

COMMISSION DE L'ENSEIGNEMENT

# Manuel Niveau 3

# Physique



lifras



Ce cours est un ouvrage de la LIFRAS (asbl).

Toute reproduction partielle ou totale est strictement interdite.



## STANDARD : EXIGENCES DE LA FORMATION

### 3. PHYSIQUE

- ✓ Connaître les composants de l'air et le rôle des gaz dans le métabolisme.
- ✓ Pouvoir effectuer des calculs élémentaires sur la pression et des calculs d'autonomie.
- ✓ Connaître et comprendre le principe d'Archimède et savoir en expliquer toutes les applications courantes à la technique de la plongée.
- ✓ Connaître et comprendre la loi de Boyle et Mariotte et savoir en expliquer toutes les applications courantes à la technique de la plongée.
- ✓ Connaître et comprendre la loi de Dalton (notion de pression partielle).
- ✓ Connaître la loi de Henry et la relation qui existe entre cette loi et l'accident de décompression.
- ✓ Savoir que les couleurs disparaissent dans l'eau, que les objets y paraissent plus grands et plus rapprochés.
- ✓ Connaître la propagation des ondes sonores dans l'eau et les conséquences pour la plongée.



# PLAN DE COURS

## 3. PHYSIQUE

3.0 RAPPEL 2⬇️

3.1 L'EAU ET L'AIR

3.2 LA PRESSION

3.3 ARCHIMÈDE

3.4 LOI DE BOYLE ET MARIOTTE

3.5 LOI DE DALTON

3.6 LOI DE HENRY

3.7 LA VISION SUBAQUATIQUE

3.8 LA PROPAGATION DES ONDES SONORES

3.9 LA CONSOMMATION



# PLAN DE COURS

## 3. PHYSIQUE

### 3.0 RAPPEL 20

#### 3.1 L'EAU ET L'AIR

#### 3.2 LA PRESSION

#### 3.3 ARCHIMÈDE

#### 3.4 LOI DE BOYLE ET MARIOTTE

#### 3.5 LOI DE DALTON

#### 3.6 LOI DE HENRY

#### 3.7 LA VISION SUBAQUATIQUE

#### 3.8 LA PROPAGATION DES ONDES SONORES

#### 3.9 LA CONSOMMATION





## 3. PHYSIQUE

### 3.0 RAPPEL 2⬇️

#### **Masse M :**

w Une masse est une quantité de matière.

w Unité de mesure officielle : le kilogramme (kg).

#### **Force F :**

w Une force est une impulsion capable de mettre une masse en mouvement.

w Unité de mesure officielle : le newton (N).

#### **Poids P :**

w Le poids d'un corps est la force qui attire ce corps vers le centre de la terre.

- ♦ Unité de mesure officielle : le newton (N).
- ♦ Relation entre P et M :  $P = M \times 9,81$  (soit approximativement 10).

Confusion habituelle

- ♦ Assimilation entre poids et masse d'où l'utilisation abusive du kilogramme pour mesurer des poids.



### 3. PHYSIQUE

#### 3.0 RAPPEL 2⬇️

##### Capacité et volume

- ♦  $1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ litre.}$
- ♦  $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3 = 1000 \text{ litres (l ou L).}$

##### Propriétés :

- |             |       |                       |
|-------------|-------|-----------------------|
| ♦ Eau pure  | 1 L = | 1,00 kg.              |
| ♦ Eau salée | 1 l ± | 1,03 kg (variable !). |
| ♦ Plomb     | 1 L = | 11,3 kg.              |
| ♦ Air       | 1 l ± | 0,00125 kg.           |

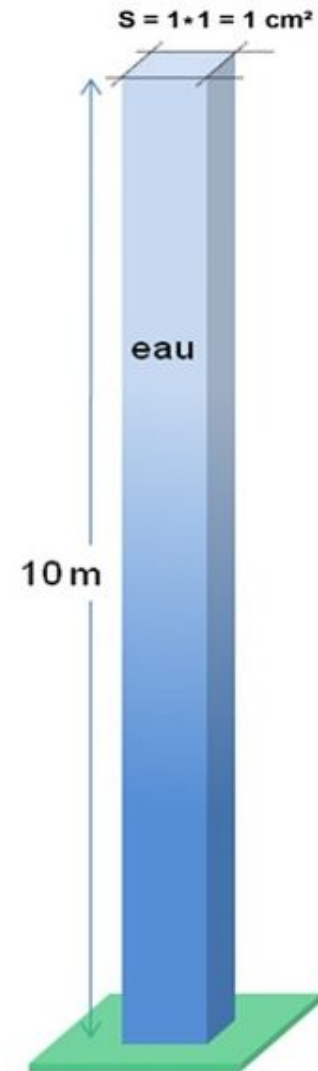


### 3. PHYSIQUE

#### 3.0 RAPPEL 2⬇

Pour rappel, la pression hydrostatique est la pression due au poids d'une colonne d'eau immobile.

- ♦ Elle augmente donc avec la profondeur :
  - ✓ Elle vaut à peu près : **1 bar pour 10 m d'eau.**  
(Quelle que soit la profondeur car l'eau est quasi incompressible).



