

Préparation N2 – Cours théorique n°2

La Loi de Mariotte

Sommaire

Sommaire

• Généralité	page 02
• Notions de pression	page 03
• La Loi de Mariotte	page 06
• Illustrations de l'application de la Loi de Mariotte	page 07
• La compressibilité des gaz	page 09

Généralités

Robert Boyle

(1627 – 1691) Physicien Irlandais qui énonça en 1662 la Loi de la compressibilité des gaz .

Edme Mariotte

(1620 – 1684) Physicien Français qui énonça à quelques années d'intervalles la même Loi.

Mariotte étant français, l'énoncé de la Loi est essentiellement appelée « *Loi de Mariotte* ».

Justification

En plongée, tout ce qui se rapporte à la pression est très important, car, en effet, c'est elle, par ses variations, qui gouverne les phénomènes physiques qui agissent sur notre corps.

Les solides et les liquides sont quasiment incompressibles (Ils sont quand même soumis à la pression mais leur volume ne varie pas ou de manière infime). Il n'en est pas de même pour les gaz.

Exemples : les pneus, l'air dans une bouteille de plongée, ... contiennent de l'air comprimé.

Questions

La Loi de Mariotte permet de répondre aux questions suivantes :

- Pourquoi l'expiration, lors de la remontée dans les 10 m vers la surface, est très importante ?
- Pourquoi en remontant vers la surface, le plongeur est obligé de vider en partie sa Stab ?
- Pourquoi le plongeur doit gonfler sa Stab à la descente alors qu'il doit faire un effort pour s'immerger ?
- Pourquoi un plongeur consomme plus de volume d'air au fur et à mesure qu'il descend en profondeur ?

Applications pour la plongée

Pour un plongeur autonome, connaître la Loi de Mariotte, lui permet de :

- Calculer la capacité d'une bouteille.
- Calculer le temps qu'il peut passer à une certaine profondeur en fonction de sa consommation d'air et du volume de sa bouteille
- Lors d'un transfert tampon, savoir comment obtenir la plus grande pression possible dans le bloc rechargé
- Comprendre les conséquences du fonctionnement de la pression ambiante sur le corps du plongeur.
- Comprendre le fonctionnement des profondimètres

Légende

Signification de certaines abréviations :

Abréviation	Signification
Pabs	Pression absolue
Patmos	Pression atmosphérique

Abréviation	Signification
Phydro	Pression hydrostatique

Notions de pression

Définition

La pression est l'expression

- d'une force exprimée en kg
- sur une surface exprimée en cm²

$$P = F / S$$

Avec :

- P pour la pression
- F pour la force exercée
- S pour la surface sur laquelle s'exerce la force F

Définition du bar – unité de pression en plongée :

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ kg} / 1 \text{ cm}^2$$

Valeur de la pression atmosphérique au niveau de la mer

(Valeur approximative du bar mais qui servira de définition pour tous les calculs de pression qui seront effectués)

On distingue, pour l'activité de la plongée, trois types de pression :

- la pression atmosphérique
 - la pression hydrostatique (ou relative)
 - la pression absolue
-

Mise en évidence

- Vous appliquez votre main sur le sable avec une certaine force, de telle manière que votre main s'enfonce légèrement dans le sable de 2 à 3 mm.
- Puis, avec la même force, vous appuyez avec votre doigt sur le sable.
- Le doigt s'enfonce complètement dans le sable.

Vous avez exercé la même force mais la surface était différente, plus petite, donc la pression était différente, plus grande.

Conclusion :

- Pour une force égale, plus la surface est petite, plus la pression est élevée.
- Pour une même surface, plus la force est grande, plus la pression est élevée.

En plongée :

La pression est utilisée pour :

- l'air des bouteilles
 - exprimer l'effet de l'immersion
 - etc.
-

Autres unités de pression

Nous trouvons :

- le millibar 1 bar = 1000 millibar
 - l'atmosphère
 - le Pascal ou Hectopascal
1 bar = 1013 Hectopascal = 1.013 Pascal
 - le Mercure (abréviation Hg) ou le millimètre de Mercure (mmHg)
1 bar = 760 mmHg
-

Ce sujet continue page suivante

Notions de pression, suite

Pression atmosphérique

La pression atmosphérique est la pression exercée par le poids de l'air qui entoure la terre.

