

LES TABLES DE DECOMPRESSION MT92



« La valeur de ces tables réside dans le fait qu'elles sont conçues pour une utilisation professionnelle et qu'elles intègrent des procédures complètes et faciles à utiliser » (Imbert & Gardette 1991)

I - Objectifs

Il est important de savoir utiliser les tables en toutes circonstances. C'était l'objectif majeur de l'intervention orale. Faute de temps, il était difficile d'en dire plus. Il apparaît toutefois intéressant de connaître la théorie amenant à la conception et à la validation des tables que vous utiliserez désormais dans le cadre de la plongée scientifique, la réglementation et la législation qui les caractérisent.

Le présent document insiste donc sur les points suivants:

- 1 - Qu'est ce qui cache derrière une table? Rappels et éléments de calcul des tables. Théorie de la décompression
- 2 - Les tables utilisées pour les travaux en milieu hyperbare: constitution, réglementation, législation
- 3 - L'utilisation des tables en toutes circonstances:
 - Plongées mélange air et nitrox
 - Plongée en altitude
 - Plongées successives
 - Plongée à niveaux multiples

II - Sources

- Instruction n° 980002 IGHS (mars 1999): Réglementation de la plongée scientifique. Instruction d'application de la réglementation nationale et procédures de sécurité, pp 32-40.
- Roger Aubert & Pierre Jonville. 1998. Le tour de la plongée en 80 problèmes. Editions Roger Aubert & Pierre Jonville, 431 p.
- Travaux en milieu hyperbare. Mesures particulières et prévention (dernière mise à jour). 1995. Journal officiel de la république française, 404 p.
- Paul Villevieille. 1993. Guide de préparation au niveau 4. Editions GAP, 192 p.
- Philip Foster. 1993. La plongée sous-marine à l'air: l'adaptation de l'organisme et ses limites. Presse Universitaire de Grenoble, 236 p.
- Xavier Fructus & Raymond Sciarli. 1992. Plongée: santé, sécurité. Editions Ouest France, 252 p.
- Jean-Pierre Imbert & Bernard Gardette. 1991. La proposition COMEX pour les tables de décompression du ministère du travail. Présentation à MEDSUBHYP, 20-21 sept 1991, Bordeaux.
- Le manuel du Dive master PADI. 1999. Version 2

III – Rappels

Dès le début de vos formations de plongée loisir, vous avez appris les règles simples qui permettent de se mettre à l'abri des accidents, en particulier des accidents de décompression (ADD). Parmi ces règles, deux sont essentielles lorsque l'on termine sa plongée:

- respecter une certaine vitesse de remontée
- respecter la durée des paliers

Pourquoi?

Notions de saturation, sursaturation, désaturation

A la remontée, lors de la décompression, la tension d'azote dissous dans les tissus à une profondeur donnée – au premier palier par exemple – est supérieure à la pression d'azote de l'air respiré à la pression ambiante. L'objectif des tables est de conseiller une procédure de remontée qui occasionne une sursaturation raisonnable pour l'organisme. Dit autrement, une bonne décompression est celle qui se solde par un phénomène bullaire accepté par l'organisme. La sursaturation critique caractérise la tolérance de l'organisme aux bulles circulantes et désigne ainsi la saturation minimum requise pour provoquer la formation d'au moins une bulle. Au-delà de ce seuil pour une sursaturation importante, des manifestations chimiques ou biologiques anormales peuvent apparaître. Ce seuil est déterminé par le coefficient de sursaturation critique qui permet le dégazage sans formation de bulles (voir plus bas). Si ce seuil est dépassé, des bulles circulantes ou stationnaires peuvent se former et l'accident de décompression est susceptible de survenir. Il survient lorsque le volume de la bulle dépasse le volume maximal admissible.

Pourquoi impose t-on une vitesse de remontée?

Les différents tissus ou compartiments de notre organisme sont différemment sensibles à la saturation et la désaturation en gaz, en particulier l'azote (tableau 1). Dit autrement, ils se chargent et se déchargent différemment en gaz, on dit qu'ils ont des périodes variables de (dé)saturation en azote. Une remontée lente est nécessaire pour désaturer les tissus dont la période est courte (c'est à dire qui seaturent rapidement).

Les différentes tables et ordinateurs donnent des valeurs de vitesse de remontée différente, voire variables. Ainsi celles que nous utiliserons préconisent une vitesse de remontée entre 9 et 15 m/min (avec une moyenne de 12 m/min) contre 15-17 m/min pour les tables MN90, conseillées par la FFESSM. La vitesse est de 10-12 m/min pour les ordinateurs non adaptatifs et elle varie entre 20 et 7 m/min pour les appareils adaptatifs, dernière génération (voir cours sur les ordinateurs).

Pourquoi réaliser des paliers?

Les paliers servent à désaturer les tissus dont la période est longue (de façon à ce que pour eux, le coefficient de sursaturation critique [c'est à dire la valeur seuil avant le dégazage incontrôlé] ne soit jamais dépassé).

IV – Les concepts de la décompression

Actuellement, la conception d'une table repose sur l'expérimentation. Son élaboration repose sur:

- Des bases physiques: Théorie de la perfusion d'Haldane et de la diffusion d'Hempleman.
Un modèle mathématique de la décompression est alors choisi
- Le calcul mathématique qui donne une ébauche de la table

- La vérification expérimentale et l'étude statistique pour apporter ensuite les corrections nécessaires. Il est accordé une place prépondérante à la base de données, la composante aléatoire de la survenue d'un accident de plongée n'ayant pu à ce jour être modélisé.

La théorie classique de Haldane (1907) reste la base de toutes les tables actuelles. Physiologiste de son état, Haldane est le premier à établir une règle de conduite à observer par les plongeurs afin de remonter à la surface sans encombre. Cette demande lui a été formulée par la Royal Navy britannique en 1906. Il fonde son étude sur l'expérimentation en chambre de décompression, le modèle mathématique est énoncé ensuite pour donner une explication rationnelle du phénomène biologique de la décompression. Le modèle biologique qu'il utilise est la chèvre (le saviez vous ?). Il met en évidence qu'il existe différents tissus de périodes différentes (ou plutôt des compartiments tissulaires = groupes de tissus ou organes qui se comportent de la même façon vis à vis de l'absorption et de l'élimination de l'azote). Il met en place les premières procédures de décompression: paliers et vitesse réduite entre les paliers et la surface. Le modèle de décompression proposé sera vérifié sur des plongeurs en milieu naturel. A l'époque, il considérait 5 tissus. Certains modèles en utilisent plus de 20 aujourd'hui !

Il admet que la pression de l'air alvéolaire est instantanément transmise au sang artériel. Il suppose que la concentration de gaz dissous dans tout l'espace tissulaire est uniforme. Il se rallie ainsi à l'idée que les échanges entre sang et tissus s'effectuent seulement par perfusion.

Il élabore alors les premières tables de décompression dont la méthode consiste à ne pas dépasser un rapport entre la pression maximum d'exposition et la pression atteinte pendant la décompression (ceci afin de ne pas avoir de gaz dissous en excès). Il préconise des arrêts ou paliers pour éliminer l'excédent de gaz.

Le modèle de Haldane constitue la première approche de modélisation mathématique de la décompression. Dans ce modèle, seule la perfusion est considérée comme mode de transport et d'échange. La diffusion n'est pas considérée. Ceci sera corrigé par Hempleman en 1952.

Tableau 1: Périodes de saturation des tissus de l'organisme

Compartiment	Période (min)	Organes concernés
1	5	Reins
2	10	Estomac, foie, viscères, SNC
3	20	Foie, viscères, SNC
4	40	Peau
5	80	Peau, muscles, cœur
6	160	Muscles
7	320	Muscles, articulations, os, graisse
8	640	Graisse, articulations, os

La valeur M de Workman

Il est possible de considérer la sursaturation critique comme le gradient maximum de gaz inerte dissous, admissible lors d'une décompression. Cet excès de tension du gaz inerte dissous (Δp) propre à chaque tissu permet au plongeur de remonter jusqu'à un palier de profondeur P au profondimètre. Ces valeurs critiques de Δp sont appelés M et $M = M_0 + a \times P$. M_0 est l'excès de tension maximum de gaz inerte autorisé quand $P=0$ lorsque le plongeur arrive en surface; a est une constante qui dépend du tissu.

C'est la publication des travaux de Workman qui a fournit des tables à l'air et aux mélanges synthétiques plus étendues et plus sûres, mais également qui a permis aux divers groupes de travail (aux USA, en France, en Angleterre) de calculer leurs propres tables et de les perfectionner.

La valeur M est donc la valeur maximale qu'un compartiment peut accepter lorsque le plongeur remonte vers la surface. La valeur M permet de ne pas dépasser le gradient maximum acceptable. Si le plongeur venait à dépasser cette valeur M pour un tissu donné, il s'exposerait à un risque inadmissible de maladie de décompression.

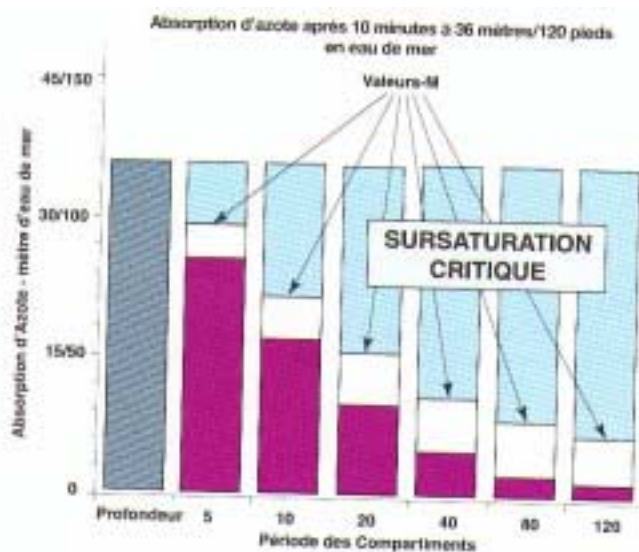
Les concepteurs des modèles de décompression basent leurs valeurs M sur des plongées tests et des données de plongée montrant que certains des profils peuvent ou non générer une maladie ou des bulles asymptomatiques n'entraînant pas la maladie mais détectables au débitmètre Doppler à ultrason. Les concepteurs déterminent la valeur M pour chacun des compartiments de manière à ce que les limites de temps déterminées par le modèle restent cohérentes avec les données.

Pour la plupart des modèles de décompression utilisés pour les tables de plongée et ordinateurs destinés à la plongée loisir, la valeur M est calculée pour faire surface au niveau de la mer. Au-delà de 300 m, il faut généralement appliquer des mesures particulières.

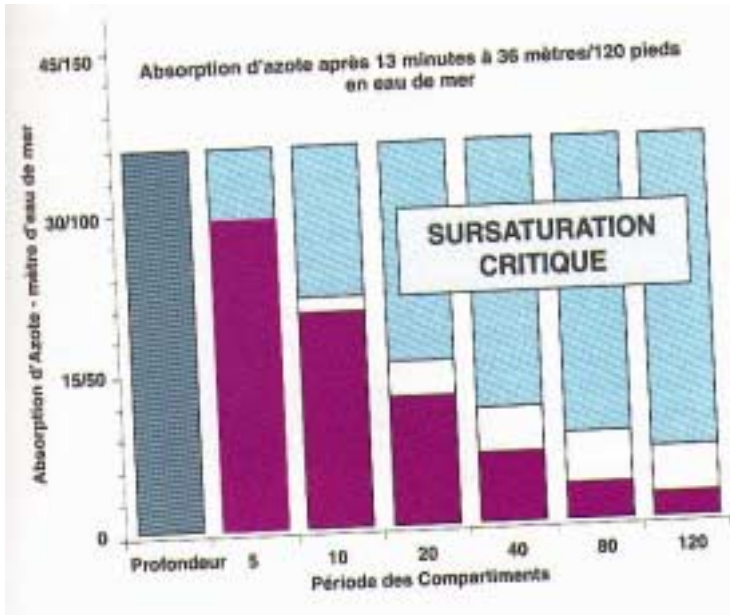
La formule de Haldane et les valeurs de M servent de base pour la conception des tables actuelles.

Fonctionnement du modèle d'Haldane pour une plongée simple

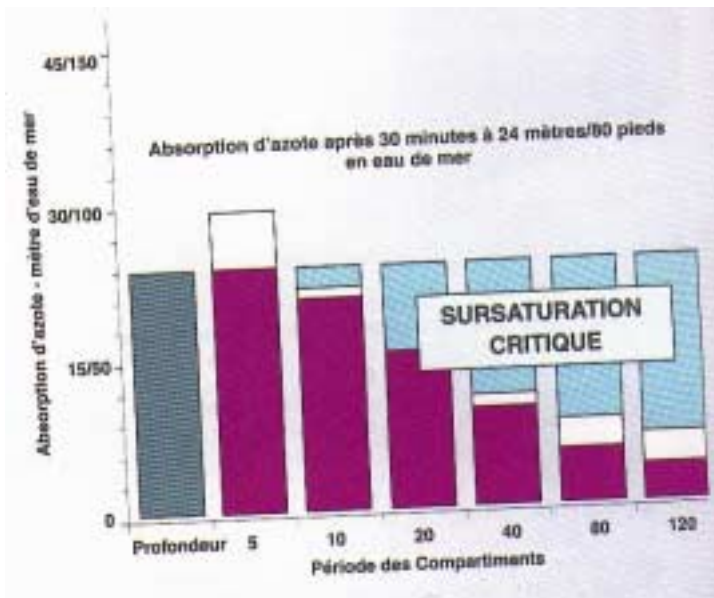
Le modèle détermine la quantité d'azote absorbée pour chaque compartiment pour une profondeur et une durée donnée. Lorsqu'un compartiment atteint sa valeur M, la plongée devient une plongée avec décompression. Lors des plongées profondes, les compartiments les plus rapides atteignent habituellement leur valeur M en premier. Les valeurs M sont plus importantes mais les périodes sont si courtes que les compartiments tissulaires atteignent rapidement leurs limites. Lors de plongées moins profondes, la quantité maximale d'azote qu'un compartiment peut absorber est moins importante que les valeurs M des compartiments les plus rapides. Cela signifie que les compartiments rapides ne peuvent jamais atteindre leur valeur M lors de plongées peu profondes. De ce fait les compartiments plus lents déterminent et contrôlent les limites maxima de la plongée. Au cours d'une plongée profonde ou non, le compartiment qui atteint sa valeur M en premier est celui qui détermine la limite de la plongée. Il est appelé compartiment directeur.



Absorption d'azote après 10 min à 36 m. Aucun compartiment n'atteint sa limite maximale ou valeur M



Absorption d'azote après 13²min à 36 m. le compartiment de période 5 min a atteint sa limite. Il devient le compartiment directeur qui contrôle la plongée.



Absorption d'azote à 24 m après 30 min. le compartiment de période 20 min contrôle la plongée. Remarquez que le compartiment de 5 min s'est équilibré (30 min = 6 périodes). Cependant, à 24 m, le compartiment de période 5 min ne peut jamais atteindre sa valeur M et contrôler la plongée.

