

Introduction à la physique en plongée

Lorsque nous plongeons, nous changeons de milieu : nous passons de l'air à l'eau. Ceci va impliquer pas mal de modifications que nous allons analyser !

1. L'eau et l'air sont différents !

a. Composition

L'air est un gaz composé :

- d'azote (N₂) à 78%
- d'oxygène (O₂) à 21 %
- de gaz divers à 1% (dont 0,04% de gaz carbonique CO₂)

L'eau, par contre, est un fluide et est composée d'hydrogène et d'oxygène.

b. Masse

Quantité = volume	1 L d'eau douce	1 L d'eau salée	1 L d'air
Masse	1 Kg	1,026 Kg	1,3 g

c. Densité

$$\begin{aligned} \text{Densité} &= \frac{\text{Masse d'un volume d'un corps}}{\text{Masse du même volume d'eau}} && \text{(ou d'air pour les gaz)} \\ &= \frac{\text{masse de 1L eau de mer}}{\text{masse de 1L eau douce}} = 1,026/1 = \mathbf{1,026} \text{ la densité de l'eau de mer (sans unité)} \end{aligned}$$

Chaque corps, qu'il soit solide, liquide ou gazeux, a une densité. La valeur de référence est prise dans des conditions standardisées de pression et de température. Dans cet exemple, on voit que l'eau de mer est plus dense que l'eau douce : **il faut rajouter du lestage pour couler.**

d. Conductibilité

La conduction est la transmission de la chaleur entre deux corps qui se touchent. L'eau est meilleur conducteur de la chaleur que l'air. Les échanges constatés au niveau du corps immergé sont donc très importants.

Plus l'eau sera froide, plus la transmission de chaleur sera grande, d'où une perte de calories importante. Afin d'isoler notre corps de l'eau nous devons nous **revêtir d'une combinaison isothermique (isolante)** pour conserver la chaleur du corps et ralentir les échanges corps vers eau.

e. Sons

Dans l'air, les sons se transmettent à la vitesse de 330 m/sec. Dans l'eau douce, ils se transmettent à la vitesse de **1100 m/sec**. Et dans l'eau de mer (plus dense), ils se transmettent à la vitesse de **1450 m/sec**. L'eau est un milieu plus dense que l'air (à peu près 800 fois) !

1° L'air est un gaz (compressible) → sons amortis très rapidement

2° L'eau est un liquide (incompressible) → transmission rapide et puissante des sons

Les conséquences physiques de cette vitesse de propagation des sons pour le plongeur sont qu'il ne va

pas pouvoir déterminer ni la direction d'où provient le son, ni la distance qui le sépare de la source sonore → Attention aux bateaux !

f. Vision

Le champ de vision est réduit sous l'eau à cause du masque → bien tourner la tête en plongée pour élargir son champ de vision. Sans masque, on voit flou, car l'image se forme en arrière de la rétine à cause de la réfraction. De plus, un rayon lumineux qui arrive à la surface de l'eau va être soumis à plusieurs phénomènes :

- les rayons lumineux sont réfléchis par la surface de l'eau (réflexion) : moindre pénétration
- les rayons lumineux sont *déviés* à la surface air/eau (réfraction)
→ Ces deux phénomènes font *qu'on voit les objets plus gros et plus proches* que dans la réalité, à cause de la déformation des objets à l'interface du masque de plongée et de l'eau.
- les couleurs disparaissent avec la profondeur (absorption) : *en profondeur, seuls le bleu et le vert subsistent*
- Les particules en suspension dévient les rayons lumineux, les modifient ou les réfléchissent (diffusion) : diminution progressive de la lumière et un effet de brouillard

2. Le principe des pressions :

La pression P est le résultat exercé par une force F sur une surface S : $P = F/S$

L'unité de mesure de la pression est le Pascal (Pa). En plongée, on utilisera plus communément le bar (1 bar = 100000 Pascals → 1 mbar = 100 Pa ou 1 hPa en météo).

P = pression en bars

F = force en Newton

S = surface en cm²

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,987 \text{ atmosphère (atm)} = 760 \text{ mmHg}$$

On peut donc admettre avec une approximation suffisante que le bar équivaut à 1 atmosphère.

