

# **Cours N4**

## **LA PLONGEE EN ALTITUDE**

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## SOMMAIRE

### Introduction

1. Rappels
  2. Mise en évidence & formules
  3. Les paliers
  4. Vitesse et durée de remontée
  5. Utilisation de profondimètres
  6. Les ordinateurs
  7. L'avion
  8. Conclusion
  9. Exercices
-

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## Introduction

En plongée, une de nos préoccupations est la désaturation en azote de notre corps, que nous contrôlons en utilisant les tables de plongée MN90.

L'utilisation de ces tables a été calculée sous certaines conditions :

- plongée à l'air
- 2 plongées par jour maxi
- vitesse de remontée entre 15 m/mn à 17 m/mn (jusqu'au 1er palier puis 6 m/mn)
- plongée au niveau de la mer,  $P_{atm} = 1b$
- 60 mètres maximum (si + de 60 mètres, une plongée par 24 heures)
- Bonne forme physique

Si notre plongée ne respecte pas ce protocole, la table MN90 n'est théoriquement plus utilisable :

- si je plonge à plus de 60 mètres,
- si je n'utilise pas de l'air (plongée aux mélanges),
- si je plonge en altitude (au delà de 300 m).

Est-ce que je peux encore utiliser ma table MN90 ? si oui, comment dois-je l'utiliser ?

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 1. Rappels

### 1.1 Les pressions

**Pression absolue = Pression atmosphérique + Pression hydrostatique**

- Pression atmosphérique :

- la pression atmosphérique diminue avec l'altitude puisque la hauteur de la colonne d'air entre le sol et le ciel diminue :

- + environ - 0.1 bar tous les 1000 mètres (1 l d'air pèse 1.293 g, soit en moyenne 100g/cm<sup>2</sup>/1000m due à la densité de l'air)

- + la formule qui permet de calculer la pression atmosphérique est :

$$P. \text{ atm} = 1 - \frac{\text{Altitude}}{10000} \quad (\text{jusqu'à 5000 mètres})$$

0 mètres : 1 bar ou 1000 mbars	1000 mètres : 898 mbars
2000 mètres : 795 mbars	3000 mètres : 701 mbars

- pression atmosphérique au niveau de la mer      1,013 bar = 1013 mbars = 760 mm Hg = 1013 hPa

En plongée, on arrondi  $P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$ .

Certains baromètres donne la pression en mm Hg ou en mbars. On passe de l'un à l'autre par une règle de trois.

Exemple : A 2000 mètres d'altitude, la pression atmosphérique vaut 578 mm de Hg.

Calcul de  $P_{\text{atm}}$  en bar :

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ bar} \Rightarrow 760 \text{ mm Hg} \\ x \text{ bar} \Rightarrow 578 \text{ mm Hg} \end{array} \right\} x = 1 * 578 / 760 = 0.76 \text{ bar}$$

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 1.1 Les pressions

- Pression hydrostatique :

La pression hydrostatique ne dépend que de la colonne d'eau entre le plongeur et la surface, pas de l'altitude du lieu de plongée.

Deux paramètres influencent la P hydrostatique : la profondeur et la densité de l'eau.

Rappel de la formule :

$$P \text{ hydrostatique} = \frac{\text{Profondeur}}{10} * \text{Densité}$$

Dans une eau de densité 1, la pression hydrostatique augmente de 1 bar tous les 10 mètres.

- Pression absolue :

$$P \text{ absolue} = P \text{ atmosphérique} + \left( \frac{\text{Profondeur}}{10} * \text{Densité} \right)$$

## 1.2 Rappels des autres éléments de physique

Rappel des pressions partielles :  $P_p = P_{abs} * \text{Concentration du gaz}$  (loi de Dalton)

Saturation – Désaturation – Sous-saturation – Sursaturation (loi de Henry)

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 1.3 Evolution des Pabs à la mer et en lac

Profondeur	P abs mer	P abs lac 5000 m
surface	1	0,5
- 5 m	1,5	1
- 10 m	2	1,5
- 15 m	2,5	2
- 20 m	3	2,5
- 25 m	3,5	3

La Pabs aura triplé en lac (à 5000m) alors qu'elle n'aura que doublé en mer pour 10 m de prof !

