

LES PLONGÉES EN ALTITUDE

1 - JUSTIFICATION

Les tables MN 90 ont été calculées pour permettre aux plongeurs une désaturation correcte de l'azote dissout dans leur organisme pendant la plongée. Au retour à l'air libre, l'azote dissout n'est pas totalement évacué mais le rapport entre la tension d'azote des tissus et l'azote contenu dans l'air ambiant n'atteint pas le seuil de sursaturation critique. Le plongeur peut donc respirer à l'air libre sans risques.

En altitude, la pression est inférieure à la pression atmosphérique au niveau de la mer. On considère qu'elle décroît environ de 0,1 bar tous les 1000 mètres.

Ceci influence donc la pression partielle d'azote existante dans l'air ambiant : à une altitude de 2000 mètres, la pression ambiante sera de $1 - 0,2 = 0,8$ bar, et la pression partielle d'azote dans l'air sera donc de $0,8 \times 80\% = 0,64$ bar.

Si on appliquait directement les tables MN 90, on prendrait donc le risque de voir les plongeurs rejoindre la surface avec un rapport entre la tension d'azote dissout et la pression partielle d'azote dans l'air supérieur au seuil de sursaturation critique. Il a donc fallu adapter des procédures de décompression spécifiques à la plongée en altitude.

Les plongeurs, à partir du niveau 3, peuvent choisir eux-mêmes leur site de plongée. Il importe donc que ces plongeurs connaissent les procédures de désaturation spécifiques aux plongées en altitude pour pouvoir les mettre en œuvre le cas échéant.

2 - ADAPTATION DES TABLES DE PLONGEE MN 90

En altitude, la pression partielle d'azote dans l'air est égale à :

$$P_{N_2} = 80\% \times P_{\text{atm}}$$

Les tables ont été calculées en fonction d'un rapport entre la tension d'azote des tissus et le pression d'azote ambiante. En fait, dans les tables, la profondeur que l'on lit n'est que la traduction d'une pression ambiante.

Pour que ce rapport soit conservé en altitude, il faudrait donc lire non pas la profondeur réelle, mais une profondeur pour laquelle le rapport des pressions d'azote est conservé. Cette profondeur est appelée « **profondeur fictive** ».

Comment détermine-t-on cette profondeur fictive ?

On cherche à avoir l'égalité des rapports de pression partielle d'azote entre le fond et la surface, que l'on soit en mer ou en altitude.

De par la loi sur les pressions partielles, la pression partielle d'azote est égale à 80% de la pression absolue. Celle-ci est elle-même égale au dixième de la profondeur (pression hydrostatique) augmentée de la pression atmosphérique.

En altitude :

$$PPN_{2atm}/PPN_{2fond} = 80\% \times P_{atm\ alt} / (80\% \times (Prof_{réelle}/10 + P_{atm\ alt}))$$

En mer :

$$PPN_{2atm}/PPN_{2fond} = 80\% \times P_{atm\ mer} / (80\% \times (Prof_{fictive}/10 + P_{atm\ mer}))$$

On peut simplifier les facteurs 80% et croiser les produits.

$$P_{atm\ alt} \times (Prof_{fictive}/10 + P_{atm\ mer}) = P_{atm\ mer} \times (Prof_{réelle}/10 + P_{atm\ alt})$$

$$P_{atm\ alt} \times Prof_{fictive}/10 + P_{atm\ alt} \times P_{atm\ mer} = P_{atm\ mer} \times Prof_{réelle}/10 + P_{atm\ alt} \times P_{atm\ mer}$$

On peut maintenant éliminer de chaque côté les facteurs $P_{atm\ alt} \times P_{atm\ mer}$ et multiplier par 10.

D'où la formule :

$$\text{Profondeur}_{fictive} = \text{Profondeur}_{réelle} \times P_{atm\ mer} / P_{atm\ alt}$$

Cette formule est très simple à utiliser dans la mesure où $P_{atm\ mer} = 1$ bar.

3 – UTILISATION EN ALTITUDE DES TABLES DE PLONGEE MN 90

De la même façon que la profondeur lue dans les tables sera la profondeur fictive, les paliers seront eux effectués à des profondeurs **réelles** suivant la même formule.

