

Comprendre les M_values

Par Erik C. Baker, P.E.

(traduit de l'anglais par jean-marc belin: jmbelin@ifrance.com)

Allant de pair avec les tableaux de compartiments (ou tissus) hypothétiques, les calculs de saturation des gaz ainsi que les M-values composent la majeure partie des modèles Haldanien de dissolution des gaz. Avec l'avènement sur le marché de nombreux logiciels de décompression, les plongeurs Tek s'appuient sur ces modèles pour gérer leur décompression. Aussi, une bonne compréhension des M-values peut aider le plongeur à définir les facteurs de conservatisme appropriés et à évaluer les nombreux profils de décompression d'une plongée en particulier.

Que sont les M-values ? Le terme 'M-value' fut employé par Robert Workman dans le milieu des années 60 alors qu'il effectuait des recherches sur la décompression pour le compte de la NEDU (US Navy Experimental Diving Unit). Workman était docteur avec le rang de capitaine dans le corps médical de la U.S Navy.

Le «M» de M-value signifie Maximum. Pour une pression ambiante donnée, une M-value est définie comme étant la pression maximale qu'un compartiment (tissu) hypothétique peut supporter sans présenter de symptôme de la maladie de la décompression. Les M-values représentent la limite de l'écart toléré entre la pression du gaz inerte et la pression ambiante, et ce, pour chaque compartiment. En d'autres termes, les M-values sont 'des limites de surpression tolérée', 'tension critique', limite de sur-saturation'. Le terme M-value est communément utilisé par les concepteurs de logiciel de décompression.

Un peu d'histoire

Dans le modèle Haldanien de dissolution des gaz, les calculs de saturation de chaque compartiment (tissu) hypothétique sont comparés au 'critère limite de remontée' pour déterminer le profil de remonté en toute sécurité. Lorsque John S. Haldane a développé son modèle en 1908, le 'critère limite de remontée' était exprimé sous la forme d'un ratio de sursaturation. Par exemple, Haldane avait défini qu'un plongeur dont les tissus avaient été saturés en respirant de l'air à une profondeur de 10m, pouvait remonter directement à la surface (niveau de la mer) sans présenter de symptôme de la maladie de la décompression. Parce que la pression à 10m est double de celle du niveau de la mer, Haldane en avait conclu qu'un ratio de 2:1 comme surpression tolérable, pouvait être utilisée comme critère limite de la remontée. Ce critère approximatif fut utilisé par Haldane pour établir le premier jeu de tables de décompression. Dans les années suivantes et jusque

dans les années 60 d'autres ratios furent utilisés par de nombreux concepteurs, pour des compartiments de différentes périodes. La plupart des tables U.S Navy furent établies en utilisant cette méthode de ratio de sursaturation.

Cependant, un problème subsistait. La plupart des tables établies avec cette méthode devinrent inutilisables lorsque les plongées furent plus longues et plus profondes. Robert Workman passa systématiquement en revue les différents modèles de décompression en incluant le résultat des recherches qu'il avait préalablement effectuées pour le compte de l' U.S Navy. Il en tira plusieurs conclusions : en premier lieu, il remarqua que le ratio de 2 :1 qu'Haldane avait défini à l'origine (établi sur l'air) était en réalité un ratio de 1,58 :2. si on considérait uniquement la pression partielle du gaz inerte de l'air- l'azote. (à cette étape de la recherche sur la décompression, il était connu que l'oxygène n'était pas un facteur significatif de la MDD ; les coupables étaient les gaz inertes comme l'azote ou l'hélium). Dans sa quête sur la recherche de donnée, Workman découvrit que la limite de surpression tolérable était fonction des périodes des compartiments ainsi que de la profondeur. Les données montrèrent que les compartiments 'courts' tolèrent un ratio de surpression plus grand que les compartiments 'longs' et que, pour tous les compartiments, les ratios diminuent avec l'accroissement de la profondeur. *Aussi, au lieu d'utiliser des ratios, Workman décrivit les M-values comme étant la pression partielle maximale tolérable de l'azote et de l'hélium pour chaque compartiment et pour chaque profondeur.* Puis il fit une projection linéaire de ses M-values comme étant une fonction de la profondeur et il trouva que la droite était raisonnablement proche des données (ça collait bien) Il observa également que la représentation des M-values sous forme d'une équation de droite était pratique pour la programmation informatique.

Les M-values de R. Workman

La représentation des M-values de R. Workman, sous la forme d'une équation linéaire, fut une étape significative dans l'évolution des modèles de décompression des gaz dissous. Ses M-values établirent le concept d'une relation linéaire entre la pression due à la profondeur (ou pression ambiante) et la pression des gaz inertes tolérée dans chaque compartiment (tissu).

Ce concept est un élément primordial des modèles de dissolution des gaz d'aujourd'hui car il est utilisé par de nombreux concepteurs.

Workman exprima ses M-values sous la forme d'une pente issue de l'équation d'une droite (voir schéma n°1).

La valeur de surface fut désignée M_0 (prononcer M zéro). C'est la valeur de la M-value au point 'profondeur zéro' (donnée par le profondimètre au niveau de la mer). La pente de l'équation fut appelée ΔM (prononcer Delta M). Elle représente la variation des M-values en fonction des variations de pression dues à la profondeur.

Les M-value de A. Buhlmann

Le professeur Albert A. Buhlmann entreprit ses recherches sur la décompression en 1959 dans le laboratoire de physiologie hyperbarique de l'hôpital universitaire de Zurich en Suisse. Buhlmann poursuivit ses recherches pendant plus de 30 ans et apporta nombre de contributions dans le domaine de la décompression. En 1983 il publia la première édition (en allemand) de son fameux livre intitulé 'Décompression – maladie de la décompression'. Une traduction en anglais de ce livre fut publiée en 1984. L'ouvrage de Buhlmann fut la première référence quasi complète traitant des calculs de décompression, accessible à un large public de plongeurs. Ceci eut pour conséquence que l'algorithme Buhlmann devint la référence mondiale utilisée par la plupart des ordinateurs de plongée et des logiciels de plongée 'maison'.