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

a. La pression atmosphérique = P_{atm}

L'atmosphère qui entoure le globe terrestre est composée d'air. L'air exerce sur le sol une certaine pression (1 litre d'air pèse 1,293g). **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**.

b. La pression hydrostatique = P_{eau}

C'est la pression exercée par le poids d'une colonne d'eau. Aussi appelée "**pression relative**". La pression dans l'eau est proportionnelle à la profondeur : elle **augmente de 1 bar tous les 10 mètres**. **Dans l'eau, il suffit de descendre à -10 m pour que la pression double.**

c. La pression absolue = P_{abs}

La pression absolue, ambiante ou totale (**eau + air**) est égale à la pression relative (hydrostatique) 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.*

En résumé, chaque fois que le plongeur descend de 10 mètres, la pression qu'il subit augmente de 1 bar :

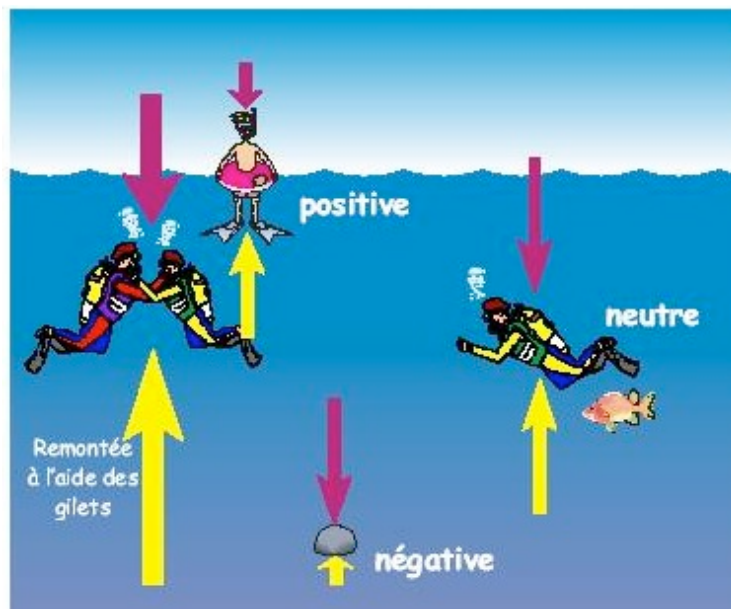
Profondeur	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
P _{absolue}	1 bar	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar

De plus, plus la pression est importante, plus la consommation d'air sera élevée. Donc, plus on plonge profond, plus on doit veiller à sa consommation d'air !

3. Le principe d'Archimède : la flottabilité

Nous savons que certains objets flottent (flottabilité positive), que d'autres coulent (flottabilité négative) et d'autres sont à l'équilibre (flottabilité neutre ou nulle). 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 »



A partir de ce principe, plusieurs notions peuvent être définies :

- Poids réel $P_{réel}$: poids exercé par le corps immergé. *Vertical du haut vers le bas.*
- Poussée Archimède P_{archi} : valeur de la force qui empêche le corps de couler. *Verticale du bas vers le haut.*
- Poids apparent P_{app} : la résultante du poids réel moins la poussée d'Archimède. S'il est nul le corps est en équilibre

$$\text{Calcul de flottabilité : } P_{app} = P_{réel} - P_{archi}$$

*Exemple : un sous-marin se trouve en équilibre à -50m, donc il a un $P_{app} = 0$. S'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. S'il veut remonter, il faut qu'il soit plus léger sans que son volume ne change, il vide ses ballasts et obtient un **poids apparent négatif** donc il remonte.*

