

# Cours de Niveau 2

## La compressibilité des gaz : lois de Boyle-Mariotte et de Charles Gay Lussac

Marc LANCEL mai 2006

### I) La loi de Boyle-Mariotte

#### A) Des effets physiques observés

##### 1) observations en plongée

- effets et réactions du gilet quand on monte ou descend ?
- effets sur le plongeur quand il monte ou descend ?
- quelles sont les consignes de sécurité à la remonté ?
- consommez vous identiquement suivant la profondeur ?

##### 2) rappels

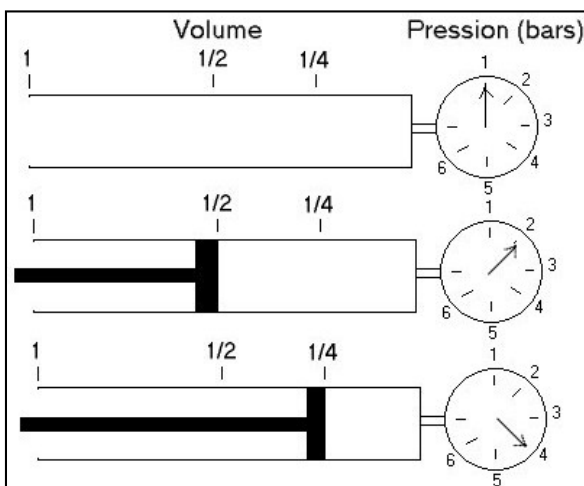
- définition et calcul des pressions ambiante, relative et absolue en fonction de la profondeur

#### B) Une loi physique primordiale en plongée

##### 1) liquide, solide et gaz sous pression

- les liquides et solides ne se compriment pas sous la pression
- les gaz se compriment en fonction de cette pression

##### 2) volume et pression



En faisant varier le volume d'air à l'intérieur d'une seringue, on observe :

- à pression ambiante, on lit 1 b sur le manomètre
  - en diminuant de moitié le volume d'air, la pression double
  - avec 1 quart du volume d'air, la pression quadruple
- > la pression est inversement proportionnelle au volume d'air

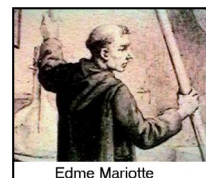
##### 3) énoncé de la loi :

\* en 1662, **Robert Boyle**, physicien irlandais énonce la règle de compressibilité des gaz :

**le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il reçoit**



\* en 1676, le Père **Edme Mariotte**, physicien français complète en ajoutant :



à température constante

\* Cette loi est formulée de la façon suivante à  $T^{\circ}$  constante (P en bars):

$$PV = \text{constante}$$

\* La loi revient donc à dire qu'à  $T^{\circ}$  constante :

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

\* la formule peut s'écrire de 2 façons suivant ce que l'on cherche :

- pression :  $P_2 = P_1V_1/V_2$

- volume :  $V_2 = P_1V_1/P_2$

#### 4) application pratique

\* un plongeur descend à 25m, la pression augmente, que se passe-t-il pour le volume d'air de 20l dans un ballon fermé rempli en surface qu'il emmène avec lui?

$$V_2 = P_1V_1/P_2 \rightarrow V_2 = 1 \times 20 / 3,5 \rightarrow V_2 = 20/3,5 \rightarrow V_2 = 5,7 \text{ l}$$

en descendant, le volume diminue, le ballon se dégonfle.

\* le plongeur à 20m remplit un ballon de 5l, que va-t-il se passer à la surface ?

$$V_2 = P_1V_1/P_2 \rightarrow V_2 = 3 \times 5 / 1 \rightarrow V_2 = 15 \text{ l}$$

en remontant, le volume augmente considérablement, le ballon peut donc éclater

\* et si les ballons, ce sont nos poumons ?

#### 5) application à la plongée

\* *volume fermé avec soupape: le gilet stabilisateur*

- un plongeur est équilibré à 20 m avec 5 l d'air dans son gilet. Il remonte à 10 m sans toucher à la stab. Que se passe-t-il ?

$$V_2 = P_1V_1/P_2 \rightarrow V_2 = 3 \times 5 / 2 \rightarrow V_2 = 7,5 \text{ l d'air,}$$

A la remontée, le gilet se gonfle, le plongeur pour s'équilibrer doit le vider.

