

COMMISSION TECHNIQUE REGIONALE

Procédures de décompression des plongées Trimix
Utilisation des logiciels

Mémoire présenté dans le cadre du stage d'instructeur régional

Juin 2002

Jean-Marc ROBERT

Sommaire

1. Introduction	Page 2
2. De nombreux éléments en présence	Page 3
3. La théorie des « M-values »	Page 4
4. La théorie du « volume critique des bulles »	Page 9
5. Les limites des logiciels	Page 11
6. Les applications	Page 12
7. Références	Page 16

1. Introduction

Il suffit de prononcer le mot « TEK » dans une assemblée de plongeurs pour immédiatement susciter moult réactions des plus diverses. De la crainte à la vantardise, en passant par la curiosité et le constat d'ignorance, ce monde étrange ne laisse pas indifférent.

De fait, il s'agit bien plus que d'une simple spécialité permettant une activité subaquatique en se suffisant d'une formation classique de plongeur. La formation Tek (de technique, mais écrit de façon stylisée) se distingue par une offre complète de spécialisations permettant d'appréhender des matériels, des techniques et des procédures nouvelles, dans le but de s'approprier de nouveaux environnements de plongée. Ainsi, il est possible de rester plus longtemps dans le milieu, grâce aux vêtements étanches et au nitrox, de s'aventurer dans des lieux clos, dans des épaves, sous la glace ou en grotte, fort des techniques spéléo, d'aller plus profond à l'aide de mélanges respirables adéquats comme le trimix. Il existe même des techniques permettant de plonger seul ! (Avec une assistance et une organisation sans faille !). De quoi retrouver les sensations de la découverte et donner le goût de l'aventure.

Dans l'imaginaire du plongeur loisir, les « Tekkys » sont référencés dans la catégorie des bricoleurs têtes brûlés, limites suicidaires. Pourtant, les matériels utilisés et les formations dispensées sont au service de la sécurité et d'un plus grand confort. Par exemple, une plongée sur épave à 50 m peut se planifier avec de l'air et en combinaison humide, organisation presque banale, ou avec un mélange ternaire plus décompression nitrox et en vêtement sec. C'est nettement moins classique et pourtant le confort et la sécurité y ont gagné.

Le trimix est à l'heure actuelle le parent pauvre de ces formations. Il souffre d'un problème crucial : l'apport d'un autre gaz neutre implique l'utilisation de tables de décompression spécifiques. Au-delà des problèmes techniques incidents, il existe une vraie barrière psychologique. Les sacro-saintes procédures de déco sont à revoir ! De plus, il existe plusieurs procédures, selon le format (papier ou informatique) et selon le modèle théorique. On connaît bien sa bonne vieille table, même si on l'utilise peu. On ne sait pas bien comment fonctionne son ordinateur de plongée, mais on en a l'habitude et c'est bien pratique de ne plus planifier. Mais planifier sur un ordinateur de bureau, avec x paramètres modifiables, des plongées avec un gaz bizarre...

En reprenant les modèles et les logiciels couramment utilisés, je me propose d'avoir une approche plus didactique qu'un mode d'emploi. Le plongeur doit y trouver le moyen de déterminer les facteurs de conservatisme appropriés et la gestion des paramètres en fonction des profils et des conditions particulières. Ce n'est pas un cours sur le trimix. Notons qu'actuellement il n'existe pas de cursus de formation fédéral pour l'emploi de tels mélanges. Ces programmes ne sauraient donc servir de support pour l'organisation de plongées trimix, ni de formation au sein des clubs. Il s'agit donc plus de la découverte et de l'analyse d'un nouvel outil, qui sera peut-être un jour intégré à nos usages.

2. De nombreux éléments en présence

Il existe une grande variabilité des paramètres dans la plongée trimix. L'arrêté 2000 relatif à la plongée aux mélanges autres que l'air impose de diminuer le taux d'azote au-delà de 60 m, et limite la profondeur à 120 m. Cependant, un trimix convient tout à fait dès 50 m et des tables existent jusqu'à 150 m ; ce qui implique des choix multiples de proportions des gaz. D'autre part, le plongeur peut être amené à utiliser plusieurs mélanges au cours de son immersion. Dans le cas d'une plongée profonde à plus de 80 m, le mélange fond est hypoxique en surface. Il lui faudra donc respirer des gaz propres à la descente, au fond et à sa décompression plus au moins optimisée.

Ces paramètres sont pris en compte par des algorithmes différents selon les théories de décompression utilisées. Et dans une même théorie, des facteurs complémentaires et la précision des calculs amènent à des résultats différents. Ce phénomène est connu de tous les plongeurs autonomes et est accepté. Deux ordinateurs de plongée de marques distinctes ou de même marque mais de modèles différents ne donnent pas des résultats identiques. Pour certains, il est de plus possible de faire varier des valeurs initiales, comme des échelles de conservatisme ou la quantité de micro-bulles acceptables. Ainsi, on constate de petits écarts à l'issue de plongées à l'air simples, écarts qui se creusent avec les plongées successives.

Bien sûr, il existe des tables papier pour le trimix (C.G. Doris, TDI, IANTD, Ministère du Travail...). Mais comme toutes, elles sont peu flexibles dans leurs procédures. Les mélanges sont définitivement fixés tant pour la plongée que pour la décompression. Ne s'adaptant pas au profil, le calcul sur des paramètres maximums devient extrêmement pénalisant pour des plongées longues et profondes, mais pas forcément carrées.

Il convient donc d'accepter que la multiplicité des paramètres amène à des procédures de décompression variables, selon les choix du plongeur. On comprend dès lors la nécessité sécuritaire de connaître les modèles et leurs outils de calcul.

3. La théorie des « M-values »

Que sont les « M-values » ? Ce terme fut utilisé par Robert D. Workman dans le milieu des années 60, alors qu'il faisait des recherches pour l'U.S. Navy Experimental Diving Unit (NEDU). Workman était un médecin avec le grade de Capitaine dans le corps médical de l'armée américaine.

Le « M » signifie « Maximum ». Pour une pression ambiante donnée, une M-value est définie comme la valeur maximum de la tension d'un gaz inerte qu'un compartiment tissulaire théorique peut tolérer sans présenter de symptômes d'un accident de décompression. Les M-values représentent le gradient admissible entre la tension du gaz inerte et la pression ambiante dans chaque compartiment. Les autres termes utilisés pour M-values sont « limites de surpression tolérables », « tensions critiques » et « limites de sursaturation ». Le terme M-value est communément utilisé par les concepteurs de modèles de décompression.

