

CHAPITRE 3 : LES PRINCIPES PHYSIQUES

Introduction

Lorsque nous plongeons, nous changeons de milieu, nous passons de l'air à l'eau. Ce changement paraît simple; et pourtant pas mal de choses peuvent changer... analysons les !

3.1 L'eau et l'air

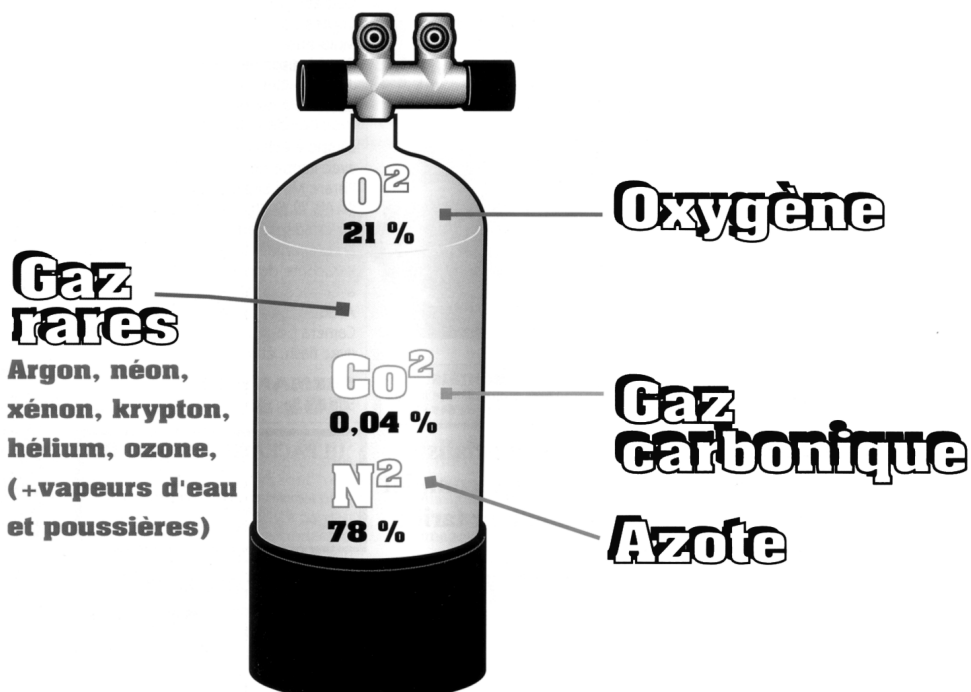
Nous allons pénétrer dans l'eau afin d'y découvrir "le monde du silence". Nous devons savoir que l'eau, de par sa composition, est différente de l'air. En effet :

COMPOSITION : L'air est composé :

d'**AZOTE** (N₂) à **78%**
 d'**OXYGENE** (O₂) à **21%**
 à **1%** de GAZ divers
 dont 0,04% de gaz carbonique (CO₂)

L'eau est composée :

d'HYDROGENE et d'OXYGENE



MASSE : Si on prend 1L d'eau douce il pèsera : 1 kg
 d'eau de mer il pèsera : 1,026 kg
 d'air il pèsera : 1,3 g

DENSITE : C'est le rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau. (ou d'air pour les gaz). La densité relative est le rapport du poids spécifique ou densité absolue d'un corps pris comme référence, dans les mêmes conditions de température et de pression.

exemple : 1 m³ d'eau douce (1000 litres) pèse 1000 kg
 1 m³ d'eau de mer (1000 litres) pèse 1026 kg

la densité de l'eau de mer sera de : $1026/1000 = 1,026$
 la densité est un nombre abstrait.

1 m³ de mercure (hg) pèse 13600 kg. Sa densité sera de $13600/1000 = 13,6$
 Il en est de même pour tous les corps : solides, liquides et pour les gaz.

CONDUCTIBILITE : L'eau est meilleur conducteur de la chaleur que l'air. Les échanges constatés au niveau du corps immergé sont donc très importants. La conduction est la transmission de la chaleur entre deux corps qui se touchent. Dans notre cas, notre peau et l'eau ! Plus l'eau sera froide, plus la transmission de chaleur sera grande, d'où une perte de calories importante. Afin d'isoler notre corps du milieu aqueux (de l'eau) nous devons nous revêtir d'une "combinaison isothermique" (isolante). Cette combinaison conserve la chaleur du corps et ralentit les échanges (corps vers eau). Nous pouvons comparer cela à un thermos.

SONS : Dans l'air, les sons se transmettent à la vitesse de 330 m par seconde. Dans l'eau douce, ils se transmettent à la vitesse de 1100 m par seconde. Et dans l'eau de mer (plus dense), ils se transmettent à la vitesse de 1450 m par seconde.