Tables de l'US Navy et plongées successives

Avant les années 30, pour gérer la décompression d'une plongée successive, le plongeur se basait sur la profondeur maximale atteinte durant l'une des deux plongées et le temps de plongée cumulé de celles-ci. Il n'y avait donc pas de méthode pour déterminer le niveau d'azote éliminé lors de l'intervalle de surface. Ce calcul fut réalisé par la US Navy qui révisa la table d'Haldane en y ajoutant un 6^{ème} compartiment : le 120 MIN. Ne disposant pas encore d'ordinateur, le système devait être basé sur des tables et faciles d'utilisation. Pour répondre à cela, l'US Navy mit au point sa table d'intervalle de surface, répondant au pire scénario possible. Cela correspondait à une plongée successive précédée d'une plongée avec décompression. Le calcul fut fait sur la base du compartiment le plus lent, de période 120 min. c'est la raison pour laquelle, selon ces tables (QUE LES COMEX PRO IMITENT EN PARTIE – voir plus loin), il faut 12 h d'intervalle (720 min = 6 périodes) avant qu'une plongée ne soit plus considérée comme successive

V - Éléments de calcul des tables

Le but ici est de comprendre comment les tables sont réalisées pour le calcul des paliers. Il est utile de connaître quelques définitions au préalable:

Pression partielle = $P_{abs} \times X/100$

Tension finale = Pression finale d'un gaz donné dans un organe donné

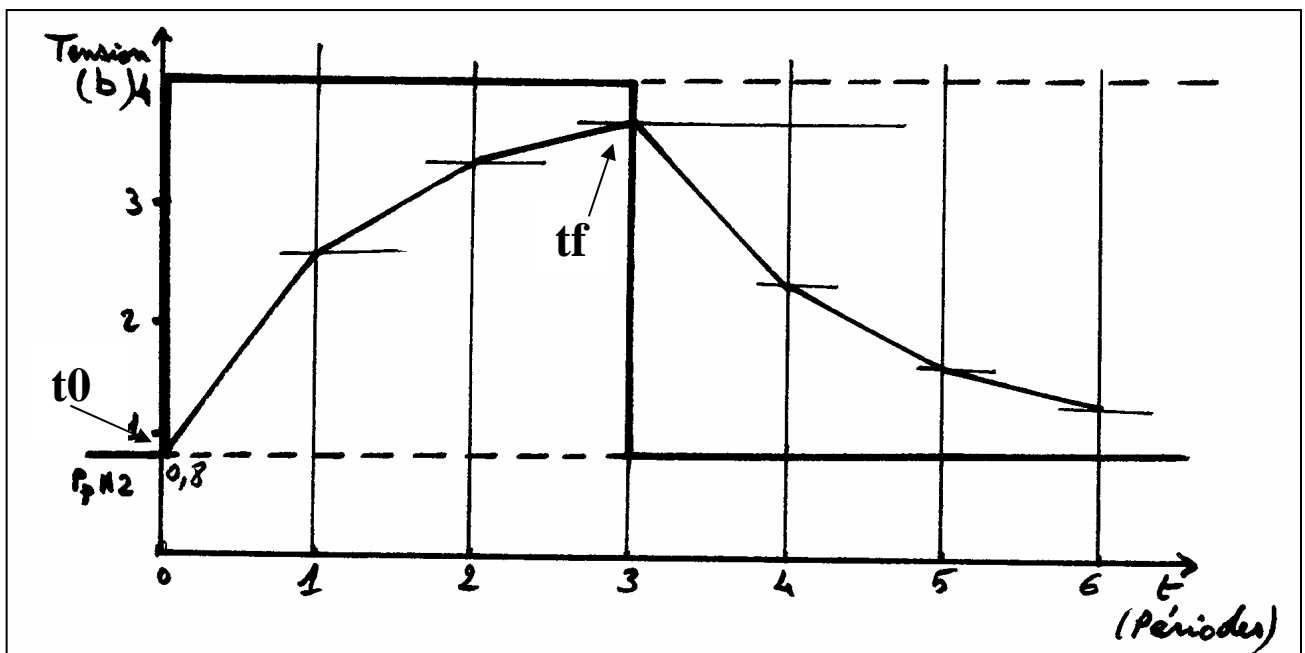
Gradient = écart de pressions partielles ou tension d'azote entre 2 états de saturation. C'est la différence entre la quantité de gaz qui devrait être dissoute et celle qui l'est réellement. Si le gradient dépasse les limites acceptables, alors l'azote dissout s'évacue trop rapidement pour que le corps puisse l'éliminer par la circulation et la respiration. Des bulles d'azote se forment, causant la maladie de décompression.

Période = temps nécessaire à un liquide ou un tissu pour diminuer le gradient de moitié. Pour chaque compartiment, Haldane a défini une période qui correspond à son rythme d'absorption et d'élimination de l'azote. La période d'un compartiment est le temps, en minutes, pour qu'un compartiment particulier atteigne, à partir de sa tension initiale, la moitié de la tension à l'équilibre (saturation) à une nouvelle profondeur. Un compartiment absorbe ou élimine la moitié de ce qu'il reste à absorber ou à éliminer pendant chaque période, créant ainsi une progression exponentielle.

La maladie de décompression peut donc s'éviter en gardant un gradient de pression dans des limites acceptables. On le fait en calculant la tension théorique d'azote dissous dans le corps et en contrôlant la remontée de manière à ce que le gradient entre la tension théorique des tissus et la pression ambiante ne dépasse pas les limites critiques. Si le gradient devient trop important pour qu'un plongeur puisse remonter directement, il devra remonter par étapes (paliers de décompression), ce qui permet à l'azote de s'évacuer du corps sans avoir à dépasser la limite du gradient.

Comment se comporte un gaz dans nos tissus ?

Il se dissout ou sature le tissu suivant une loi de type exponentiel



En surface, à l'équilibre, $T_o = 0,8$ bar d'azote et on tend vers un état de saturation T_f

$$G = T_f - T_o$$

La période est le temps pour obtenir $G/2$ donc une période T_1 est telle que :

$$T_1 = T_o + (T_f - T_o)/2$$

On peut écrire cela sous la forme: $T_1 = T_o + (T_f - T_o) \times 50/100$

Et ainsi de suite, pour deux périodes, $T_2 = T_o + (T_f - T_o) \times 75/100$, pour trois périodes, $T_3 = T_o + (T_f - T_o) \times 87,5/100$

Ex: à 30 m $T_o = 0,8$ bar $T_f = 4 \times 0,8 = 3,2$ bars
 $T_1 = 0,8 + (3,2 - 0,8) \times 50/100 = 2$ bars

Après une période, la tension est donc de 2 bars

Dans les tables MN90, 12 tissus sont pris en compte avec des périodes qui varient entre 5 et 120 minutes. Dans les tables professionnelles, il y a également la période 300 minutes car les immersions peuvent être longues

Exemple: calcul pour trois tissus de la tension finale dans le cas d'une plongée de 1 h à 30 m:

Tissu 5': $60/5 = 12$ périodes

On peut le considérer saturé donc $T_{N2} = T_f = 4 \times 0,8 = 3,2$ bars

Tissu 30': $60/30 = 2$ périodes $T_{N2} = 0,8 + (3,2 - 0,8) \times 87,5/100 = 2,9$ bars

Tissu 60': $60/60 = 1$ période $T_{N2} = 0,8 + (1 - 0,8) \times 50/100 = 0,9$ bar

En remontant, il arrive un moment où l'un des tissus dépasse une valeur appelée sursaturation critique, ce qu'il faut éviter. La valeur de ce coefficient est donnée par la formulation suivante:

$$S_c = T_{N2} / P_{abs}$$

Si S_c est dépassé, il y a dégazage incontrôlé

Dans les MN90, la valeur de S_c pour les tissus 5, 30 et 60 minutes sont:

Tissu	5	30	60
S_c	2,72	1,82	1,58

C'est à partir de S_c que l'on détermine la durée d'un palier : $P_{abs} = T_{N2} / S_c$, qui est donc la pression absolue maximale que peut supporter le tissu avant dégazage incontrôlé.

Dans notre exemple:

Tissu 5' $P_{abs} = 3,2 / 2,72 = 1,17$

Tissu 30' $P_{abs} = 2,9 / 1,82 = 1,6$

Tissu 60' $P_{abs} = 0,9 / 1,58 = 0,57$

Le tissu qui impose le palier le plus profond est appelé tissu directeur. Ici c'est le 30' avec un palier à 6 m.

La durée du palier est telle que $T_{N2} = T_o + (T_f - T_o) \times X/100$

TN2 doit être telle qu'à la fin du palier, le tissu puisse être remonté au palier suivant ou en surface sans dépasser Sc donc $TN2 = Sc \times Pabs$

Tf = PpN2 à la profondeur du palier

To = TN2 à l'arrivée au palier

Donc X% = 50%: palier d'une période

75%: palier de deux périodes

En résumé:

$$T_{N2} = p + (P-p)(1-0.5^{t/T})$$

$$Sc = T_{N2}/P_{absolue}$$

Quelques exemples pour calculer le niveau d'absorption théorique d'azote pour un compartiment :

Quelle est la pression tissulaire d'un compartiment de période 5 minutes lorsqu'un plongeur descend à 18 m durant 5 minutes ?

9 m = 0,9 bar de pression hydro ; A 18 m = 1,8 bars, la tension d'un compartiment tissulaire de 5 min pendant 5 minutes atteint la moitié de la pression finale.

Quelle est la pression tissulaire d'un compartiment de période 20 min lorsqu'un plongeur descend à 24 m durant 40 min ?

18 m = 1,8 bar de pression hydrostatique ; 40 min = 2 périodes pour un compartiment de période 20 min. a près la première période, la tension atteint la moitié de 24 m (2,4 bar), soit 12 m (1,2 bar). Après la deuxième période, le compartiment atteint la moitié de 12 m, soit de 6m (0,6 bar). 12+6=18 m.

Combien de temps faut-il à un compartiment de période de 120 min pour atteindre l'état de saturation à 30 m ?

6 périodes = 720 min. La réponse est la même qu'elle que soit la profondeur.

VI – Les tables de plongée professionnelle françaises

Les tables de plongée à l'air françaises définies par l'arrêté du 3 octobre 1974 ont fait l'objet de la plus grande enquête statistique réalisée à ce jour.

Ces dernières utilisaient:

- l'air au fond en décompression jusqu'à 0 m
- l'air ou l'oxygène pour les paliers de 6 m à la surface
- la décompression dans l'eau

Elles autorisaient:

- une plongée répétitive dans l'intervalle des 8 h qui suivent la première plongée
- une profondeur de travail jusqu'à 72 m bien que la profondeur maximale de travail soit limitée à 60 m à l'époque (50 m en Mer du Nord)
- des temps au fond tels que la durée de plongée n'excède pas 3 h. Cette contrainte est liée à la réglementation française qui limite le temps passé dans l'eau à 3 h par jour et par plongeur.

Ces tables ont été remplacées en 1992 par de nouvelles tables professionnelles, établies et validées à partir de données statistiques correspondant à certains types d'accidents sur un grand nombre de plongées (> 64 000).

Cette méthode d'élaboration a été relativement lente (plus de trois ans) mais sûre. Des contrôles DOPPLER ont été pratiqués pour les plongées profondes ou longues et ont montré la forte corrélation entre bulles circulantes et accidents. Dans ce type de plongée, des techniques d'optimisation numérique affinent les tables. On arrive ainsi à un modèle dit de probabilité maximale qui conduit à élaborer, à partir de la banque de données, le modèle contenant les paramètres occasionnant le risque le plus faible.

Les meilleurs résultats ont été obtenus à l'aide d'un modèle mathématique descriptif dérivé de l'hypothèse du «volume critique des bulles» de Hennessy et Hempleman (1977). Une amélioration et une simplification de cette théorie ont abouti à un modèle qui ne comporte plus que trois paramètres:

- la constante de temps caractérisant les échanges gazeux du tissu le plus lent
- un coefficient géométrique matérialisant les échanges gazeux
- un coefficient reflétant la résistance du tissu à la formation des bulles

La validation des tables COMEX 87 (tenant compte de l'effort musculaire effectué au fond) s'est effectué en conditions réelles sur des chantiers sous-marins pilotes avec des plongeurs professionnels et loisirs. Aucune différence significative au DOPPLER n'a été trouvée entre le plongeur professionnel et le plongeur loisir.

Types d'accident

Sur les ~65 000 plongées prises en compte, les différents accidents enregistrés étaient:

135 douleurs articulaires / musculaires (accidents de type I)

6 accidents neurologiques

0 accident vestibulaire, respiratoire, hyperoxique

Les accidents de type I, c'est à dire les moins dangereux, sont donc les plus courants. Les accidents neurologiques correspondaient à des profils type yo-yo faciles à éviter.

Sécurité des tables

L'analyse des tables réalisées à partir de ces données conduit à l'observation de 55 accidents pour 47 888 plongées (soit environ 1 accident pour 1000 plongées, ce qui est très bon!).

Toutefois, l'analyse détaillée a révélé des taux d'accidents inacceptables dans certaines zones (jusqu'à 1, 2% pour certaines plongées longues et/ou profondes) traduisant clairement les insuffisances du modèle de calcul.

Des corrections ont donc été amenées (voir l'article de JP Imbert & B Gardette). Elles ont porté sur le choix du temps au fond, les paliers à l'oxygène:

Pour le temps au fond, celui utilisé dans la table correspond au temps supérieur au fond immédiatement disponible. La marge de sécurité est ainsi agrandie (10 min au lieu de 5).

Pour les tables avec palier à l'oxygène, il a été décidé de cumuler les deux derniers paliers à 6 m car la respiration d'oxygène à 1,6 bar n'entraîne pas de menace pour l'organisme, la respiration d'oxygène à pression partielle élevée accroît le gradient de gaz neutre et facilite son élévation, les paliers à 3 m peuvent être très inconfortables (houle).

Le calcul des décompressions des plongées successives a fait l'objet d'une démarche originale. Après différentes méthodes, celle qui est retenue est un cumul de la méthode du tissu directeur (qui est basée sur le niveau de saturation du tissu 120 minutes et des paramètres de la première plongée) et de la méthode «du cas le plus favorable». Cette dernière suppose que tous les tissus sont saturés à la valeur maximale à l'arrivée en surface de la première plongée. L'avantage est que la deuxième décompression ne dépend pas de la première plongée. On tient compte donc du tissu 120 minutes saturé au maximum.

Le tableau ci dessous établit une comparaison des taux d'accident, pour les types I et II, entre les tables du décret de 1974 et les tables COMEX 1986. les informations ont été recueillies à partir des rapports de plongée des chantiers COMEX. Les expositions sont classées selon l'index 'Prt' qui est égal au produit de la profondeur et de la racine carrée du temps au fond). Les valeurs faibles de Prt correspondent à des expositions modérées

	Prt <=25		25 < Prt <=35		Prt > 35	
	1974	1986	1974	1986	1974	1986
Expositions	17,683	7,129	9,590	8,384	2,426	2,055
Type I nbre	18	1	55	12	49	17
Type I %	0,1	0,001	0,57	0,14	2,02	0,82
Type II nbre	1	0	1	1	1	2
Type II %	0,006	0	0,01	0,01	0,04	0,09

On voit très clairement que les améliorations sont nettes pour les accidents de type I mais pas pour le type II, qui heureusement restent très peu fréquents.

Présentation de la table COMEX au Ministère du Travail

L'histoire de la proposition COMEX adressée au Ministère du Travail est longue et connaît de nombreux rebondissements :

- la première proposition fut présentée à la Commission Médicale et Technique de l'INPP, corrigée en fonction des remarques recueillies et adressée en juillet 1988 au Ministère du Travail (révision 1)
- une première série de modifications fut introduite dans les tables de plongées successives qui furent transmises au Ministère du Travail en juin 1990 (révision 2)
- une deuxième série de modifications fut introduite pour tenir compte des besoins spécifiques des tubistes et des praticiens hospitaliers. Cette révision 3 fut distribuée en août 1991 aux professionnels concernés pour commentaires
- une révision 4 tenant compte des remarques reçues fut adressée à la même période au Ministère du Travail pour évaluation. C'est la table MT92 que vous utiliserez désormais.

VII - Législation – réglementation

A – La plongée scientifique

Elle caractérise toute plongée en milieu aquatique marin ou continental dont le but consiste en un recueil d'informations, de données ou d'échantillons à des fins de recherche ou d'enseignement et à la mise en place des techniques nécessaires. Ce type de plongée relève de la mention B décrite à l'annexe 1 de l'arrêté du 28 janvier 1991, mention destinée aux travailleurs dont la profession principale n'est pas d'effectuer des travaux subaquatiques, mais qui peuvent être conduits à pratiquer leur métier en immersion.