Dans le modèle de décompression « haldanien », le calcul de chargement du gaz dans chaque compartiment tissulaire théorique est comparé à un « critère limite de remontée ». Dans les premières années de ce modèle, initié par John S. Haldane en 1908, le critère limite de remontée était exprimé sous la forme d'un ratio, le coefficient de sursaturation critique. Par exemple, Haldane trouva que les plongeurs dont les « tissus » étaient saturés en respirant de l'air à une profondeur de 33 pieds (10 m) pouvaient directement rejoindre la surface (en mer) sans déclencher d'accident de décompression. Comme la pression ambiante à 33 pieds est 2 fois supérieure à celle de la surface de la mer, Haldane conclut qu'un ratio de 2:1 de surpression pouvait être utilisé comme critère limite de remontée. Ce ratio fut employé par Haldane pour développer les premières tables de décompression. Plus tard, et surtout à partir des années 60, d'autres ratios furent utilisés par divers concepteurs, pour différents compartiments périodiques. La plupart des tables de décompression de l'U.S. Navy furent calculées par la méthode du coefficient de sursaturation critique.

Cependant, beaucoup de ces tables ainsi conçues se révélèrent insuffisantes pour des plongées plus longues et plus profondes. Robert Workman commença une étude systématique des modèles de décompression, incluant les précédentes recherches de l'U.S. Navy. Il aboutit à plusieurs conclusions importantes. Tout d'abord, il redéfini le ratio original d'Haldane de 2:1 (basé sur l'air) comme étant réellement un ratio de 1,58:1 si l'on considère seulement la pression partielle du gaz inerte – l'azote. Dans ses recherches, Workman trouva que le « ratio tissulaire » pour la surpression admissible variait selon les compartiments périodiques et selon la profondeur. Ses données montrèrent que les compartiments périodiques les plus rapides toléraient un ratio plus important que les moins rapides, et que pour chaque compartiment, le ratio devenait moindre en augmentant la profondeur. Ainsi, toujours en utilisant les ratios, Workman décrit la pression partielle maximum admissible de l'azote et de l'hélium pour chaque compartiment à chaque profondeur comme « M-value ». Ensuite, il fit une projection linéaire de ses M-values en fonction des profondeurs et valida les résultats par rapport aux données disponibles. Il observa que « *une projection linéaire des M-values est utilisable pour un programme correcte sur ordinateur* ».

La présentation des M-values sous la forme d'une équation linéaire fut une étape significative dans l'évolution des modèles de décompression. Elle introduit le concept d'une relation linéaire entre la pression ambiante et la tension tolérable de gaz inerte dans chaque compartiment tissulaire. Ce concept est un élément important des modèles actuels, appliqué par une grande variété de concepteurs.

Workman exprime ses M-values sous la forme d'une pente d'une équation linéaire (voir Figure 1). Sa valeur de surface est désignée par M_0 . C'est la valeur au croisement de l'équation linéaire et de la pression au niveau de la mer. La pente de l'équation linéaire est désignée par ΔM et représente le changement de M-value en fonction du changement de la pression ambiante.

Le professeur Albert A. Bühlmann commença des recherches sur la décompression en 1959 dans le laboratoire de physiologie hyperbare à l'hôpital universitaire de Zürich, en Suisse. Bühlmann continua ses travaux durant 30 ans et apporta de nombreuses contributions à l'étude de la

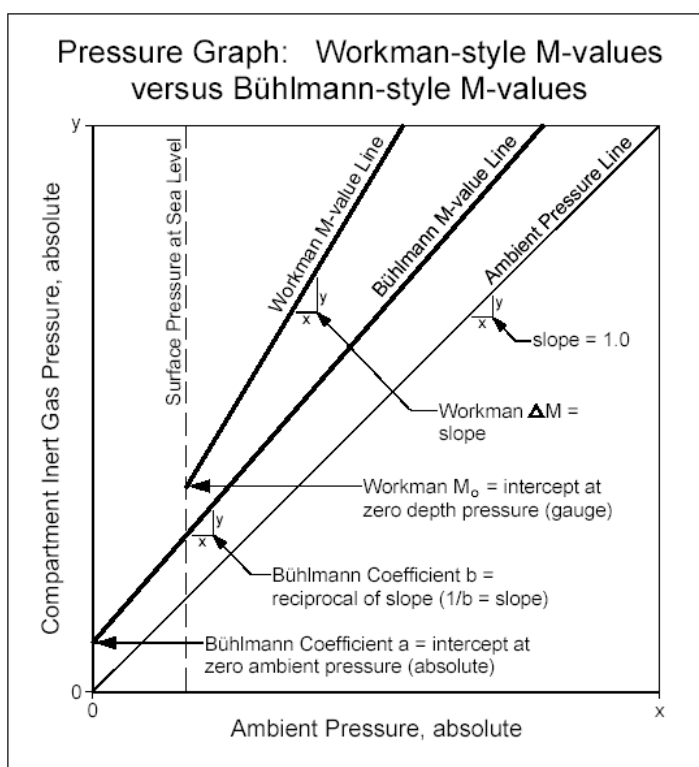


Figure 1

décompression. En 1983, il publie *Decompression – Decompression Sickness*, traduit en Anglais l'année suivante. Son livre fut la première référence pour les calculs de décompression accessible aux plongeurs grand public. Le résultat fut que les « algorithmes de Bühlmann » devinrent la base de la majorité des ordinateurs de plongée et des logiciels « do-it-yourself » des ordinateurs de bureau.

La méthode de Bühlmann pour les calculs de décompression est similaire à la description de Workman. Elle inclut des M-values, lesquelles représentent une relation linéaire entre la pression ambiante et la tension admissible de gaz inerte dans des tissus périodiques. La principale différence entre les deux approches réside dans le fait que les M-values de Workman sont établies à partir du niveau de la mer, tandis que Bühlmann les base sur la pression absolue, ce qui permet de calculer des décompressions en altitude sans extrapoler. Cela prend tout son sens du fait que Workman s'intéressait aux activités de plongée de l'U.S. Navy, a priori au niveau de la mer, tandis que Bühlmann était concerné par les activités de plongée dans les lacs des montagnes suisses.

