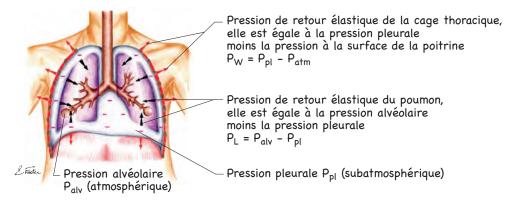


Figure 3.22 - Modification du volume thoracique pendant la respiration

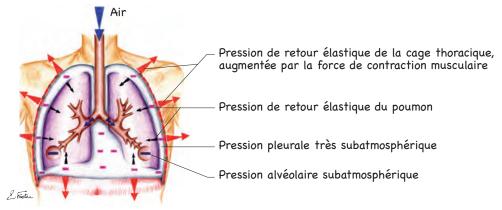
Dépression intra-pleurale

Il est facile de voir qu'aucun muscle ne vient tirer sur le poumon pour le gonfler. Un feuillet de la plèvre est adhérent à la paroi thoracique et le feuillet pleural qui lui fait face colle au poumon. Entre les deux, un espace intra-pleural où règne une pression intra-pleurale inférieure de 5 cm H₂O à la pression atmosphérique.

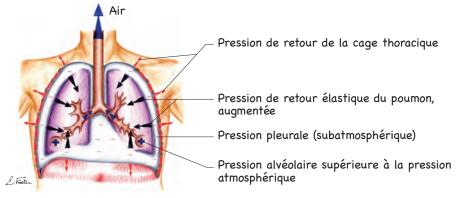
Par ailleurs, une propriété du poumon est la tendance à se rétracter. Si on sort un poumon du thorax, il se dégonfle comme un ballon crevé. Mais nous verrons plus loin que ceci constitue un très gros avantage pour la ventilation. Dans le thorax, les



Au repos (à la fin d'une expiration normale) : les muscles respiratoires sont au repos. La pression de retour élastique du poumon est égale et opposée à celle de la cage thoracique. La pression alvéolaire est atmosphérique. L'air ne circule pas dans l'arbre bronchique.



A l'inspiration : les muscles inspiratoires se contractent et la cage thoracique s'agrandit. La pression alvéolaire devient subatmosphérique. L'air pénètre dans le poumon.



A l'expiration : les muscles respiratoires se relâchent. L'augmentation de la pression de retour élastique du poumon provoque l'accroissement de la pression alvéolaire. La pression alvéolaire devient supérieure à la pression atmosphérique. L'air sort du poumon.

Figure 3.25 - Les pressions de la mécanique ventilatoire

MODÈLE MÉCANIQUE DU SYSTÈME RESPIRATOIRE

Un modèle mécanique simple reproduit les forces en action.

Sur la figure 4.2, le ressort noir représente la force de retour élastique du poumon (rétraction). Le ressort interne rouge figure la force de retour élastique de la cage thoracique (distension). La combinaison de l'action des deux ressorts symbolise la compliance du système (tissu pulmonaire, mur thoracique et diaphragme).

Le volume pulmonaire résulte de l'effet de la pression du retour élastique du système respiratoire dans son ensemble.

$$P_{RS} = P_L + P_W$$
 et $F_{RS} = P_{RS} \times s$

F_{RS} force du système respiratoire

s surface d'application du ressort sur le thorax

Le volume de relaxation V_R est le volume d'équilibre vers lequel le système retourne lorsque P_{RS} est égale à zéro. Lors d'une respiration normale, V_R représente le volume de la capacité résiduelle fonctionnelle.

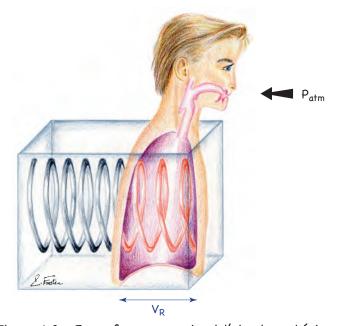


Figure 4.2 – En surface, en respirant l'air atmosphérique Le ressort noir représente la pression de retour élastique du poumon P_L . Le ressort rouge figure la pression de retour de la cage thoracique P_W .

