

**Poids - Pression – Volume**  
**Conséquences et relations avec l'activité**  
**Flottabilité et équilibre**  
**Compressibilité des gaz**  
**Pression partielle**  
**Relation avec la toxicité des gaz, relation avec le Nitrox**

**COURS THEORIQUE CAPACITAIRE N4**  
**SAISON 2009 / 2010**  
**Le 3 décembre 2009**

# Sommaire



<ul style="list-style-type: none"><li>1. Préalable</li><li>2. Les unités de mesure<ul style="list-style-type: none"><li>- Masse</li><li>- Masse volumique</li><li>- Densité</li><li>- Poids</li><li>- Température</li><li>- Pression</li></ul></li><li>3. Pression et profondeur<ul style="list-style-type: none"><li>- P Atmosphérique</li><li>- P Hydrostatique</li><li>- P Absolue</li></ul></li><li>4. Pression et diurèse d'immersion</li><li>5. Pression et plongée en altitude</li><li>6. Pression et compressibilité des gaz<ul style="list-style-type: none"><li>- Loi de Boyle-Mariotte</li><li>- L'autonomie</li><li>- Incidence sur la densité du gaz respiré</li><li>- Flottabilité &amp; équilibre<ul style="list-style-type: none"><li>• Poussée d'Archimède</li><li>• Flottabilité</li><li>• Paramètres de flottabilité</li><li>• Les risques liés</li><li>• Les techniques d'immersion</li></ul></li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Le gonflage</li><li>- Le parachute</li><li>- Accident de décompression</li><li>- Barotraumatismes</li><li>7. Pression Partielle des gaz<ul style="list-style-type: none"><li>- Loi de Dalton</li><li>- Incidence sur les gaz respirés en plongée<ul style="list-style-type: none"><li>• Azote<ul style="list-style-type: none"><li>- Trimix</li></ul></li><li>• Oxygène<ul style="list-style-type: none"><li>- Hyperoxie<ul style="list-style-type: none"><li>» Nitrox</li><li>» Palier à l'oxygène pur</li></ul></li><li>- Hypoxie<ul style="list-style-type: none"><li>» Apnée</li><li>» Trimix</li><li>» Recycleur</li></ul></li></ul></li></ul></li></ul></li><li>8. Influence de la température sur les gaz<ul style="list-style-type: none"><li>- Loi de Dalton intégrale</li><li>- Loi de Charles</li><li>- Calcul d'autonomie en sortie de gonflage</li></ul></li></ul>
---	---

## Préalable



Le présent cours a pour objet de comprendre les phénomènes physiques intervenant en plongée, et d'introduire les conséquences qui en découlent pour le plongeur

Ces conséquences seront étudiées en détail dans la suite du cursus de préparation au niveau 4



## Les unités de mesure

- **Masse**

- **Quantité de matière**, indépendante de la pression et de la température

**kg**

- **Masse volumique**

- **Quantité de matière contenue dans un volume donné**

1 litre ou 1 dm<sup>3</sup> d'**eau** pèse 1 kg, soit 1 kg/dm<sup>3</sup>

**kg/dm<sup>3</sup>**

1 litre ou 1 dm<sup>3</sup> de **plomb** pèse 11,3 kg, soit 11,3 kg/dm<sup>3</sup>

1 litre ou 1 dm<sup>3</sup> d'**air** pèse 1,293 g, soit 1,293 g/dm<sup>3</sup>

**g/dm<sup>3</sup>**

**Dépendante de la température et de la pression, car la matière se dilate avec l'augmentation de température et se contracte sous la pression**

**Les valeurs ci-dessus correspondent à des conditions de température et de pression données**

**Pour le plongeur                      1 kg/dm<sup>3</sup> = 1 g/cm<sup>3</sup>                      1 dm<sup>3</sup>=1 litre                      1 g/dm<sup>3</sup> = 1 g/litre**

**Les gaz sont nettement plus soumis aux phénomènes de dilatation et compressibilité que les solides et liquides** (la pression d'air augmente dans un pneu échauffé par le roulement / le pneu s'écrase lorsque vous chargez votre coffre,...)

**Cette propriété des gaz joue un rôle important en plongée par exemple sur le gonflage des blocs, sur la consommation du plongeur, donc son autonomie; sur la flottabilité, sur la toxicité des gaz respirés etc... Nous y reviendrons plus loin**



## Les unités de mesure

- Densité

- Rapport entre la masse d'un corps et la masse d'un corps de référence, pour un même volume, sans unité
  - L'eau pour les liquides et solides
  - L'air pour les gaz

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ litre de plomb pèse } 11,3 \text{ kg} \\ 1 \text{ litre d'eau pèse } 1 \text{ kg} \end{array} \right\} \text{ densité plomb} = \frac{11,3}{1} = 11,3$$

La densité de l'eau douce est de 1

**La densité de l'eau de mer varie avec la salinité**

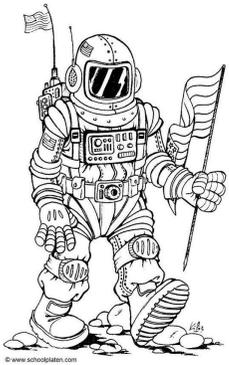
Ex.:  $d = 1,03$  indique qu'un litre ou un  $\text{dm}^3$  de cette eau de mer pèse 1,03 kg à une pression et à une température données

↪ **Nous verrons plus loin que cette différence de densité du milieu impacte les conditions de plongée, en obligeant le plongeur à adapter son lestage**

## Les unités de mesure

- Poids

- Les corps exercent entre eux une force dite « d'attraction », de « pesanteur » ou de « gravitation », qui dépend des masses ou quantités de matières en présence, et de la distance qui les sépare



- Le corps ayant la quantité de matière la plus petite est attiré par le corps le plus important : la Lune est attirée par la Terre, la Terre par le Soleil. Vous êtes attirés par la Terre
- La force d'attraction augmente avec la quantité de matière ou masse en présence : vous êtes plus « lourd » à la surface de la Terre qu'à la surface de la Lune, ce qui explique que les astronautes puissent faire des bonds plus importants sur la Lune que sur Terre
- La force d'attraction diminue avec la distance : les hommes sont en état d'apesanteur (poids zéro) dans une station orbitale car ils sont très loin de la Terre, qui n'exerce plus la même attraction qu'à sa surface

Nous vivons à la surface de la Terre, qui exerce donc sur nous une force dirigée vers son centre (vers le bas, à la verticale). Cette force varie selon l'endroit où nous sommes : à l'équateur ou aux pôles (la terre n'étant pas ronde, la distance à son noyau varie et fait varier notre poids), à la surface de la mer ou à 5 000 m d'altitude en montagne...

