

Plongée Tech

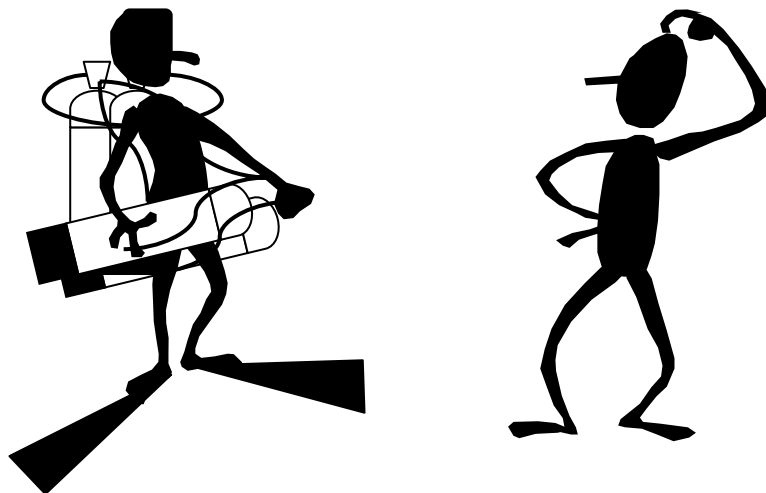


Table des matières

1. Préambule	7
2. Introduction	9
2.1. Définition	9
2.2. Historique, records du monde de plongée profonde	10
2.3. Vous et la plongée Tech	12
2.3.1. Généralités	12
2.3.2. La remise en question	12
2.3.3. Plongée profonde à l'air	13
2.3.4. Différences entre la plongée loisir et la plongée technique	13
2.3.5. La motivation	14
2.4. La préparation psychologique	15
2.4.1. Généralités	15
2.4.2. Les sources de stress	16
2.4.3. Les conditions requises pour plonger profond	17
3. Sécurité et formation	18
3.1. Introduction	18
3.2. La gestion des risques en 5 étapes	18
3.2.1. Généralités	18
3.2.2. L'identification des dangers	19
3.2.3. L'évaluation des risques	19
3.2.4. Le contrôle et l'élimination	20
3.2.5. Le trépied	21
3.2.6. La modification et l'adaptation	21
3.3. La planification	22
3.3.1. Généralités	22
3.3.2. Les dix règles d'or	22
3.3.3. La liste de contrôle	23
3.3.4. Les procédures	24
3.3.5. La technique du questionnement « QFS »	25
3.4. La formation	26
3.4.1. Généralités	26
3.4.2. Les organismes de formation	26
3.4.3. Formation Plongeur Trimix niveau 1 CMAS.CH	27
3.4.4. Connaissances théoriques et pratiques Plongeur Trimix niveau 1 CMAS.CH	28
3.4.5. Formation Plongeur Trimix niveau 2 CMAS.CH	29
3.4.6. Connaissances théoriques et pratiques Plongeur Trimix niveau 2 CMAS.CH	30
3.4.7. Formations WKPP GUE DIR	31
4. Décompression	32
4.1. Introduction	32
4.2. Les modèles de décompression	32
4.2.1. Généralités	32
4.2.2. Le modèle de Haldane	33
4.2.3. Critique du modèle de Haldane	36
4.2.4. Les modèles néo-Haldaniens	38
4.2.5. Le modèle de Bühlmann	39
4.2.6. Le modèle d'Empleman	40
4.2.7. Le modèle de Spencer	41
4.2.8. Le concept du volume critique des bulles	42
4.2.9. L'algorithme "E-L" de Thalman	43
4.2.10. Le modèle canadien du DCIEM	44
4.2.11. Le modèle sigmoïdal de Wald	44
4.2.12. Les modèles probabilistes	45
4.2.13. Le modèle de décompression statistique	45
4.2.14. Personnalisation de la gestion de la décompression	46
4.3. La gestion de la décompression	47
4.3.1. Généralités	47
4.3.2. Planification et gestion des tables	48
4.3.3. La vitesse de remontée	50
4.3.4. Durant les paliers	50

4.3.5.	Après les paliers	50
4.4.	La fenêtre oxygène	51
4.4.1.	Généralités	51
4.4.2.	Transport de l'oxygène dans le sang	51
4.4.3.	La genèse de la fenêtre oxygène	52
4.4.4.	Rôle de la fenêtre oxygène	52
4.4.5.	Evolution de la fenêtre oxygène	53
4.4.6.	Conclusion	54
4.5.	Les paliers profonds	55
4.5.1.	Généralités	55
4.5.2.	Algorithmes conventionnels	56
4.5.3.	Bulles et gradient	56
4.5.4.	Les M_Value	57
4.5.5.	Profils sans paliers profonds	58
4.5.6.	Profils avec la méthode Pyle	59
4.5.7.	Profils avec la méthode WKPP	60
4.5.8.	Profils avec la méthode des GF	61
4.5.9.	Réglages des GF	62
4.5.10.	Profils avec la méthode VPM/RGBM	63
4.5.11.	Conclusion	64
4.6.	Interruption des paliers	65
4.6.1.	Généralités	65
4.6.2.	Méthode US NAVY (USN)	65
4.6.3.	Méthode Bühlmann	65
4.7.	Les accidents de décompression	66
4.7.1.	Généralités	66
4.7.2.	Les bases de notre compréhension	66
4.7.3.	Les principaux mécanismes de l'accident de décompression	67
4.7.4.	L'effet des bulles	68
4.7.5.	Les puces et moutons	69
4.7.6.	Les douleurs articulaires (Bends)	69
4.7.7.	Les problèmes respiratoires	69
4.7.8.	Les problèmes neurologiques	70
4.7.9.	Les facteurs favorisants	70
4.8.	La décompression à PO₂ constante	71
4.8.1.	Généralités	71
4.8.2.	Le diluant fond Hélicair	71
4.8.3.	Le diluant fond Trimix	73
4.8.4.	Le diluant fond HélioX	74
4.8.5.	Choix des diluants fond	75
4.8.6.	Choix des diluants en décompression	76
4.8.7.	Choix de la PO ₂	78
4.8.8.	Gestion décompression à PO ₂ constante	79
4.9.	Les logiciels de décompression	80
4.9.1.	Généralités	80
4.9.2.	Les limites des logiciels terrestres	80
4.9.3.	Les avantages des logiciels terrestres	81
4.9.4.	Pro Planner	82
4.9.5.	Deco Planner	82
4.9.6.	ZPlanner	83
4.9.7.	V-Planner	84
4.9.8.	GAP	85
4.9.9.	Voyager	86
4.9.10.	Abyss	87
4.9.11.	Nautilus	88
4.9.12.	Les facteurs de conservatisme	89
4.9.13.	Les ordinateurs Trimix	89
4.9.14.	Conclusion	90
5.	Limites physiologiques	91
5.1.	Introduction	91
5.2.	L'oxygène	92
5.2.1.	Généralités	92
5.2.2.	La biochimie de l'oxygène	92
5.3.	La neurotoxicité de l'oxygène	93
5.3.1.	Généralités	93
5.3.2.	Symptômes	93
5.3.3.	Calcul de la neurotoxicité	94
5.3.4.	L'influence de la rétention du dioxyde de carbone sur la toxicité de l'oxygène	95
5.3.5.	La CNS Clock	95
5.3.6.	Respiration de l'oxygène à pression partielle élevée	95