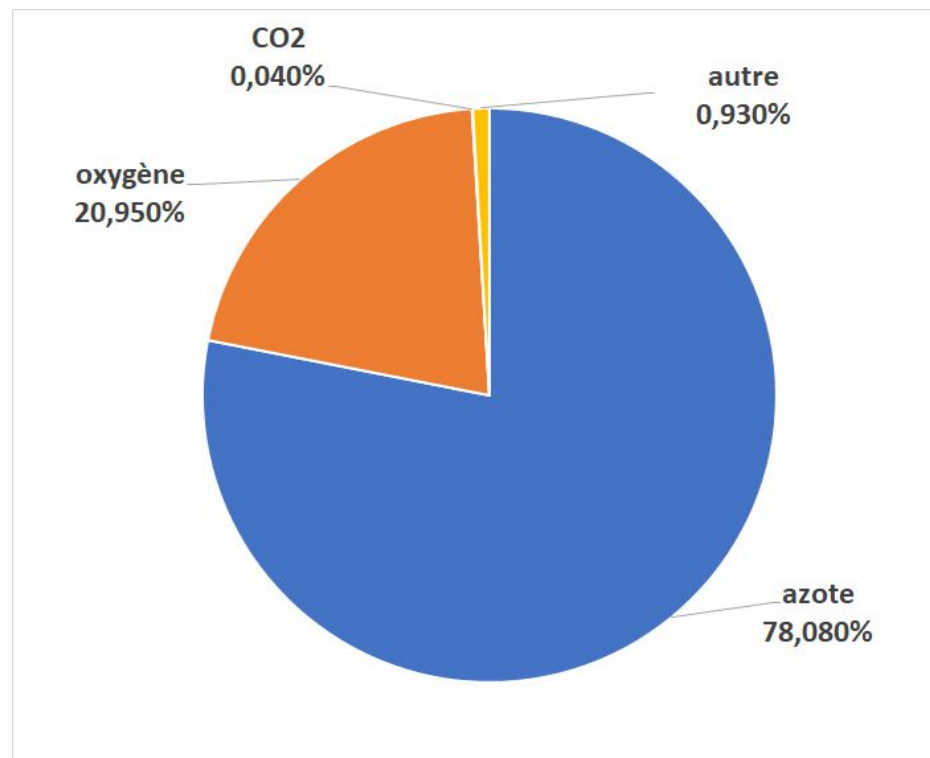




### 3. PHYSIQUE

#### 3.1 L'AIR ET L'EAU

- ♦ L'air est un **mélange gazeux** :  
Approximation: **80 % de  $N_2$  et 20 % d' $O_2$** .
- ♦ L'air a une **masse volumique** :  
Approximation :  **$1,25 \text{ kg/m}^3$** .





### 3. PHYSIQUE

#### 3.1 L'AIR ET L'EAU

**L'OXYGÈNE ou  $O_2$**  est indispensable à la vie, (air inspiré 21 %  $O_2$ , air expiré  $\pm 6$  %  $O_2$ ) mais une pression d' $O_2$  partielle trop élevée est toxique. (*Effet Paul Bert*).

Une longue exposition à l' $O_2$  pur est également toxique. (*Effet Lorrain Smith*).

**L'AZOTE ou  $N_2$**  est inerte ou neutre métaboliquement. Mais une pression partielle d' $N_2$  trop élevée est à l'origine d'un effet narcotique.

L'eau est bien **plus conductrice** de la chaleur que l'air.  
=> Refroidissement plus important dans l'eau.



# PLAN DE COURS

## 3. PHYSIQUE

### 3.0 RAPPEL 2⬇️

### 3.1 L'EAU ET L'AIR

### 3.2 LA PRESSION

#### 3.2.1 INTRODUCTION

#### 3.2.2 PRESSION BAROMÉTRIQUE

#### 3.2.3 PRESSION HYDROSTATIQUE / ABSOLUE / RELATIVE

#### 3.2.4 MASSE VOLUMIQUE ET DENSITÉ

#### 3.2.5 LA PRESSION DES GAZ

#### 3.2.6 PRINCIPE FONDAMENTAL DE L'HYDROSTATIQUE

#### 3.2.7 LA PRESSION PARTIELLE



## 3. PHYSIQUE

### 3.2 LA PRESSION

#### 3.2.1 INTRODUCTION

##### Pression P

Une pression est une force exercée sur une surface :

$$P = F / S$$

Unité de mesure officielle : le Pascal (Pa).

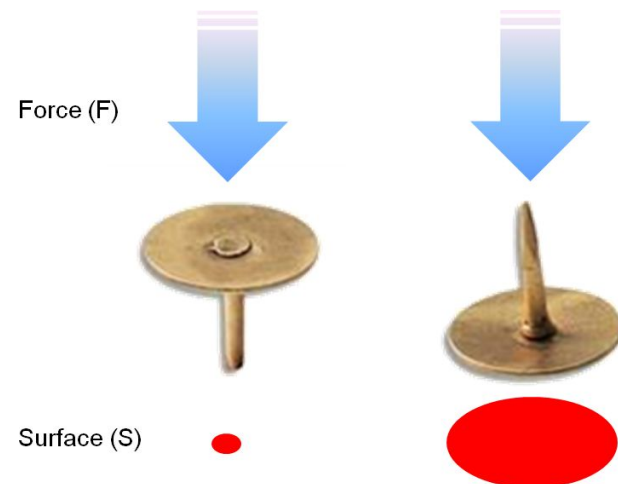
Le Pascal est la pression exercée par une force de 1 newton sur une surface de 1 m<sup>2</sup>.

Le bar, unité de pression **pratique** pour le plongeur :

1 bar = 1 kg / cm<sup>2</sup>.

1 bar = ± 00 000 Pa.

1 bar = 14,5 psi.

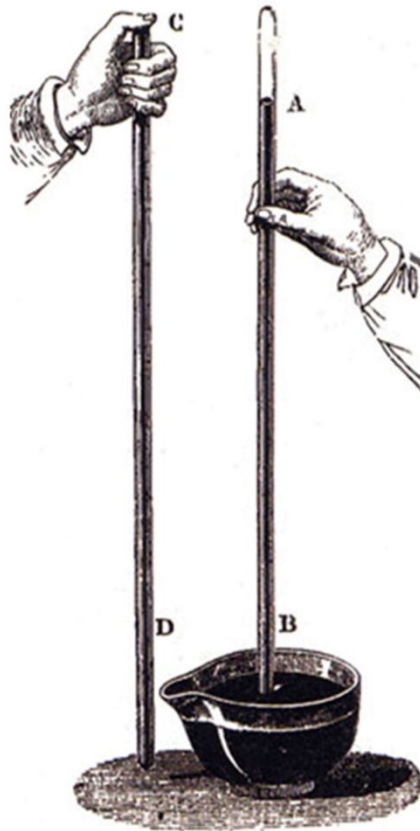




### 3. PHYSIQUE

#### 3.2 LA PRESSION

##### 3.2.2 PRESSION BAROMÉTRIQUE



La pression atmosphérique est la pression due au poids de l'air situé au-dessus de nous.

Au niveau de la mer, elle vaut :

$$1 \text{ atm} = 1\,013 \text{ hPa} = 1,013 \text{ bar} \\ = 760 \text{ mm de mercure}$$

Approximation suffisante :

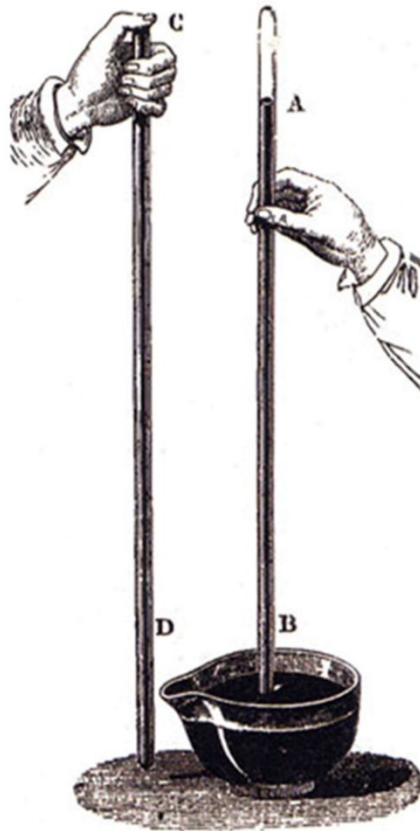
$$1 \text{ atm} = 1 \text{ bar}$$



### 3. PHYSIQUE

#### 3.2 LA PRESSION

##### 3.2.2 PRESSION BAROMÉTRIQUE



La pression atmosphérique est la pression due au poids de l'air situé au-dessus de nous.