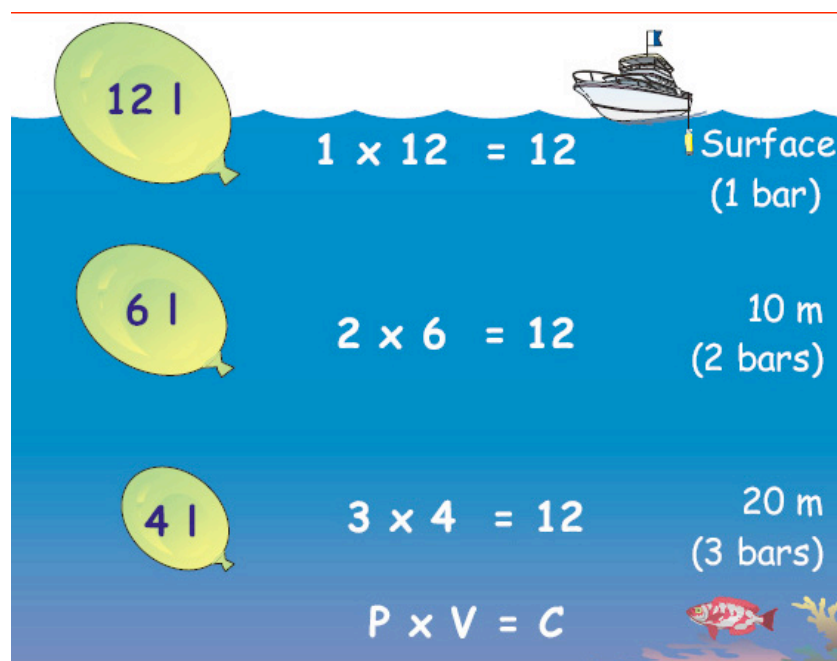
De ce principe découlent plusieurs applications en plongée :

- Le poumon ballast : lors d'une inspiration on remonte et à l'expiration on coule;
- au fur et à mesure de la plongée, la bouteille se vide (le poids diminue) donc on est plus léger;
- Le gilet de stabilisation que l'on gonfle pour se stabiliser dans l'eau et pour remonter. Pour éviter une remontée trop rapide (l'air se décomprime à la remontée), il faut purger régulièrement l'air insufflé dans le gilet.
- Le canard diminue la surface de contact du corps avec l'eau, donc diminue la poussée alors que le poids est le même, pour avoir une meilleure pénétration dans l'eau ;
- Le lestage : le corps humain a une densité proche de celle de l'eau. Lorsque le plongeur revêt du matériel flottant (combinaison en néoprène), sa densité va être inférieure à celle de l'eau, surtout en mer. Pour pouvoir pénétrer dans l'eau et couler, le plongeur doit se lester au moyen d'une ceinture de plomb.

4. La loi de Boyle et Mariotte

Les solides et les liquides sont incompressibles. Ce n'est pas du tout le cas pour les gaz. En plongée et en apnée, les gaz contenus dans les cavités aériennes de notre corps (sinus, poumons,...) se dilatent et se compriment en fonction des pressions que nous supportons. Ils obéissent à la loi de Boyle et Mariotte. Chez le plongeur immergé, 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 subit »



Comme dans l'eau l'influence de la température est moindre nous obtenons :

$$\boxed{P \times V = \text{CONSTANTE} \text{ ou } P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 = \text{CONSTANTE}}$$

Donc si la pression augmente le volume diminue (à la descente) et inversement (à la remontée), ce qui a des applications très importantes en termes de plongée :

- Les accidents mécaniques découlent de cette loi, y compris la surpression pulmonaire et la manœuvre de Valsalva pour compenser les oreilles;
- L'accident de décompression (ADD) suite à la dilatation de bulles d'azote dans la circulation sanguine à la remontée;
- La consommation d'air : plus on descend, plus on consomme → calculs de consommation
- Le gonflage du gilet ou du parachute;
- Le profondimètre à capillaire ou celui à membrane qui est basé sur la pression;
- Le gonflage des bouteilles.

D'autres lois et applications dérivant de la loi de Boyle et Mariotte seront vues au cours 2*.

5. La loi de Dalton et la loi de Henry

La loi de Dalton et la loi de Henry sont des lois qui seront vues en profondeur au brevet 2 étoiles.

Dalton : elle concerne les mélanges gazeux et explique la toxicité des gaz (toxicité de l'oxygène, narcose à l'azote) et l'élaboration des tables de plongée et autres moyens de décompression (ordinateurs).