5.3.7.	Les doses maximales d'oxygène.....	97
5.3.8.	Conclusion	97
5.4.	La pneumotoxicité de l'oxygène	98
5.4.1.	Généralités.....	98
5.4.2.	Symptômes	98
5.4.3.	Calcul de la pneumotoxicité	98
5.4.4.	Prévention.....	99
5.5.	L'hypoxie.....	100
5.5.1.	Généralités.....	100
5.5.2.	Symptômes	100
5.5.3.	Prévention.....	100
5.6.	La narcose (N₂).....	101
5.6.1.	Généralités.....	101
5.6.2.	Symptômes	101
5.6.3.	Les facteurs favorisant	101
5.6.4.	La profondeur narcotique équivalente (PNE)	102
5.6.5.	Limites	102
5.6.6.	Prévention.....	102
5.7.	L'essoufflement (CO₂)	103
5.7.1.	Généralités.....	103
5.7.2.	La densité des gaz	103
5.7.3.	Mécanismes de l'essoufflement.....	103
5.7.4.	Prévention.....	104
5.8.	Le froid.....	105
5.8.1.	Généralités.....	105
5.8.2.	Pertes par respiration.....	105
5.8.3.	Pertes cutanées	106
5.8.4.	Dettes thermique	107
5.8.5.	Les échanges de chaleur.....	107
5.8.6.	Moyens de lutte et prévention.....	109
5.8.7.	Prévention.....	109
5.8.8.	Conclusion	109
5.9.	La déshydratation	110
5.9.1.	Généralités.....	110
5.9.2.	Mécanisme.....	110
5.9.3.	L'alcool	110
5.9.4.	Conclusion et prévention.....	110
5.10.	Le SNHP (syndrome nerveux des hautes pressions)	111
5.10.1.	Généralités.....	111
5.10.2.	Symptômes	111
5.10.3.	Prévention.....	111
5.11.	Le syndrome myo-articulaire	112
5.11.1.	Généralités.....	112
5.11.2.	Mécanisme.....	112
5.11.3.	Symptômes	112
5.12.	La CDI (contre diffusion isobare).....	113
5.12.1.	Généralités.....	113
5.12.2.	Mécanisme	114
5.12.3.	Prévention.....	115
5.12.4.	Conclusion	115
6.	Mélanges.....	117
6.1.	Introduction	117
6.2.	Les gaz neutres	117
6.2.1.	Généralités.....	117
6.2.2.	Le choix des gaz neutres.....	117
6.2.3.	L'hélium	118
6.2.4.	Utilisation de l'hélium.....	119
6.2.5.	La décompression à l'hélium.....	119
6.3.	Les mélanges de fond	120
6.3.1.	Généralités.....	120
6.3.2.	Les mélanges binaires.....	120
6.3.3.	Les mélanges ternaires	120
6.3.4.	Ternaires ou binaires	121
6.3.5.	Le choix du mélange fond	121
6.3.6.	L'oxygène au fond.....	122
6.3.7.	Le mélange idéal	122
6.3.8.	Calcul du mélange idéal	122
6.4.	Les mélanges de décompression.....	123
6.4.1.	Généralités.....	123

6.4.2.	Le gaz neutre	123
6.4.3.	Changement de gaz neutre	124
6.4.4.	L'oxygène en décompression	124
6.4.5.	Comparatif des mélanges de décompression	126
6.4.6.	Conclusion	127
6.5.	Le gaz d'inflation	128
6.5.1.	Généralités	128
6.5.2.	L'inflation à l'air	129
6.5.3.	Manipulation et utilisation	129
6.5.4.	Précaution et secours	129
6.6.	Fabrication des mélanges	130
6.6.1.	Généralités	130
6.6.2.	Compressibilité des gaz	130
6.6.3.	La fabrication par pression partielle	131
6.6.4.	Calculs pour la fabrication des Nitrox	133
6.6.5.	Calculs pour la fabrication des Trimix	134
6.6.6.	La fabrication automatique	135
6.6.7.	La fabrication par mélange continu	135
6.6.8.	La fabrication par séparation moléculaire	136
6.6.9.	L'achat direct des mélanges	136
6.7.	Analyse et marquage des mélanges	137
6.7.1.	Généralités	137
6.7.2.	Précision des mélanges	137
6.7.3.	L'analyseur d'hélium	138
6.7.4.	L'analyseur d'oxygène	139
6.7.5.	Le marquage des mélanges Nitrox	140
6.7.6.	Le marquage des mélanges Trimix	140
6.8.	Quantité des mélanges	141
6.8.1.	Généralités	141
6.8.2.	Calcul de consommation moyenne	141
6.8.3.	Calcul de consommation totale	142
6.8.4.	Réserve des mélanges fond	142
6.8.5.	Réserve des mélanges de décompression	142
6.8.6.	Détermination du profil de décompression et du volume des gaz	143
6.8.7.	Conclusion	143
7.	Matériel	145
7.1.	Introduction	145
7.1.1.	Redondance	146
7.2.	Les bouteilles du mélange fond	147
7.2.1.	Généralités	147
7.2.2.	La robinetterie	147
7.2.3.	Les gaz respirables	148
7.2.4.	La configuration	148
7.3.	Les bouteilles relais	149
7.3.1.	La contenance	149
7.3.2.	La configuration	149
7.3.3.	Fixation	150
7.4.	Les détendeurs pour le mélange fond	151
7.4.1.	Choix et type des détendeurs	151
7.4.2.	Modèles de détendeurs	151
7.4.3.	Configuration de l'ensemble	152
7.4.4.	Les techniques de respiration	153
7.4.5.	Le choix des manomètres	153
7.5.	Les détendeurs pour le mélange de décompression	154
7.5.1.	Choix et types des détendeurs	154
7.5.2.	Configuration de l'ensemble	154
7.5.3.	Le marquage	154
7.5.4.	Le rangement	154
7.5.5.	Hyperoxie	154
7.6.	Les Wings	155
7.6.1.	Généralités	155
7.6.2.	Fixation des Wings	155
7.6.3.	Direct System	155
7.7.	Les combinaisons	157
7.7.1.	Généralités	157
7.7.2.	Combinaisons en néoprène	157
7.7.3.	Combinaisons en toile tri-laminées	157
7.7.4.	Combinaisons en néoprène pré-compressé	157
7.7.5.	Les sous-vêtements	158