**Elle diminue donc avec l'altitude.**

À 5 00 m d'altitude, elle vaut :

$$P_{\text{Atm}} = \pm,5 \text{ bar.}$$

L'air étant compressible, la relation n'est pas linéaire.





### 3. PHYSIQUE

#### 3.2 LA PRESSION

##### 3.2.3 PRESSION HYDROSTATIQUE / ABSOLUE / RELATIVE

La pression **ABSOLUE** est la pression totale :

- ♦ Pression **ATMOSPHERIQUE** + pression **HYDROSTATIQUE**.

En plongée à 30 m de profondeur :

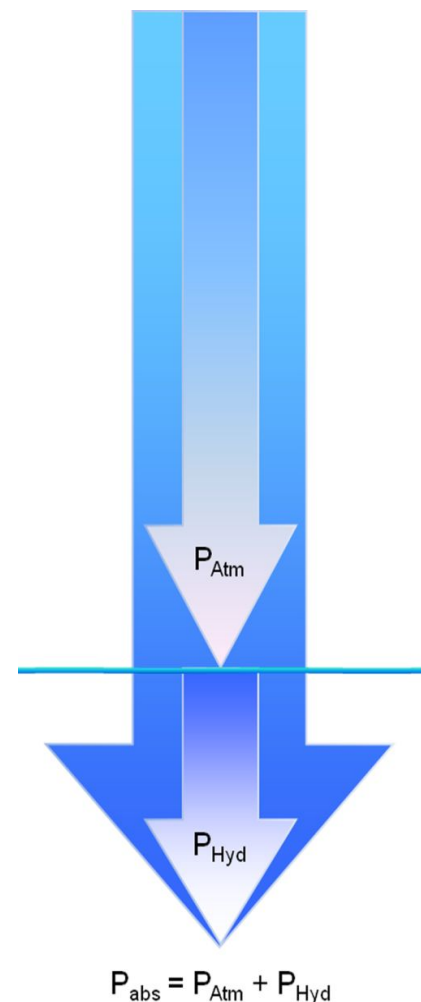
$$P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar.}$$

$$P_{\text{hydro}} = 3 \text{ bars} = P \text{ Hydrostatique.}$$

$$P_{\text{Abs}} = 4 \text{ bars} = P \text{ Absolue.}$$

La pression **RELATIVE** est la pression qui s'ajoute à la pression atmosphérique.

Si un manomètre indique 0 à l'air libre, que mesure-t-il ?





## 3. PHYSIQUE

### 3.2 LA PRESSION

#### 3.2.4 MASSE VOLUMIQUE ET DENSITÉ

##### Masse volumique $\rho$

- ♦ La masse volumique d'un corps est le rapport entre sa masse et son volume.
- ♦ Unité de mesure officielle : le kg par m<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>).

Les conditions de mesure sont importantes :

- ♦ La masse volumique d'un gaz dépend de la pression :  
Le contenu d'une bouteille « vide » ou d'une bouteille gonflée à 200 bars n'a pas la même masse volumique.
- ♦ La température a aussi un effet. L'eau, par exemple, a un maximum de masse volumique à 4°C.

Différentes conditions de référence ont été définies (conditions standards, conditions normales, etc.).



### 3. PHYSIQUE

#### 3.2 LA PRESSION

##### 3.2.4 MASSE VOLUMIQUE ET DENSITÉ

###### Densité :

- ♦ La densité (d'un solide ou d'un liquide) est le rapport entre la masse volumique de la substance et celle de l'eau pure à 4°C.
- ♦ La densité d'un gaz est le rapport entre sa masse volumique et celle de l'air. (Mêmes conditions de températures et de pression).
- ♦ Pas d'unité.

###### Propriétés :

- |             |       |                      |              |
|-------------|-------|----------------------|--------------|
| ♦ Eau pure  | 1 L = | 1,00 kg              | Densité 1    |
| ♦ Eau salée | 1 l ± | 1,03 kg (variable !) | Densité 1,03 |
| ♦ Plomb     | 1 L = | 11,3 kg              | Densité 11,3 |
| ♦ Air       | 1 l ± | 0,00125 kg           | ???          |



# PLAN DE COURS

## 3. PHYSIQUE

### 3.0 RAPPEL 2⬇️

### 3.1 L'EAU ET L'AIR

### 3.2 LA PRESSION

#### 3.2.1 INTRODUCTION

#### 3.2.2 PRESSION BAROMÉTRIQUE

#### 3.2.3 PRESSION HYDROSTATIQUE / ABSOLUE / RELATIVE

#### 3.2.4 MASSE VOLUMIQUE ET DENSITÉ

#### 3.2.5 LA PRESSION DES GAZ

#### 3.2.6 PRINCIPE FONDAMENTAL DE L'HYDROSTATIQUE

#### 3.2.7 LA PRESSION PARTIELLE



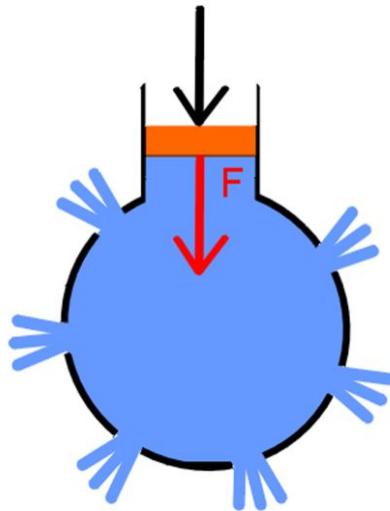
## 3. PHYSIQUE

### 3.2 LA PRESSION

#### 3.2.5 LA PRESSION DES GAZ

##### Principe de Pascal

Toute pression exercée sur un fluide se transmet intégralement et dans toutes les directions.