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 2. Mise en évidence

### 2.1 Effet sur l'organisme

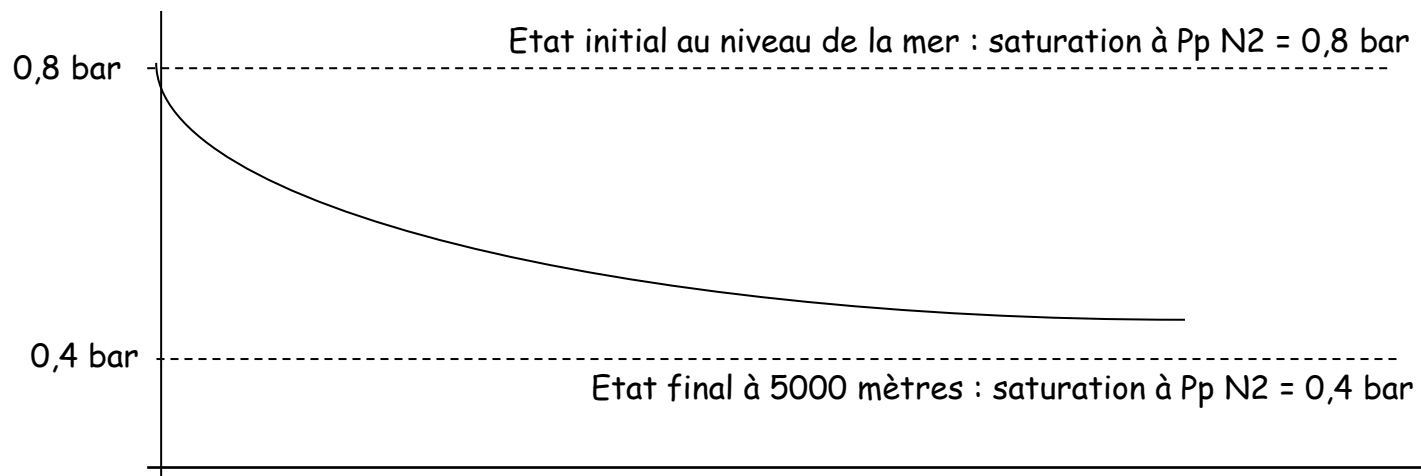
Quel est le paramètre qui va changer lorsque je ne plonge plus au niveau de la mer ?

**La pression atmosphérique va diminuer.** La composition de l'air reste inchangée avec 80% N<sub>2</sub>

Au niveau de la mer, mon organisme est à la saturation en azote avec  $P_{pN_2} = 0,8$  bar.

Avec l'altitude, la pression atmosphérique qui diminue va entraîner une diminution de la pression partielle d'azote. Ainsi, à 5000 mètres où la  $P_{atm.} = 0,5$  bar, la pression partielle d'azote sera de  $P_{pN_2} = 80\% * 0,5 = 0,4$  bar.

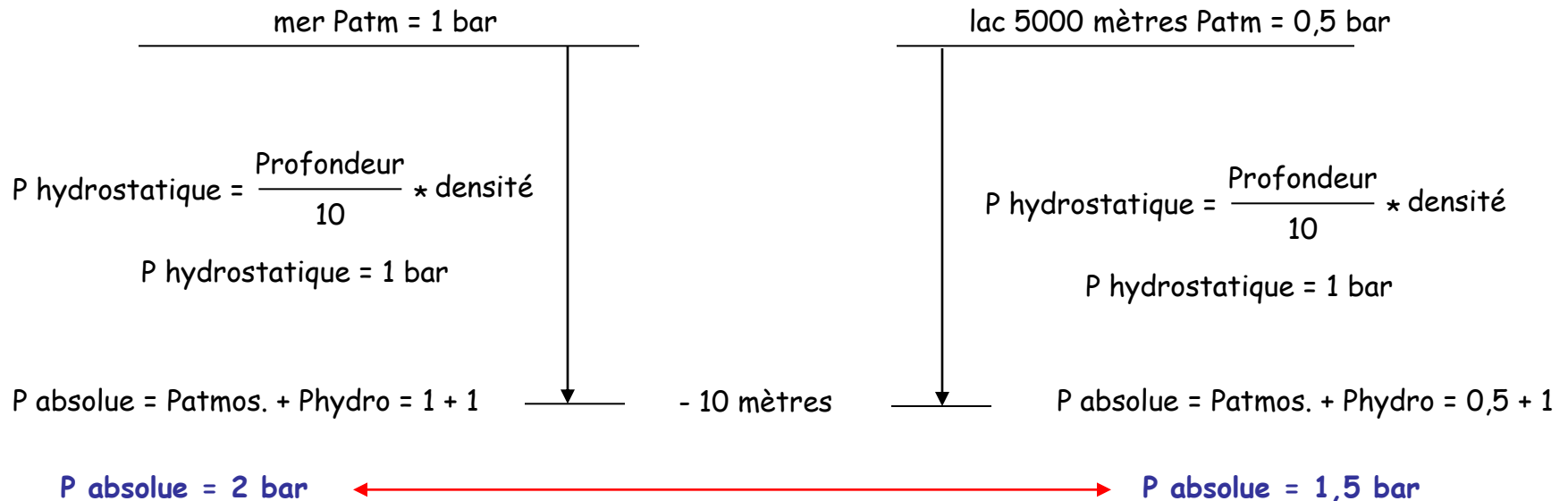
Mon organisme en arrivant à 5000 m se trouve donc en état de sur-saturation. Il faudra attendre un certain temps avant de retrouver un nouvel état d'équilibre. La  $P_{pN_2}$  passera de 0,8 b → 0,4 b.



# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 2.2 La plongée

Prenons l'exemple d'une plongée à 5000 mètres d'altitude : la pression atmosphérique est de 0,5 bar, notre plongée se déroule à 10 mètres de profondeur.



$$P_p \text{ N}_2 = 2 \text{ bar} \times 0,8 = 1,6 \text{ bar}$$

$$P_p \text{ N}_2 = 1,5 \text{ bar} \times 0,8 = 1,2 \text{ bar}$$

On constate immédiatement que notre corps ne sera pas exposé à la même saturation en N<sub>2</sub> lors de cette plongée, Que la Patm à la sortie sera différente de 1b : il n'est donc pas possible d'utiliser tel quel les tables MN90 pour contrôler notre désaturation !

On fait l'hypothèse que la densité de l'eau est égale à 1 pour les deux cas.



# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## Première Méthode : PpN2

Si l'on compare la PpN2 de la plongée 1,2 b à la PpN2 du lieu de la plongée 0,4 b, nous avons pour cette plongée en altitude à 5000 m :

$$\left. \frac{\text{PpN2 plongée}}{\text{PpN2 lieu}} \right\} \text{ lac} = \frac{1,20}{0,40} = 3,00 \quad \text{On a multiplié par 3 la PpN2}$$

Pour retrouver ce rapport de 3 pour une plongée mer :

$$\left. \frac{\text{PpN2 plongée}}{\text{PpN2 lieu}} \right\} \text{ mer} = 3,00$$

Avec une PpN2 en surface de 0,8 b on obtient une PpN2 plongée mer = 3 \* 0,8 = 2,40 bar.

Ce qui donne une Pabs = PpN2 / 80% = 2,4 / 0,8 = 3 b soit une profondeur mer de 20 mètres.

