

Utilisation de l'air en décompression

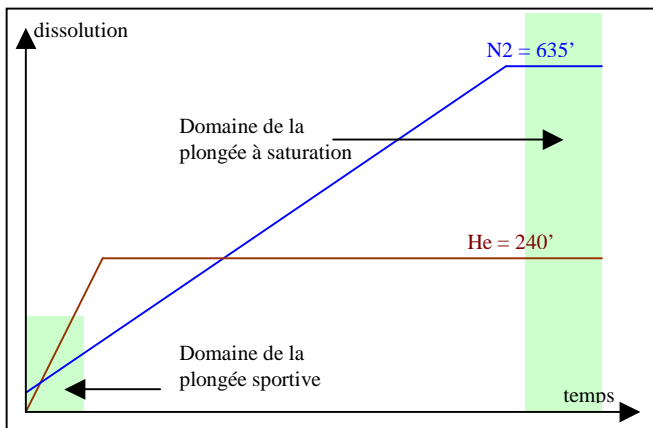
Le 16 juillet 2001, par jean-marc Belin (jmbelin@ifrance.com)

Préambule

Pourquoi les professionnels prétendent que la décompression est plus rapide avec l'hélium plutôt qu'avec l'azote, alors que dans le domaine de la plongée sportive, on constate un allongement de la durée totale de la décompression lorsqu'on utilise de l'hélium.

En réalité les conditions d'utilisation ne sont pas les mêmes et c'est ce qui fait toute la différence ; Si on utilise l'hélium pour des plongées à saturation, la décompression sera plus courte qu'avec l'azote. Par contre, dans le cas de plongées relativement brèves, et donc pas à saturation, la décompression sera plus longue avec l'hélium.

Puisqu'un bon croquis vaut mieux qu'un grand discours, voyons l'explication en s'appuyant sur un schéma.



De manière succincte, on peut dire que l'hélium se dissout très rapidement mais que la quantité maximale admissible est relativement faible (la courbe s'arrête assez vite). Tandis que l'azote se dissout tranquillement mais il 'poursuit son chemin bien au delà de l'hélium'.

Etant donné qu'en plongée à saturation on ne considère que le compartiment le plus long (He = 240', N2 = 635'), on voit bien sur le croquis que c'est l'azote qui sera le gaz directeur lors d'une plongée à saturation, tandis que l'hélium sera directeur lors d'une plongée sportive non à saturation (au moins au début de la décompression). C'est ce qui explique le paradoxe initial.

Remarques : Ce schéma n'a qu'un but éducatif. Il ne prétend nullement représenter une plongée réelle. Il ne faut pas oublier que dans le cas des plongées à saturation la pression partielle

d'oxygène dans le mélange n'excédera pas 0,4 bar, et que d'autre part, l'azote n'offre plus de confort respiratoire passé 35 mètres.

Tout ceci pour dire que ce qui est vrai pour une situation donnée ne doit pas être transposé sans analyse préalable. Tout les paramètres connus doivent être pris en considération. Pour le choix des mélanges utilisables en décompression, le phénomène est identique. Ce n'est pas parce que, pour un cas particulier, un mélange gazeux donne satisfaction à une profondeur donnée, qu'il faut généraliser et croire que ce mélange sera toujours optimal à cette profondeur, quelque soit le temps, la profondeur max et la composition du mélange fond utilisés.

Expériences du docteur Buhlmann

Albert A. Bühlmann est devenu très populaire pour avoir permis l'élaboration d'un profil de décompression modélisable et donc incorporable dans un calculateur. Mais il ne faut pas restreindre la contribution du docteur aux seules M_values. De nombreuses expériences humaines de plongées aux mélanges ont été réalisées et la publication détaillée de ces expériences sont édifiantes.

En 1961 à Toulon, puis à Washington, Hannes Keller effectua deux plongées **en caisson** ; une plongée à 215m et une autre à 300m. L'utilisation de deux gaz inertes et le remplacement de l'hélium par l'azote au moment approprié permirent une décompression extrêmement courte.