##### Application :

- ✓ Ré-épreuve hydraulique des bouteilles.



## 3. PHYSIQUE

### 3.2 LA PRESSION

#### 3.2.6 PRINCIPE FONDAMENTAL DE L'HYDROSTATIQUE

Le principe fondamental de l'hydrostatique relie la pression à la profondeur :

- ♦ La pression hydrostatique augmente avec la profondeur.  
(1 bar tous les 10 mètres dans l'eau).
- ♦ La pression atmosphérique diminue avec l'altitude.  
(1 mbar tous les 10 mètres dans l'atmosphère < 2 000 m).





## 3. PHYSIQUE

### 3.2 LA PRESSION

#### 3.2.7 LA PRESSION PARTIELLE

La pression partielle d'un gaz, dans un mélange gazeux, est la pression qui serait exercée par ce gaz s'il occupait seul le volume total du mélange.

La pression partielle d'un gaz dans un mélange est égale au produit de la pression totale du mélange par le % du gaz considéré :

$$P_p = P_{Abs} \times \% \text{ gaz}$$

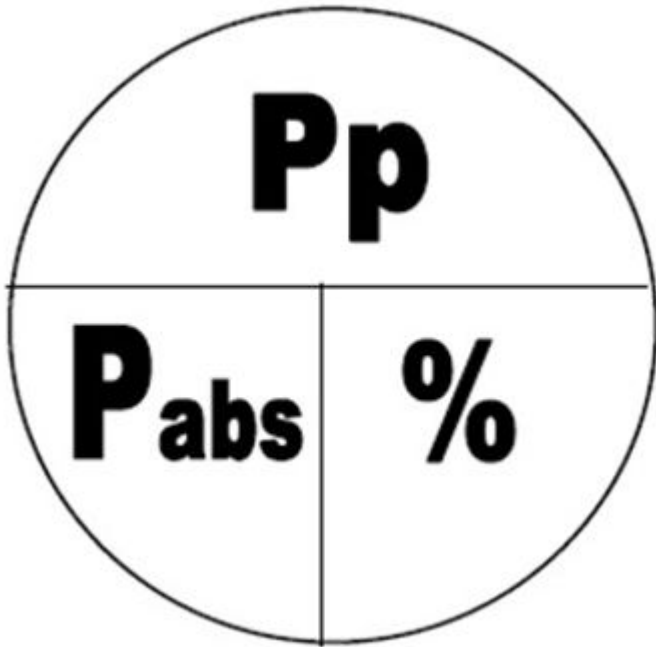


### 3. PHYSIQUE

#### 3.2 LA PRESSION

##### 3.2.7 LA PRESSION PARTIELLE

$$Pp = P_{Abs} \times \% \text{ gaz}$$



$P_{Abs}$  = pression absolue en bar.

$Pp$  = pression partielle du gaz dans le mélange.

$\%$  = Pourcentage de gaz dans le mélange.

Quelle serait la  $PpO_2$  d'un Nitrox 32 % à 40 m ?



# PLAN DE COURS

## 3. PHYSIQUE

3.0 RAPPEL 2⬇️

3.1 L'EAU ET L'AIR

3.2 LA PRESSION

**3.3 ARCHIMÈDE**

**3.4 LOI DE BOYLE ET MARIOTTE**

**3.5 LOI DE DALTON**

**3.6 LOI DE HENRY**

3.7 LA VISION SUBAQUATIQUE

3.8 LA PROPAGATION DES ONDES SONORES

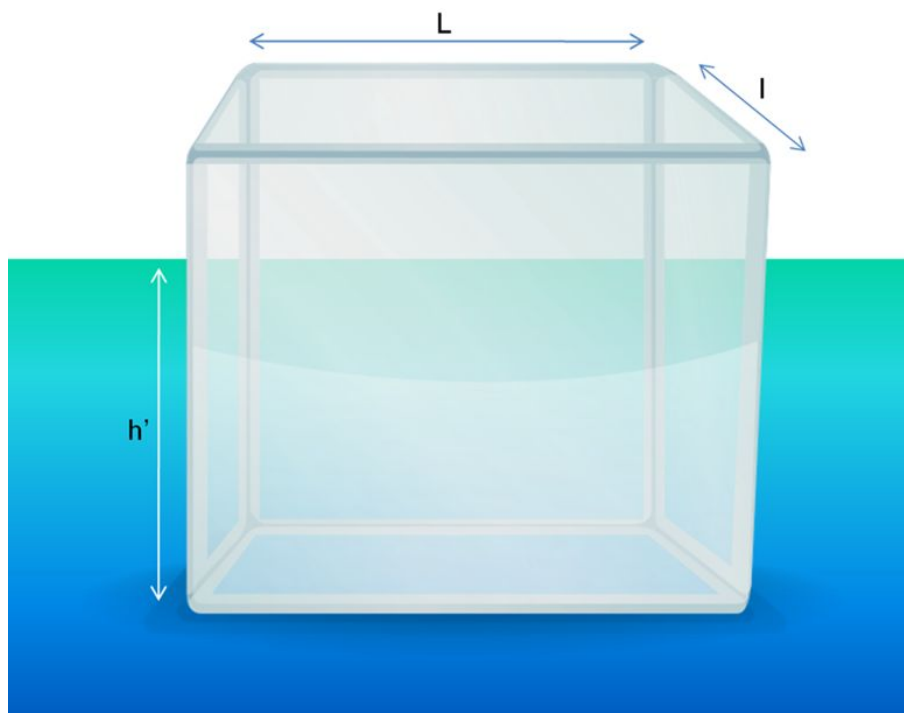
3.9 LA CONSOMMATION



## 3. PHYSIQUE

### 3.3 LE PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

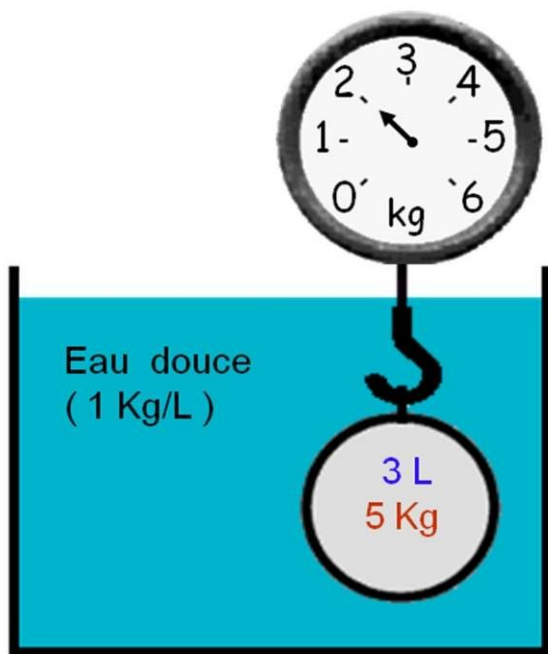
Tout corps plongé dans un fluide subit de la part de celui-ci une poussée verticale, orientée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé.