Constats :

- Cette pression diminue avec l'altitude car plus on monte en altitude, moins on aura de quantité d'air au dessus de nous.
- Le poids de l'atmosphère terrestre s'exerce sur tout notre corps, nous ne le ressentons pas car notre corps est incompressible et ses cavités (estomac, poumons, sinus, ...) contiennent de l'air à la même pression que l'extérieur.

Remarques :

- 1 bar peut aussi être défini comme la pression exercée par le poids d'une colonne de Mercure de 760 mm de haut.
Le mmHg est très utilisé comme unité de mesure car beaucoup de baromètres fonctionnaient sur ce système.
- Jusqu'à 5000 mètres d'altitude, la pression atmosphérique diminue de 0.1 bar par 1000 mètres.
Ainsi à 2000 m, la pression atmosphérique est d'environ 0.8 bar et descend à 0.5 bar à 5000 m. (Attention ceci est une approximation et une moyenne)
- Au niveau de la mer, la pression atmosphérique est d'environ 1 bar ou exactement 1013 millibar, ou 1.013 bar, ou 1 atmosphère, ou 101 300 Pascal, ou 760 mmHg, ou 1013 Hectopascal.

Pression hydrostatique

Encore appelée « *pression relative* ».

La pression hydrostatique est la pression exercée par le poids de l'eau. Cette pression varie avec la densité de l'eau considérée.

Considérons une colonne d'eau de 10 mètres de haut et de 1 cm^2 de section (surface). Son volume total est : 1000 cm (hauteur) $\times 1 \text{ cm}^2$ (section) = $1000 \text{ cm}^3 = 1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ litre}$

Rappels :

- 1 litre d'eau douce a une masse de 1 kg. (densité eau douce = 1)
- 1 litre d'eau de mer a une masse de 1.026 kg (densité eau de mer = 1.026 ou ≈ 1.03)

Pour simplifier, on admet que : 1 litre d'eau = 1 kg

Donc la pression exercée par la colonne d'eau de 1 kg sur la surface de 1 cm^2 est de 1 bar.

Formule :

Pression relative = (Profondeur en mètres / 10) \times densité de l'eau

Avec densité de l'eau = 1 (valeur approximative)

Plus on s'éloigne de la surface, plus la pression augmente car il faut tenir compte du poids de l'eau au-dessus de nous.

- A -10 m de profondeur, chaque cm^2 de notre peau supportera le poids de 1 litre d'eau
- Sachant que 1 litre d'eau de mer pèse environ 1 kg, la pression due à l'eau à -10 m de profondeur est donc de $1 \text{ kg} / \text{cm}^2$, c'est-à-dire 1 bar

Exemples :

- La pression relative à 0 m (surface de la mer) est de : 0 bar
- La pression relative à la profondeur de 10 m est de : 1 bar
- La pression relative à la profondeur de 47 m est de : 4.7 bar
- La pression relative à la profondeur de 3 m est de : 0.3 bar

Remarque :

La pression relative augmente de 1 bar tous les 10 m de profondeur.

Notions de pression, suite

Pression absolue

La pression absolue est la pression réelle subit dans l'eau par le plongeur, soit :
pression atmosphérique + pression hydrostatique

Formule :

Pression absolue = Pression atmosphérique + Pression hydrostatique

Exemple :

A -10 m de profondeur :

- la pression atmosphérique est de 1 bar
- la pression hydrostatique est de 1 bar
- la pression absolue est donc de 2 bar (1 bar P. atmos + 1 bar P. hydro)

Constat :

Pour doubler à nouveau cette valeur, il est nécessaire de descendre à -30 m, soit une pression absolue de 4 bar (1 bar P. atmos + 3 bar P. hydro)

Conclusion :

La pression absolue varie plus vite en fonction de la profondeur si on est près de la surface. C'est pourquoi il faut être extrêmement prudent dans la zone des 10 m.