Trois autres éditions de l'ouvrage furent publiées en allemand en 1990, 1993 et 1995 sous le nom Tauchmedizin ou 'Diving médecine' (une traduction anglaise de la 4^{ième} édition de l'ouvrage (1995) est en préparation pour publication).

La méthode Buhlmann pour le calcul de la décompression était similaire à celle que Workman avait établie. Ceci inclut l'expression des M-values sous la forme d'une relation linéaire entre la pression ambiante et la pression en gaz inerte tolérée dans les compartiments (tissus) hypothétiques. La principale différence entre les deux approches était que les M-values de Workman étaient basées sur la pression due à la profondeur (il

prenait en compte la plongée à partir du niveau de la mer), tandis que les M-values de Buhlmann étaient basées sur la pression absolue (pour la plongée en altitude). Ceci s'explique par le fait que Workman était impliqué dans les activités de plongée de l'U.S. Navy (probablement réalisées en mer), tandis que Buhlmann était concerné par les activités de plongée en altitude pratiquées dans les lacs de montagne Suisse.

Buhlmann publia deux jeux de M-values qui sont devenus très populaires dans les cercles de plongeurs ; le jeu ZH-L12 publié dans l'ouvrage de 1983, et le(s) jeu(x) ZH-L16 publié dans celui de 1990 et suivants. Dans ces désignations, le 'ZH' signifie 'Zurich' (pour la ville où il était domicilié), le 'L' signifie 'Limite' et les '12' ou '16' représentent le nombre de couples de coefficients établis pour le tableau des compartiments de chaque période, pour l'hélium et l'azote. Le jeu ZH-L12 possède douze paires de coefficient pour 16 compartiments de période différente et ces M-values furent déterminées de façon empiriques (d'après ce qu'on en sait aujourd'hui). Le jeu ZH-L16A possède seize paires de coefficients pour seize compartiments de période distinctes et ces M-values furent déduites mathématiquement à partir des périodes et à partir de la solubilité et des tolérances en sursaturation des gaz inertes. Le jeu ZH-L16A de l'azote est divisé en deux sous-jeux B et C car on a défini de façon empirique que le jeu A, qui avait été déduit mathématiquement, n'était pas suffisamment contraignant pour les compartiments moyens. La variante B (légèrement plus conservatrice) est préconisée pour le calcul de table, tandis que la variante C (encore un peu plus conservatrice) est préconisée pour l'utilisation des ordinateurs de plongée qui calculent en temps réel.

Les M-values de Buhlmann sont similaires aux M-values de Workman. Elles sont exprimées sous la forme d'une pente issue de l'équation d'une droite (voir figure n°1). Le coefficient a est l'intersection de la droite des M-values avec l'axe des ordonnées, donc pour la pression ambiante zéro (absolue). Et le coefficient b est l'inverse de la pente. [Note : le coefficient a ne signifie pas que l'être humain puisse supporter une pression absolue nulle : Ceci est simplement une extrapolation mathématique utilisée dans l'équation. La limite basse pour la pression ambiante, applicable aux M-values Buhlmann, est de l'ordre de 0,5 bars]