Le rapport entre notre masse et notre poids **dépend de la force de gravitation**, qui n'est pas constante, nous l'avons vu :

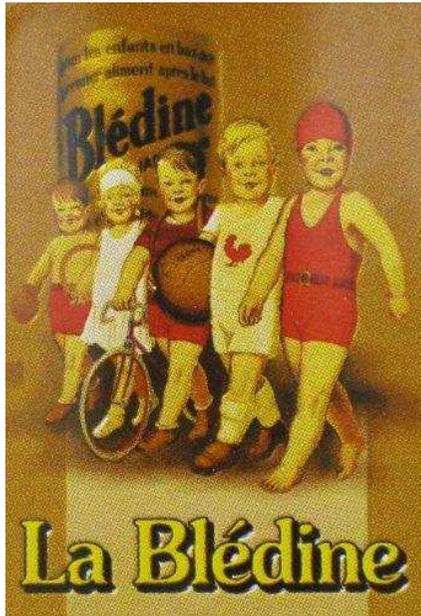
$$\text{Poids} = \text{Masse} * \text{Gravitation}$$

↳ **Le plongeur assimilera le poids à la masse, par soucis de simplicité, et continuera à parler de son poids en kg**



# Les unités de mesure

- **Température**



°C Celsius : l'eau congèle à 0°C et bout à 100°C

°F Fahrenheit : utile en voyage dans les pays anglo-saxons

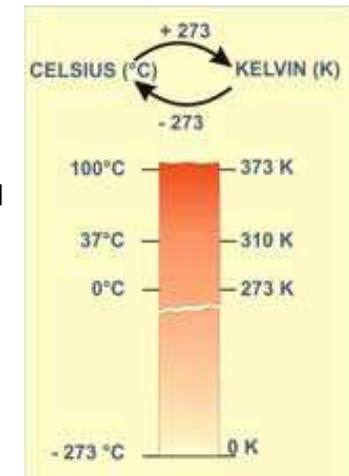
$$°F = 32 + 1,8 * °C \quad 30°C = 86°F$$

k kelvin – **Température absolue**

$$k = °C + 273,15 \quad 0k = -273,15°C = \text{zéro absolu}$$

$$°C = k - 273,15 \quad 0°C = 273,15k$$

$$30°C = 303,15k$$



↪ **Notion utilisée par le plongeur pour calculer les évolutions de pression en fonction des évolutions de température des gaz utilisés. Nous le verrons plus loin**  
**Nota : le plongeur arrondira 273,15 à 273 dans ses calculs**

## Les unités de mesure

- **Pression**

- La pression (P) est une force (F) appliquée sur une surface (S) :  $P = F/S$

Dans l'eau et l'air (et dans un fluide en général) la pression s'exerce sur toutes les faces d'un corps et de manière uniforme

Plusieurs unités de pression sont couramment utilisées :

atm	L'atmosphère
b	Le bar
mm Hg	Le millimètre de mercure
m eau	Le mètre d'eau



Le plongeur retiendra en simplifiant :  **$1b = 1\text{kg/cm}^2 = 760 \text{ mm Hg} = 76 \text{ cm Hg} = 1\text{atm} = 10\text{m eau}$**

## Pression et profondeur

La **pression atmosphérique** (poids de l'air) est d'environ 1bar à la surface de la mer

$P_{atm} = 760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ b}$  Chaque  $\text{cm}^2$  de notre peau supporte 1 kg

La **pression hydrostatique** (pression relative due au poids de l'eau) augmente avec la profondeur de 1b tous les 10 m du fait de l'augmentation de la masse d'eau au-dessus du plongeur

↪ **Pression absolue = pression atmosphérique + pression hydrostatique**



*Sans compter les petites bêtes...*

Pabs. 10 m = 1b P hydrostatique + 1b P atmosphérique = 2 b

Pabs. 20 m = 2b hydrostatique + 1b P atmosphérique = 3 b

Pabs. 30 m = 3b hydrostatique + P atmosphérique = 4 b

La pression augmente de 100% de 0 à 10m, de 33% de 20 à 40m

↪ **Les différences de pression sont plus importantes près de la surface**

**Zone de risque maximum pour le plongeur : stabilité, vitesse de remontée, accidents barotraumatiques, ADD etc**



## Pression et diurèse d'immersion

Sous l'effet de la pression ambiante, le sang reflue des membres vers le tronc, augmentant la pression sanguine. Cette augmentation de pression sanguine est détectée par l'organisme et déclenche une régulation par transfert d'eau contenue dans le sang vers les reins et la vessie

- Le plongeur ressent l'envie d'uriner, on parle de diurèse d'immersion, qui augmente avec la profondeur et la durée de plongée
- Elle se combine à un autre phénomène : le froid, qui génère également un reflux sanguin vers les organes nobles, cœur et cerveau

↳ Conseiller aux plongeurs débutants d'uriner avant la plongée

☝ **La densité plus importante du sang en fin de plongée est un facteur favorisant de l'ADD, d'où l'importance de boire après la plongée**

Les français ont bu moins de bière l'an dernier...