Ne pas oublier que si on lit des profondeurs fictives, on plonge à des profondeurs réelles.

$$\text{Profondeur}_{réelle\ palier} = \text{Profondeur}_{fictive\ palier} / (P_{atm\ mer} / P_{atm\ alt})$$

Soit numériquement :

$$\text{Profondeur}_{réelle\ palier} = \text{Profondeur}_{fictive\ palier} \times P_{atm\ alt}$$

Pour résumer :

La profondeur lue dans les tables est toujours supérieure à la profondeur réelle

Les paliers sont toujours effectués à des profondeurs inférieures à celles lues dans les tables

4 - VITESSE DE REMONTEE

Le temps de remontée d'une plongée en altitude sera identique que celui donné par la table pour la profondeur fictive correspondante. Comme on remonte d'une profondeur réelle inférieure, un temps identique de remontée sous-entend une vitesse de remontée plus faible.

La formule appliquée est identique :

$$\text{Vitesse}_{\text{réelle}} = \text{Vitesse}_{\text{tables}} \times P_{\text{atm alt}}$$

Attention : on ne peut donc pas en altitude calquer sa vitesse de remontée sur celle des petites bulles.

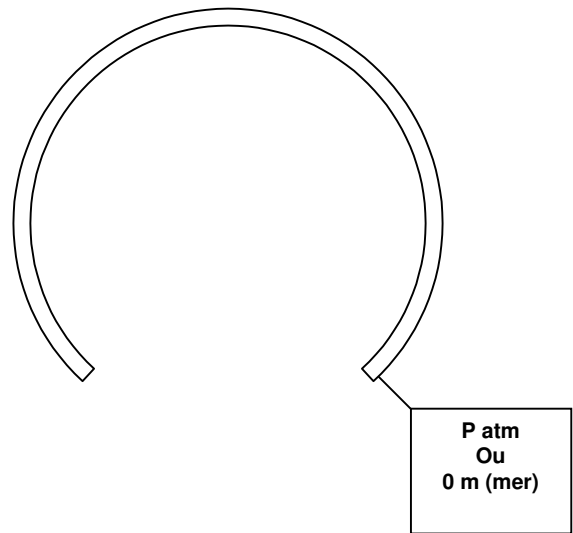
5 - CONTROLE DE LA PROFONDEUR

Le contrôle de la profondeur est bien sûr primordial dans le cas de plongées en altitude, comme il l'est pour des plongées en mer. Mais il importe de savoir si les équipements que nous utilisons pour mesurer notre profondeur, et qui sont en fait des manomètres, ne donnent pas des indications modifiées par le seul fait d'une pression atmosphérique différente de celle du niveau de la mer.

5.1 Le profondimètre capillaire

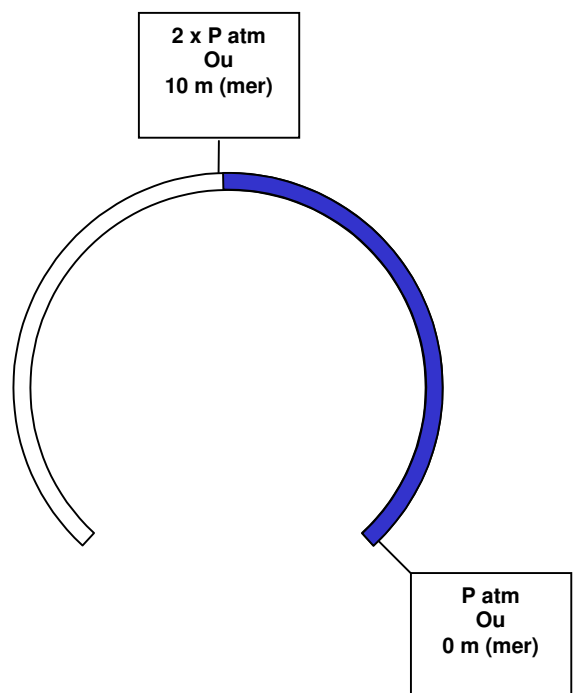
Il s'agit en fait d'un tube fin ouvert sur une de ses extrémités et dont l'air intérieur est soumis à la loi de Mariotte. Pendant la plongée, la pression augmente, le volume d'air diminue dans le tube, et l'eau rentre. La limite entre l'eau et l'air du tube est représentative de la pression ambiante et autorise donc une traduction en profondeur par le biais d'une graduation appropriée.