Il faut avouer que le Docteur était particulièrement gonflé. Voici les caractéristiques de la plongée de 10 minutes à 22 bars :

Pression	O2	N2	HE	↑ou ↓
surf - 2	100			en 4'
2 - 6	50	50		en 1'
6 - 11	21	79		en 1'
11 - 16	10	30	60	en 1'
16 - 22	10		90	en 1'
- 22-	10		90	10'
22 - 14	10		90	en 3'
14 - 9,5	10	30	60	en 5'
9,5 - 5,5	21	79		en 11'
5,5 - 2,5	50	50		en 35'
2,5 - surf	100			en 86'

Total déco 140 minutes.

La vitesse de descente est vertigineuse et les PpO2 et PpN2 sont impressionnantes. La décompression se fait en continu. (voir temps par segment).

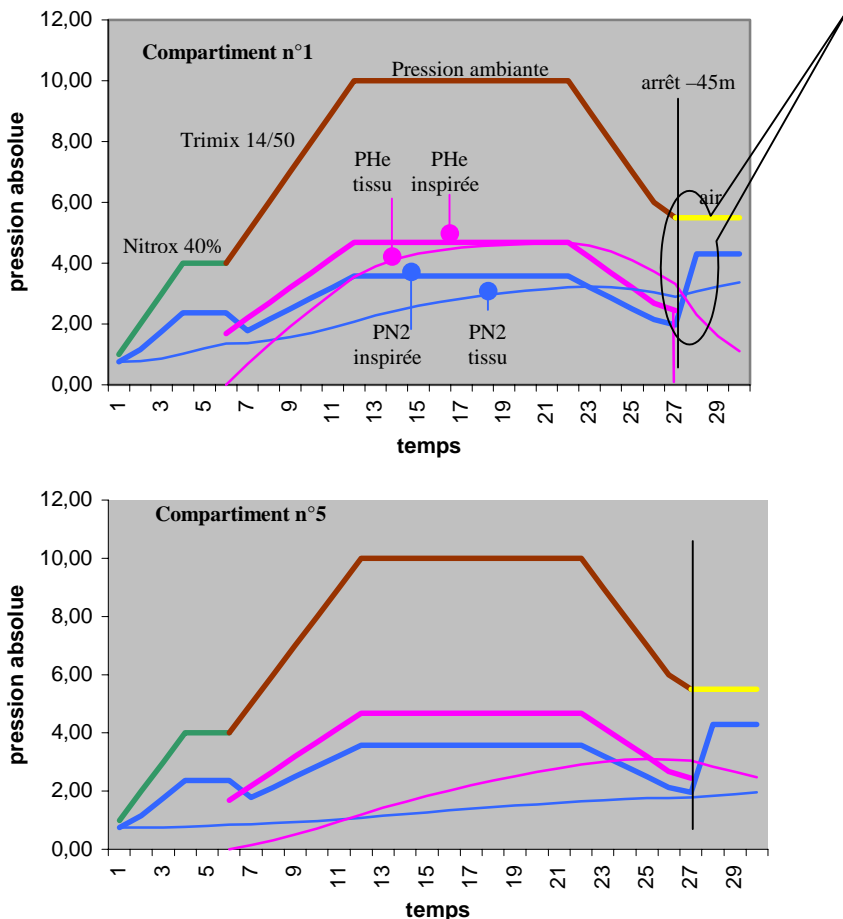
De l'air pour mélange intermédiaire

Des tables ont été validées pour l'utilisation d'un trimix 18/42 jusqu'à -78m avec une décompression sur le mélange fond ou à l'air. Voici le cas typique d'une procédure qui fonctionne parfaitement mais qu'on ne peut pas transposer sans risque à d'autres profondeurs et pour d'autres mélanges.

Le WKPP ne préconise plus l'utilisation d'air en décompression et le CDG non plus. Mais leurs démarches ne sont que l'aboutissement de constatations empiriques. Voyons ce qu'il en est avec les moyens dont nous disposons.

Illustration par l'exemple

Prenons l'exemple d'une plongée de 10 minutes à -90 mètres. Les vitesses de descente et de remontée sont fixées à 10m/min. La descente est effectuée jusqu'à -30m avec un nitrox 40%, on reste 2 minutes à cette profondeur avant de poursuivre la descente avec un trimix 14/50. A -45m, on interrompt la remontée pour changer le trimix par de l'air et on reste 3 minute à cette profondeur. Analysons ce qui se passe pour les compartiments n°1 et n°5.