Sur la figure 4.3, le plongeur est immergé jusqu'au larynx, en position verticale. La pression hydrostatique de quelques centimètres d'H₂O est appliquée sur le thorax qui se déplace vers une nouvelle position d'équilibre. Le nouveau volume pulmonaire obtenu est le volume de relaxation immergé VRI (aucune force musculaire n'est activement mise en jeu). L'air respiré est à la pression atmosphérique. La pression absolue P_B s'applique sur le thorax (nous verrons sa détermination plus loin).

Les courbes P/V représentées sur la figure 4.10 sont obtenues en conditions réelles. La pression mesurée (pression transpulmonaire) est un reflet de la pression P_{RS} de l'ensemble du système. La ventilation réelle est de 60-70 L min⁻¹ dans chaque cas. Elles montrent de façon claire que le travail respiratoire en profondeur est beaucoup plus important qu'en surface.

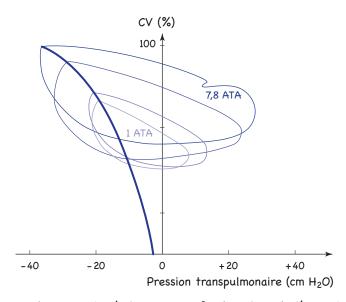


Figure 4.10 - Courbes pression/volume en profondeur lors de l'exercice musculaire

4.4 - CONTRÔLE RESPIRATOIRE EN PROFONDEUR

Un aspect intéressant de l'adaptation à la plongée sous-marine est l'acclimatation du plongeur chevronné à la respiration de l'air sous pression. Cet entraînement offre un avantage sur le rendement de la mécanique ventilatoire, mais présente néanmoins certains dangers. Des accidents peuvent en résulter.

RÉTENTION DE CO2 CHEZ LE PLONGEUR ENTRAÎNÉ

Il existe une relation étroite entre l'accumulation sanguine de CO₂ en plongée sousmarine et le nombre d'années d'expérience de ce sport. Toutefois, cette anomalie peut apparaître chez les néophytes. Elle est provoquée par l'hypoventilation (baisse de la ventilation) induite par un défaut de réponse du contrôle ventilatoire. Il se produit une sorte d'insensibilité des centres respiratoires à la stimulation par le CO₂ (ou plutôt les ions H⁺ cédés par H₂CO₃). Le plongeur entraîné habitue son organisme à de fortes concentrations sanguines de gaz carbonique. Ce phénomène est retrouvé chez les apnéistes. Cette anomalie est décelée même chez des plongeurs ayant cessé cette activité depuis des années.

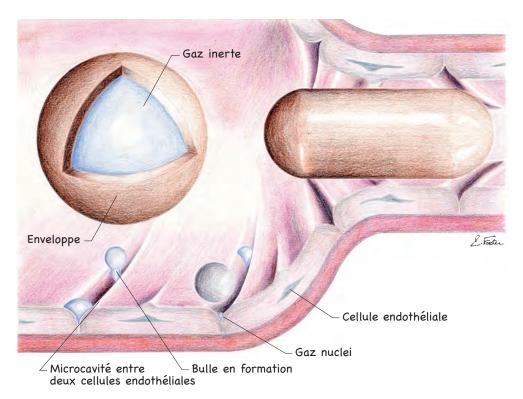


Figure 5.1 - Aspects de la bulle

Les différentes étapes de sa formation dans un vaisseau sanguin sont représentées en bas. Lorsque le diamètre du vaisseau diminue, la bulle perd sa forme sphérique et devient cylindrique. Elle bloque alors la circulation sanguine vers l'aval.

5.3 - LA BULLE ET L'ACCIDENT DE DÉCOMPRESSION

La présence de bulles de gaz à l'intérieur des tissus est l'événement qui provoque l'installation de la maladie de décompression (MDD).