Henry : elle concerne la dissolution des gaz dans les tissus et explique les différents états de saturation et les calculs de paliers de décompression en plongée.

EXERCICES :

1. Calculez la pression en bar d'une colonne de 10 m d'eau douce et de 10 m d'eau salée

10 m d'eau douce :

$$10 \text{ m} \times 1 \text{ cm}^2 = 1 \text{ dm}^3$$

$$\text{masse} = 1 \text{ kg}, \quad \text{poids} = 9,81 \text{ N}$$

$$P = 9,81 \text{ N} / \text{cm}^2 = 98100 \text{ N} / \text{m}^2 = 0,981 \text{ bar}$$

$$\sim 1 \text{ bar} \quad (\text{à } 2 \% \text{ près})$$

10 m d'eau salée de densité 1,03 environ :

$$\text{masse} = 1,026 \text{ kg},$$

$$\text{poids} = 1,03 \times 9,81 \text{ N} = 10,1 \text{ N}$$

$$P = 10,1 \text{ N} / \text{cm}^2 = 101000 \text{ N} / \text{m}^2 = 1,01 \text{ bar}$$

$$\sim 1 \text{ bar} \quad (\text{à } 1 \% \text{ près})$$

2. Calculez la pression subie par un plongeur qui évolue à 30 m de profondeur.

3. Soit un plongeur tout équipé (matériel, bouteille inclus) de poids 95 kg et de volume 100 L.

Calculez son poids apparent en plongée en carrière.

Quel lest doit-il ajouter pour être en flottabilité nulle?

Note: on négligera le volume occupé par le lest.

(Poids apparent : - 5 kg . Lest : 5 kg)

4. Soit un plongeur équipé, bien équilibré pour l'eau douce: son poids = 100 kg, son volume = 100 L.

Calculez son poids apparent en plongée en Zélande.

Quel lest doit-il ajouter pour y être en flottabilité neutre ? Note: l'eau salée pèse $\sim 1,03 \text{ kg} / \text{L}$.

(Poids apparent : - 3 kg . Lest à ajouter : 3 kg)

5. Quelle est la quantité d'air, à la pression atmosphérique, contenue dans une bouteille de 12 l, gonflée à 200 bars ?

(Soit V_2 le volume correspondant à cette quantité d'air à pression atmosphérique, on applique

$$P_1V_1 = P_2V_2 \text{ soit } 200 \times 12 = 1 \times V \text{ donc } V = 2400 \text{ l} = 2,4 \text{ m}^3)$$

6. Une pression de 1 bar correspond à :

- a) une force de 10 kg s'exerçant sur une surface de 1 cm²
- b) une force de 1 kg s'exerçant sur une surface de 100 cm²
- c) une force de 1 kg s'exerçant sur une surface de 1 cm²

7. A 20 mètres de profondeur, la pression hydrostatique (ou relative) est égale à :

- a) 1 bar
- b) 2 bars**
- c) 3 bars

8. A 1000 m d'altitude la pression atmosphérique est plus élevée qu'au niveau de la mer :

- a) Vrai
- b) Faux**

9. La pression absolue exercée sur un plongeur est égale à :

- a) La pression atmosphérique - la pression hydrostatique
- b) La pression hydrostatique - la pression atmosphérique
- c) La pression hydrostatique + la pression atmosphérique

10. La variation de la pression absolue est plus grande entre la surface et 10 mètres de profondeur qu'entre 30m et 40m de profondeur :

- a) Vrai**
- b) Faux

11. La loi de Boyle Mariotte décrit :

- a) L'effet de la température sur les gaz
- b) L'effet de la pression sur les gaz**
- c) L'absorption des gaz par l'organisme

12. A température constante, la loi de Boyle Mariotte définit que :

- a) $P_1 \times V_1 \times V_2 = P_2$ (ou P_1 et P_2 représentent des pressions et V_1 et V_2 des volumes)
- b) $P_1 \times P_2 = V_1 \times V_2$
- c) $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$

13. Un ballon de baudruche est gonflé de 2.5 litres d'air à une profondeur de 10m. A la surface son volume sera de :

- a) 4 litres
- b) 5 litres**
- c) 7.5 litres