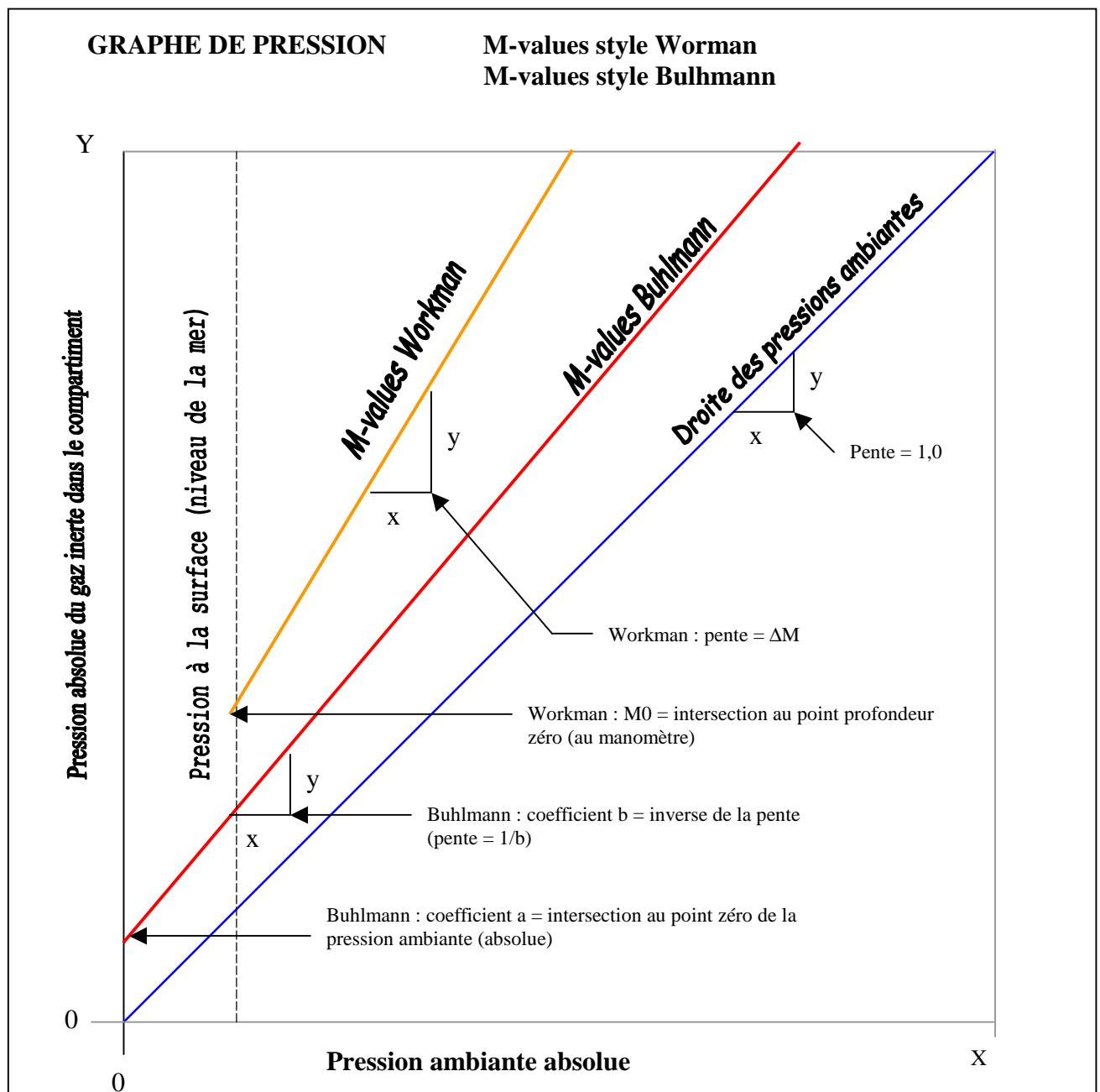


Figure 1

Les M-values DCAP et DSAT

Beaucoup de plongeurs tek reconnaîtront les jeux de M-values 11F6 du DCAP (Research Decompression Computation and Analysis Program) utilisées par Hamilton. Ce jeu, ou matrice, de M-values fut élaboré par le Dr. Bill Hamilton et ses collègues lors du développement de nouvelles tables de décompression à l'air établies pour le compte de la marine Suédoise. En plus de la plongée à l'air, les M-values 11F6 ont également bien fonctionnées pour les plongées au trimix. Elles

servent encore de bases à de nombreuses tables de décompression toujours en vigueur dans le monde des plongeurs techniques.

De nombreux plongeurs loisirs sont familiers des tables RDP (Recreational Dive Planner) diffusées par PADI (Professional Association of Diving Instructors). Les M-values utilisées par le RDP furent développées et testées par le Dr. Raymond E. Roger, Dr. Michael R. Powell et ses collègues avec le DSAT (Diving Science and Technology Corp., une association affiliée à PADI). Les M-values DSAT furent vérifiées de manière empirique sur un

large échantillon de plongées réelles et par monitoring Doppler.

Comparaisons de M-values

Les tables 1 à 4 présentent une comparaison de M-values établies pour l'azote et l'hélium, entre les différents algorithmes de décompression Haldaniens présentés dans cet article. Toutes les M-values sont représentées sous le format Workman. Il est évident qu'une évolution, ou ajustement des

M-values, a eu lieu entre l'époque Workman (1965) et Bulhmann (1990). La tendance générale va vers un léger conservatisme. Cette tendance est la conséquence de processus de validation plus intenses incluant l'utilisation de monitoring Doppler à ultrasons pour déceler et quantifier les bulles 'silencieuses' (bulles décelées dans la circulation mais qui ne sont associées à aucun symptôme manifeste de la maladie de la décompression)

M-values mathématiques		
Equations linéaire	$y = mx + b$	$x = (y - b) / m$
Style Workman	$M = \Delta M * Prof. + M_0$	Prof. Tolérée = $(P - M_0) / \Delta M$
Style Bulhmann	$P_{t.tot} \text{ i.g.} = (P_{amb.} / b) + a$	$P_{amb.tol} = (P_{t.i.g.} - a) * b$
Workman vers Bühlmann	← Conversion →	Bühlmann vers Workman
$a = M_0 - \Delta M * P_{amb.}$ (surface, niveau de la mer)		$M_0 = a + P_{amb.}$ (surface, niveau de la mer) / b
$b = 1 / \Delta M$		$\Delta M = 1 / b$

Uniformité des M- Values

L'observation que l'on peut faire, en comparant les M-values des divers algorithmes, est qu'il n'y a pas de grandes différences entre elles.

En d'autres termes, il apparaît une certaine cohérence entre les valeurs établies par les différents chercheurs autour du globe.

Ceci est bon signe car cela indique que la science a déterminé un seuil relativement uniforme concernant les symptômes de la maladie de la décompression parmi la population humaine.

Formalisme des M-Values

Les M-Values sont souvent exprimées sous la forme d'une équation linéaire comme dans le style Workman ou Buhlmann. Cette forme est idéale pour la programmation informatique car elle permet de calculer les M-Values en continu, comme il se doit. La forme linéaire permet également l'affichage des M-Values sur le graphe des pressions.

Les M-Values peuvent aussi être exprimées sous la forme d'une matrice ou tableau.

Cette disposition en lignes et colonnes représente simplement des valeurs de M-Values pré-calculées pour chaque compartiment et chaque profondeur. Ce formalisme est très pratique pour établir des analyses et des comparaisons détaillées. Certains des premiers ordinateurs de plongées et logiciels informatiques utilisaient le format « tableau » pour

« surveiller » les M-Values durant le processus de calcul.

<u>Définitions Workman</u>
P = pression du gaz inerte (absolue) dans le compartiment
M = pression tolérée du gaz inerte (absolue) dans le compartiment hypothétique
Prof. = pression à la profondeur lue au manomètre, mesurée à partir du niveau de la mer
Prof. Tolérée = = pression tolérée à la profondeur lue au manomètre, mesurée à partir du niveau de la mer
M ₀ = intersection à la poondeur zéro ; valeur de la M_value au niveau de la mer
ΔM = pente de la droite des M_values
<u>Définitions Buhlmann</u>
P _{t.tot} i.g. = = pression tolérée du gaz inerte (absolue) dans le compartiment hypothétique
P _{t.i.g} = = pression du gaz inerte (absolue) dans le compartiment
P _{amb.} = pression ambiante (absolue)
P _{amb.tol} = pression ambiante tolérée (absolue)
a = intersection à la pression ambiante zéro (absolue)
b = inverse de la pente des M_values