Observations : La courbe de saturation des tissus tend à suivre la courbe du gaz inspiré avec plus ou moins d'inertie selon le compartiment et le gaz considéré. Ceci s'explique par le fait que l'écart (positif ou négatif) entre ces deux

courbes est 'la force motrice' qui est à l'origine de la charge, ou décharge, du gaz dans les tissus. Lorsqu'on entame la remontée, la courbe de pression du gaz inspiré diminue instantanément alors que la courbe de saturation des tissus commence à s'infléchir après un petit laps de temps. Ceci est particulièrement visible pour le compartiment n°1.

Lorsqu'on marque une pause à -45m et qu'on change le trimix pour de l'air, on rompt brutalement 'l'harmonie' qui s'instaurait. La pression partielle d'azote inspirée remonte brutalement car on passe d'un trimix contenant 36% d'azote à de l'air en contenant 79%. La courbe de la pression partielle d'azote dans les tissus va suivre avec un décalage tandis que la charge d'hélium dans les tissus va chuter brutalement du fait qu'il n'y a plus d'hélium dans le nouveau mélange respiré.

On crée une situation de choc où la charge d'azote reprend une phase de croissance importante (alors qu'elle était en phase de décroissance pour ce compartiment et ce type de plongée) tandis qu'on accélère brutalement la décharge de l'hélium.

Les phénomènes intervenant à cet instant précis où l'on change de mélange ne sont pas encore tous élucidés. Il est probable que la situation de choc qu'on a créée soit en partie responsable des incidents qui surviennent parfois. Par contre, il n'est pas certain que le phénomène de contre-diffusion isobare, souvent cité, soit l'unique responsable. Certes, l'expérience menée par CJ. Lambertsen concernait bien un changement de gaz respiratoire sans modification de la pression ambiante, mais les tissus étaient dans un état stable (dit à saturation). Alors que lors d'une remontée de plongée, les tissus sont dans un état instable de sursaturation qui facilite d'autant la cavitation et la génération d'une phase gazeuse (voir article du Dr. Hennessy).

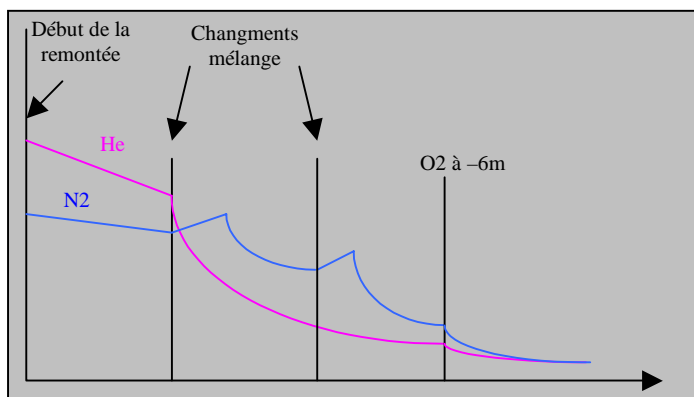
D'ailleurs, le Dr Buhlmann avait noté que la tolérance à l'hélium variait avec la fraction d'azote contenu dans le mélange et inversement.

Dans certains cas, l'augmentation brutale de la PpN2 respirée qui va de pair avec la disparition de la PHe peut augmenter le temps de la décompression. En effet, la pression partielle d'hélium régnant dans les tissus sera devenue ridiculement faible et ce sera uniquement la charge exagérée d'azote qui dirigera la décompression. La

décompression idéale serait celle qui permettrait aux compartiments directs de l'azote et de l'hélium d'atteindre ensemble une valeur proche de leur maximum respectif admissible à la fin du dernier palier, tout en ne subissant jamais de nouvelle phase de charge au cours de la décompression. Ces équations ne sont peut-être pas impossibles à construire mais elles sont néanmoins très complexes.

Méthodes applicables

Nous venons de voir qu'au cours de la remontée, dans certains cas et pour certains gaz, des compartiments peuvent avoir des parcours accidentés faits d'une succession de décharges et de charges au lieu qu'il y ait une continuité harmonieuse dans l'élimination des gaz inertes. De façon schématique, voici ce que cela peut donner :



En ce qui concerne l'azote, ce style de décompression peut être assimilé à une plongée 'yoyo' dont on connaît les méfaits.

