

LA SATURATION

La saturation d'un liquide par un gaz est la quantité maximale que ce liquide peut dissoudre à température et pression constantes. La saturation n'est pas atteinte immédiatement. La courbe représentant

cette saturation est d'une forme exponentielle. Le temps au bout duquel la quantité de gaz dissous est égale à la moitié de la quantité dissoute à saturation définit la période.

ANALOGIE ENTRE QUANTITÉ DE GAZ DISSOUS ET TENSION

Soit un liquide dégazé et soumis à un gaz pur à la pression P .

Nous avons vu que le gaz va se dissoudre dans le liquide. Lorsque nous arriverons à la saturation, il y aura autant de gaz entrant dans le liquide pur que de gaz en sortant (état d'équilibre). On peut donc dire que le gaz dissous exerce sur le gaz libre une pression égale à la pression du gaz au-dessus du liquide. Pour éviter toute ambiguïté, nous appellerons cette pression exercée par le gaz dissous : *tension de gaz dissous*. A saturation, la tension du gaz dissous est donc mesurée par la valeur P , pression du gaz au-dessus du liquide.

La quantité dissoute dans cette première expérience est de q mesuré en masse. Arrêtons maintenant l'expérience lorsque la quantité dissoute est de $\frac{q}{2}$. Peut-on dire que si à une quantité dissoute correspond une tension P , à une quantité $\frac{q}{2}$ correspondra une tension $\frac{P}{2}$? Menons donc l'expérience, mais de telle sorte que la saturation ait lieu, le gaz au-dessus du liquide étant à une pression de $\frac{P}{2}$. A cette pression $\frac{P}{2}$ correspond une quantité dissoute de $\frac{q}{2}$, soit une tension de $\frac{P}{2}$ par définition.

Inversement, on peut dire que, quand la dissolution était de $\frac{q}{2}$ dans la deuxième expérience, l'équilibre à ce moment aurait pu être atteint avec une pression du gaz au-dessus du liquide de $\frac{P}{2}$. A ce moment de l'expérience, la tension du gaz dans le liquide avait donc une valeur de $\frac{P}{2}$.

Cette analogie est extrêmement importante ; elle permet d'éviter l'emploi des grandeurs (masse dissoute, volume dissous) variables avec la pression, le gaz, le liquide.

Ainsi, si nous prenons un liquide saturé avec de l'hélium ou de l'azote à une pression P , nous aurons des valeurs différentes si nous mesurons la quantité dissoute en masse ou en volume ; par contre la tension de l'hélium ou de l'azote dans le liquide aura exactement la même valeur : tension = P .

La tension nous permet donc d'éliminer des valeurs très variables : qualité des gaz ; qualité des liquides.

De plus, les équations permettant de calculer les tables de plongées seront homogènes en temps et pression, ce qui simplifie énormément le travail.

Il convient de signaler que si un liquide dissout une certaine quantité de gaz, ce gaz va exercer à l'intérieur du liquide

une certaine tension. Cette tension ne variera pas, la quantité de gaz dissous

restant la même, si le liquide (incompressible) est soumis à une pression supérieure.

LA DIFFUSION

Prenons une certaine quantité de liquide contenu dans un récipient de forme quelconque et soumis par un gaz à une pression P . Nous allons avoir une dissolution qui sera immédiate à la surface de séparation. Les molécules gazeuses ainsi dissoutes vont envahir le liquide par

diffusion. Ce phénomène sera d'autant plus rapide que la surface de contact sera grande. Si la surface de contact est infinie, la vitesse de dissolution sera infinie. Par contre, si la surface de contact est infiniment petite, la dissolution sera infiniment lente.

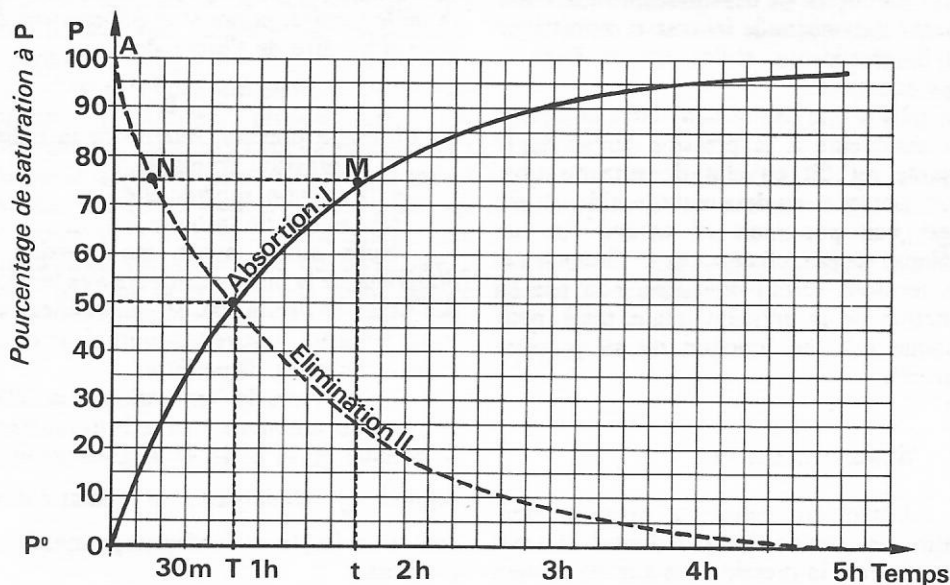
SATURATION-DÉSATURATION-SURSATURATION

Nous avons vu que, lorsqu'un liquide est soumis à un gaz sous pression, le gaz va se dissoudre dans le liquide ; si le liquide est dépourvu de gaz au début de

l'expérience, la dissolution du gaz au bout du temps t sera donnée par la formule :

$$p = P(1 - e^{-kt})$$

où p est la tension du gaz dissous, P la



9. Courbe théorique d'absorption et d'élimination de l'azote par un tissu.

pression du gaz au-dessus du liquide et k un coefficient qui dépend essentiellement de la forme occupée par le liquide.

La courbe représentative de p en fonction de t est une exponentielle :

$$\frac{p}{P} = 1 - e^{-kt}$$

Si nous étions partis d'un liquide saturé à une valeur p_0 , la formule aurait été :

$$p = p_0 + (P - p_0)(1 - e^{-kt})$$

$$\frac{p - p_0}{P - p_0} = 1 - e^{-kt}$$

DÉSATURATION

Inversement, si un liquide saturé à une pression P est ramené à une pression P_0 , la saturation de liquide va passer de la valeur $p = P$ à la valeur $p = P_0$.

La courbe de désaturation va être une courbe exponentielle inverse et symétrique de la précédente, si les valeurs P et P_0 sont identiques.

Tant que la tension dans le liquide est supérieure à la pression ambiante, le liquide est dit en état de sursaturation.

Lorsque, au-dessus du liquide, le gaz n'est pas pur mais se trouve être un mélange de gaz, chaque gaz se dissoudra et les tensions seront calculées, non pas en fonction de la pression totale, mais, pour chaque gaz, en fonction de sa pression partielle.

SURSATURATION

Lorsqu'on abaisse la pression extérieure, la tension des gaz dissous devient supérieure à la pression des gaz au contact

avec le liquide, celui-ci est dit en état de sursaturation.

La sursaturation est un état instable et il existe une valeur limite du rapport tension du gaz dissous à pression ambiante au-delà de laquelle l'équilibre instable est rompu et nous avons un dégazage.

Cette limite définit le rapport de sursaturation critique. En physique, on rencontre très souvent des valeurs de ce coefficient allant de 10 à 100 ou même 1 000, pour des liquides dépourvus de toute hétérogénéité (poussière, turbulence, variation de pression par cavitation...). Par contre, dans l'organisme, les coefficients de sursaturation critiques sont de l'ordre de 2.

Cette faible valeur est due au fait que, dans l'organisme, il existe ce que l'on appelle des noyaux gazeux qui très facilement peuvent devenir des bulles gazeuses et entraîner le dégazage. En effet, une fois la bulle formée, la pression à l'intérieur de celle-ci va être de l'ordre de :

$$P_b = P + \frac{2\gamma}{R}$$

où P_b est la pression interne de la bulle,

P la pression ambiante,

γ la tension superficielle,

r le rayon de la bulle.

Nous allons avoir une pression à l'intérieur de la bulle supérieure à la tension des tissus environnants, le gaz intérieur va avoir tendance à se redissoudre dans ceux-ci et la bulle va disparaître.

Mais si, lors de l'apparition de la bulle, la pression ambiante tombe brusquement, la volume de la bulle va augmenter et le rapport $\frac{2\gamma}{R}$ diminuant, la redissolution sera trop faible et le dégazage massif se produira.

POIDS APPARENT DANS L'EAU

Dans l'air, au niveau de la mer, le poids d'un objet est considéré comme pratiquement invariable. La pesanteur maintient les différents corps, et notamment l'homme, prisonniers au sol.

Sous l'eau, elle ne cesse pas d'exister, mais l'eau exerce une poussée, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de liquide déplacé (principe d'Archimède). Cette poussée n'est plus négligeable, comme dans le cas de l'air, puisqu'elle passe de 1,3 gramme à 1 000 grammes environ par litre. La notion de poids est remplacée par celle de poids apparent, qui est le poids diminué de la poussée de l'eau. Ces deux forces, pesanteur et poussée, déterminent l'équilibre des corps immergés. Cependant, la masse d'un corps n'étant pas modifiée lorsqu'on le plonge dans l'eau, l'inertie subsiste : le scaphandrier qui heurte ou qui déplace un objet s'en aperçoit.

Dans le cas des corps incompressibles, la poussée, proportionnelle au volume, ne varie pas avec la profondeur ; le poids apparent garde toujours la même valeur. Un corps incompressible coule, ou remonte et flotte à la surface, suivant que sa densité est supérieure ou inférieure à celle de l'eau. Si ce corps a la même densité

que l'eau, son poids apparent est nul et il reste en équilibre à la profondeur où on l'a placé.

Les volumes gazeux varient avec la pression, la poussée qu'ils reçoivent subit évidemment les mêmes variations. Une bulle de gaz remontera donc vers la surface avec une force croissante en se dilatant progressivement.

En général, les volumes gazeux, tel l'air contenu dans un sac souple, sont liés à des corps incompressibles de poids apparent invariable : le sac lui-même, etc. Le poids apparent d'un tel système ne peut être défini qu'en fonction de la profondeur. Il est nul à la profondeur où la poussée équilibre le poids. Mais cet équilibre est instable : à la moindre amorce de remontée, le sac se gonfle, s'allège et accélère son mouvement. Une chute s'accélère de même par la compression qu'elle entraîne. L'instabilité est d'autant plus grande que l'on est plus près de la surface, puisque les variations de volume sont plus rapides.

Ces notions sont d'une extrême importance. Elles commandent l'équilibre et les mouvements en cours de plongée, et nous les retrouverons à propos des accidents de scaphandriers.

4. Tables de plongée à l'air

Historique

C'est à Paul Bert que l'on doit les premiers protocoles de décompression destinés à éviter les accidents dont étaient victimes les travailleurs en caisson. Il préconisait une remontée lente à vitesse uniforme. Cependant, bien que la durée de cette remontée soit très longue, des accidents se produisaient parfois encore. C'est seulement en 1907, à l'issue des travaux du « Comité de plongée profonde » de l'Amirauté anglaise que furent adoptées des règles assurant la sécurité du retour à la pression atmosphérique pour les scaphandriers et les travailleurs en caisson. Ces règles se résumaient en une table de remontée par paliers, œuvre du physiologiste J.S. Haldane. Elles furent bientôt universellement employées.

La Marine américaine chercha ensuite à perfectionner les tables de Haldane, et ses travaux lui permirent de publier des tables pour la plongée à l'air, jusqu'à 90 mètres, et des tables pour la plongée à l'hélium, jusqu'à 183 mètres. En 1948, la Marine française rendit réglementaire une table pour la plongée à l'air jusqu'à

40 mètres, traduction dans le système métrique de la table américaine. Toutes ces tables, destinées à l'usage des scaphandriers, étaient calculées pour une vitesse de remontée arbitraire de 7,50 mètres par minute.

