



N°006 le mercredi 5 mai 2004

*En raison de l'absence du Doc aux 2 cours de Stéphane pour la préparation au niveau 2, ce dernier est allé piocher différents cours sur INTERNET et vous les soumet...*

## De la dissolution des gaz = la loi de HENRY

Pour illustrer le phénomène de la dissolution, on va considérer que les molécules sont des petites boules. Commençons par parler des solides : si on laisse « en paix » les molécules lorsqu'elles sont très proches les unes des autres, elles restent sagement collées à leurs voisines respectives, formant ainsi un bloc, un "**solide**". La force qui maintient cette cohésion est énorme quand, rappelons-le, les molécules sont proches.

### Du solide au liquide ?

Maintenant on va commencer à chauffer le solide. Lorsque les molécules reçoivent cette énergie, elles commencent à s'animer de mouvements divers. L'intensité de ce mouvement se mesure : c'est la température du solide. A l'inverse, les molécules sont parfaitement immobiles au le "zéro absolu" (moins 273,16 °C).

*Si on continue à chauffer le solide, les molécules vont s'agiter de plus en plus : l'énergie qu'on lui a communiqué commence permettre aux molécules de rivaliser avec la force qui les maintenait quasi-immobiles. Ce phénomène s'appelle simplement la fusion. Le solide a changé d'état, il est devenu liquide ! On commence à se rapprocher de notre élément. Même dans un verre d'eau froide, les molécules se promènent.*

### La phase gazeuse

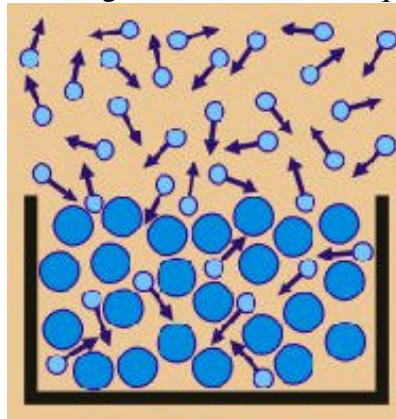
*Dans un liquide, il fait "chaud" du point de vue des molécules : ça bouge, aucune molécule n'est immobile. On continue de chauffer le liquide encore pour voir ce qui se passe. Puisqu'on augmente la température, les molécules emmagasinent de plus en plus d'énergie. Elles finissent par se lâcher et se télescopent les unes les autres.*

On est en présence d'un gaz, la dissociation entre les molécules est totale. Elles percutent les parois du récipient, qui a intérêt à être assez solide pour résister à cette pression... Ça y est, le mot est lâché. Vous faites le lien avec la pression maintenant ? C'est vraiment une force qui s'applique à une surface. Moins il y aura de place, plus la densité des molécules en mouvement sera importante, plus la pression sera élevée.

### Une idée : la dissolution

Imaginons maintenant ce qui se passe à la surface d'un liquide au contact de l'air, par exemple en considérant notre verre d'eau fraîche. Le petit dessin ci-dessous montre que certaines molécules présentes dans l'air plongent dans le liquide. C'est normal, on se rappelle qu'elles se bousculent les unes les autres. Celles qui cognent la paroi du réfrigérateur rebondissent, celles qui touchent la surface de l'eau continuent leur trajectoire.

Il y a ainsi dans l'eau un grand nombre de molécules de gaz qui font trempette. Elles se baladent entre les molécules de liquide, ressortent parfois vers l'air libre sous la pression des nouvelles venues (au fait, la "pression" du gaz dissout dans un liquide s'appelle "tension").



Le liquide n'est pas en reste. Loin d'être passif, il peut lui même éjecter des molécules de gaz. On se souvient que dans un liquide les molécules "dansent" de façon rapprochée. Si le liquide se réchauffe, la danse des molécules se fait plus violente. Beaucoup sortent du liquide par la surface. Si la température monte vite (on sort le verre de frigo), on voit apparaître des bulles dans le liquide.

Les molécules de gaz ne peuvent plus se promener tranquillement dans le liquide qui est maintenant trop agité pour toutes ces molécules de gaz. Elles se regroupent donc ...

### La saturation

Notre verre d'eau va finir par être à température ambiante. On observera alors un équilibre entre les molécules de gaz qui y plongent et celles qui en sortent. La valse des aller-retour continue bel et bien, mais d'une façon équilibrée (autant d'entrées que de sorties). On dit alors que le liquide est à saturation.

### La loi de Henry

Quand des molécules de gaz se regroupent au sein d'un liquide, elles forment une bulle. Dans les liquides, beaucoup de molécules de gaz ne se regroupent pas, elles sont "dissoutes" dans le liquide et se promènent librement. Dans un verre d'eau, une certaine quantité d'air dissout est présent. Cette quantité dépend de la température et de la pression atmosphérique. Si ces paramètres ne changent pas, la quantité de gaz dissout reste la même, le liquide est alors "**à saturation**".

#### Loi de Henry

A température constante et à saturation, la quantité de gaz dissout dans un liquide est proportionnelle à la pression qu'exerce ce gaz sur le liquide.

Henry a remarqué que la quantité de gaz dissout dans un liquide est directement proportionnelle à la pression que ce gaz exerce sur le liquide. Si on augmente la pression du gaz, des molécules de ce gaz passeront dans le liquide jusqu'à saturation. Inversement, si on réduit la pression, le liquide se trouve en "**sursaturation**" et des molécules de gaz vont s'en échapper pour tendre vers une nouvelle saturation. Ce phénomène génère des bulles dans le liquide lorsque la pression baisse trop rapidement.

En plongée, on respire de l'air comprimé qui va se dissoudre dans le corps. L'azote de l'air n'est pas consommé par l'organisme et peut former des bulles dans nos tissus si on remonte trop

rapidement d'une plongée. Ces bulles peuvent obstruer des vaisseaux, comprimer des tissus vitaux,... C'est "l'accident de décompression", qu'on évite en remontant lentement et en faisant des paliers.

**La loi de HENRY régit donc le comportement des gaz mis en contact avec des liquides.**

**Enoncé de la loi: les gaz sont solubles dans les liquides. La quantité de gaz dissous sera fonction :**

- **de la pression partielle du gaz**
- **du coefficient de solubilité du gaz (constant pour un gaz donné dans un liquide donné)**
- **de l'inverse de la température.**

**de la durée du contact gaz / liquide. Les gaz vont se dissoudre progressivement selon une courbe exponentielle jusqu'à « saturation ».**

## La loi de Dalton

Cette loi concerne la description des mélanges gazeux.

**Dans l'air il y a approximativement 80% d'azote et 20% d'oxygène.** A la pression atmosphérique il règne environ 1 bar. La part de pression due à l'azote est proportionnelle à sa concentration dans l'air : il participe donc pour 80% à la pression atmosphérique. On dit que à la pression atmosphérique, la "**pression partielle**" de l'azote dans l'air est de 0,8 bar.