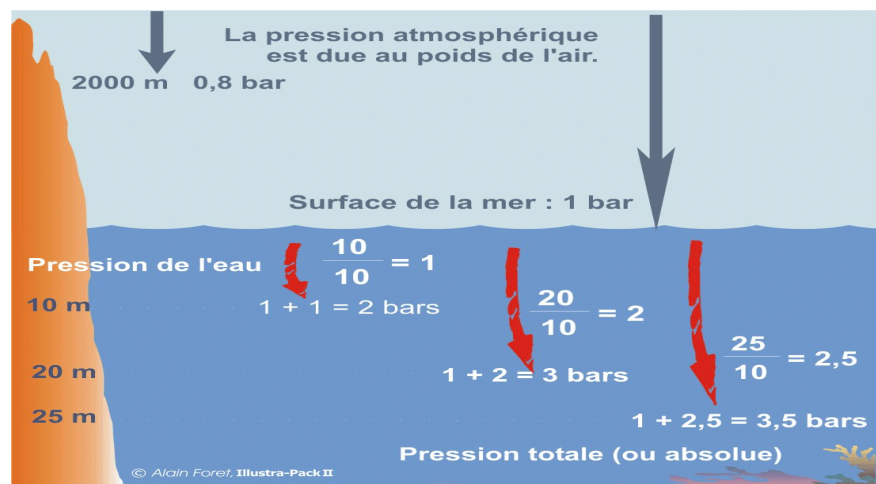
Trouver une pression

Pour calculer une pression en fonction d'une profondeur, appliquer la formule :

$P_{abs} = (Profondeur / 10) + 1$

Exemples / calcul de pression absolue :

- à 0 m $\rightarrow P_{abs} = (0 \text{ m} / 10) + 1 = 1 \text{ bar}$
- à 10 m $\rightarrow P_{abs} = (10 \text{ m} / 10) + 1 = 2 \text{ bar}$
- à 20 m $\rightarrow P_{abs} = (20 \text{ m} / 10) + 1 = 3 \text{ bar}$
- à 25 m $\rightarrow P_{abs} = (25 \text{ m} / 10) + 1 = 3.5 \text{ bar}$



Trouver une profondeur

Pour calculer une profondeur en fonction d'une pression, appliquer la formule :

$Prof = (P_{abs} - 1) \times 10$

Exemples / calcul de profondeur :

- Pabs = 3 bar $\rightarrow Prof = (3 \text{ bar} - 1) \times 10 = 20 \text{ m}$
- Pabs = 5.8 bar $\rightarrow Prof = (5.8 \text{ bar} - 1) \times 10 = 48 \text{ m}$
- Pabs = 1.05 bar $\rightarrow Prof = (1.05 \text{ bar} - 1) \times 10 = 0.5 \text{ m}$

La Loi de Mariotte

Constat

A l'inverse des corps solides ou liquides qui sont incompressibles, les corps gazeux ont la faculté de pouvoir être comprimés. Ils sont donc dits compressibles.

Définition (Loi de Mariotte)

La loi de Mariotte définit la relation existante entre un volume et pression d'un gaz à **température constante**.

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

Le produit de la pression par le volume reste constant soit $P \times V = \text{constante}$

- A une même température, pour le même gaz mais soumis à une pression différente, on aura :
 $P_1 \times V_1 = \text{constante}$ (Même constante que précédemment)
- A une même température, pour le même gaz mais soumis à un volume différent, on aura :
 $P_2 \times V_2 = \text{constante}$ (Même constante que précédemment)

Nous pouvons également écrire la formule sous la forme suivante :

$$P \times V = P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 = \text{constante}$$

Avec :

- P pression de départ
P1 pression autre état
P2 pression correspondant à l'état du volume V2
- V volume de départ
V1 volume correspondant à l'état de la pression P1
V2 volume autre état

Mise en évidence 1

On remplit une seringue d'air.

On bouche l'extrémité de la seringue avec un doigt.

Etape 1 :

On presse le piston de la seringue, le piston s'enfonce et l'air contenu dans la seringue se comprime.

Etape 2 :

On arrête de presser le piston de la seringue, l'air comprimé dans la seringue reprend sa place (puisque en contact avec la pression de l'air ambiant) et le piston retrouve sa position d'origine.