A la surface, le tube est vide. Sur le schéma de droite, le tube est considéré ouvert à droite et fermé à gauche. La graduation 0 correspond à l'extrémité ouverte du tube.



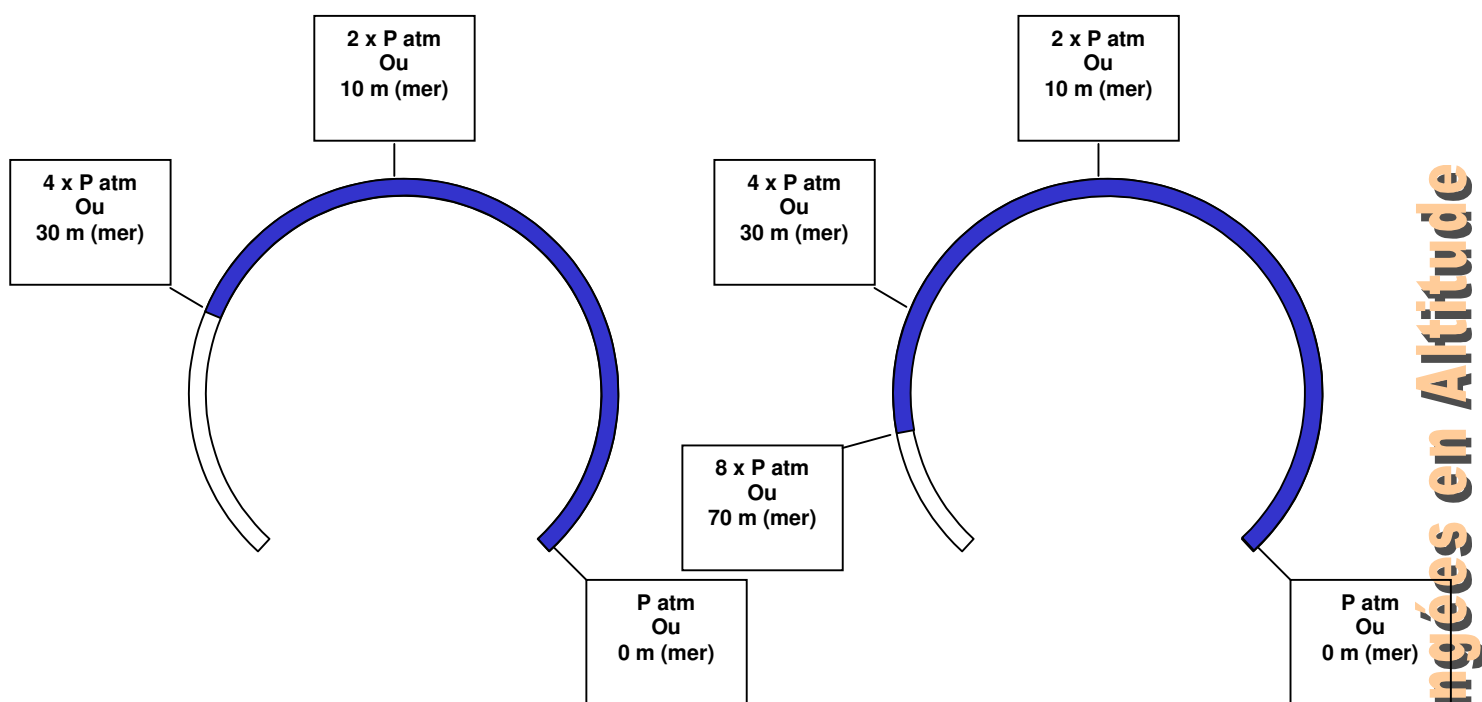
Quand le plongeur va se trouver à une profondeur correspondant à deux fois la pression atmosphérique, le volume d'air dans le tube va diminuer de moitié et l'eau va occuper l'autre moitié du tube.