## Pression et compressibilité des gaz

- ☞ Nous avons vu que les solides et les liquides sont pratiquement incompressibles. Les gaz par contre le sont
- ☞ Nous avons vu que l'eau exerce une pression hydrostatique, augmentant avec la profondeur. En plongeant, l'eau va pouvoir comprimer les gaz

- **Loi de Boyle-Mariotte**

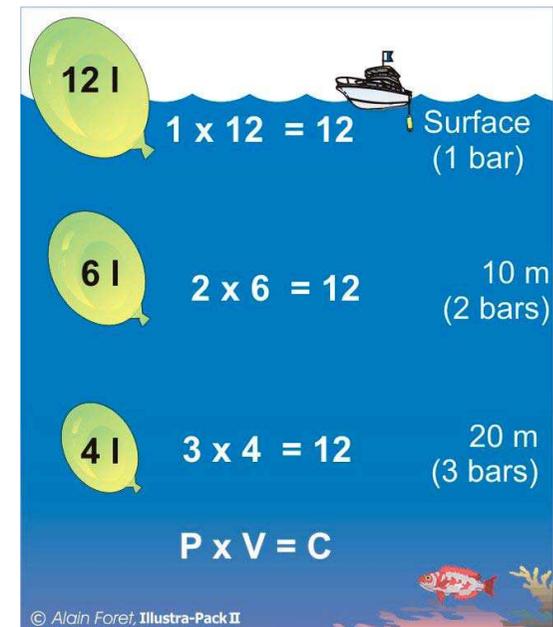
A température constante, le volume V d'un gaz est inversement proportionnel à la pression P qu'il subit  **$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = \text{constante}$**

**En plongeant, les gaz se compriment à la descente et se dilatent à la remontée**

**Un ballon de 10 l d'air en surface aura à 30m un volume de :**

$$P_1 = 1 \text{ bar} \quad V_1 = 10 \text{ l} \quad P_2 = 4 \text{ bars} \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_2} = \frac{1 \text{ bar} \cdot 10 \text{ l}}{4 \text{ bars}} = 2,5 \text{ l}$$



## Pression et compressibilité des gaz – L'autonomie

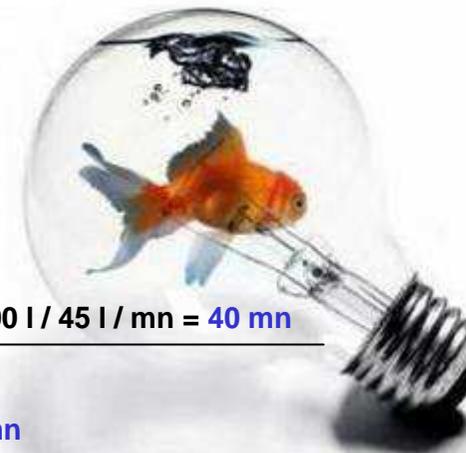
En tant que guide de palanquée, vous devez être capable de calculer l'**autonomie en gaz** de votre palanquée

Vous partez avec des blocs de 12 l gonflés à 200b, et prévoyez de remonter avec 50b

Volume de départ :  $12 \text{ l} * 200\text{b} = 2\,400 \text{ l}$

Volume de réserve :  $12 \text{ l} * 50\text{b} = 600 \text{ l}$

Volume utile :  $12 \text{ l} * (200\text{b} - 50\text{b}) = 1\,800 \text{ l}$



- Autonomie à 20m pour un plongeur consommant 15l/mn en surface ?

Consommation à 20 m :  $15 \text{ l / mn} * 3\text{b} / 1\text{b} = 45 \text{ l / mn}$

Autonomie à 20m :  $1\,800 \text{ l} / 45 \text{ l / mn} = 40 \text{ mn}$

- Le plongeur est stressé. Il ne contrôle plus sa respiration et passe à 30 l/mn

Consommation à 20 m : 90 l / mn

Autonomie à 20m: 20 mn

- Autonomie à 40 m ?

Consommation à 40 m :  $30 \text{ l / mn} * 5\text{b} = 150 \text{ l / mn}$

Autonomie à 40m : 12 mn

- Il s'essouffle et consomme l'équivalent de 80 l / mn en surface, toujours à 40 m

Consommation à 40 m :  $80 \text{ l / mn} * 5\text{b} = 400 \text{ l / mn}$

Autonomie à 40m : 4,5 mn

- Son détendeur givre à 40m (600 l / mn)

Autonomie à 40 m :  $1\,800 \text{ l} / 500\text{l} = 3\text{mn}$

## Pression et compressibilité des gaz – L'autonomie

Vous verrez plus en détail la gestion d'une palanquée, mais on peut déjà retenir quelques éléments de bon sens...



- **Une plongée se planifie** : profondeur, durée, temps de décompression (remontée + paliers), gestion de l'air
- **On adapte son matériel** aux conditions de plongée (détendeurs compensés, anti-givrage, 2 premiers étages...)
- **On prévoit la sécurité** (bloc de secours, blocs de décompression)
- **Le guide rappelle les consignes**, les signes. En plongée il contrôle la ventilation (lâcher de bulles), contrôle la consommation et l'autonomie
- **Le guide évite les efforts inutiles** (courant, distance, palmage)

...

# Pression et compressibilité des gaz - Incidence sur la densité du gaz respiré



Nous avons abordé la notion de masse volumique. A la descente, le gaz est comprimé, sa masse volumique va donc augmenter.

Nous avons vu que la masse volumique de l'air est ~ de 1,3 g/l, le tableau suivant montre son évolution avec la profondeur :

Profondeur	Pression abs.	Contenance pulmonaire en équivalent surface	Poids volumique en g	Masse volumique en g/l
Surface	1b	6	7,8	$7,8 / 6 = 1,3$
10m	2b	12	15,6	$15,6 / 6 = 2,6$
30m	4b	24	31,2	$31,2 / 6 = 5,2$
70m	8b	48	62,4	$62,4 / 6 = 10,4$

Masse volumique de l'air en g/l à 1b : 1,3

En conséquences

- La consommation de gaz augmente avec la pression, donc la profondeur, réduisant l'autonomie. Pour le même volume, les poumons contiennent une masse d'air plus importante
- La densité de gaz respiré augmente avec la pression, donc la profondeur. L'air est plus « consistant », demandant un effort musculaire supplémentaire à l'inspiration et à l'expiration (lié également à la résistance matérielle du détendeur et à la compression de la combi.)