### 3. PHYSIQUE

#### 3.3 LE PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

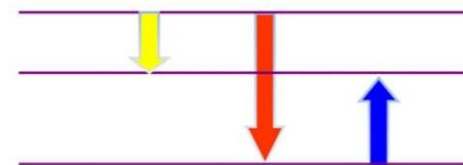


↓ Poids apparent du corps  
Objet: volume: 3 L  
masse: 5 kg

Poussée d'Archimède:  
 $3 * 1 * 9.81 \sim 30 \text{ N}$

↑ 30 N Poussée d'Archimède  
(force du fluide sur l'objet)

↓ 50 N Force de gravité



Bilan:  $50 - 30 = 20 \text{ N}$   
soit 2 kg sur la balance

Calcul du poids apparent

$$P_{\text{app}} (\text{kg}) = P_{\text{réel}} (\text{kg}) - P_{\text{arch}} (\text{kg})$$



## 3. PHYSIQUE

### 3.3 LE PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

Applications :

- ✓ **Le poumon-ballast.**
- ✓ **La combinaison.**
- ✓ **L'air du scaphandre.**
- ✓ **Le lestage.**
- ✓ **Le gilet stabilisateur.**
- ✓ **Le tuba** (Respiration en surface).
- ✓ **Le canard.**



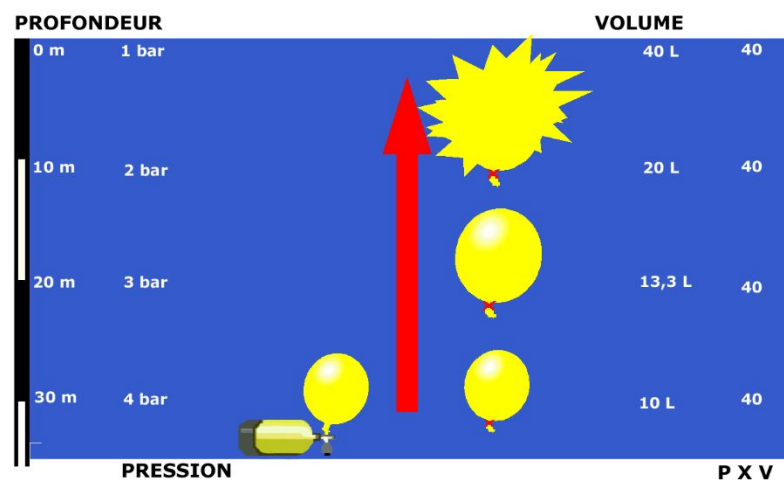
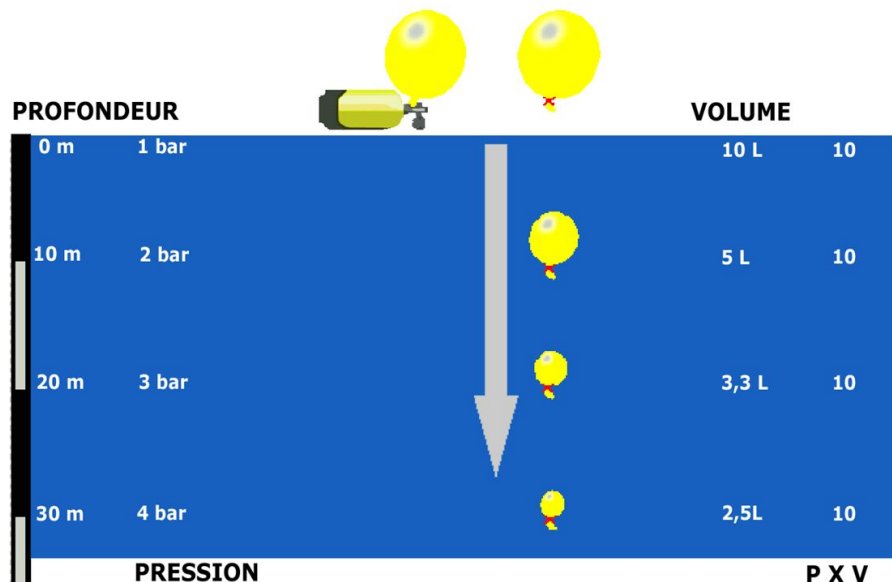


### 3. PHYSIQUE

#### 3.4 LOI DE BOYLE ET MARIOTTE

À température constante, le volume d'une masse gazeuse varie en raison inverse de la pression qu'il subit.

**PRESSION X VOLUME :  $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 = \dots = \text{CONSTANTE}$**





### 3. PHYSIQUE

#### 3.4 LOI DE BOYLE ET MARIOTTE

Applications :

- ✓ **La Combinaison** (écrasement).
- ✓ **Les bulles lors d'un ADD à la remontée.**
- ✓ **Le gonflage des bouteilles et l'équilibrage.**
- ✓ **Le gilet stabilisateur.**
- ✓ **Le parachute et le gilet de sauvetage.**
- ✓ **Les barotraumatismes.**
- ✓ **La consommation d'air.**

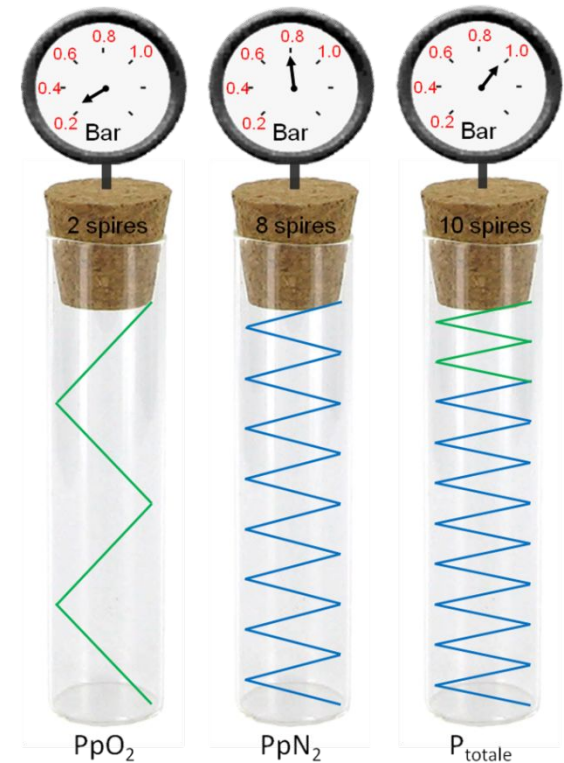


### 3. PHYSIQUE

#### 3.5 LOI DE DALTON

À température constante, la pression absolue d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles de chacun des gaz constituants.