Il s'agit donc d'une activité régie par des textes de loi émanant du ministère du travail. La plongée scientifique est soumise à la réglementation définie par l'arrêté du Ministère du travail du 3 octobre 1974.

La nouvelle instruction n° 980002 de l'inspection générale d'hygiène et de sécurité (mars 1999) annule et remplace l'instruction CNRS du 2 mai 1988 de la réglementation de la plongée scientifique. L'article 17 de la section 4 (= équipements) concerne les tables de plongée:

Article 17

Les tables de plongée ou tables de décompression sont les instructions qui régissent en fonction de la profondeur atteinte et de la durée de la plongée, la nécessité d'effectuer des paliers de décompression et qui définissent la durée et la ou les profondeurs de ces derniers. Un exemplaire de ces tables doit être en possession du responsable du service de plongée et du chef d'opération; un exemplaire simplifié sur support simplifié (COMEX PRO 92) doit être remis à chaque plongeur ainsi qu'au surveillant de surface. La modification et l'extrapolation de ces tables sont interdites.

Les conditions d'utilisation de ces tables sont définies dans l'annexe 2 de l'arrêté du 15 mai 1992.

La durée totale des paliers doit être inférieure à 15 minutes si le délai prévu entre l'alerte et l'arrivée au caisson de recompression (dans le cas d'un accident de plongée) est supérieur à une heure.

L'usage d'ordinateurs de plongée est interdit, sauf en tant que profondimètres.

B – Journal officiel de la république française

L'arrêté paru au journal officiel de la république française en juin 1992 a pour objet de définir:

- les procédures d'accès
- les procédures de séjour
- les procédures de sortie
- les procédures d'organisation du travail en milieu hyperbare, destinées à garantir en fonction des méthodes et des tables de recompression disponibles, la sécurité et la santé des travailleurs.

C'est l'article premier.

Articles 10 & 12 du chapitre 4: procédures et tables de décompression en immersion

Article 10

- Dans les conditions normales d'intervention à l'air comprimé, la décompression des scaphandriers doit être conduite conformément aux procédures et aux tables décrites en annexe 2 du présent arrêté et pour les interventions aux mélanges héliox, conformément à celles décrites en annexe 3
- Compte tenu de la profondeur de l'intervention, réelle ou équivalente, de la méthode de plongée envisagée et de la procédure de décompression correspondante, le chef d'opération hyperbare doit sous la responsabilité de l'employeur sélectionner pour celles publiées en annexes, la table de décompression la plus appropriée pour garantir la sécurité et la santé des scaphandriers

Article 12

- La modification et l'extrapolation des tables de décompression sont interdites

- Lorsqu'ils interviennent en scaphandre autonome, les scaphandriers doivent disposer de tables de décompression correspondant à la plongée qu'ils effectuent

Annexe 1 de l'arrêté: définitions.

Types de plongée: plongée en scaphandre autonome
 Plongée avec narghilé
 Plongée en bulle
 Plongée avec système
 Plongée air / héliox / nitrox pas trimix donc

Profondeur équivalente: profondeur fictive utilisée pour déterminer la procédure de décompression à partir des tables ordinateurs lorsque les conditions de plongée (mélanges, altitude, densité du milieu) impliquent une correction des tables.

Annexe 2 de l'arrêté: procédures d'intervention pour des plongées à l'air comprimé ou avec un mélange à base d'azote

- **Procédure de compression**

- ❖ La vitesse de descente ne doit pas excéder 30 m/min

- **Procédures de décompression**

Les tables de décompression indiquent les profils de remontée en fonction des paramètres définissant la plongée: profondeur, temps au fond, et nature du gaz respiré

- ❖ Unités: temps (HH:MM:SS), profondeur (m, poumons, mer et eau douce), pression (HPa ou bar)
- ❖ Domaines de validité des tables: 0 – 300 m: tables standard, > 300 m: méthode de plongée en altitude
- ❖ Définitions des paramètres de plongée: Profondeur = Pmax arrondie à la valeur supérieure, temps de plongée = temps de l'immersion jusqu'au début de la remontée, plongée yoyo interdite même à faible profondeur
- ❖ Les tables sont définies pour des profondeurs allant de 3 en 3 m et généralement par tranche de 10 min au fond
- ❖ Une seule plongée successive autorisée. L'intervalle de temps entre les deux plongées est l'heure de l'immersion de la seconde plongée – l'heure de sortie de la première
- ❖ Vitesse de remontée au premier palier: 9 à 15 m/min. Dans les tables simplifiés, la vitesse considérée est de 12 m/min
- ❖ Paliers: la dernière minute sert à remonter au palier suivant, pas de travail, cumul 3 et 6 m à 6 m pour palier à l'oxygène pur
- ❖ Si remontée rapide, procédure de sécurité (palier mi-profondeur = moitié de Pmax, la durée de la plongée devient = durée de la plongée + durée remontée rapide + temps en surface et redescente jusqu'à Pmax/2 [soit moins de 3 min] + 5 min). Rester près d'un caisson pendant 12 h

- **Recommandation après décompression**

- ❖ Absence d'activité pendant 2 h
- ❖ Plongée successive (tables appropriées)
- ❖ Surveillance après la plongée (symptômes d'ADD dans les 30 min), rester proche d'un caisson pendant 12 h

- **Tables air standard (voir tableaux document)**

Décompression effectuée dans l'eau
Mélange autorisé: air ou nitrox
Plongée en scaphandre autonome, narghilé, en bulle, avec système
Pmax = 60 m
I = 12 h

- **Tables air/oxy/6m (voir tableaux document)**

Décompression facilitée
Palier dans l'eau ou avec système
Respiration d'oxygène pur à 6 m
Mélange autorisé: air ou nitrox
Pmax = 60 m
I = 12 h

- **Tables air/oxy/12 m**

(ne nous intéresse pas car palier en bulle ou en tourelle)

- **Tables air décompression de surface**

(suppose d'avoir un caisson à bord)

- **Procédure pour plongée au nitrox**

Méthode de la profondeur équivalente

- **Plongées à niveaux multiples**

Le but est d'optimiser le temps de décompression d'un plongeur ayant travaillé à des niveaux différents. Le principe est d'utiliser une profondeur équivalente, située entre les deux profondeurs de travail. Cela permet une décompression plus courte.

Mélange au fond: air uniquement

Pas d'autres restrictions

Principe de calcul (voir tableaux document)

- **Plongée en altitude**

Méthode de la profondeur équivalente car il faut adapter les tables au fait que Patm chute avec l'altitude

Nécessité de mesurer la profondeur réelle à l'aide d'une sonde (ordinateur?)

La profondeur équivalente est toujours plus importante que celle de la plongée effectuée (le temps de décompression en lac est supérieur à celui de la mer)

Méthode valable pour toutes les tables sauf celles de décompression de surface interdites à toute altitude > 300 m.

Principe de calcul (voir tableaux document)

- **Procédures pour les plongées successives**

Deux méthodes:

- ❖ Méthode du temps équivalent = méthode de calcul d'un temps équivalent pour la 2nde plongée

Mélange autorisé: air ou nitrox

Tables standard, air/oxy/6m (12m)

Le temps au fond ne dépend que de la profondeur de la seconde plongée et de l'intervalle en surface. C'est une différence très nette avec ce que l'on connaît (MN90, ou les paramètres de la première plongée interviennent). C'est la méthode du 'cas le plus défavorable' développée

par le Dr Fructus qui suppose que tous les tissus sont saturés à la valeur maximale en arrivant en surface. Dans la MT92, le tissu 120 min est considéré comme directeur
On détermine une majoration = temps à ajouter au temps réel de la 2nde plongée pour obtenir le temps équivalent au fond

❖ Méthode du temps cumulé (fait penser à nos plongées consécutives mais ici le terme n'existe pas)

Les deux plongées n'en constituent qu'une: on ignore donc la première décompression et l'intervalle de surface

Le temps est le cumul des deux durées de plongée

La profondeur est soit Pmax des deux si Pmax = P2

soit Pequival déterminée par la méthode des plongées à niveaux multiples (si Pmax = P1)

les autres annexes sont:

Annexe 3 de l'arrêté = procédures d'intervention pour des plongées aux mélanges à bases d'hélium

Tables heliox/oxy/6m (12m) jeter un œil par curiosité

Annexe 4 de l'arrêté = procédures d'intervention en air comprimé sans immersion dans le cadre de la mention C

Oxygénothérapie hyperbare

Tables Air/mention C/standard et Air/mention C/oxy

Annexe 5 de l'arrêté = procédures d'intervention en air comprimé sans immersion effectué dans le cadre de la mention D

Tables de compression et décompression

Tables air/mention D/standard, air/mention D/oxy, air/mention D/standard (tables de rattrapage),

air/mention D/oxy (tables de rattrapage)

Annexe 6 de l'arrêté = recompression d'urgence

Tables pour accident de type 1 (symptômes uniquement douloureux)

tables pour accident de type 2 (symptômes à caractères neurologique) ou pour surpression pulmonaire

VIII – Utilisation des tables

Je vous renvoie aux procédures d'utilisation vues en cours et issues de: «Travaux en milieu hyperbare. Mesures particulières et prévention».

IX - Les tables immergeables simplifiées COMEX PRO 92

The image shows three COMEX-PRO decompression tables. Each table is a grid with 'PDB' (depth in meters) on the vertical axis and 'Durée en minutes' (duration in minutes) on the horizontal axis. The tables are color-coded: white, yellow, and blue. Each table also includes a section for 'Remontée au 1^{er} palier 12 m/min' (ascent rate to the first stage at 12 m/min). The white table is for depths up to 240m, the yellow for up to 210m, and the blue for up to 180m with a 1-hour interval.

Le jeu de tables immergeables COMEX PRO est un condensé des tables professionnelles de plongée à l'air publiées par arrêté du 15 mai 1992

Sur la notice d'utilisation, on peut lire:

Vmax = 12 m/min jusqu'au premier palier

La durée du palier commence quand on y arrive

La dernière minute du palier est utilisée pour accéder au palier suivant

Une seule plongée successive est autorisée

Jeu de trois tables: - blanche si $I > 12$ h
 - jaune si $4 < I < 11$ h 59
 - bleue si $1 < I < 3$ h 59
 profondeurs de 3 m en 3 m

La table est en fait divisée en 2 parties:

- Partie supérieure où on lit les paramètres de notre plongée: Pmax et temps de plongée
- Partie inférieure où on lit la profondeur et la durée des paliers à effectuer

Il existe des tables de décompression immergeables nitrox. L'utilisation est la même:

On cherche Pmax sous le mélange approprié

Si le mélange ne figure pas, on prend celui pour lequel la concentration en O₂ est inférieure

X – La véritable conduite à tenir en cas de remontée catastrophe?

On a vu précédemment qu'en cas de remontée rapide, la procédure à adopter (telle qu'elle apparaît dans le JO est le palier à mi-profondeur). Toutefois, le palier à mi-profondeur est une méthode empirique dont on n'est pas sûr qu'elle réponde à toutes les situations. Voilà ce que l'on peut lire dans le livre de Foster, pour votre information.

La remontée en catastrophe ou «blow up» occasionne un dégazage important. Lors d'une remontée précipitée vers la surface, le nombre de bulles circulantes détecté est élevé. Redescendre ensuite à une profondeur supérieure à la zone des paliers réalise un modèle extrême de profil en dents de scie. Les bulles circulantes formées au cours de cette remontée en

catastrophe sont comprimées par l'augmentation de pression, provoquée par un retour à une profondeur importante. Le diamètre des bulles diminue alors suffisamment pour passer dans les capillaires pulmonaires sans que celles ci soient éliminées. Ces bulles traversant le filtre pulmonaire sont injectées dans la grande circulation. Simultanément, l'azote se dissout de nouveau dans les tissus et les bulles s'enrichissent d'une quantité de gaz inerte supplémentaire. Lors de la deuxième remontée, le volume des bulles dans la grande circulation s'accroît conformément à la loi de Boyle Mariotte. Des troubles neurologiques peuvent apparaître.

La méthode proposée par les docteurs Fructus et Sciarli, inspirée des procédures appliquées par la US Navy depuis 1973, s'est révélée efficace. Immédiatement après l'arrivée en surface, la procédure consiste à redescendre dans la zone des paliers en 3 minutes maximum. La méthode peut être employée pour les MN90 et les COMEX PRO

Avec les COMEX PRO

- A Redescendre à 12 m: rester à cette profondeur le tiers du temps du palier de 3 m indiqué par la table
- B Remonter à 9 m: rester à cette profondeur la moitié du temps du palier de 3 m indiqué par la table
- C Remonter à 6 m: rester à cette profondeur le temps du palier de 3 m indiqué par la table
- D Remonter à 3 m: rester à cette profondeur une fois et demi le temps du palier de 3 m indiqué par la table

Avec les MN 90

- A Redescendre à 12 m: rester à cette profondeur le quart du temps du palier de 3 m indiqué par la table
- B Remonter à 9 m: rester à cette profondeur le tiers du temps du palier de 3 m indiqué par la table
- C Remonter à 6 m: rester à cette profondeur la moitié du temps du palier de 3 m indiqué par la table
- D Remonter à 3 m: rester à cette profondeur une fois et demi le temps du palier de 3 m indiqué par la table

La durée de remontée entre chaque palier est de 1 minute

Remontée catastrophe seulement ?

Depuis un moment, on trouve aussi dans la littérature DAN notamment la proposition «validée» de faire obligatoirement un palier à mi profondeur pendant quelques minutes pour toutes les plongées dites profondes (au-delà de 30 m). Cette nouvelle façon de plonger et surtout d'éliminer l'azote a déjà été adoptée par de nombreux plongeurs outre-Atlantique. Elle semble avoir fait ses preuves et il n'est pas impossible que ce soit l'évolution à venir de plonger.

Toutefois, et pour être complet, ce n'est pas l'avis du Dr Gardette de la COMEX, qui rappelle que cette procédure DAN n'a pas été validé par un protocole de recherche clair. Selon lui, il s'agit plus d'un effet de mode. Mais pour aller au-delà de cela, il a mis en place de tests en caisson avec des plongeurs de la marine nationale pour vérifier la validité de l'hypothèse DAN sur un nombre de plongées à l'air profonde et moyennement profondes sans résultat probant. En fait aucune différence significative n'a été trouvée sur les tests DOPPLER et présence de bulles circulantes entre les plongeurs réalisant ce palier à mi-profondeur et ceux réalisant leurs paliers normaux en surface !

XI – Réaction face à un accident de décompression

Le déclenchement de l'alerte au secours doit être réalisé dans les 30 premières minutes qui suivent l'accident. La mise sous oxygène doit être faite tout de suite en vérifiant que le débit est de 15 L/min, constant (idéalement avec le masque pour éviter les pertes). La victime doit boire de l'eau plate sauf en cas de perte de connaissance, vomissements ou lésions gastriques. Enfin et seulement si la victime y consent, ne présente pas d'allergie, la victime doit prendre en une seule fois 500 mg d'aspirine si on se situe toujours dans les 30 premières minutes.

Au niveau de la prévention, j'ai lu dans le n° 62 d'*Octopus* (juin-juillet 2004) que l'exercice physique réduirait les chances pour un plongeur d'avoir un ADD. Une équipe de chercheurs norvégiens a montré qu'un exercice intense 20 h avant une plongée réduisait en effet de manière importante la formation de bulles. La théorie derrière cette constatation serait que 1) l'exercice élimine les nucléi qui sont à l'origine de la formation des bulles dans le sang OU 2) l'exercice stimule la libération d'oxyde nitrique qui dilate les vaisseaux sanguins et change leurs propriétés de surface les rendant plus glissants (les nucléi étant attachés aux parois des vaisseaux !). poursuivant cette idée, les norvégiens ont travaillé sur l'administration d'oxyde nitrique pour reproduire les effets des exercices avec succès (réduction des bulles circulantes et protection contre le stress). L'avantage ici est que la procédure est efficace 30 min avant la plongée contre les 20 h pour l'exercice. Existe-t-il ce type de médicament ? Oui, c'est la famille du VIAGRA ! Qui sait qui teste ?