7.7.6.	Les fermetures éclair.....	158
7.7.7.	La diurèse.....	158
7.8.	Les instruments.....	159
7.8.1.	Généralités.....	159
7.8.2.	L'ordinateur de plongée.....	159
7.8.3.	Le profondimètre.....	159
7.8.4.	Le timer.....	159
7.8.5.	Résumé.....	159
7.9.	L'éclairage.....	160
7.9.1.	Généralités.....	160
7.9.2.	L'éclairage principal.....	161
7.9.3.	L'éclairage de secours.....	162
7.9.4.	Les batteries.....	163
7.9.5.	Les lampes.....	165
7.10.	Le matériel collectif.....	166
7.10.1.	Le narguilé oxygène.....	166
7.10.2.	La trousse de premiers secours.....	166
7.11.	Les accessoires et divers.....	167
7.11.1.	Les couteaux.....	167
7.11.2.	L'ardoise.....	168
7.11.3.	Le tuyau chirurgical.....	168
7.11.4.	Les mousquetons.....	168
7.11.5.	Le dévidoir.....	169
7.11.6.	Le parachute.....	171
8.	Recycleurs.....	173
8.1.	Introduction.....	173
8.2.	Fonctionnement.....	173
8.2.1.	Généralités.....	173
8.2.2.	Les éléments d'un recycleur.....	174
8.2.3.	Le processus de filtration.....	174
8.2.4.	Les avantages des recycleurs.....	176
8.2.5.	Les inconvénients des recycleurs.....	177
8.3.	Les types de recycleurs.....	178
8.3.1.	Généralités.....	178
8.3.2.	Le CCR à oxygène pur.....	179
8.3.3.	Le SCR actif (recycleur à circuit semi fermé à débit massique constant).....	180
8.3.4.	Le SCR passif (recycleur à circuit semi-fermé à fuite proportionnelle).....	181
8.3.5.	Le CCR à gestion électronique.....	182
8.4.	Le marché des recycleurs.....	183
8.4.1.	Généralités.....	183
8.4.2.	Le marché des SCR.....	183
8.4.3.	Le marché des CCR.....	186
8.4.4.	Conclusion.....	190
9.	Conclusions.....	191
10.	Bibliographie et liens Internet.....	193
10.1.	Bibliographie.....	193
10.2.	Liens Internet.....	193
10.2.1.	Organisations.....	193
10.2.2.	Matériel Tech.....	193
10.2.3.	Recycleurs.....	193
10.2.4.	Logiciels décompression.....	193
10.2.5.	Divers.....	193
11.	Remerciements.....	195

1. Préambule

La plongée technique (ci-après Tech) fait appel à du matériel, des procédures et une formation spéciale pour améliorer la sécurité et les performances. Ce type de plongée va nous permettre d'accéder à des profondeurs jusque-là fortement déconseillées du fait des inconvénients de l'air (densité du mélange, narcose à l'azote et PO_2 élevée).

Ce recueil n'est pas officiel dans le sens où les différents organismes formant les plongeurs Tech ont leur propre documentation théorique. Notre but étant de présenter de façon la plus exhaustive possible, le maximum d'informations sur les particularités de la plongée Tech en circuit ouvert et recycleur. En effet, l'utilisation de mélanges autres que l'air (même si l'air est un mélange) requiert une formation indispensable dispensée par des organismes reconnus et compétents. Ces mélanges utilisés nous imposent des contraintes (froid, vitesse de remontée, décompression) dont il faut tenir compte sans quoi ce type de plongée peut se terminer en tragédie.

Ce recueil s'adresse aux plongeurs loisirs et sportifs qui désirent s'informer sur ces nouvelles techniques et ce, quelque soit leurs niveau de formation, leur expérience et leur appartenance à un quelconque organisme de formation de plongée loisir ou professionnel. Il s'adresse aux moniteurs de plongée qui désirent étendre leurs connaissances sur ce type de plongée enfin aux futurs plongeurs Tech afin de parfaire leurs connaissances déjà acquises lors de leur formation.

Pour certains la plongée Tech et la plongée aux mélanges sont identiques, pour d'autres la plongée aux mélanges n'est qu'une partie de la plongée technique. N'ayant pas d'opinion tranchée sur ce sujet, nous avons considéré pour ce recueil que les 2 expressions sont synonymes, ceci afin de limiter les répétitions.

N'hésitez pas à nous transmettre vos remarques et suggestions, nos coordonnées sont les suivantes :

Yvan von Büren

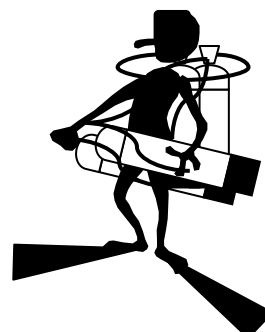
Mobile : +4179 603 90 34

E-mail : phonebu@bluewin.ch

André Warrisse

Mobile : +4179 206 92 29

E-mail : ddsansbulle@gmail.com



2. Introduction

2.1. Définition

La plongée Tech est en quelque sorte une extension de la plongée récréative et se définit :