A une profondeur de 20 m, il règne une **pression absolue** de 3 bar, la pression partielle d'oxygène dans le détendeur sera donc  $3 \times 20\% = 0,6$  bar. On note respectivement les pressions partielles de l'oxygène et de l'azote  $PpO_2$  et  $PpN_2$ . Une des expressions de la loi de Dalton donne la formule de calcul de la pression partielle d'un gaz dans un mélange :

Loi de Dalton - 1

**$P_{partielle\ d'un\ Gaz} = \%Gaz \times P_{absolue}$**

Une autre expression de la pression partielle d'un gaz est :

Loi de Dalton - 2

**Pour un Volume donné, la Pression partielle d'un gaz dans un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul ce volume.**

Pour en finir avec ces énoncés, voici une dernière expression de la loi de Dalton qui découle logiquement des précédentes :

Loi de Dalton - 3

**La pression absolue d'un mélange gazeux est la somme des pressions partielles des gaz qui composent ce mélange.**

**Exemple :  $P_{absolue\ de\ l'air} = P_{partielle\ azote} + P_{partielle\ de\ l'oxygène}$**

La notion de pression partielle est importante pour définir les seuils de toxicité des gaz. **Par exemple, l'oxygène représente un danger pour les plongeurs à partir d'une pression partielle de 1,6 bar.** Quand on plonge à l'air, cette valeur critique est atteinte à la profondeur de 70 m. Les plongeurs au nitrox respirent un mélange enrichi en oxygène, la  $PpO_2$  limite de 1,6 bar sera

atteinte encore plus tôt. Les nageurs de combat qui respirent de l'oxygène pur dans leur scaphandre à circuit fermé ne pourront dépasser sans danger la profondeur de 6 m !

## **Applications :**

### **1) Toxicité de l'azote**

L'azote est toxique à partir d'une pression partielle de 4 bars, ce qui correspond - pour l'air comprimé - à une profondeur de 40 m =  $(4 = 0.8 * X$  où X est la pression absolue soit ici X=5 bars, pression observée à 40 m de profondeur = 1bar en surface, 2bars à 10 m , 3 bars à 20 m etc.)

### **2) Toxicité de l'oxygène**

L'oxygène peut être toxique en mélange à partir d'une pression partielle de 2 bars, soit à une profondeur de 85 mètres, ce qui explique la limite de 85 m des tables de plongée. ( $2 = 0.2 * Y$  et en suivant le raisonnement précédent  $Y=10$  et donc pour une profondeur de 90 m en toute approximation => mais si l'on estime que l'air est un mélange comprenant 21% d'oxygène, lors  $2=0.21*Y$  donne  $Y= 9.52$  et donc la profondeur limite est de 85 m... )

### **3) Manque d'oxygène**

Si la pression partielle d'oxygène est trop faible, le cerveau va souffrir. On parle d'**hypoxie** si  $Pp O_2 < 0,17 \text{ bar}$  , puis d'**anoxie** si  $Pp O_2 < 0,1 \text{ bar}$ . Cela explique les syncopes survenant à la remontée après une apnée.

### **4) Toxicité du gaz carbonique**

Lorsque la pression partielle de CO<sub>2</sub> dépasse 0,07 bar (on parle d'**hypercapnie**), le centre respiratoire du bulbe rachidien entraîne une accélération de la respiration, donc un **essoufflement**. Un peu de CO<sub>2</sub> dans l'air comprimé, anodin en surface, devient dangereux en profondeur.

### **5) Plongée "aux mélanges"**

L'élaboration de mélanges gazeux oxygène/azote, oxygène/hélium et, récemment, oxygène/hydrogène pour aller dans les grandes profondeurs est aussi une application directe de la loi de Dalton qui permet de réduire la toxicité des gaz inspirés.

### **Exemples d'utilisation de la loi de Dalton**

L'air est un mélange contenant 21% d'oxygène et 78% d'azote (+1% de gaz rares, etc..) à la pression atmosphérique de 1 bar.

Les pressions partielles sont de

$1 \times 0,21 = 0,21 \text{ bar}$  pour O<sub>2</sub>

et  $1 \times 0,78 = 0,78 \text{ bar}$  pour N<sub>2</sub>

En plongée à 40 m on respire de l'air comprimé à la pression absolue de 5 bars. La pression partielle sera donc de

$5 \times 0,21 \text{ bars} = 1,05 \text{ bars}$  pour O<sub>2</sub>

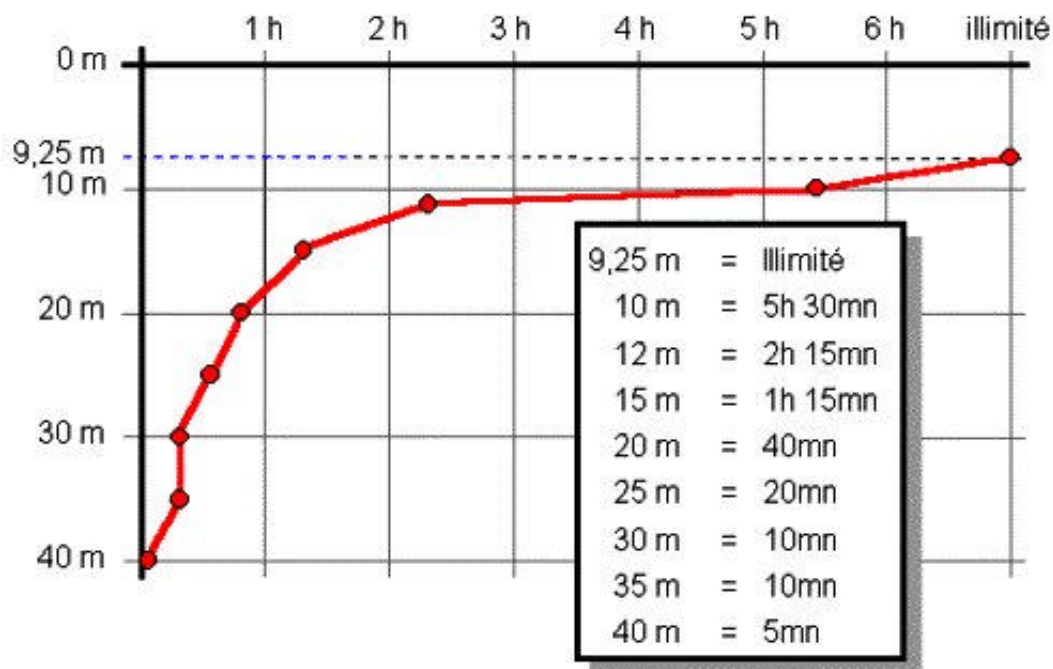
et  $5 \times 0,78 \text{ bars} = 3,90 \text{ bars}$  pour N<sub>2</sub>.