Pourquoi ?
 Parce que l'eau est un milieu plus dense que l'air. (à peu près 800 fois)

1° L'air étant un gaz, il est compressible. De ce fait, les sons seront amortis très rapidement.

2° L'eau étant un liquide, elle est incompressible d'où transmission rapide et plus puissante des sons.

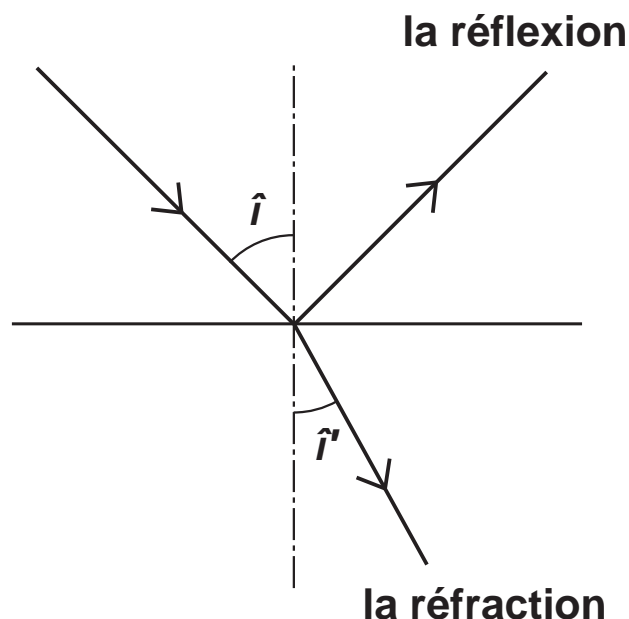
Pour la même raison, l'onde de choc provoquée par une explosion sous-marine est plus dangereuse que dans l'air alors que la charge d'explosif est identique.

exemple : une charge de 1 kg d'explosif peut être dangereuse jusqu'à 300 mètres et une charge de 1 tonne jusqu'à 3000 mètres.



3.2 La vision dans l'eau

Lorsque les rayons lumineux atteignent la surface de l'eau, ils sont soumis à plusieurs phénomènes : tout d'abord lorsqu'un rayon lumineux change de milieu, il se divise en deux composants : un rayon réfléchi (la surface de séparation entre les deux milieux se comporte comme un miroir) et un rayon réfracté (lorsque le rayon passe dans un autre milieu il change légèrement de direction).



3.2.1 La réflexion

Comme nous l'avons vu ci-dessus, les rayons lumineux touchant la surface de l'eau sont en partie réfléchis. L'autre partie pénètre le milieu (l'eau) et est absorbée par celui-ci.

Exemple :

En début et en fin de journée, la mer agit comme un miroir : plus le soleil est bas, plus il y a de lumière réfléchi et moins il y a de visibilité sous l'eau.

Nous pouvons dire que les rayons sont plus ou moins réfléchis en fonction de l'incidence de ceux-ci à la surface de l'eau.

N.B. : En mer, un facteur perturbant produit par l'amplitude des vagues va diminuer la pénétration des rayons lumineux dans l'eau.



3.2.2 la réfraction

C'est un autre phénomène exercé par la lumière lorsque elle rentre dans l'eau.

Pourquoi ? La différence de milieu air/eau produit une déviation des rayons plus ou moins grande en fonction de l'incidence de ceux-ci à la surface du plan d'eau.

Il est curieux de remarquer que, dans l'eau, l'inclinaison des rayons solaires, par rapport à une droite verticale imaginaire appelée normale, n'est jamais supérieure à $48,5^\circ$.

Cet angle a été défini comme l'angle limite et il correspond à un rayon incident dans l'air rasant la surface de l'eau. (au lever et au coucher du soleil).

Inversement, un rayon lumineux dirigé de bas en haut avec une inclinaison supérieure à $48,5^\circ$ n'est pas réfracté dans l'air mais est totalement réfléchi dans l'eau car la surface agit alors comme un miroir (elle en a d'ailleurs l'aspect). En plongée de nuit, si on braque obliquement vers la surface une lampe étanche, le faisceau lumineux est brisé et réfléchi vers le fond.

Exemples :

1° Si vous plongez une paille dans un verre d'eau, celle-ci semblera brisée. C'est la déviation des rayons lumineux qui entraîne cette vision.

2° Une autre conséquence de la réfraction, c'est la vision déformée des objets observés au travers du verre du masque de plongée.

on voit plus gros et plus proche qu'en réalité.

Ce phénomène va produire quelques réflexes de marseillais au plongeur... Hé t'as vu la baleine (sardine) !!! sic...