- il ne touche pas à la stab. Sachant que sa purge libère l'air à partir de 10 l d'air, à quelle profondeur va-t-elle se déclencher ?

$$P_2 = P_1V_1/V_2 \rightarrow P_2 = 3 \times 5 / 10 \rightarrow P_2 = 1,5 \text{ b : pression à 5m de profondeur}$$

\* *volume ouvert : le parachute*

- à la différence du gilet, le parachute est ouvert. Quand le volume d'air dépasse celui du parachute, l'air échappe. Une fois plein, son volume reste constant.

\* *volume d'air inspiré*

- Un poumon en surface contient 5l d'air environ. Combien faut-il de litres d'air équivalent surface pour remplir les 5 litres des poumons à 20m ?

$$V_2 = P_1V_1/P_2 \rightarrow V_2 = 5 \times 3 / 1 \rightarrow V_2 = 15 \text{ l}$$

Puisqu'on divise toujours par 1, on peut appliquer la formule simplifiée pour le volume d'air inspiré :

$$Vol \text{ à } x \text{ m} = Vol \text{ Surface } \times \text{pression absolue à } x \text{ m}$$

*\* la consommation d'air*

- Le principe précédent s'applique à la consommation d'air car elle dépend bien entendu du volume d'air inspiré Elle s'exprime en litre par minute (l/min). Un plongeur expérimenté consomme entre 15 et 20 l/min.

$$\boxed{\text{Cons à } x \text{ m} = \text{Cons Surface} \times \text{pression absolue à } x \text{ m}}$$

- Un plongeur consomme 22l/min en surface, combien va-t-il consommer à 15m ?

$$\text{Cons à 15m} = 22 \times 2,5 = \mathbf{55\text{l/min}}$$

*\* l'autonomie du plongeur*

- Elle s'obtient en divisant le volume d'air détendu disponible (pression disponible X le volume du bloc) par la consommation à la profondeur demandée. La pression disponible tient compte des 50 bars de réserve non disponibles par définition (P dispo = P totale – 50 b)

$$\boxed{\text{Autonomie} = ((P - 50) * V) / \text{Conso}} \quad (\text{P en b, V en l, Consommation en l/min})$$

- Un plongeur consomme 20 l/min en surface, combien va-t-il consommer à 10 m ? Sa bouteille de 15l est à 200 b, quelle sera son Autonomie ?

$$\text{Cons 10m} = 20 \times 2b \rightarrow \mathbf{40 \text{ l/min}}$$

$$\text{Air dispo} = 15 \times (200 - 50) = \mathbf{2250 \text{ l d'air disponible}}$$

$$\text{Autonomie} = 2250 / 40 = \mathbf{56,25 \text{ minutes}}$$

- si le plongeur évolue à 25 m ?

$$\text{consommation} \rightarrow 20 \times 3,5 = 70 \text{ l/min} \rightarrow 2250 / 70 = \mathbf{32,14 \text{ minutes}}$$

$$\boxed{\text{Plus on plonge profond, plus le temps de plongée se réduit}}$$

*\* les plongeurs en apnée*

- Un apneiste prend 8l d'air en surface. Il descend à 20 m, quel sera le volume de ses poumons à cette profondeur ?

$$V_2 = P_1 V_1 / P_2 \rightarrow V_2 = 8\text{l} \times 1\text{b} / 4\text{b} \rightarrow V_2 = \mathbf{2 \text{ l}}$$

Ses poumons sont complètement « ratatinés ». Seul un plongeur confirmé et entraîné peut descendre aussi bas.

- Au retour en surface, ses poumons reprennent le volume de départ soit 8l.

$\boxed{\text{Il ne faut jamais donner d'air à un apneiste}}$  qui ne sait pas qu'il faut souffler à la remontée pour éviter la surpression pulmonaire.