### **Conclusion**

La loi de Dalton a des implications importantes pour le plongeur, particulièrement en ce qui concerne la sécurité.

## LA COURBE DE SECURITE en plongée

La courbe de sécurité est une ligne délimitant 2 zones d'un diagramme comportant en abscisse le temps (en heures) et en ordonnées la profondeur (en mètres)



Les points principaux de la courbe doivent être connus par coeur.

Pour des profondeurs et des durées situées **en deçà de la courbe**, et pour autant que la vitesse de remontée soit respectée, on peut plonger sans faire de paliers de décompression, en dehors du palier "de sécurité" de 3 minutes à 3 mètres.

**Au delà de cette courbe**, il faut utiliser les tables de plongées

## UTILISATION DES CARTES DE PLONGEE MN 90

### Introduction

Lorsqu'on plonge hors de la courbe de sécurité, il y a lieu de prendre certaines précautions au cours de la remontée pour prévenir une maladie de décompression.

À cet effet, on a élaboré des tables de plongée à l'air de 6 à 65 m, qui constituent un véritable guide de la remontée vers la surface en toute sécurité.

### Présentation des tables (d'après MN 90)

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des Paliers à				Durée Totale de la remontée	Groupe de Plongée successive
		12 m	9 m	6 m	3 m		
42 m	5				2	3	C
	10				5	5	E
	15				8	8	G
	20			1	12	16	I
	25			3	22	28	J
	30			6	31	40	L
	35			11	37	51	M
	40		1	16	43	63	N

**Colonne 1:** On considérera la plus grande profondeur atteinte au cours de la plongée. Si elle ne figure pas dans la table, on prendra la profondeur indiquée directement supérieure.

*Exemple:* pour 41 m on retient 42 m.

**Colonne 2:** On y comptera le temps écoulé entre l'immersion et le début de la remontée à 15 m/mn. Si il ne figure pas dans la table, on prendra le temps indiqué directement supérieur.

*Exemple:* pour 36' on retient 40'.

**Colonnes 3 à 6:** Elles indiquent, en fonction de la profondeur et la durée de la plongée, les temps des paliers à effectuer aux profondeurs de 15 m (3ème colonne), 12 m, 9 m, 6 m et 3 m (7ème colonne) avant de faire surface. Ces temps doivent être respectés avec précision.

*Exemple:* après une plongée à 33 m d'une durée de 36', il y a lieu de faire un palier de 5' à 6 m et un second de 34' à 3 m.

**Colonne 7:** Elle indique la durée totale de la remontée à 15 m/mn, y compris les paliers éventuels.

*Exemple:* pour la plongée précédente, lire sur la ligne des « 35 m » les paliers successifs = on comptera 5' (pour 40' au lieu de 36') à 6 m de profondeur + 34' (palier à 3 m) + 2' (de sécurité à 3 m) = 41' avant de refaire surface.

**Colonne 8:** Elle attribue la plongée effectuée à un "groupe de plongée successive" sous forme d'une lettre de A, à P, qui sera indispensable pour le calcul de la majoration dans le cas où une deuxième plongée est prévue dans un intervalle entre 15 minutes et 8 heures.

*Exemple:* Groupe L pour la plongée précédente.

Le symbole \* indique qu'il est interdit (sous peine d'une maladie de décompression) de plonger avant un délai d'attente de 8 heures.

### **Remarques importantes**

1) Huit heures après une plongée, on considère que le taux d'azote résiduel dans les tissus est négligeable. Une nouvelle plongée ne sera pas considérée comme successive.

2) Après une plongée, il est capital pour sa sécurité d'inscrire sur le carnet de plongée les données suivantes:

Profondeur maximum atteinte

Durée de la plongée

Heure de sortie

Éventuel problème

3) Même dans la courbe de sécurité, on effectuera un palier "de principe" de 3 minutes à 3 mètres.

### **Justification**

L'utilisation des tables de plongée découle directement de 2 lois physiques vues précédemment, à savoir les lois de Mariotte (compression des gaz) et de Henry (saturation des tissus).

Pour éviter ces problèmes de désaturation trop rapide (loi de Henry), il est nécessaire de respecter des vitesses de remontée qui permettent aux gaz dissous dans les tissus (l'azote en général), d'être évacués par la respiration et donc de prévenir la formation de bulles trop importantes dans les tissus du corps (il y aura toujours des bulles de gaz dans le sang; ce qu'il faut éviter, c'est qu'elles deviennent pathogènes, c'est à dire dangereuses.)

### **Sécurité des tables de plongée**

La décompression est un phénomène complexe. Les conceptions actuelles reposent sur des bases déjà anciennes, énoncées dès 1905 par le physiologiste anglais, John Scott Haldane.

Différentes tables existent de par le monde (on peut citer par exemple les tables PADI, Buhlmann, MN90, NAUI, Comex,...). Ces tables sont toutes basées sur le modèle de **HALDANE**. Par contre, chacun des concepteurs a adapté ce modèle pour que leur tables répondent à la base de données statistique qu'ils avaient, soit en utilisant le modèle de **HALDANE** pur, mais plus poussé (avec d'avantage de paramètre de calcul, comme pour les tables MN90), soit en y ajoutant d'autres modélisations (sur la diffusion des bulles par exemple avec les tables Buhlmann).

Il existe d'autres tables qui ne sont pas basées sur le modèle de **HALDANE**. C'est le cas par exemple des tables de l'US Navy, qui sont basées sur le modèle de **HEMPLEMAN**. Ce modèle est plus récent.

La **FFESSM** préconise l'utilisation des **tables MN90** (créées par la Marine Nationale) lors des examens théoriques, afin que tous les examens se passent sur le même type de tables.

Malgré les énormes progrès réalisés par la recherche scientifique, le risque d'accident de décompression n'est pas totalement écarté, même en respectant les tables de plongée (d'après certaines personnes, les tables permettent de prévoir assez finement les accidents de décompression de type 1 (accidents mécaniques), mais ne sont pas aussi fiables dans les accidents de type 2 (neurologiques)).

Les tables ne seront jamais fiables à 100 %, car on s'aperçoit que beaucoup de paramètres rentrant en ligne de compte dans les calculs de décompression sont des paramètres individuels, spécifiques à chaque individu (fatigue, froid, entraînement, stress,...). Ces paramètres ne peuvent pas apparaître dans des tables destinées à la plongée loisir. Le salut viendra peut-être des ordinateurs de prochaine génération, qui seront de plus en plus capable de prendre en compte l'état du plongeur qui le porte, et qui apprendra au fur et à mesure des plongées (certains commencent à prendre en compte le froid). Mais ne rêvons pas, ce n'est pas encore pour tout de suite.

Néanmoins, l'amélioration des tables de plongée au fil des ans a réduit considérablement le risque d'accident. Nous bénéficions aujourd'hui de près d'un siècle d'utilisation des tables de plongée. Le respect des tables et des règles de prévention est donc la seule solution permettant de réduire au maximum les risques d'accidents.