D'après les calculs de Snéllius, et on le croira, on voit plus près et plus gros de $1/4$ (133 %).

Ex. Un poisson qui se trouve à 4 m et qui mesure 30 cm, nous le voyons comme s'il se trouvait à 3 m et comme s'il avait une longueur de 40 cm.

3.2.3 la pénétration de la lumière dans l'eau.

La lumière diminue au fur et à mesure que la profondeur augmente. En eau claire à 5 m, l'énergie lumineuse est déjà réduite au quart de sa valeur; à 15 m au huitième; à 40 m au trentième.



3.2.3 bis l'absorption

Une partie de cette lumière se réfléchit sur la surface, une autre partie est absorbée et transformée en chaleur. Le soleil étant un ensemble de radiations dont la partie visible est comprise entre deux longueurs d'ondes extrêmes, correspondant à l'ultra-violet et à l'infra-rouge. Le spectre solaire fait apparaître les sept couleurs dites fondamentales (violet - indigo - bleu - vert - jaune - orange - rouge), dont la superposition constitue la lumière blanche. Ainsi les couleurs ne sont pas absorbées de la même façon :

le rouge disparaît à -10 m

l'orange entre -10 et -20 m

le jaune à -30 m

Au delà seul le bleu et le vert subsistent.

Comment retenir l'ordre de disparition des couleurs : pensez à la viande (rostbeef) =>

ROJVBIV =>

- rouge
- orange
- jaune
- vert
- bleu
- indigo
- violet

3.2.4 la diffusion

L'eau elle-même et surtout les particules en suspension dévient les rayons lumineux, les modifient ou les réfléchissent. Conséquence, une diminution progressive de la lumière et un effet de brouillard.



3.3 Principe des pressions

La pression est le résultat exercé par une force sur une surface

Rappel des unités : P = la pression en bars
 F = la force en Newton
 S = la surface en cm²

$$P = \frac{F}{S}$$

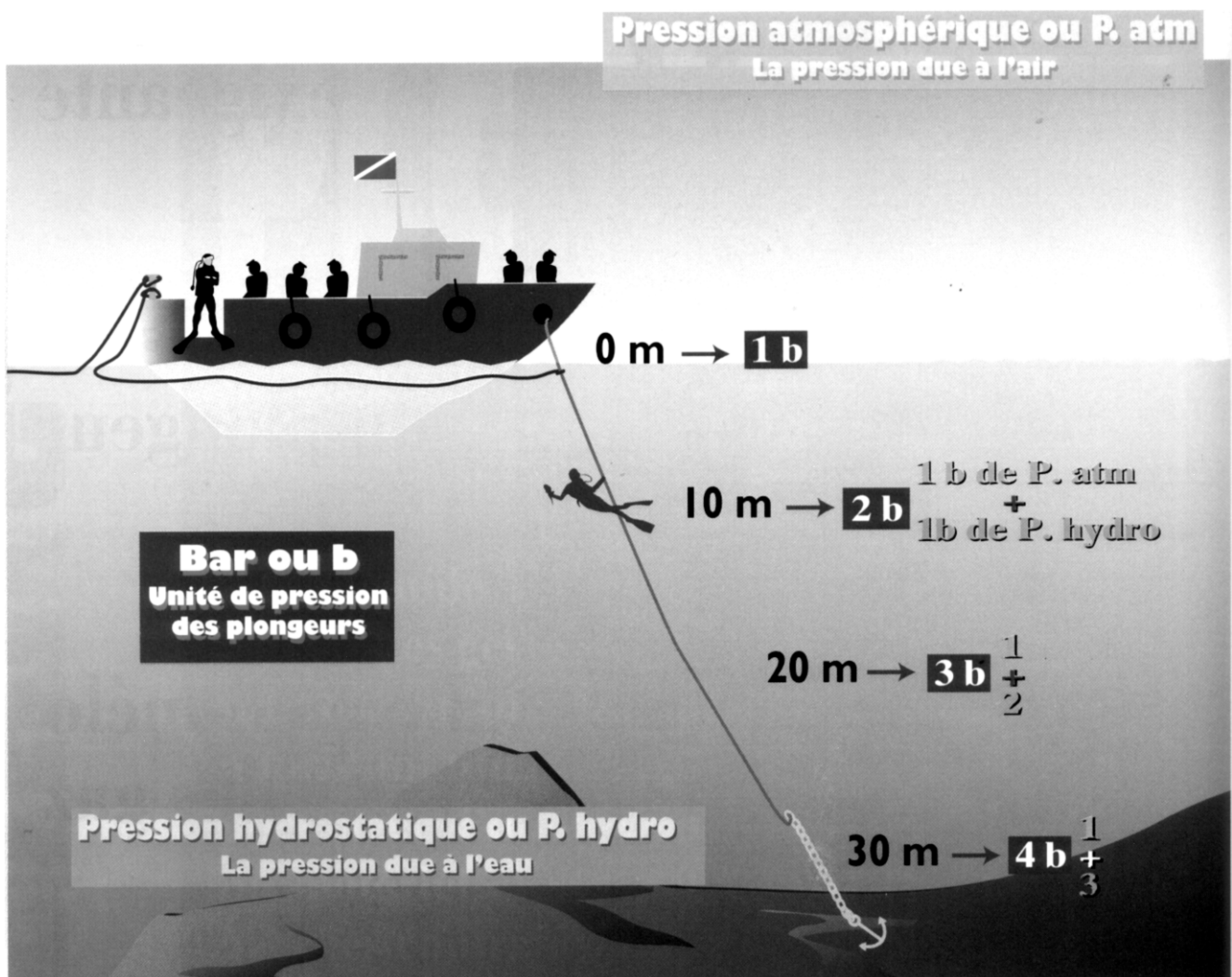
Nous disons :