Application de la loi

Un gaz enfermé dans une cavité ne peut varier :

- en pression qu'en variant de volume.
- en volume qu'en variant de pression

L'application de cette loi permet de comprimer de l'air dans les bouteilles de plongée.

Remarque :

- Entre 0 et -10 m, on multiplie la pression par 2 Pour la multiplier à nouveau par 2, il faut faire 20 m de plus en profondeur.
Ceci veut dire que lorsque l'on remonte près de la surface, le plongeur subit une différence de pression plus importante.

Conséquence :

C'est la raison pour laquelle il faut ralentir sa vitesse de remontée à l'approche de la surface.

Ce sujet continue page suivante

Illustrations de l'application de la Loi de Mariotte

Mise en évidence 2

Un ballon contient 12 litres d'air en surface.

Formule de Mariotte : $P \times V = \text{Constante}$

Soit : 1 bar (pression atmosphérique) x 12 litres = Constante = 12

On décide d'immerger ce ballon à une profondeur de 20 mètres.

Le ballon, en descendant à 20 m, subit la pression du milieu ambiant au fur et à mesure qu'il descend.

Ainsi à une profondeur de 10 m, nous avons :

$P \times V = \text{Constante} = 12$

Pabs à 10 m = (10 m / 10) + 1 = 2 bar

Donc 2 bar x Vol recherché = 12

Vol du ballon = 12 / 2 = 6 litres

A la profondeur de 20 m, nous avons :

$P \times V = \text{constante} = 12$

Pabs à 20 m = (20 m / 10) + 1 = 3 bar

Donc 3 bar x Vol recherché = 12

Vol du ballon = 12 / 3 = 4 litres

Autre façon de calculer :

Formule de Mariotte : $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$

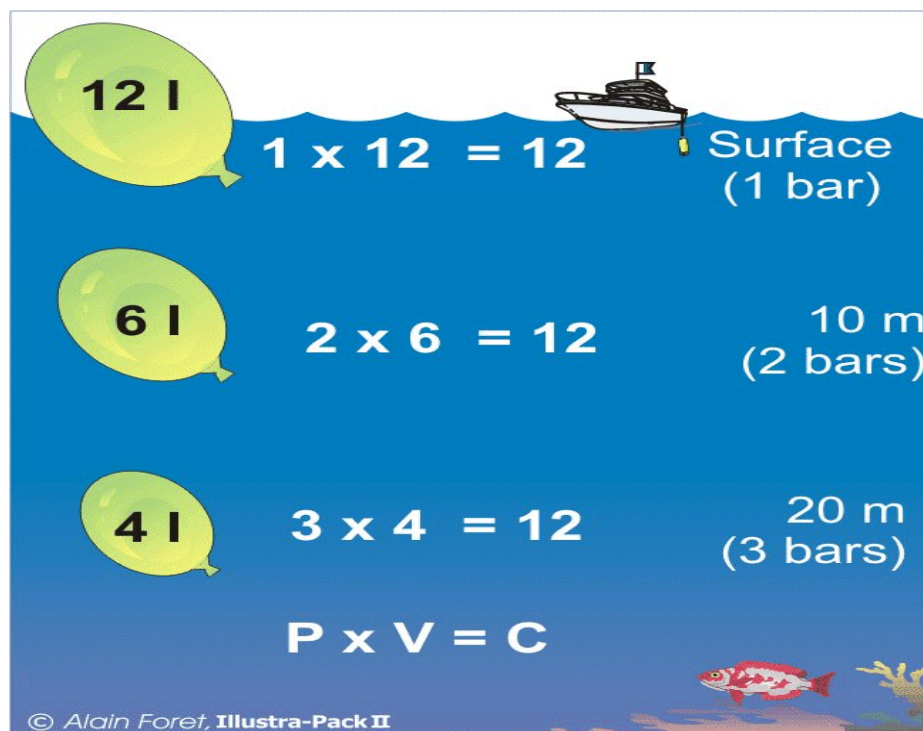
Avec :

- $P_1 = 1$ bar (pression atmosphérique=)
- $V_1 = 12$ litres d'air en surface
- $P_2 = \text{Pabs à la profondeur de 20 m}$
- $V_2 = \text{Volume du ballon recherché}$

Calcul de la Pabs à 20 m :

Pabs = (20 m / 10) + 1 = 3 bar

$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$ soit $V_2 = (P_1 \times V_1) / P_2 = (1 \text{ bar} \times 12 \text{ litres}) / 3 \text{ bar} = 4 \text{ litres}$



Illustrations de l'application de la Loi de Mariotte, suite

Mise en évidence 3

Si l'on retourne un verre à la surface de l'eau et qu'on l'immerge.