### **Mise au point des tables de plongée**

La mise au point d'une table de plongée demande un budget de recherche très important et qui peut difficilement être pris en charge par le secteur de la plongée loisir. C'est pour cette raison que le plongeur loisir utilise des tables conçues par d'autres.

Les principales tables utilisées en France ont été conçues pour le domaine militaire ou du travail sous-marin (M.T. 92).

Ces tables sont élaborées et validées pour une population spécifique et relativement homogène, sélectionnée selon des critères précis : âge, taille, poids, sexe, condition physique... Plus un plongeur s'éloigne du profil type utilisé pour l'élaboration des tables qu'il utilise, plus le risque d'accidents augmente. Les tables M.N.90 ont été élaborées par la Marine Nationale et ciblent une population masculine d'environ 30 ans, en bonne condition physique. Nous voyons bien que ce profil n'est pas toujours adapté à la plongée loisir en France (il suffit de regarder autour de soi quand on plonge !!!).

### **Quelles tables choisir ?**

Les avis sont partagés sur ce point. La FFESSM prend en compte les tables MN90 pour l'enseignement et lors d'exams. Pour les plongées, elle ne conseille pas de tables particulières.

Certains médecins recommandent quant à eux l'utilisation des tables M.T.92 (Ministère du travail), jugée plus pénalisantes. Celles-ci seraient plus adaptées à la plongée loisir. Tables plus pénalisantes veut dire augmentation de la durée des paliers de décompression, donc une plus grande sécurité en théorie. Mais certains physiologistes disent que l'augmentation des paliers ne va pas forcément vers la sécurité (car on sature alors d'avantage les tissus longs).

A l'heure actuelle, les plongeurs s'orientent de plus en plus vers des ordinateurs de plongée qui intègrent les tables dans leur processeur. Les ordinateurs sont basés sur les tables et modèles existants. L'intérêt principal d'un ordinateur de plongée est de décharger le plongeur du calcul des paliers. De par leur conception, ils sont même capables de prendre en compte des facteurs aggravants lors de plongée (comme le stress, le froid...).

Mais la sécurité d'une table ne s'évalue pas seulement sur les procédures qu'elle propose, mais surtout d'après les données statistiques issues de son utilisation. Le principe de mise au point de tables de plongée est basé en grande partie sur une étude statistique des accidents connus, et de leur paramètres. Ces données permettent de construire une base de données permettant de mettre en évidence des liens entre les différents accidents. Ainsi, on peut corriger les tables existantes.

Afin de faire évoluer au mieux ces tables, la FFESSM a mis en place depuis 1991 un questionnaire afin de constituer une telle base de données. Plus la base de données sera importante, plus les tables seront sûres et adaptées. Ce questionnaire peut être obtenu à l'adresse suivante : **F.F.E.S.S.M. , 24, quai de Rive Neuve, 13007 Marseille**

## Condition et utilisation des tables

Dans la suite de ce document, nous parlerons uniquement des tables MN90, celles-ci étant utilisées en France pour les formations FFESSM

Elles ont été établies à l'origine par la Marine Nationale pour être utilisées en plongée à l'air par des jeunes de 32 ans en moyenne, en bonne condition physique. C'est pour cette raison que certaines personnes qui s'éloignent de ce profil type (embonpoint, plus de 40 ans, mauvaise condition physique,...) devront adopter une procédure de décompression plus pénalisante. La profondeur maximale d'utilisation est de 60 mètres. Les profondeurs de 62 et 65 mètres existent dans le cas où un plongeur dépasserait accidentellement 60 mètres.

La vitesse de remontée préconisée est de 15 à 17 mètres par minute.

Deux plongées par 24 heures sont prévues.

Il est conseillé d'attendre 12 heures avant de prendre un avion (c'est la durée que met l'organisme pour éliminer l'azote contenu dans le sang qui a été emmagasiner durant la plongée)

Ces tables ne sont pas prévues pour les plongées en altitude.

Ces tables sont prévues pour la plongée loisir, c'est à dire sans effort particulier au fond, et pour une nage tranquille (0,5 noeud, c'est à dire inférieure à 1 km/h)

**REMARQUE : En Novembre 97, la Marine Nationale a apporté quelques modifications quant à l'utilisation des tables M.N.90 : On ne prend plus en compte la colonne "Durée de la remontée"**

**La vitesse de remontée entre les paliers est de 1 mètre en 10 secondes.** Les paliers avec inhalation d'oxygène : la durée de chacun des paliers à l'oxygène pur est égale au 2/3 de la durée du palier donné par les tables MN90, arrondie à la minute supérieure. Cette réduction n'est appliquée que si la durée totale des paliers réduit à l'oxygène pur est supérieure ou égale à 5 mn. Si cette durée est inférieure à 5 mn, les paliers sont effectués à l'oxygène pur sans réduction, c'est à dire pour les durées données par les tables MN90.

En tant que plongeur autonome, il est vital de maîtriser l'utilisation et la manipulation des tables de plongées.

### **Définitions concernant une plongée simple**

Le but des tables de plongée est de définir les critères qu'un plongeur doit respecter afin d'éviter tout dégazage anarchique d'azote dans le corps et, par suite, tout accident de décompression.

Ces critères ont été définis de manière empirique et affinés expérimentalement sur des plongeurs militaires (entraînés et en bonne forme physique). Depuis quelques années, on tient également compte des accidents « non mérités ».

### Critères à respecter

Ces critères sont au nombre de deux.

- La **vitesse de remontée** : celle-ci doit être de 15 m/mn (et de 6 m/mn entre chaque palier). Il s'agit donc d'une *donnée* qui est totalement indépendante du profil et du type de plongée effectuée.
- La profondeur et la **durée des paliers** à effectuer. Quand des paliers sont nécessaires, ceux-ci sont toujours à effectuer aux mêmes profondeurs (3m, 6m, 9m, 12m, 15m). La durée des paliers, en revanche, dépend des paramètres de la plongée et doit donc être *déterminée* grâce aux tables de plongée.

### Qu'appelle-t-on paramètres d'une plongée ?

Ces paramètres sont au nombre de deux.

- **La profondeur** : il s'agit de la profondeur **maximale** caractérisant la plongée. On la note P.
- **La durée** : il s'agit du temps total **entre la mise à l'eau et le début de la remontée**. On la note T. La descente est donc comprise dans T, mais pas la remontée à partir du moment où le déplacement vertical s'effectue à une vitesse de 15 m/mn.

**Note importante :** les paramètres d'une plongée dépendent du type de la plongée, c'est-à-dire qu'ils peuvent être majorés pour pénaliser une plongée donnée.