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ PASCALS (1000000)} = 0,987 \text{ ATMOSPHERE}$$

On peut donc admettre avec une approximation suffisante que le bar équivaut à 1 atmosphère. Cette approximation dans le cas qui nous intéresse est justifiée par la précision des manomètres de caissons et des profodimètres des plongeurs.

exemple :

On enfonce plus facilement un doigt que la main dans le sable, tout comme les raquettes utilisées pour marcher et ne pas s'enfoncer dans la neige.



En tant que plongeur, nous nous intéresserons aux pressions suivantes :

- La pression atmosphérique

L'atmosphère qui entoure le globe terrestre est composée d'air. L'air qui est pesant (1 litre d'air pèse 1,293g) exerce sur le sol une certaine pression. Le baromètre permet de mesurer cette valeur : Au niveau de la mer (c-à-d 0 m) la pression atmosphérique atteint la valeur de 760 mm de mercure (hg), ce qui équivaut à 1 bar. En altitude, on estimera que la pression diminue de 0,1 bar tous les 1000 mètres. Il faut monter jusqu'à 5000 m environ pour voir diminuer la pression de moitié. En mer, il suffit de descendre à -10 m pour que la pression double.

-la pression hydrostatique

C'est la pression exercée par le poids d'une colonne d'eau. Nous appelleront cette pression la "pression relative". La pression dans l'eau est proportionnelle à la profondeur; Elle augmente pratiquement de 1 bar tous les 10 mètres.

- La pression absolue

La pression absolue (eau+air) est égale à la pression relative (eau) augmentée de 1 bar (pression atmosphérique). Il faut toujours préciser, lorsque l'on parle de pression, s'il s'agit de pression relative ou de pression absolue. Dans ce fascicule, nous n'emploierons que des pressions absolues. (eau+air)

- La pression partielle

c'est le pourcentage de la concentration d'un gaz à une pression donnée.

Exemple :

l'air étant composé de 21% d'O ₂ 78% de N ₂ 1% de gaz rares et de CO ₂	à la pression atmosphérique
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------

Nous dirons que la Pp de l'O ₂ est de 1 bar (atm.) x 21/100 = 0,21 bar de l'N ₂ 1 bar x 78/100 = 0,78 bar de CO ₂ + gaz rares est de 1 bar x 1/100 = 0,01 bar	TOTAL : 1 bar
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------

Exercice : Si nous nous trouvons à 20 mètres, trouvez les différentes valeurs des Pp des différents gaz du mélange.



Chaque fois que le plongeur descend de 10 mètres, la pression qu'il subit augmente de 1 bar.
Schéma montrant les pressions supportées en fonction des profondeurs atteintes.

$1 \text{ kg/cm}^2 = 10 \text{ mètres d'eau} = 1 \text{ Bar}$ donc on a :

- 0 m = 1 bar
- 10 m = 2 bar
- 20 m = 3 bar
- 30 m = 4 bar
- 40 m = 5 bar
- 50 m = 6 bar

Exemple :

Soit un plongeur se trouvant à -12 mètres. Quelle est la pression de l'air débité par le détendeur ?