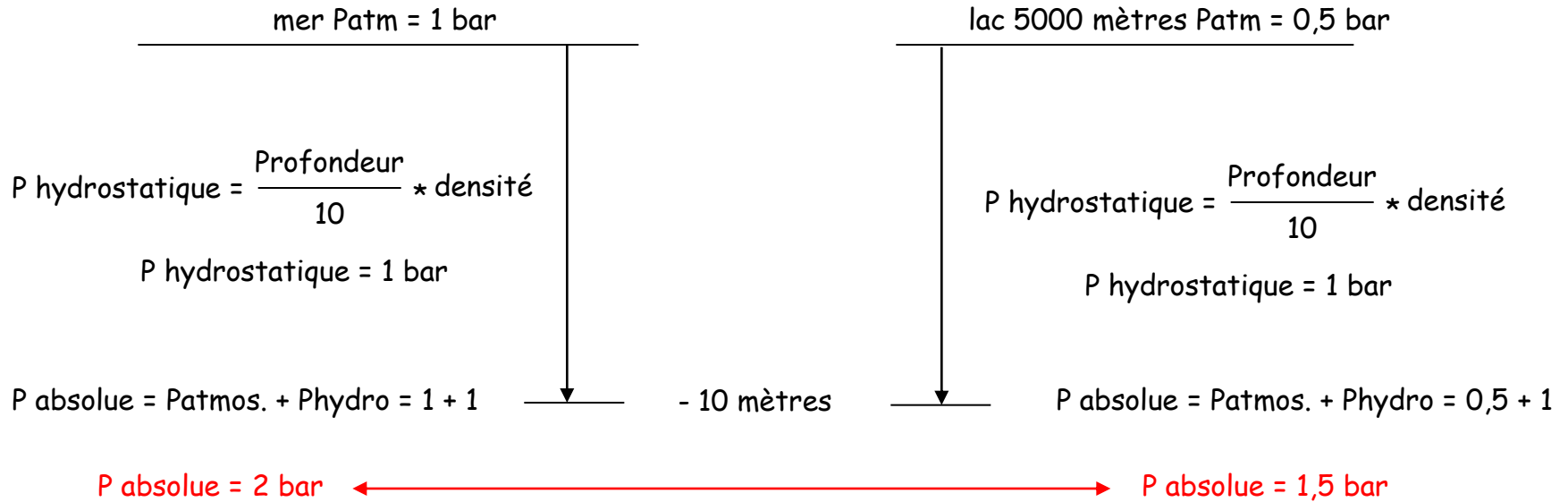
Notre plongée à 10 mètres dans un lac à 5000 m d'altitude est équivalente à une plongée en mer de 20 mètres. Les variations de pression seront donc plus élevées.

Cette profondeur de 20 m, c'est la profondeur d'une plongée en mer pour laquelle les conditions de saturation / désaturation en N2 sont équivalente à ma plongée en lac à 10m.

Notre corps risque un dégazage anarchique lors de la remontée à cause du gradient important entre la PpN2 du sang et la PpN2 de l'air en surface, d'où un risque d'accident de décompression accru.

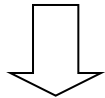
# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## Seconde méthode : Pabs



On peut retrouver la profondeur mer où l'on retrouve ce rapport de 3 soit  $P_{abs} = 3 * P_{atm} = 3 * 1 = 3 \text{ bar}$ .

Cela correspond encore à une plongée mer de 20 mètres de profondeur.

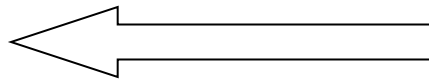


Avec cette profondeur, il me sera permis d'entrer dans les tables MN90

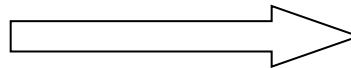
Le rapport entre la P absolue et la P atmosphérique est de :

$$\frac{1.5}{0.5} = 3$$

On a donc 3 fois la pression de départ (idem Pp).



Ainsi, pour une plongée à -10 m dans un lac situé à 5000 mètres d'altitude, je vais utiliser ma table MN90 en considérant une plongée à -20 mètres.



# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

Pour que je puisse utiliser la table MN90 lors d'une plongée en altitude, je dois donc trouver une plongée équivalente au niveau de la mer.

Cette méthode permet de continuer à utiliser les tables MN90, dès lors que l'altitude du lieu de plongée est connu. Cette solution est beaucoup plus simple que de calculer un jeu de table pour chaque lac d'altitude .

D'autres rapports peuvent être mis en évidence :

$$\left( \frac{P \text{ absolue}}{P \text{ atmosphérique}} \right)_{\text{mer}} = \left( \frac{P \text{ absolue}}{P \text{ atmosphérique}} \right)_{\text{lac}} \quad \text{Pression absolue}$$
$$\text{Pression partielle} \quad \left( \frac{P_{pN2}}{P \text{ atmosphérique}} \right)_{\text{mer}} = \left( \frac{P_{pN2}}{P \text{ atmosphérique}} \right)_{\text{lac}}$$
$$\left( \frac{\text{Profondeur}}{P \text{ atmosphérique}} \right)_{\text{mer}} = \left( \frac{\text{Profondeur}}{P \text{ atmosphérique}} \right)_{\text{lac}} \quad \text{Profondeur}$$

La profondeur mer ainsi calculée est encore nommée profondeur équivalente, ou profondeur fictive  
**La profondeur fictive est toujours supérieure à la profondeur réelle.**

## Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

### 3. Les paliers

Pour connaître la profondeur des paliers (éventuels) à effectuer, on utilise la même formule avec  $P_{atm} = 1$  b au niveau de la mer :

$$\text{Profondeur fictive} = \text{Prof. mer} = \frac{\text{Prof. Lac}}{P_{atm lac}}$$

La profondeur du palier en lac sera donnée par la formule suivante :

$$\text{Profondeur palier lac} = \text{Prof. Mer} \times P_{atm lac}$$

$$\text{Profondeur palier lac} = \text{Profondeur palier table} \times P_{atmosphérique lac}$$

**La profondeur réelle du palier est toujours inférieure à celle lue dans les tables.**

### 4. Vitesse de remontée

Pour la vitesse de remontée, on doit retrouver la même variation de pression au cours de la remontée :

$$\text{Vitesse lac} = \text{vitesse mer} \times P_{atmosphérique lac}$$

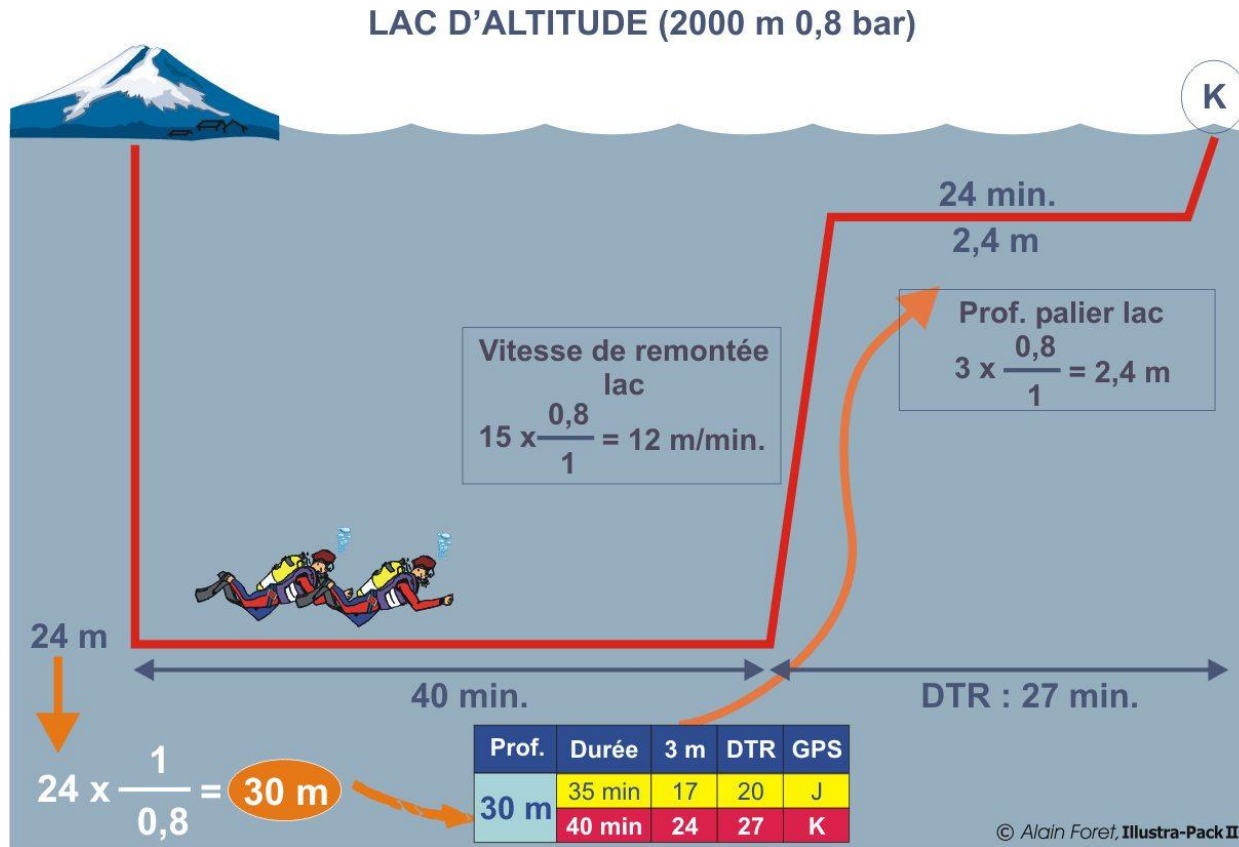
La vitesse de remontée dans un lac situé à 5000 mètres sera :

$$\text{Vitesse lac} = 15 \text{ m/mn} \times P_{atmosphérique lac} = 15 \times 0,5 = 7,5 \text{ m/mn}$$