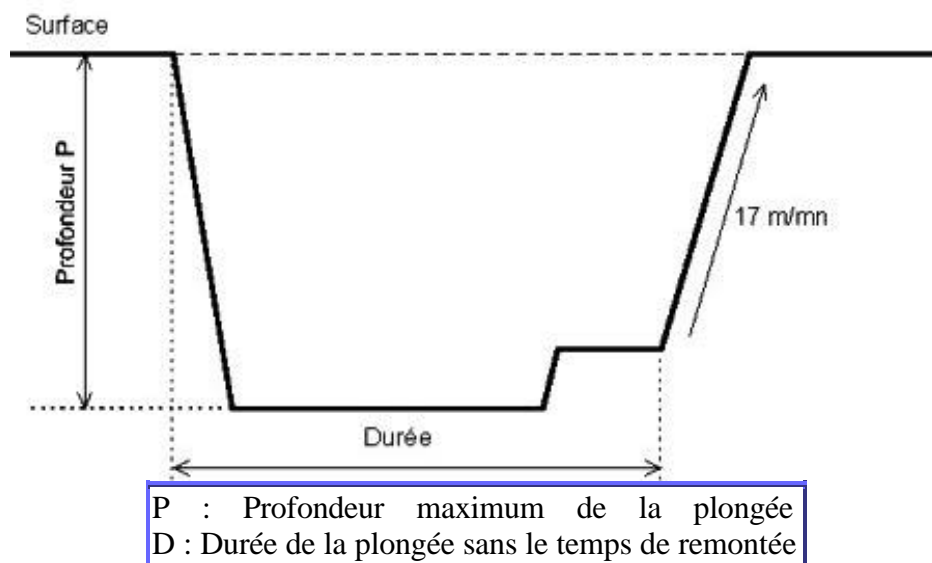
### Quelques définitions

- **Heure de sortie :** heure à laquelle on termine une plongée, à savoir l'heure à laquelle on refait surface.
- **Intervalle :** durée entre l'heure de sortie d'une plongée et le début de la plongée suivante.
- **Palier :** profondeur à laquelle on doit rester stabilisé pendant une durée déterminée grâce aux tables.

Dans le cas où aucun palier n'est à effectuer, il est souhaitable néanmoins de réaliser un palier de sécurité de 3 minutes à 3 mètres.

### Conventions pour les calculs de tables (épreuves théoriques)

- Vitesse de remontée jusqu'au premier palier = 15 m/mn.
- Vitesse de remontée entre paliers (ou du dernier palier à la surface) = 6 m/mn (soit une durée de 30 s).
- Durée totale de remontée : à arrondir à la minute immédiatement supérieure.
- **Attention :** La durée de remontée dépend de la profondeur à laquelle on est au moment où l'on commence la remontée. Cette profondeur n'est pas forcément celle considérée pour le calcul des paliers. Par exemple, un plongeur peut descendre à une profondeur de 40 mètres, se balader le long d'un tombant en remontant petit à petit à 20 mètres et de là, remonter à la surface à la vitesse de 15 m/mn. Dans un tel cas, la profondeur à considérer pour le calcul des paliers est 40 mètres (i.e. la profondeur maximale atteinte) et celle à considérer pour le calcul du temps de remontée est 20 mètres (i.e. la profondeur réelle à laquelle est le plongeur au moment où il décide de remonter).



### Utilisation des tables de plongée MN 90

Profondeur et durée : Si la profondeur exacte de notre plongée ne se trouve pas dans la table, prendre la profondeur immédiatement supérieure. Si la durée exacte de la plongée ne se trouve pas dans la table, prendre la durée immédiatement supérieure.

Durée totale de la remontée : Durée de la profondeur par rapport à la profondeur indiquée + le paliers éventuels

Groupe de Plongée successive : Cette lettre représente la tension d'azote résiduel que nous avons après la première plongée, quantité d'azote qu'il faudra prendre en compte dans le cas où nous effectuons une deuxième plongée .

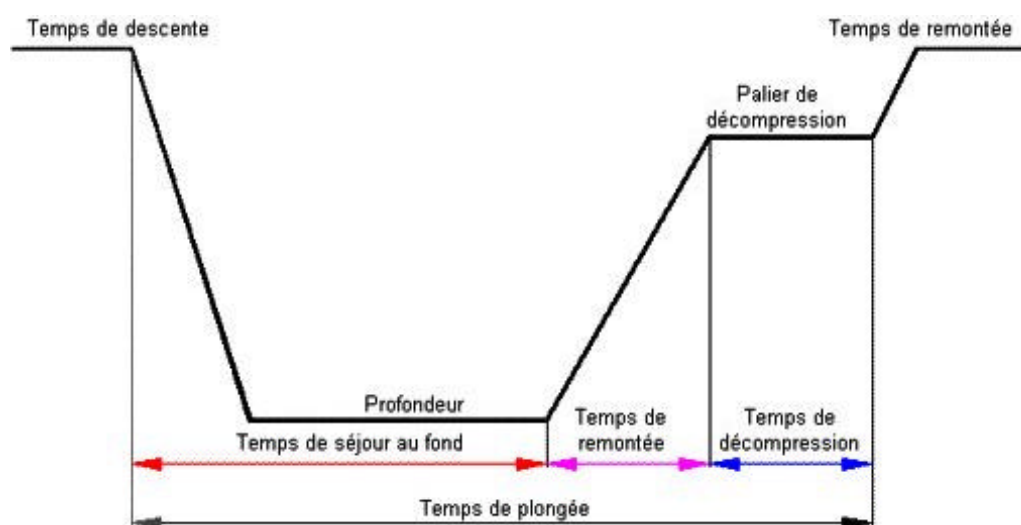
Dans un problème : Toujours faire un schéma très clair (cela permet d'éviter des erreurs d'inattentions). Y mettre le plus d'informations possible : toutes les profondeurs , toutes les durées , toutes les heures, tous les groupes de plongées successives.

## Plongée simple

C'est la première plongée, ou la seule plongée de la journée ou **d'une plongée après 8h30 de la sortie précédente**. **Exemple** : Je plonge à 10 h et je descend à 42 m. 15 minutes après mon immersion, je remonte entre 15 et 17 m/mn. Ma profondeur maximum est de 42 m. Mon temps de plongée est de 15 mn . La lecture de la table me donne donc un palier de 5 mn à 3 m. Ma durée de remontée sera de 8 mn (5mn de palier plus 3 mn de remontée) et ma lettre de sortie sera la lettre G (elle sert lors de plongée successives qui seront vues plus loin).

## Graphique de plongée

Il est parfois utile de représenter une plongée à l'aide d'un schéma pour mieux l'illustrer **et effectuer les calculs nécessaires**.



Remarque:

Le plan de décompression indiqué par les tables utilise la "méthode des valeurs maximales", c'est à dire qu'elle calcule les paliers comme si la profondeur maximum atteinte était celle de toute la plongée.