La graduation centrale correspond donc à une pression ambiante de 2 fois la pression atmosphérique, soit une profondeur de 10 mètres en mer.



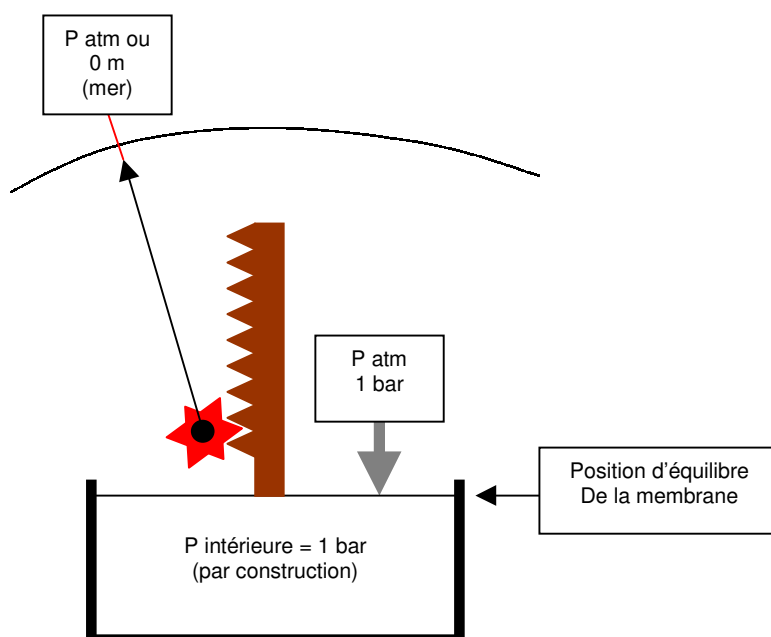
En altitude, la profondeur réelle serait celle correspondant à deux fois le pression atmosphérique également, mais la lecture donnera 10 mètres de la même façon. **On lit donc directement la profondeur fictive sur ce genre de profondimètre.**

De la même façon, les schémas suivants correspondent respectivement à une pression absolue égale à 4 fois et 8 fois la pression atmosphérique. On peut constater que plus la pression augmente, plus la précision de la mesure diminue. Ce type de profondimètre ne donne une précision importante que pour de fortes variations de pression, c'est à dire près de la surface.