La DTR restera celle indiquée dans les tables puisque la vitesse en lac sera plus lente

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## Synthèse :



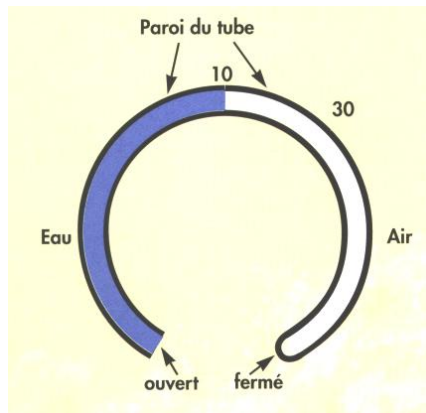
L'ensemble des procédures concernant les plongées ayant des profils exceptionnels restent Valables, à la condition d'utiliser les tables avec une profondeur équivalente en mer.

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 5. Utilisation des profondimètres

Bien que l'ordinateur ou le profondimètre électronique soit maintenant très courant, on peut encore trouver et utiliser des profondimètres plus anciens qui ont leur propre principe de fonctionnement.

### 5.1 Les profondimètres à tube capillaire (loi de Mariotte)



C'est une application de la loi de Mariotte.

Il s'agit d'un tube calibré ouvert à la pression ambiante qui est rempli d'air sous une pression qui est celle de la Patm. Lors de l'immersion, le volume d'air va se comprimer sous l'effet de l'eau et lorsque le volume aura diminué de moitié cela voudra dire que la pression a doublé.

Il indique : 10 m lorsque la pression a doublé, 20 m lorsque la pression a triplé, etc.

En mer, la Patm est de 1 bar, lorsque la pression a doublé, il indique 10 m.

Dans un lac à 2000 m, la Patm est de 0,8 bar. Lorsque la pression a doublé, il indique 10 m alors que l'on se trouve en réalité à 8 m (0,8 bar de P hydrost = 8 m d'eau).

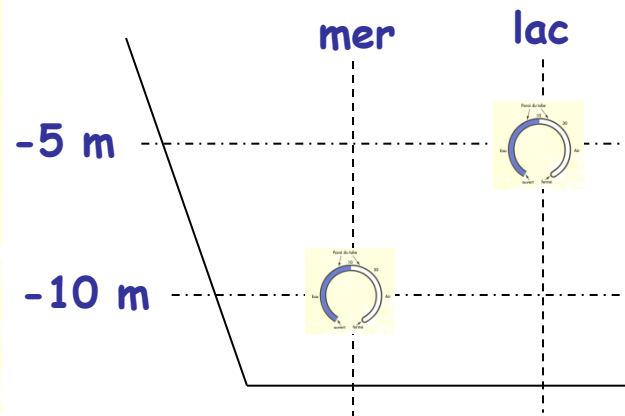
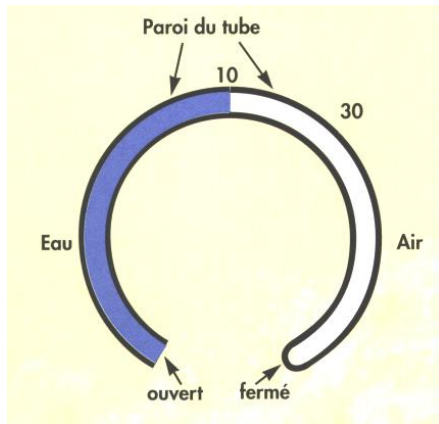
Ces profondimètres donnent donc directement la profondeur équivalente mer.

On va donc lire directement sur les tables MN90

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

En mer [ $P_{atm}$  de 1 b] :  $P_{abs}$  de 2 b  $\Rightarrow$  10 m de profondeur  $\Rightarrow$  volume divisé par deux.

En lac à 5000 m [ $P_{atm}$  de 0,5 b] :  $P_{abs}$  de 1 b  $\Rightarrow$  5 m de profondeur  $\Rightarrow$  volume divisé par deux.