- **Par son contenu:** un contenu où la théorie et les différentes notions sont plus approfondies en ce concerne les propriétés des différents gaz inertes et de l'oxygène. En ce qui concerne la théorie de la décompression, les aspects psychologiques de la plongée profonde, la sécurité sur le plan opérationnel, l'analyse de chacune des causes d'accidents dans la pratique de la plongée Tech, le SNHP, la recompression sous l'eau, les effets des différents groupes de drogues, médicaments et suppléments alimentaires etc...
- **Par ses techniques :** de plongée bien spécifiques au niveau des différents types de moyens de propulsion, du maintien du corps afin de permettre un meilleur contrôle et dégazage, des pénétrations à l'aide de moulinets et de leurs différentes attaches, de la localisation et du rôle de chaque plongeur dans une équipe de deux, trois ou quatre plongeurs, de la manipulation d'un parachute de sécurité avec et sans moulinet. De plus, des simulations pour préparer les participants à faire face à toutes les situations d'urgence possibles afin de permettre de développer des automatismes, le contrôle et le maintien de la flottabilité dans toutes les conditions ou situations d'urgence, bref pouvoir manipuler son équipement comme s'il s'agissait du prolongement de son propre corps.
- **Par sa planification:** une planification et une gérance des gaz très détaillée. Savoir calculer la quantité de litres nécessaire, connaître la marge de sécurité prescrite de la quantité de gaz dans différents types d'environnement, savoir effectuer le calcul des contingents dans l'éventualité où certains de nos systèmes seraient défectueux, savoir effectuer le calcul des marges en fonction des différents cubages de chacun des plongeurs de l'équipe et de leur consommation de gaz, calcul des intoxications à l'oxygène du système nerveux central et pulmonaire, calcul des pressions partielles, calcul des équivalences à l'air et narcotiques, calcul du meilleur mélange, calcul de la profondeur maximale en fonction d'un mélange donné, calcul du taux résiduel d'oxygène pour des plongées répétitives etc...
- **Par son équipement:** un équipement approprié et de qualité pour le niveau de formation. Différents types de configurations minimalistes basées sur la redondance, l'autosuffisance, la simplicité, l'aspect profilé, le confort et surtout, la sécurité. Chaque pièce d'équipement est judicieusement choisie, positionnée et ajustée pour former un ensemble équilibré et homogène.

2.2. Historique, records du monde de plongée profonde

La plongée Tech a commencé dès le début des premières immersions de l'homme avec des scaphandres. L'homme voulant connaître les fonds sous marins pour découvrir les épaves et du pétrole, à ce sujet de multiples records ont été tentés avec du matériel lourd ou léger. Dans la course à la profondeur et à la durée en plongée, ainsi que par souci de sécurité, divers mélanges ont été imaginés, mis au point et testés avec des réussites variables par les précurseurs professionnels et militaires. Les résultats de leurs travaux permettent maintenant aux sportifs de disposer de méthodes fiables et éprouvées à condition de les adapter correctement à cet usage.

Olivier Isler (CH) lors de sa conquête de la Doux de Coly



Sylvain Redoutey lors d'une plongée spéléo



Tableau récapitulatif des principaux records de plongée

Profondeurs	Années	Plongeurs	Lieux	Mélanges
-105 mètres	1988	Marty Dunwoody	Florida	Air
-106 mètres	1961	Jean Clark Samazen	Florida	Air
-108 mètres	1963	Hal Watts	Florida	Air
-118 mètres	1967	Watts & Muns	Florida	Air
-122 mètres	1970	Hal Watts	Mystery Sink, Florida	Héliox
-122 mètres	1988	Mary Ellen Eckhoff	Rio Mante, Mexico	Trimix
-126 mètres	1970	Hal Watts	Mystery Sink, Florida	Héliox
-133 mètres	1968	Watson & Gruener	Bahamas	Air
-134 mètres	1971	Ann Gunderson	Bahamas	Air
-137 mètres	1990	Bret Gilliam	Roatan	Air
-144 mètres	1993	Bret Gilliam	San Salvador	Air
-149 mètres	1994	Dan Manion	Nassau	Air
-152 mètres	1945	Arne Zetterstrom	Méditerranée, France	Hydrox
-168 mètres	1993	Ann Kristovich	Zacatan, Mexico	Trimix
-200 mètres	1987	Sheck Exley	Rio Mante, Mexico	Héliox
-205 mètres	1983	Jochen Hasenmayer	Vaucluse, France	Trimix
-205 mètres	1997	Pascal Bernabé	Vaucluse, France	Trimix
-222 mètres	1961	Keller & Mc Leish	Simulateur hyperbare	Heliox
-273 mètres	1989	Sheck Exley	Rio Mante, Mexico	Trimix
-282 mètres	1994	Jim Bowden	Zacatan, Mexico	Trimix
-283 mètres	1996	Nuno Gomez	Afrique du sud	Trimix
-305 mètres	1962	Keller & Small	California, United-States	Héliox
-318 mètres	2005	Nuno Gomez	Afrique du sud	Trimix
-330 mètres	2005	Pascal Bernabé	Propriano, Corse	Héliair 4/80
-331 mètres	2003	Ellyatt	Patong, Thaïlande	Trimix
-534 mètres	1988	Patrick Raude, Comex	Cassis, France	Hydréliox
-701 mètres	1992	Théo Mavrostomos	Simulateur hyperbare	Hydréliox

Pascal Bernabé (F) lors de son record de plongée à -330 mètres en Corse



(c) Photo François Brun

2.3. Vous et la plongée Tech

2.3.1. Généralités

Une des caractéristiques de la plongée Tech est qu'à partir d'un moment, soit le plongeur explore des cavités, soit il pénètre dans une épave, soit plus généralement il dépasse les paramètres d'une plongée loisir, nécessitant des paliers profonds et longs, dès lors il n'a plus accès directement à la surface.

Liée à un milieu où il devient rapidement impossible de survivre sans une technologie éprouvée, la plongée Tech ne peut laisser aucune place à l'improvisation. Afin de contrôler et limiter les risques, le plongeur Tech doit avoir, avant toute chose, une sérieuse dose de paranoïa, doublée d'un désir légitime de prévoir toutes les possibilités en cas d'incident ou d'accident.

2.3.2. La remise en question

Le premier équipement dont ait besoin un plongeur Tech est un cerveau, il arrive un moment où il faut rassembler ce qui nous reste de neurones, non encore détruits par les micro-bulles circulantes, et faire le point :

- Où suis-je ?
- Où vais-je ?
- Où cours-je ?

Pas besoin d'aller trouver votre psy avant d'envisager la plongée Tech, mais il faut se poser un certain nombre de questions.

J'ai acquis une certaine expérience en plongée et j'envisage la plongée Tech, quels sont les risques encourus ?

Est-ce que j'accepte les risques que je prends ?

Est-ce que mon entourage accepte les risques que je prends ?

Ces questions vous conduisent à réfléchir au prix des choses et de savoir si le fait de prendre de tels risques est justifié et c'est là, le premier pas vers la sécurité.

On ne doit pas plonger profond pour se prouver qu'on est capable de descendre, mais au contraire, on peut plonger profond **quand on sait** qu'on est capable de descendre.