👉 **Il y a nécessité absolue d'adapter sa respiration en fonction de la profondeur, vous verrez plus en détail ces points à l'occasion de l'étude de l'essoufflement**

# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



- Nous sommes donc soumis à l'attraction de la Terre, force orientée du haut vers le bas fonction de notre masse et de la gravité. Nous parlerons de notre **poids réel**
- Un plongeur est également soumis à la **Poussée d'Archimède** : force orientée du bas vers le haut égale au poids du volume d'eau déplacé par le plongeur

« Tout corps plongé dans un liquide reçoit de la part de celui-ci une poussée verticale dirigée de bas en haut, égale au poids du volume du liquide déplacé »

- En conséquence, le plongeur a dans l'eau un **poids apparent = poids réel – poussée d'Archimède**

Un plongeur équipé pesant 90 kg à terre  
La poussée d'Archimède dans l'eau douce  
dans l'eau de mer



a un volume de 90 dm<sup>3</sup>  
sera de 90dm<sup>3</sup> \* 1kg/dm<sup>3</sup> = 90 kg  
90dm<sup>3</sup> \* 1,03 kg/dm<sup>3</sup> = 92,7 kg

Son poids apparent sera de 90 – 92,7 = - 2,7 kg Il flotte et devra ajouter 3 kg de **lest**

- On parle de **Flottabilité**
  - Positive (poids apparent < 0): combinaison, bouée, bouteille alu vide...
  - Négative (poids apparent > 0): bouteille acier, détendeur, couteau...

# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



- Le plongeur recherche à toute profondeur une flottabilité neutre (poids apparent = 0), on dit qu'il est équilibré
- **le bon lestage correspond à une flottabilité neutre en fin de plongée pour le palier à 3 m avec 50b de pression dans la bouteille**

**👉 Gilet vide, sans palmer, légère expiration : les yeux arrivent à la surface. A vérifier systématiquement avec la palanquée avant l'immersion**

- Paramètres de flottabilité du plongeur

Invariants : détendeur, combinaison lycra...

Variants : combinaison Néoprène (épaisseur, couches, qualité), étanche (+/- gonflée)

Gaz comprimé (1,29 g / l), selon la pression dans la bouteille

Densité de l'eau

Ventilation +/- 3 l selon que l'on respire poumons pleins ou vides

Bouteille (acier, aluminium, volume, fabrication, forme)

Profondeur (poids apparent)



# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



- Exemples de variations de flottabilité



Volume d'un **shorty** monopièce 4 mm = 4 l

Volume d'un **deux pièces** 7 mm = 7 l

↪ Ecart de lestage de 3 kg en eau douce, sans tenir compte des poids respectifs



Ecart de poids des **blocs de plongée** : 12 l acier 2 kg    15 l acier 3,5 kg    alu – 2 kg

Un bloc de 15l gonflé d'air à **200b** pèse  $15 \times 200 \times 1,29 = 3870$  g (densité de l'air ~ 1,29)

Au palier de 3m, le même bloc pèsera à **50b**  $15 \times 50 \times 1,29 = 967$  g

Soit 2,9 kg d'air en moins qu'en début de plongée



2 kg de lest en moins en moyenne entre Niolon et Chamagnieu (**densité de l'eau**)

↪ **Vous plongez avec une palanquée de débutants et oubliez de vérifier leur lestage avant immersion, ils ont toutes les chances de ne pas tenir leur palier ou de s'essouffler au fond...**

↪ **Et s'ils empruntent ou louent leur équipement sur place !...**

# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



- Le Néoprène

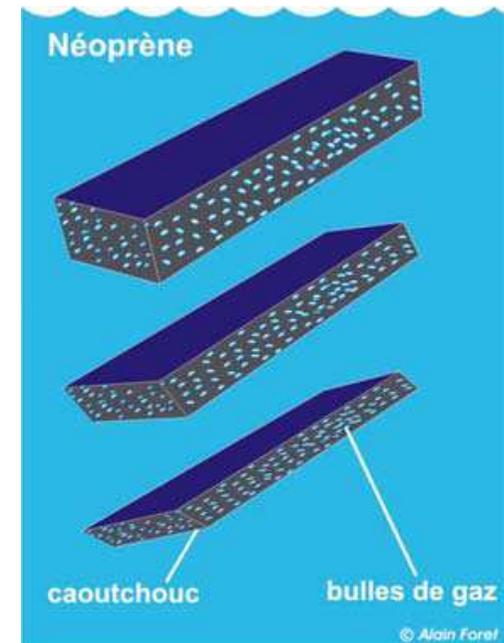
**Le Néoprène contient des bulles de gaz qui contribuent à l'isolation thermique du vêtement**

**A la descente, ces bulles prisonnières sont comprimées par l'augmentation de la pression ambiante, leur volume diminue, la poussée d'Archimède diminue**

**Le poids apparent du plongeur augmente et sa flottabilité diminue : il descend de plus en plus rapidement, nécessitant de compenser par les poumons ballast, puis le gilet stabilisateur**

**A la remontée le phénomène inverse nécessite de s'équilibrer au fur et à mesure par le vidage du gilet stabilisateur pour gérer la vitesse de remontée et maintenir les paliers**

**Une combinaison Néoprène est par conséquent moins isolante et moins « flottante » avec la profondeur, son épaisseur diminuant**



↳ **C'est l'une des principales raisons de l'utilisation du gilet pendant la plongée**

# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



Paramètres d'ajustement de flottabilité

- Lest, pour compenser une flottabilité positive
- Gilet stabilisateur

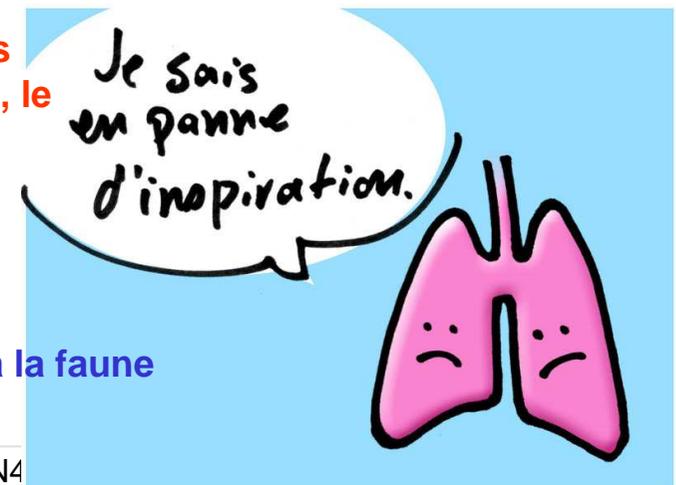


- Compensation du poids du bloc, des accessoires, du lestage à la descente et au fond du fait de l'écrasement de la combinaison
- Maintien en surface à l'immersion et au retour
- ☞ Attention au volume des gilets, importance accrue pour le guide de palanquée, qui doit être en mesure de remonter un équipier
- ☞ Attention à la profondeur, qui nécessite des volumes plus importants