Table 1 : Comparaison des M-values de l'azote pour les différents algorithmes de décompression Haldaniens																				
Système d'unité de pression Américain – feet of sea water (fsw)																				
Workman M-values (1965)				Bulmann ZH-L12 M-values (1983)				DSAT RDP M-values (1987)			DCAP MF11F6 M-value (1986)				Bulmann ZH-L16 M-values (1990)					
Cpt N°	Per. min	M ₀ fsw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ fsw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ fsw	Cpt N°	Per. min	M ₀ fsw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	A M ₀ fsw	B M ₀ fsw	C M ₀ fsw	ΔM pente
				1	2,65	111,9	1,2195													
1	5	104	1,8					1	5	99,08	1	5	31,90	1,30	1	4,0	106,4	106,4	106,4	1,9082
2	10	88	1,6	2	7,94	89,1	1,2195	2	10	82,63	2	10	14,65	1,05	1b	5,0	97,3	97,3	97,3	1,7928
				3	12,2	75,2	1,2121								2	8,0	83,2	83,2	83,2	1,5352
3	20	72	1,5	4	18,5	68,8	1,1976	3	20	66,89					3	12,5	73,8	73,8	73,8	1,3847
				5	26,5	63,5	1,1834	4	30	59,74	3	25	19,04	1,08	4	18,5	66,8	66,8	66,8	1,2780
4	40	56	1,4	6	37	57,3	1,1628	5	40	55,73					5	27,0	62,3	62,3	60,8	1,2306
				7	53	53,2	1,1494	6	60	51,44	4	55	14,78	1,06	6	38,3	58,5	57,4	55,6	1,1857
5	80	54	1,3	8	79	51,9	1,1236	7	80	49,21					7	54,3	55,2	54,1	52,3	1,1504
								8	100	47,85	5	95	13,92	1,04	8	77,0	52,3	51,7	50,1	1,1223
6	120	52	1,2	9	114	51,9	1,1236	9	120	46,93					9	109	49,9	49,9	48,5	1,0999
7	160	51	1,15	10	146	50,2	1,0707	10	160	45,78	6	145	13,66	1,02	10	146	48,2	48,2	47,2	1,0844
8	200	51	1,1	11	185	50,2	1,0707	11	200	45,07	7	200	13,53	1,01	11	187	46,8	46,8	46,1	1,0731
9	240	50	1,1	12	238	47,3	1,0593	12	240	44,60					12	239	45,6	45,6	45,1	1,0635
				13	304	42,6	1,0395				8	285	13,50	1,0	13	305	44,5	44,1	44,1	1,0552
				14	397	42,6	1,0395	13	360	43,81	9	385	13,50	1,0	14	390	43,5	43,5	43,1	1,0478
				15	503	42,6	1,0395	14	480	43,40	10	520	13,40	1,0	15	498	42,6	42,6	42,4	1,0414
				16	635	42,6	1,0395				11	670	43,5	1,0	16	635	41,8	41,8	41,8	1,0359

Cpt : Compartiment Per. : Période M₀ : M-value en surface (niveau de la mer = 1atm = 33fsw = 1,01325bar) ΔM : pente de la droite M-values

Table 2 : Comparaison des M-values de l'azote pour les différents algorithmes de décompression Haldaniens																				
Système d'unité de pression européen – mètre of sea water (msw)																				
Workman M-values (1965)				Bulmann ZH-L12 M-values (1983)				DSAT RDP M-values (1987)			DCAP MF11F6 M-value (1986)				Bulmann ZH-L16 M-values (1990)					
Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ mw	Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	A M ₀ msw	B M ₀ msw	C M ₀ msw	ΔM pente
				1	2,65	34,2	1,2195													
1	5	31,7	1,8					1	5	30,42	1	5	31,90	1,30	1	4,0	32,4	32,4	32,4	1,9082
2	10	26,8	1,6	2	7,94	27,2	1,2195	2	10	25,37	2	10	14,65	1,05	1b	5,0	29,6	29,6	29,6	1,7928
				3	12,2	22,9	1,2121								2	8,0	25,4	25,4	25,4	1,5352
3	20	21,9	1,5	4	18,5	21,0	1,1976	3	20	20,54					3	12,5	22,5	22,5	22,5	1,3847
				5	26,5	19,3	1,1834	4	30	18,34	3	25	19,04	1,08	4	18,5	20,3	20,3	20,3	1,2780
4	40	17,0	1,4	6	37	17,4	1,1628	5	40	17,11					5	27,0	19,0	19,0	18,5	1,2306
				7	53	16,2	1,1494	6	60	15,79	4	55	14,78	1,06	6	38,3	17,8	17,5	16,9	1,1857
5	80	16,4	1,3	8	79	15,8	1,1236	7	80	15,11					7	54,3	16,8	16,5	15,9	1,1504
								8	100	14,69	5	95	13,92	1,04	8	77,0	15,9	15,7	15,2	1,1223
6	120	15,8	1,2	9	114	15,8	1,1236	9	120	14,41					9	109	15,2	15,2	14,7	1,0999
7	160	15,5	1,15	10	146	15,3	1,0707	10	160	14,06	6	145	13,66	1,02	10	146	14,6	14,6	14,3	1,0844
8	200	15,5	1,1	11	185	15,3	1,0707	11	200	13,84	7	200	13,53	1,01	11	187	14,2	14,2	14,0	1,0731
9	240	15,2	1,1	12	238	14,4	1,0593	12	240	13,69					12	239	13,9	13,9	13,7	1,0635
				13	304	12,9	1,0395				8	285	13,50	1,0	13	305	13,5	13,4	13,4	1,0552
				14	397	12,9	1,0395	13	360	13,45	9	385	13,50	1,0	14	390	13,2	13,2	13,1	1,0478
				15	503	12,9	1,0395	14	480	13,33	10	520	13,40	1,0	15	498	12,9	12,9	12,9	1,0414
				16	635	12,9	1,0395				11	670	13,30	1,0	16	635	12,7	12,7	12,7	1,0359

Cpt : Compartiment Per. : Période M₀ : M-value en surface (niveau de la mer = 10msw = 1,0bar) ΔM : pente de la droite des M-values

Particularités des M-Values

On peut classer les jeux de M-Values en 2 catégories : les jeux pour « plongées sans décompression » et les jeux pour « plongées avec décompression »

Les M-Values pour plongées sans décompression sont seulement les valeurs de surface ; Les M-Values RDP DSAT en sont un exemple.

C'est intentionnellement qu'aucun profil de remontée avec palier n'a été conçu, aussi la charge en gaz, calculée pour les compartiments, ne doit pas excéder les M-Values de surface.