HISTORIQUE

En 1878, Paul BERT, dans son ouvrage *La Pression barométrique, Recherches de Physiologie expérimentale*, expose de façon précise cette maladie et sa cause.

Paul BERT relate l'observation suivante : Le 5 août 1869, le nommé Nicolas Théodo-ROS fut pris de paralysie des membres inférieurs. Ce plongeur pêchait sur les côtes de Crête depuis le commencement de mai, c'est-à-dire depuis trois mois. C'était un homme de grande taille et en même temps d'une corpulence énorme, due surtout au développement très considérable du tissu adipeux. Le 5 août, il pêchait aux environs de Sitia et depuis huit jours, il affrontait des profondeurs [...] de 30-35 mètres. Aucun accident fâcheux, aucune douleur n'était venue l'avertir, lorsque le 5 août, un 8 - Plongée au Nitrox 197

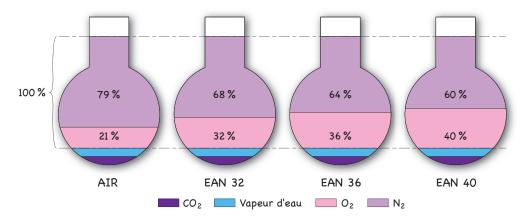


Figure 8.3 - Les mélanges Nitrox utilisés

Les fractions de gaz sont représentées non-mélangées dans sacs alvéolaires pulmonaires. La vapeur d'eau (bleu) et le gaz carbonique (violet) sont aussi présents dans l'alvéole. L'addition du pourcentage de l'oxygène et celui de l'azote est compté égal à 100%. Ce total de 100% correspond au pourcentage délivré au plongeur dans le mélange Nitrox.

LA PROFONDEUR MAXIMALE OPÉRATIONNELLE

Les tables de plongées NAUI EAN 32 et EAN 36 pour 32 % et 36 % d'oxygène sont limitées pour une P_{O_2} de 1,6 atm à un temps d'exposition ne dépassant pas 30 min, mais ceci est destiné à des procédures d'urgence seulement. Des temps plus longs sont possibles avec des valeurs de P_{O_2} inférieures ou égales à 1,4 atm, et ces temps devraient être utilisés pour des plongées de routine. Dans la programmation des plongées, la P_{O_2} est un facteur majeur.

La profondeur maximale opérationnelle correspond à une Po, de 1,4 atm.

La profondeur maximale opérationnelle (PMO ou MOD, Maximum Operating Depth) est la profondeur maximale à laquelle il est possible de plonger de manière routinière avec un mélange enrichi à l'oxygène. La PMO est strictement contrôlée par les limites de l'exposition à l'oxygène. Comme il avait été mentionné à la section Prévention de la toxicité au niveau du SNC, NAUI recommande une P_{O_2} maximum opérationnelle de 1,4 atm. Au-dessus de 1,4 atm, le risque de toxicité sur le SNC est trop important pour la plongée sportive SCUBA de routine. Il est à noter que la PMO est importante lors de l'utilisation de mélange enrichi à l'oxygène comme le Nitrox. Les plongeurs expérimentés labellisent de manière visible la PMO sur tous les blocs de plongée contenant des mélanges enrichis à l'oxygène, de telle façon qu'il est toujours possible de vérifier que la profondeur n'est pas dépassée.

Le niveau optimal pour la plupart des plongées est une P_{O_2} jusqu'à 1,4 atm. Cette limite d'oxygène présente un risque faible de toxicité sur le SNC ; elle permet jusqu'à 150 min en une seule exposition (plongée) et jusqu'à 180 min de temps de plongée dans une période de 24 heures. Ce niveau de P_{O_2} peut être considéré comme une limite de routine pour la plupart des plongées.

constante, toujours selon la loi de BOYLE-MARIOTTE). Si la remontée se poursuit dans ces conditions, il se produit alors un déséquilibre considérable entre la pression de l'intérieur de l'alvéole P_A et la pression ambiante absolue P_B de l'eau autour de la cage thoracique. Il se manifeste un effet mécanique direct de la pression d'air alvéolaire sur la paroi des alvéoles. **Des alvéoles éclatent**.