$$P_{\text{p gaz}} = P_{\text{Abs}} \text{ mélange} \times \% \text{ gaz}$$



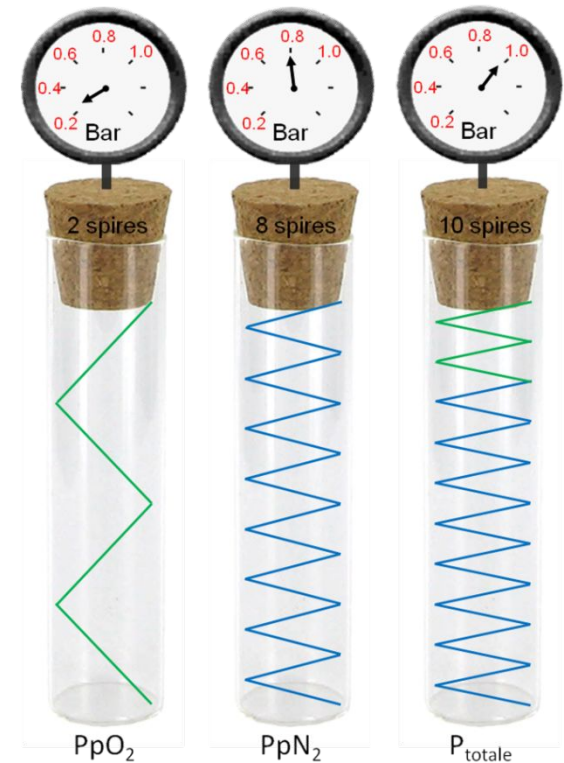


### 3. PHYSIQUE

#### 3.5 LOI DE DALTON

Applications :

- ✓ Toxicité des gaz : accidents biochimiques.
- ✓ Narcose  $P_{pN_2} > 3,2$  bars.
- ✓ Hyperoxie  $P_{pO_2} > 1,6$  bars.
- ✓ Essoufflement  $P_{pCO_2} > 0,02$  bar.
- ✓ Mélanges respiratoires.





## 3. PHYSIQUE

### 3.6 LOI DE HENRY

À température constante et à saturation, la quantité d'un gaz donné dissous dans un liquide donné est directement proportionnelle à la pression exercée par le gaz à la surface du liquide.

Etats :

- ✓ **Saturation.**
- ✓ **Sous-saturation.**
- ✓ **Sursaturation.**

Application :