XII– Y-a-t-il encore une réflexion sur le sujet de la décompression ?

Comme je vous l'ai dit quelques lignes plus haut, la procédure de palier à mi profondeur est une réalité basée sur des considérations théoriques et pratiques récentes, mais ne faisant pas l'unanimité. On voit donc bien que les choses bougent.

Dans le numéro 62 d'*Octopus* (juin-juillet 2004), un article de Caroline Lepage résume le dernier colloque sur la décompression ayant eu lieu en France cette année 2004. On y trouve ce genre de choses : « nous n'avons aucune représentation totalement efficace de ce qui se passe au niveau des tissus. Aujourd'hui, grâce au Doppler, on sait qu'il existe des bulles parfaitement asymptomatiques. Parallèlement aux théories actuelles, celle de Haldane perdure car il n'existe aucune autre qui soit aussi facile à remanier. Et pourtant elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité : la répartition des molécules ne peut ne peut pas être uniforme à l'intérieur des tissus. On attend encore un modèle déterministe sur la connaissance et l'évolution des bulles mais il n'y a pas de modèle parfait ». Et aussi, « les médecins unanimes rappellent que certains facteurs favorisent une mauvaise décompression (successives, yoyos, nombre de paliers, froid, foramen ovale perméable, mauvaises conditions physiques, âge>40 ans, etc) et que l'accident immérité ou inexplicable n'existe pas ». Et de conclure que l'étude de la décompression a encore de beaux jours devant elle.

Vous avez sûrement aussi entendu parler du FOP. Et j'en passe !

A cette question encore, je vous renvoie à la lecture de l'article ci-dessous. Il m'a été fourni par Jean-Pierre IMBERT, grand spécialiste de la question. Vous avez beaucoup de chance car vous aurez du mal à trouver cet article ailleurs. Il est daté de février 2003. Attention, cet article est la propriété exclusive de son auteur. Il est donc destiné à votre lecture seule. Ne pas divulguer, utiliser, etc.

IN SEARCH OF MODELS BEHIND SUCCESSFUL DECOMPRESSIONS

JP Imbert and J Hugon, Divetech, France

Our decompression tradition is based on the principles set by Haldane in 1908 (1). The classic or “Haldanian” models used for the calculation of present military, commercial and recreational diving tables all have the same mathematical expression: a) they figure inert gas exchanges with a series of exponential compartments, b) they specify the safe ascent criteria as a linear relation between the ambient pressure and the maximum permitted compartment tension. As a consequence, these models have produced similar decompression profiles, characterized by a rapid initial ascent on a relatively high distance. However, the drive for table development is operational pressure. Aside these traditional tables, marginal divers communities have empirically developed original decompression procedures for their needs. Refreshing experiences come from technical and cave divers who keep pushing their explorations supported by a new Internet culture. Surprising procedures come from coral or shell divers who keep diving deeper and deeper to make their livings. Apparently, all share the same strategy and use slower rates of ascent and deeper stops than would be predicted by the Haldanian models (2). An attempt is made to introduce new assumptions in the present models to obtain the typical profile of these successful decompressions.

Identifying the risk of decompression

The safety performances of decompression tables can be first defined in terms of the risk of decompression sickness (DCS) occurrence per dive exposure (3). This risk was difficult to assess until the development of diving databases in the 80's provided the volume of information required for the statistical analysis (4,5,6). DCS symptoms include a wide span of problems ranging from skin rash to articular pain and neurological symptoms which for operational reasons have for long been classified into two categories, Type I DCS and Type II DCS, according to the US Navy Diving Manual. Thus, the risk can further be defined in terms of symptoms.

Type I DCS includes simple symptoms like skin rash, articular or muscle pain. Because the symptoms are obvious, they are reported early and the treatment is initiated without hesitation. In most cases, administration of hyperbaric oxygen at 12m will rapidly resolve the symptoms. Safety wise, a Type I DCS is a “good” decompression accident because the diagnosis is easy, the onset is usually rapid, the treatment is applied rapidly, and the symptoms are treated efficiently in 95 % of the cases (7).

Type II DCS is always serious because it affects either the respiratory or the neurological systems. The symptoms which often include fatigue, headache or feeling unwell are vague and the diagnosis may be difficult at an early stage or for mild cases. The treatment is complex and requires a deep recompression, significant periods of hyperbaric oxygen breathing, fluid intake and sometimes steroids administration (7). Safety wise, a Type II DCS is a “bad” decompression accident because the diagnosis may not be easy, the treatment is often delayed, and the consequences can be dramatic.

It is interesting to note that in an earlier time, medical doctors tended to distinct more types of DCS symptoms. In the 1974 edition of the Comex Medical Book, Dr. X Fructus differentiated between vestibular hits and other neurological symptoms. At the time, he suspected that different dive profiles yield to different neurological symptoms. This came after he developed some early bounce decompression tables, called the “Cx70” tables, that were designed both for heliox surface supplied and bell diving.

The Cx70 tables were intensively used in the early North Sea developments before saturation diving finally took over bounce diving. The analysis of the safety records of the Cx70 tables (unpublished) stored in the Comex Data Base (8) showed that the risk was uneven over the exposures. The long bottom times (90 to 120 minutes) tended to induce Type I DCS in the last part of the decompression, which follows the logic of large amounts of dissolved gas to be eliminated. The intermediate bottom times (30 to 60 minutes) preferably produced neurological symptoms, either central or spinal, a common outcome with heliox bounce diving. Surprisingly, short bottom times (10 to 30 minutes) exclusively produced vestibular symptoms. Typical of their time, the Cx70 tables were characterized by a high distance between the bottom and the first stop and a rapid initial ascent. This was particularly significant for short bottom times. For instance, a particular concern was the 66m/20min table with a first stop at 12m, leading to an initial ascent of 54m done in 3 minutes (18m/min). The safety analysis of these early deep bounce tables already indicated that the dive profile controls the bubble scenario and decides on the safety outcome of the decompression and the initial phase was slowed down in the later revisions of the tables.

The lesson learnt after the Cx70 tables is that the main risk for technical divers, who usually dive 15 to 20 minutes bottom time, is a vestibular hit. It is already a serious accident when symptoms occur at the surface, with strong

nausea and vertigo. As technical diving gets deeper, it will become dramatic the day the symptoms occur in the water. With bell diving, such accidents were kept under control: the diver was recompressed in the bell or the chamber and put on mask. Unfortunately, if a technical diver got bent in the water, he would not be able to take any therapeutic action, and when trying to ascend, would likely vomit in his regulator: a critical situation. Because of the threat of symptoms occurring in the water, technical divers must use very safe tables.

Strategies for successful decompressions

Divers have known the criticality of the initial ascent in decompression for long. In fact, each divers group has generated its own strategy to increase their decompression safety. The very first adaptation is the reduction of the ascent rate. In commercial diving, most of the diving supervisors admitted they used slower rates of ascent than the 60 ft/min recommendation of the US Navy. The French Navy reduced the ascent rate from 18 to 12 m/min in the 1990 revision of their air tables.

Another common modification is the introduction of a deep stop. One of the earlier accounts I heard came from two old divers who worked for red coral in the 50's. They told they used to stop at mid-depth during their ascent from deep dives and sang a gospel. They added with a smile that of course they would adapt the number of verses to how comfortable they felt with the decompression. Obviously these two old timers knew things I ignore for I have never been able to neither imagine how physically feels the decompression stress nor conceive any physiological mechanism for it. Deep stops appeared in the early edition of the Royal Navy diving manual. The manual included a set of deep air tables to 90 meters, the particularity of which was the presence of a mid-depth decompression stop (up to now, I have been unable to identify who introduced such stops and for what reasons). Deep stops were later advertised by Richard Pyle in articles published in the "AquaCorps" and "Deep Tech" magazines (2) and supported by other influent authors (9). Today's, deep stops are so popular that most decompression software's propose one or two arbitrary deep stops during the ascent. However, other diving strategies can be identified.

Mediterranean coral diving

Red coral jewels are a tradition around the Mediterranean and coral has been fished for centuries using an assembly of beams and nets, called "the cross", drag along the underwater walls. Since the introduction of SCUBA diving, there has been a small population of coral divers in France, mainly along the Côte d'Azur and in Corsica. Diving for coral is a tough job as divers during the season usually dive twice a day for 20 minutes, to 80-90m on air. Recently, because coral is getting scarce, divers have moved to trimix and work at around 100-130m. Coral divers use a variety of decompression procedures that they have developed empirically and are very reluctant to give

away. Over the years, I have been able to collect and document several of these original procedures. It appears that coral divers normally use one set of decompression stops that they learn by heart and apply to varying exposures, such as 25 minutes at 80m, 20 minutes at 90m and so on. They usually carry their bottom mix on a twin set or tri-cylinders backpack and rely on the boat to deploy an umbilical for the rest of their ascent. They all use oxygen aggressively, usually starting at 12m in the water, sometimes at 15m for few minutes. Some of them also have a chamber on board in which they finish their ascent after surface decompression.

Coral diver tables appeared dramatically short when compared to commercial or recreational references. The reason why coral divers survive such severe decompressions must be their specific operational procedures. Coral divers have explained that at the end of the bottom time, they ascend rapidly 10-15 meters above the bottom to get read of the narcosis. Then they slow down (9-6 m/min) until they reach 40 meters where they wait for the boat to spot their bubbles. When the boat is positioned above them, they send a lift bag to the surface with the basket attached to one end. The crew sends an umbilical down using the same line. When the basket is secured, the divers proceed with the rest of their decompressio. This way, the dive profile is lengthened by some 8-10 minutes spent at mid-depth, apparently essential to their decompression safety (figure 1).

Comex deep decompression studies

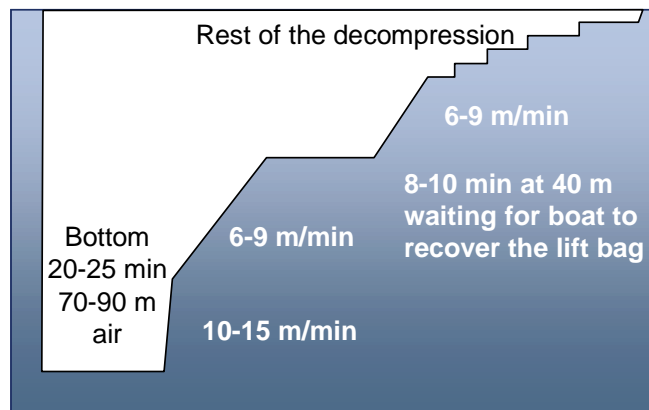


Figure 1 : a typical dive profile of a coral diver

In 1977, Comex, a commercial diving company, planned to conduct deep diving operations on a large scale and wanted to select a pool of deep divers based on their individual susceptibility to the High Pressure Nervous Syndrome. A test protocol was set up where divers were pressurized in 15 minutes to 180m, run a battery of tests for two hours at bottom and then were decompressed. The person calculating the decompression at the time had difficulties to define a mathematical model for such a severe exposure. He finally gave up the idea of any mathematical support and simply started drawing the decompression profiles on paper. After some trials, he discovered that by plotting the rate of ascent in a logarithm scale versus depth in a linear scale, decompressions roughly appear as a straight line (figure 2). He further used this property to design a set of decompression tables. His method produced decompressions with varying rates of ascent and very deep stops. After some adjustments, he designed a schedule for the 180m/120min dive that required 48 hours of decompression and which appeared extremely safe. A total of 49 divers went through the selection tests without any symptom (10). The characteristic of the "semi log plot" is that it expands the deeper portion of the decompression and makes it possible to define rates of ascent in an area where traditional models fail to control the ascent (figure 2). Although the method was deliberately empirical, it gave varying initial ascent rates that progressively turned into short deep stops. The result was outstanding when considering similar deep bounce dive trials at the Duke University (11). The French Navy, who attempted to design deep bounce tables in 150-180 meters range at the same time (unpublished) only succeeded in

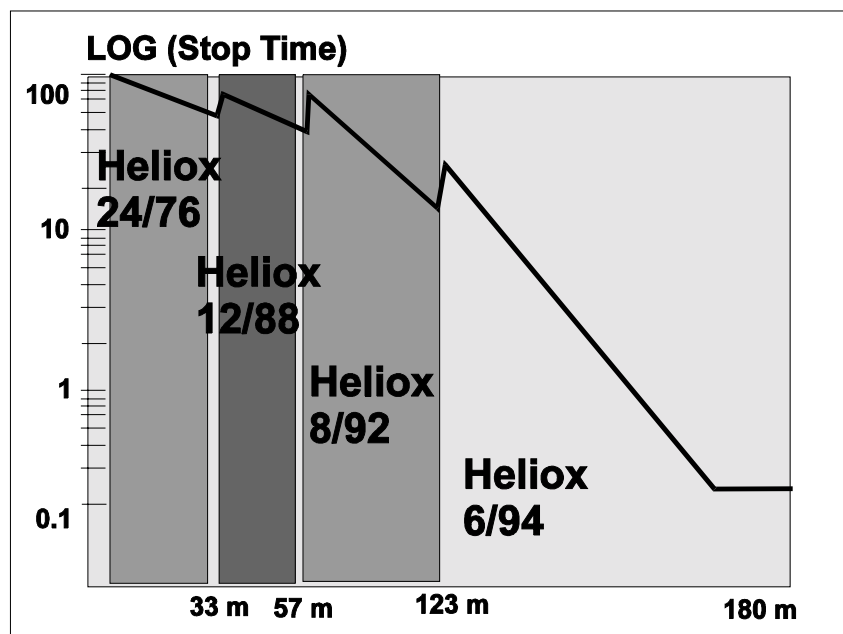


Figure 2 : Semilog plot of the 180m/120 min test dive carried at Comex Hyperbaric Center in 1977. The decompression mixtures and depth of change are indicated during the ascent.

Possible ascent strategies

The classic approach of decompression is based on Haldanian models and involves assumptions that are summarized below:

- 1) Diving requires compressed air breathing and causes nitrogen to dissolve in the diver's tissues.
- 2) The critical issue is the amount of nitrogen stored in the tissues (dose) prior to the ascent.
- 3) The primary insult is the volume of the gas phase formed during the ascent.
- 4) Limb bends and neurological symptoms are not differentiated and are considered as different levels of severity of a same problem.
- 5) The sites for bubble formation are the tissue or the venous side of the blood circulation but no tissue is specifically identified and a series of "compartments" is considered instead.
- 6) The decompression strategy consists in managing the amount of gas dissolved in each compartment to control a gas phase formation and avoid DCS during the ascent (figure 3).

These assumptions are the basis of present table calculations although a large variety exists in the gas exchange models or in the criteria used to control bubbles formation. These models cannot be denied to have a certain efficiency since the present commercial air diving tables have an overall safety record around 0.5% DCS incidence (12). However, their initial ascent strategy can be questioned from the above accounts. These models work on tissue gas load. Their logic is to rapidly ascent to a stop close to the surface to create an off-gassing gradient. However, thinking in terms of bubbles instead of tissue gas load, the logic would rather be to slow down the ascent to the

control bubble growth (13). Doppler detection studies with air diving up to 40m have already documented differences in ascent rate procedures (14, 15, 16). Effectively, we have noted that successful bounce decompressions tend to slow the initial ascent down by using (figure 4):

- simply slower rates of ascent to the first stop,
- varying rates of ascent, from 15 m/min to as slow as 6 m/min,
- deeper decompression stops
- mid-depth stops
- a combination of the above.