☞ **Poumons ballast : le poumon ballast est l'une des toutes premières techniques à enseigner : une fois équilibré à une profondeur donnée, le plongeur évolue au poumon ballast**

Le poumon ballast permet de compenser des erreurs de manipulation du gilet à la remontée (remontée rapide ou redescente)

Il permet d'éviter de soulever les sédiments et de toucher à la faune et à la flore fixées

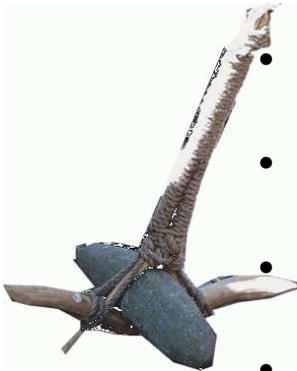


# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



- Les risques liés à un défaut de flottabilité

- Sur-lestage



- **Risque de couler** : gonfler légèrement les gilets avant de sauter, vérifier la flottabilité en surface, être soi-même équilibré, prêt à intervenir, contrôler la ventilation...
- **Gilet plus gonflé** = résistance au déplacement et prise au courant : fatigue, crampe, essoufflement, consommation, réduction d'autonomie...
- **Gilet plus utilisé** = consommation d'air plus importante, autonomie réduite, risque de panne d'air...
- **Au fond position diagonale** = plus de palmage  $\Rightarrow$  fatigue, crampe, essoufflement, consommation, réduction d'autonomie...
- **Narcole et ADD favorisés**

 **Attention à la profondeur plancher**

 **Attention à la pleine eau et au courant au fond et en surface**

- Sous-lestage

- **Non respect de la vitesse de remontée**, avec le risque de surpression pulmonaire et d'ADD
- **Non maintien des paliers**, avec le risque d'ADD induit
-  **Respirer « poumons vides »**



# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



- Conseils au guide de palanquée
  - 👉 Savoir évaluer et conseiller la palanquée sur le bon lestage : les débutants empruntent du matériel qu'ils ne connaissent pas (bloc, combinaison,...)
  - 👉 Prévoir du lest supplémentaire (plomb(s) pédagogique(s))
  - 👉 Toujours rappeler l'importance de l'expiration en plongée
  - 👉 S'immerger en premier et se tenir prêt à intervenir (équilibré, masque sur le visage, détendeur en bouche) à la mise à l'eau de la palanquée
  - 👉 Faire légèrement gonfler les gilets avant la mise à l'eau
  - 👉 Contrôler la flottabilité en surface
  - 👉 Privilégier la technique d'immersion et de ventilation au sur-lestage (phoque, canard)
  - 👉 Proposer un support (bout, mouillage,...) pour les phases de descente et de remontée pour les débutants

# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



- Conseils au guide de palanquée (suite)

- ☞ Etre vigilant lors de variations de profondeur

- ☞ les différences de pression sont les plus importantes de 0 à 10 m, c'est la zone de risques la plus importante, notamment pour les plongeurs débutants

- Un bon équilibre permet :

- Le confort
  - La visibilité (position allongée)
  - Un effort de palmage minimum limitant les risques de crampes, essoufflement, surconsommation, autonomie réduite, panne d'air, surpression pulmonaire, ADD, stress, panique...
  - Le respect du fond : faune et flore fixées
  - La sécurité : ne pas réduire la visibilité en soulevant sédiments et sable
  - Le respect des paliers
  - ...

# Pression et Compressibilité des gaz - Flottabilité & équilibre



- **L'immersion**

Nous avons vu que l'immersion n'est pas naturelle pour le plongeur : son lestage est réglé de façon à ce qu'il soit équilibré à 3 m avec 50b de pression. En surface il est donc en flottabilité négative : il flotte

Ceci nécessite la maîtrise d'une technique d'immersion, qui fait souvent défaut chez les plongeurs débutants et que le guide de palanquée doit savoir corriger

## Le Phoque

Basée sur le principe d'Archimède. Le fait d'expirer rapidement une grande quantité d'air et de rester en apnée expiratoire diminue le volume de la cage thoracique, donc la Poussée d'Archimède. La flottabilité diminue et aide le plongeur à s'immerger



☞ Défauts principaux du débutant : expiration insuffisante ou trop lente, apnée trop courte

## Le canard



Toujours basé sur le principe d'Archimède. Le plongeur, en levant subitement les jambes à la verticale, diminue son volume immergé, donc la Poussée d'Archimède. La flottabilité diminue...

☞ Défauts principaux du débutant : Jambes non à la verticale, geste lent

☞ Attention à la nuque, qui peut être touchée par la robinetterie, et au déséquilibre lié à un gilet insuffisamment serré

## Pression et Compressibilité des gaz – Le gonflage

- La propriété de compressibilité des gaz est largement utilisée en plongée pour le gonflage sous pression des blocs tampons (stockage de gaz comprimé) et des blocs de plongée

Vous aurez l'occasion d'étudier en détail le compresseur, les différents types de blocs utilisés en plongée et les techniques de gonflage et d'équilibrage



## Pression et Compressibilité des gaz – Le parachute

- Une autre utilisation de la compressibilité des gaz par le plongeur est la technique du **parachute de palier**, qui permet de se signaler en surface

Le principe est basé sur le fait qu'une quantité d'air insufflée à une profondeur donnée va se dilater à la remontée, avec la baisse de pression ambiante ( $P \cdot V = \text{Constante}$ ). Le parachute arrive gonflé en surface et se maintient en position droite, permettant au plongeur de signaler sa position, notamment pendant la durée des paliers et jusqu'à l'arrivée du bateau

- **Parachute de relevage**

Ce sont des parachutes de volumes beaucoup plus importants qui permettent de remonter des objets immergés (ancres, archéologie...) : en remontant, la pression ambiante diminue, le gaz se dilate, le volume du parachute augmente, la poussée d'Archimède augmente, le poids apparent de l'ensemble diminue et sa flottabilité augmente, l'objet remonte en accélérant