L'apparition des appareils respiratoires autonomes de plongée actuellement utilisés dans le monde entier, que les Anglo-Saxons appellent S.C.U.B.A. (*self contained underwater breathing apparatus*), conduisit à modifier la valeur de certains éléments pris en considération dans le calcul des tables (vitesse de descente et de remontée, durée du séjour au fond) et à se pencher sur le problème des plongées successives. Les Marines britannique et américaine ont adopté de nouvelles tables pour la plongée à l'air, jusqu'à 90 mètres, admettant une vitesse de remontée de 18 mètres/minute. Les Italiens (docteur Gaspare Albano), en utilisant une nouvelle hypothèse de calcul, ont établi des tables pour les plongées à l'air de courte durée jusqu'à 90 mètres.

La Marine Nationale a rendu régle-

mentaire une table pour la plongée à l'air jusqu'à 85 mètres, calculée et expérimentée par le G.E.R.S., la vitesse de remontée étant de 17 mètres/minute. Cette table fournit un élément (coeff. C) servant à calculer les durées des plongées successives selon la méthode imaginée en 1948 par le G.E.R.S. (Cdt Alinat).

Les tables actuellement en service dans les différents pays ne sont pas exactement semblables. Si les vitesses de remontée sont sensiblement les mêmes, les paliers ne sont pas identiques en profondeur et en durée. On peut toutefois considérer qu'elles garantissent la sécurité,

à condition évidemment d'être respectées.

Les difficultés rencontrées dans l'élaboration des tables de plongée sont dues surtout à la nature des vérifications qu'elles comportent. En effet, quelles que soient les hypothèses et les méthodes utilisées pour calculer le temps consacré à la remontée, temps perdu pour le plongeur et son entourage, la sécurité d'une table doit être contrôlée, ce qui implique nécessairement une expérimentation humaine. Celle-ci doit porter sur le plus grand nombre possible de sujets ; elle nécessite du personnel spécialisé et d'importantes installations ; elle est longue et comporte des risques.

Calcul des tables de plongée

Le calcul d'une table de plongée fait appel à un certain nombre d'hypothèses qui tiennent compte d'une réalité physiologique : la dissolution des gaz dans l'organisme pendant le séjour en pression.

Nous avons vu qu'un liquide soumis à un gaz sous une certaine pression P dissolvait ce gaz jusqu'à ce que la tension du gaz dissous soit égale à la pression de celui-ci.

Il a été dit aussi que la mesure en unités de pression du gaz dissous nous dispensait de faire intervenir la nature du gaz et celle du liquide. Ainsi un liquide en couche très fine dissoudra le gaz très rapidement tandis qu'une couche épaisse le fera beaucoup plus lentement (vitesse de diffusion).

On peut considérer que la vascularisation de l'organisme est telle que la diffusion des gaz au travers des capillaires se fait de façon instantanée. En effet, le calcul mathématique à partir de lois de diffusion permet de déterminer des périodes

allant de quelques centièmes à quelques centaines de secondes, alors que les périodes déterminées pour l'organisme à partir des lois de dissolution vont jusqu'à plusieurs centaines de minutes.

Jones, qui a étudié le taux d'élimination des gaz inertes de l'organisme, a déterminé des périodes allant de 1,5 à 300 minutes et indépendantes des gaz inertes choisis, alors que les coefficients de diffusion des gaz dans l'eau sont inversement proportionnels à la racine carrée du poids atomique. Ce qui confirme donc, indirectement, que la diffusion est un phénomène négligeable dans le problème de la dissolution des gaz dans l'organisme.

Les différentes périodes de l'organisme devront être rattachées aux débits sanguins régnant dans les différentes parties. Un tissu aura donc, en fonction du débit sanguin qui le traverse, une certaine période.

La mesure du taux d'élimination des

gaz inertes chez un sujet sous inhalation d'oxygène pur permet de déterminer

expérimentalement les périodes des tissus.

Mesure du taux d'élimination des gaz inertes chez un sujet respirant de l'oxygène pur

Alors qu'il n'est pas facile de mesurer en fonction du temps la quantité de gaz inertes qui se dissout dans les tissus d'un sujet exposé à une certaine pression, il est possible de mesurer le taux d'élimination de ces gaz inertes à partir d'un certain état de saturation, chez un sujet respirant de l'oxygène pur. L'analyse des échantillons de gaz expiré est faite, soit par liquéfaction fractionnée, soit par marquage des gaz à l'aide d'isotopes radioactifs. Ces techniques sont très délicates, mais les mesures ont la très grande précision nécessaire.

On obtient ainsi la courbe expérimentale de la quantité de gaz inerte éliminée en fonction du temps. La représentation de cette courbe sur papier logarithmique rend évidente la possibilité de la représenter par une somme d'exponentielles dont les périodes s'étagent de quelques minutes à quelques centaines de minutes.

Cette expérimentation, démontrant que l'élimination des gaz inertes peut être représentée par une somme d'exponentielles, rend particulièrement adéquate la méthode de calcul de Haldane, que nous allons voir maintenant.

MÉTHODE DE CALCUL DE HALDANE

Par définition, la quantité de gaz inerte dissoute dans un tissu est maximale quand l'état de saturation est atteint. Elle est mesurée en unité de pression et sa valeur est égale à la pression partielle de ce gaz inerte dans le mélange respiré. Pour éviter toute ambiguïté, nous parlerons de pression de gaz respiré et de tension de gaz dissous.

L'unité de pression sera l'atmosphère (atm) et dans le système métrique nous profiterons d'un très grand avantage : la pression exercée par 10 mètres d'eau de mer est sensiblement égale à 1 atmosphère (à 1 p. 100 près).

Dans la pratique, on confond cette valeur avec celle du bar déjà définie et la

valeur de l'ancien système M.K.p.s., le kgf/cm^2 .

LES TISSUS

Nous avons vu la façon expérimentale de déterminer les différentes périodes des tissus de l'organisme. Leurs valeurs s'échelonnent de 1,50 minute à 300 minutes et plus. Il est évident qu'entre les deux valeurs extrêmes existe toute une série de tissus.

Dans le calcul des tables de plongée courantes, on peut choisir un certain nombre de « tissus » pris entre les valeurs trouvées, soit :

1,5 minute
 7,90 minutes
 29 minutes
 120 minutes
 300 minutes

et correspondant aux courbes exponentielles déterminées par Jones.

Les tissus extrêmes peuvent être éliminés de la gamme des tissus considérés :

- le plus rapide (1,5) n'intervenant pas dans le calcul : la remontée à 17 mètres/minute élimine son influence ;

- le plus lent (300) n'étant jamais concerné dans ce type de plongée, compte tenu du temps et de la profondeur qui sont insuffisants. Par contre, il est nécessaire de tenir compte d'un tissu intermédiaire de 60 minutes.

Ces paramètres étant définis, l'hypothèse de Haldane permet de connaître la tension de gaz dissous dans les tissus choisis.

La vitesse de variation de la tension du gaz dissous dans un tissu humain est proportionnelle à la différence entre la valeur de la pression partielle du gaz respiré et celle de la tension du gaz dissous.

Ce qui s'écrit sous la forme de l'équation différentielle :

$$\frac{dp}{dt} = k(P - p)$$

où p est la tension du gaz dissous et P la pression partielle du gaz respiré.

Si P est constant, l'intégration de cette équation nous donne :

$$p = p_0 + (P - p_0)(1 - e^{-kt})$$

où p représente la tension du gaz au temps t considéré,

p_0 la tension du gaz au temps 0

P la pression partielle du gaz respiré

k est une constante caractéristique du tissu et se déduit de sa période

$$k = \frac{\ln 2}{T}$$

Des tables spéciales donnent la valeur de l'exponentielle $(1 - e^{-kt})$ en fonction de $\frac{t}{T}$

Il est donc très facile de connaître la valeur de la tension dans les différents tissus considérés, si l'on connaît le temps passé t à la pression considérée P .

Il est important de constater que l'oxygène n'intervient pas dans le calcul des tables de plongée. En effet, le supplément d'oxygène est transporté dans le sang sous forme dissoute et c'est lui qui en premier lieu sera consommé.

Nous ne tiendrons compte, dans la suite de ce chapitre, que du gaz inerte qui sera l'azote, pour la partie qui nous intéresse.

SURSATURATION

A la fin du séjour sur le fond, les différents tissus se sont chargés en fonction de leur période. Au cours du retour vers la surface, il arrivera un moment où la tension du gaz inerte dans un ou plusieurs tissus sera supérieure à la pression partielle du gaz inerte respiré. Ces tissus seront dits alors en état de sursaturation. Ce phénomène de sursaturation nous amène à définir ce qu'est la sursaturation critique et le coefficient de sursaturation.

La sursaturation se produisant en cours de remontée, celle-ci doit être ralentie pour éviter la formation de bulles gazeuses ou l'accroissement d'entités appelées noyaux gazeux. La valeur limite pour laquelle la sursaturation ne provoque pas de changement de phase du gaz dissous est appelée la sursaturation critique.

Deux critères peuvent définir la sursaturation critique :

- soit le gradient de sursaturation $p - P$, différence entre la tension du gaz dissous et la pression ambiante ;

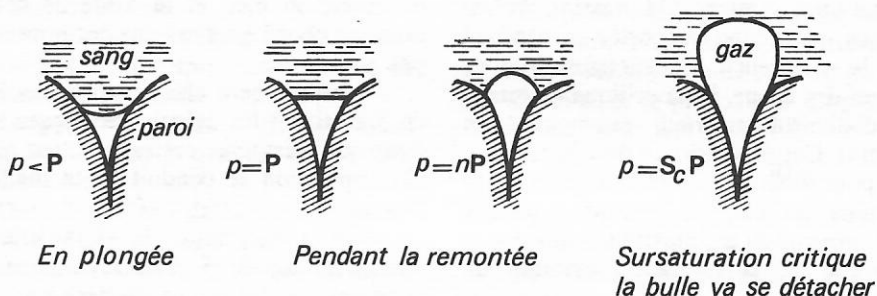
- soit le rapport de sursaturation $\frac{p}{P}$, rapport de la tension du gaz dissous à la pression ambiante.

Les Américains et les Français utilisent la notion de rapport de sursaturation, alors que les Anglais et les Italiens utilisent la notion de gradient de sursaturation.

C'est un fait bien connu en physique qu'un gaz dissous dans un liquide peut se maintenir en état de sursaturation dans

des rapports de 100 à 1 000 pour 1 si le liquide est débarrassé de toute trace d'impuretés solides ou gazeuses. Mais lors d'accidents de décompression, les rapports de sursaturation sont de l'ordre de 2. Il est vrai que dans l'organisme les tissus ne sont pas homogènes. Il en est de même pour le sang. De plus, il est admis que dans celui-ci existent, à l'état permanent, des noyaux gazeux, point de départ de la formation de bulles.

On ne doit pas considérer ces noyaux comme généralement libres dans la circulation, mais plus souvent ils sont coincés dans les anfractuosités de la paroi des vaisseaux sanguins et dans les espaces intercellulaires.



p : tension du gaz dissous ; pression dans le noyau gazeux ;
 P : pression ambiante ;
 Sc : rapport de sursaturation critique.

13. Naissance d'une bulle à partir d'un noyau gazeux pariétal.

Il ressort de l'examen de ces différents croquis que la variation du volume du noyau gazeux correspond à la sursaturation du tissu, ce qui nous amène au rapport de sursaturation critique, rapport maximum supportable de la tension du gaz dissous à la pression ambiante

$$Sc = \frac{p}{P}$$

Ainsi un tissu ayant un coefficient de sursaturation critique à Sc pourra être amené à une pression :

$$P = \frac{p}{Sc}$$

sans qu'il y ait formation de bulles libres. Les bulles ne pourront se dégager que si la pression ambiante P devient inférieure à cette valeur.

DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE SURSATURATION CRITIQUE

Dans le cas des plongées à l'air, les coefficients peuvent être déterminés assez facilement par les plongées avec remontées sans palier.

Le principe est le suivant :

Soit une profondeur donnée P. La remontée étant faite à une vitesse déterminée (17 mètres/minute), les plongeurs restent des temps de plus en plus longs sur le fond, et ce, jusqu'à ce qu'il y ait un incident.

On revient par la suite au temps immédiatement inférieur et on calcule la tension supportée dans chaque tissu. Comme nous sommes à la pression atmosphérique, la tension supportée se confond avec le coefficient de sursaturation et, pour un des tissus, il est critique (le temps immédiatement supérieur provoquant un accident). Cette expérience doit être renouvelée pour différentes profondeurs et on en détermine les courbes qui, pour chaque tissu, présentent un maximum qui est le coefficient de sursaturation critique du tissu examiné.

On peut considérer que dans chaque plongée un des tissus est limitatif. Pour cette raison ce tissu est appelé « tissu directeur ».

Dans les plongées permettant une remontée sans paliers, le tissu directeur a une période d'autant plus faible que la profondeur de la plongée est plus importante.

Le rapport de sursaturation critique correspondant au tissu le plus lent (120 minutes) est directement donné par la profondeur maximale à laquelle peut demeurer un sujet pendant un temps très long.

CHOIX DES PALIERS

Après un séjour en pression, les tissus ayant une certaine tension, la profondeur à laquelle on doit s'arrêter à la remontée est déterminée par le rapport $\frac{P}{Sc} = P$

Sc étant plus grand que 1, P sera inférieur à p et le tissu va se désaturer par l'intermédiaire du sang. On pourra donc aller à une profondeur inférieure. Il serait possible d'effectuer une décompression continue dans laquelle à tout moment la pression ambiante serait égale à $\frac{P}{Sc}$

Si la décompression continue peut se concevoir dans un caisson, il n'en est pas de même en mer, et le mode de décompression choisi est alors une décompression par paliers.

L'espacement choisi entre ceux-ci est de 3 mètres : les calculs théoriques montrent que c'est avec cet espacement que la décompression se conduit de la meilleure façon.

Un espacement de 4 mètres en 4 mètres, ou de 5 mètres en 5 mètres, conduirait à des temps de décompression sensiblement plus longs.

Un espacement plus faible raccourcirait légèrement le temps de décompression, mais la conduite d'une telle décompression par le plongeur en pleine eau serait très difficile.

Exemple de calcul d'une table de plongée

Nous sommes maintenant en possession d'une méthode permettant de calculer une table de plongée et nous savons comment choisir les coefficients numériques nécessaires.

La formule de départ est :

Merde! $L_2 ? = \underline{L_2}!$

$$p = p_0 + (P - p_0)(1 - e^{-kt})$$

Les coefficients k sont connus quand

les périodes $k = \frac{L_2}{T}$ sont déterminées. Dans

notre cas, nous emploierons les périodes :

0,09902 7 mn pour laquelle $k = 0,1$
 30 mn pour laquelle $k = 0,023105$
 60 mn pour laquelle $k = 0,011552$
 120 mn pour laquelle $k = 0,005776$

Les coefficients de sursaturation employés seront de :

Périodes T	7 mn	30 mn	60 mn	120 mn
Sc	2,56	1,84	1,6	1,6

La vitesse de remontée employée sera de 17 mètres/minute.

Calculons, par exemple, la décompression à effectuer après une plongée de 30 minutes à 50 mètres.

Le gaz employé étant de l'air, nous ne tiendrons compte que de la pression partielle d'azote.

Dans le tableau de la page suivante, la première ligne correspond au calcul de la tension dans les différents tissus à la fin du séjour en pression.

Le temps nécessaire à la descente est considéré comme passé sur le fond.

Une fois les tensions définies, il faut déterminer le premier palier en faisant le rapport de la tension dissoute par le coefficient de sursaturation.

Nous aurons ainsi :

$$\frac{4,596}{2,56} = 1,79 \quad \frac{2,800}{1,84} = 1,53$$

$$\frac{1,972}{1,6} = 1,29 \quad \frac{1,436}{1,6} < 1$$

Les valeurs trouvées correspondant à des pressions absolues, il convient de retrancher 1 atm pour avoir la valeur relative, c'est-à-dire la profondeur.

- Le tissu 7 minutes permet d'aller jusqu'à 0,79 atm, soit 7,9 mètres.

- Le tissu 30 minutes permet d'aller jusqu'à 5,3 mètres.

- Le tissu 60 minutes permet d'aller jusqu'à 2,9 mètres.

Le rapport pour le tissu 120 minutes étant inférieur à 1, ce tissu n'entre pas en jeu pour le retour en surface.

Entre les trois paliers, nous choisirons obligatoirement le plus profond : c'est-à-dire 7,9 mètres. L'espacement des paliers se faisant de 3 mètres en 3 mètres, le premier palier se fera à une profondeur de 9 mètres.

De 50 mètres à 9 mètres, pendant la remontée, la tension dans les différents tissus va varier.

On peut considérer que les tissus vont être soumis à la pression partielle du gaz à la profondeur moitié entre la profondeur du fond et la profondeur du premier palier dans notre cas :

$$\frac{50 + 9}{2} = \frac{59}{2} \neq \frac{60}{2} = 30 \text{ m}$$

La pression partielle sera donc de :
 $4 \times 0,8 = 3,2$ bars.

La vitesse de remontée étant de 17 mètres par minute, la durée de celle-ci sera de :

$$\frac{50 - 9}{17} = 2,4 \text{ minutes ou, en arrondissant,}$$

3 mn

La deuxième ligne se déduit donc facilement des différents éléments connus et nous avons la tension dans les tissus à l'arrivée à 9 mètres.

Pour déterminer le temps de séjour au palier de 9 mètres, il suffit de calculer la tension que devraient avoir les tissus à 6 mètres.

Dans notre exemple, le tissu 7 minutes doit avoir une tension de :

$$2,56 \times 1,6 = 4,096$$

Profondeurs	Pression hydrostatique moyenne	Pression partielle du gaz interne respiré	Intervalle de temps	Tissu 7 minutes :					Sc = 2,56	Tissu 30 minutes :					Sc = 1,84
				Tension initiale	Gradient de pression	Coefficient exponentiel	Variation de tension	Tension finale		Tension initiale	Gradient de pression	Coefficient exponentiel	Variation de tension	Tension finale	
	H	P	t	p_0	$P - p_0$	$1 - e^{-kt}$	$p - p_0$	p	pc	p_0	$P - p_0$	$1 - e^{-kt}$	$p - p_0$	p	pc
50 m	6	4,8	30 mn	0,8	4	0,949	3,796	4,596		0,8	4	0,5	2	2,800	
de 50 à 9 m	4	3,2	3 mn	4,596	- 1,396	0,257	0,360	4,236		2,800	+ 0,400	0,067	0,026	2,826	
9 m	1,9	1,52	1 mn	4,236	- 2,716	0,094	0,255	3,981	4,096	2,826	- 1,306	0,023	0,030	2,796	2,944
6 m	1,6	1,28	14 mn	3,981	- 2,701	0,750	2,025	1,956	3,328	2,796	- 1,516	0,276	0,418	2,378	2,392
3 m	1,3	1,04	38 mn	1,956	- 0,916	0,977	0,893	1,063	2,56	2,378	- 1,338	0,584	0,781	1,597	1,84
				Tissu 60 minutes :					Sc = 1,6	Tissu 120 minutes :					Sc = 1,6
	H	P	t	p_0	$P - p_0$	$1 - e^{-kt}$	$p - p_0$	p	pc	p_0	$P - p_0$	$1 - e^{-kt}$	$p - p_0$	p	pc
50 m	6	4,8	30 mn	0,8	4	0,293	1,172	1,972		0,8	4	0,159	0,636	1,436	
de 50 à 9 m	4	3,2	3 mn	1,972	+ 1,228	0,034	0,042	2,014		1,436	+ 1,764	0,018	0,032	1,468	
9 m	1,9	1,52	1 mn	2,014	- 0,494	0,011	0,005	2,009	2,56	1,468	+ 0,052	0,006	0,001	1,469	2,56
6 m	1,6	1,28	14 mn	2,009	- 0,729	0,149	0,108	1,901	1,98	1,469	- 0,189	0,078	0,014	1,455	1,98
3 m	1,3	1,04	38 mn	1,901	- 0,861	0,355	0,306	1,595	1,6	1,455	- 0,415	0,197	0,082	1,373	1,6

Exemple de calcul d'une table de plongée. — Profondeur : 50 m — Durée : 30 mn — Mélange respiré : air.

le tissu 30 minutes doit avoir une tension de :

$$1,84 \times 1,6 = 2,944$$

A l'arrivée à 9 mètres, la tension est de 4,236 pour le tissu 7 minutes, supérieure à 4,096, tension supportable à 6 mètres.

Elle est de 2,826 pour le tissu 30 minutes, qui à 6 mètres peut supporter 2,944

Le seul tissu qui doit diminuer sa tension est le tissu 7 minutes.

Or on a la formule :

$$p = p_0 + (P - p_0)(1 - e^{-kt})$$

où p doit être la tension à 6 mètres. Pour déterminer le temps, il suffit donc de faire apparaître seul le facteur exponentiel :

$$\frac{p(6 \text{ m}) - p_0(9 \text{ m})}{P(\text{pression partielle à } 9 \text{ m}) - p_0(9 \text{ m})} = 1 - e^{-kt}$$

Dans notre cas, nous avons :

$$\frac{4,096 - 4,236}{1,52 - 4,236} = \frac{0,140}{2,716} = 0,052 = 1 - e^{-kt}$$

On en déduit $t = 0,56$ seconde ou, en arrondissant, 1 minute, et l'on refait le calcul de la ligne de la même façon en connaissant le temps que doit durer le palier.

La ligne suivante (4) nous montre que le tissu 7 minutes n'est plus directeur. En effet, si sa tension est supérieure à celle qu'il devrait avoir pour passer à 3 mètres, il donne un temps de palier inférieur à celui demandé par le tissu 30 minutes, et c'est celui-ci qui devient directeur à 6 mètres.

A 3 mètres, le tissu directeur sera le tissu 60 minutes. Dans cette plongée, le tissu 120 minutes n'intervient pas. Il est cependant indispensable de le calculer afin de déterminer le coefficient de plongées successives.

Utilisation des tables de plongée

MODE D'EMPLOI

Les tables indiquent, en fonction de la profondeur atteinte et du temps passé sous l'eau, les paliers à effectuer en cours de remontée. Les paliers sont fixés en profondeur et en durée. La durée de la plongée se compte en minutes entières (toute fraction de minute est considérée comme une minute entière ; ainsi une plongée de 14 mn 20 s ou 14 mn 40 s sera considérée comme une plongée de 15 mn) depuis l'instant où le plongeur quitte la surface en direction du fond jusqu'à l'instant où il commence la remontée vers les paliers et la surface.

On entre dans la table avec la pro-

fondeur maximale atteinte et la durée de la plongée ; si ces chiffres ne sont pas dans la table, on prend ceux immédiatement supérieurs.

L'interpolation des temps ou des profondeurs est interdite.