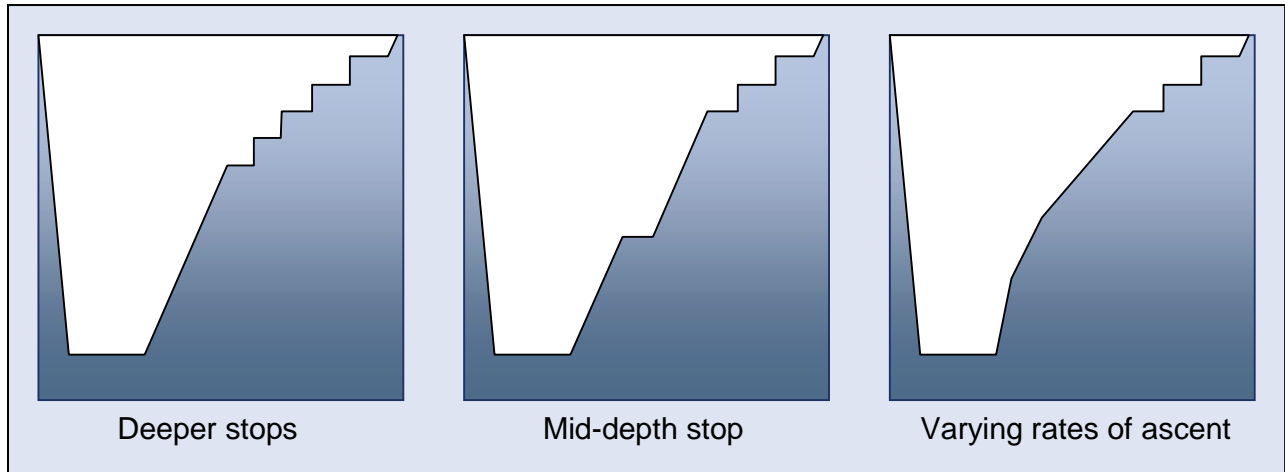


Figure 4 : strategies identified for the initial ascent in successful decompressions.

It is difficult to document the efficiency of such strategies. Most of the cases reported are uncontrolled information that constitutes more anecdotes than scientific data. However, one can consider that for deep bounce tables, the criticality of the exposure replaces statistical significance. Then, there is an obvious influence of the depth. An advanced ascent strategies will not change much the safety performances of an air dive to 21 meters and data from traditional air diving are not expected to provide evidences on the matter. Finally, one can suppose that the nature of the inert gas also play a role, as helium bubbles seems to have a different behavior than the nitrogen ones. In that respect, trimix dives become difficult to analyze. To the best, one can accept the above information as a trend that could be scientifically documented in near future. This leads to reject the classic models and search for new assumptions. The arterial bubble assumption was used to propose an explanation.

The Arterial Bubble Assumption

The very idea of arterial bubbles can be tracked to page 352 of Haldane's 1908 publication where he wrote:

"If small bubbles are carried through the lung capillaries and pass, for instance, to a slowly de-saturating part of the spinal cord, they will there increase in size and may produce serious blockage of the circulation or direct mechanical damage".

Closer to our time, in paper published in 1971, Hills (17) was able to show, using an animal model, that DCS symptoms could change from Type I to Type II by changing from continuous decompression to surface decompression. This elegant experiment demonstrated the existence of a different mechanism for the onset of Type II DCS which was later accounted for by arterial bubbles. The arterial bubbles were first detected and their possible role discussed by the scientists running Doppler detection studies (18, 19). The model was then proposed by James for the onset of CNS and spinal symptoms (20, 21). It was used to discuss the cerebral perfusion deficit in divers who had symptoms mainly referable to the spinal chord (22) and the role of a Patent Foramen Ovale in the divers susceptibility to Type II DCS (23, 24). Finally, Hennessy published in 1989 all the physical aspects of the arterial bubbles scenario in a remarkable paper (25) that became the foundation of the Arterial Bubble assumption

The critical issue in the Arterial Bubble assumption is the filtering capacity of the lung (figure 5). The threshold radius is suspected to be the size of a blood cell. Publications on intra-vascular ultrasound techniques using a contrast agent called "Levovist" confirmed this assumption. The agent contains stable gas bubbles trapped in galactose that have a calibrated size distribution from 3 to 8 microns. The contrast agent is injected intra-venously and measurements are made few minutes later in the cerebral, renal and lower limb arteries (26). If Levovist bubbles up to 8 μ can freely cross through the lungs, it means that decompression bubbles can pass to the arterial side, especially during the initial phase when bubbles are small. Later in the ascent, bubbles that are detected by ultrasound Doppler

on the venous side have a much larger size (20-30 microns). They obviously are trapped at the lung as conventional Doppler measurements have not permitted to detect any bubbles on the arterial side.

The first merit of the Arterial Bubble assumption is to introduce variability in the decompression outcome through the lung function. The first variable is individual susceptibility. It is reasonable to accept that the filtering capacity of the lung may vary from persons to persons, and for one individual, from one day to the other. It thus accounts for the inter-individual variability (age, fat content, smoking, etc.) and intra-individual variability (fatigue, hang over, etc.) which have been observed for long in DCS susceptibility. Basically, a good diver is a good bubble filter. It is a justification for divers who claim top physical fitness for severe decompressions.

The second variable is related to dive conditions. It is reasonable to speculate a possible role of CO₂ on the lung filter. CO₂ could decrease its filtration capacity and cause bubbles to pass to the arterial side of the circulation. Thus diving situations that produce CO₂ retention or hypercapnia should be associated to a higher risk of Type II DCS. It could explain why the following situations, which are all related to high levels of CO₂, have been identified as contributing factors to DCS:

- anxiety and stress, either because of the dive conditions or of insufficient training,
- exhaustion or hyperventilation due to intense activity or work at the bottom,
- cold at bottom or during decompression,
- breathing resistance due to the poor performances of the regulator (bad maintenance or adjustment, insufficient flow).

One scenario is a shunt at the heart or lung level that accidentally passes bubbles from the venous to the arterial side. A vast literature is now available on the subject but the latest conclusion is that a permeable patent foramen ovale (PFO) only opens in certain conditions (27, 28). A permeable PFO conveniently explains neurological accidents after recreational air diving without procedures violation. However, it does not fit the scheme for vestibular hits in deep diving. A first reason is that a deep diver generally has a long diving career and a diver with a permeable PFO would not be expected to follow it without any warning. The second is that vestibular symptoms can appear very early in the decompression, long before the massive bubble production required to overload the system.

A second scenario corresponds to pressure variations during decompression that reduce bubble diameters. Bubble trapped in the lung during a normal decompression process can suddenly pass through the capillaries and become responsible for Type II DCS symptoms. This scenario has been proposed to explain the difference in safety performances of in-water decompression versus surface decompression. Data collected in the North Sea have shown that if the overall incidence rate of the two diving methods is about the same, but that surface decompression tends to produce ten times more type II DCS than in-water decompression. The assumption is that at the moment the diver ascends to the surface, bubbles are produced that are stopped at the lung level. Upon recompression of the diver in the deck chamber, these bubbles reduce their diameter due to the Boyle's law and pass to the arterial side, later causing neurological symptoms. A similar scenario has been proposed for type II DCS recorded after yoyo diving or multiple repetitive diving (29).

The last advantage of the Arterial Bubble assumption is that it provides an explanation for the criticality of the initial ascent phase. Bubbles associated to symptoms are not necessarily generated on site. There is an amplification process at the beginning of the ascent that may last for several cycles. Once the bubbles have reached a critical size, they are either filtered in the lung or stopped at the tissue level. It is believed that the showering process of small arterial bubbles during the first minutes of the initial ascent prepares the prognostic for further DCS symptoms. An attempt was made to turn this scenario into a decompression model.

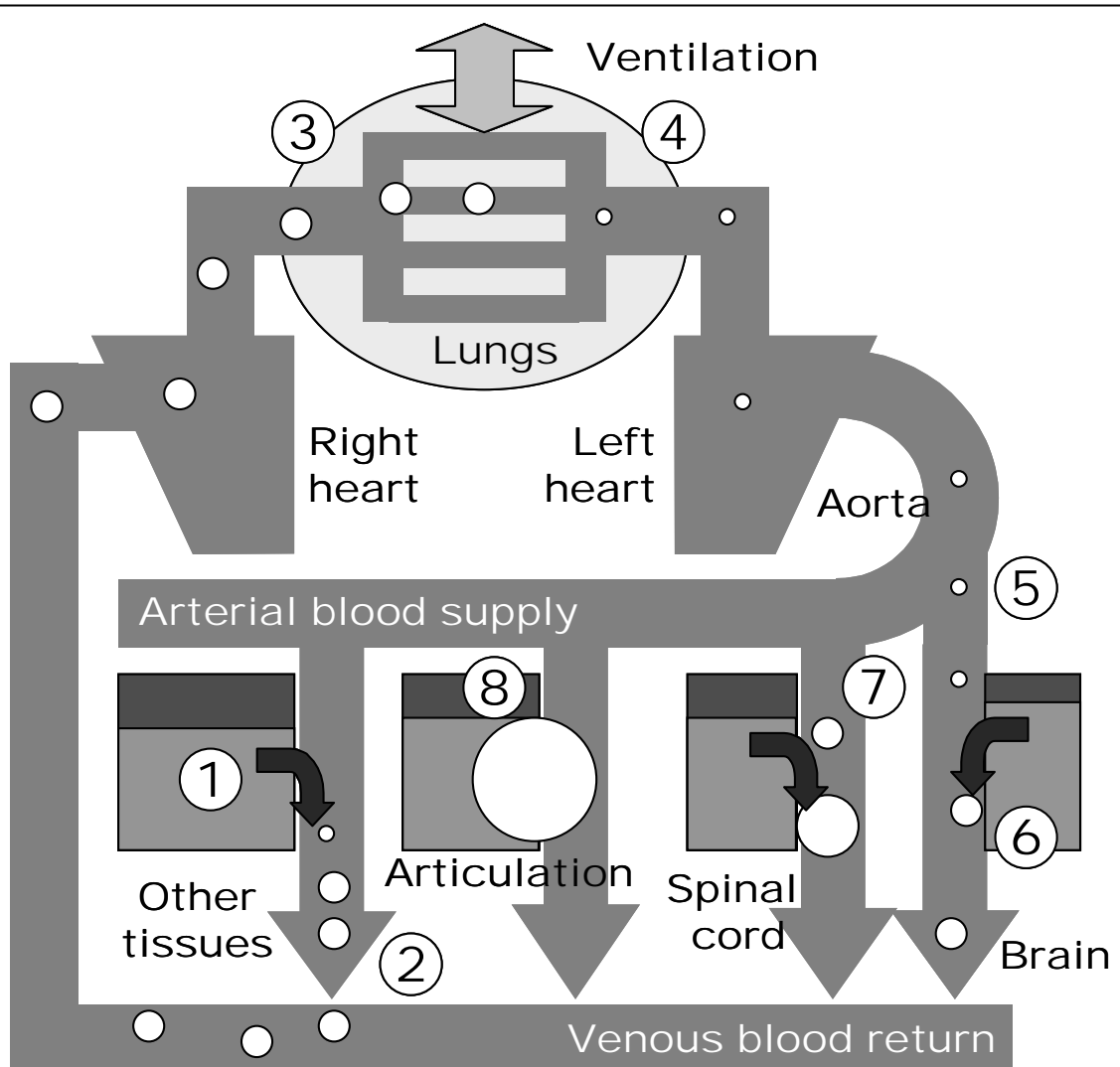


Figure 5 : the Arterial Bubble Assumption

1. Diving requires breathing a compressed inert gas that dissolves in the various tissues during the bottom exposure. When the ascent is initiated, the compartments off-load the inert gas as soon as a gradient is created.
2. Bubbles are normally produced in the vascular bed and transported by the venous system to the lung.
3. The lung works as a filter and stops the bubbles in the capillaries by an effect of diameter. Gas transfer into the alveoli further eliminates the bubbles.
4. The critical issue is the filtering capacity of the lung system. Small bubbles may cross the lung and pass into the arterial system.
5. At the level of aorta cross, the distribution of blood is such that the bubble is likely to reach a neurological tissue such as the brain or the spinal cord.
6. The brain is a fast tissue and might be in supersaturated state in the early phase of the decompression. It acts as a gas reservoir and feeds the bubble that starts growing. The bubble may just proceed to the venous side for another cycle. It may also grow on place causing major alteration of the blood supply and finally ischemia. The consequence will soon be central neurological symptoms.
7. Similarly, arterial bubbles may also reach the spinal cord and grow on site from local gas and produce spinal neurological symptoms.
8. Much later in the decompression, bubbles may reach a significant size and exert a local pressure, specifically in dense tissues such as tendons and ligaments that excites nerve terminations and produces pain.

Definition of the critical case

Setting the scene for a decompression model, simplifications and restrictions must be specified:

- The divers' population targeted must correspond to "standard divers". Although such persons do not exist, it is assumed that they have a normal lung filtering function and that they have no physiological dysfunctions such as a cardiac or pulmonary shunt to accidentally pass bubbles through.
- The dive considered should also have "a standard conditions" because our level of understanding does allow us to quantify the effect of fatigue, hyperventilation, cold, anxiety, etc. These conditions should be taken into account by applying the usual safety margins.
- Finally, the dive procedures must correspond to one "single square dive". Variations in the dive procedures such as yoyo diving, repetitive diving, multi-level diving introduce disturbances in the normal bubbles distribution that requires further assumptions.

From the above analysis, the critical case is defined as the arrival of an arterial bubble passing by a tissue compartment. Again, a series of simplifying assumptions is introduced (figure 6):

- The bubble was formed elsewhere. Its growth did not modify the local tissue gas load.
- The bubble is reputed to be small when compared to the tissue gas capacity, at least at the beginning of the decompression process. It does not change the tissue perfusion time response.
- Stuck in place, the bubble exchanges gases with both blood and the adjacent tissue.
- However, the bubble is stable and keep a critical volume.

Complementary assumptions could be added that will generate a family of solutions. However, as the validation of these models is done by data fitting, the mathematical expression should remain simple and the number of parameters should be kept minimum.

Derivation of a mathematical model

Decompression models are all based on the same structure (figure 7). The assumptions in the various boxes may vary from one author to another but the logic remains the same. The input parameters correspond to the operational conditions: bottom depth, bottom time, and gas protocol. They set the initial and boundary conditions for the various equations. The gas exchange model serves to evaluate the amount of available gas at the site. A second model is used to describe the gas exchanges between the bubble and its surrounding environment. Both models may interact depending on the assumptions. The safe ascent criteria is a decision on the critical phenomena to be controlled during the ascent. It could be super-saturation as in the Haldane's model, the volume of the gas phase in the critical volume hypothesis (30), or the bubble size, the rate of growth, etc.