- Forme physique, psychique, aspect émotionnel, êtes-vous prêt ? (la seule pression devrait être celle de l'eau)
- Acceptez-vous les risques liés à la pratique de cette discipline ?
- Votre entourage accepte-t-il les risques que vous prenez ?
- Aspect des assurances (CMAS, PADI, DAN, autres) ?

En plongée Tech rien n'est pire que la confiance qu'inspirent l'expérience et la routine !

2.3.3. Plongée profonde à l'air

L'air est bien adapté pour les interventions de longues durée jusque vers -40 mètres et de courtes durées, jusqu'à -50 mètres. En dehors de ces zones restreintes de profondeur, toute analyse d'optimisation dans le choix des gaz respiratoires aboutit à recommander la plongée avec des mélanges synthétiques suroxygénés ou sous oxygénés et contenant éventuellement de l'hélium pour les zones profondes.

Au niveau de la CMAS, la plongée loisir sportive à l'air, est limitée à la profondeur de **-50 mètres**. L'expérience dans tous des domaines nous prouve que cette limite est parfaitement fondée. Mais rappelons brièvement les facteurs limitatifs de la plongée à l'air :

- La narcose à l'azote apparaît vers la profondeur de -40 mètres provoquant une diminution des capacités intellectuelles et physiques
- Le risque d'essoufflement est dû entre autres à la densité de l'air respiré
- L'hyperoxie, l'oxygène devient toxique lorsqu'il est respiré à des pressions supérieures à 1.6 bar, correspondant à une profondeur de -6 mètres s'il est respiré à 100% et à une profondeur de - 66 mètres respiré avec de l'air

Aujourd'hui, de nombreux plongeurs s'aventurent à l'air au-delà de ces limites, voire dans la zone à 3 chiffres, des accidents mortels viennent nous rappeler que l'organisme humain n'est pas fait pour résister à une telle agression.

La plongée profonde à l'air atteint ses limites à - 60 mètres !

2.3.4. Différences entre la plongée loisir et la plongée technique

- **La profondeur**

Avec ce type de plongée, le plongeur Tech est amené à explorer des sites situés en-dessous des limites de la plongée à l'air (> 50 mètres).

- **Les gaz**

La plongée Tech impose l'utilisation de mélanges ternaires (Trimix) pour le fond et des Nitrox plus ou moins enrichis pour optimiser la décompression.

- **Le plafond**

La plongée Tech se déroule dans des environnements (spéléo, épaves, paliers) ou le plongeur Tech n'a pas d'accès vertical direct vers la surface.

- **Le binôme**

Le partenaire doit être sûr et expérimenté, on doit en tout temps pouvoir compter sur lui. Suivant les circonstances, le plongeur Tech peut aussi être un plongeur solo.

- **L'équipement**

La plongée Tech se caractérise par l'utilisation d'équipements différents du scaphandre autonome conventionnel utilisé en plongée loisir (multi-bouteilles, recycleur, scooter, combinaison étanche, narguilé oxygène, masque facial, etc...)

- **La décompression**

En fonction des paramètres de la plongée, la décompression occupe plus du 75% de la durée de la plongée, les paliers peuvent être longs et commencent profonds.

2.3.5. La motivation

La plongée Tech trouve sa justification dans de nombreuses activités comme :

- **Plonger sur une épave**

Il y a autant de raisons de plonger sur épave que d'épaves à plonger. Même avec les moyens actuels de navigation et les bateaux insubmersibles (le cauchemar du plongeur . . .), il y a toujours de nouvelles épaves (collisions, tempêtes, incendies, iceberg). Chaque épave a sa propre personnalité et en appelle à la part de rêve qu'il y a en chacun de nous.

- **Découverte de constructions humaines**

Placée dans un autre environnement, une construction humaine prend un tout autre aspect, plein de mystère et de surprises. L'exploration d'un village englouti ou d'une abbaye au fond d'un lac du Jura, s'apparente à la découverte des ruines d'une cité perdue au milieu de la jungle.

- **Admirer la faune et la flore**

Les récifs et les épaves, surtout à grande profondeur, regorgent de vie et permettent d'y approcher un environnement relativement vierge de tout contact avec l'être humain. Les amateurs de biologie sous-marine peuvent même y découvrir des espèces introuvables à des profondeurs moindres.

- **Photographier et filmer**

La photo et la vidéo sous-marine permettent de rapporter des images saisissantes de sites intacts ou d'épaves doivent très photogéniques. Malgré les difficultés techniques liées au délicat combat pression-étanchéité, le plongeur amateur d'images sous-marines peut y voir un défi plus qu'intéressant à relever.

- **Assurer la sécurité des apnéistes**

Lors de records de plongées en apnée, la présence de plongeurs Tech est indispensable pour assurer la sécurité de l'apnéiste au fond. (Exemple record de Pipin au large de Cuba à – 162 mètres avec Pascal Bernabé)

- **Aller plus loin en spéléo**

La configuration de certains réseaux immergés bloque parfois les plongeurs spéléo qui se heurtent au délicat problème de la profondeur, du stock de gaz à emporter et du profil de décompression à suivre.

- **Battre des records**

Bien que cette motivation puisse paraître peu recommandable en plongée, elle est pourtant à la base d'un certain nombre de plongées en mer, en lac ou souterraines. Il peut, bien sûr, s'agir de records officiels ou, plus modestement, de repousser ses propres limites.

2.4. La préparation psychologique

2.4.1. Généralités

En plongée Tech, la préparation psychologique est aussi importante que la planification des gaz, la décompression et le matériel. Car effectuer ce type de plongée, c'est avant tout accepter de prendre des risques, se fixer une discipline et se préparer à toutes les éventualités, dont celle de remonter en moins bon état qu'avant. C'est aussi mettre en œuvre des techniques qui dépassent souvent largement le cadre de la plongée loisir conventionnelle. La plongée, en soi est une activité impliquant des risques que l'on ne maîtrise jamais dans leur ensemble, pour la bonne raison qu'un certain nombre de données nous échappent (météo, conditions environnementales, réalités physiologiques du moment, etc...). Le meilleur moyen de limiter réellement une partie des risques serait de ne plonger que dans une zone où l'on peut à tout moment remonter en surface sans source d'air et sans problèmes.

Deux éléments sont particulièrement vrais en plongée Tech :

- **Un état de stress latent et permanent**

La notion de profondeur et la durée des paliers est constamment présente dans l'esprit du plongeur Tech. L'accumulation de stress, la pression du temps, la consommation et une éventuelle situation d'urgence peuvent faire basculer un plongeur, apparemment calme et compétent, en un être désespéré en proie à une panique liée à sa survie dans un environnement hostile.