Elle donne donc des temps de décompression souvent supérieurs à ceux d'un ordinateur ou calculés par la "méthode des valeurs moyennes"(celle-ci étant toutefois trop compliquée pour être utilisée sous l'eau).

Exemples d'utilisation des tables de plongée

1) On effectue une plongée à l'air de 10' à 31 m. C'est une plongée dans la courbe de sécurité et l'on peut sortir sans faire de palier en remontant à la vitesse de 15 m/mn. Si l'on effectue tout de même le palier "de principe" à 3 m, la durée de cette remontée sera de 2' + 3' soit 5' et le groupe de plongée successive sera D.

2) Après une plongée de 24' (prendre la valeur 25' de sécurité) à 31 m, il y a lieu de faire 6' de palier à 3 m. La durée totale de la remontée sera de 6' + 2' soit 8' et le groupe de successive H.

3) Dans le schéma ci dessus, on plonge dans la courbe de sécurité (32 min à 19 m). La durée de remontée est de 2 minutes, et le plongeur fait un palier de principe à 3m de 1 minute seulement.

Le groupe de plongée successive est E.

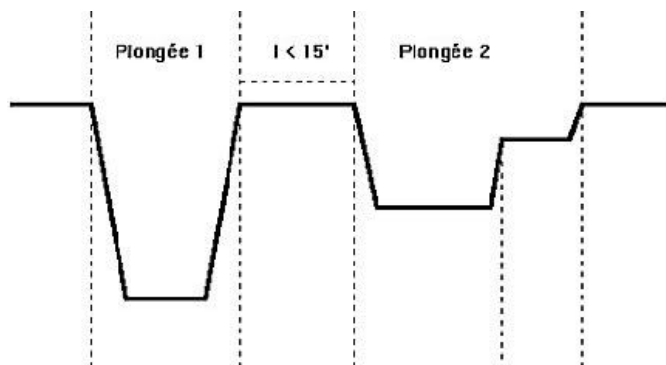
## Plongées consécutives

On appelle "**consécutives**" une plongée effectuée **moins de quinze minutes** après la sortie d'une première plongée. Pour connaître la procédure de remontée, on considère l'ensemble des deux plongées comme une seule et même plongée, de sorte que:

1) La durée sera la somme des durées: de la première plongée + de la remontée en surface y compris les paliers + de la deuxième plongée .

2) La profondeur sera la plus grande profondeur atteinte au cours des deux plongées.

On lit alors directement sur la table les paliers éventuels à effectuer. On prendra garde, avant de replonger en consécutive, de s'assurer que l'on ne va pas sortir de la table pour pouvoir calculer les paliers.



### Exemple:

Un plongeur refait surface après avoir séjourné 20 minutes à 32 mètres.

Il a donc fait 3 minutes de palier à 3 m, soit une remontée d'une durée de 5 minutes.

Onze minute après, il est obligé de replonger pour dégager son ancre coincée sous un rocher à 34 m.

Cela lui prend 4 minutes, après quoi il remonte à 15 m/mn et consulte sa table:

la durée à prendre en compte est de 20 minutes + 5 minutes + 4 minutes = 29 minutes

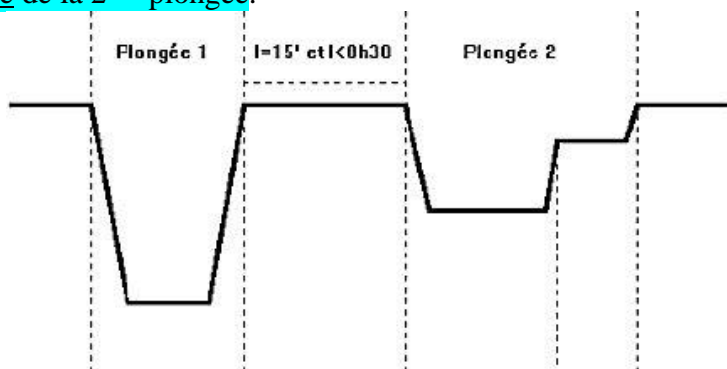
la profondeur à retenir est de 34 m

Il devra donc faire un palier de 1 minute à 6 mètres et 20 minutes à 3 m (comme dans le cas d'une seule plongée de 30 minutes à 35 m).

Remarque: On considère qu'une consécutive est une plongée très éprouvante pour l'organisme et que l'on doit, dans la mesure du possible, attendre au moins 15 minutes avant de replonger.

## Plongées successives

On appelle **successive** une plongée effectuée **entre 15 minutes et 8 heures** après la sortie d'une première plongée. Pour connaître la procédure de remontée dans ce cas, il faut considérer: **le groupe de plongée successive** (lettre de A à P lue dans la colonne 9 de la table) - **le temps écoulé** entre la sortie de la première plongée et le début de la seconde, (**intervalle de surface**) - **la profondeur** de la 2<sup>ème</sup> plongée - **la durée de la 2<sup>ème</sup> plongée**.



À l'aide des trois premiers paramètres, on détermine sur la table de plongée successive la **MAJORATION** (en minutes) dont sera affectée la 2<sup>ème</sup> plongée.

Puis, on utilise les tables de plongée simple en considérant une plongée fictive dont: la profondeur est celle de la 2<sup>ème</sup> plongée --- la durée est la somme de la majoration et de la durée réelle de la 2<sup>ème</sup> plongée.

Exemple:

Après une plongée de 33 minutes à 27 mètres, deux plongeurs sortent de l'eau à 10 h 48. À 12 h 00, ils effectuent une 2<sup>ème</sup> plongée de 10 minutes à 19 mètres.

Dans la table, on lit que le groupe de plongée successive pour une plongée de 33 minutes à 27 mètres (on prend 28 m) est I.

Le temps écoulé entre les deux plongées est de 1 heure et 12 minutes (mais on considérera 1 h car 1 h 12 n'existe pas sur la table).

**INTERVALLES**

Dans le tableau "**Détermination de l'azote résiduel**", à l'intersection de la ligne "I" et de la colonne 1 h, on lit la valeur 1,08 pour le coefficient.

Dans le tableau "**Détermination de la majoration**", on cherche à l'intersection de la ligne "1,11" (on prend 1,11 car 1,08 n'existe pas) et de la colonne "20 m" (on prend 20 m car 19 m n'existe pas), on lit une majoration de 37 minutes.

Procédure de remontée: La plongée fictive que l'on considère a pour profondeur 20 mètres et pour durée 10 minutes + 37 minutes = 47 minutes

La table de plongée indique pour une plongée de 50 minutes (on prend 50 minutes car 47 minutes n'existe pas) à 20 m un palier de 4 minutes à 3 m. La durée totale de la remontée sera de 4 minutes + 1,2 minutes, arrondi à 6 minutes.

Remarques:

Détermination de l'azote résiduel: si le temps entre deux plongées ne figure pas dans la table, prendre la valeur immédiatement **inférieure**.