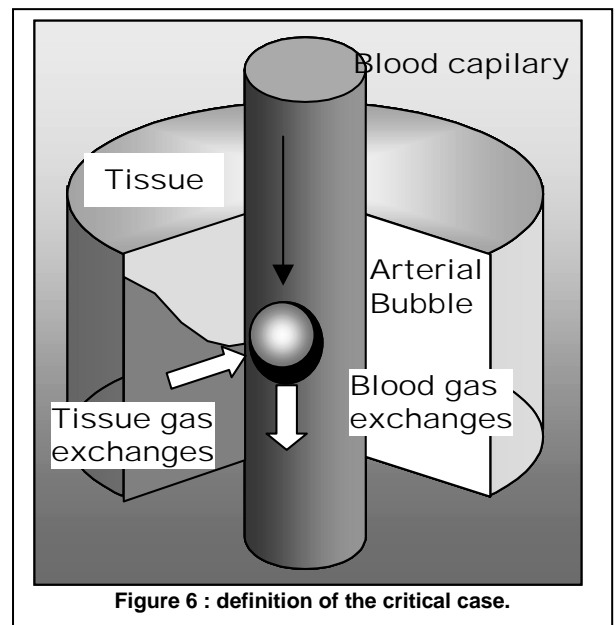
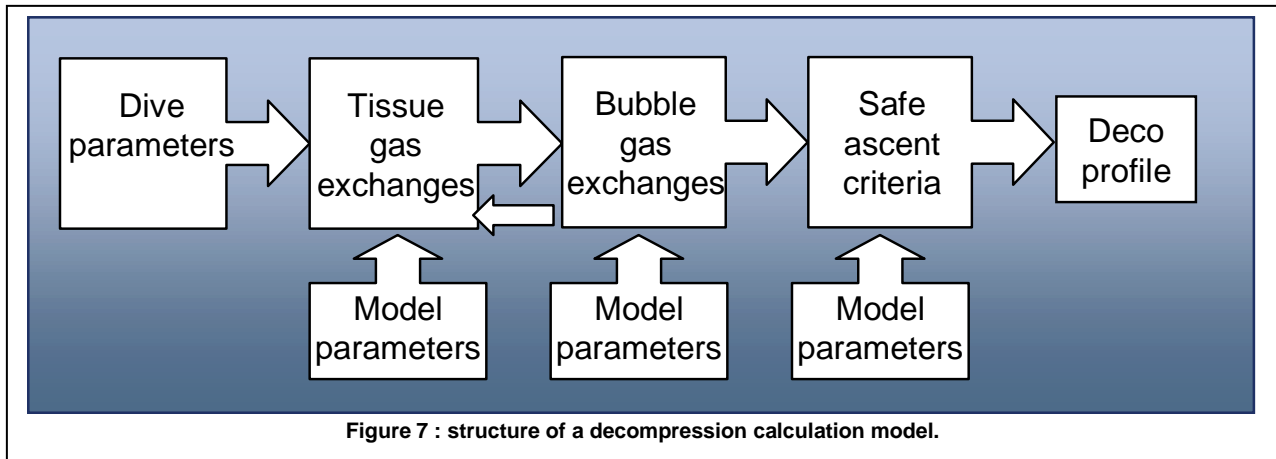


Figure 6 : definition of the critical case.

Tissue gas exchanges model

Models require parameters to be defined. The number of parameters, or degrees of freedom, increases with the complexity of the model. It is currently admitted that models with a large number of parameters are purely descriptive models and that models with a limited number parameters, corresponding to more pertinent assumptions, are more predictive. The consequence is that when the number of parameters increases, the domain of validity of the model shrinks. Classic models used in table calculations are obviously over dimensioned in terms of parameters. Typically, the Buhlman model (31) uses 16 compartments to calculate air tables. Considering the half-time and the two "a" and "b" coefficients for the safe ascent criteria of the various compartments, the model uses a total of 36 parameters to run. Although these tables are among of the best air tables available, it took Dr. Buhlman a lifetime to adjust these parameters. In addition, the model is fine as long it is used in its domain of validation that is mainly recreational diving. It could not be extrapolated for instance for very long bottom times as used in commercial diving.



The tissue gas exchange model is generally the main source of parameter proliferation because of the concept of tissue compartments. Tissue compartments are just an historical approach and their identification is not important. A series of compartments avoids the difficulty of accurately defining the process of the gas exchanges, would it be perfusion, diffusion or combined perfusion and diffusion. The exponential compartments are considered as harmonics of a complex mathematical solution that are controlling the decompression one after the other. For this reason, we used the general classic expression:

$$E1 \quad \frac{dPtis_{gas}}{dt} = \frac{0.693}{T} (Pa_{gas} - Ptis_{gas})$$

Where T is the compartment half-time as defined in the perfusion equation, Pa and Ptis, the arterial and tissue inert gas tensions.

The modern trend in table computation is to consider all the possible compartments and treat their half-time as a continuous variable. The difficulty then is to express the safe ascent criteria in terms of the compartment half-time, an exercise that was solved only in simple cases (32). Because modern computers are fast, the solution adopted was to keep treating tissue compartments individually but express them with a geometrical series to remove any subjectivity in their selection. We used the Renard's series, named after a French admiral who faced the standardization of ropes, sails, planks, etc. in navy arsenals, and elegantly solved the problem with a progression based on a square root of 10. For instance, with 10 values per decade ($\sqrt[10]{10}$), the series gives the following values:

$$10 - 12.5 - 16 - 20 - 25 - 32 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100$$

Experimentally, we found that the computations become stable when the number of compartment is set between 15 to 20 values per decade. This way, the description of the tissue gas exchange model only requires defining the boundaries. The fastest compartment obviously corresponds to instant equilibration and does not need to be specified. The slowest compartment is defined as the one used in saturation decompressions. Based on Comex saturation experience, these values were set to 270 minutes for heliox and 360 minutes for nitrox saturation (33). Finally, the tissue gas exchange model only requires one parameter to be defined, corresponding to the half-time of the slowest compartment.

Bubble gas exchanges model

All gases present in the surrounding of the bubble participate to the gas exchanges. Metabolic gases play an important role and especially CO₂ (34), the presence of which has been reported in bubbles as soon as Paul Bert. However, Van Liew demonstrated in his experiments that the permeations of O₂ and CO₂ are very rapid (35). If

local tension of CO₂ and water vapor are well documented in the surrounding tissue, the local values of the oxygen tension might become a problem, especially if various decompression mixtures are used during the ascent. As a first approximation we took the bubble oxygen pressure equal to the tissue oxygen tension and constant. However, when the decompression gas protocol is aggressive, or if pure oxygen is breathed in the last stops, this simple approach gives rapid changes of ascent rates that are incompatible with our operational experience. In an improved version of

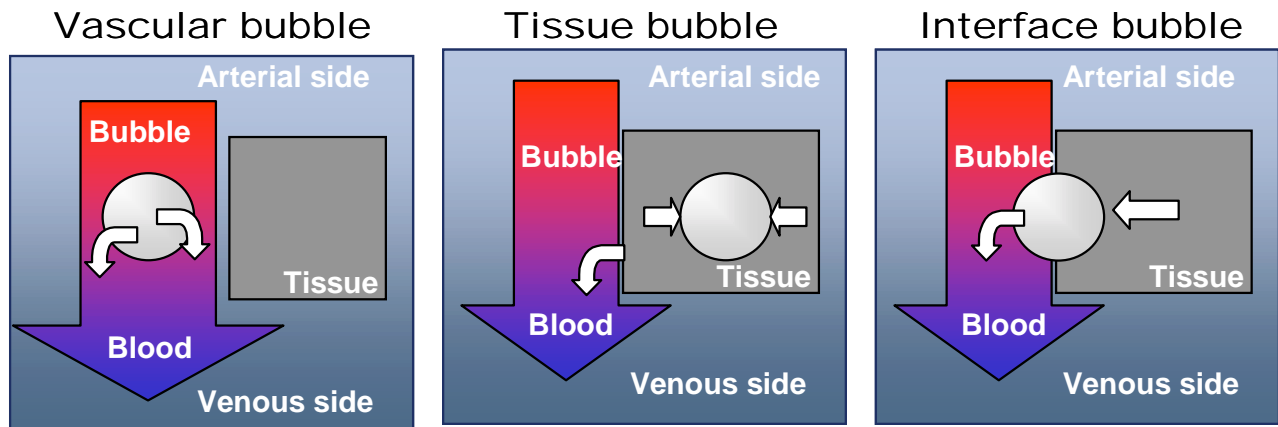


Figure 8 : possible bubble gas exchange situations

the model, the bubble oxygen partial pressure was computed as a function of the ambient pressure and the metabolic oxygen extraction (36, 37) and using the mathematical derivation of the oxygen window proposed by Egi (38). To cope with the complexity of the inert gas exchanges in the bubble, we decided to simplify the process by considering two extreme situations (figure 8). In one case, the bubble is purely vascular and remains on place. The blood flows around it and exchanges gas by convection so efficiently that there is no laminar layer and no diffusion delay at the bubble interface. In these conditions, we adopted for the bubble gas exchanges a formulation similar to the classic tissue perfusion equation. We further assumed that the blood flow draining the bubble is a small fraction of the tissue perfusion and that the blood leaves the bubble equilibrated with its gas pressure. This permitted to arbitrarily express the quantity of inert gas molecules transiting through the bubble interface into the blood as:

$$E2 \quad \frac{dn, blood_{gas}}{dt} = C \frac{0.693}{T} (Pa_{gas} - Pb_{gas})$$

Where $dn, blood_{gas}$ is the number of molecules of inert gas passed from the bubble into the blood, Pa_{gas} the arterial inert gas tension, Pb_{gas} the bubble inert gas pressure, T the compartment half-time and C a coefficient that accounts for the fraction of the tissue blood perfusion that governs these exchanges, the relative capacity of the bubble to the surrounding tissue, etc.

In the second case, the bubble is purely extravascular. The bubble exchanges gas with the surrounding tissue by diffusion. We used the classic assumption of a linear gradient in a surrounding shell and obtain a second general expression for the number of inert gas molecules diffusing through the bubble interface into the tissue.

$$E3 \quad \frac{dn, tis_{gas}}{dt} = \frac{1}{K} (Ptis_{gas} - Pb_{gas})$$

Where dn, tis_{gas} is the number of molecules of inert gas diffusing from the tissue into the bubble, $Ptis_{gas}$ the tissue inert gas tension, Pb_{gas} the bubble inert gas pressure, K a coefficient that accounts the diffusibility of the gas, the thickness of the layer, the surface of the bubble, etc.

Finally, we imagined an intermediate situation where the bubble is at the interface between the blood and the tissue and exchanges gas through the two above mechanisms. The importance of the exchange varies with the relative area of the bubble exposed to each media. The ratio between the two exposed areas of the bubble is called α and varies from 0 to 1. The inert gas mass balance of the bubble becomes:

$$E4 \quad \frac{d(PbVb)}{dt} = \frac{1}{R\tau} \left(\alpha \frac{dn, tis_{gas}}{dt} + (1-\alpha) \frac{dn, blood_{gas}}{dt} \right)$$

Where R is the gas constant, τ the absolute temperature and V_b the volume of the bubble.

Safe ascent criteria

The ascent criteria simply seeks the stability of an arterial bubble, with a critical size, stuck at the interface of the blood vessel and exchanging gas with both the blood and the tissue. We translated this statement by specifying that the overall mass balance of the arterial bubble remains unchanged in these conditions:

$$E5 \quad \frac{d(P_b V_b)}{dt} = P_b \frac{dV_b}{dt} + V_b \frac{dP_b}{dt} = 0$$

At a constant ambient pressure, corresponding to the situation of a decompression stop, the stability of the bubble requires two conditions. The first one is that the bubble volume remains constant $\frac{dV_b}{dt} = 0$ and the second that the

various pressures are balanced at the surface of the bubble $\frac{dP_b}{dt} = 0$.

This last condition means that the sum of all the internal gas pressures equals the external ambient pressure plus the stabilization pressures (surface tension, skin elasticity, tissue compliance). This is written as:

$$E6 \quad P_{b_{gas}} + P_{b_{O_2}} + P_{b_{H_2O}} + P_{b_{CO_2}} \leq P_{amb} + P_{stab}$$

Where $P_{b_{gas}}$, $P_{b_{O_2}}$, $P_{b_{H_2O}}$, $P_{b_{CO_2}}$ are respectively the pressures of the inert gas, oxygen, water vapor and CO_2 inside the bubble, P_{amb} the ambient pressure and P_{stab} the sum of the various stabilization pressures. Assuming $P_{b_{O_2}}$ is constant and equal to the tissue oxygen tension and introducing B , a coefficient of obvious definition, we obtained a simpler form:

$$E7 \quad P_{b_{gas}} \leq P_{amb} + B$$

In these conditions, the overall of gas transfers between the bubble and its surrounding is balanced. The same amount of molecules of inert gas must enter and leave the bubble during a unit of time. There is no gas accumulation inside the bubble. Equations E5 and E4 become:

$$E8 \quad \alpha \frac{dn_{gas, blood}}{dt} = -(1-\alpha) \frac{dn_{gas, tis}}{dt}, \text{ and yields:}$$

$$E9 \quad \frac{\alpha}{K} (P_{tis_{gas}} - P_{b_{gas}}) = -(1-\alpha) \cdot C \frac{0.693}{T} (P_{a_{gas}} - P_{b_{gas}})$$

Finally, equation E10 and E8 are combined to eliminate $P_{b_{gas}}$. After defining a coefficient A as:

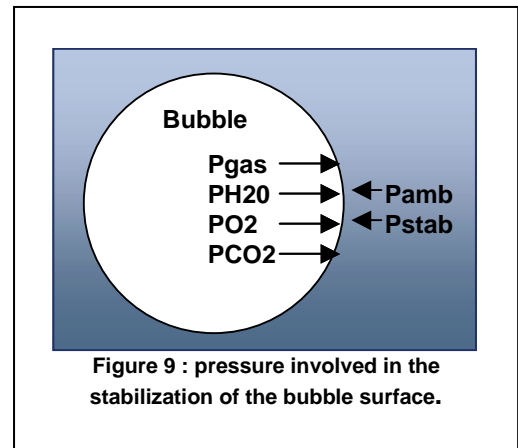
$$E10 \quad A = 0.693 \cdot \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \cdot C \cdot K$$

The final expression of the safe ascent criteria becomes:

$$E11 \quad P_{tis_{gas}} \leq \left(1 + \frac{A}{T}\right) (P_{amb} + B) - \frac{A}{T} P_{a_{gas}}$$

Equation E11 sets the condition for a safe ascent to the next stop according to the initial hypothesis: an arterial bubble, exchanging gas with blood and tissue that keeps a critical size during the ascent. It is a function similar to an M-value. With the tissue compartment tension evolution defined in E1, it permits the classic computation of a decompression stop time. This computation model is later referred as the Arterial Bubble model or "AB" model.

The primary interest of the ascent criteria in E11 is that it is expressed as a function of T and thus can be defined continuously for each compartment. This definition is also extremely efficient in terms of parameters, as it only requires determining (when $P_{b_{O_2}}$ is taken as a constant) the values of the A and B coefficients. The total number of model parameters reduces to three coefficients that are the longest tissue half-time and the two A and B coefficients.



Validation of the model

Validation of a model should follow the recommendations of the UHMS Workshop on Validation of Decompression Tables (39). The validation should range from laboratory testing to operational evaluation. Scientists refer to the convention of Helsinki for human experiment and proceed with informed consent forms. However, nowadays, ethical committees will exclude manned trials from almost any decompression study. Commercial diving, that was the main driving force during the 70's and 80's, has been ruled by laws, industry recommendations and social pressure. This normal maturation process of an industry has proved very limiting too. The last time a decompression problem was identified in the North Sea, it was solved by forbidden diving in the area of concern (40). Since then, the collapse of the offshore diving has reduced money available for diving research in many countries. The precious diving databases were lost along with any hope of official support for the validation of decompression tables. The lack of manned experiments or documented operational experience make new models difficult to validate. The only remaining possibility for tables design is to analyze old data with new models.

AB Model-1: validation of the 1992 French air tables

Comex had used on its worksites the first version French official air decompression tables, called "MT74 Tables, that were published in 1974 by the "Ministère du Travail" (41). In 1982, the French government supported a research project for the evaluation of their safety performances using the computer treatment of the dive reports. The database analysis showed that the MT74 tables had limitations for severe exposures (12). The French government then supported a second research project to edit and validate new tables. A complete set of air tables, offering pure oxygen breathing at 6m (surface supplied), at 12m (wet bell), surface decompression, split level diving, repetitive diving, etc. was developed in 1983.