Ceci permet de remonter à la surface à n'importe quel moment de la plongée. Il existe des algorithmes « sans décompression » qui tiennent compte des vitesses de descente et de remontée dans leurs calculs. Les M-Values « avec décompression » sont caractérisées par les coefficients de pente, qui déterminent la variation des M-Values avec la modification de la pression ambiante.

La valeur de la pente dépend de la période du compartiment « tissu » hypothétique.

Table 3 : Comparaison des M-values de l'hélium pour les différents algorithmes de décompression Haldaniens											
Système d'unité de pression américain – feet of sea water (fsw)											
Workman M-values (1965)				Bulhmann ZH-L12 M-values (1983)				Buhlmann ZH-L16A M-values (1990)			
Cpt N°	Per. min	M ₀ fsw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ fsw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ fsw	ΔM pente
				1	1,0	111,9	1,2195	1	1,51	134,5	2,3557
				2	3,0	89,1	1,2195	1b	1,88	121,9	2,0964
1	5	86	1,5	3	4,6	75,2	1,2121	2	3,02	102,5	1,7400
				4	7,0	68,8	1,1976	3	4,72	89,4	1,5321
2	10	74	1,4	5	10	63,5	1,1834	4	6,99	79,7	1,3845
				6	14	57,3	1,1628	5	10,21	73,6	1,3189
3	20	66	1,3	7	20	53,2	1,1494	6	14,48	68,2	1,2568
				8	30	51,9	1,1236	7	20,53	63,7	1,2079
4	40	60	1,2	9	43	51,9	1,1236	8	29,11	59,8	1,1692
				10	55	52,4	1,0799	9	41,20	57,1	1,1419
5	80	54	1,2	11	70	52,4	1,0799	10	55,19	55,1	1,1232
				12	90	52,4	1,0799	11	70,69	54,0	1,1115
6	120	54	1,2	13	115	52,4	1,0799	12	90,34	53,3	1,1022
				14	150	52,4	1,0799	13	115,29	53,1	1,0963
7	160	54	1,1	15	190	52,4	1,0799	14	147,42	52,8	1,0904
				16	240	5,4	1,799	15	188,24	52,6	1,0850
8	200	53	1,0					16	240,03	52,3	1,0791
9	240	53	1,0								

Cpt : Compartiment **Per.** : Période **M₀** : M-value en surface (niveau de la mer = 1atm = 33 fsw = 1,01325 bars) **ΔM** : pente de la droite M-values

En général, les compartiments courts ont une pente plus importante que les compartiments longs. Ces compartiments tolèrent une plus grande surpression que les compartiments plus lents. Si la pente est supérieure à 1,0, alors la droite des M-Values s'écarte de la droite des pressions du graphe et le compartiment acceptera une surpression de plus en plus importante avec l'accroissement de la profondeur.

Une droite avec une pente de 1,0 signifie que le compartiment tolérera le même écart de surpression indépendamment de la profondeur.

Table 4 : Comparaison des M-values de l'hélium pour les différents algorithmes de décompression Haldaniens											
Système d'unité européen – meters of sea water (msw)											
Workman M-values (1965)				Bulhmann ZH-L12 M-values (1983)				Buhlmann ZH-L16A M-values (1990)			
Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente
				1	1,0	34,2	1,2195	1	1,51	41,0	2,3557
				2	3,0	27,2	1,2195	1b	1,88	37,2	2,0964
1	5	26,2	1,5	3	4,6	22,9	1,2121	2	3,02	31,2	1,7400
				4	7,0	21,0	1,1976	3	4,72	27,2	1,5221
2	10	22,5	1,4	5	10	19,3	1,1834	4	6,99	24,3	1,3845
				6	14	17,4	1,1628	5	10,21	22,4	1,3189
3	20	20,1	1,3	7	20	16,2	1,1494	6	14,48	20,8	1,2568
				8	30	15,8	1,1236	7	20,53	19,4	1,2079
4	40	18,3	1,2	9	43	15,8	1,1236	8	29,11	18,2	1,1692
				10	55	15,9	1,0799	9	41,20	17,4	1,1419
5	80	17,0	1,2	11	70	15,9	1,0799	10	55,19	16,8	1,1232
				12	90	15,9	1,0799	11	70,69	16,4	1,1115
6	120	16,4	1,2	13	115	15,9	1,0799	12	90,34	16,2	1,1022
				14	150	15,9	1,0799	13	115,29	16,1	1,0963
7	160	16,4	1,1	15	190	15,9	1,0799	14	147,42	16,1	1,0904
				16	240	15,9	1,0799	15	188,24	16,0	1,0850
8	200	16,1	1,0					16	240,03	15,9	1,0791
9	240	16,1	1,0								

Cpt : Compartiment **Per.** : Période **M₀** : M-value en surface (niveau de la mer = 10msw = 1,0 bars) **ΔM** : pente de la droite M-values

Dans tous les cas, la valeur de la pente ne peut jamais être inférieure à 1,0. Autrement la droite des M-Values passerait sous la droite des pressions ambiantes en un point donné et ceci traduirait une situation illogique où le compartiment ne supporterait même pas la pression ambiante.

La droite des pressions ambiantes

Sur le graphe des pressions, la droite des pressions ambiantes est de première importance. Passant par l'origine, elle a une pente de 1,0 et représente simplement l'ensemble des points dont la charge des compartiments en gaz inerte, est égale à la pression ambiante. Ceci est très important car,

quand la valeur du compartiment en charge de gaz, passe au dessus de la droite des pressions ambiantes, il se crée un écart de surpression. Une droite de M_value représente la limite établie pour un écart de surpression admissible, au dessus de la droite des pressions ambiantes.

La zone de décompression

Sur le graphe des pressions, la zone de décompression est la région comprise entre la droite des pressions ambiantes et celle des M_values. Dans le contexte du modèle de gaz dissous, cette zone représente la surface fonctionnelle où prend place la décompression. En théorie, un compartiment nécessite un écart positif au dessus de la pression ambiante pour 'dégazer'. Bien qu'il y aient des cas, comme lorsqu'on a un mélange à fort taux d'oxygène, où un compartiment sera capable de dégazer même si la pression partielle du gaz inerte est inférieure à la pression ambiante.