La table donne, à titre indicatif, la durée totale de la remontée (arrondie à une minute entière), calculée en ajoutant la durée des paliers à celle de la remontée proprement dite, à 17 mètres à la minute. Elle donne enfin la valeur du coefficient C qui permet de calculer des plongées successives, avec ou sans inhalation d'oxygène.

t (durée) T (période)	Deuxième décimale									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	—	.007	.014	.021	.027	.034	.041	.047	.054	.061
0.1	.067	.073	.081	.086	.092	.099	.105	.111	.117	.123
0.2	.129	.136	.141	.147	.153	.159	.165	.171	.176	.182
0.3	.188	.193	.199	.204	.210	.215	.221	.226	.232	.237
0.4	.242	.247	.253	.258	.263	.268	.273	.278	.283	.288
0.5	.293	.298	.303	.307	.312	.317	.322	.326	.331	.336
0.6	.340	.345	.349	.354	.358	.363	.367	.372	.376	.380
0.7	.384	.389	.393	.397	.401	.405	.410	.414	.418	.422
0.8	.426	.430	.434	.438	.441	.445	.449	.453	.457	.460
0.9	.464	.468	.472	.475	.479	.482	.486	.490	.493	.496
1.0	.500	.503	.507	.510	.514	.517	.520	.524	.527	.530
1.1	.533	.537	.540	.543	.546	.549	.553	.556	.559	.562
1.2	.565	.568	.571	.574	.577	.580	.583	.585	.588	.591
1.3	.594	.597	.600	.602	.605	.608	.610	.613	.616	.618
1.4	.621	.624	.626	.629	.632	.634	.637	.639	.642	.644
1.5	.646	.649	.651	.654	.656	.659	.661	.663	.666	.668
1.6	.670	.672	.675	.677	.679	.681	.684	.686	.688	.690
1.7	.692	.694	.697	.699	.701	.703	.705	.707	.709	.711
1.8	.713	.715	.717	.719	.721	.723	.725	.726	.728	.730
1.9	.732	.734	.736	.738	.739	.741	.743	.745	.747	.748
2.0	.750	.752	.754	.755	.757	.759	.760	.762	.764	.765
2.1	.767	.768	.770	.772	.773	.775	.776	.778	.779	.781
2.2	.782	.784	.785	.787	.788	.790	.791	.793	.794	.796
2.3	.797	.798	.800	.801	.803	.804	.805	.807	.808	.809
2.4	.811	.812	.813	.815	.816	.817	.818	.820	.821	.822
2.5	.823	.824	.826	.827	.828	.829	.830	.832	.833	.834
2.6	.835	.836	.837	.839	.840	.841	.842	.843	.844	.845
2.7	.846	.847	.848	.849	.850	.851	.852	.853	.854	.855
2.8	.856	.857	.858	.859	.860	.861	.862	.863	.864	.865
2.9	.866	.867	.868	.869	.870	.871	.872	.873	.874	.875
3.0	.875	.876	.877	.878	.878	.879	.880	.881	.882	.883
3.1	.883	.884	.885	.886	.887	.887	.888	.889	.890	.890
3.2	.891	.892	.893	.893	.894	.895	.896	.896	.897	.898
3.3	.899	.899	.900	.901	.901	.902	.903	.903	.904	.905
3.4	.905	.906	.907	.907	.908	.909	.909	.910	.910	.911
3.5	.912	.912	.913	.913	.914	.915	.915	.916	.916	.917
3.6	.918	.918	.919	.919	.920	.920	.921	.921	.922	.923
3.7	.923	.924	.924	.925	.925	.926	.926	.927	.927	.928
3.8	.928	.929	.929	.930	.930	.931	.931	.932	.932	.933
3.9	.933	.934	.934	.934	.935	.935	.936	.936	.937	.937
4.0	.938	.938	.938	.939	.939	.940	.940	.941	.941	.941
4.1	.942	.942	.943	.943	.943	.944	.944	.944	.945	.945
4.2	.946	.946	.946	.947	.947	.947	.948	.948	.949	.949
4.3	.949	.950	.950	.950	.951	.951	.951	.952	.952	.952
4.4	.953	.953	.953	.954	.954	.954	.955	.955	.955	.956
4.5	.956	.956	.957	.957	.957	.957	.958	.958	.958	.959
4.6	.959	.959	.959	.960	.960	.960	.960	.961	.961	.961
4.7	.962	.962	.962	.962	.963	.963	.963	.963	.964	.964
4.8	.964	.964	.965	.965	.965	.965	.966	.966	.966	.966
4.9	.967	.967	.967	.967	.967	.968	.968	.968	.968	.969
5.0	.969	.969	.969	.969	.970	.970	.970	.970	.970	.971
5.1	.971	.971	.971	.971	.972	.972	.972	.972	.972	.973
5.2	.973	.973	.973	.973	.974	.974	.974	.974	.974	.974
5.3	.975	.975	.975	.975	.975	.976	.976	.976	.976	.976
5.4	.976	.977	.977	.977	.977	.977	.977	.977	.978	.978
5.5	.978	.978	.978	.978	.979	.979	.979	.979	.979	.979
5.6	.979	.980	.980	.980	.980	.980	.980	.980	.981	.981
5.7	.981	.981	.981	.981	.981	.981	.982	.982	.982	.982
5.8	.982	.982	.982	.982	.983	.983	.983	.983	.983	.983
5.9	.983	.983	.984	.984	.984	.984	.984	.984	.984	.984

Table numérique donnant la valeur de $1 - e^{-\frac{t}{T}}$ en fonction de $\frac{t}{T}$.

La vitesse de la descente est laissée à la discrétion du plongeur. La vitesse de remontée doit être aussi voisine que possible de 17 mètres à la minute. Dans le cas où la remontée est plus rapide que celle donnée dans la table, il est indispensable de retourner le plus rapidement possible au premier palier pour y passer la différence entre la durée prévue pour la remontée et celle effectivement réalisée¹.

Même dans le cas où la remontée sans paliers est permise, il est conseillé d'effectuer un arrêt de quelques minutes aux environs de 3 mètres.

SÉCURITÉ DES TABLES

Une table n'est qu'un recueil de programmes de plongées protégeant les utilisateurs contre le risque d'accidents de décompression. Cette protection ne peut évidemment jouer que si la table est respectée.

Il faut savoir également que les tables ne sont valables que pour des conditions normales : un effort intensif et prolongé, une perturbation de la circulation (vêtements étanches trop serrés au cou et aux poignets) peuvent être à l'origine d'un accident alors que les paliers ont été correctement effectués.

Il ne faut pas oublier enfin qu'elles sont destinées à des individus normaux ; des modifications physiologiques dues à l'âge, à la maladie ou à des traumatismes peuvent être la cause d'accidents malgré le respect des tables.

1. Cela n'est pas valable pour une remontée avec un gilet gonflable qui fait l'objet d'une procédure particulière.

VITESSES DE DESCENTE ET DE REMONTÉE

La descente est comptée dans la durée totale de la plongée. On a donc tout intérêt à la raccourcir et à descendre aussi vite que possible, compte tenu du matériel employé et du souci de ménager les oreilles du plongeur. En pratique, le plongeur autonome descend très aisément à une vitesse de 30 mètres/minute.

La durée de la remontée jusqu'au premier palier entre dans le calcul de la durée de la décompression, et il est dangereux de l'écourter inconsidérément. Une remontée plus rapide, terminant une plongée profonde, risque de provoquer des accidents graves et brutaux, avec perte de connaissance et paralysie ; les tissus ayant une courte période de désaturation, tels que le sang, n'ont pas, en effet, le temps d'éliminer normalement, au niveau des poumons, les gaz dissous en excès.

En cas de remontée en catastrophe (gilet gonflable en service), il convient, dès le retour en surface ou *en moins de trois minutes*, de replonger à la profondeur-moitié de la première plongée. Y faire un séjour de cinq minutes, et recommencer l'exécution des paliers, pour la profondeur maximale atteinte, comme si la plongée avait duré le temps passé au fond, plus le temps de la remontée en catastrophe, plus le temps passé en surface, plus les cinq minutes passées à la profondeur-moitié.

REMONTÉE SANS PALIER

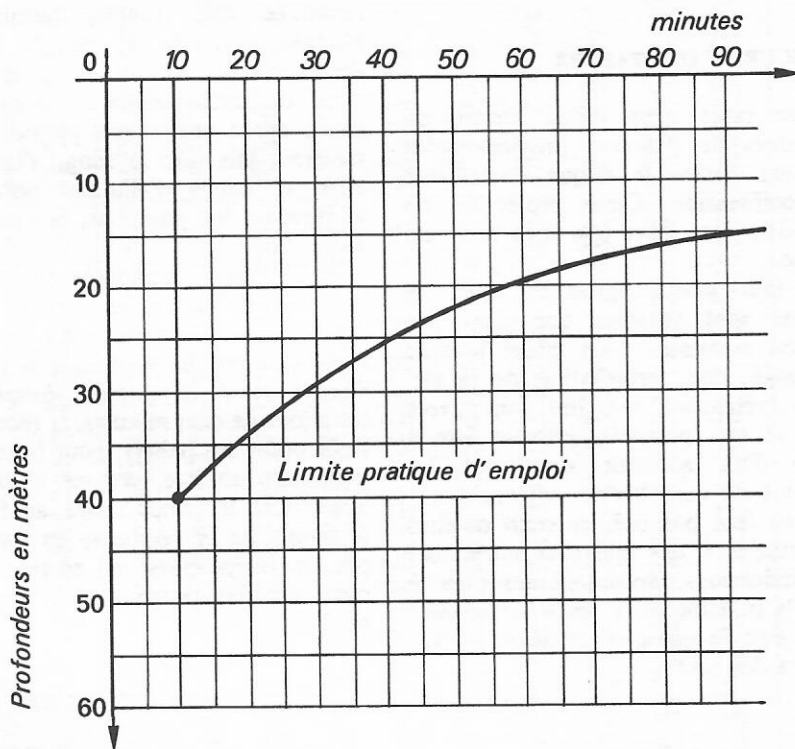
Pour des profondeurs inférieures à 12 mètres, les accidents de décompression ne sont pas à craindre, quelle que

soit la durée du séjour sous l'eau. Pour des interventions à des profondeurs supérieures, la remontée sans palier est également sans risque quand le séjour ne dépasse pas une certaine durée, de plus en plus réduite à mesure que la profondeur augmente.

Nous donnons la table suivante extraite des tables réglementaires de la Marine Nationale pour des plongées d'incursion réalisées avec des durées limites jusqu'à la profondeur de 40 mètres.

Profondeurs	Durées limites permettant de remonter sans palier
11 mètres	séjour illimité
15 mètres	2 h
20 mètres	1 h
25 mètres	0 h 40 mn
30 mètres	0 h 30 mn
35 mètres	0 h 25 mn
40 mètres	0 h 10 mn

Nous l'avons traduite par une courbe dite « courbe de sécurité ».



14. Courbe de sécurité pour la remontée sans palier.

Si le point correspondant à une profondeur et à une durée de séjour données se trouve à gauche de la courbe, la remontée peut être effectuée sans palier. S'il est à droite, il faut consulter la table de plongée. Cette « courbe de sécurité » n'est valable que pour une première plongée, mais elle ne l'est plus pour une seconde, effectuée moins de six heures après la première.

La vitesse de remontée ne doit pas dépasser 17 mètres/minute. Chaque fois que la chose est possible, il y a quand même intérêt à passer quelques minutes à 3 mètres ; les remontées sans paliers se traduisent parfois par une fatigue anormale¹.

1. A partir de 40 mètres, un palier est toujours nécessaire, quelle que soit la durée de la plongée.

TABLES DE PLONGÉES SUCCESSIVES

Nous avons vu qu'après une plongée, les pressions d'azote dissous dans les tissus étaient supérieures à leur tension au départ de la plongée. Si une deuxième plongée est refaite assez rapidement, les tensions de gaz dissous seront donc supérieures et, à la fin d'une même plongée, les tensions calculées seront supérieures à celles trouvées dans le cas d'une première plongée. Ces valeurs entraîneront donc une augmentation du temps de la décompression.

Dans le cas particulier des tables de plongée à l'air données dans cet ouvrage, les conditions de temps et de profondeur sont telles que l'on peut admettre que 6 heures après la première plongée les tissus sont désaturés et une deuxième plongée pourra être effectuée sans majoration de la décompression.