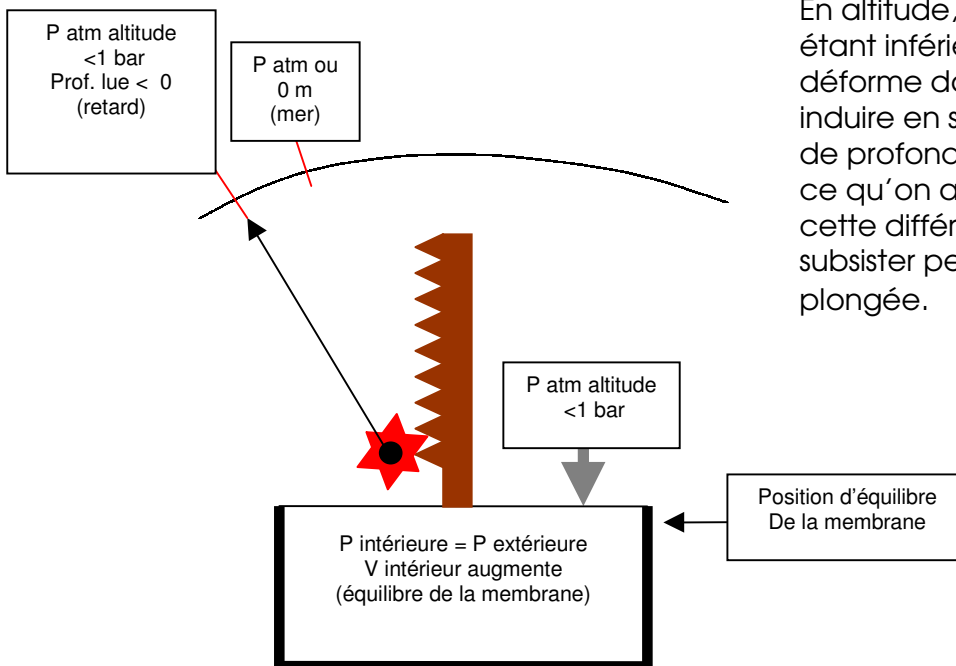
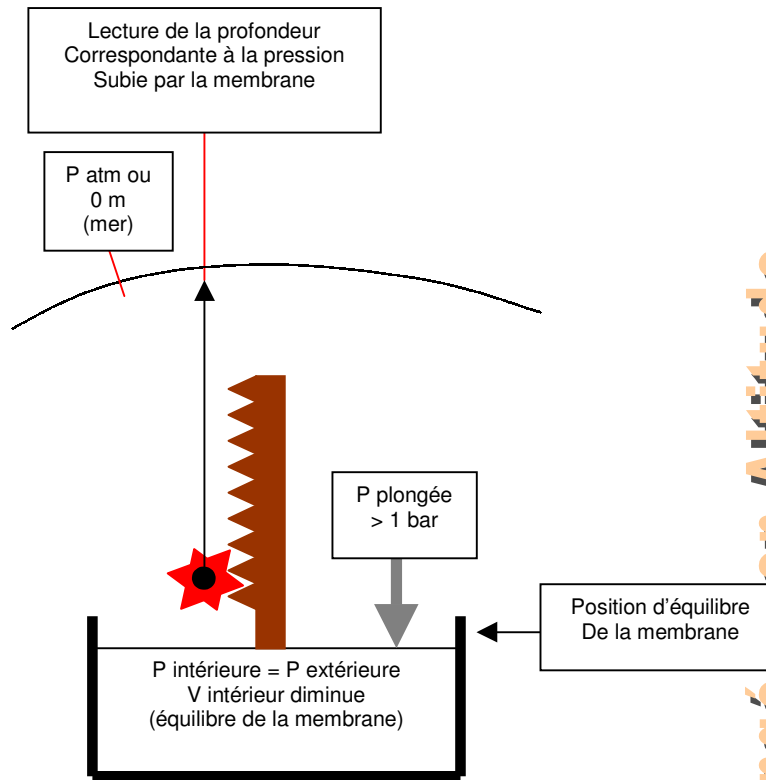


5.2 Le profondimètre à membrane ou à tube de bourdon

Ces deux types de profondimètres sont basés sur le même principe. Un volume fermé, qui se déforme sous l'effet de la pression, est mécaniquement lié à une aiguille qui indique une profondeur correspondant à la pression qui provoque la déformation du tube ou de la membrane.



En plongée, la membrane subit la pression et s'incurve. La flèche bouge sur son axe et va donc indiquer une profondeur liée à la déformation subie, donc à la pression ambiante. On peut donc en déduire la profondeur.



En altitude, la pression ambiante étant inférieure, la membrane se déforme dans l'autre sens et va induire en surface une lecture de profondeur négative. C'est ce qu'on appelle le **retard**, et cette différence de lecture va subsister pendant toute la plongée.

Ce retard s'exprime en mètres, puisque c'est de cette façon qu'est gradué le profondimètre, et est égal à l'écart entre la pression atmosphérique au niveau de la mer et celle régnant en altitude, exprimé en mètres de colonne d'eau (10 mètres de colonne d'eau équivalent à 1 bar) :

$$\text{Retard} = (P_{\text{atm alt}} - P_{\text{atm mer}}) \times 10$$

5.3 L'ordinateur de plongée ou le profondimètre numérique à correction automatique

Certains ordinateurs de plongée, de même que certains profondimètres numériques, s'adaptent automatiquement à la pression atmosphérique en altitude, pour peu qu'on les ait allumés à l'air libre. On voit alors des petites montagnes s'afficher sur les cadrans, ou carrément une altitude mesurée.