Un profil de décompression efficace est caractérisé par la valeur de charge du compartiment directeur qui se situe dans la zone de décompression. Les valeurs de charge en gaz des différents compartiments vont se trouver tantôt dans la zone de décompression et tantôt en dehors (en dessous), selon le compartiment qui dirige, ou qui contrôle, la décompression à un moment donné. Généralement, les compartiments courts seront les premiers à être directeurs et à entrer dans la zone de décompression (la valeur de charge en gaz sera proche de la M_value), tandis que les compartiments plus longs contrôleront le reste de la décompression à tour de rôle.

Plusieurs gaz inertes

Lorsqu'il y a plusieurs gaz inertes, les modèles actuels de dissolution des gaz utilisent un concept qui stipule que la pression totale en gaz inertes dans un compartiment (tissu) hypothétique, est la somme des pressions partielles de chaque gaz présent dans le compartiment, même si chacun des différents gaz inertes possède une période différente pour ce compartiment.

Les algorithmes de décompression aux mélanges doivent composer avec plus d'un gaz inerte présent dans le mélange respiratoire, comme l'hélium et l'azote pour le trimix. Pour ces situations, les algorithmes appréhendent les M-values de manière différentes. Certains utilisent les mêmes M-values, à la fois pour l'azote et pour l'hélium; habituellement les valeurs sont basées sur les M-values de l'azote.

Dans l'algorithme Buhlmann, on calcule une M-value intermédiaire qui tient compte des M-values distinctes de l'azote et de l'hélium, ainsi que de la proportion de ces gaz inertes présents dans le compartiment.

Dans l'équation linéaire des M_values, le coefficient a (He + N2) et le coefficient b (He + N2) sont calculés au prorata des pressions partielles de l'hélium (PHe) et de l'azote (PN2) comme suit :

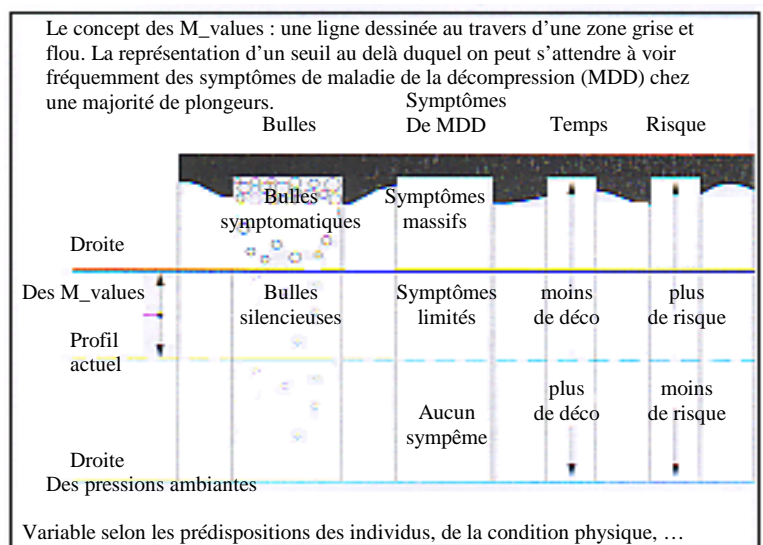
$$a(\text{He} + \text{N}_2) = [a(\text{He}) * \text{PHe} + a(\text{N}_2) * \text{PN}_2] / [\text{PHe} + \text{PN}_2]$$

$$b(\text{He} + \text{N}_2) = [b(\text{He}) * \text{PHe} + b(\text{N}_2) * \text{PN}_2] / [\text{PHe} + \text{PN}_2]$$

Que représentent les M-values ?

Certains plongeurs pensent, à tort, que les M-values représentent une limite bien définie entre 'avoir un bends' et 'ne pas avoir de bends'. Ceci pourrait expliquer pourquoi certains plongeurs poussent systématiquement aux limites de leurs tables ou ordinateur. L'expérience de la médecine de plongée a montré que les limites établies (M-values) sont parfois inadéquates. Le degré d'inadéquation semble varier selon les individus et selon les situations. C'est pourquoi il semble plus approprié de décrire une M-value comme étant une ligne dessinée au travers d'une zone grise et flou. Pour expliquer ce manque de précision, il faut invoquer la complexité de la physiologie humaine, les différences entre individus et les facteurs de prédisposition face à la maladie de la décompression.

Cependant, il faut reconnaître que les modèles de dissolution des gaz appliqués à la plongée ont bien fonctionnés et que les connaissances de base continuent de progresser. Par exemple : on pensait à l'origine, que tous les gaz inertes devaient rester dissous en solution, et que la moindre bulle était prémisses de MDD. Cependant, nous savons aujourd'hui qu'il y a présence de bulle même lors d'une plongée ne présentant aucun symptôme. La réalité est qu'il y a une combinaison de 2 facteurs lors de la plongée : la plupart des gaz inertes sont en solution, et une petite partie de ces gaz inerte se trouve en dehors de la solution sous forme de bulle.



Ainsi, une M_value ne représente pas seulement un écart de surpression acceptable, mais également un nombre de bulles tolérable. Les M_values ont été validées de manière empirique, ceci signifie que les jugements sur la décompression actuelle, sont le résultat de projets menés sur des sujets humains. Ces tests ont été réalisés sur un échantillon relativement restreint d'individus sensés représenter une population de plongeurs la plus large possible. Bien que l'on ait des données fiables à propos des seuils approximatifs d'apparition de la MDD, ce processus ne peut prédire avec exactitude, ni garantir un seuil absolu, pour chacun d'entre nous. De plus, nous savons par expérience que certains facteurs prédisposent à la maladie de la décompression : le manque de condition physique, l'obésité, la fatigue, les drogues et l'alcool, la déshydratation, la persistance du foramen ovalé, etc. Les susceptibilités individuelles peuvent également varier d'une journée à l'autre.