- L'eau va monter progressivement dans le verre en comprimant l'air qu'il contient.
- En remontant le verre, la pression va diminuer, l'air se dilate et chasse l'eau qu'il contient.

Supposons un verre d'un volume de 10 litres.

En surface :

La pression intérieure dans le verre est de 1 bar (pression atmosphérique)
soit l'équation :

« **volume du verre** = **pression x volume en fonction de la profondeur** »

1 bar x 10 litres = 10 litres

Le verre est vide

Profondeur -10 m :

La pression est de 2 bar (1 bar atmos + 1 bar hydro)

Le volume du verre est toujours de 10 litres, donc

2 bar x « ? » (volume cherché) = 10 litres, soit un volume disponible de 5 litres à -10 m

Le verre est à moitié rempli par l'eau

Profondeur -30 m :

La pression est de 4 bar (1 bar atmos + 3 bar hydro)

Le volume du verre est toujours de 10 litres, donc

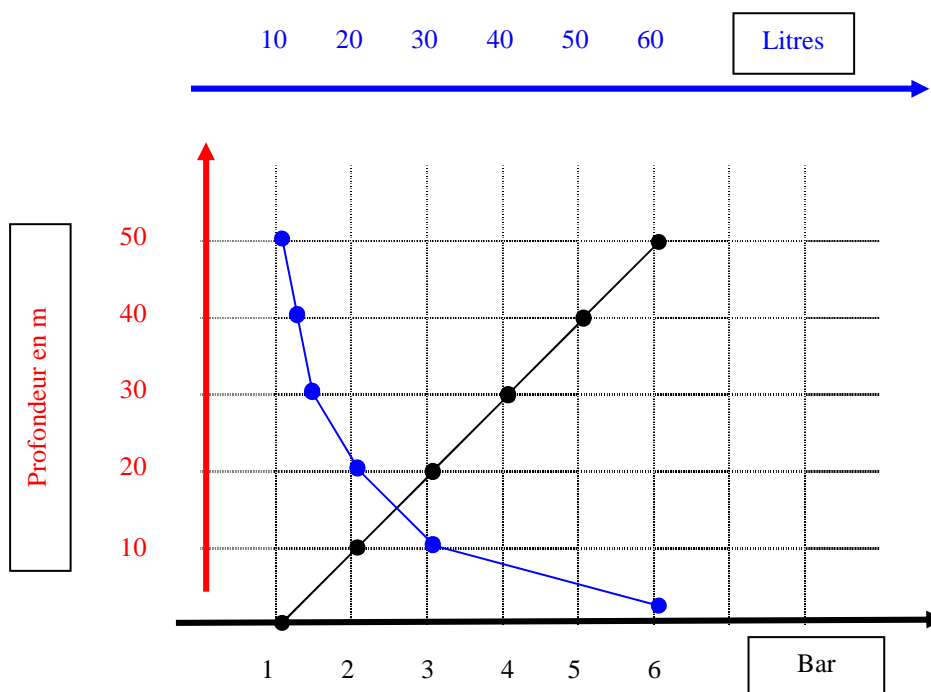
4 bar x « ? » (volume cherché) = 10 litres, soit un volume disponible de 2.5 litres à -30 m

Le verre est au trois quart rempli par l'eau.

Schématisation

En bleu : Courbe de l'évolution des volumes de l'air en fonction de la pression

En noir : Courbe de l'évolution des pressions absolue en fonction de la profondeur



La compressibilité des gaz

Conclusions

La loi de Mariotte – la compressibilité des gaz - est :

- à la base de tous les accidents barotraumatiques
- à une influence sur les accidents de décompression
- à une influence sur les accidents de toxicité

Prévention des accidents barotraumatismes

Pour la prévention des barotraumatismes, il est impératif de :

1. Soufflez par le nez dans le masque à la descente pour compenser la diminution de volume dans le masque.
2. Equilibrer les oreilles surtout dans les premiers mètres et uniquement à la descente.
3. Ne jamais bloquer sa respiration lors de la remontée – risque de surpression pulmonaire.