- **Une confiance excessive liée à l'expérience**

L'apparition de la routine pour celui qui plonge régulièrement profond, peut entraîner un relâchement pouvant faire oublier que les risques sont toujours présents. La discipline des débuts disparaît peu à peu, les checklists se font moins complètes et les contrôles moins rigoureux. Jusqu'au jour où une accumulation de négligences conduit à un incident qui rappelle à l'ordre, dans le meilleur des cas.

Le plongeur Tech doit se préparer mentalement à cette activité si exigeante, pour s'immerger l'esprit tranquille, il devra :

- Avoir un bon contrôle de soi, il doit connaître ses propres limites, celles du binôme et ses réactions en cas de problèmes.
- Avoir une vision claire des dangers potentiels de la plongée. En fonction des circonstances présentes et être en mesure de fournir une réponse adaptée (technique de questionnement).
- N'avoir ni appréhension, ni impression de précipitation. Il ne doit avoir aucune inquiétude particulière ni pressentiment négatif.
- Avoir correctement accompli les phases de préparation de sa plongée. Il ne doit pas avoir de sensation de compromis au niveau des conditions de plongée ou de l'équipement.
- Visualiser sa plongée au préalable. Il s'agit de se relaxer et de répéter mentalement le déroulement de sa plongée.

2.4.2. Les sources de stress

- **L'autonomie**

Les bouteilles, même d'un volume important, se vident extrêmement vite. Ainsi à –100 mètres, un plongeur consomme ses tiers un bi 18 en 10 minutes environ. Une petite erreur de planification, une difficulté à s'équilibrer et le temps s'écoule mettant le plongeur en risque d'autonomie. Cela revient à plonger avec 2 fois 6 litres à –30 mètres de profondeur en consommant un tiers de son air avant d'amorcer la remontée.

- **La décompression**

Une erreur de 5 minutes sur la durée du séjour au fond entraîne une augmentation tragique de la durée des paliers. Ainsi, à –100 mètres de profondeur, 5 minutes de trop entraînent un allongement des paliers de 1 heure 40 minutes. Ce n'est pas très grave si on a prévu les bouteilles nécessaires, c'est de toute façon très inconfortable. De même une erreur de planning à la remontée, trop lente par exemple, un séjour trop important dans les paliers profonds (à –100 mètres, les premiers paliers sont dans la zone des -70 mètres) entraînent automatiquement le « repli » sur des paliers de durée plus importante, il faut passer sur le profil supérieur.

- **La pression collective**

Cette pression provient du fait que celui qui ne veut pas plonger profond mais qui le fait, contraint, afin de faire plaisir au partenaire ou à cause de l'investissement engagé en terme de temps et d'argent. Ce comportement de devrait pas avoir sa place en plongée profonde, car chaque plongeur dépend des autres.

- **La surcharge attentionnelle**

Le plongeur Tech doit effectuer rapidement et efficacement plusieurs tâches en même temps, notamment lors de la descente (équilibrage des oreilles et de la Wing, changement de mélange, surveillance du binôme, ses paramètres de plongée, etc...). Il doit en permanence gérer sa plongée, son environnement, son binôme, les gaz qu'il respire et les tâches qu'il veut effectuer, sans oublier de se faire plaisir à l'occasion.

- **L'imprévu**

Rien n'est pire qu'une fuite de détendeur ou une sangle qui se rompt juste avant de se mettre à l'eau, c'est un instant d'énervement inutile en surface, qui aura généralement des répercussions psychiques sur toute la plongée.

- **L'équipement**

Le stress est accentué par la surcharge matérielle que le plongeur peut avoir, due à un stock de gaz important, à du matériel de prise de vue encombrant, à de trop nombreuses bouteilles.

- **Les problèmes personnels**

Des soucis d'ordre personnel, hors de la plongée, peuvent néanmoins interférer avec son bon déroulement. Tout comme une fatigue ou un énervement professionnel qui s'accumule.

- **L'environnement**

Le froid, l'obscurité due à la profondeur, l'appréhension de la découverte d'une épave, une visibilité limitée, sont autant de facteurs supplémentaires de stress.

Tous ces paramètres peuvent être des éléments essentiels qui font basculer dans le domaine du cauchemar ce qui ne devrait rester qu'un loisir.

2.4.3. Les conditions requises pour plonger profond

Face aux risques inhérent à l'utilisation de mélanges autres que l'air et aux divers accidents survenus, les plongeurs Tech ont mis au point un éventail de techniques basées sur leur expérience et sur les méthodes employées en plongée spéléo ou en plongée industrielle. Sheck Exley a ainsi clairement défini les conditions requises pour une plongée profonde, il faut :

- **Une bonne attitude**

Une évaluation claire des risques est nécessaire pour effectuer une plongée Tech en toute sécurité. Le jeu en vaut-il la chandelle ? Pourquoi faire cette plongée ?

- **De sérieuses connaissances**

Sans les connaissances nécessaires, il n'y a aucune possibilité de choix en cas de problèmes. Le plongeur Tech doit connaître toutes les procédures d'urgence possibles (voir la technique de questionnement).

- **Un équipement adapté**

Chaque plongée nécessite une certaine gamme d'outils. Le stock de gaz est sûrement le facteur de risque le plus important en plongée Tech. La redondance, la quantité de gaz nécessaire, le choix du mélange gazeux, son marquage rigoureux font partie des éléments essentiels.

- **Une bonne formation**

Les différentes techniques doivent être une seconde nature. Un cours est la première étape, mais la pratique répétée est nécessaire. La plongée Tech est une discipline et non un simple brevet.

- **Une solide expérience**

C'est l'exposition longue à des conditions environnementales particulières. Plus la plongée se fait dans des conditions différentes de la plongée loisir et plus les risques sont élevés. Rien n'éliminera complètement ces risques.

- **Une bonne forme psychique**

Il faut être bien dans sa tête pour flirter avec ses propres limites, ne pas hésiter à annuler une plongée si l'on ne se sent pas en forme.