- ✓ **La décompression.**





# PLAN DE COURS

## 3. PHYSIQUE

3.0 RAPPEL 2⬇

3.1 L'EAU ET L'AIR

3.2 LA PRESSION

3.3 ARCHIMÈDE

3.4 LOI DE BOYLE ET MARIOTTE

3.5 LOI DE DALTON

3.6 LOI DE HENRY

**3.7 LA VISION SUBAQUATIQUE**

**3.8 LA PROPAGATION DES ONDES SONORES**

**3.9 LA CONSOMMATION**

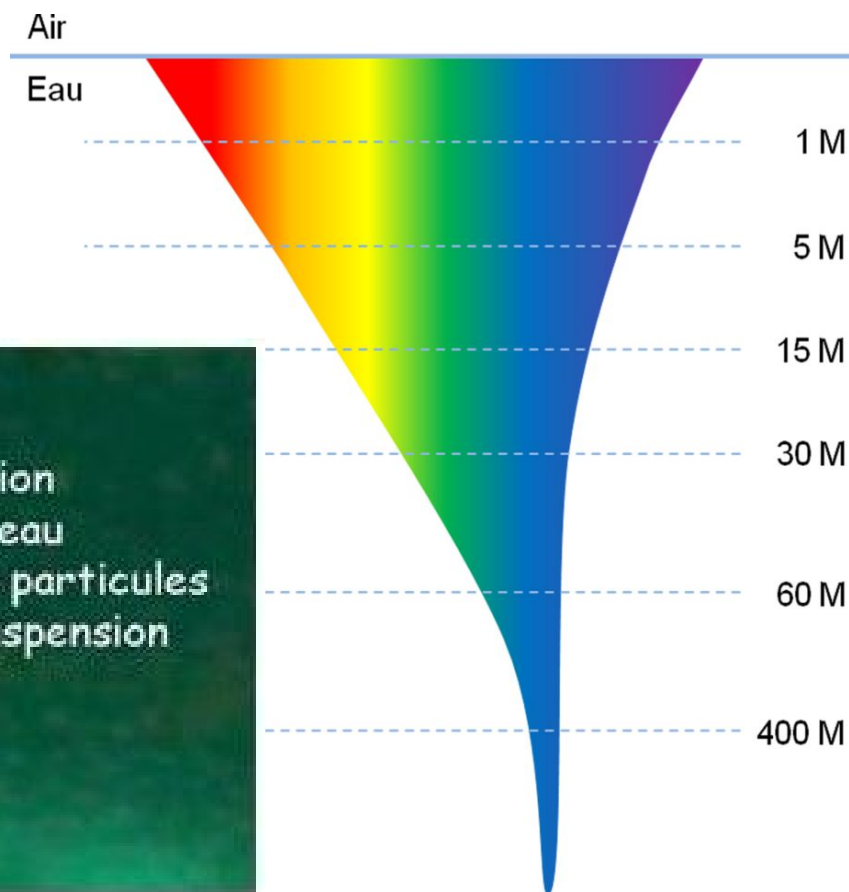




## 3. PHYSIQUE

### 3.7 LA VISION SUBAQUATIQUE

#### 3.7.1 DIFFUSION - ABSORPTION





### 3. PHYSIQUE

#### 3.7 LA VISION SUBAQUATIQUE

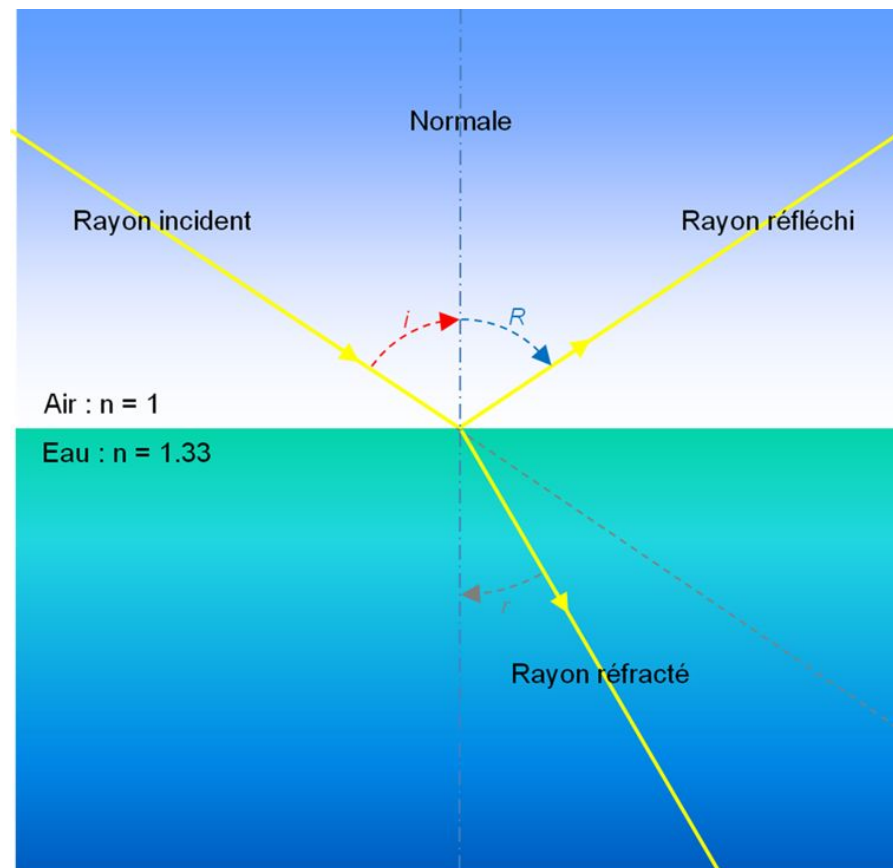
##### 3.7.2 RÉFRACTION - RÉFLEXION

La **réflexion** est le retour dans le premier milieu d'une partie de la lumière.

C'est l'effet « miroir ».

La **réfraction** est le changement de direction de la partie de la lumière qui pénètre dans le second milieu.

C'est l'effet « bâton brisé ».



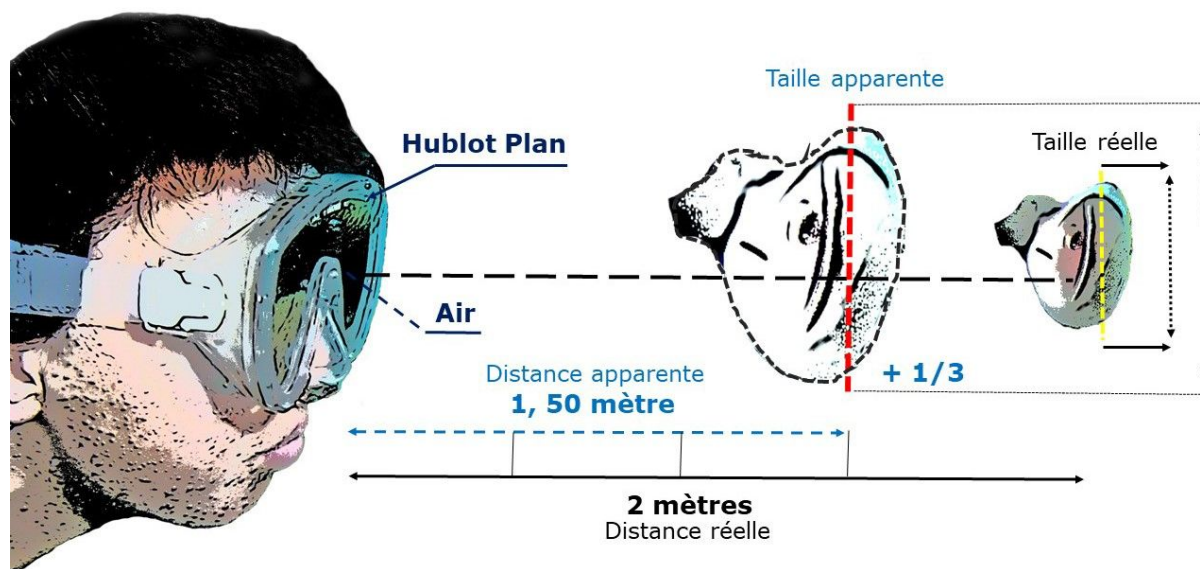


### 3. PHYSIQUE

#### 3.7 LA VISION SUBAQUATIQUE

Conséquence de la réfraction :

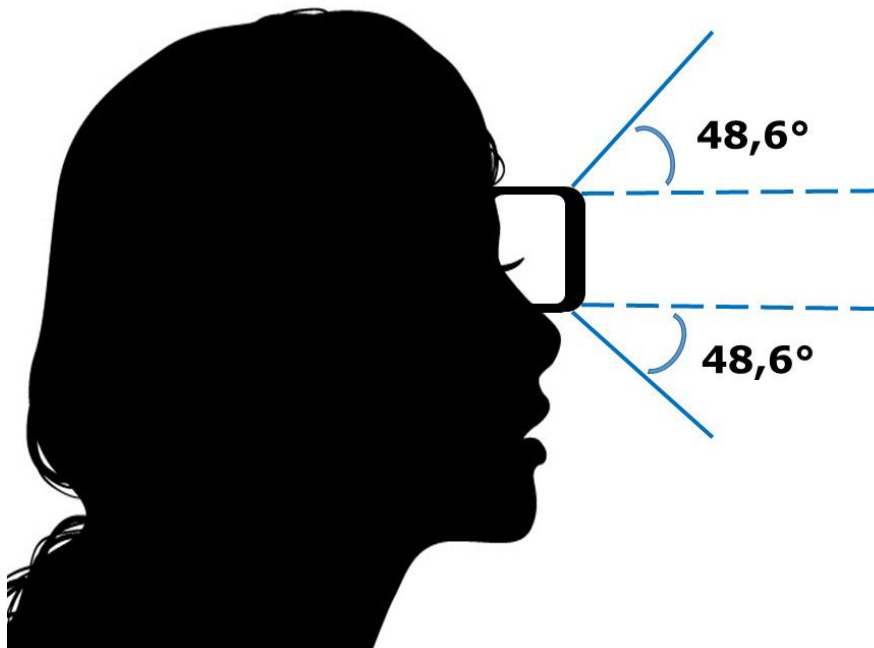
- ♦ Impression de **rapprochement**.  
La distance apparente =  $\frac{3}{4}$  de la distance réelle.
- ♦ Impression de **grossissement**.  
La taille apparente =  $\frac{4}{3}$  de la taille réelle.