*\* L'équilibrage des blocs*

- En sortie, on est souvent amené à équilibrer des blocs à l'aide d'une lyre. Une fois les 2 blocs réunis, la pression s'équilibre. Son calcul dépend également de la loi Boyle-Mariotte :  $P_2 = P_1 V_1 / V_2$ .

- Cependant,  $P_1 V_1$  est exprimée différemment. Elle correspond ici la quantité d'air détendu totale des 2 blocs soit  $P_1 V_1$  (bloc a) +  $P_1 V_1$  (bloc b)  $\rightarrow P_a V_a + P_b V_b$ .

- Quant à  $V_2$ , il correspond au volume cumulé des 2 blocs car la pression s'équilibre sur les 2 blocs.

- la formule s'écrit donc de la manière suivante pour un bloc a de pression  $P_a$  et de Volume  $V_a$  et d'un bloc b de pression et volume  $P_b$  et  $V_b$  :

$$\boxed{P \text{ équilibré} = (P_a V_a + P_b V_b) / (V_a + V_b)}$$

- Par exemple, pour un bloc de 15l à 220b et un bloc de 12l à 100b, on obtiendra après équilibrage :  
$$Pe = (15 \times 220 + 12 \times 100) / (12 + 15) \rightarrow Pe = 3300 + 1200 / 27 \rightarrow Pe = 4500 / 27 = \mathbf{166 \text{ b}}$$

- \* *les accidents baro-traumatiques*
- ils seront étudiés dans le prochain cours

## 6) Problèmes

\* un plongeur qui consomme 20 l/min en surface part avec un bouteille de 12l gonflée à 180 b. Il plonge 5 minutes à 25 m puis 15 minutes à 20m. Combien de temps peut-il encore rester à 3 m pour son palier de sécurité?

- nombre de litres d'air disponibles (50b de réserve) :  $(180 - 50) \times 12 = 1560 \text{ l}$
- consommation à 25 m :  $5 \text{ min} \times 3,5 \text{ b} \times 20 \text{ l} = 350 \text{ l}$
- consommation à 20 m :  $15 \text{ min} \times 3 \text{ b} \times 20 \text{ l} = 900 \text{ l}$
- air restant :  $1560 - (350 + 900) = 310 \text{ l}$
- consommation à 3 m :  $1,3 \times 20 = 26 \text{ l/min}$
- temps restant :  $310 / 26 = \mathbf{11,9 \text{ minutes}}$

\* un plongeur est à l'entraînement en piscine de 2m de profondeur avec son bloc. Au fond, il remplit ses poumons de 7 l d'air. Il bloque sa respiration et remonte en surface. Quel sera le volume de ses poumons en surface ? Quelle est la conséquence possible ?

- $V_2 = P_1 V_1 / P_2 \rightarrow V_2 = 1,2 \text{ b} \times 7 \text{ l} / 1 \text{ b} \rightarrow V_2 = \mathbf{8,4 \text{ l}}$
- il y a une augmentation de 1,4 l qui peut **provoquer des lésions pulmonaires**

\* Une plongée en petite profondeur (12m) est prévue mais un des plongeurs a un bloc vide : son bloc de 15l est à 50b, il doit être équilibré avec les 2 autres blocs qui sont remplis, le premier de 12l à 200b et le second de 15l à 200b.

On peut donc commencer à équilibrer avec le 15l puis le 12l (méthode a), ou le 12l puis le 15l (méthode b). Calculer les pressions de chaque bloc après équilibrage avec les 2 méthodes. Quelle conclusion en tirez-vous ?