$P_{\text{atmo}} = 1 \text{ bar}$

$P \text{ de } 12\text{m d'eau} = 1,2 \text{ bar}$

$\Rightarrow P \text{ au détendeur} = 2,2 \text{ bar}$



3.4 principe d'Archimède

Nous savons que certains objets flottent d'autres coulent. Archimède a démontré que :

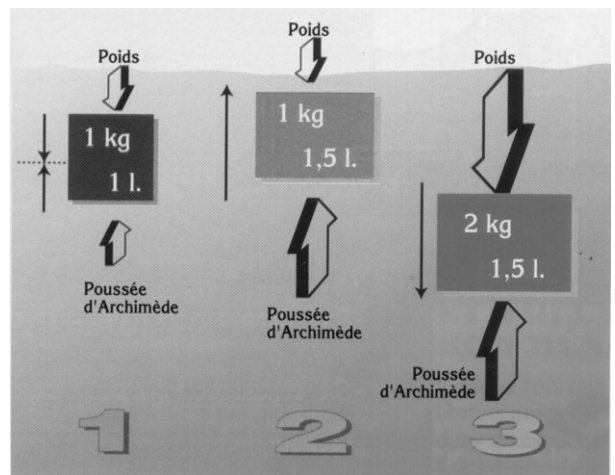
Tout corps plongé dans un fluide subit de la part de ce fluide une poussée verticale de bas en haut égale au poids du volume déplacé.

à partir de ce principe plusieurs notions peuvent être définies :

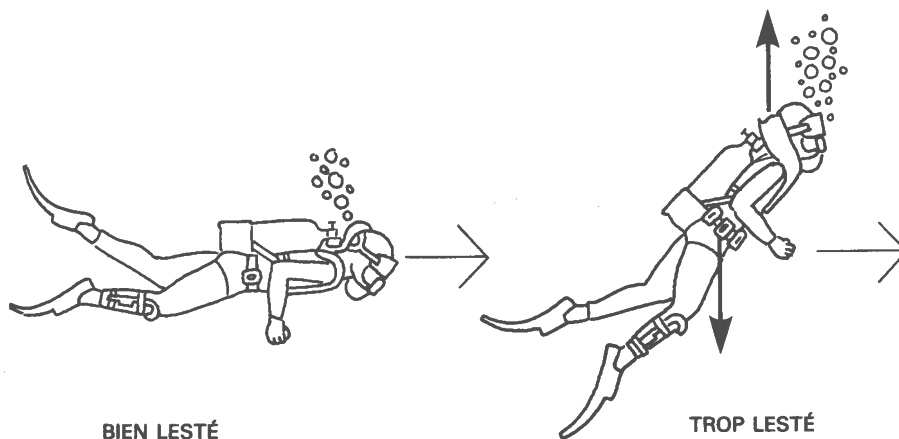
Poids réel = poids exercé par le corps immergé

Poussée Archimède = valeur de la force qui empêche le corps de couler

Poids apparent = la résultante du poids réel moins la poussée d'Archimède. s'il est nul le corps est en équilibre.



$$P_{app} = P_{réel} - P_{archi}$$



Exemple : un sous-marin se trouve en équilibre à -50m, donc il a un $P_{app} = 0$

si il veut descendre, il faut qu'il soit plus lourd sans que son volume ne change, donc il remplit ses ballasts d'eau et obtient un poids apparent positif donc il coule.

si il veut remonter, il faut qu'il soit plus léger sans que son volume ne change, donc il vide ses ballasts et obtient un poids apparent négatif donc il remonte.

sur ce principe nous pouvons analyser plusieurs situations en plongée :

- lors d'une inspiration on remonte et à l'expiration on coule;
- au fur et à mesure de la plongée, la bouteille se vide donc on est plus léger;
- le gilet de sécurité que l'on gonfle pour une augmentation de poids négligeable, si on se sent descendre trop vite on le gonfle pour freiner. Sur le fond on doit pouvoir se déplacer horizontalement après s'être équilibrer donc avoir un poids apparent nul.;
- le canard, en le faisant on diminue la surface de contact donc la poussée alors que le poids est le même;
- le costume en néoprène est aussi une vraie bouée c'est pourquoi nous devons nous plomber, si toutefois en plongée on se sent trop léger, on peut toujours ramasser une pierre.

REMARQUES :

- En mer l'eau étant plus dense, il faudra ajouter environ 2 kg de plomb.
- En Zélande le plongeur sera plus lourd de manière à se laisser déhaler sur le fond.
- Lorsqu'un plongeur est en difficulté, il faut larguer sa ceinture de plomb, ce qui permet de pouvoir le remonter plus facilement. C'est la raison pour laquelle on vous habitue à cet exercice en piscine. Cette ceinture doit être au dessus de tout matériel afin d'être larguée facilement.
- Lors d'une remontée, on tiendra toujours sa purge en main de façon à pouvoir dégonfler rapidement; ce sont les derniers mètres que les variations de volume sont les plus importantes comme nous allons le voir ci-après.