Bühlmann publia 2 séries de M-values, qui sont devenues les plus connues des cercles de plongeurs. La série ZH-L₁₂ (publication 1983) et les séries ZH-L₁₆ (publications 1990 et suivantes). La désignation « ZH » signifie Zürich, « L » pour linéaire et « 12 » ou « 16 » représentent le nombre de paires de coefficients (M-values) pour l'ensemble des compartiments périodiques, pour l'hélium et l'azote. La série ZH-L₁₂ comporte 12 paires de coefficients pour 16 compartiments périodiques et ses M-values ont été déterminées empiriquement. La série ZH-L_{16A} comporte 16 paires de coefficients pour 16 compartiments périodiques et ses M-values sont déterminées mathématiquement. Notamment, la série pour l'hélium a été calculée en fonction du rapport de la vitesse de diffusion He/N₂ (2,645) pour les périodes des compartiments et en fonction du rapport de solubilité N₂/He (1,383) pour les M-values. C'est une extrapolation mathématique. Cette série a ensuite été déclinée en sous-séries B et C, car l'évaluation empirique de la série A montra qu'elle n'était pas assez conservatrice pour les compartiments périodiques moyens. La série B est prévue pour le

calcul des tables et la série C (plus conservatrice) est prévue pour être utilisée dans les ordinateurs immergeables, qui calculent en temps réel.

Similaires aux M-values de Workman, celles de Bühlmann sont représentées sous la forme d'une pente d'une équation linéaire (voir Figure 1). Le coefficient **a** est le croisement avec le zéro de la pression ambiante (pression absolue) et le coefficient **b** est la réciproque de la pente. Bien entendu, le coefficient **a** n'implique pas que le plongeur puisse atteindre la pression absolue zéro ! C'est simplement un paramètre mathématique pour l'équation. La limite basse de la pression absolue dans l'application des M-values de Bühlmann est de l'ordre de 0,5 bar.

Il existe deux autres modèles connus et basés sur la méthode des M-values : La série 11F6 utilisée par le Dr Bill Hamilton et coll. dans le cadre de ses recherches « Decompression Computation and Analysis Program » (DCAP) pour la marine suédoise et la Recreational Dive Planner (RDP) distribuée par PADI, développée et testée par les Dr Raymond E. Rogers, Michael R. Powell et coll., avec la Diving Science and Technology Corp. (DSAT). Ces modèles de décompression ont été développés uniquement pour des plongées à l'air et pour la DSAT, pour des plongées sans décompression. Ils ne nous intéressent donc pas dans le cadre de la plongée trimix.

Les tableaux suivants présentent une comparaison des M-values pour l'azote et l'hélium entre les différents algorithmes de décompression. Toutes les M-values sont présentées au format de Workman.

Workman M-values (1965)		Bühlmann ZH-L ₁₂ M-values (1983)				DSAT RDP M-values (1987)			DCAP MM11F6 M-values (1988)				Bühlmann ZH-L16 M-values (1990)								
Cpt No.	HT min	M ₀ msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M ₀ msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M ₀ msw	Cpt No.	HT min	M ₀ msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M ₀ msw	M ₀ msw	M ₀ msw	M ₀ msw	ΔM slope
				1	2.65	34.2	1.2195								1	4.0	32.4	32.4	32.4	32.4	1.9082
1	5	31.7	1.8					1	5	30.42	1	5	31.90	1.30	1b	5.0	29.6	29.6	29.6	29.6	1.7928
2	10	26.8	1.6	2	7.94	27.2	1.2195	2	10	25.37	2	10	24.65	1.05	2	8.0	25.4	25.4	25.4	25.4	1.5352
				3	12.2	22.9	1.2121								3	12.5	22.5	22.5	22.5	22.5	1.3847
3	20	21.9	1.5	4	18.5	21.0	1.1976	3	20	20.54					4	18.5	20.3	20.3	20.3	20.3	1.2780
				5	26.5	19.3	1.1834	4	30	18.34	3	25	19.04	1.08	5	27.0	19.0	19.0	18.5	18.5	1.2306
4	40	17.0	1.4	6	37	17.4	1.1628	5	40	17.11					6	38.3	17.8	17.5	16.9	16.9	1.1857
				7	53	16.2	1.1494	6	60	15.79	4	55	14.78	1.06	7	54.3	16.8	16.5	15.9	15.9	1.1504
5	80	16.4	1.3	8	79	15.8	1.1236	7	80	15.11					8	77.0	15.9	15.7	15.2	15.2	1.1223
								8	100	14.69	5	95	13.92	1.04	9	109	15.2	15.2	14.7	14.7	1.0999
6	120	15.8	1.2	9	114	15.8	1.1236	9	120	14.41											
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	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	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	13.7	1.0635
				13	304	12.9	1.0395				8	285	13.50	1.0	13	305	13.5	13.4	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	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	12.9	1.0414
				16	635	12.9	1.0395								16	635	12.7	12.7	12.7	12.7	1.0359
											11	670	13.30	1.0							

Cpt = Compartment HT = Half-time M₀ = Surfacing M-value (sea level = 10 msw = 1.0 bar) ΔM = slope of M-value line

Une évolution et une précision dans les M-values sont évidentes entre Workman (1965) et Bühlmann (1990). La tendance générale a tendu vers plus de conservatisme. Cette tendance est le reflet de procédures de validations par la méthode empirique et inclut l'utilisation de détecteurs à ultrason Doppler pour repérer et quantifier la présence de « bulles silencieuses », c'est à dire présentes dans la circulation mais non associées à un accident de décompression.

Cependant, on constate une certaine constance entre les valeurs des différents modèles à travers le monde. C'est le signe d'un aboutissement de cette méthode et d'une méthodologie de recherche et de compilation des symptômes des accidents de décompression à travers la population.

Une mauvaise conception chez les plongeurs est que les M-values représentent une limite rigide entre avoir un accident ou ne pas en avoir. Cela pourrait expliquer pourquoi certains poussent régulièrement les limites de leur table ou de leur ordinateur de plongée. La médecine de plongée a montré que l'établissement de

limites est parfois inadéquat. Ce degré d'inadéquation dépend de paramètres individuels et environnementaux, les fameux facteurs favorisants. Il est plus approprié de parler de limite tracée à travers une zone de risques (voir Figure 2).

Puisque la limite des M-values ne peut garantir à elle seule qu'il n'y aura jamais d'accident de décompression, beaucoup de plongeurs souhaiteraient obtenir des procédures personnalisables, offrant le niveau le plus bas de risques. Les concepteurs en sont bien conscients, mais ils ne peuvent évidemment pas proposer des tables pour tous les individus et tous les scénarios. C'est pourquoi les programmes de

**Table 4: Comparison of M-values for Helium
Between Various Haldanian Decompression Algorithms**
European System of Pressure Units - meters of sea water (msw)