Pour une même indication du profondimètre :

Lac = 5 mètres

Mer = 10 mètres

$\Rightarrow$  profondeur lue = profondeur fictive

$\Rightarrow$  J'utilise directement mes tables

Et Prof. Réelle lac = Prof. lue x  $P_{atm}$  lac

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 5.2 Les profondimètres à membrane et à tube de Bourdon

Un volume d'air sous une pression de 1 bar est isolé du milieu ambiant dans le profondimètre. Il est donc réglé pour se déclencher au niveau de la mer (1 bar = 0 mètre de profondeur).

Lorsque l'on monte en altitude, l'aiguille a tendance à reculer par rapport au 0. Il faudra attendre une certaine profondeur pour retrouver l'aiguille en face du 0. Ce décalage s'appelle le retard :

$$\text{Retard} = (\text{Patm mer} - \text{Patm lac}) \times 10$$

exemple : à 5000 m, le retard sera de  $R = (1 - 0,5) \times 10 = 5 \text{ m}$

On aura alors : Prof. Réelle = Prof. Lue + Retard

Exemples de profondimètre à membrane  
Et à tube de Bourdon

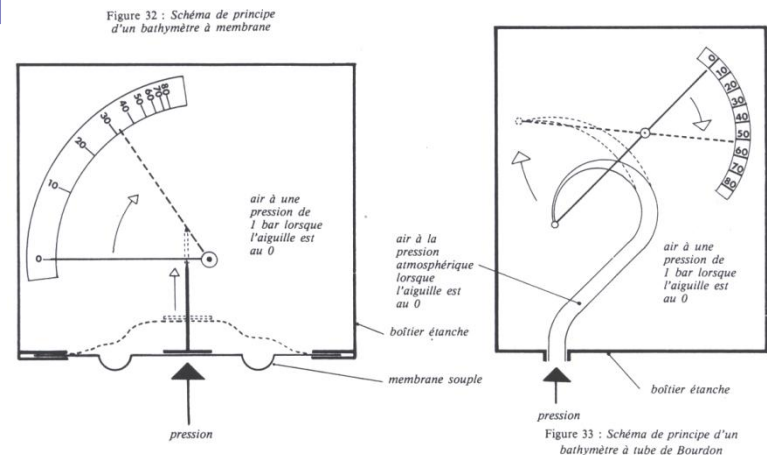
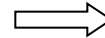


Figure 33 : Schéma de principe d'un bathymètre à tube de Bourdon



# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## Récapitulatif

Type de profondimètre	Indications
Tube de bourdon À membrane	Prof. réelle = Prof. Lue + retard avec : Retard = $(P_{atm\ mer} - P_{atm\ lac}) \times 10$
À capillaire	Prof. Lue = Prof. Équivalente mer → Tables
Électronique et ordinateur	Prof. Lue = Prof. Réelle

## 6 . Les ordinateurs

Selon les modèles, les ordinateurs prévoient soit un paramétrage manuel ou un ajustement automatique de l'altitude.

- Paramétrage manuel : il suffira souvent de choisir une des plages proposée (0-300m, 300-1500m..)

Ses inconvénients sont qu'il ne faut pas oublier de le régler, qu'il faut connaître l'altitude du lieu, Et qu'il ne tient pas compte du temps d'adaptation du corps avant la première plongée.

Son avantage est que l'on peut utiliser ce mode altitude lors d'une plongée en mer afin de durcir Le fonctionnement de son ordinateur dans le sens de la sécurité.

- Ajustement automatique : son avantage est qu'il va prendre en compte le temps d'adaptation de l'organisme avant la première plongée si besoin comme s'il s'agissait d'une plongée successive, ou suivre l'évolution de la  $P_{atm}$  en cas de plongées rapprochées à des altitudes différentes.

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 7 . L'avion

Lors d'un voyage long ou moyen courrier en avion, les cabines sont pressurisées à 0,8 b.

Les passagers passent donc en peu de temps d'une  $P_{atm}$  de 1 b à 0,8 b.

Nous savons que le temps d'évacuation de l'azote résiduel après une plongée est de 12 à 24 heures.

Afin d'éviter tout risque d'accident de décompression, les plongeurs ne doivent donc pas prendre l'avion dans cet intervalle, ce qui reviendrait à transformer leur dernière plongée mer en plongée en lac à 2000 m d'altitude ( $P_{atm} = 0,8$  b).