3.5 loi de Boyle et Mariotte

Les cellules de notre corps se comportent comme des liquides et ne sont donc pas influencées par ces pressions. Par contre, en plongée en apnée, les gaz contenus dans notre corps se dilatent et se compriment en fonction des pressions que nous supportons. Ils obéissent à la loi de Boyle et Mariotte. En scaphandre, ce phénomène est compensé par le fait que le détenteur d'air à la pression ambiante. Mais certaines cavités contenant de l'air peuvent être isolées, ceci peut entraîner des accidents mécaniques.

A température constante, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il supporte.

Pour cette loi Boyle et Mariotte ont pris comme référence la loi des gaz parfaits :

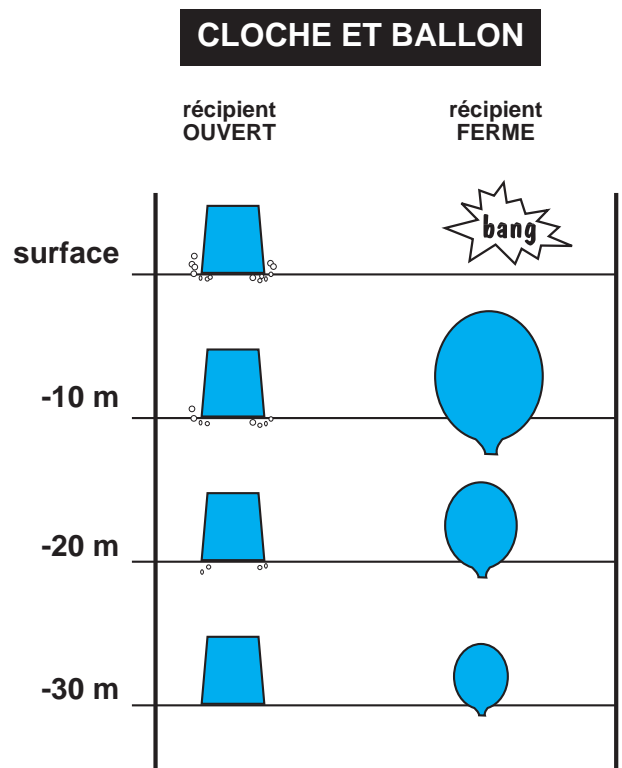
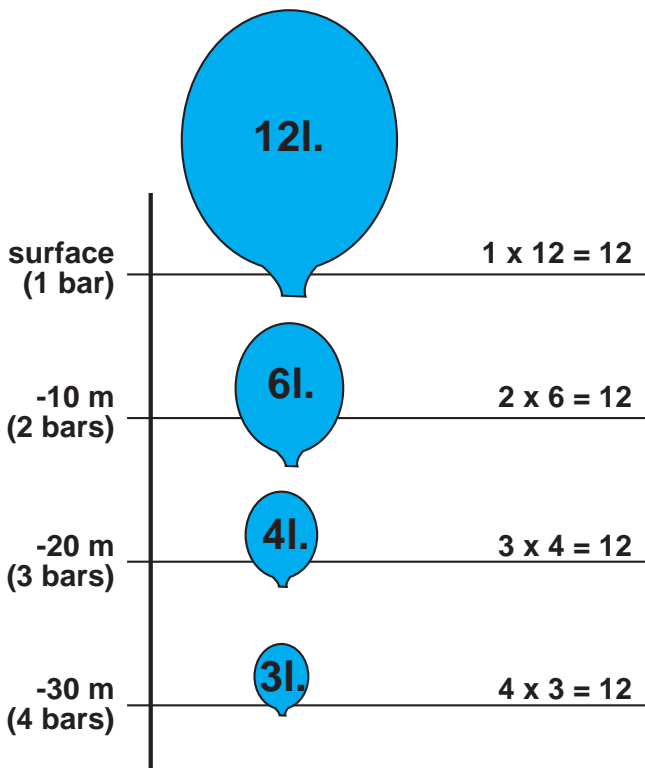
$$P.V = n.R.T$$

où le produit $n.R = \text{constante}$

Comme dans l'eau l'influence de la T° est moindre nous obtenons :

$$P \times V = \text{CONSTANTE}$$

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 = \text{CONSTANTE}$$



Autre exemple : Un plongeur effectuant une apnée après une inspiration avec 6 l d'air à la surface se retrouve à -10 m avec :

à 0 m il a $1.6 = 6 \text{ l}$

DONC à -10 m il a $2.V = 6 \text{ l} \Rightarrow 3 \text{ l}$

donc **si la pression augmente le volume diminue et inversement** ce qui pour nous à des applications très importantes en terme de plongée :

- les accidents mécaniques découlent de cette loi : y compris la surpression pulmonaire;
- lors de la descente on doit effectuer la manœuvre de valsalva afin d'éviter un problème au niveau des tympans;
- l'accident de décompression (ADD) suite à la dilatation de bulles d'azote dans la circulation sanguine;
- la consommation d'air : plus on descend, plus on consomme;
- le profondimètre à capillaire ou celui à membrane qui est basé sur la pression;
- le gonflage du gilet ou du parachute;
- le gonflage des bouteilles.