Workman M-values (1965)				Bühlmann ZH-L ₁₂ M-values (1983)				Bühlmann ZH-L16A M-values (1990)			
Cpt No.	HT min	M ₀ msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M ₀ msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M ₀ msw	ΔM slope
				1	1.0	34.2	1.2195	1	1.51	41.0	2.3557
								1b	1.88	37.2	2.0964
				2	3.0	27.2	1.2195	2	3.02	31.2	1.7400
1	5	26.2	1.5	3	4.6	22.9	1.2121	3	4.72	27.2	1.5321
				4	7.0	21.0	1.1976	4	6.99	24.3	1.3845
2	10	22.5	1.4	5	10	19.3	1.1834	5	10.21	22.4	1.3189
				6	14	17.4	1.1628	6	14.48	20.8	1.2568
3	20	20.1	1.3	7	20	16.2	1.1494	7	20.53	19.4	1.2079
				8	30	15.8	1.1236	8	29.11	18.2	1.1692
4	40	18.3	1.2	9	43	15.8	1.1236	9	41.20	17.4	1.1419
				10	55	15.9	1.0799	10	55.19	16.8	1.1232
5	80	17.0	1.2	11	70	15.9	1.0799	11	70.69	16.4	1.1115
				12	90	15.9	1.0799	12	90.34	16.2	1.1022
6	120	16.4	1.2	13	115	15.9	1.0799	13	115.29	16.1	1.0963
7	160	16.4	1.1	14	150	15.9	1.0799	14	147.42	16.1	1.0904
8	200	16.1	1.0	15	190	15.9	1.0799	15	188.24	16.0	1.0850
9	240	16.1	1.0	16	240	15.9	1.0799	16	240.03	15.9	1.0791

Cpt = Compartment HT = Half-time ΔM = slope of M-value line
M₀ = Surfacing M-value (sea level = 10 msw = 1.0 bar)

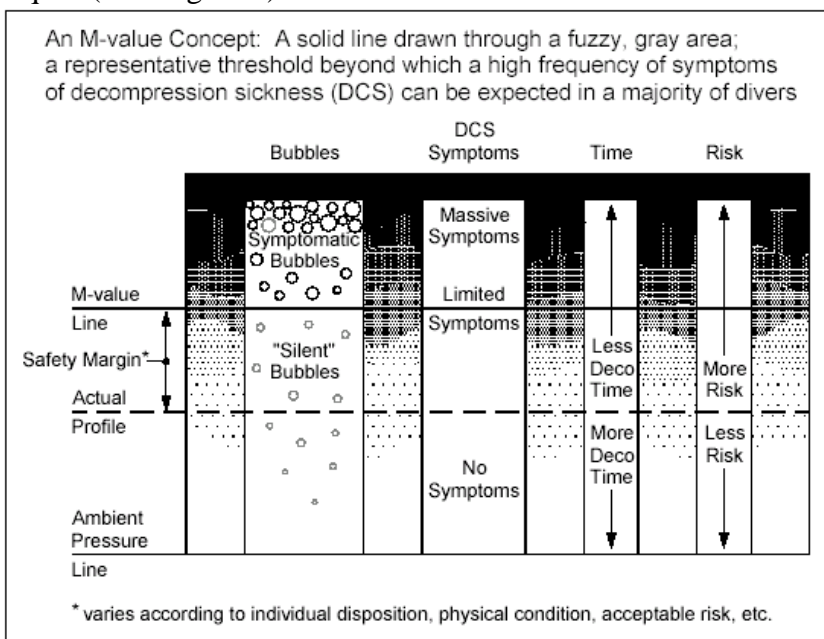


Figure 2

décompression ont introduit du conservatisme dans leurs calculs.

Certaines méthodologies consistent à appliquer une marge de sécurité en calculant plus profond que la réalité ou plus longtemps que la durée effective de plongée, ou encore en considérant une désaturation asymétrique (plus lente). Certains programmes utilisent ces méthodes combinées. Le degré « d'efficacité » de ces modes de conservatisme est habituellement évalué par le plongeur en terme de temps et de profondeur du profil de décompression par rapport à celui initial et à travers l'expérience individuelle. Une méthode

utilisée par nombre de concepteurs, dont Bühlmann, consiste à appliquer un pourcentage à la ligne des M-values, correspondant à son positionnement dans la zone de décompression.

La série ZH-L16 est la plus employée dans les logiciels de décompression pour ordinateur de bureau. Ces M-values ont été développées et testées tant pour des plongées en altitude que pour des plongées profondes. Utilisées avec un conservatisme approprié, elles ont montré leur fonctionnalité pour la plongée tek. Elles sont devenues de facto une référence universelle pour la comparaison et l'évaluation des profils de décompression.

Il est relativement aisé pour les programmeurs d'inclure un pourcentage de conservatisme. La table 5 est un exemple qui montre l'effet du facteur de conservatisme dans un logiciel commercial disponible tournant sur un ordinateur de bureau. On y remarque une marge de

0% Conservatism Factor				50% Conservatism Factor				100% Conservatism Factor			
Deco Stop (fsw)	Run Time (min)	Maximum * % M-value (Cpt No.)	Maximum * % M-value Gradient (Cpt No.)	Deco Stop (fsw)	Run Time (min)	Maximum * % M-value (Cpt No.)	Maximum * % M-value Gradient (Cpt No.)	Deco Stop (fsw)	Run Time (min)	Maximum * % M-value (Cpt No.)	Maximum * % M-value Gradient (Cpt No.)
								140	35	74.3% (4)	29.3% (3)
								130	37	76.0% (4)	31.0% (3)
				120	35	81.6% (4)	47.0% (3)	120	40	77.4% (4)	33.9% (4)
110	36	85.8% (4)	59.4% (4)	110	38	84.5% (4)	55.7% (4)	110	43	77.6% (4)	35.5% (4)
				100	39	79.0% (5)	39.4% (4)	100	45	75.4% (5)	22.6% (4)
90	38	89.0% (4)	69.3% (4)	90	41	82.1% (5)	46.0% (4)	90	49	76.5% (6)	26.3% (5)
80	41	89.5% (5)	69.1% (4)	80	45	83.2% (5)	49.1% (5)	80	53	76.3% (6)	20.3% (5)
70	44	88.3% (5)	65.6% (5)	70	49	82.2% (6)	42.5% (5)	70	58	77.0% (6)	22.1% (6)
60	48	89.8% (6)	67.2% (6)	60	55	83.2% (6)	45.1% (6)	60	68	78.2% (7)	24.9% (6)
50	55	91.1% (6)	72.2% (6)	50	64	83.1% (7)	44.1% (6)	50	78	76.9% (7)	17.6% (7)
40	64	90.3% (7)	67.7% (7)	40	75	83.1% (7)	42.8% (7)	40	96	78.4% (8)	22.5% (7)
30	79	90.7% (7)	70.7% (7)	30	95	84.5% (8)	46.0% (7)	30	124	78.3% (8)	22.4% (8)
20	94	90.9% (8)	70.7% (8)	20	113	84.2% (9)	47.1% (8)	20	147	78.9% (9)	24.4% (9)
10	119	91.1% (9)	72.2% (9)	10	144	85.8% (10)	51.7% (10)	10	189	81.2% (11)	32.6% (10)
0	120	93.6% (11)	80.2% (11)	0	145	88.6% (12)	62.6% (12)	0	190	84.9% (13)	46.6% (13)