M_value et conservatisme

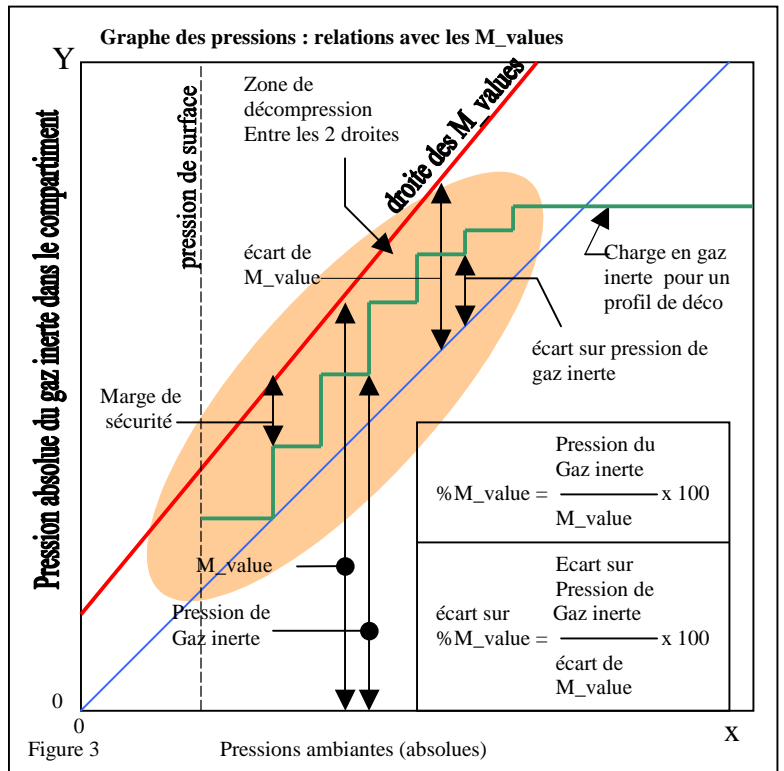
Les M_values sont associées à des symptômes limités, s'il y en a, et un niveau de risque raisonnablement faible. Cependant, certains plongeurs peuvent ne pas trouver ces critères tout à fait acceptables. Lorsqu'il faut attaquer son profil de décompression, de nombreux plongeurs souhaiteraient se trouver dans la zone 'sans symptôme' et 'très faible risque'. Heureusement les concepteurs et programmeurs de 'décompression' ont bien compris que des calculs basés sur les seules M_values ne peuvent pas produire des tables suffisamment fiables pour tous les individus en toutes circonstances. C'est pourquoi les programmes de décompression permettent d'introduire des notions de conservatisme dans leurs calculs.

Certaines méthodes consistent à augmenter la proportion du gaz inerte utilisée dans les calculs, d'autres appliquent une marge de sécurité basée sur la profondeur en utilisant une profondeur instantanée plus grande que la profondeur réelle, d'autres encore calculent un temps de plongée supérieur au temps réel, alors que d'autres ajustent les périodes pour prendre en compte dans le dégazage, le fait que la charge/décharge est asymétrique (la décharge est plus

lente). Certains programmes utilisent même une combinaison de ces méthodes. Ces méthodologies sont efficaces lorsqu'elles sont correctement appliquées. Au travers de l'expérience personnelle et de l'aboutissement des profils précédents, les plongeurs jugent le degré d'efficacité du nouveau profil de décompression en ces termes : 'combien de temps en plus', 'quelle profondeur supplémentaire'.

Relations complémentaires aux M_values

Quelques relations fondamentales impliquant les M_values et les calculs de décompression sont indiquées sur le graphe des pressions en figure 3.



Le calcul de pourcentage de M_value a été utilisé par différents concepteurs de décompression au fil des années. Par exemple, le professeur Buhlmann évaluait beaucoup de ses essais sur la décompression, sous la forme de pourcentage de M_value et il reportait les données telles quelles dans son livre.

L'écart de pourcentage de M_value (ou gradient), mesure jusqu'où un profil de décompression est entré dans la zone de décompression. Un écart de 0% de M_value se situe sur la droite de pression ambiante et représente le bas de la zone de décompression. Un écart de 100% de M_value se situe sur la droite des M_values et représente le sommet de la zone de décompression.

Analyse des profils

De nombreux plongeurs aimeraient connaître précisément quels sont les effets des facteurs de conservatisme programmés dans leurs ordinateurs. Ils sont conscient qu'en augmentant les facteurs de conservatisme, les profils deviennent plus profonds et plus longs, mais ils souhaitent avoir des informations plus fondamentales.

Les deux notions de pourcentage de M_value et de gradient de M_value sont utilisées pour l'analyse et l'évaluation des profils de décompression. En utilisant un même jeu de M_values, différents profils peuvent être évalués en s'appuyant sur des bases cohérentes. Ceci inclus la comparaison de profils générés par des programmes, algorithmes et modèles de décompression complètement différents.

Valeurs de référence universelles

Les M_values Buhlmann ZH-L16 sont employées dans la plupart, si ce n'est tous, les programmes informatiques de décompression. Ces M_values furent développées et testées pour des expositions

couvrant une large gamme de pressions ambiantes ; de la plongée en haute altitude jusqu'aux plongées profondes en mer. Utilisées avec un conservatisme approprié, elles ont prouvées leur fiabilité dans le cadre de la plongée technique (si tant soit peut que quelque chose puisse être fiable dans un monde de sciences inexactes). Elles sont devenues de facto un standard mondial qui peut servir de valeur de référence universelle pour la comparaison et l'évaluation des profils de décompression.

C'est une tâche relativement aisée pour un programmeur que d'inclure les calculs de pourcentage de M_value et de gradient de M_value pour un profil de décompression donné, puis de mettre sommairement en forme les résultats. La table 5 en est un exemple. Elle montre les effets des facteurs de conservatisme utilisés dans un programme commercial de décompression disponible sur le marché. Avec un facteur de conservatisme de 0%, le profil décompression est dans la gamme des 90% de M_value et il est entré d'environ 70% dans la zone de décompression (70% d'écart de M_value).