Pour des raisons de sécurité, on admet qu'il faut éviter de faire deux plongées dans la même journée au-delà de 60 mètres.

Le G.E.R.S. a calculé une table de plongées successives dont les vérifications expérimentales paraissent garantir la sécurité. Cette table fait intervenir un coefficient C qui représente le rapport entre la pression d'azote dissous dans

les tissus les plus lents de l'organisme au retour en surface et celle qui y existe normalement.

La table de plongées successives donne, à partir de ce coefficient C, de l'intervalle entre les deux plongées et de la profondeur de la deuxième, une majoration de durée permettant d'utiliser la table de plongée simple.

Elle n'est utilisable que si la deuxième plongée est faite avec un intervalle d'au moins 15 minutes. Si les circonstances obligent à replonger immédiatement, on adoptera, pour entrer dans la table, le temps total des deux plongées et la profondeur égale à celle de la plus profonde.

La majoration de durée donnée par la table de plongées successives peut être plus importante que la durée de la première plongée si celle-ci a été plus profonde que la seconde. Il est évident, en effet, que pour avoir un coefficient C égal dans deux plongées à profondeurs différentes, il faut rester plus longtemps à la profondeur la plus faible :

- à 45 m, une plongée de 20 minutes donne un coefficient C de 1,5 ;
- à 18 m, une plongée de 60 minutes donne un coefficient C de 1,5.

MODE D'EMPLOI

Pour une deuxième plongée suivant la première à moins de six heures :

- lire dans la table de plongée le coefficient C correspondant à la profondeur et à la durée de la première plongée ;

- dans la table de plongées successives, prendre la colonne correspondant à cette valeur C, manœuvrer la réglette pour amener dans cette colonne la profondeur P de la deuxième plongée ;

- dans cette colonne, lire la majoration de durée en face de l'intervalle de temps écoulé entre les deux plongées ;

- entrer dans la table de plongée avec la profondeur atteinte au cours de la deuxième plongée et une durée fictive, somme de la durée de la deuxième plongée et de la majoration de durée ; on trouve la décompression à effectuer.

Pour une troisième plongée suivant la deuxième à moins de six heures, on prendrait le coefficient de plongées successives C correspondant à la profondeur de la deuxième plongée et à sa durée fictive (temps réel + majoration), mais les vérifications actuelles ne sont pas suffisantes pour que l'on puisse garantir la sécurité totale du procédé, et plus de deux plongées par jour sont à déconseiller.

Exemple

Un plongeur a effectué de 8 h à 8 h 27 une plongée de 20 minutes à 40 mètres (remontée 3 mn et 4 mn de palier à 3 mètres). A 10 h 30, soit 2 h 3 mn après, il veut effectuer une plongée à 36 mètres. Quelle majoration faut-il prévoir pour cette deuxième plongée ?

Dans la table de plongée, à la profondeur de 40 mètres, ligne 20 minutes, nous trouvons le coefficient C de plongées successives : $C = 1,5$.

Dans la colonne $C = 1,5$ de la table de plongées successives, amenons la valeur 36 mètres (profondeur de la deuxième plongée) en manœuvrant la réglette. En regard de l'intervalle 2 heures (immédiatement inférieur à 2 h 3 mn, intervalle vrai entre les deux plongées), nous trouvons la majoration de 12 minutes qu'il faut ajouter à la deuxième plongée pour obtenir sa durée fictive. Cette durée fictive est utilisée pour trouver, dans la table de plongée, les temps et les paliers de décompression. Deux solutions sont alors possibles selon que l'on accepte ou non de faire des paliers à la seconde plongée.

Si l'on décide qu'il est nécessaire de passer 20 minutes à 36 mètres, le calcul est le suivant : on entre dans la table, à la profondeur de 36 mètres, avec une durée fictive de 20 minutes + 12 minutes = 32 minutes, et l'on effectue les paliers prévus pour 35 minutes (durée immédiatement supérieure à 32 minutes), soit 16 minutes à 3 mètres. La descente commence alors à 10 h 30 et la remontée à 10 h 50. Arrivée au palier de 3 mètres à 10 h 52. Surface à 11 h 8.

Si au contraire l'on préfère, pour des raisons diverses (froid, faible réserve d'air), effectuer une deuxième plongée sans palier, le calcul est différent : on cherche, dans la table profondeur 36 mètres la durée de plongée maximale pour laquelle il est possible de remonter sans palier. On trouve 25 minutes. Il faut alors simplement soustraire de cette durée la majoration imposée par la plongée précédente, soit 12 minutes. Il reste donc la différence, soit 13 minutes, à passer entre la surface et 36 mètres de profondeur. La descente commence à 10 h 30, la remontée à 10 h 43. Surface à 10 h 45.

A partir du coefficient C d'une pre-

mière plongée, cette méthode permet de calculer dans combien de temps on pourra effectuer une deuxième plongée dont on connaît la profondeur et la durée.

Remarque

Le modèle de calcul des tables de plongées successives est un modèle mathématique et en tant que modèle est valable. Cependant, les échanges gazeux chez les plongeurs sont régis par la physiologie et la réversibilité parfaite des phénomènes mathématique et physique ne s'applique pas de façon rigoureuse.

Il faut donc éviter de faire longtemps des plongées répétitives. L'exécution de 2 plongées par jour pendant 15 jours ou un

mois peut créer un déséquilibre physiologique important, générateur parfois d'accidents.

Les modèles physiques permettant d'élaborer une courbe de décompression (décompressimètres) ne reflètent pas non plus ce déséquilibre et les indications données sont imparfaites. Ces appareils sont de plusieurs types : ils emploient l'analogie avec des phénomènes basés sur des lois exponentielles ou de variations de débit :

- diffusion de fluide à travers un ensemble de matière poreuse ;
- décharge de condensateur dans des circuits électriques LCR ;
- diffusion de chaleur.

PLONGÉES SUCCESSIVES AVEC INHALATION D'OXYGÈNE

La stricte application de la table de plongées successives évite le risque d'accidents de décompression, mais conduit à des durées de paliers qui peuvent être prohibitives. Il n'est pas possible au plongeur équipé de vêtements légers de lutter longtemps contre l'énorme déperdition de calories qu'entraîne le séjour en eau froide. Dans ces conditions, même avec une chambre de décompression submersible permettant de recueillir le plongeur à la hauteur de son premier palier, il y a un gros intérêt (cas des missions d'intervention urgentes) à pouvoir effectuer des plongées sans être arrêté par une « majoration de durée » exagérée, surtout si l'on ne dispose que d'un nombre limité de plongeurs.

Il a paru intéressant de calculer dans quelle mesure l'inhalation d'oxygène pur, qui active l'élimination de l'azote dissous dans les tissus, permettait de raccourcir la durée des intervalles entre

les plongées successives. Les résultats obtenus au cours de cette étude sont donnés par les tableaux I et II, dont la comparaison fait ressortir le gain de temps très appréciable qui résulte de cette inhalation pour effacer les traces d'une première plongée.

Il est alors possible de faire des plongées successives en procédant de la manière suivante :

- prendre dans les tables de plongée à l'air la colonne « coefficient de plongées successives » et en tirer la valeur du coefficient C correspondant à la plongée effectuée ;
- chercher dans le tableau I ce qu'est devenue la valeur de ce coefficient C au moment où l'on désire commencer l'inhalation d'oxygène pur ;
- en fonction de ce chiffre, chercher dans le tableau II le temps nécessaire pour ramener à 1 la valeur du coefficient C ;
- au bout de ce temps, il est possible

Tableau I : valeurs du coefficient C en fonction du temps
(respiration à l'air en pression atmosphérique):

Temps écoulé depuis la fin de la plongée	Valeur du coefficient C à la fin de la plongée (donnée dans les tables de plongée)										
	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	
0 h 10	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	
0 h 20	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1		
0 h 30	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1		
0 h 40	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1			
0 h 50	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1			
1 h 00	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0			
1 h 20	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0			
1 h 40	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9			
2 h 00	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8			
2 h 30	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7			
3 h 00	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7			
4 h 00	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6			
5 h 00	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5			
6 h 00	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4			

Tableau II : valeurs du coefficient C en fonction du temps
(inhalation d'oxygène pur).

Temps écoulé depuis le début de l'inhalation d'oxygène pur	Valeur du coefficient C au début de l'inhalation d'oxygène										
	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2		
0 h 10	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1		
0 h 20	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0		
0 h 30	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9		
0 h 40	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8		
0 h 50	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7		
1 h 00	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6		
1 h 10	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6		
1 h 20	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5		
1 h 30	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4		
1 h 40	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3		
1 h 50	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3		
2 h 00	1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3		

de replonger sans tenir compte de la première plongée ;

— s'il n'a pas été possible de faire durer assez longtemps l'inhalation d'oxygène pur pour ramener à 1 la valeur du coefficient C, le tableau II indique la valeur restante de ce coefficient, avec laquelle on peut entrer dans la table de plongées successives.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel nécessaire à l'application de cette méthode très avantageuse est

d'une grande simplicité. Il comprend :
une bouteille d'oxygène comprimé,
un manodétendeur classique,
un sac respiratoire,
un tuyau annelé souple,
un ensemble de soupapes d'inspiration et d'expiration,
un masque inhalateur ou un simple embout buccal avec pince-nez.

L'ensemble ainsi défini n'exclut pas tout autre dispositif, mais l'attention des utilisateurs est attirée sur les dangers que présenterait un équipement non spécialement adapté et réservé à l'emploi de l'oxygène pur.

CONDITIONS PARTICULIÈRES DE L'EXÉCUTION DES PALIERS

L'exécution des paliers sous l'eau est fastidieuse et pénible.

— Pour un scaphandrier, il est prévu une plate-forme lestée, manœuvrée de la surface sur un ordre du directeur de plongée.

— Pour un plongeur, un filin, lesté et muni de repères, suffit.

Deux méthodes permettent l'exécution correcte des paliers dans des conditions plus confortables : la décompression de surface et la décompression en « chambre de décompression submersible ».

DÉCOMPRESSION DE SURFACE

Lorsqu'on dispose d'une chambre de recompression sur les lieux de la plongée, elle peut être utilisée pour abrégier le séjour dans l'eau, mais à la condition que la profondeur et le temps passé sous l'eau jusqu'au début de la remontée soient dans les limites indiquées dans le tableau suivant, extrait des règles de plongée de la Marine américaine.

Profondeurs	Temps passé sous l'eau
30 mètres	85 minutes
33 mètres	75 minutes
36 mètres	60 minutes
39 mètres	55 minutes
42 mètres	45 minutes
45 mètres	40 minutes
51 mètres	30 minutes

La décompression de surface s'opère de la manière suivante :

le plongeur effectue sous l'eau le premier palier, conformément à la table de plongée.

Lorsque ce palier est terminé, il remonte d'une seule traite à la surface. On le déséquipe sans perdre de temps pour l'introduire dans la chambre; où il est immédiatement recomprimé à la pression correspondant au palier qu'il vient d'effectuer sous l'eau. Celui-ci est répété, et la décompression poursuivie conformément à la table de plongée.

INHALATION D'OXYGÈNE PENDANT LES PALIERS

La respiration d'oxygène pur, qui assure une élimination rapide de l'azote, permet de réduire dans la proportion de 40 p. 100 environ la durée des paliers à l'air indiqués par les tables.

Cette respiration d'oxygène doit se faire en circuit ouvert pour garantir la concentration de ce gaz. Elle peut être

commencée dès le palier de 9 mètres si le sujet est au repos. Elle ne doit pas dépasser deux heures consécutives. Des signes d'intolérance sans gravité (nausées) peuvent obliger à interrompre l'oxygène, et à reprendre les paliers à l'air.