Ces outils vont donc mesurer en plongée la profondeur réelle, et calculer les paliers en fonction d'une profondeur fictive correspondante. Mais attention : si certains ordinateurs donnent les paliers à la profondeur fictive directement (par exemple : Stop à 2m70) ou les donnent aux profondeurs habituelles en adaptant les temps de palier correspondants, les profondimètres numériques doivent être utilisés avec les tables MN 90 et le plongeur doit penser de lui-même à faire son palier à une profondeur fictive qu'il aura lui-même calculé.

De même, certains profondimètres numériques d'ancienne génération sont en fait des profondimètres à membrane sur lesquels a seulement été adapté un affichage numérique. On peut les reconnaître à leur épaisseur imposante pour loger la membrane dans le boîtier. Ces profondimètres sont donc assortis d'un retard comme un profondimètre classique.

Il appartient au plongeur qui utilise de tels matériels de bien lire la documentation qui les accompagne afin de bien être conscient des caractéristiques et possibilités de l'outil et de savoir s'il doit oui ou non adapter ses paramètres de décompression en fonction de ce que lui indiquera son appareil.

5.4 Tableau récapitulatif

Type de profondimètre	Profondeur lue
Profondimètre capillaire	Profondeur fictive
Profondimètre à membrane ou à tube de bourdon	Profondeur réelle – retard (en valeur positive)
Profondimètre électronique ou ordinateur	Profondeur réelle

6 - EXERCICES :

❶ Un groupe de plongeurs s'immerge à 10h00 dans un lac situé à 2500 mètres d'altitude. Ils sont équipés de profondimètres à membrane et de tables MN 90.

Profondeur lue : 26 mètres, durée 23 minutes.

Paliers lus ? Heure de sortie ? Groupe de plongée successive ?

❷ Vous allez plonger dans un lac situé à 2000 mètres d'altitude. Vous disposez de tables MN 90, mais vous n'avez pas d'ordinateur à correction automatique d'altitude. Vous espérez faire une plongée de 45 minutes environ, et le guide de montagne qui vous accompagne estime que le lac présente 25 m de profondeur en son point le plus bas. Quel appareil allez-vous privilégier pour contrôler votre profondeur ? Justifiez votre choix.

❸ Deux plongeurs effectuent une plongée en altitude. L'un est équipé d'un profondimètre à membrane, l'autre d'un profondimètre capillaire. Ils comparent les indications de leurs appareils au fond. Le profondimètre capillaire indique 40 m, l'autre indique 32,5 m. Quelle est l'altitude à laquelle ils effectuent leur plongée ?

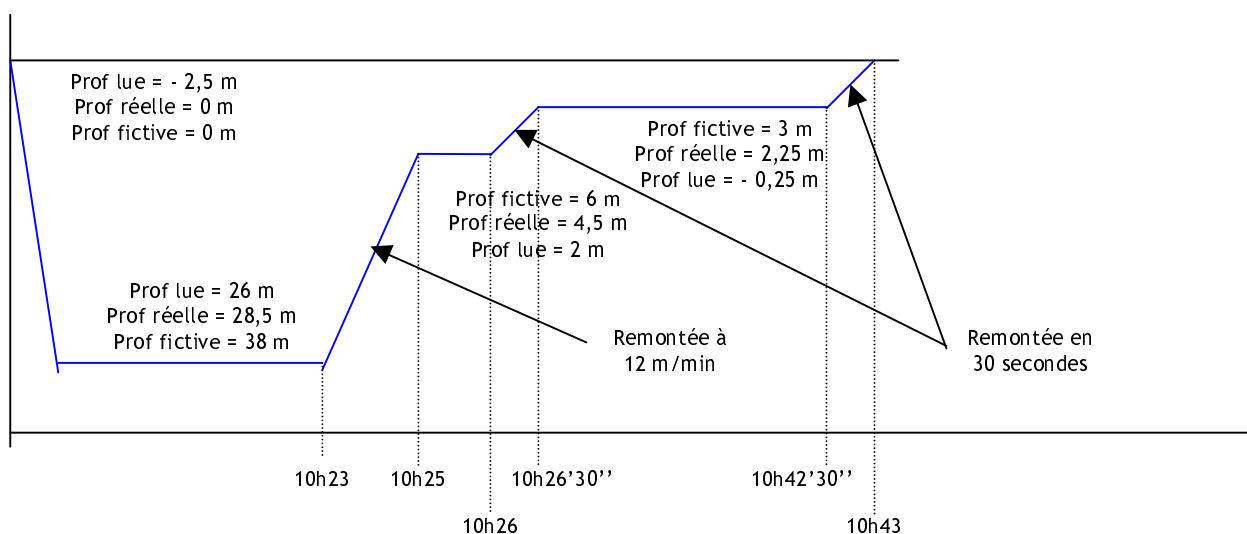
7 – CORRECTION DES EXERCICES :**Exercice 1 :**