3. Sécurité et formation

3.1. Introduction

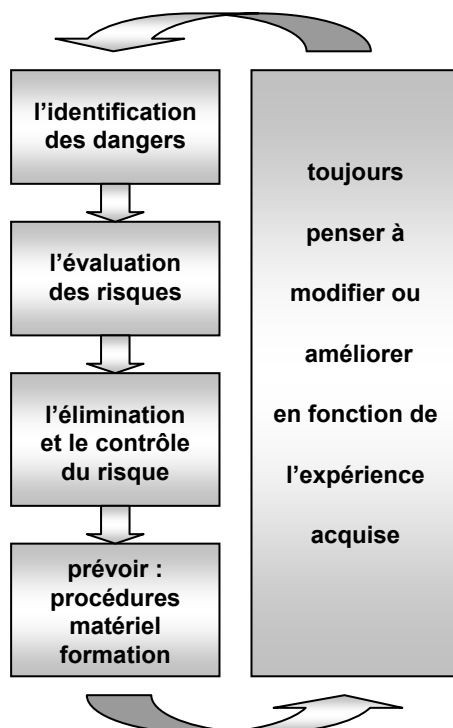
Lorsque l'on pratique la plongée Tech, il y a la nécessité de prévoir les choses qui vont foirer et de s'organiser pour les contrôler ou les éviter, chez IANTD (International Advanced Nitrox and Technical Divers) ils appellent cela le « Risk Management » la gestion du risque.

Toujours chez IANTD, un responsable martèle le message à sa façon : « la sécurité est l'un des points clefs de la plongée », « le prix de la réussite est une éternelle vigilance » et pour mieux convaincre « la stupidité est un moyen de sélection naturelle ». En dehors de ces grandes théories il existe des approches systématiques pour éviter les accidents. L'industrie a eu des théoriciens qui ont su distinguer des principes pour organiser cette sécurité. Ainsi, un système cohérent repose sur un trépied à savoir mon matériel, mes procédures et ma formation sont cohérentes.

3.2. La gestion des risques en 5 étapes

3.2.1. Généralités

Ce qui différencie un plongeur Tech d'un plongeur loisir c'est sa capacité à anticiper. Tout le monde peut avoir un problème, mais celui qui y aura déjà pensé saura agir pour en sortir. La planification est le premier outil de la sécurité, la base de l'enseignement de la plongée Tech. La méthode de l'évaluation des risques en 5 étapes n'est autre qu'un « pense-bête » pour nous amener à planifier nos plongées, après c'est trop tard. On est plus dans le domaine de la prévision, mais de la surprise, et il peut y en avoir de mauvaises.



3.2.2. L'identification des dangers

La première étape consiste à imaginer ce qui peut mal se passer. Certains problèmes sont évidents, en cas de panne de détendeur, vous savez que vous n'avez que deux options : soit respirer sur un autre détendeur, soit respirer de l'eau. Vous savez que vous ne respirerez l'eau pas longtemps si bien que vous vous arrangez pour pouvoir prendre votre détendeur de secours ou arracher celui de votre partenaire. D'autres problèmes latents sont plus sournois et c'est malheureusement l'apanage des vieux plongeurs d'avoir tout vu et tout entendu. Si vous ne voulez pas croire qu'un mousqueton d'escalade accroché à votre stab est un piège qui peut être mortel, il vous faudra attendre que le doigt s'ouvre tout seul et emprisonne un câble ou un fil d'Ariane dans une épave pour le découvrir. C'est la pédagogie de la découverte, mais dans certains cas il vaut mieux laisser les autres découvrir à votre place.

3.2.3. L'évaluation des risques

Un danger n'est pas toujours un problème. Au moment où je rédige ces lignes, il existe un risque objectif réel qu'une météorite s'écrase sur mon toit, me pulvérisant moi et mon ordinateur. Comme vous, je prends ce risque sereinement. La raison est que si le risque est réel, sa probabilité est très faible et je décide de ne pas m'en soucier. Par contre lorsque, avant la mise à l'eau, je découvre 120 bars dans mon bi alors que j'en attendais au moins 180, je prends un risque réel de terminer mes paliers dans un caisson de recompression dans le meilleur des cas si je ne change pas le plan de ma plongée. Un danger devient un problème lorsque son risque d'occurrence devient significatif, mais comment connaître ce risque ?

La difficulté est qu'il existe 2 risques, le risque objectif et le risque subjectif.

- **Le risque objectif**

C'est le risque que pourrait préciser par exemple un comité d'experts et/ou une assemblée de spécialistes, tous froids et déterminés.

- **Le risque subjectif**

C'est celui que je ressens tout seul hésitant au bord de l'échelle. Le risque que je perçois est lié à mon expérience, c'est clair, mais aussi à mes motivations. On touche alors à des choses obscures et profondes qui ne sont pas toujours avouables. Certaines sont saines et nous poussent à progresser, d'autres sont discutables et visent simplement à nous afficher, nous faire valoir, nous donner un rang. La différence entre risque réel et risque perçu est l'origine de tout drame. Nous avons tous dépassé dans un virage sans visibilité. Pourquoi ? Parce qu'à cette époque nous avons confiance en nos réflexes, nous pensons que la route était déserte, nous étions euphoriques. Pourtant, si nous analysons froidement la situation, le risque était réel de déboucher sur une voiture que nous n'avions pas vue. Il faut aussi apprendre à se méfier de soi-même.

3.2.4. Le contrôle et l'élimination

Une fois le risque reconnu, le reste devient facile. Il faut, soit éliminer le risque, soit le contrôler pour qu'il devienne acceptable. On peut aussi renoncer, mais ce n'est pas le plus facile. Si je découvre que les détendeurs à étrier sont des sources de problèmes permanents parce que les joints s'extrudent continuellement et si je n'aime pas les joints toriques qui sautent en pleine plongée, je décide de passer au montage de type DIN. Le joint est maintenant au fond de robinetterie et ne peut plus bouger. Lorsqu'on peut éliminer un risque, il ne faut pas s'en priver. Malheureusement, la plupart des risques ne peuvent pas être éliminés simplement. On se contente alors de les contrôler dans des limites acceptables. Un détendeur 100% fiable n'existe pas, comme vous ne pouvez pas compter sur lui que vous ne voulez pas accepter l'idée d'une RSE (respiration sans embout) de -70 mètres. Le jour où il tombe en panne, vous en prendrez un second.

Le détendeur de secours ne résout pas le problème de la fiabilité des détendeurs, il réduit uniquement les conséquences dramatiques d'une panne. C'est ce que l'on appelle la redondance, le principe de la ceinture « et » des bretelles. Chaque fois qu'une pièce d'équipement est critique, il faut la doubler, car le jour où elle vous lâche, vous n'avez plus que vos larmes pour pleurer (si vous êtes encore vivant). De plus, si cette pièce d'équipement doit tomber en panne, elle le fera, en général au moment où cela vous arrange le moins. Il faut donc prévoir à l'avance de se raccrocher à autre chose. La nature a bien fait les choses, regardez-vous dans la glace, tout ce qui est critique est doublé, 2 yeux, 2 oreilles, 2 poumons, 2 testicules, etc...