☞ **A utiliser avec précautions : contrôle d'autonomie en air, jamais seul, ne pas rester sur la trajectoire, gonfler progressivement pour décoller l'objet**

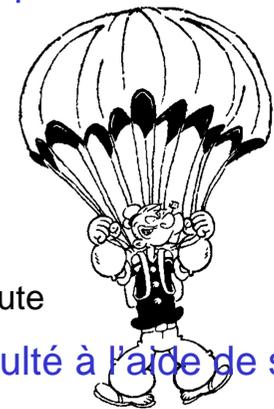
Vous voulez remonter une ancre de 40 kg posée à 30 m de fond en lac (densité eau 1)

$P \text{ absolue} = 4b$       Volume nécessaire pour compenser les 40 kg : 40 l

Volume d'air nécessaire pour gonfler un parachute de 40 l à 30 m :  $40 \text{ l} \cdot 4b = 160 \text{ l}$

Soit  $160 \text{ l} / 15 \text{ l} \sim 11b$  de pression sur un bloc de 15 l pour le seul gonflage du parachute

**Le plongeur exploite le même phénomène pour remonter un équipier en difficulté à l'aide de son gilet stabilisateur**



# Pression et Compressibilité des gaz

## Accident De Décompression (ADD)



L'azote n'est ni fabriqué ni consommé par l'organisme. Il est stocké dans le corps

**A la descente**, la pression absolue augmente, les gaz sont compressés et diminuent de volume. Le plongeur inspire du gaz délivré par le détendeur à la pression ambiante. **Sous l'effet de la pression, l'azote va se concentrer dans le corps.** A l'atteinte d'un seuil de pression donné, l'azote perd sa phase gazeuse et se dissout dans les liquides. Il est **absorbé par les tissus**

**A la remontée**, la pression absolue diminue, au retour du seuil de pression, **l'azote dissous retrouve sa forme gazeuse sous forme de micro-bulles**, évacuées par transfert vers la circulation sanguine, puis vers les poumons (expiration)

La pression continue de diminuer, **si la remontée est trop rapide, les micro-bulles** non évacuées, toujours plus nombreuses, prennent du volume et **peuvent s'agréger**

Dans les cas extrêmes, le corps réagit par agrégation d'anticorps (plaquettes) autour des bulles, qui vont-elles-mêmes s'agréger

**La circulation sanguine est altérée voire stoppée** au niveau des artères et/ou veines. **C'est l'embolie.** Les tissus en aval ne sont plus oxygénés

- C'est L'**Accident De Décompression** qui peut générer de nombreuses conséquences (oreille, système nerveux, poumons, os, articulations,...) temporaires ou définitives pour le plongeur

**Vous aurez l'occasion d'étudier plus en détail les accidents liés à la pratique de la plongée**

## Pression et Compressibilité des gaz - Barotraumatismes

- Traumatismes liés aux évolutions de la pression ambiante sur les gaz contenus dans le corps du plongeur

### –Sinus bouchés par des mucosités (rhume)

- L'augmentation de pression ambiante à la descente comprime l'air bloqué dans les sinus, provoquant une dépression et un décollement des muqueuses

- La diminution de pression ambiante à la remontée crée une augmentation du volume de gaz bloqué dans les sinus, provoquant une compression des muqueuses

### –Oreilles



- A la descente l'augmentation de pression ambiante comprime le tympan et l'air contenu dans l'oreille moyenne, déformant le tympan vers l'intérieur. Un mauvais équilibre compensant insuffisamment ce déséquilibre des pressions provoque un risque de lésion du tympan (congestion, otite, perforation, ...)

- Phénomène inverse à la remontée. En cas d'obturation de la Trompe d'Eustache, le déséquilibre entre la pression externe et la pression de l'oreille moyenne déforme le tympan vers l'extérieur

# Pression et Compressibilité des gaz - Barotraumatismes

## – Placage de masque

- L'augmentation de pression ambiante à la descente comprime l'air bloqué dans le masque, créant une dépression (effet ventouse) qui peut décoller la rétine

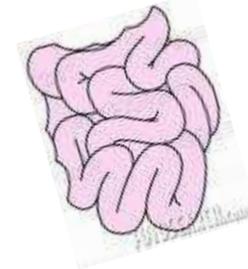


## –Dents

- Une bulle d'air peut entrer dans le trou d'une dent mal soignée (carie) et y rester prisonnière. Au moment de la remontée la diminution de pression ambiante dilate cette bulle et peut faire éclater la dent

## –Estomac et intestins

- Au moment de la remontée la diminution de pression ambiante dilate les gaz et provoque des flatulences



## – Poumons

- Au moment de la remontée la diminution de pression ambiante dilate le gaz contenu dans les poumons. Une apnée à la remontée provoque **l'accident de plongée le plus grave : la surpression pulmonaire** : le gaz prisonnier augmente de volume, provoquant une pression dans les poumons supérieure à celle que peuvent supporter les alvéoles pulmonaires. Elles se rompent, c'est l'insuffisance pulmonaire

**Toujours respirer ou expirer à la remontée !**

# Pression partielle des gaz (Pp)

- **Loi de Dalton**

- La pression totale d'un mélange gazeux se répartit en proportion de chacun des gaz qui le composent

- **$P \text{ totale mélange} = Pp \text{ gaz } 1 + Pp \text{ gaz } 2 + \dots$**

–La pression exercée par chacun de ces gaz au sein du mélange gazeux s'appelle la pression partielle

- **$Pp \text{ gaz} = P \text{ abs.} * \% \text{ gaz}$**



L'air respiré à la surface de la mer est composé de :	21% d'O <sub>2</sub>	$Pp \text{ O}_2 = 1b * 0,21 = 0,21b$
	79% de N <sub>2</sub>	$Pp \text{ N}_2 = 1b * 0,79 = 0,79b$

Le même air délivré par le détendeur à 30m est constitué de :	21% d'O <sub>2</sub>	$Pp \text{ O}_2 = 4b * 0,21 = 0,84b$
	79% de N <sub>2</sub>	$Pp \text{ N}_2 = 4b * 0,79 = 3,16b$

**Cette augmentation de la pression partielle des gaz respirés en plongée a des effets directs sur le plongeur, sur les incidents et accidents en plongée, et sur les limites à connaître dans la pratique**