Nota. — Il est évident que cette méthode de décompression, mise au point pour les scaphandriers ayant de longs paliers à effectuer, est parfaitement valable, et plus pratique encore, pour les plongeurs.

TRAVAIL EN CAISSON

Théoriquement, du point de vue de la décompression, le problème des travailleurs en caisson dans l'air comprimé (ouvriers tubistes) est le même que celui des plongeurs et des scaphandriers. C'est au physiologiste Paul Bert (1833-1886) que revient le mérite d'avoir soupçonné et mis en évidence les conséquences biologiques de la vie en pression ; la relation de ses travaux, parue en 1878 sous le titre *La pression barométrique*, constitue un bel exemple d'expérimentation intelligente, originale, honnête et féconde, pour expliquer les mystérieuses conséquences de la vie en surpression et en dépression.

Malgré les appellations différentes telles que « mal des caissons », « maladie des scaphandriers », « aéro-embolisme », « coup de pression », le mécanisme, la prévention et le traitement de ces accidents sont identiques. Un décret en date du 1^{er} octobre 1913 a codifié, pour la première fois en France, les conditions du retour à la pression atmosphérique des ouvriers ayant effectué des travaux dans l'air comprimé. Cette réglementation, parfaitement insuffisante et qui n'empêchait pas des accidents graves et nombreux, est

néanmoins restée en application jusqu'au décret du 31 août 1959 relatif aux mesures particulières de protection et de salubrité applicables dans les chantiers de travaux dans l'air comprimé.

L'expérience de ces nouvelles tables de décompression pour ouvriers tubistes n'est pas encore suffisante pour que l'on puisse se prononcer sur leur valeur. Il serait intéressant de faire profiter cette catégorie de travailleurs de l'expérience acquise dans le domaine de la plongée, et il est certain, par exemple, que l'inhalation d'oxygène pendant les paliers serait une mesure efficace pour augmenter la sécurité. Le G.E.R.S. a fourni aux organismes chargés de la surveillance et de la protection des travailleurs dans l'air comprimé (ministère des Travaux publics, Sécurité sociale, Organisme professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux publics) tous les éléments nécessaires pour calculer, sur les bases des tables de plongée, des tables de décompression avec inhalation d'oxygène. Les gains de temps sont très appréciables et il serait du plus grand intérêt de procéder à une expérimentation sérieuse.

CORRECTION DES TABLES EN FONCTION DE L'ALTITUDE

Le calcul montre que la valeur de la pression barométrique sur le lieu de plongée influe sur les conditions de la remontée¹ ; il n'est pas toujours possible d'utiliser directement les tables classiques.

En toute rigueur, il y aurait lieu de calculer un jeu de tables complet pour chaque cas particulier. Ce travail serait considérable et une étude faite au G.E.R.S. (Cdt Chauvin) a permis d'utiliser d'une manière simple les tables classiques : il suffit de connaître l'altitude du lieu. Appelons H_0 la pression atmosphérique au niveau de la mer, exprimée en mètres d'eau (10 mètres d'eau ou 760 millimètres de mercure), H la pression atmosphérique à l'altitude du lac, exprimée en mètres d'eau, et P la profondeur effective de la plongée dans le lac exprimée en mètres. Il suffit d'entrer dans la table avec une profondeur fictive égale à la profondeur réelle de la plongée multipliée par le coefficient $\frac{H_0}{H}$. Les différents paliers prévus dans la table réglementaire à 3 mètres, 6 mètres, 9 mètres, 12 mètres, etc., seront remplacés par des paliers de durée égale

1. En cas de forte dépression barométrique et pour les plongées profondes, il y a lieu de corriger les tables de décompression comme ci-après.

à des profondeurs corrigées par le rapport $\frac{H}{H_0}$; 3 mètres deviendront $3 \times \frac{H}{H_0}$

Exemple

Pour des plongées envisagées dans un lac de montagne situé à 1 500 mètres d'altitude où la pression barométrique est de 640 millimètres de mercure, la valeur de H est égale à :

$$\frac{10 \times 640}{760} = 8,40 \text{ mètres.}$$

Les paliers s'effectueront donc aux profondeurs suivantes :

– au lieu de 3 m :

$$3 \times \frac{H}{H_0} = \frac{3 \times 8,4}{10} = 2,5 \text{ m}$$

– au lieu de 6 m :

$$6 \times \frac{H}{H_0} = \frac{6 \times 8,4}{10} = 5 \text{ m}$$

etc.

Les profondeurs fictives à prendre en considération pour entrer dans les tables seront corrigées par le rapport

$$\frac{H_0}{H} = \frac{10}{8,4}$$

qui donne, par exemple, la profondeur fictive de :

$$\frac{32 \times 10}{8,4} = 38 \text{ mètres}$$

pour une plongée réelle à 32 mètres.

RÉFLEXIONS SUR LE CALCUL DES TABLES DE PLONGÉE

Nous avons donné une méthode pour le calcul des tables de plongée avec certains coefficients de sursaturation critique que nous avons considérés comme constants. En fait, avec les connaissances que nous avons maintenant, on admet que les coefficients de sursaturation critique sont variables et dépendent de la profon-

deur et de la durée de la plongée. Il en a été tenu compte pour le calcul des tables à l'air données dans cet ouvrage : les coefficients ont été modifiés, ce qui explique l'hétérogénéité que l'on pourrait constater dans le temps des paliers.

De plus, il va sans dire que ces coefficients ne sont valables en aucune façon

pour des plongées faites avec des mélanges gazeux autres que l'air (mélange O_2He , O_2HeN_2 ...). Dans tous les cas, il est très important de définir expérimentalement les coefficients de sursaturation critique à employer.

Enfin, une table calculée avec des coefficients de sursaturation critique choisis très faibles ne peut être considérée *a priori* comme bonne. *Le seul critère valable pour déterminer si une table est bonne ou non est l'expérimentation en caisson.*

Nota. — Il existe un appareil, dit

détecteur de bulles, qui donne une indication sur les bulles circulant dans les gros vaisseaux. Des appareils de ce genre ont été réalisés aux États-Unis et en France. Ils ont été utilisés dans certaines expérimentations animales et humaines. Mais l'interprétation des résultats qu'ils fournissent n'est pas, à l'heure actuelle, tout à fait évidente. On peut escompter que les données recueillies à l'issue d'une longue période permettront d'établir une corrélation entre les signaux de l'appareil et l'état du plongeur durant la décompression.

Table de plongée à l'air G.E.R.S.

autorisant le travail au fond

Toutes les durées sont exprimées en minutes ou heures et minutes

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :			Durée totale de la remontée	Coefficient C
		9 m	6 m	3 m		
15 mètres	10				1	1,1
	20				1	1,2
	30				1	1,2
	40				1	1,3
	50				1	1,4
	60				1	1,4
	1 h 30				1	1,6
	2 h 00				1	1,7
16 mètres	10				1	1,1
	20				1	1,2
	30				1	1,3
	40				1	1,3
	50				1	1,4
	60				1	1,5
	1 h 10				1	1,5
	1 h 20				1	1,6
	1 h 30				1	1,7
	1 h 40			1	2	1,7
	1 h 50			5	6	1,7
	2 h 00			10	11	1,8
18 mètres	10				1	1,1
	20				1	1,2
	30				1	1,3
	40				1	1,4
	50				1	1,5
	60				1	1,5
	1 h 10				1	1,6
	1 h 20			3	4	1,7
	1 h 30			6	7	1,7
	1 h 40			12	13	1,8
	1 h 50			17	18	1,8
	2 h 00			26	27	1,8
20 mètres	10				1	1,1
	20				1	1,2

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :			Durée totale de la remontée	Coeff.-Coeff.-C
		9 m	6 m	3 m		
20 mètres	30				1	1,3
	40				1	1,4
	50				1	1,5
	60				1	1,6
	1 h 10			6	7	1,7
	1 h 20			10	11	1,7
	1 h 30			16	17	1,8
22 mètres	10				1	1,1
	20				1	1,2
	30				1	1,4
	40				1	1,5
	50				1	1,6
	55			2	3	1,6
	60			7	8	1,6
	1 h 10			12	13	1,7
	1 h 20			17	18	1,8
	1 h 30			31	32	1,8
24 mètres	10				2	1,1
	20				2	1,3
	30				2	1,4
	40				2	1,5
	45				2	1,6
	50			5	7	1,6
	55			9	11	1,6
	60			13	15	1,7
	1 h 10			22	24	1,7
	1 h 20			31	33	1,8
	1 h 30			45	47	1,8
25 mètres	10				2	1,2
	15				2	1,2
	20				2	1,3
	25				2	1,3
	30				2	1,4
	35				2	1,5
	40				2	1,5
	45			3	5	1,6
	50			8	10	1,6
	55			13	15	1,6

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :			Durée totale de la remontée	Coefficient C
		9 m	6 m	3 m		
25 mètres	60			15	17	1,7
	1 h 10			23	25	1,8
	1 h 20			35	37	1,8
	1 h 30			52	54	1,8
26 mètres	5				2	1,1
	10				2	1,2
	15				2	1,2
	20				2	1,3
	25				2	1,3
	30				2	1,4
	35				2	1,5
	40				2	1,6
	45			6	8	1,6
	50			11	13	1,6
	55			14	16	1,6
	60			18	20	1,7
	1 h 10			32	34	1,8
	1 h 20			42	44	1,8
	1 h 30			55	57	1,9
28 mètres	5				2	1,1
	10				2	1,2
	15				2	1,3
	20				2	1,3
	25				2	1,4
	30				2	1,4
	35				2	1,5
	40			6	8	1,6
	45			11	13	1,6
	50			16	18	1,7
	55			20	22	1,7
	60			28	30	1,7
	1 h 10			43	45	1,8
	1 h 20		4	55	61	1,8
	1 h 30		7	64	73	1,9
30 mètres	5				2	1,1
	10				2	1,2
	15				2	1,3
	20				2	1,3

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :			Durée totale de la remontée	Coefficient C
		9 m	6 m	3 m		
30 mètres	25				2	1,4
	30				2	1,5
	35			3	5	1,5
	40			10	12	1,6
	45			16	18	1,7
	50			21	23	1,7
	55			27	29	1,7
	60			37	39	1,8
	1 h 5			42	44	1,8
	1 h 10		5	47	54	1,8
32 mètres	5				2	1,1
	10				2	1,2
	15				2	1,3
	20				2	1,3
	25				2	1,4
	30				2	1,5
	35			7	9	1,6
	40			15	17	1,6
	45			21	23	1,7
	50			26	28	1,7
	55			36	38	1,8
	60			46	48	1,8
	1 h 5		7	50	59	1,8
	1 h 10		9	55	66	1,8
34 mètres	5				2	1,1
	10				2	1,2
	15				2	1,3
	20				2	1,4
	25				2	1,4
	30			4	6	1,5
	35			12	14	1,6
	40			19	21	1,7
	45			26	28	1,7
	50			34	36	1,8
	55		2	42	46	1,8
	60		7	50	59	1,8
35 mètres	5				2	1,1
	10				2	1,2

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :			Durée totale de la remontée	Coefficient C
		9 m	6 m	3 m		
35 mètres	15				2	1,3
	20				2	1,4
	25				2	1,5
	30			6	8	1,5
	35			14	16	1,6
	40			22	24	1,7
	45			28	30	1,7
	50			39	41	1,8
	55		6	45	53	1,8
	60		9	53	64	1,8

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :							Durée totale de la remontée	Coefficient C
		21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		
36 mètres	5								2	1,1
	10								2	1,2
	15								2	1,3
	20								2	1,4
	25								2	1,5
	30							8	10	1,6
	35							16	18	1,6
	40							23	25	1,7
	45							30	32	1,7
	50						4	38	44	1,8
	55						7	46	55	1,8
	60						11	55	68	1,8
38 mètres	5								2	1,1
	10								2	1,2
	15								2	1,3
	20								2	1,4
	25							2	4	1,5
	30							12	14	1,6
	35							20	22	1,6
	40							27	29	1,7
	45							37	39	1,8
	50						8	45	55	1,8
	55						11	52	65	1,8
	60						17	56	75	1,8