* Upon Arrival at the Stop

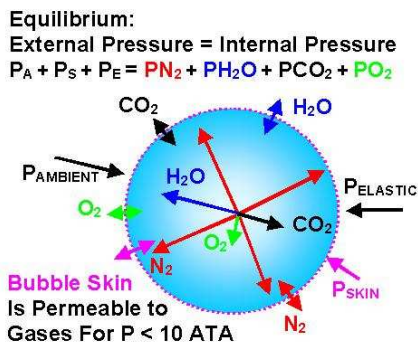
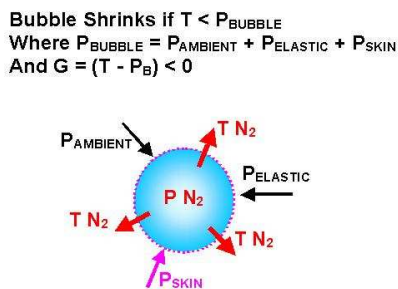
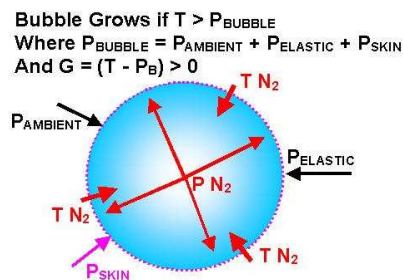
sécurité initiale, puisque avec un facteur de conservatisme de 0%, le maximum de %M-value plafonne à 93,6%.

Ainsi, les plongeurs peuvent déterminer des limites personnelles de décompression. La marge de sécurité dépendra des dispositions individuelles et de l'expérience avec le profil.

4. La théorie du « volume critique des bulles »

Récemment, certains plongeurs ont commencé à augmenter la profondeur de leur premier palier, au-delà des indications de leurs tables ou ordinateur de plongée. Dans ce cas, les arrêts profonds sont typiquement utilisés pour modifier les tables conventionnelles, utilisant les techniques décrites par Richard Pyle : les « Pyle-stops ». Pour ces remontées sophistiquées, cette récente adaptation des procédures de décompression naît de la génération des tables personnalisées, conduites avec la mesure du temps et de la profondeur plutôt qu'avec un ordinateur au poignet.

Bien que des ordinateurs basés sur l'extension de Bruce Wienke (1991) du modèle de Yount et Hoffman (Varying Permeability Model –VPM 1986) soient récemment devenus disponibles pour des calculs de décompression de plongées aux mélanges en temps réel, peu de plongeurs possèdent des tables ou des logiciels basés sur le VPM, également appelé le modèle hawaïen de la « bulle minuscule » (tiny bubble model). Le modèle initial fut développé par les chercheurs de l'université de Hawaï, et incorporait naturellement des paliers profonds dans les profils de remontées. La méthode de décompression VPM a été calibrée pour produire des temps de remontée comparables aux tables de l'U.S. Navy des années 80, et sont de fait significativement accélérés par rapport aux calculs basés sur Bühlmann.



Le « modèle de perméabilité variable » (VPM) a été développé à partir d'observations de laboratoire de formation et de croissance des bulles dans des modèles expérimentaux (gélatine) et in vivo. Bien que le VPM original soit considéré comme ancien par les spécialistes de la médecine hyperbare, la durée importante entre sa formulation et la sortie publique a laissé les plongeurs suivre les anciens modèles physiques.

Le VPM présume que des vides microscopiques, des cavités, des noyaux, existent dans l'eau et les tissus qui contiennent de l'eau, avant le début de la plongée. Tout noyau plus gros qu'une taille critique, en relation avec la profondeur de la plongée (pression d'exposition), grandira avec la décompression. Le VPM aspire à réduire au minimum le volume total des ces bulles grandissantes, en gardant la pression extérieure importante et la pression partielle des gaz inertes inspirés basse durant la décompression.

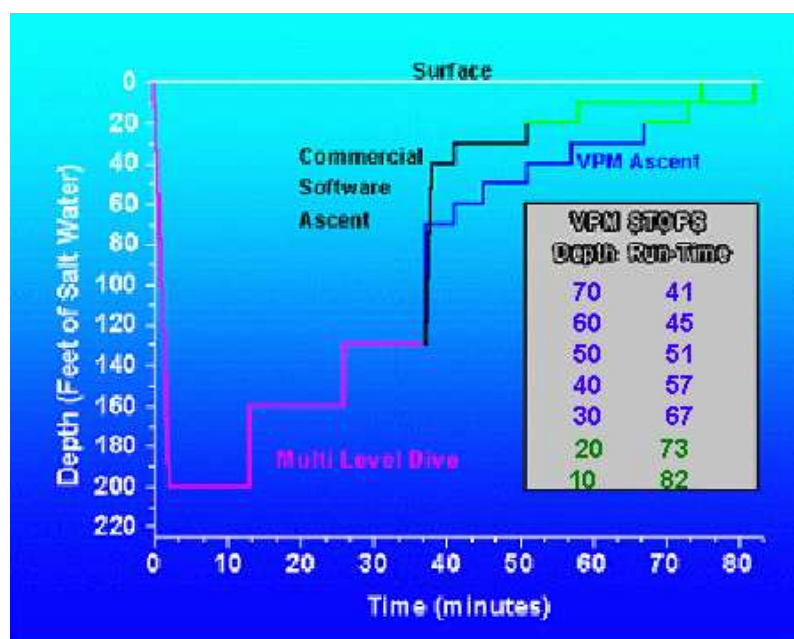
Bien que les temps totaux de décompression aient été « forcés » de correspondre à ceux de l'U.S. Navy, beaucoup de ce temps de décompression est réalisé plus profond. C'est un élément considéré comme conservateur. Cependant, il eut mieux valu pour Yount et Hoffman se caler sur Bühlmann pour le conservatisme. En effet, les paramètres initiaux donnent une courbe de sécurité semblable à la sienne et un temps total de décompression entre lui et l'U.S. Navy.

VPM Air Diving No-Stop Times											
Dive Depth (ft)	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
No-Stop Time(min)	76	46	32	25	20	16	14	12	10	9	8

Une différence fondamentale entre les algorithmes VPM et de sursaturation critique est que le programme utilise un calcul itératif. A chaque étape, un nouveau calcul complet de décompression est effectué. Le temps total de décompression est repris dans le calcul pour réviser les gradients critiques et produire une décompression optimisée. La répétition de ce processus jusqu'au temps de décompression converge vers ce qui est supposé correspondre au maximum de production de bulles de gaz neutre admissibles.