Notons dès à présent que deux autre lois dérivées de la loi Boyle et Mariotte :

Loi de Charles : où le VOLUME reste constant =>

$$\frac{P}{T} = \text{Cte}$$

Loi de Gay Lussac : où la PRESSION reste constante =>

$$\frac{V}{T} = \text{Cte}$$

Nous en reparlerons plus tard ...



3.6 Calcul des consommations

Une personne consomme environ 20 l/min à la pression atmosphérique. Pendant la plongée, la pression augmentant, notre volume d'air va augmenter proportionnellement à la pression (à 2 bars = 40 l/min)
A partir de ces données nous pouvons calculer nos besoins en air pour nos plongées. Il faut toujours avoir une réserve de sécurité au moins 40 bars.

EX : ◆ avec 50 bars dans mon 10 l combien de temps puis-je rester à 3m ?

50 x 10 = 500 l dans ma bouteille
à 3 m ma consommation est de 20 x 1,3 = 26 l/min
donc je pourrai rester 500/26 = 19 minutes

◆ et si j'avais eu un 15 l ?

50 x 15 = 750 l dans ma bouteille
donc je pourrai rester 750/26 = 28 minutes

Pour une plongée complète, le calcul de la descente et de la remontée se fait par le calcul de la pression absolue moyenne.

EX : ◆ plongée avec un 15 l. à 220 b pendant 25' à 33 m temps de descente : 4' ?

220 x 15 = 3300 l dans ma bouteille
- à la descente : ma consommation MOYENNE est de $(4,3 + 1)/2 = 2,7$ b => 20 x 2,7 = **216 l**
- pendant la plongée : 25 x (4,3 x 20) = **2150 l**
- à la remontée : 3 x (2,7 x 20) = **162 l**
- paliers (33 m/29' : 7' à 3m) : 7 x (1,3 x 20) = **182 l**

CALCUL TOTAL : 3300 -(216+2150+162+182) = 590 l => 590/15 = **39,3 bar** OK

Savoir calculer l'équilibrage entre deux blocs est très utile, car il n'est pas rare d'utiliser cette méthode pour pouvoir aider un compagnon ayant oublié de gonfler sa bouteille, en lui permettant de faire une plongée malgré tout.

Ex. On a un bi de 20 l. à 200 b et un 15 l. à 120 b. la pression finale sera de :

20 x 200 = 4000 l.
15 x 120 = 1800 l. => 5800 l se répartissent dans 20+15 litres = 35 l
=> 5800/35 = 165 b.

l'équilibrage se fait en bar, pas en volume d'air équivalent.



3.7 Loi de DALTON

Le plongeur respire de l'air comprimé cet air contient plusieurs gaz qui à une certaine pression deviennent toxiques : c'est pourquoi il est nécessaire de savoir calculer la pression de chaque gaz.

A température constante la pression absolue d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles qu'auraient chaque gaz s'il occupait seul le volume total.

A température constante, la pression partielle d'un gaz composant un mélange gazeux est égale au produit de la pression totale du mélange par le pourcentage du gaz considéré.

A température constante la pression absolue d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles de chaque composant du mélange.

FORMULES :

$$P_{abs} (AB) = P_p (A) + P_p (B)$$

$$P_p = P_{abs} \times (\% \text{ du gaz})$$

- Applications :**
- tables de décompression
 - mélanges respiratoires modifiés => NITROX
 - accidents toxiques
 - narcose à l'azote
 - accident de décompression
 - adaptation des tables pour plongée en altitude



L'air étant composé principalement de 80 % d'azote (N₂) et de 20 % d'oxygène (O₂) à la surface quelles seraient leurs pressions ?

$$\begin{aligned} \text{En surface} \quad 1 \text{ bar} &= P_p \text{ O}_2 + P_p \text{ N}_2 \\ &= 0,2 + 0,8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{à -20 m} \quad 3 \text{ bars} &= P_p \text{ O}_2 + P_p \text{ N}_2 \\ &= (0,2 \times 3) + (0,8 \times 3) \\ &= 0,6 + 2,4 \end{aligned}$$