Règle optimisée

Lorsqu'on effectue un changement de mélange, il faut que la teneur en oxygène du nouveau mélange donne la pression partielle maximale de 1,6b. Cette règle serait à moduler dans le cas de 'méga-plongée' où la toxicité de l'oxygène sur le système nerveux et sur les poumons, serait à prendre en compte (SNC et UPTD). Dans notre exemple de plongée 10 minutes à -90m, le changement de mélange à -45m donnera : $1,6 / 5,5 = 29\%$ d'oxygène

Concernant l'azote, pour qu'il n'y ait pas de nouvelle phase de charge, il faut que la teneur en azote du nouveau mélange ne donne pas une pression partielle respirée supérieure à la pression partielle du compartiment possédant la pression partielle la plus élevée (c'est pratiquement toujours le compartiment directeur). Dans notre exemple, à -45m, il n'y a pas de compartiment imposant un arrêt. On choisira donc le compartiment qui est le plus chargé. C'est le compartiment n°1 dont la valeur à ce moment là vaut 2,89. Le pourcentage d'azote du mélange sera donc $2,89 / 5,5 = 52\%$.

Le pourcentage d'hélium sera donc le complément, soit 18%. La composition théorique du nouveau mélange serait donc 29% d'oxygène, 19% d'hélium et 52% pour l'azote

(dans ce cas de figure, il vaut mieux passer à un mélange plus pratique qui reste proche du calcul théorique : un trimix 30/20).

De cette manière, il n'y a pas d'augmentation de la pression partielle d'azote du compartiment directeur (ni dans les compartiments plus courts qui n'interviendront d'ailleurs plus dans la décompression). En effet, lors d'une décompression, ce sont d'abord les compartiments courts qui sont directs, puis, au fur et à mesure de la remontée, ce sont les compartiments plus longs qui imposent les paliers. Dans une plongée très brève, ce pourra être le compartiment n°1 qui imposera le premier arrêt, puis les autres suivront en séquence. Dans une plongée un peu plus longue, ce pourra être le compartiment n°3 qui sera le premier compartiment directeur, puis les autres suivront en séquence (tout ceci dépendant de la vitesse de remontée). Jusqu'au cas extrême de la plongée à saturation où le premier (et le seul) compartiment directeur sera le plus long (cpt n°16 de 635 minutes pour l'azote).

Par contre, il est possible qu'au cours de la remontée les compartiments plus longs continuent de saturer lentement, comme ils l'auraient fait sans le changement de mélange. Cela n'est pas gênant, il en sera tenu compte pour le reste de la décompression.

Attention !!! Le calcul de la pression partielle des tissus peut influencer sensiblement sur le mélange choisi. Ici les valeurs de pression partielle ont été calculées avec l'équation de Schreiner (voir article sur les éléments de calcul de soft) Dans notre exemple nous avons trouvé une PpN2 de 2,89 ce qui nous a donné pour mélange de déco un trimix 30/20 avec 50% d'azote. Alors que Decoplanner donne une PpN2 de 2,96, ce qui donnerait, par approximation, un trimix 30/15. Toujours avec Decoplanner, une plongée de 40 minutes à -90m donnerait une PpN2 de 3,27 à -45m pour le compartiment n°2 (sans conservatisme), le mélange de décompression serait donc un trimix 30/10.

Cette méthode optimise le temps de décompression tout en évitant les brusques revirements de charge/décharge d'azote, toujours préjudiciable en plongée. Bien que dans notre cas on utilise souvent un trimix (et donc de l'hélium) au lieu de l'air, les durées de décompression ne sont pas allongées car le pourcentage d'oxygène du trimix est supérieur à celui contenu dans

l'air. L'inconvénient reste le prix et la nécessité d'un bon marquage qui évitera les erreurs.

Remarque : on voit bien que pour une même profondeur max et pour un même mélange fond, la composition du mélange de décompression **dépend** du temps passé au fond.

Les caractéristiques de la plongée effectuée (profondeur, temps fond, mélange fond, paliers avant le switch, ...) influent donc sur la composition du mélange de décompression ainsi que la profondeur à laquelle on souhaite effectuer le changement.