Les programmes VPM considèrent la charge et la décharge de gaz de manière identique aux programmes néo-haldanien. Mais la décompression est dirigée par la croissance des bulles inévitablement produites. Tant que le volume de ces bulles est inférieur à un « volume critique », le corps du plongeur est supposé les tolérer. En prenant le volume des bulles comme élément directeur de la remontée, les paliers commencent plus profond et le temps du dernier palier est plus court.

En résumé, dans le modèle de sursaturation critique, la procédure consiste à remonter « le plus rapidement possible » jusqu'au premier palier, déterminé par le gradient maximum admissible, de façon à



charger le gaz neutre le plus près de la surface. Ce principe impose un dernier palier long. Initialement, il ne tient pas compte des micro-bulles. Il a été montré depuis que le risque d'accident s'accroît avec la quantité de micro-bulles produites. Ainsi, le modèle s'est complété avec le principe du conservatisme et plus récemment en y adjoignant des « pyle-stops ». Le modèle VPM, quant à lui, peu être assimilé à une décompression en continue. Finalement, la succession de

paliers courts, débutant plus profond, décrit une remontée lente et une décompression en continue. De plus, en s'intéressant directement à la cause de l'accident (les bulles), ce modèle se targue de pouvoir gérer tout type de profils, y compris inversés.

5. Les limites des logiciels

Les 2 modèles semblent incompatibles. Ainsi, en ajoutant des paliers profonds dans un calcul de décompression haldanien, le modèle continue de charger les compartiments les plus longs. Le dernier palier s'allonge en conséquence. Pour peu que l'on y introduise le principe de désaturation asymétrique, le temps total de décompression peut devenir extrêmement long. Y gagne-t-on en sécurité ? Pas si sûr. On sait que les compartiments les plus longs n'ont d'existence que pour le calcul de désaturation de surface, en vue de plongées successives. Leur tendance à l'allongement répond au principe de conservatisme imposé par le besoin sécuritaire des fabricants d'ordinateurs immergeables, dans le cadre de plongées multiples. D'autre part, augmenter le temps total d'immersion a des conséquences : Exposition au froid et plus généralement aux dangers du milieu, besoins supplémentaires en gaz respirables. La multiplicité des paramètres et les possibilités de modifications peuvent dénaturer un modèle. Notamment, certains logiciels permettent d'intervenir sur les constantes (M-values, périodes...), alors qu'elles répondent à une logique d'ensemble.

Une autre limite concerne les changements de mélanges gazeux au cours de la plongée. Les différents gaz neutres vont alors diffuser (en charge ou en décharge) à des vitesses différentes, selon la loi de Graham. Ce phénomène, appelé contre-diffusion isobarique, n'est pas pris en compte par les logiciels, qui calculent l'état de saturation de chaque gaz de façon indépendante. Le tableau suivant montre l'effet de la contre-diffusion entre différents gaz.

de	Changement de gaz vers	Ratio de tension maximum	Génération de bulles
Hélium	Azote	0.861	Non
Hydrogène	Azote	0.890	Non
Argon	Azote	1.015	Non
Néon	Hydrogène	0.939	Non
Néon	Hélium	0.978	Non
Azote	Hydrogène	1.076	Très peu
Hydrogène	Hélium	1.080	Très peu
Azote	Hélium	1.139	Oui
Azote	Néon	1.160	Oui
Argon	Hélium	1.123	Oui

Si l'on passe d'un gaz léger à un gaz lourd, on se trouve en situation de contre-diffusion sous-saturante. Dans le cas contraire, on se trouve en sursaturation par le cumul des 2 gaz, avec production de bulles. Ainsi, lors d'une remontée, on délaisse le trimix au bénéfice d'un nitrox, favorisant la désaturation de l'hélium et profitant des bénéfices de l'oxygène. En cas de problème durant la décompression, il ne faut pas reprendre son mélange fond, au risque de créer des bulles. Il existe également un risque au niveau de l'oreille, dans la mesure où l'oreille moyenne est riche en hélium. De ce fait, en changeant de gaz, l'hélium peut diffuser dans les liquides de l'oreille interne, qui eux se chargent d'azote, et donc créer une sursaturation. Il est donc conseillé d'utiliser des nitrox plutôt que de l'air en décompression et d'effectuer des « rinçages » de l'oreille moyenne, par des déglutitions au palier.

Il est fort probable que dans un proche avenir, les logiciels intègrent ces paramètres et leurs limites.

6. Les applications

Les premiers paramètres à introduire sont les constantes personnelles. On y trouve notamment les limites de pression pour l'oxygène et pour l'azote (Maximum END = profondeur équivalente narcotique). Cela servira pour le choix des mélanges et évitera les erreurs liées à la toxicité de ces gaz. Pour l'aide au calcul des quantités de gaz, on peut paramétrer sa consommation durant la plongée et durant la décompression.

Tous les logiciels donnent la possibilité de personnaliser les résultats de la décompression, en modifiant le conservatisme, en choisissant une série de M-values, en incluant des paliers profonds, en définissant les vitesses de remontées, en jouant sur la précision des calculs, etc., selon évidemment le modèle de base utilisé. Certains incluent des paramètres individuels, comme

l'expérience, l'âge, le sexe..., qui influent automatiquement sur le conservatisme. Le tableau du haut est basé sur le modèle de Bühlmann, tandis que celui en dessous est basé sur le modèle VPM.

Ensuite, on teste, on ajuste, on planifie. Par exemple, pour une plongée particulièrement profonde, je cherche à optimiser mon temps de décompression.