Si on modifiait le mélange d'air en mettant 40 % d'O₂ et 60 % d'N₂ à 20 m Quelle serait la P_p d'azote et à quelle profondeur correspondrait-elle en plongée à l'air ?

$$\begin{aligned} \Rightarrow P_p \text{ N}_2 &= (3 \times 0,6) \\ &= 1,8 \text{ bars} \end{aligned}$$

\Rightarrow 1,8 bars correspond à une plongée effectuée à l'air à...

$$\begin{aligned} 1,8 &= (? \times 0,8) \\ ? &= 2,25 \text{ b} \quad \Rightarrow \text{qui correspond à 12,5 m} \end{aligned}$$

Calculez quelle serait la pression partielle d'un mélange composé de 32% d'O₂ à 40 m.



3.8 Loi de Henry

A température donnée la quantité de gaz dissout à saturation dans un liquide est proportionnelle à la pression exercée par ce gaz à la surface du liquide.

Notions nouvelles :

Les gaz se dissolvent dans les liquides; mais certains facteurs influent sur cette loi :

- la nature du liquide
- la nature du gaz
- la pression exercée par le gaz
- la durée pendant laquelle la pression est exercée
- la surface sur laquelle elle est exercée
- la température (les poissons qui crèvent en été par manque d'O₂)

Notre corps étant constitué en majeure partie de liquides, on peut dire qu'il s'y dissout du gaz. Comme l'oxygène est consommé, il reste l'azote qui lui se dissout dans notre corps.

Suite aux différents facteurs ci-dessus, nous pouvons déterminer que :

le liquide : le sang (le corps)

le gaz : l'azote

la pression exercée : la profondeur

la durée de la pression : le temps de plongée

la surface : notre volume corporel

la température : n'a pas d'influence, puisque normalement la température en plongée ne varie pas.

3.8.1 la diffusion

Prenons une certaine quantité de liquide contenue dans un récipient de forme quelconque qui est soumis par un gaz à une pression P . Nous allons avoir une dissolution qui sera immédiate à la surface de séparation. Les molécules gazeuses ainsi dissoutes vont envahir le liquide par DIFFUSION.

Ce phénomène sera d'autant plus rapide que la surface de contact sera grande. Si la surface de contact est infinie, la vitesse de dissolution sera infinie. Par contre, si la surface de contact est infiniment petite, la dissolution sera infiniment lente.

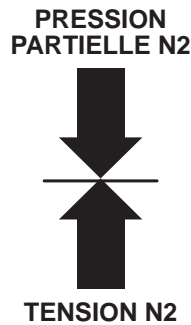
Remarque :

Les échanges respiratoires, air- sang, se font pour la diffusion des gaz, au travers de la paroi dialysante des alvéoles. (très mince)



LA SATURATION

C'est l'état d'équilibre entre la pression exercée par le gaz libre et le gaz dissous. La saturation représente la quantité maximale de gaz dissous. La pression de gaz dissous s'appelle la TENSION.



LA SOUS-SATURATION

C'est lorsque l'on part de l'état d'équilibre et que l'on augmente la pression de gaz libre, alors la pression de gaz dissous va augmenter pour tendre vers un nouvel état de saturation.



LA SUR-SATURATION

Si l'on diminue la pression de gaz libre, la tension de gaz dissous est alors plus importante et va diminuer de manière à tendre vers un nouvel état de saturation. Il faut savoir que ces phénomènes ne sont pas immédiats. La vitesse de dissolution est définie par la **période, c'est le temps qui lui est nécessaire pour atteindre la demi-saturation**. La période s'exprime en minutes, et on considère un liquide comme saturé après 6 périodes. Toutefois, le passage d'un état à l'autre ne peut se faire n'importe comment : des valeurs limites ont été définies. Elles ne peuvent être dépassées sans entraîner un risque pour le plongeur. Nous analyserons ces phénomènes lors du chapitre sur les tables de plongées.



LA SUR-SATURATION CRITIQUE

Si on diminue de manière trop rapide la pression de gaz libre, la tension de gaz dissous va être tellement importante, qu'il va y avoir formation de bulles, qui ne pourront être éliminées par les échanges respiratoires, et qui vont circuler dans le corps en risquant d'aller se coincer à un rétrécissement dans un tissu sanguin, c'est le début d'un accident de décompression.

Les tables de plongées ont été élaborées de manière à prévenir de tels effets, c'est la raison pour laquelle nous devons faire un palier de décompression lors de certaine plongée. Il permet au plongeur de diminuer sa tension d'azote dans les tissus, ce qui lui évitera d'arriver au delà de la limite de sursaturation.



Les Paliers - La saturation

Un plongeur