## Pression partielle des gaz – Incidence sur les gaz respirés en plongée

Le plongeur inspire un mélange gazeux (air, Nitrox, Trimix...) sur un détendeur qui le délivre à la pression ambiante, qui augmente avec la profondeur

Chacun des gaz qui composent le mélange respiré va réagir différemment en fonction de la pression qu'il va subir, pouvant notamment devenir toxique pour l'organisme

On parlera de **seuils de toxicité**

- **Azote**

- **Effets narcotiques pour une  $PpN_2 \geq 3,2b$**

Soit à partir de 30m, systématiques à partir de 40 m, **incontrôlables à partir de 60 m**

Troubles de la concentration et du raisonnement : on parle de **narcose**

- **Seuil de la narcose :  $PpN_2 < \text{ou} = 5,6 b$  : limitation à 60 m pour la plongée à l'air**



↪ **Trimix** : mélange gazeux fabriqué dans lequel on remplace tout ou partie de l'azote de l'air par de l'hélium



- ☑ L'hélium étant 100 fois moins narcotique que l'azote, il permet de repousser les limites de la narcose

**Limitation à 70 m de la plongée au Trimix normoxique (taux normal d'O<sub>2</sub>)**

**Limitation à 120 m de la plongée au Trimix hypoxique (raréfié en O<sub>2</sub>)**

# Pression partielle des gaz – Incidence sur les gaz respirés en plongée



- **Oxygène - Hyperoxie**

- **Toxique pour les cellules nerveuses (neurotoxicité, on parle d'effet Paul Bert)** et les cellules des poumons (surfactant) au-delà d'un seuil de tolérance correspondant à une **Pp O2 > 1,6 b. On parle d'hyperoxie**
- **Limite atteinte à 66 m en plongée à l'air**, ce qui ne peut arriver à un plongeur à l'air puisque la limite légale est de 60 m

- ↪ **Nitrox : gaz enrichi en O2** et appauvri en N2

- Accessible dès le niveau 1
- Utilisé pour réduire le risque d'ADD et diminuer la fatigue en fin de plongée
- **Palier à l'oxygène pur** : utilisé au palier pour réduire le temps de décompression. **Limite d'utilisation : 6 m (1,6b et 100% O2)**  
**Risque d'hyperoxie si le plancher de 6 m n'est pas respecté en cours de palier**



**La proportion d'O2 dans le Nitrox impose une profondeur plancher à ne pas dépasser**

# Pression partielle des gaz – Incidence sur les gaz respirés en plongée

Le Nitrox se qualifie par 2 nombres : 32/68 pour un Nitrox composé de 32% d'O<sub>2</sub> et 68% de N<sub>2</sub>

- Profondeur plancher pour un Nitrox 32/38 ?

$$PpO_2 \text{ max} = 1,6b$$

$$Pp \text{ gaz} = P \text{ absolue} * \% \text{ gaz}$$

$$P \text{ absolue} = 1,6b / 0,32 = 5b, \text{ soit } 40m$$

$$\% O_2 = 32\%$$

$$1,6b = P \text{ absolue} * 0,32$$



- Mélange Nitrox à utiliser pour une profondeur plancher de 30m ?

$$P \text{ absolue} = 4b$$

$$1,6b = 4b * \% O_2$$

$$\% O_2 = 1,6b / 4b = 0,4, \text{ soit un Nitrox } 40/60$$

- Profondeur équivalente / plongée à l'air pour un Nitrox 40/60 à 30m, à calculer en prenant en considération l'azote (ici 60% N<sub>2</sub>) ?

$$Pp N_2 = P \text{ absolue} * \% N_2 = 4b * 0,6 = 2,4b$$

A l'air (79 % N<sub>2</sub>), pour la même Pp N<sub>2</sub>, nous aurions :

$$2,4b = P \text{ absolue} * 0,79$$

$$P \text{ absolue Air} = 2,4b / 0,79 = 3,04b, \text{ soit } 21m$$

↳ Une plongée au Nitrox 40/60 à 30m équivaut à une plongée à l'air à 21m, par rapport au risque de narcose



**Formations Nitrox Élémentaire et Avancé, et Trimix normoxique dans le cadre des sorties de la Commission Technique du Rhône à Fréjus**



## Pression partielle des gaz – Incidence sur les gaz respirés en plongée

- **Oxygène - Hypoxie**

**Une  $PpO_2 < 0,21b$  peut mener à l'essoufflement, puis si le phénomène s'amplifie à la perte de connaissance et à la mort**

**En plongée, la  $Pp O_2$  minimale tolérée du mélange gazeux inspiré est fixée à  $0,16b$**

Le plongeur peut rencontrer l'hypoxie en apnée, en plongée au Trimix et dans l'utilisation du recycleur :

### **Apnée**

L'apnéiste est particulièrement soumis au risque d'hypoxie avec noyade. Risque lié à l'**hyperventilation (aujourd'hui interdite)**, qui permet de diminuer anormalement la  $Pp$  de  $CO_2$

L'organisme ne provoque pas l'envie de respirer sur un taux anormalement bas d' $O_2$ , mais sur un taux anormalement haut de  $CO_2$ . Le fait de reculer l'atteinte de ce seuil de  $CO_2$  amène l'hypoxie avant qu'il soit atteint. C'est la syncope

### **Trimix**

En plongée au Trimix hypoxique, le mélange est appauvri en  $O_2$  et ne peut être utilisé qu'à partir d'une profondeur plancher à partir de laquelle la pression ambiante ramène la  $Pp O_2 \geq 0,16b$

Dans ce type de plongée, **une erreur de protocole peut soumettre le plongeur à l'hypoxie**

# Pression partielle des gaz – Incidence sur les gaz respirés en plongée



## Recycleur

Un recycleur est un appareil respiratoire de plongée qui permet de faire circuler les gaz dans un circuit en boucle. Le plongeur expire et inspire dans ce circuit. De l'oxygène est ajouté au circuit pour remplacer l'oxygène consommé par le plongeur, alors que le gaz carbonique est absorbé par un composé chimique