Plongée à 130 mètres

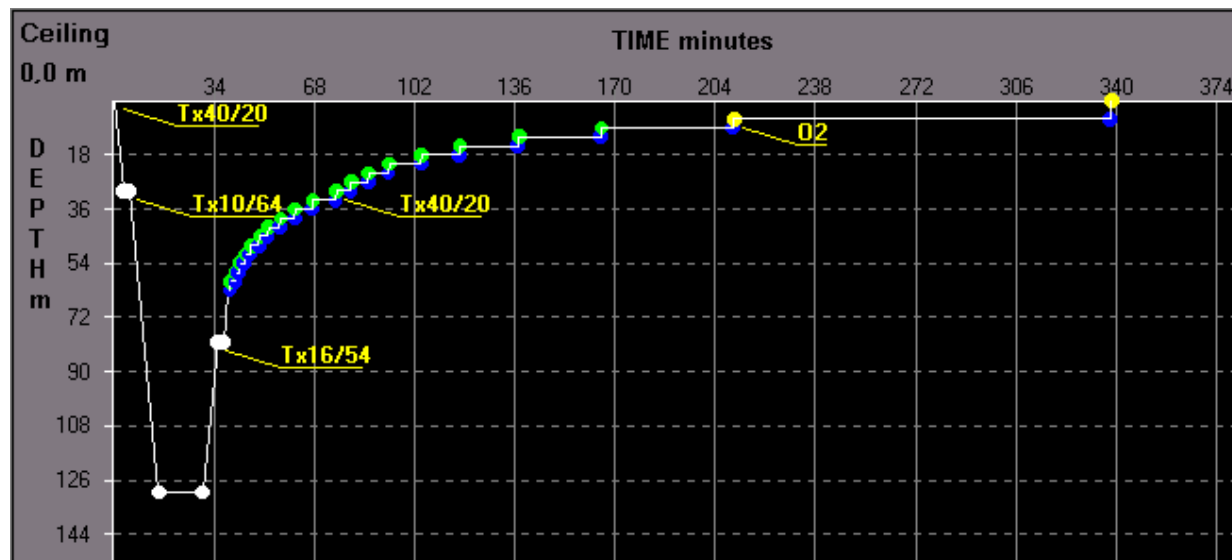
Mélange fond : trimix 10% O₂, 64% He, 26% N₂

Descente impossible avec le mélange fond, il faudra donc partir avec un mélange comportant au moins 17% d'oxygène, il pourra s'agir d'un des mélanges qui servira à la décompression.

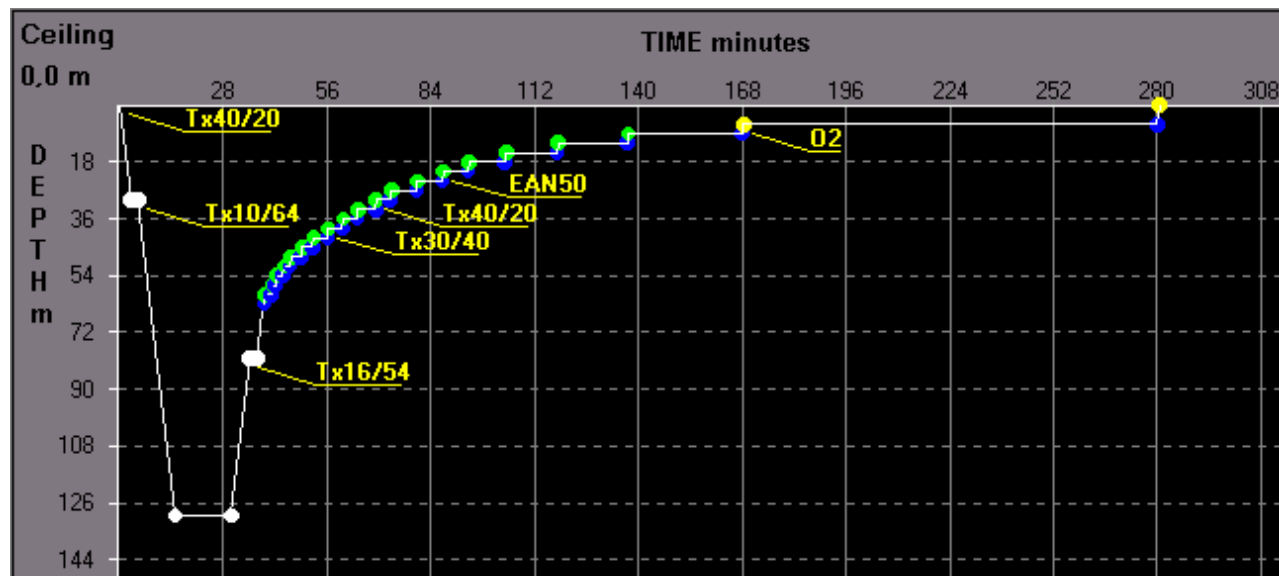
La remontée jusqu'à -6 mètres ne peut se faire avec le trimix fond. Il faudra donc prévoir un, ou plusieurs, mélanges intermédiaires de plus en plus oxygénés au fur et à mesure qu'on se rapproche de la surface. Plus on aura de mélanges, plus la décompression sera raccourcie, mais la logistique s'alourdira. Il faut également prendre en compte le fait que notre trimix fond ne comporte que 26%

d'azote et qu'il ne faut pas que les mélanges intermédiaires ne fassent trop varier ce pourcentage (du moins dans les zones profondes).

- On pourra opter pour un trimix 16/54% qu'on prendra à -80 mètres, dans ce cas le pourcentage d'azote contenu dans les mélanges respirés passera de 26% à 30%
- à -30 mètres, on passera sur un trimix 40/20 qui aura l'avantage de ne pas faire trop varier la PpN₂ lors du changement de gaz (de 30% à 40%).
- Oxygène pur à -6 mètres



En augmentant et en optimisant le nombre de mélanges disponible pour la décompression, on raccourcit les temps de palier (d'environ 1h)



Dans cet exemple, une grande attention est portée sur la variation de l'azote, pour tenir compte des risques de contre-diffusion isobarique.

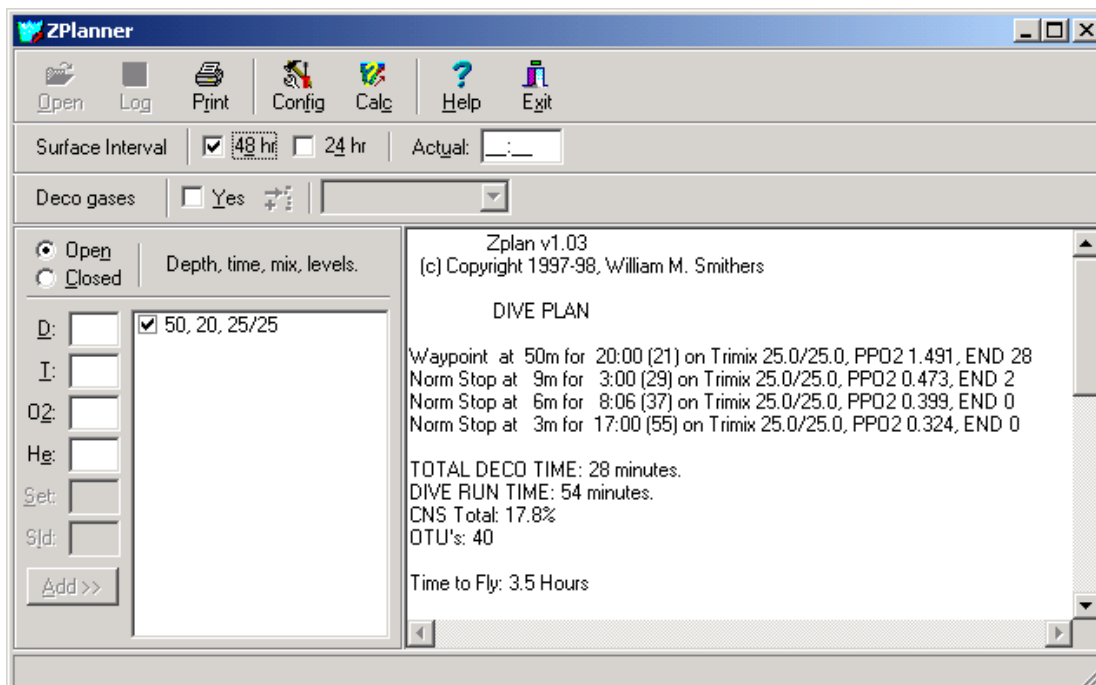
Autre exemple d'application : la gestion de « petites » plongées au trimix, ce que les Anglo-Saxons appellent le trimix élémentaire. Il s'agit de mélanges normoxiques, utilisables à moins de 80 m. Pour ces plongées, on s'aperçoit que parfois elles occasionnent des temps de remontée plus court qu'à l'air. Il est donc possible d'utiliser son ordinateur de plongée classique, sachant qu'il sera en fait plus pénalisant.