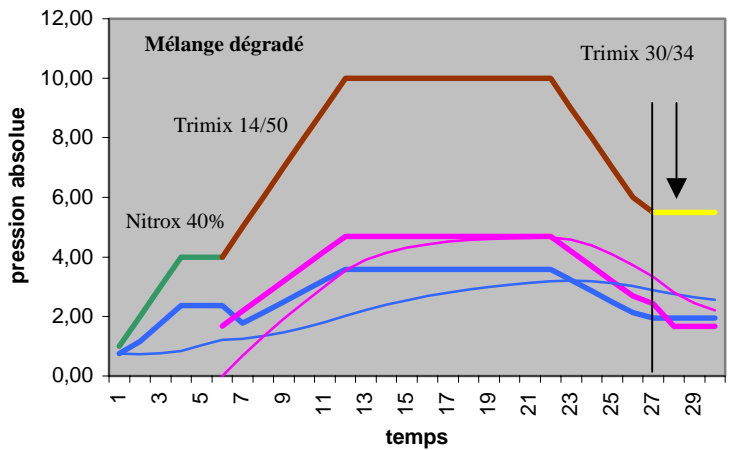
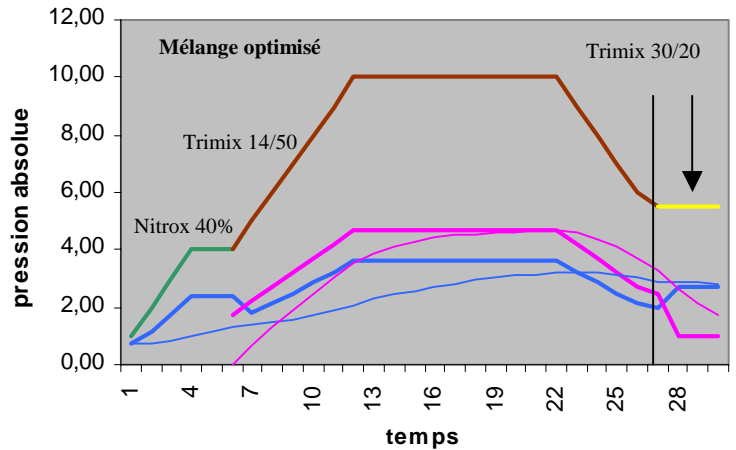
Règle dégradée

La méthode optimisée présente l'inconvénient d'un calcul fastidieux et délicat. Il n'est pas toujours facile de calculer la pression partielle des 16 compartiments pour déterminer celui qui sera directeur. De plus, différentes simulations seront peut-être nécessaires pour déterminer la profondeur idéale du changement de gaz. Aussi, est-il possible d'utiliser une règle dégradée qui assurera une sécurité au moins aussi bonne mais, en contrepartie, avec un allongement de la durée de décompression.

En prenant pour règle de conserver, dans le nouveau mélange, le même **pourcentage** d'azote (et non pression partielle) que dans le mélange précédent, on est sûr de ne pas déclencher une nouvelle phase de charge dans un tissu qui était en phase d'élimination. Dans ce cas, on se contente de remplacer une partie de l'hélium par de l'oxygène.

Dans notre exemple, la composition du nouveau mélange serait : 30% d'oxygène, 34% d'hélium et 36% d'azote.

Dans les cas d'utilisation de mélange optimisés ou dégradés, on voit que la courbe de charge en azote présente une continuité de décharge et que la brusque remontée qu'on constatait avec un changement à l'air, n'existe plus. En contrepartie, la courbe de décharge de l'hélium est moins prononcée.



On se rend compte qu'en procédant ainsi, on retrouve des mélanges analogues à ceux que préconise Jarrod Jablonski dans le cadre de l'association GUE, sauf que cette association préconise l'utilisation de mélanges standards adaptés à certaines zones de profondeur, ce qui est certainement une très bonne approche, j'en parlerai un peu plus loin.

TABLE 13.1 BOTTOM MIXES

10'	100'	3m - 30m	32% Oxygen
110'	150'	33m - 45m	21/35 (O2/He)
160'	200'	48m - 60m	18/45 (O2/He)
210'	250'	63m - 75m	15/55 (O2/He)
260'	400'	78m - 121m	10/70 (O2/He)

TABLE 13.1 DECOMPRESSION MIXES

20'	6m	100% Oxygen
70'	21m	50% Oxygen
120'	36m	35/25 (O2/He)
190'	57m	21/35 (O2/He)

Quand faudrait-il changer de mélange ?