**Recycleur à circuit fermé : fabrication du mélange en temps réel pilotée par ordinateur (N3 et +)**

**Recycleur à circuit semi-fermé : mélange pré-fabriqués (à partir du N1)**

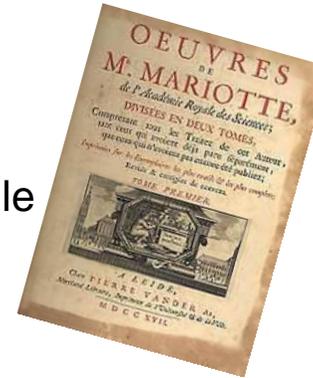
**Une panne ou une erreur humaine sur ce type d'appareil pour soumettre le plongeur à un défaut d'O<sub>2</sub>**

**Ce type d'appareil nécessite une formation adaptée et une rigueur d'utilisation totale**



## Influence de la température sur les gaz

Boyle-Mariotte nous qui dit qu'à température constante, le volume V d'un gaz est inversement proportionnel à la pression P qu'il subit :  $P * V = \text{Constante}$



- Si l'on souhaite prendre en compte la variabilité de température, cette formule devient :

$$\frac{P1 * V1}{T1} = \frac{P2 * V2}{T2} = \text{Constante}$$

Cette propriété des gaz intéresse le plongeur, dans la mesure où le gonflage des blocs peut augmenter la température du mélange compressé de plusieurs dizaines de °C

Qui n'a pas constaté 200b en sortie de gonflage ou dans une bouteille exposée en plein soleil, pour se retrouver avec un bloc à 180b une fois arrivé dans l'eau ?

Il s'agit simplement du cas particulier où le volume (celui du bloc en l'occurrence) est invariable

La formule devient  $\frac{P1}{T1} = \frac{P2}{T2} = \text{Constante}$ , on parle de loi de Charles où T = Température en k

**Vous verrez dans votre cursus qu'il est possible de perdre 20b et plus suite au refroidissement d'un bloc, phénomène à prendre en compte dans le calcul d'autonomie et la planification de la plongée, et qui prend toute son ampleur dans les plongées profondes et/ou en eau froide. En lac, par exemple**

# Influence de la température sur les gaz



Jacques Alexandre César Charles



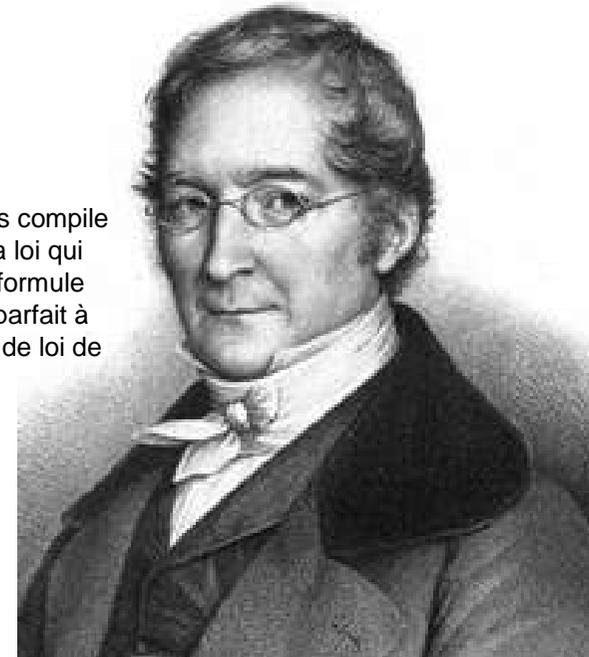
Physicien, chimiste et inventeur français. Il fut le premier à faire voler un ballon à gaz gonflé à l'hydrogène

En 1787, il est le premier à formuler la « loi de la dilatation des gaz »

Le chimiste Louis-Joseph Gay-Lussac les compile et les compare aux siens pour formuler la loi qui porte son nom, la loi de Gay-Lussac. La formule reliant pression et température d'un gaz parfait à volume constant porte par contre le nom de loi de Charles

<b>Naissance</b>	12 novembre 1746 Beaugency (Orléanais, actuel Loiret)
<b>Décès</b>	7 avril 1823 Paris (75)
<b>Nationalité</b>	 <b>France</b>
<b>Institution</b>	Nommé à l'Académie des sciences membre résidant de la 1re Classe de l'Institut national des sciences et arts dans la section de physique expérimentale par arrêté du Directoire exécutif le 29 brumaire an IV (20 novembre 1795)

Louis Joseph Gay-Lussac



<b>Naissance</b>	6 décembre 1778 Saint-Léonard-de-Noblat (87)
<b>Décès</b>	9 mai 1850 (à 71 ans) Paris (75)
<b>Nationalité</b>	 <b>France</b>
<b>Institution</b>	Ecole polytechnique, Faculté des sciences de Paris, Muséum d'histoire naturelle



## Influence de la température sur les gaz

Dans un bloc, le gaz étant prisonnier, son volume est constant. Si la température augmente, la pression augmente; si la température diminue, la pression diminue

Un bloc vient d'être gonflé à **200b**, l'air est à **50°C**

Lorsqu'il sera revenu à température ambiante sur le bateau, soit **20°C**, sa pression sera de :

$$50^{\circ}\text{C} = 50 + 273 = 323\text{K}$$

$$20^{\circ}\text{C} = 20 + 273 = 293\text{K}$$

$$\frac{200\text{b}}{323\text{K}} = \frac{P_2}{293\text{K}}$$

$$P_2 = \frac{200\text{b} * 293\text{K}}{323\text{K}} \sim 181\text{b}$$

A l'immersion la température de l'eau est de **14°C** (287K), la pression passe à :

$$P_2 = \frac{200\text{b} * 287\text{K}}{323\text{K}} \sim 178\text{b}$$

Nous avons 22b de moins qu'en sortie de gonflage, soit 330 l pour un bloc de 15 l

Pour un plongeur consommant 15l/mn en surface, cela représente une consommation à 20m de 15 l/mn \* 3b = 45l/mn, soit une **perte d'autonomie** de 360l / 45l/mn = **7'30''**

- ↪ **Etre vigilant sur les pressions des blocs**
- ↪ **Attention à l'exposition au soleil**
- ↪ **Gonfler doucement, si possible via les tampons**
- ↪ **Vérifier systématiquement les pressions de la palanquée au fond**