Planifions une plongée à 50 m

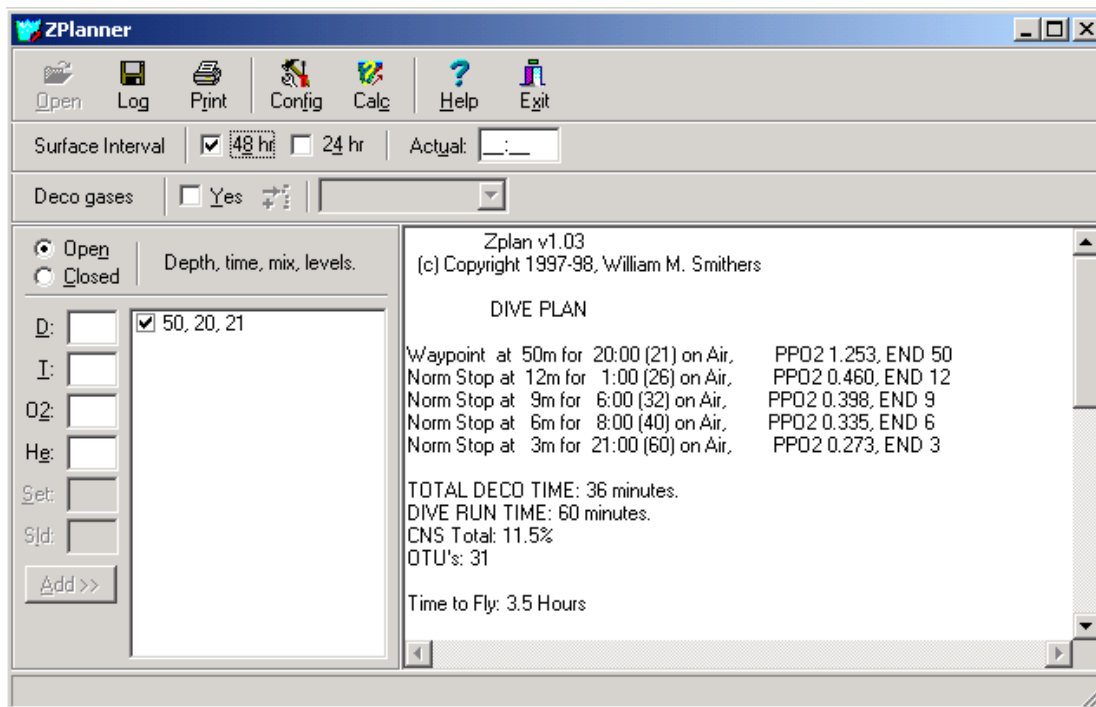
Il est encore possible de suroxygéner le mélange. En prenant une PPO2 de 1,5 bar (pour ne pas être limité par le compteur SNC), on obtient 25% d'oxygène.

Calculons un équivalent narcotique à 30 m, pour profiter d'une lucidité maximum. On trouve alors un mélange contenant 52,67% d'azote. Pour simplifier, nous prendrons 50%.

Le trimix utilisé sera donc O2=25%, He=25%, N2=50%.



La même plongée à l'air :



S'agissant d'un modèle Bühlmann, je peux utiliser un ordinateur type Aladin[®], en prenant soin de remonter lentement (10 m/min) dès le fond, du fait de la désaturation plus rapide de l'hélium.

Ces exemples sont représentatifs de la grande diversité des planifications de la plongée au trimix. Les logiciels se positionnent comme une aide efficace, se jouant de la variabilité des situations, tant liée à l'environnement qu'aux disponibilités matérielles.

La tendance actuelle est en faveur des modèles à micro-bulles. Les concepteurs de versions haldaniennes commencent à écrire des versions VPM, ou en tiennent compte en incorporant la gestion des bulles à leur modèle existant. Les remontées se font plus lentes et le premier arrêt plus profond. Le mérite des logiciels de bureau est qu'ils se mettent à jour rapidement et à moindre frais, comparés aux ordinateurs immergeables. D'autre part, bien qu'ils s'adaptent à différents profils, ils obligent malgré tout à une planification de la plongée et évitent la dérive comportementale qui consiste à suivre aveuglément son ordinateur en temps réel, ce qui ne permet pas une bonne gestion des risques en plongée profonde. Le principe du « *plan your dive and dive your plan* » est remis au goût du jour.

7. Références

Workman RD. 1965. Calculation of decompression schedules for nitrogenoxygen and helium-oxygen dives.

Research Report 6-65. Washington: Navy Experimental Diving Unit.

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

Bühlmann, AA. 1995. Tauchmedizin. Berlin: Springer-Verlag.

The appendix of: D.E. Yount, D.C. Hoffman, *On the Use of a Bubble Formation Model to Calculate Diving Tables*. Aviation, Space, and Environmental Medicine, February, 1986.

Wienke BR. 1991. Basic decompression theory and application.

Flagstaff, AZ: Best.

Pyle RL. 1996. The importance of deep safety stops: Rethinking ascent patterns from decompression

dives. DeepTech. 5:64; Cave Diving Group Newsletter. 121:2-5.

Eric Maiken – VPM Background, 1994-2001

Eric Maiken – The VPM algorithm, 1999

Baker EC. 1998. Understanding Mvalues.

Immersed. Vol. 3, No. 3.