A 2500 mètres d'altitude, la pression atmosphérique est environ de 0,75 bars.

Le retard affiché par les profondimètres à membrane est donc de 2,5 mètres.

La profondeur réelle est donc de : $26 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 28,5 \text{ m}$

La profondeur fictive est donc de : $28,5 / 0,75 = 38$, donc lecture de la table à la valeur 38 m.



Paliers de 1 minute à 6 mètres et 16 minutes à 3 mètres en profondeur fictive.

La profondeur réelle des paliers est de : $6 \times 0,75 = 4,5 \text{ m}$ et $3 \times 0,75 = 2,25 \text{ m}$.

La profondeur lue des paliers sera de : $4,5 - 2,5 = 2 \text{ m}$ et $2,25 - 2,5 = -0,25 \text{ m}$.

Vitesse de remontée : $15 \text{ à } 17 \text{ m/min} \times 0,75 = 12 \text{ m/min}$

Durée de remontée hors paliers : $28,5 \text{ m}$ à $4,5 \text{ m}$ (profondeur réelle 1^{er} palier), soit 24 m de remontée, en $24/12 = 2$ minutes.

Durée de remontée entre paliers : en fictive, il faut 30 secondes pour faire 3 m, soit une vitesse de 6 mètres/minute. En altitude, la vitesse de remontée entre paliers sera de $6 \times 0,75 = 4,5$ mètres/minute. Les paliers étant espacés entre eux de $2,25 \text{ m}$, la durée de 30 secondes entre chaque palier sera conservée.

Heure de sortie :

$10\text{h}00 + 23 \text{ minutes (plongée)} + 2 \text{ minutes (remontée au premier palier)} + 17 \text{ minutes (durée des paliers)} + 1 \text{ minute (remontée entre palier)} = 10\text{h}43$.

Groupe de plongée successive : J

Exercice ② :

La profondeur fictive correspondant à votre plongée est de $25/0,8 = 31,25$ m. La durée prévue pour votre plongée vous donnera donc des paliers aux profondeurs fictives de 6m et 3m.

Sur la gamme de profondeurs fictives envisagée, le profondimètre capillaire offre encore une bonne précision et il présente l'avantage de donner une lecture directe de la profondeur fictive. Vous n'aurez donc aucun calcul à faire sous l'eau et vous ne serez pas sujet à une éventuelle erreur du guide de montagne sur la profondeur du lac. Par ailleurs, lors des paliers, le profondimètre capillaire vous offrira une très bonne précision de lecture.

Exercice ③ :

Le capillaire offre une lecture en profondeur fictive. Donc $Prof_{réelle} / P_{atm} = 40$.

$$\text{Donc } Prof_{réelle} = P_{atm} \times 40$$

Pour le profondimètre à membrane, la lecture est égale à la profondeur réelle moins le retard.

En valeur numérique, retard = $10 \times (1 - P_{atm})$ mètres.

$$32,5 = Prof_{réelle} - \text{retard} = Prof_{réelle} - 10 \times (1 - P_{atm})$$

$$\text{Donc } 32,5 = P_{atm} \times 40 - 10 \times (1 - P_{atm})$$

$$32,5 = P_{atm} \times 40 - 10 + 10 \times P_{atm}$$

$$P_{atm} = (32,5 + 10)/(40 + 10) = 0,85$$

L'altitude à laquelle est effectuée la plongée est donc d'environ 1500 mètres.