Les ordinateurs affichent souvent un avion et un temps suite à une plongée. Tant que cette indication Apparaît, ne prenez pas l'avion.

Cette règle s'applique aussi si vous souhaitez monter en montagne, rejoindre une station d'altitude.

## 8. Conclusion

Plonger en altitude nécessite des précautions supplémentaires....

Ne pas hésiter à demander des conseils auprès des clubs locaux.

D'autres paramètres seront à prendre en compte telles que la densité et la température de l'eau qui nécessiteront un équipement adapté.

---

# Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

## 9. Exercices

1/ En altitude, la vitesse de remontée est-elle inférieure ou supérieure à la vitesse de remontée en mer ?

*Corrigé*

Durant la vitesse de remontée, on doit ressentir la même variation de pression au cours de la remontée en lac qu'en mer.

**La formule est :**

Vitesse lac = 15 m/mn x P atmosphérique lac, avec Patm lac < 1

**Donc la vitesse en lac sera toujours plus lente**

**La DTR restera celle indiquée dans les tables MN90**

2/ On fait un plongée à 36m, dans un lac situé à une Patm de 532 mm Hg, immersion à 9h40, sortie de l'eau à 10h30. Trouver le temps de plongée et les paliers

*Corrigé*

Recherche de la Patm en bar

1 b → 760 mm Hg

X b → 532 mm Hg, soit  $x = 532 \times 1 / 760 = 0,7$  b, soit une altitude d'environ 1000 m

Recherche de la profondeur fictive

Prof fictive = Prof réelle / Patm lac = 36 / 0.7 = 51,42 → Prof fictive = 52 m

Le temps total d'immersion est de 10h30 – 9h40 = 50 min

On recherche dans les Tables, pour 52m, un temps de plongée + DTR >= à 50 min

→ Tps de plongée = 0h20 et DRT = 34 Min, soit 54 min au total

→ On minore alors le temps de plongée à 16 min pour conserver Temps de plongée + DTR = 50 min

→ Les paliers seront dans la tables sont 1 min à 9m, 5 min à 6m et 23 min à 3m

→ Les paliers réels seront donc 1m à 6,3m, 5 min à 4,2 m et 23 min à 2,1m

## Cours N4 : LA PLONGEE EN ALTITUDE

3/ on plonge dans un lac situé à une Patm de 608 mm Hg.

Au fond notre profondimètre à membrane indique 36 m de profondeur.

On s'immerge à 10h15 et on refait surface à 10h58

Donner la profondeur réelle, le temps de plongée, la vitesse de remontée jusqu'au premier palier, la profondeur des paliers et l'indication lue sur le profondimètre aux paliers.

### Corrigé

$P_{\text{abs lac}} = 608 / 760 = 0,797 = 0,8 \text{ b}$

On sait que pour ce type de profondimètre (membrane ou tube de bourdon),

Prof réelle = Prof lue + retard et que retard =  $(P_{\text{atm mer}} - P_{\text{atm lac}}) \times 10 = (1 - 0,8) \times 10 = 2 \text{ m}$

→ Prof réelle =  $36 + 2 = 38 \text{ m}$

Prof fictive = Prof réelle lac /  $P_{\text{atm lac}} = 38 / 0,8 = 47,5$

On entrera dans les tables avec Prof fictive = 48 m

Le temps total d'immersion est de 10h58 – 10h15, soit 43 min

On prend dans les tables un temps de plongée de 20 min et une DTR de 27 min, ce qui donne un temps d'immersion de 47 min.

On minore le temps de plongée de 4 min pour conserver un temps total d'immersion de 43 min

→ Temps de plongée =  $20 - 4 = 16 \text{ min}$ , DTR = 27 min, paliers mer 4min à 6m et 19 min à 3 m

→ Paliers lac de 4 min à  $6 \times 0,8 = 4,8\text{m}$  et 19 min à  $3 \times 0,8 = 2,4 \text{ m}$

→ Vitesse de remontée =  $15 \text{ m/min} \times 0,8 = 12 \text{ m/min}$ .

→ avec ce profondimètre, il faudra retrancher le retard de 2m lors de la lecture

→ Soit 4 min à 2,8m lue et 19 min à 0,4 m lue