- méthode a :

équilibre avec le bloc de 15l :

$$Pe = (15 \times 50 + 15 \times 200) / 15 + 15 \rightarrow 750 + 3000 / 30 \rightarrow 125 \text{ b}$$

Equilibre avec le bloc de 12l :

$$Pe = (15 \times 125 + 12 \times 200) / 15 + 12 \rightarrow 1875 + 2400 / 27 \rightarrow 158 \text{ b}$$

On se retrouve avec : 1 bloc **15l à 158b**, 1 bloc **15l à 125b** et 1 bloc **12l à 158b**

- méthode b :

équilibre avec le bloc de 12l :

$$Pe = (15 \times 50 + 12 \times 200) / 15 + 12 \rightarrow 750 + 2400 / 27 \rightarrow 116 \text{ b}$$

Equilibre avec le bloc de 15l :

$$Pe = (15 \times 116 + 15 \times 200) / 15 + 15 \rightarrow 1740 + 3000 / 30 \rightarrow 158 \text{ b}$$

On se retrouve avec : 2 blocs **15l à 158b** et 1 bloc **12l à 116b**

- avec la méthode b, le bloc de 12l est trop peu gonflé, il devient inutile. Donc l'équilibrage n'a servi à rien. La méthode a est plus valable, les volumes sont mieux répartis.

## II) La loi de Charles Gay Lussac

### 1) observations en plongée

- un bloc mis au soleil va monter en pression
- la T° de l'eau est généralement plus froide que celle de l'air
- quand il fait froid, on consomme plus

### 2) rappel

- la loi Boyle-Mariotte :  $PV = \text{constante}$  si la température est constante

### 3) énoncé de la loi

\* en 1808, le Physicien français **Charles Gay-Lussac** énonce une loi qui prolonge celle de Boyle-Mariotte. :



**A volume constant, la pression d'un volume de gaz donné varie proportionnellement à la température.**

\* La loi se formule de la façon suivante :

$$P/T = \text{constante}$$

Soit

$$P_1/T_1 = P_2/T_2$$

Avec P en bars et T en Kelvin° ( $C^\circ + 273$ )

\* suivant ce que l'on cherche, la formule se transforme :

- température :  $T_2 = P_2 \times T_1 / P_1$

- pression :  $P_2 = P_1 \times T_2 / T_1$

### 4) application à la plongée

\* un bloc de 15 l gonflé à 200 b à 20 °C est exposé en plein soleil. L'air monte à une température de 60 °C. Que se passe-t-il ?

$$P_2 = P_1 \times T_2 / T_1 \rightarrow P_2 = 200 \text{ b} \times (60 + 273) / (20 + 273) \rightarrow 200 \times 333 / 293 = \mathbf{227 \text{ b}}$$

Le bloc monte en pression de 27 bars (+14 %).

Il risque, si la température monte trop, d'être porté au delà de la pression de service.

\* le plongeur TIV du club gonfle les blocs à 200 bars. L'air, comprimé, s'échauffe à 60°C. Une fois refroidi à 20°C, quelle sera pression dans chaque bloc ?

$$P_2 = P_1 \times T_2 / T_1 \rightarrow P_2 = 200 \times (20 + 273) / (60 + 273) \rightarrow 200 \times 293 / 333 = \mathbf{175 \text{ b}}$$

Un bloc perd toujours de la pression après le gonflage.

\* un plongeur prend un bloc de 15 l gonflé à 200 b à 20°C. Il plonge à Barges où la température moyenne est de 6°C. Que se passe-t-il ?

$$P_2 = P_1 \times T_2 / T_1 \rightarrow P_2 = 200 \times (6 + 273) / (20 + 273) = \mathbf{190 \text{ b}}$$

Dans l'eau froide, les blocs perdent de la pression, donc l'autonomie du plongeur est réduite.

## 5) Problème

\* Pascal gonfle à chaud (60°C) un bloc de 12 l à 200 bars. Michel plonge au lac de Roeux, en eau froide à 2°C à une profondeur maximale de 12m. Sachant qu'il consomme 17 l d'air à la minute en surface, quelle sera son autonomie ?

- pression du bloc à 2°C :  $P_2 = P_1 \times T_2 / T_1 \rightarrow P_2 = 200 \text{ b} \times (2+273) / (60+273) = 187 \text{ b}$

- consommation à 12 m :  $2,2 \text{ b} \times 17 = 37,4 \text{ l/min}$

- air disponible avec réserve :  $(187 - 50) \times 12 \text{ l} = 1644 \text{ l}$

- autonomie de Michel :  $1644 / 37,4 = \mathbf{43,9 \text{ minutes}}$