Une pression transpulmonaire (pression alvéolaire moins pression pleurale) de 95 à $110 \text{ cm H}_2\text{O}$ est suffisante pour rompre la paroi alvéolaire. Ce type d'accident peut aussi survenir dans une piscine de 3 mètres de profondeur.

L'embolie gazeuse artérielle

Elle peut succéder à la surpression pulmonaire. La rupture des alvéoles permet à l'air alvéolaire d'entrer dans les capillaires pulmonaires. Ce passage d'air est favorisé par la chute de pression intrathoracique à la reprise de la première inspiration après le barotraumatisme. Les bulles d'air entrent ensuite dans les veines pulmonaires. Puis elles se dirigent vers le cœur gauche. Lorsque le plongeur remonte, il est en position debout, les bulles d'air montent par flottabilité positive vers l'aorte, puis vers le cerveau, par les carotides. C'est l'accident cérébral.

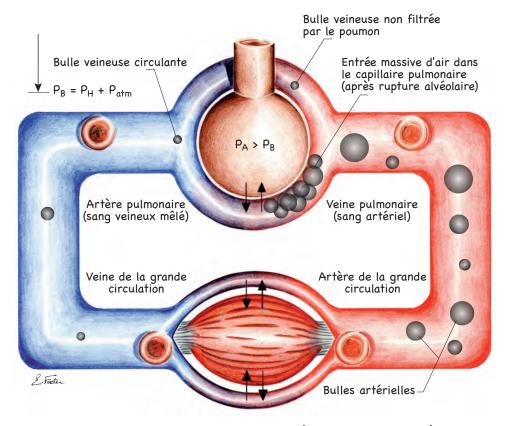


Figure 9.1 - La surpression pulmonaire et l'embolie gazeuse artérielle

10 - CONTRE-INDICATIONS À LA PRATIQUE DE LA PLONGÉE SPORTIVE

La liste de contre-indications absolues à la pratique de la plongée à l'air, citées cidessous, est proposée pour le plongeur civil, sportif ; les plongeurs professionnels et militaires sont sélectionnés sur des critères encore plus stricts.

Nos études et celles d'autres équipes ont souligné l'importance de facteurs anthropométriques et physiologiques dans la genèse de bulles et de l'accident de MDD. Ces facteurs ne constituent cependant pas des contre-indications à la plongée. Ils représentent seulement une plus grande susceptibilité. La susceptibilité à la formation de bulles augmente avec l'âge et la taille. L'incidence de la MDD s'accroît avec :

- l'âge,
- une capacité aérobique maximale basse,
- le poids,
- la taille,
- la masse grasse,
- l'indice de masse corporelle.

Les facteurs sur lesquels il est possible d'agir, par exemple la condition physique et le poids, permettent de réduire de manière très significative cette susceptibilité. Dans nos études, le fait d'être de sexe féminin ou masculin n'a montré aucune différence dans la susceptibilité à la formation de bulles et à l'apparition de MDD. L'attitude face à certaines contre-indications traditionnelles s'est individualisée et l'avis d'experts permet d'étudier au cas par cas l'aptitude du plongeur, notamment à l'aide d'investigations paracliniques. Des indications sur des attitudes nouvelles proposées par des groupes d'experts ou d'organisations sont développées pour certaines pathologies. Il est donc à noter que cette liste est évolutive et en discussion constante.

10.1 - GÉNÉRALES

- » Grossesse
- » Obésité importante, supérieure à 20% du poids idéal

10.2 - ORL

» Perforation de la membrane tympanique. Si la membrane est cicatrisée, la mobilité tympanique normale doit être observable à l'otoscope, lors du VALSALVA, pour renouveler l'aptitude.