Profon- deur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :							Durée totale de la remontée	Coef- ficient C
		21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		
40 mètres	5								3	1,2
	10								3	1,3
	15							2	5	1,4
	20							4	7	1,5
	25							8	11	1,6
	30						2	15	20	1,6
	35						2	25	30	1,7
	40						3	34	40	1,8
	50					2	18	40	63	1,8
	60					8	24	54	89	1,9
42 mètres	5								3	1,2
	10								3	1,3
	15							4	7	1,4
	20							6	9	1,5
	25						3	18	24	1,6
	30						5	24	32	1,7
	35						11	34	48	1,7
	40						15	41	59	1,8
45 mètres	5								3	1,2
	10							2	5	1,3
	15							4	7	1,4
	20						2	8	13	1,5
	25						3	21	27	1,6
	30						9	29	41	1,7
	35						14	39	56	1,8
	40					2	17	46	68	1,8
48 mètres	5								3	1,2
	10							3	6	1,3
	15							5	8	1,4
	20						3	17	23	1,6
	25						5	23	31	1,7
	30					1	12	34	50	1,7
	35					2	17	42	64	1,8
	40					6	17	50	76	1,8
50 mètres	5								3	1,2
	10							3	6	1,3

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :							Durée totale de la remontée	Coefficient C
		21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		
50 mètres	15						2	4	9	1,5
	20						4	18	25	1,6
	25					1	7	26	37	1,7
	30					2	13	37	55	1,7
	35					3	18	45	69	1,8
	40					8	18	52	81	1,9
52 mètres	5								3	1,2
	10							4	7	1,3
	15						2	6	11	1,5
	20					1	4	20	28	1,6
	25					2	9	29	43	1,7
	30					2	15	40	60	1,8
	35					6	17	48	74	1,8
	40					11	19	54	87	1,9
55 mètres	5								4	1,2
	10							4	8	1,4
	15						3	8	15	1,5
	20					2	3	23	32	1,6
	25					3	11	33	51	1,7
	30					3	18	43	68	1,8
	35					9	18	51	82	1,9
58 mètres	40					14	23	54	95	1,9
	5								4	1,2
	10						1	4	9	1,4
	15						4	10	18	1,5
	20					2	6	23	35	1,7
	25					3	14	36	57	1,7
	30					7	17	47	75	1,8
	35				1	12	18	54	89	1,9
60 mètres	40				3	15	27	54	103	1,9
	5							1	5	1,2
	10						1	5	10	1,4
	15					1	4	10	19	1,5
	20					3	7	26	40	1,7
	25					3	16	39	62	1,8
60 mètres	30				1	8	18	48	79	1,8

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :							Durée totale de la remontée	Coefficient C
		21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		
60 mètres	35				2	13	21	54	94	1,9
	40				6	14	30	54	108	2,0
62 mètres	5							3	7	1,3
	10						2	5	11	1,5
	15					2	3	15	24	1,6
	20					3	9	28	44	1,7
	25				1	3	17	41	66	1,8
	30				2	9	18	51	84	1,8
65 mètres	5							4	8	1,3
	10						3	5	12	1,5
	15					3	3	20	30	1,6
	20				1	3	11	32	51	1,7
	25				2	5	17	44	72	1,8
	30				2	12	18	53	89	1,9
68 mètres	5							4	8	1,3
	10						4	5	13	1,5
	15					3	3	22	32	1,6
	20				2	2	14	35	57	1,7
	25				2	7	18	47	78	1,8
	30				3	14	21	54	96	1,9
70 mètres	5							5	10	1,3
	10					1	4	4	14	1,5
	15					3	4	23	35	1,6
	20				2	3	15	37	62	1,7
	25				3	8	18	49	83	1,8
	30				4	14	24	54	101	1,9
72 mètres	5							5	10	1,4
	10					1	4	6	16	1,6
	15				1	3	5	23	37	1,7
	20				2	3	16	39	65	1,8
	25				3	10	18	51	87	1,8
	30			1	5	15	25	54	105	1,9
75 mètres	5						1	4	10	1,4
	10					2	3	7	17	1,6
	15				2	2	8	26	43	1,7
	20				3	3	18	41	70	1,8

Profondeur	Durée de la plongée	Durée des paliers à :							Durée totale de la remontée	Coefficient C
		21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		
75 mètres	25			1	3	12	17	54	92	1,9
	30			2	7	14	29	54	111	1,9
78 mètres	5						1	4	10	1,4
	10					3	3	10	21	1,5
	15				2	3	9	29	48	1,7
	20			1	2	6	17	45	76	1,8
	25			2	2	14	21	53	97	1,9
	30			2	9	15	32	53	116	2,0
80 mètres	5						2	4	11	1,4
	10					3	3	12	23	1,6
	15				2	3	11	31	52	1,7
	20			1	3	7	17	47	80	1,8
	30		2	5	18	24	32	60	146	2,0
85 mètres	5						3	4	12	1,4
	10				1	3	3	19	31	1,6
	15				3	3	14	35	60	1,7
	20			2	2	10	18	50	87	1,8
	30	1	6	12	12	24	36	69	165	2,0

5. Mélanges respiratoires

Généralités

L'air, mélange respiratoire naturel, a été évidemment le premier utilisé pour l'alimentation des scaphandres ; mais il est apparu qu'à partir du moment où il est respiré à des pressions supérieures à la pression atmosphérique, il provoque, pendant la plongée, des troubles divers et nécessite à la remontée des précautions pour éviter les accidents de décompression. Ses constituants, l'oxygène (21 p. 100) et l'azote (79 p. 100) étaient considérés, l'un comme indispensable à la vie et donc inoffensif, l'autre comme un simple diluant que l'on rendait responsable de tous les troubles observés. Il était donc logique d'envisager d'utiliser seulement l'élément vital, et c'est là l'origine des appareils à oxygène.

Mais l'usage inconsidéré de ces appareils donna lieu à des accidents dont l'oxygène n'était pas toujours la cause, et la nécessité de diluer l'oxygène par un gaz inerte apparut.

Le désir d'éviter les inconvénients de l'azote conduisit à employer, d'une part, des mélanges suroxygénés et, d'autre part,

des mélanges dans lesquels l'azote était remplacé par de l'hélium ou de l'hydrogène, avec l'espoir d'abrégier la durée de la décompression et d'augmenter la profondeur accessible.

Il est actuellement admis qu'un mélange respiratoire a une action physiologique qui dépend à la fois de sa composition, de la concentration de ses constituants et de la pression à laquelle il est respiré. Ces deux derniers facteurs déterminent la *pression partielle* d'un gaz dans un mélange dont la valeur est, par définition, égale au produit de sa concentration par la pression absolue. Par exemple, la pression partielle de l'oxygène est la même, qu'il soit respiré pur à 7 mètres de profondeur (1,7 bar) ou comme constituant de l'air à 71 mètres (8,1 bars $\times$ 0,21 = 1,7 bar).

Le fait que l'action physiologique d'un gaz dépende de la valeur de sa pression partielle explique qu'un mélange respiratoire, toléré à la pression atmosphérique, puisse être toxique à partir d'une certaine profondeur.

Limites imposées par l'oxygène

Les valeurs de la pression partielle d'oxygène supportables pendant quelques heures consécutives, sans qu'apparaissent de troubles immédiats ou différés, sont comprises entre des limites que l'expérimentation a précisées.

Il ne faut pas que la concentration de ce gaz tombe au-dessous de 17 p. 100 dans un mélange respiré en pression atmosphérique (pression partielle $0,17 \times 1 = 0,17$ bar), si l'on veut être à l'abri de troubles anoxiques dont le risque est aggravé par l'effort musculaire. Au repos, des concentrations en oxygène inférieures à 17 p. 100 sont supportables, mais à partir de 10 p. 100 environ (pression partielle de $0,10 \times 1 = 0,10$ bar), la perte de connaissance est immédiate.

Il ne faut pas, non plus, que l'oxygène soit respiré pur à des profondeurs supérieures à 7 mètres, si l'on ne veut pas risquer d'accident hyperoxique, susceptible de se manifester brutalement dès que la pression partielle de l'oxygène dépasse la valeur de $1 \times 1,7 = 1,7$ bar.

On admettait jusqu'ici qu'à pression partielle égale, l'oxygène était plus toxique respiré pur que respiré dans un mélange. De nombreuses expériences pratiquées au G.E.R.S. ont infirmé cette opinion, et si l'on veut éviter l'apparition d'accidents aigus par manque ou par excès d'oxygène, mieux vaut s'en tenir, *pour des durées d'inhalation de l'ordre d'une à deux heures*, aux valeurs suivantes :

$0,17 \text{ bar} < \text{PiO}_2 < 2 \text{ bars.}$

Pour des durées d'inhalation plus longues mais ne dépassant guère six heures, il est sage de maintenir la PiO_2 au-dessous de 1,7 bar ; enfin, pour des durées encore plus longues, excédant six heures, il faut maintenir la PiO_2 aussi près que possible de 0,21 bar pour éviter l'apparition des accidents chroniques d'irritation pulmonaire.

Dans les bases sous-marines fixes à grande profondeur (*Sealab II*, par exemple), la PiO_2 est maintenue un peu au-dessus de 0,21 bar, pour deux raisons au moins ; d'une part, à de telles profondeurs cette PiO_2 ne suffirait pas à assurer une hématoxose suffisante au niveau alvéolaire¹, et d'autre part, si l'on se rapporte au graphique présenté plus loin, on voit qu'à grande profondeur il suffit de variations très faibles de la teneur du mélange en oxygène pour entrer en hypoxie.

1. Ceci a été retrouvé par Chouteau et les autres collaborateurs de l'équipe du commandant Cousteau au cours de l'expérience « Ursula » sur le bouc en 1966, et mis par ces auteurs sur le compte d'une hypoventilation ; il se peut également que les molécules d'oxygène diluées dans une grande quantité de gaz inerte aient de la difficulté à atteindre le capillaire alvéolaire (diffusion de l'oxygène dans le gaz inerte) ; il se peut, aussi, que ce phénomène soit lié à des modifications du rapport ventilation/perfusion pulmonaire. Cette étude se poursuit en collaboration entre le C.E.R.T.S.M., le G.I.S.M.E.R. et le C.E.R.B.