L'idéal serait de pouvoir faire varier la composition du mélange en continu, en fonction de la profondeur. Outre les problèmes techniques que cela soulève, il faudrait également confier sa décompression à un calculateur qui intégrerait la composition gazeuse respirée en temps réel.

En attendant que ces techniques soient disponibles, voyons comment procéder avec le matériel dont nous disposons.

Règles théoriques :

On peut dire qu'il serait avantageux de changer de mélange chaque fois que la pression ambiante a suffisamment diminué pour permettre une augmentation du pourcentage d'oxygène d'environ 10%. En deçà, le gain sur la durée de décompression ne compense pas l'accroissement de la logistique.

Dans notre exemple de plongée de 10' à -90m, on changerait le trimix 14/50 pour un mélange comportant 24% d'oxygène à -56m, puis à un mélange contenant 34% d'oxygène à -37m, puis 44% à -26m, etc ... La teneur en gaz inerte serait établie en fonction des indications données précédemment.

Il est évident que de nombreuses considérations viennent moduler la théorie.

Paramètres pratiques :

Tout le monde s'accorde sur le fait que la fin de la décompression sera réalisée à l'oxygène pur à partir de -6m. Il faut donc gérer ses différents mélanges de décompression entre le fond et -6m.

Avec la règle théorique de changer de mélange chaque fois qu'on peut gagner 10% sur la teneur en oxygène du suivant, on finirait pas changer de mélange à chaque palier, lorsqu'on se rapproche de la surface.

On peut également effectuer une bonne décompression avec le mélange fond, ce n'est qu'une question de temps (et de froid, de faim, de soif, de pipi, ...). C'est pourquoi le changement de mélange n'est qu'un compromis personnel entre la logistique qu'on est prêt à mettre en œuvre (nombreux changements de mélange, cloche de décompression, équipe de soutien, ...), et celle qu'on peut mettre en œuvre (profil du terrain, finances disponibles, ...).

Standardisation des mélanges.

En cherchant à optimiser à outrance, chaque plongée devient un cas particulier et nous conduira à élaborer toute une série de mélanges spécialisés que ce soit pour le fond ou pour la décompression. Or une différence de quelques pourcents d'oxygène ou d'hélium ne présente pas un avantage justifiant qu'on utilise toute la panoplie des combinaisons

possibles. D'autre part, ainsi que le préconise le WKPP, une utilisation de quelques mélanges standards présente l'immense intérêt de pouvoir se familiariser avec une procédure qui reste similaire quelque soit la plongée, sans pour autant, allonger la décompression de façon très significative. Standardiser les mélanges signifie d'utiliser toujours les mêmes mélanges par zone de profondeur.

Voici les mélanges standards de décompression figurant sur le site du WKPP :

STOP DEPTH MIX

20 Feet	6m	100% O2	0% N2
70 Feet	21m	50% EANx	50% N2
120 Feet	36m	35% EANx,	40% N2
190 Feet	57m	18/35 Trimix	47% N2
240 Feet	72m	16/40	44% N2

Alors, doit-on utiliser les mêmes mélanges que les plongeurs du WKPP ? Au vue de l'expérience accumulée par ces plongeurs, on peut penser que la procédure est sûre. Cependant, analysons la composition de ces mélanges avec les éléments qui ont été développés précédemment;

A grande profondeur, la PpO2 est en dessous de la limite maximale admise de 1,6 bar, ce qui s'explique par la durée très importante de la plupart des plongées effectuées dans le cadre de cette association.

D'autre part, pour les mélanges fond, la teneur en azote donne une profondeur air équivalente à 22m, ce qui doit être très confortable, mais ce qui provoque une forte augmentation du pourcentage d'azote lorsqu'on passe au premier mélange de décompression (par exemple de 20% à 44% quand on plonge au delà de 78m avec un 10/70). On peut également noter une petite anomalie lors du passage à un 35/25 à -36m (on passe de 44% à -72m à 40% avant de revenir à 50% à -21m).

Voici une proposition de mélanges standards basés sur une PpO2 de 1,4 bar pour les mélanges fonds et de 1,6 (ou légèrement plus pendant quelques minutes) pour les décompressions. Pour l'azote, la profondeur air équivalente est de -30m pour les mélanges fond.

Lors de la remontée, les mélanges proposés permettent aux gaz inertes de ne pas subir de nouvelles phases de charge.