## 3. PHYSIQUE

### 3.7 LA VISION SUBAQUATIQUE



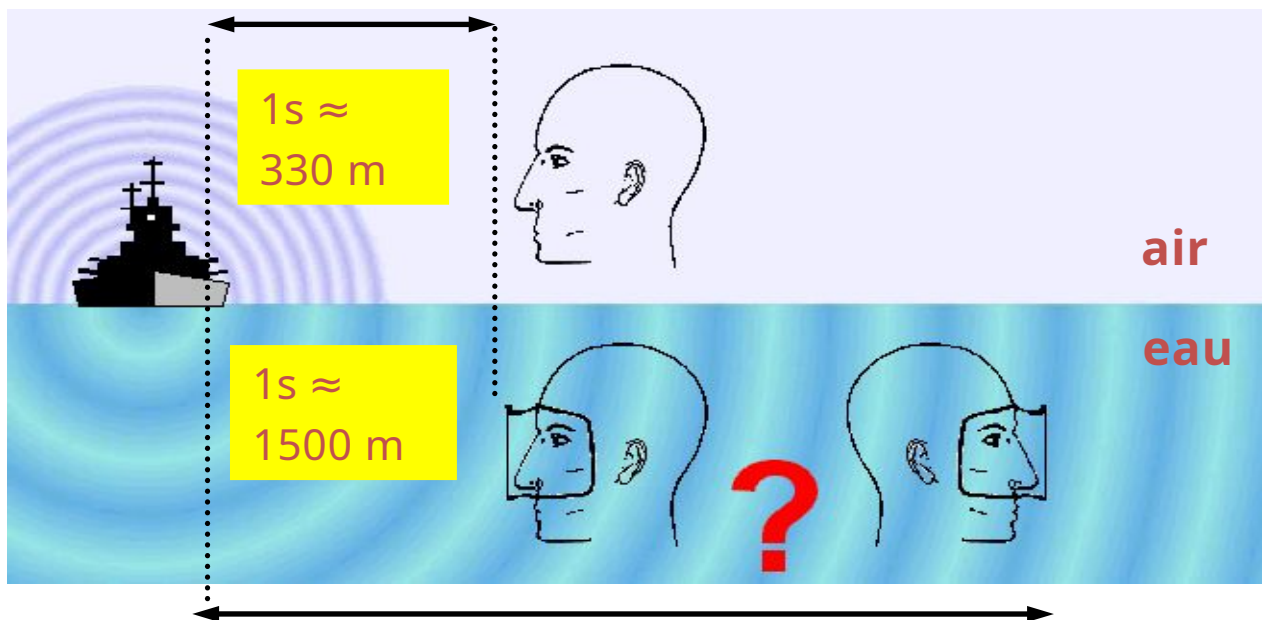
- ♦ Les rayons dont l'angle d'incidence est supérieur à  $48,6^\circ$  sont totalement réfléchis. C'est une limite.
- ♦ Le champ de vision à travers un masque, en plongée, est donc restreint.



### 3. PHYSIQUE

#### 3.8 LA PROPAGATION DES ONDES SONORES

- ♦ Le son est une onde qui a besoin d'un milieu pour se propager.
- ♦ Plus le milieu est dense, plus l'onde sonore se propage vite.  
(Air 330 m/s – Eau douce 1100 m/s – eau de mer 1500 m/s).
- ♦ Dans l'eau, il est difficile de déterminer la direction du son.





## 3. PHYSIQUE

### 3.9 LA CONSOMMATION

La consommation d'un plongeur représente la quantité d'air utilisé par minute.  
(**VRM** = Volume Respiratoire par Minute).

L'autonomie est le temps que nous pourrions plonger avec la quantité d'air emportée au départ (bouteille gonflée).

N'oublions pas Boyle et Mariotte : les gaz se compriment !

Il faut donc exprimer les volumes à même pression :

- ♦ Consommation en L/min à  $P_{\text{Atm}}$ .
- ♦ Volume embarqué en L à  $P_{\text{Atm}}$ .

L'autonomie dépend du profil (profondeur).







## 3. PHYSIQUE

### 3.9 LA CONSOMMATION

La quantité d'air emportée doit permettre de réaliser le parcours prévu en profondeur y compris les paliers et de disposer d'une réserve suffisante.

Il est donc important de pouvoir planifier que la plongée est possible mais aussi de vérifier régulièrement la pression en cours de plongée.

Facteur de consommation :

- ♦ Stress.
- ♦ Effort.
- ♦ Froid.
- ♦ Equipement.
- ♦ Entraînement.
- ♦ Comportement.
- ♦ Personnels.
- ♦ Etc.





## 3. PHYSIQUE

### 3.9 LA CONSOMMATION

Le calcul du VRM se fait en plongée :

- ♦ En relevant la pression de départ.
- ♦ En évoluant normalement en restant à la même profondeur pendant un certain temps (ex. 10 minutes à 10 m).
- ♦ En relevant la pression de fin.
- ♦ Cela permettra de calculer son VRM.

Exemple :

Pression de départ : 150 bars, pression de fin : 130 bars.

10 minutes à 10 m avec une bouteille de 15 litres.

20 bars consommés d'un 15 L = 300 L consommés en 10 minutes.

Le VRM s'exprime en  $P_{Atm}$ , nous étions à 10 m donc 2 bars.

Le VRM était donc de 15 L/min à  $P_{Atm}$ .





### 3. PHYSIQUE

#### QUESTIONS ?

- ✓ Pourquoi les bulles remontent ?
- ✓ Par quoi la narcose est-elle provoquée ?
- ✓ Combien pèsent 1 000 L d'air ?
- ✓ Quelle couleur disparaît à 30 m ?
- ✓ Est-ce que le VRM à 10 m et à 40 m sont égaux ?





Auteur :

Stéphane Dubois  
Jean-Marc Szalies

Crédits photos

Illustrations de la Farde Lifras : 7, 8, 11, 12, 13, 14, 18, 23, 26, 29, 30, 32, 33, 36

Marc Hiernaux : 1

Niel Andrea (Subea) : 37, 40

Sylviane Godin : 21, 34, 35, 38