Profondeur de la 2<sup>ème</sup> plongée: si la valeur ne figure pas dans la table, prendre la valeur immédiatement **supérieure**.

Détermination de la majoration, si la valeur ne figure pas dans la table, prendre la valeur immédiatement **supérieure**.

Au cours d'une successive, le calcul de la majoration peut se faire sous l'eau avant de remonter. Mais il est préférable de se fixer une profondeur maximale selon un calcul fait à l'avance. On évitera aussi de mauvaises surprises, comme une quantité d'air insuffisante pour les paliers ou de longs paliers dans une eau froide.

**D'une façon générale, une troisième plongée est interdite sous peine d'une maladie de décompression.** Dans un cas exceptionnel (secours à un plongeur en détresse par exemple), on peut calculer la majoration comme pour une deuxième plongée, avec cependant des risques réels, car aucune expérimentation sérieuse n'a été faite dans ce cas.

Après une attente de 8 heures, on considère que tous les tissus sont pratiquement désaturés et que le coefficient d'azote est voisin de la normale soit 0,8. On peut alors utiliser à nouveau la table de plongée simple.

La vitesse de remontée préconisée est toujours de 15 m/mn, soit 1 mètre toutes les 4 secondes.

Les conditions dans lesquelles un palier doit être effectué sont les suivantes:

- A la profondeur prescrite

- En position horizontale

- La ventilation doit être efficace

- Toute activité physique importante doit être suspendue

- **La durée des paliers doit être respectée mais on peut rallonger celle du palier à 3 m, surtout pour les personnes âgées, obèses ou très fatiguées.**

Même dans le cas d'une remontée sans palier obligatoire, il est recommandé de faire un palier "de principe" ou "de sécurité" de 3 minutes à 3 mètres.

## Les tables MN90 et la détermination des groupes de plongées successives

C'est lors de ce type de plongées successives qu'intervient la notion de groupe de plongées successives. Déterminer d'après ce groupe (trouvé lors de la première plongée) et l'intervalle, le taux d'azote résiduel

X1	INTERVALLES																										
	15	30	45	1h	1h30	2h	2h30	3h	3h30	4h	4h30	5h	5h30	6h	6h30	7h	7h30	8h	8h30	9h	9h30	10h	10h30	11h	11h30	12h00	
A	0,84	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81														
B	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81									
C	0,92	0,91	0,9	0,89	0,88	0,87	0,85	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81							
D	0,97	0,95	0,94	0,93	0,91	0,89	0,88	0,86	0,85	0,85	0,84	0,83	0,83	0,85	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81					
E	1	0,98	0,97	0,96	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81			
F	1,05	1,03	1,01	0,99	0,96	0,94	0,91	0,9	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
G	1,08	1,06	1,04	1,02	0,98	0,96	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87	0,85	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
H	1,13	1,1	1,08	1,05	1,01	0,98	0,95	0,93	0,91	0,89	0,88	0,86	0,85	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
I	1,17	1,14	1,11	1,08	1,04	1	0,97	0,94	0,92	0,9	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
J	1,2	1,17	1,14	1,11	1,06	1,02	0,98	0,96	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
K	1,25	1,21	1,18	1,15	1,09	1,04	1,01	0,97	0,95	0,92	0,9	0,89	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
L	1,29	1,25	1,21	1,17	1,12	1,07	1,02	0,99	0,96	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
M	1,33	1,29	1,25	1,21	1,14	1,09	1,04	1,01	0,97	0,94	0,92	0,9	0,89	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81
N	1,37	1,32	1,28	1,24	1,17	1,11	1,06	1,02	0,98	0,95	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87	0,85	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81
O	1,41	1,36	1,32	1,27	1,2	1,13	1,08	1,04	1	0,97	0,94	0,92	0,9	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81
P	1,45	1,4	1,35	1,3	1,22	1,15	1,1	1,05	1,01	0,98	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81

*1<sup>er</sup> volet de la 2<sup>ème</sup> carte des tables MN90 : « INTERVALLES »*

### Remarque

On prendra comme intervalle celui juste inférieur à l'intervalle réel

Puis on peut trouver d'après la profondeur de la deuxième plongée la majoration qu'il faut ajouter au temps de cette deuxième plongée.

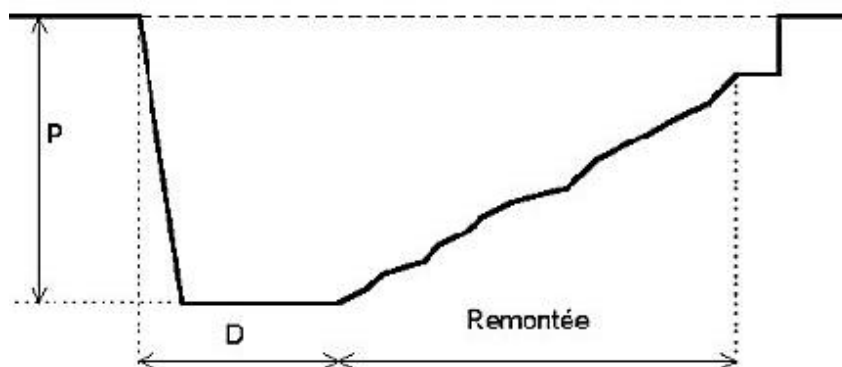
Azote résiduel	PROFONDEUR DE LA 2 <sup>e</sup> PLONGÉE					
	12 m	15 m	18 m	20 m	22 m	...
0,82	4	3	2	2	2	...
0,84	7	6	5	4	4	...
0,86	11	9	7	7	6	...
0,89	17	13	11	10	9	...
0,92	23	18	15	13	12	...
0,95	29	23	19	17	15	...
0,99	38	30	24	22	20	...
1,03	47	37	30	27	24	...
1,07	57	44	36	32	29	...
1,11	68	52	42	37	34	...
1,16	81	62	50	44	40	...
1,2	93	70	56	50	45	...
1,24	106	79	63	56	50	...
1,29	124	91	72	63	56	...
1,33	139	101	79	70	62	...
1,38	160	114	89	78	69	...
1,42	180	126	97	85	75	...
1,45	196	135	104	90	80	...