The model used to compute the tables implemented the concept of continuous compartment half-times. For the safe ascent criteria, the formulation of equation E11 was suspected but not established mathematically. An approximation was defined empirically by fitting mathematical expressions to selected exposures stored in the Comex database. At the time, the best fit was obtained by the expression E12 below, now called "AB model-1". It is similar to the equation E11 when the last term is neglected.

$$E12 \quad P_{tis_{gas}} \leq \left(1 + \frac{A}{T}\right)(P_{amb} + B)$$

The values obtained by data fitting for the coefficients were A= 8 min and B= 0.4 bar. The AB model-1 was used to compute a set of decompression tables that was sent offshore for evaluation on selected Comex worksites. In 1986, after some minor adjustments, the tables were finally included in the Comex diving manuals and used as standard procedures (42). Later in 1992, the tables were included in the new French diving regulations under the name of "Tables du Ministère du Travail 1992" or "MT92" tables (43). The safety performances of the new AB model-1 are documented in table 1 after their offshore validation with air diving.

Table 2.

Comparison of the safety performances of the MT74 and the MT92 French air tables. The dives are classified in moderate, standard and severe exposures according to the Prt Index (5). The exposures correspond to in-water decompressions and exclude any surface decompressions. The data permit to quantify the safety performance improvement that is especially significant for type I DCS and severe exposures. Results on type II DCS are inconclusive as the general level of incidence is very low.

Exposures	Moderate (Prt<=25)		Standard (25<Prt<=35)		Severe (Prt>35)	
	MT74	MT92	MT74	MY92	MT74	MT92
Tables	MT74	MT92	MT74	MY92	MT74	MT92
Dives	17,683	7,129	9,590	8,384	2,426	2,055
Number of Type I DCS	18	1	55	12	49	17
Percentage of cases	0.10%	0.001%	0.57%	0.14%	2.2%	0.82%
Number of Type II DCS	1	0	1	1	1	2
Percentage of cases	0.006%	0.00%	0.01%	0.01%	0.04%	0.09%

AB Model-2: calibration with Comex deep experimental dives

The name "AB model-2" was given to the full expression of equation E11. Used in its full extend, the expression can be compared to a normal M-value associated to a corrective factor that tends to reduce the permitted gradient for small values of T. Its role is similar to the "Reduce gradient factor" method of calculation presented by Backer (44) or the reduction factor of the rbgm model (45). These compartments correspond to fast tissues that effectively direct the initial phase of the ascent. The overall consequence is much deeper stops. The initial rate of ascent to the first stop is not part of the model control and was set arbitrarily to 9-6 m/min. The combination of the deep stops and slow ascent rates gives decompression profiles with features identified above for successful decompressions. The AB

model-2 was calibrated by data fitting on a series of Comex offshore and experimental dives using both air, nitrox and heliox gas mixtures. As an example, the fit obtained for the test dive to 180m/120min already mentioned in the above paragraph is presented in figure 10. The AB model-2 succeeded in introducing the deep stop at least to 153 m that is very closed to the actual one at 162m.

AB Model-2: field validation

There is a strong cave divers community in the south of France. Over the recent years, they have reached a high technical level and achieved some outstanding explorations. Their leaders are always looking for tables to push the limits. Reluctantly, I have accepted to provide some of them with tables computed with the AB model-2 on the principle that “they would do it anyway, so better try to help”.

I met Pascal Bernabé in 1995 and we have since started a long cooperation. Pascal is a French cave diver with a dry sense of humor and an outstanding capacity for deep diving. He has since become the main Beta tester of the different versions of the AB model-2. His most impressive deep cave dives include:

- June 1996, 163m at Foux du Mas de Banal, 30 minutes of descent time
- September 1996, 176m at Fontaine de Vaucluse, 20 minutes descent time
- September 1997, 250m at Fontaine de Vaucluse, 25 minutes descent time

Pascal Bernabé also participated as a support diver to the breath-hold record set by Pipin at Cosumel in January 2000. During 15 days, he performed 10 dives between 130 and 163m, with bottom times of 5 to 7 minutes. As Pipin was getting close to his record setting dive, he dived 153m, 156m, 163m and 162m in seven days. More recently, in October 2002, working with the late Audrey Mestre, he made support dives to 143m, 166m and two dives to 170m in a week.

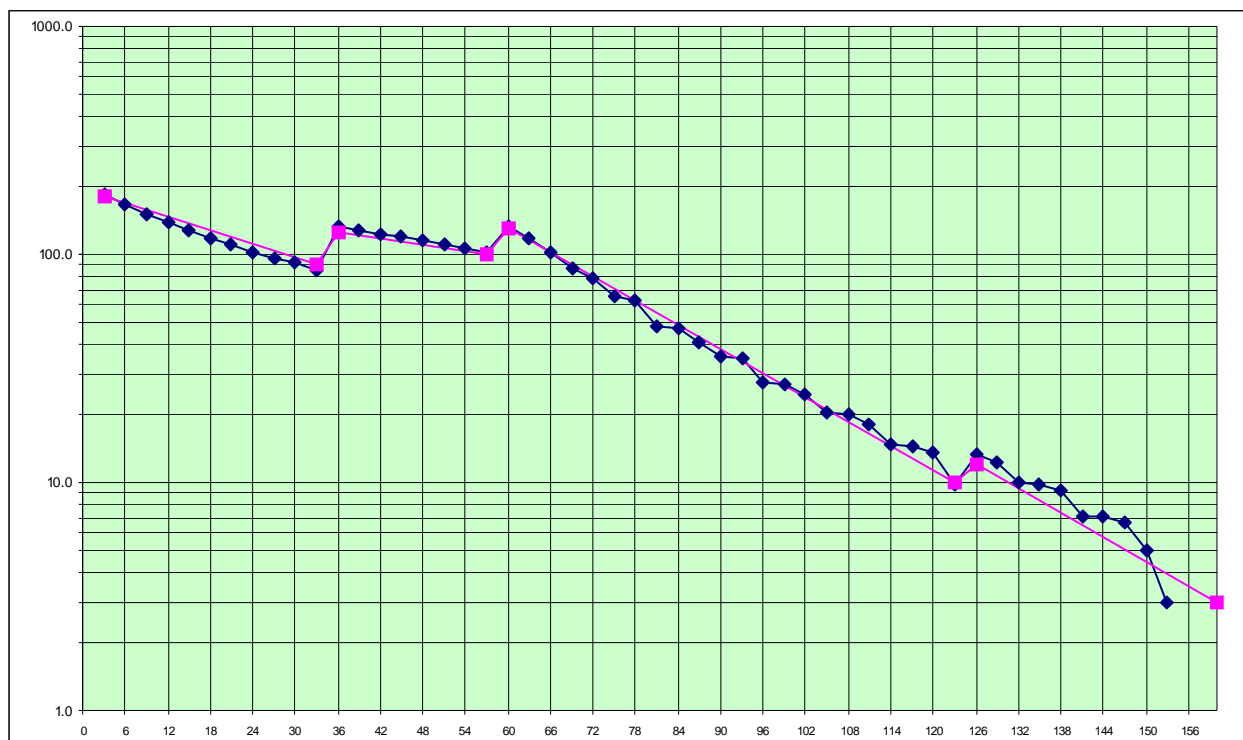


Figure 10: Comparison of the predictions of the AB model 2 and the actual dive profile of a 180m/120min deep bounce dive that was successfully conducted at Comex Hyperbaric Center in 1977. The decompression profiles are plotted using the decompression stop times in a semi-log scale, and the depth in a linear scale. The straight line represents the actual dive.

Olivier Isler, another famous cave divers, but with a Swiss style, also used the AB model 2 for a dive to 165m in the spring of Bourg Saint Andeol, south of France. More recently, the AB model-2 was used to derive tables for coral divers. These tables use a simple gas protocol, with heliair as bottom mix, air as deco mix and pure oxygen at the end of the ascent, as specified by the users. For two seasons, one crew in Corsica and a second in Tunisia have used the tables intensively. A typical coral dive would be 20-25 minutes at 100m, and divers would repeat one dive a day as long as the weather permits it. In Tunisia, on specific sites, the tables have been used down to 140m. The overall number of coral dives now exceeds one thousand, carried out by a dozen of coral divers, without any reported DSC

problem. Although this is non-controlled information, the criticality of the exposure is such that a certain credit must be given to the table safety performances.

Discussion and conclusion

It is admitted that the shape of the decompression generated has prevailed over the theoretical basis in the derivation of the AB model-1 and 2. The limits of their assumptions are clearly understood:

- No information is available on the origin bubble. Arterial bubbles could in fact be just a local vascular bubble at a given stage of its development.
- The full dynamic of the bubble growth should be considered until it reaches its critical volume.
- A distribution of bubbles with various sizes should be considered instead of a single isolated bubble. This has already been solved for one single compartmental tissue array (46).

However, few points must be recognized in favor of the AB models:

- The concept of the arterial bubbles seems to be a way of designing tables with deep stops as we nowadays believe they should have.
- The model in its simplified form (AB model-1) has been effectively validated in controlled conditions with air diving at the time it was still possible to do with diving data-bases.
- The mathematical formulation, based on a continuously varying compartment half-time, requires a minimum of parameters, and somehow proves the relevance of the assumptions.
- As such, the AB models have a surprising prediction capacity as they were successfully calibrated with air and heliox from 0 to 180m.

In any cases, recognition is due to the cave and coral divers who helped in the operational validation of the deep part of these AB model tables.

References

1. Boycott, A.E., Damant, GC, Haldane, JS. The prevention of compressed-air illness. *J. Hygiene*, 8, 342-443.1908.
2. Pyle R. The importance of Deep Safety Stops. *Deep Tech Issue* 5.
3. Imbert JP. Decompression safety. *Proceedings of the Subtec '93 Conference*. Volume 31, 239-249. Aberdeen, Scotland, November 1993.
4. Imbert JP, Montbarbon S. Use of the Comex Diving Data Base. *Proceedings of the EUBS Workshop on Operational dives and decompression data : collection and analysis*. Amsterdam, 17 August, 1990.
5. Shields TG, Lee WB. The incidence of decompression sickness arising from commercial offshore air-diving operations in the UK sector of the North Sea during 1982/83. *Report to the UK Department of Energy*, 1986.
6. Giles R. Decompression sickness from commercial offshore air-diving operations on the UK continental shelf during 1982 to 1988. *Report from the UK Department of Energy*. 1989.
7. Imbert JP. Evolution and offshore performances of the Comex Treatment Tables. *Proceedings of the UHMS Workshop on Decompression Illness Treatment*. Palm Beach, Florida, 18-19 June 1995.
8. Imbert JP, Montbarbon S. Presentation of the Comex Diving Data Base. *Proceedings of the EUBS Workshop on Operational dives and decompression data: collection and analysis*. Amsterdam, 17August, 1990.
9. Wienke BR. Deep stops. *Advanced Diver Magazine*. Issue 12. p30-34. 2002.
10. Gardette B, C Lemaire, D Lamy, J Le Chuiton. Heliox bounce dive decompression (180m). *Proceedings of the 5th Annual Meeting of the EUBS*. Bergen, Norway, 5-6 July, 1979.
11. Bennett PB. *Proceedings of the 9th Undersea medical Society Workshop on development of decompression procedures for depths in excess of 400 feet*. Duke University, USA. 21-23 February 1975.
12. Imbert JP, Bontoux M. Safety analysis of French 1974 air decompression tables. *Proceedings of the Undersea Medical Society Workshop on Decompression in surface-based diving*. Tokyo, Japan, September 12 th, 1986.
13. Marroni A, Benent PB, Balestra C, Cali-Corleo R, Germonpre P, Pieri M, Bonucelli C. What ascent profile for the prevention of decompression sickness? I Recent research on the Hill/Haldane ascent controversy. *Proceedings of the 28th Annual Scientific Meeting of the European Underwater and Baromedical Society*, Bruges, Belgium, 4-98 September, 2002.
14. Carturan D, Boussugues A, Habib G, Gardette B, Sainty J.M. Influence of ascent rate on venous bubbles detected after recreational dives. *Proceedings of the International Joint meeting on Hyperbaric and Underwater medicine*, Milan, Italy, 4-8 September, 1996.
15. Carturan D, Boussugues A, Burnet H and Gardette B. Effect of ascent rate on circulating venous bubble production during decompression in air sport diving. *Bull. Mesubhyp* 1998; 8:1-6.

16. Marroni A, Benent PB, Balestra C, Cali-Corleo R, Germonpre P, Pieri M, Bonucelli C. What ascent profile for the prevention of decompression sickness? II- a field model comparing Hill and Haldane ascent modalities with an eye to the development of a bubble safe decompression algorithm. Proceedings of the 28th Annual Scientific Meeting of the European Underwater and Baromedical Society, Brugges, Belgium, 4-9 September 2002.
17. Hills BA. Decompression sickness : a fundamental study of surface excursion diving and the selection of limb bends versus CNS symptoms. *Aerospace Medicine*, Vol 42, No 8, August 1971.
18. Brubakk AO, Grip A, Holand B, Ornaheim J, Tonjum S. Pulsed Doppler ultrasound for studying haemodynamic changes and bubbles during simulated diving. Proceedings of the VIth Annual Congress of the EUBS. Cambridge, UK, 1981.
19. Mazurel G, Hee J, Giacomini L, Guillerm R. Ultrasonic detection of circulating bubbles in ewes exposed to simulated dives deeper than 800m under isobaric conditions and with unchanged gas mixtures. Proceedings of the XI th Annual meeting of the EUBS. Goteborg, Sweden, August 1985.
20. James PB. The size distribution of gas emboli arising during decompression. A review of the concept of critical diameter of gas emboli. Proceedings of the XIII th Annual Congress of the EUBS, Lubeck, Germany, 5-8 October 1982.
21. James PB. Decompression sickness. In *Clinical Neurology*. Edited by Michael Swash and John Oxbury. Churchill Livingstone. Vol. 1;565, 1991.
22. Adkinson GH, Macleod MA, Hodgson M et al. Cerebral perfusion deficit in disbaric illness. *Lancet* 2;119, 1989.
23. Moon RE, Camporesi EM, Kisso JA. Patent foramen ovale and decompression sickness in divers. *Lancet* 1; 513, 1989.
24. Wilmshurt PT, Byrne JC. Relation between interatrial shunts and decompression sickness in divers. *Lancet*, 1302-1306, 1989.
25. Hennessy TR. On the site of origin, evolution and effects of decompression microbubbles. Proceeding of the International Symposium on supersaturation and bubble formation in fluids and organisms. Trondheim, Norway, 6-10 June 1989.
26. Besnard S, M Philippot, Ph Hervé, M Porcher, Ph Arbeille: Intravascular ultrasound contrast agent particles in the cerebral, renal and lower limb arteries – consequence on diving physiology. Proceeding of the 28th Annual Scientific meeting of the European Underwater and Baromedical Society, Bruges, Belgium, 4-8 September 2002.
27. Balestra C, P Germonpre, and A Marroni. Intrathoracic pressure changes after Valsalva strain and other maneuvers: implication for divers with patent foramen ovale. *Undersea hyperb. Med*, 1998. 25(3): page 171-4.
28. Germonpre P et al; Patent foramen ovale and decompression sickness in sport divers. *J. Appl. Physiol*, 1988, 84(5): p1622-6.
29. Imbert JP. Decompression tables versus decompression procedures: an analysis of decompression sickness using diving data-bases. Proceedings of the XVII th annual meeting of Diving and Hyperbaric Medicine, Heraklion, Crete, Greece, 20 September-3 October 1991.
30. Hennessy TR, Hempleman HV. An examination of the critical release gas volume concept in decompression sickness. *Proc. R. Soc. B*179, 299-313, 1977.
31. Buhlmann, AA. 1984. *Decompression-Decompression Sickness*. Berlin: Springer-Verlag.
32. Egi SM and Gurmen NM. Computation of decompression tables using continuous compartment half-times. *Undersea Hyper Med* 2000; 27(3):143-153.
33. Imbert JP, Bontoux M. Diving data bank: A unique tool for diving procedures development. 20th Annual OTC Conference. Houston, Texas, 2-5 May 1988.
34. Ishiyama A. Analysis of gas composition of intravascular bubbles produced by decompression. *Bull. Tokyo Med. Univ.* 30 :25-35, 1983.
35. Van Liew HD, Bishop B, Walder-D P, Rahn H. Effects of compression on composition and absorption of tissue gas pockets. *J. of Appl. Physiol.* 1986; 20:927-33.
36. Yount D and Lally D. On the use of oxygen to facilitate decompression. *Aviation, Space and Environmental medicine*, June 1980.
37. Van Liew HD, Conkin J and Burkard M. The oxygen window and decompression bubbles: estimates and significance. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, September, p859-865, 1993.
38. Egi M. Estimation of oxygen window during and after altitude exposures. Proceedings of the 20th Annual Meeting of the European Underwater Baromedical Society, Istanbul, Turkey, 4-8 September 1994.
39. Conclusions of the 37th Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop on Validation of Decompression Tables. Bethesda, MD. 13-14 February 1987.
40. Shields TG, Duff P, Wilcox SE. Decompression sickness from commercial offshore air-diving operations on the UK continental shelf during 1990. Report from the UK HSE. 1992.