Prévention des accidents de décompression

Mise en évidence :

- Prenons un ballon de 1 litre de volume à -3 m, en surface ce ballon fera :
 $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$
 $1.3 \text{ bar} \times 1 \text{ litre} = 1 \text{ bar} \times \text{« ? » litres}$
soit un volume en surface de 1.3 litre
- Prenons un ballon de 1 litre de volume à -42 m, à -30 m, ce ballon fera :
 $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$
 $5.2 \text{ bar} \times 1 \text{ litre} = 4 \text{ bar} \times \text{« ? » litres}$
soit un volume à -30 m de 1.3 litres

Remarque :

On s'aperçoit qu'il y a la même variation entre -42 m et -30 m que de -3 m à la surface.

- Entre -42 et -30 m, il y a une distance verticale de 12 m. Les tables et la sécurité recommande de remontée à une vitesse de 15 m/mn.
Soit Vitesse recommandée = Distance verticale / 1 mn = 15 m/mn
Pour faire 12 m il faudra :
Vitesse recommandée = 15 m/mn = 12 m / temps recherché
Soit temps recherché = 12 / 15 = 0.8 mn
Soit temps en seconde = 0.8 x 60 = 48 secondes (60 seconde en une minute)

Conséquence :

Si on remonte à la vitesse de 15 m/mn, on mettra environ 48 secondes pour passer de -42 m à -30 m.

- **Si on veut respecter la vitesse d'accroissement des volumes, on devra mettre 48 s pour passer de -3 m à la surface soit une vitesse de 3.75 m/mn**

Calcul :

Vitesse recommandée pour surface = 3 m / 0.8 mn = 3.75 m/mn

Pour la prévention des accidents de décompression, il est impératif de :

Ralentir sa vitesse de remontée à l'approche de la surface.

Les vitesses préconisées sont de 1 mn entre paliers et de 1 mn entre le dernier palier à -3 m et la surface.

Ce sujet continue page suivante

La compressibilité des gaz, suite

Prévention des accidents de panne d'air

Mise en évidence :

- Un plongeur consomme 20 l/mn en surface, il dispose d'un bloc de 12 litres gonflé à 200 bar, il veut plonger à -40 m mais veut revenir sur le bateau avec une réserve de 50 bar, combien de temps peut-il plonger ?
- On considère qu'il fait toute sa plongée à -40 m et on ne compte pas le temps de descente et de remontée.

Calculons son volume disponible pour plonger à -40 m :

- Il veut revenir avec 50 bar donc il ne dispose que de :
 $200 \text{ bar} - 50 \text{ bar} = 150 \text{ bar}$ utilisable dans son bloc
- Soit $150 \text{ bar} \times 12 \text{ litres} = 1800 \text{ litres d'air}$

Calculons sa consommation d'air à -40 m :

- Formule de la Pression absolue
 $P_{\text{abs}} = P_{\text{atmos}} + P_{\text{hydro}}$
 $P_{\text{abs}} \text{ à } -40 \text{ m} = 1 \text{ bar} + 4 \text{ bar} = 5 \text{ bar}$
- A -40 m, la pression absolue est de 5 bar (1 bar atmos + 4 bar hydro)
- La consommation du plongeur sera de $20 \text{ litres/mn} \times 5 \text{ bar} = 100 \text{ litres/mn}$

Calculons le temps qu'il pourra rester à -40 m :

- Le plongeur pourra donc rester $1800 \text{ litres} / 100 \text{ litres} = 18 \text{ mn}$ (à -40 m)

Pour la prévention des accidents de panne d'air, il est impératif de :

1. D'avoir à sa disposition un manomètre branché en direct sur le bloc.
 2. A partir de plongées dans l'espace lointain et au-delà, il est nécessaire de calculer le temps disponible à la profondeur maxi désirée en fonction de la capacité du bloc emporté et de sa consommation d'air par minute.
-