### Remarque

Pour le taux d'azote résiduel on prend celui juste supérieur ou égal

Pour le profondeur il faut prendre celle prise en compte pour la décompression (donc la profondeur supérieure ou égale)

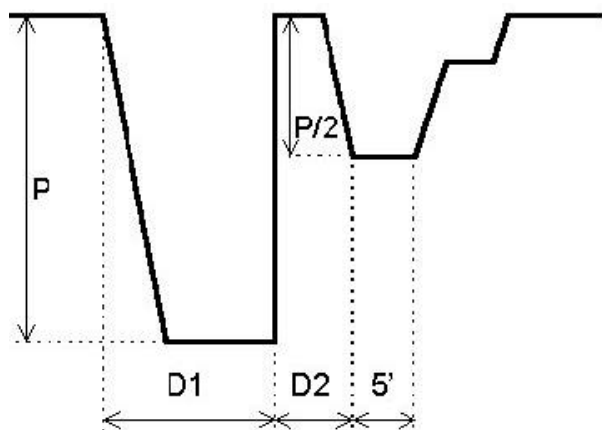
## Les remontées lentes



Il s'agit d'une plongée où la vitesse de remontée est inférieure à 17 m/mn. Dans ce cas, la durée de la remontée doit être incluse dans le temps de plongée. Le temps de plongée s'arrêtera lorsque la remontée sera faite à une vitesse comprise entre 15 et 17 m/mn. Dans mon exemple précédent, 15 minutes après mon immersion, je remonte très lentement le long d'un tombant pendant 2 mn. Ces 2 minutes sont donc à compter dans mon temps de plongée, qui est alors de 17 minutes et non plus de 15 minutes.

Si je regarde ma table, la valeur de 17 minutes en temps de plongée n'apparaît pas. Je prends dans ce cas la valeur supérieure qui est 20 minutes. J'aurais donc un palier à faire de 1 mn à 12 mètres et de 12 minutes à 3 mètres. Ma lettre de sortie sera H.

## Les remontées rapides



Si la vitesse de remontée est supérieure à 17 m/mn (par exemple à la suite d'une panne d'air ou d'un gonflage inopiné de la bouée), la remontée est qualifiée de rapide. On doit alors:

- Rester au maximum 3 minutes en surface
- Redescendre dès que possible à la moitié de la profondeur de la plongée et y rester 5 minutes
- Remonter ensuite à la vitesse de 15 m/mn et calculer les paliers en considérant:

Comme profondeur la profondeur maximum de la plongée. Et comme durée, le temps total écoulé depuis l'immersion jusqu'à la fin du palier de 5 minutes à la demi-profondeur.

## Palier interrompu

Si après une plongée nous avons des paliers à effectuer, et si au cours d'un de ces paliers, nous avons un ennui quelconque (panne d'air), et que nous sommes obligés d'interrompre ce palier nous devons recommencer le palier interrompu, et continuer la procédure.

## Remarques

La procédure ci-dessus est empirique et rien ne permet d'en garantir l'efficacité.

- Les remontées rapides doivent à tout prix être évitées car elles sont dangereuses et font courir au plongeur un risque de dégazage anarchique dans certains tissus dits courts (le sang par exemple). *L'exercice qui consistait à gonfler sa bouée au fond, à remonter rapidement*

*pour s'arrêter brutalement à 3 m était dangereux et est maintenant interdit.* Il a été remplacé par la remontée contrôlée, plus difficile certes, mais plus utile et moins dangereuse. De telles remontées doivent toujours se faire en début de plongée lorsque la saturation en azote est moindre.

- L'interruption d'un palier est une situation qu'il faut aussi éviter à tout prix, sous peine d'accident. Si cela se produit malgré tout, il faut redescendre au palier précédant celui qui a été interrompu et le refaire normalement, de même que les suivants.
- Certaines précautions contribuent à éviter une remontée rapide ou l'interruption d'un palier: Ne jamais plonger seul - Laisser une bouteille dans la zone des paliers - Prévoir un deuxième détenteur pour au moins un plongeur de la palanquée.

## **Plongées particulières (nuit, lac, altitude)**

### **Particularités de la plongée de nuit**

- Jamais en mer ouverte, **agitée ou dans un courant.**
- A but d'exploration ou de photo, **car beaucoup d'animaux marins sortent la nuit.**
- Par binômes de plongeurs confirmés ayant chacun une lampe **et un des deux un phare (20 W minimum).**
- Sur un fond connu, d'une profondeur maximum de 20 mètres et d'une durée limitée (**rester dans la courbe de sécurité**).
- Repas léger avant le départ.
- Bateau ou berge éclairés.
- Boissons chaudes prévues à la sortie.
- 

### **Particularités de la plongée en lac**

- La température est généralement inférieure. Une combinaison complète et épaisse (ou étanche) est indispensable. On peut y verser de l'eau chaude avant le départ. Le signe « j'ai froid » d'un des plongeurs entraîne la remontée de toute la palanquée.
- L'eau est plus trouble et la visibilité moins bonne. Il faut donc rester bien groupé, à portée de vue de ses camarades. En eau très trouble, se tenir par le bras. Une lampe est peu utile pour éclairer le milieu car la vase en suspension diffuse la lumière (comme celui des phares dans le brouillard), mais elle permet d'être mieux repéré..
- L'altitude est parfois supérieure. Dans ce cas, se conformer aux tables de plongée en altitude.
- La densité de l'eau douce est plus faible que celle de l'eau de mer à cause de l'absence de sel, d'où une poussée d'Archimède réduite de 3%. Mettre 1 à 2 kilos de lest en moins.

### **Particularités de la plongée en altitude**

La pression atmosphérique, qui est de 1 bar au niveau de la mer, diminue, à mesure que l'on monte, de 0,1 bar tous les 1000 mètres. Il est donc nécessaire d'en tenir compte, non seulement pour étalonner son profondimètre (si c'est possible), mais surtout pour le calcul des paliers de décompression.

Il existe des tables spéciales (par exemple: Bühlmann en Suisse) pour la plongée en altitude de 701 à 2500 mètres.

On peut aussi consulter une table utilisant la "méthode de la profondeur équivalente" qui, en fonction de l'altitude et de la profondeur réelle, donne une profondeur fictive qu'il faudra prendre en considération pour le calcul des paliers.

## Calcul de la consommation d'air

### Introduction :

En surface (à la pression de 1 bar), un adulte ayant une activité physique légère consomme environ 20 à 25 litres d'air par minute.

Sous l'eau, l'air est fourni à la pression ambiante. Ainsi, à 10 mètres (où la pression est de 2 bars), on respire 20 à 25 litres x 2 bars, soit 40 à 50 litres par minute.

Plus on plonge profond, plus on consomme d'air et il est utile de calculer à l'avance sa consommation pour ne pas avoir de mauvaise surprise...

### Calcul de la consommation totale d'air en plongée

La consommation totale est la somme des quantités d'air consommées pendant le séjour au fond (y compris la descente)

pendant la remontée

pendant le(s) palier(s)

plus 10% comme marge de sécurité.

## Voyages en avion et montagne après une plongée

Un vol en avion ou l'ascension d'une montagne après une plongée peut entraîner une maladie de décompression. En principe, il n'y a pas de risque si **l'on attend 8 heures ou plus après la plongée**, car l'azote dissout est pratiquement totalement éliminé. Pour des délais plus brefs, des tables (Bühlmann, Suisse) donnent les délais minimum d'attente en fonction de la plongée (définie selon son "groupe répétitif" et l'altitude.