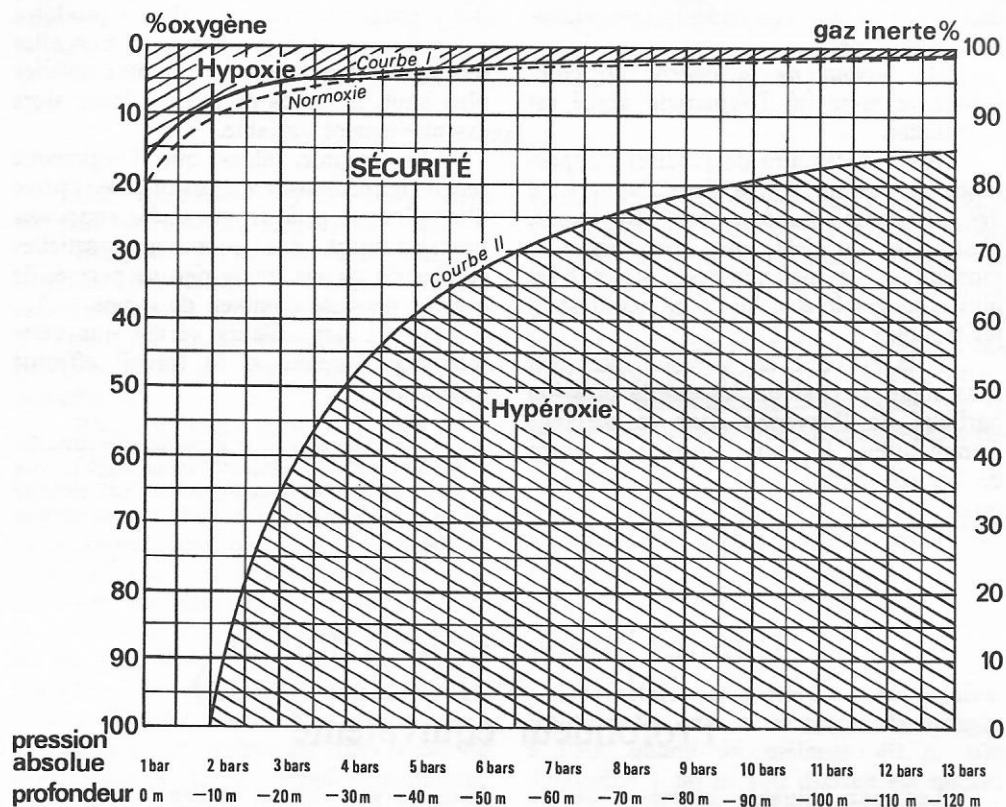
REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

En abscisses sont portées les pressions absolues (en bars) et les profondeurs

correspondantes (en m) ; en ordonnées, les concentrations centésimales en gaz

inerte (à droite) ou en oxygène (à gauche) du mélange respiré. La courbe I réunit les points où la pression partielle d'oxygène est égale à 0,17 bar ; la courbe II,

les points où la pression partielle d'oxygène est égale à 2 bars. La représentation graphique de ces courbes délimite trois zones :



15. Représentation graphique des limites imposées par l'oxygène.

La zone intermédiaire, comprise entre les courbes I et II, correspond à la zone de sécurité où les pressions partielles d'oxygène sont compatibles avec la vie. La ligne pointillée réunit les points où la pression partielle d'oxygène est de 0,21 bar (normoxie). Les PO₂ de la zone d'hypoxie relative située au-dessus d'elle

pourraient être tolérées pendant des temps prolongés, l'adaptation aidant, n'était la fatigue des muscles respiratoires lorsque la densité du mélange est grande ; en revanche les PO₂ de la zone d'hyperoxie relative ne peuvent être tolérées au-delà de quelques heures si elles s'éloignent beaucoup de 0,21 bar sans qu'apparaissent

des accidents dus à l'effet Lorrain-Smith. A titre indicatif, la PO_2 , au cours de l'expérience « Sealab II », oscillait entre 0,25 et 0,35 bar.

Au-dessus de la courbe I, on entre dans la zone où les accidents hypoxiques sont inévitables.

Au-dessous de la courbe II, commence la zone où l'hyperoxie aiguë est à craindre.

Il est nécessaire de préciser l'importance du facteur temps dans l'apparition des accidents d'anoxie ou d'hyperoxie, c'est-à-dire du délai qui existe entre le moment où le mélange respiratoire n'est plus convenable et celui où se manifestent les troubles :

- la syncope anoxémique intervient sans signe avertisseur dès que la pression partielle de l'oxygène dans le mélange respiré atteint le seuil critique ; le temps de latence est de 1 à 2 minutes selon le travail effectué¹ ;

- par contre, la crise convulsive de

type épileptique, susceptible de se déclencher pour des pressions partielles d'oxygène trop élevées, n'est pas immédiate ; si rien ne permet, pour un individu donné, de prévoir le moment de son apparition, il est pourtant certain qu'elle se produira s'il reste exposé à des pressions partielles d'oxygène supérieures aux limites définies plus haut, le temps de latence étant alors essentiellement variable.

En résumé, alors que l'organisme réagit immédiatement lorsqu'il est privé d'oxygène, il peut en revanche supporter passagèrement des pressions partielles élevées de ce gaz, mais rien ne permet de prévoir pendant combien de temps.

Il est par ailleurs vérifié que cette tolérance diminue si le travail effectué augmente.

1. Précisons qu'il y a parfois des troubles progressifs, sorte de signaux d'alarme, dans la zone 0,17 à 0,10 bar, mais qu'ils ne sont pas toujours perçus par le plongeur : il ne faut donc pas compter sur eux.

Limites imposées par le diluant (azote, hélium, hydrogène, argon) Profondeur équivalente

Les gaz diluants utilisés dans la préparation des mélanges ont une action physiologique propre.

Jusqu'ici, ils sont choisis seuls ou en mélanges, de façon à éviter la narcose dans une tranche de profondeur donnée ; on tient compte des qualités de dissolution des gaz considérés dans l'organisme pour établir les tables de décompression appropriées à chaque gaz.

Plus grande est la profondeur de la plongée et moindre est le poids molécu-

laire du gaz diluant utilisé : l'argon, de fort poids moléculaire, provoque la narcose pour des pressions partielles plus faibles que l'azote, de poids moléculaire moindre, et c'est pourquoi il n'est pas utilisé pour la fabrication des mélanges de plongée. L'hélium, de poids moléculaire inférieur à l'azote, est utilisé, seul ou mélangé à de l'azote, pour des plongées profondes.

Fort opportunément, l'utilisation à grande profondeur de gaz de faible poids moléculaire permet de maintenir les

résistances dynamiques ventilatoires dans des limites acceptables. Cependant, jusqu'à présent, ce facteur, que nous pourrions appeler « mécanique », n'a pas été déterminant dans l'élaboration des mélanges exactement adaptés à la profondeur de la plongée. Il est sûr que, dans les années qui

viennent on s'attachera à définir des mélanges qui, tout en évitant la narcose, procurent le confort respiratoire maximal : des travaux sont en cours actuellement sur ce sujet, à la C.E.R.I.S.M.E.R. et dans les organismes similaires des marines étrangères.

AZOTE

Les mélanges oxygène-azote sont les plus couramment employés.

Du point de vue de la toxicité, les troubles imputables à l'azote limitent raisonnablement à 70 mètres la plongée à l'air. La pression partielle d'azote (PN_2) a, dans ces conditions, la valeur suivante :

$$PN_2 = 8 \text{ bars} \times 0,79 = 6,3 \text{ bars.}$$

Mais le plus souvent, étant donné qu'il est admis que l'oxygène joue un rôle négligeable dans l'apparition des accidents de décompression, on utilise des mélanges plus riches en oxygène que l'air atmosphérique, contenant donc moins d'azote, et la limite toxique de la pression partielle de ce gaz, fixée ci-dessus, n'est jamais atteinte. Par contre, la dissolution de l'azote dans les tissus, bien qu'inférieure en quantité à ce qu'elle est dans le cas de la plongée à l'air, conduit néanmoins, selon la profondeur et la durée, à effectuer une remontée strictement contrôlée pour éviter des accidents de décompression.

A chaque mélange devrait correspondre une table de plongée particulière. Il est possible cependant d'utiliser les tables de plongée à l'air en introduisant la notion de « profondeur équivalente ».

Un mélange contenant X p. 100 d'azote respiré à une profondeur réelle de P mètres se comporte, du point de vue de la pression partielle et de la décompression

(puisque seul l'azote intervient), de la même façon que de l'air (79 p. 100 d'azote) respiré à une profondeur fictive de P' mètres appelée « profondeur équivalente ». A P' mètres de profondeur, la pression absolue exprimée en mètres d'eau est égale à : $P' + 10$ (10 mètres d'eau correspondant sensiblement à la valeur de la pression atmosphérique). L'égalité des pressions partielles d'azote s'écrit alors :

$$(P + 10) X = (P' + 10) 0,79$$

La profondeur équivalente est donc fournie par la formule :

$$(P' + 10) = \frac{(P + 10) X}{0,79}$$

Exemple

Quelle est la « profondeur équivalente » pour utiliser les tables de plongée à l'air, quand un mélange 40 p. 100 d'oxygène + 60 p. 100 d'azote est respiré en circuit ouvert par un scaphandrier à 40 mètres de profondeur ?

Appliquons la formule ci-dessus :

$$(P' + 10) = \frac{(40 + 10) 0,60}{0,79}$$

$$(P' + 10) = 37,9$$

$$P' = 37,9 - 10 = 27,9 \text{ mètres.}$$

Il faut donc entrer dans la table de plongée à l'air avec le temps réel passé au fond et la profondeur équivalente de 28 mètres.

La pression partielle de l'oxygène,

dans le mélange 40 p. 100 d'oxygène + 60 p. 100 d'azote respiré à 40 mètres est :

$PO_2 = 5 \text{ bars} \times 0,4 = 2 \text{ bars}$
valeur fixée comme limite acceptable sans risque d'hyperoxie.

HÉLIUM

L'hélium, gaz inerte et léger (poids moléculaire 4 au lieu de 28 pour l'azote), existe à l'état naturel en grande quantité dans certains pays. Il fut expérimenté par la Marine américaine dès 1925 pour essayer d'abrèger la remontée, sans augmenter les risques d'accident de décompression. Il apparut qu'il était beaucoup moins toxique que l'azote puisqu'il supprimait les troubles de la plongée profonde à l'air (*nitrogen narcosis*). Par ailleurs, les propriétés de solubilité et de diffusibilité de l'hélium étant différentes de celles de l'azote, la décompression se révéla plus longue et plus délicate qu'après une plongée à l'air.

Les travaux de l'*Experimental Diving*

Unit de Washington permirent de mettre au point la plongée profonde à l'hélium et de calculer une table de décompression spéciale jusqu'à 180 mètres.

La Marine Nationale française utilise également l'hélium pour les plongées profondes. Dès 1963, le G.E.R.S. a préconisé, pour les plongées entre 60 et 150 mètres, l'emploi de mélanges ternaires dans lequel le gaz diluant est formé pour moitié d'azote et pour moitié d'hélium, par exemple : 10 p. 100 d'oxygène, 40 p. 100 d'azote, 50 p. 100 d'hélium : le mélange ternaire est satisfaisant au point de vue de la mécanique ventilatoire, et il évite de gaspiller l'hélium.

HYDROGÈNE

La plongée avec mélanges oxygène-hydrogène a longtemps été le monopole de la Marine suédoise. A l'heure actuelle, il semble que la position générale soit l'expectative ; et même les Suédois ont laissé en sommeil l'étude des mélanges hydrogénés et utilisent des mélanges à base d'azote ou d'hélium.

L'hydrogène, plus léger que l'hélium (poids moléculaire 2), présente comme lui l'avantage de supprimer les troubles de la plongée profonde à l'air. L'ingénieur suédois Zetterstrom répondait clairement au téléphone alors qu'il avait atteint 160 mètres.

Du point de vue de la dissolution dans

les tissus, il se rapproche de l'azote, mais nécessite le calcul d'une table de plongée particulière.

Du point de vue de l'emploi, il présente malheureusement un grave inconvénient, puisque les mélanges oxygène-hydrogène sont spontanément explosifs quand le pourcentage d'oxygène est supérieur à 4 p. 100.

Des études et des expérimentations faites au G.E.R.S. ont de plus montré que l'exposition à l'hydrogène (gaz non inerte et au contraire très réactif chimiquement) peut provoquer des désordres physiologiques si importants qu'ils peuvent entraîner la mort.

Emploi des mélanges respiratoires

Les mélanges respiratoires ont tout d'abord été utilisés pour la plongée profonde avec des scaphandres à casque, légèrement modifiés en vue d'améliorer la ventilation et l'élimination du gaz carbonique, puis avec des scaphandres autonomes.

Leur emploi implique des moyens de surface importants, et conduit à une consommation excessive de gaz lorsque

l'alimentation du plongeur se fait en circuit ouvert. Afin de réduire le gaspillage de gaz inerte, les scaphandres autonomes ont été abandonnés au profit d'appareils à circuit semi-fermé. L'emploi de tourelles et de systèmes de récupération des gaz permet de plonger profondément aux mélanges de façon raisonnablement économique : nous renvoyons le lecteur aux chapitres où ces techniques sont exposées.