Table 5 : effets des facteurs de conservatisme utilisés par un programme commercial du marché, sur des profils de décompression

Référence : M_values Buhlmann ZH-L16 (ZH-L16A Hélium, ZH-L16B Azote) Plongée au trimix 15/40 (15% O ₂ / 40% He) à 63m pendant 30 minutes Mélanges déco : nitrox 36% à 33m, 100% O ₂ à 6m											
Facteur de conservatisme de 0%				Facteur de conservatisme 50%				Facteur de conservatisme 100%			
déco stop (msw)	Run time (min)	Maximum* % m_value (cpt n°)	Maximum* d'écart % m_value (cpt n°)	déco stop (msw)	Run time (min)	Maximum* % m_value (cpt n°)	Maximum* d'écart % m_value (cpt n°)	déco stop (msw)	Run time (min)	Maximum* % m_value (cpt n°)	Maximum* d'écart % m_value (cpt n°)
33	36	85,8% (4)	59,4% (4)	35	35	81,6% (4)	47,0% (3)	41	35	74,3% (4)	29,3% (3)
				33	38	84,5% (4)	55,7% (4)	38	37	76,0% (4)	31,0% (3)
				30	39	79,0% (5)	39,4% (4)	35	40	77,4% (4)	33,9% (4)
27	38	89,0% (4)	69,3% (4)	27	41	82,1% (5)	46,0% (4)	33	43	77,6% (4)	35,5% (4)
24	41	89,5% (5)	69,1% (4)	24	45	83,2% (5)	49,1% (5)	30	45	75,4% (5)	22,6% (4)
21	44	88,3% (5)	65,6% (5)	21	49	82,2% (6)	42,5% (5)	27	49	76,5% (6)	26,3% (5)
18	48	89,8% (6)	67,2% (6)	18	55	83,2% (6)	45,1% (6)	24	53	76,3% (6)	20,3% (5)
15	55	91,1% (6)	72,2% (6)	15	64	83,1% (7)	44,1% (6)	21	58	77,0% (6)	22,1% (6)
12	64	90,3% (7)	67,2% (7)	12	75	83,1% (7)	42,8% (7)	18	68	78,2% (7)	24,9% (6)
9	79	90,7% (7)	70,7% (7)	9	95	84,5% (8)	46,0% (7)	15	78	76,9% (7)	17,6% (7)
6	94	90,9% (8)	70,7% (8)	6	113	84,2% (9)	47,1% (8)	12	96	78,4% (8)	22,5% (7)
3	119	91,1% (9)	72,2% (9)	3	144	85,8% (10)	51,7% (10)	9	124	78,3% (8)	22,4% (8)
0	120	93,6% (11)	80,2% (11)	0	145	88,6% (12)	62,6% (12)	6	147	78,9% (9)	24,4% (9)
								3	189	81,2% (11)	32,6% (10)
								0	190	84,9% (13)	46,6% (13)

* à l'arrivée au palier

Il est évident que ce programme utilise de base un niveau de conservatisme car aucune des valeurs n'atteint 100%. Avec 50% de facteur de conservatisme (ce qui est recommandé dans le manuel de l'utilisateur), le profil est dans la gamme des 85% de M_value et il rentre approximativement de 40-50% dans la zone de décompression. Avec un facteur de conservatisme de 100%, le profil est dans la gamme de 77% de M_value et il rentre approximativement de 20-35% dans la zone de décompression ; Notez que les valeurs données dans la table 5 correspondent à l'arrivée aux paliers respectifs, ce qui est le pire des cas. Sur le graphe des pressions, ceci correspond aux sommets des marches du profil de charge en gaz (voir l'exemple de la figure 3). Quel que soit le profil, les valeurs calculées les plus élevées se trouvent en arrivant à la surface, ce qui illustre bien le fait qu'il est toujours prudent d'adopter une vitesse finale de remontée très lente entre le dernier palier et la surface.

Marge de sécurité

En utilisant un jeu de M_values ainsi que les variables qu'on peut en déduire, les plongeurs peuvent déterminer des limites personnelles de décompression qui seront à la fois bien établies et transposables. La marge de sécurité sélectionnée dépendra des prédispositions de l'individu ainsi que des profils de ses expériences passés. Une évaluation honnête de sa propre forme est toujours nécessaire pour établir un profil de décompression de plongée. Par exemple, l'auteur/plongeur (un employé de bureau) a choisi une limite personnelle de 85% de M_value et 50-60% pour l'écart de pourcentage de M_value pour les plongées type trimix.

Pour assurer une marge de sécurité suffisante, un profil de décompression peut être directement calculé à partir d'un écart de pourcentage de M_value pré-déterminé. L'avantage de cette approche est de pouvoir s'appliquer à toute la gamme des pressions ambiantes et permet d'avoir un contrôle total sur le profil résultant.

A propos de l'auteur

Erik C. Baker est un ingénieur en électricité. Il possède une entreprise d'Engineering et architecture. Il poursuit ses recherches sur la décompression et la physiologie en plongée comme un passe temps., et il a développé plusieurs programmes informatiques en Fortran pour le calcul et l'analyse de la décompression.

Erik possède des qualifications en plongée souterraine et plongée trimix.

Bibliographie

Bennett PB, Elliott DH, eds. 1993. The Physiology and Medicine of diving. London: WB Saunders.

Boycott AE, Damant GCC, Haldane JS. 1908. The prevention of compressed air illness. J Hyg (London) 8:342-443

Buhlmann, AA.
1984. Decompression-Decompression Sickness. Berlin: Springer-Verlag

Hamilton RW, Muren A, Rockert H, Omhagen H. 1988. Proposed new Swedish air decompression tables. In: Shields TG, ed. XIV Annual Meeting of the EUBS. European Undersea Biomedical Society. Aberdeen: National Hyperbaric Center.

Hamilton RW, Roger RE, Powell MR, Vann RD. 194. Development and validation of no-stop decompression procedures for recreational diving: The DSAT Recreational Dive Planner. Santa Ana, CA. Diving Science and Technology Corp.

Schreiner HR, Kelley PL. 1971. A pragmatic view of decompression. In: Lamberstsen CJ, ed. Underwater physiology IV. New York: Academic Press.

Wienke BR. 1984. Basic diving physics and applications. Flagstaff, AZ: Best.

Workman RD. 1965. Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives. Research report 6-65. Washington: Navy Experimental Diving Unit.

Workman RD. 1969. American decompression theory and practice. In: Bennett PB, Elliott DH, eds. The physiology and medicine of diving and compressed air work. London: Bailliere, Tindall & Cassell.x