Fond (O ₂ /He)	
40 - 60m	20/35
60 - 80m	15/50
80 - 120	10/65

Décompression		% N ₂
80m	20/55	25%
60m	25/45	30%
40m	30/35	35%
20m	50%	50%
6m	100% O2	-

Lors de la remontée, il n'est pas toujours utile de changer de mélange avant d'arriver au premier palier. Dans notre exemple de plongée à -90m pendant 40 minutes, si on fixe le conservatisme à 0,7 et 0,5, le premier palier se trouve à -54m. On n'utilisera pas le trimix de décompression 20/55 à -80m, mais on poursuivra la remontée sur le mélange fond jusqu'à -60m où on changera pour le trimix 25/45.

Par contre, lors de la plongée à -90m pendant 10 minutes (toujours avec le conservatisme fixé à 0,7 et 0,5), le premier palier est à -30m. On pourrait effectuer la remontée sur le mélange fond jusqu'à -40m où on changera pour le mélange standard 30/35. Ainsi, bien que la plongée se soit effectuée à -90m, trois mélanges de décompression seront nécessaires : le 30/35 à -40m, le EAN50% à -20m et l'oxygène pur à -6m.

Comparons les profils de décompression donné par decoplanner (avec $GfHi = 0,7$ et $GfLo = 0,5$) sur la plongée à -90m pendant 10 minutes entre :

D'une part, on utilise tous les mélanges standards de décompression (à -80m, à -60m, à -40m, à -20m et à -6m) et d'autre part, on ne change de mélange qu'à -20m (soit utilisation du 50% à -20m et de l'oxy pur à -6m).

Dans le premier cas on a une durée totale d'immersion de 97 minutes.

Dans le deuxième cas on trouve 100 minutes.

Tant de mélanges pour si peu de gain ?

Si on effectue la même comparaison avec une plongée de -90m pendant 40 minutes. Dans le premier cas, on utilise toute la panoplie des mélanges standards, et dans l'autre cas, on ne change de mélange qu'à partir de -40m.

Dans le premier cas on a une durée totale d'immersion de 287 minutes

Dans le deuxième cas on trouve 304 minutes.

Même constatation. Utilisons donc un minimum de logistique car en plus du prix et de la lourdeur de l'opération, il y a toujours le risque de se tromper de mélange.

Anecdotes

Je citerais encore cette étonnante expérience menée par Albert Bühlmann : Lors d'une plongée de 2h à 30m, le sujet a respiré de l'héliox 21/78 pendant 45 min, avant de passer à l'air à pression max pendant les 75 minutes suivantes. Puis il d'amorce sa remontée pour effectuer ses paliers de décompression à l'oxygène pur à partir de 15m. La durée totale de décompression était de 35 minutes seulement. Voici un bel exemple de contre diffusion qui n'a provoqué aucun trouble. Mais le passage à

l'azote est intervenu sur des tissus qui n'étaient pas en sursaturation. Le docteur savait jouer avec les changements de gaz.

Conclusion

Cet article concerne les plongées sportives au trimix. Ceci sous-entend que si on dépasse, en profondeur ou en temps, les valeurs habituelles de ces plongées, d'autres paramètres seraient à prendre en compte qui rendrait ce texte caduque.

La règle qui consiste à dire de ne pas laisser la pression partielle d'azote s'accroître au cours de la remontée est certainement une bonne règle, encore fallait-il quantifier les choses.

Dans le domaine de la plongée on a l'habitude de valider la théorie par l'expérience (ou de bâtir une théorie à partir de l'expérience), ce qui est une excellente chose, et une série de tests pratiqués de manière rigoureuse serait la bienvenue. Cependant, malgré l'impossibilité de valider le concept, on peut tout de même affirmer que cette pratique de fabrication des mélanges intermédiaires ne peut pas présenter de risque si elle est accompagnée de temps de décompression correctement calculés pour ces mélanges.

Il serait néanmoins très utile de pouvoir bénéficier d'une base de données donnant les caractéristiques complètes des plongées effectuées aux mélanges. Ces données serviraient à confirmer ou infirmer certaines hypothèses dans le but de pouvoir établir des recettes fiables aux contours bien délimités.

Mais dans quel cadre pourrait-on envisager la communication et l'exploitation systématique de ce genre d'informations ?

Dans un cadre associatif peut-être ...