41. Mesures particulières de protection applicables aux scaphandriers. Fascicule Spécial no 74-48 bis. Bulletin Officiel du Ministère du travail. Imprimerie du Journal Officiel, 26 rue Desaix, 75732 Paris cedex 15.
42. Imbert JP, Bontoux M. A method for introducing new decompression procedures. Proceedings of the Undersea Medical Society Workshop on validation of decompression schedules. Bethesda, Maryland, 13-14 February 1987.
43. Travaux en Milieu Hyperbare. Mesures particulières de prévention. Fascicule no 1636. . Imprimerie du Journal Officiel, 26 rue Desaix, 75732 Paris cedex 15. ISBN 2-11-073322-5.
44. Baker EC. 1998 Understanding M-values. Immersed. Vol. 3, No 3
45. Wienke BR. Modeling phase volume constraints under repetitive decompression. Math; Comput. Modelling. Vol. 16, No 3, pp. 109-120, 1992.
46. Gürmen NM, Llewellyn AJ, Gilbert RA, Egi SM. Simulation of dynamic bubble spectra in tissues. IEEE Trans Biomed Eng. 2001 Feb; 48(2):185-193.)

XII- Des exercices pour s'entraîner (annales d'examens et solutions)**2003 (Stéphan Jacquet)**

I- (3 pts)

Quel arrêté définit les conditions d'utilisation des tables ?

Comment les tables s'appellent-elles ?

Que dit l'instruction 980002IGHS du 3 décembre 1998 du CNRS à propos des ordinateurs de plongée ?

II- (8 points)

Cécile, Alec et Jeff programment une plongée dont la particularité est de commencer à 30m (où ils resteront 19 minutes, durée de la descente incluse) pour finir à 18m (où ils resteront 24 minutes). Sachant qu'ils s'immergent à 16h00 et qu'ils remontent de 30m à 18m à la vitesse de remontée des tables, donnez :

Les paliers éventuels,

L'heure de sortie, sachant que la dernière minute du palier sert à remonter à la surface,

Le nom de ce type de plongée.

III- (4 points)

Mireille, Muriel et Christophe sortent de l'eau d'une première plongée à 11h00, plongée dont les caractéristiques sont les suivantes : P= 32m, durée = 26 min.

Quels paliers ont-ils fait ?

Ils replongent à 14h30 sur un fond de 23,5m.

Combien de temps peuvent-ils rester sous l'eau sans avoir à faire de palier à la remontée ?

Quel est le nom de ce type de plongées ?

IV- (5 points)

Loïc et Pascal plongent à 37m. Ils décident de remonter au bout de 11 min. A la 12^{ème} minute, alors qu'ils se trouvent à 25m de profondeur, l'un des deux fait une remontée trop rapide jusqu'en surface. Les 2 plongeurs gagnent alors la profondeur de leur premier palier ; 3 min. s'écoulent entre le début de la remontée rapide et l'arrivée à ce 1^{er} palier :

Quel est celui qui a fait la remontée rapide ? (vous n'êtes pas obligé de répondre à cette question ...)

Donnez les paliers qu'ils vont devoir effectuer ?

Sachant qu'ils se sont immergés à 12h00 la première fois, quelle va être leur heure de sortie (la dernière minute de palier sert à atteindre le palier suivant ou à regagner la surface) ?

2002 (Stéphan Jacquet & Roland Graille)

I (4 points) :

Claire, Maïa et Stéphane ont planifié une plongée consistant à prospecter deux épaves localisées à deux profondeurs différentes. Ils passeront ainsi 20 minutes à 25 mètres puis 15 minutes à 18 mètres. *Quelles sont la profondeur et la durée du ou des paliers à réaliser ?* La seconde épave étant particulièrement intéressante, les plongeurs décident se ré-immérer

3 heures et 30 minutes après la sortie de la première plongée. Ils restent à 18,5 mètres 30 minutes. *Quelles sont la profondeur et la durée du ou des paliers à réaliser ?*

II (3 points) :

Jean-Michel, Bruno_P et Thierry sortent de l'eau à 11h30. Ils ont effectué une plongée dont les paramètres sont une profondeur de 32 mètres et un temps de 25 minutes pour photographier l'espèce naine très rare *Gerardus thouzeaubardus*. *Quelles sont la profondeur et la durée du ou des paliers à réaliser ?* Ils replongent, 3 heures plus tard, l'après-midi en espérant pouvoir filmer le comportement de l'espèce dans son habitat naturel sur un fond de 23 mètres. *Combien de temps au maximum peuvent-ils rester à cette profondeur pour ne pas avoir de paliers à réaliser à 6 mètres ?*

III (3 points) :

Thomas, Bertrand et Bruno_B ont décidé de « transporter leur expérience en mer » au magnifique (mais quasi azoïque) lac Léman situé à 360 mètres d'altitude. Ils y effectuent une plongée scientifique visant à observer, photographier et filmer l'écrevisse américaine. Sur leur profondimètre, les paramètres de leur plongée sont 34 mètres, 25 minutes au fond. *Quelles sont la profondeur et la durée du ou des paliers à réaliser ? Quel aurait été le gain de temps s'ils avaient eu la possibilité de faire leur palier à l'oxygène pur ?*

IV (6 points) :

Laetitia, Marc et Joëlle s'immergent à 12h00 sur un fond de 41 mètres. Ils font surface entre 12h45 et 12h50 (en fait 12h50 !). *Quelle est la durée de leur plongée sachant qu'ils ont fait plus de 15 minutes de palier ?* Ils replongent 5 heures plus tard sur 24 mètres. Au bout de 29 minutes, l'un des trois plongeurs effectuent une remontée rapide. La palanquée met alors 3 minutes pour remonter et rejoindre son premier palier. *Quelles sont la profondeur et la durée du ou des paliers à réaliser ? A quelle heure sortent-ils de l'eau (arrondir à la minute supérieure) ?*

2001 (Stéphan Jacquet)

I (4 points)

Agnès, Nicolas et David ont accepté une mission consistant à photographier une espèce rare, *Linlin couteus*, dans un lac de montagne situé à 1850 m. Ils trouvent l'animal à une profondeur de 24 m, profondeur lue sur leur ordinateur de dernière génération.

- ✓ Quelles sont la profondeur réellement atteinte, la durée de la plongée, la durée et la profondeur des paliers sachant que le temps total de la décompression est de 16,5 minutes et que les plongeurs commencent leurs paliers à 6m ?

Détaillez tous les calculs.

II (6 points)

Laure, Christine et John s'immergent à 12h00 : ils restent 22 min à 23 m puis remontent à 15 m pendant 18 min. Le but de cette plongée à niveaux multiples est d'étudier successivement deux biotopes distincts. Ils replongent à 21 m 4h après être sortis de l'eau de la première plongée. Au bout de 32 min, un des plongeurs effectue une remontée rapide ; l'ensemble de la palanquée met 3 min à partir du début de la remontée rapide pour atteindre le premier palier.

- ✓ Quelles sont pour chaque plongée la durée et la profondeur des paliers ?
- ✓ Quelle est la durée totale de la décompression (en incluant le premier palier) ?

Détaillez tous les calculs.

III (4 points)

Rappeler les procédures de décompression et de décompression pour des plongées à l'air comprimé (annexe 2 de l'arrêté du 15 mai 1992)

IV (1 point)

Que dit l'article 17 de l'instruction IGHS 98002 du CNRS à propos des ordinateurs de plongée ?

2000 (Stéphan Jacquet)

I (5 points)

Agnès, Alain et Christophe sortent de l'eau à 11h30. Ils ont effectué une plongée dont les paramètres sont pour la profondeur de 31 m et pour le temps de 24 min. Ils replongent 3 heures plus tard sur un fond de 23 m. Ils font 15 min de paliers à 3m avant de sortir de l'eau.

- ✓ Quelles sont la durée et la profondeur des paliers de la première plongée ?
- ✓ Quelles est la durée maximale possible de la deuxième plongée ?

Détaillez tous les calculs.

II (5 points)

Coralie, Laurent et Fred s'immergent dans un lac de montagne situé à 2050 m d'altitude. Leur ordinateur adaptatif dernière génération indique une profondeur de 27 m au fond.

- ✓ Quelles est la profondeur réelle ?
- ✓ Quelle est la profondeur équivalente ?
- ✓ Quelles sont la durée maximum de la plongée, la durée et la profondeur des paliers sachant que le temps total de décompression est de 16 min et 45 sec ?

III (10 points)

Deux palanquées, l'une avec Lionel, Olivier et Nicolas, l'autre avec Sébastien et François s'immergent à 9 h. Ils restent 12 min à 29 m puis remontent jusqu'à 14 m où ils restent 20 min. Il s'agit semble t-il d'une plongée à niveaux multiples ! Ce même jour, ils replongent à 12h35 sur un fond de 24 m. Au bout de 25 min, l'un des plongeurs effectue une remontée rapide. La palanquée concernée met exactement 3 min entre le départ de la remontée rapide et l'arrivée au premier palier.

- ✓ Quelles sont la durée et la profondeur des paliers de la première plongée, l'heure de sortie ?
- ✓ Quelles sont la durée et la profondeur des paliers de la deuxième plongée ?

Détaillez tous les calculs.

1999 (Stéphan Jacquet)

I (5 points)

Aline et Thierry terminent à 10h30 une plongée de 22 min à une profondeur de 30 m. Ils replongent le même jour à 14h30 sur un fond de 26 m pendant 30 minutes.

Quelles sont la durée et la profondeur des paliers des 2 plongées?

II (10 points)

Immersion à 10h00. Martin, Jean-Luc et Philippe restent 16 min à 30 m puis 19 min à 14 m. Il s'agit, semble t-il, d'une plongée à niveaux multiples ! Ces même plongeurs s'immergent à

nouveau à 13h45 à une profondeur de 22 m. Au bout de 30 min, l'un des trois effectue une remontée rapide. La palanquée met alors 3 min pour remonter et rejoindre son premier palier. *Quelles sont la durée et la profondeur des paliers éventuels de chaque plongée?*

III (5 points)

Jérôme et Pierre atteignent la profondeur de 24 m, indiquée par leur ordinateur dernière génération, dans un lac de montagne situé à 1650 m d'altitude. *Quelles sont la profondeur réelle atteinte, la durée de la plongée, la durée et la profondeur des paliers sachant que le temps total de décompression est de 11 min. et 30 sec?*

Solutions

2003

I

- Arrêté du 15 mai 1992 (annexe 2 en particulier)
- MT 92 (on dit aussi Comex Pro 92 pour les plaquettes immergeables)
- L'usage des ordinateurs est interdit sauf en tant que profondimètre

II

- 30m, 19 min : C1= 60 18m, 24 min : C2= 45
d'où C3= 105, T3= 50, et $P_{eq}= 21$ m. (3)
- Dans la table normale, on rentre avec $P= 21$ m et $T= 19+1+24= 44$ min.
Soit 21m, 45 min. : palier de 5 min. à 3m. (3)
- Heure sortie : 16h + 44 min + 1,15 + 5 min. = 16h 50 min 15 '' (1)
- Plongée à niveaux multiples (1)

III

- Plongée 1 dans la table : 33m 30 min, donc paliers de 3 min à 6m et 12 min à 3m
Intervalle = 3h30 Profondeur table de la plongée 2 = 24m majoration : 15 min
A 24m, on peut rester 25 min sans faire de palier, donc leur plongée ne pourra pas excéder 10 min avant de quitter le fond.
- Plongées successives

IV-

- Remontée rapide donc palier de 5 min à mi-profondeur (1)
- Durée de la plongée : 11 + 1 + 3 + 5 = 20 min (1)
- Profondeur du 1^{er} palier (mi-profondeur) : 18,5 m (1)
- Paramètres à considérer : 37m, 20 min soit dans la table 39m, 20 min : paliers de 3 min à 6m et 7 min à 3m (1)
- Heure sortie = 12h + 20 + 10 = 12h 30 (1)

2001

I

Préelle : 24 m

Péquiv : 33 m

Décompression de 24 à 6m : 1' 30''

Paliers : 3' à 6m, 12' à 3m

Durée de la plongée : 30'

II

1^{ère} plongée : C1=60, C2=30 donc C=90

durée de la plongée : 22+18=40'

prof à considérer dans la table : 24 m

palier de 7' à 3m

2^{ème} plongée : I=4h

Prof = 21 m don majo = 15'

Procédure : palier de 5' à 10,5 m

Durée totale de la plongée : 32+3+5+15=55'

Paliers pour 55' à 21m : 15' à 3m

Durée totale de la décompression : 5+15+0' 45'' = 20' 45''

III

Compression (descente) : Vmax < 30 m/min

Décompression (remontée) :

- Validité des tables : 0-300 m, si alt>300m, procédure plongée en altitude
- Définitions P et T
- Plongée yoyo interdite et 1 seule successive autorisée
- Tables définies pour des profondeurs allant de 3m en 3m par tranche de 104 au fond
- Vitesse de remontée : 9 à 15 m/min (12 m/min en moyenne)
- Paliers : la dernière minute sert à remonter au palier suivant, cumul des paliers de 3 et 6 m à 6m à l'oxygène pur
- Remontée rapide : 5' à mi-profondeur

IV

L'usage d'ordinateurs de plongée est interdit sauf en tant que profondimètres

2000

I

P1 : paliers de 3 min à 6 m et 7 min à 3m

Majo=20 min

Temps max possible : 30 min

II

Préelle= 27 m

Pequival = 42 m

Si on considère 15 min de palier (3 min à 6 m et 12 min à 3 m) avec une remontée entre 27 m et 6 m de 1 min 45, on a bien un temps total de décompression de 16 min et 45 sec, ce qui correspond à un temps max au fond de 20 min.

III

Temps total première plongée : 32 min

Péquival= 21 m

Pas de palier

HS1= 9h00 + 32 + 1 :15 = 9 :33 :15

Intervalle = 3 h 02

Majo= 15 min

Premier palier de 5 min à 12 m

Temps total de la seconde plongée à considérer : $25 + 15 + 3 + 5 = 48$ min à 24 m

Paliers : 15 min à 3 m

1999

I

5 min à 3 m

I = 4 h, P2=26 m

Majo=15 min

T2 = $30+15 = 45$ min

3 min à 6m, 15 min à 3 m

II

C1 = 60, C2 = 30,

C3 = 90 et T3 = 35 min

Peq = 24 m

5 min à 3 m

HS : $10h00+35+5+1=10h41$

$3 < I < 4$ h

Majo = 20 min

T2 = $30+20+3+5 = 58$ min

3 min à 6 m, 20 min à 3 m

III

24 m

Peq = 33 m

Avec un temps de plongée de 25 min à 33 m, on a 12 min et 15 sec de temps total de décompression avec 3 min à 6m, 7 min à 3m. Toutefois l'on ne remonte pas de 33 m mais de 24 m et le temps de remontée entre le fond et le premier palier à 6 m est donc de 1 min 30. Le temps total de décompression dans ce cas est donc de $1,5 + 3 + 7 = 11$ min et 30 sec.