Tout ce qui est singulier est d'une importance secondaire. Si en termes d'équipement on parle de « redondance », en termes de procédures on parle de « rattrapage ».

Si vous ratez l'épave ou le tombant et que le courant vous emporte vers les Baléares, il est bon d'avoir une table 10 minutes de temps au fond pour remonter sans tarder. De même sur l'ardoise au poignet il est rassurant de trouver la table pour « un plan plus profond, un plan plus long, panne des mélanges de décompression, remontée d'urgence ». Les procédures de rattrapage sont spécifiques à chaque plongée et elles doivent être définies à l'avance, c'est le domaine du QFS (Que Fait-on Si). Il faut savoir aussi s'arrêter, je ne pense pas que 3 détendeurs soient mieux que 2, car ils rajoutent un problème de configuration.

3.2.5. Le trépied

Toute approche de la sécurité s'assoit sur le trépied à savoir l'équipement, les procédures, la formation et il suffit de les prendre tour à tour. Chaque fois que vous introduirez un équipement nouveau, il faudra envisager d'apprendre à s'en servir. Si pour ne plus sortir de l'eau avec des testicules de hamster vous investissez dans un vêtement étanche, il vous faudra choisir un modèle adapté à vos plongées (équipement), connaître les risques (procédures) et vous entraîner à l'utiliser (formation). De même si vous évoluez vers des techniques nouvelles, il vous faudra prévoir un matériel adapté. Pas la peine de capeler deux bouteilles relais si vous n'avez qu'un stab avec 15 litres de flottabilité.

- **L'équipement**

- Les bons outils pour faire du bon travail
- Toujours avoir le meilleur équipement possible, l'entretenir comme il se doit
- Conduire une analyse de risque, toujours emporter le matériel d'urgence nécessaire
- Doubler les fonctions critiques

- **Les procédures**

- La planification est indispensable
- Prévoir à l'avance le déroulement de la plongée, planifier les besoins
- Prévoir les dérapages, connaître les procédures de rattrapage et de secours
- Définir un chef de plongée responsable des opérations en surface (lorsque cela est nécessaire)
- Plonger à deux, assurez-vous de pouvoir porter assistance à votre partenaire à tout moment
- Mettre en place des moyens de communication entre plongeurs (ardoises) et entre plongeurs et la surface (parachutes, ardoises, ascenseur)

- **La formation**

- Se donner le temps et les moyens pour acquérir un niveau de formation correspondant aux buts fixés
- Maintenir un niveau d'entraînement élevé pour effectuer de telles plongées
- La formation doit être dispensée par des organismes reconnus et compétents
- Sans connaissances, on n'a pas d'options
- Les gestes importants doivent devenir réflexes, c'est la mémoire des muscles

3.2.6. La modification et l'adaptation

C'est la partie la plus noble et la plus intéressante de cette démarche. Elle nous fait progresser alors que nous avons une tendance naturelle à la nonchalance. Rappelez-vous le jour où vous avez troqué votre bouée Fenzy contre un stab, votre réserve contre un manomètre, vos tables contre un ordinateur. Vous êtes heureux maintenant, mais avouez que sur le moment quel déchirement. Tout changement est douloureux, c'est pourquoi ce système nous aide un peu. L'idée est de tirer parti de l'expérience, de changer ce qui ne marche pas, d'améliorer ce qui va bien. C'est devenu la tarte à la crème des systèmes d'assurance qualité mis en oeuvre dans l'industrie. C'est un principe que les plongeurs Tech américains adorent : positiver ses erreurs et prendre à partir de ses échecs. C'est pourquoi il faut être attentif aux choses et aux idées, et conduire une remise en question permanente. Il est bon de rencontrer les autres plongeurs de regarder leur équipement, de noter leur façon de faire.

3.3. La planification

3.3.1. Généralités

En circuit ouvert comme en recycleur, un plongeur Tech passe plus de temps à préparer ses plongées qu'à les réaliser. Des jours de préparation pour une vingtaine de minutes au fond, mais quand il se met à l'eau tout est en place pour le succès, normalement il n'a plus qu'à faire des bulles. Planifier ses plongées c'est prendre le temps de faire sa check-list avant de partir, la plongée est un sport mécanique puisque nous dépendons lourdement de notre matériel, au même titre que l'aviation. Aucun pilote ne décolle sans faire sa check-list, aucun plongeur ne devrait sauter à l'eau avant d'avoir vérifié ses fonctions principales. Il y a plusieurs check-list à prévoir, de la préparation du sac de plongée à la mise à l'eau, il y a des check-list plus rapides et plus efficaces que d'autres.

Pour devenir un vieux plongeur, planifier vos plongées, la planification est le premier outil de la sécurité, la base de l'enseignement de la plongée Tech. Un plongeur Tech est un plongeur qui planifie sa sécurité.

Cependant, il faut faire attention avec la sécurité à outrance, en effet, le plongeur Tech doit accepter certains risques, il faut savoir gérer correctement cette sécurité.

Augmenter la sécurité à outrance dans un domaine ne doit pas avoir comme conséquence d'augmenter un risque dans un autre domaine. Par exemple, le choix de la quantité de réserve de gaz deco ne doit pas surcharger le plongeur en bouteilles.

3.3.2. Les dix règles d'or

1. **Contrôler personnellement la qualité et quantité des mélanges avant la plongée**
2. **Planifier ses plongées (objectif, gaz, décompression)**
3. **Limiter l'effectif des palanquées à deux plongeurs maximum**
4. **Doubler les fonctions critiques (redondance)**
5. **Respecter au minimum la règle des tiers pour la consommation**
6. **Surveiller mutuellement son partenaire**
7. **Entretenir une bonne condition physique et psychique**
8. **Se remettre constamment en question**
9. **En phase décompression, prévoir une liaison systématique paliers-surface (parachute)**
10. **Disposer de moyens d'alerte et procédures de secours**

3.3.3. La liste de contrôle

Afin de s'assurer que non seulement tout le matériel est opérationnel, mais que tous les plongeurs savent ce qu'ils doivent faire durant le cours normal de la plongée, et en cas d'urgence, une liste de contrôle est un élément appréciable. La liste ci-dessous (de A à I) fournit un moyen alphabétique et mnémotechnique utile dans la plupart des circonstances de plongées profonde aux mélanges. A chacun de la personnaliser et de la compléter d'éléments propres à un environnement particulier ou à des activités spécifiques.

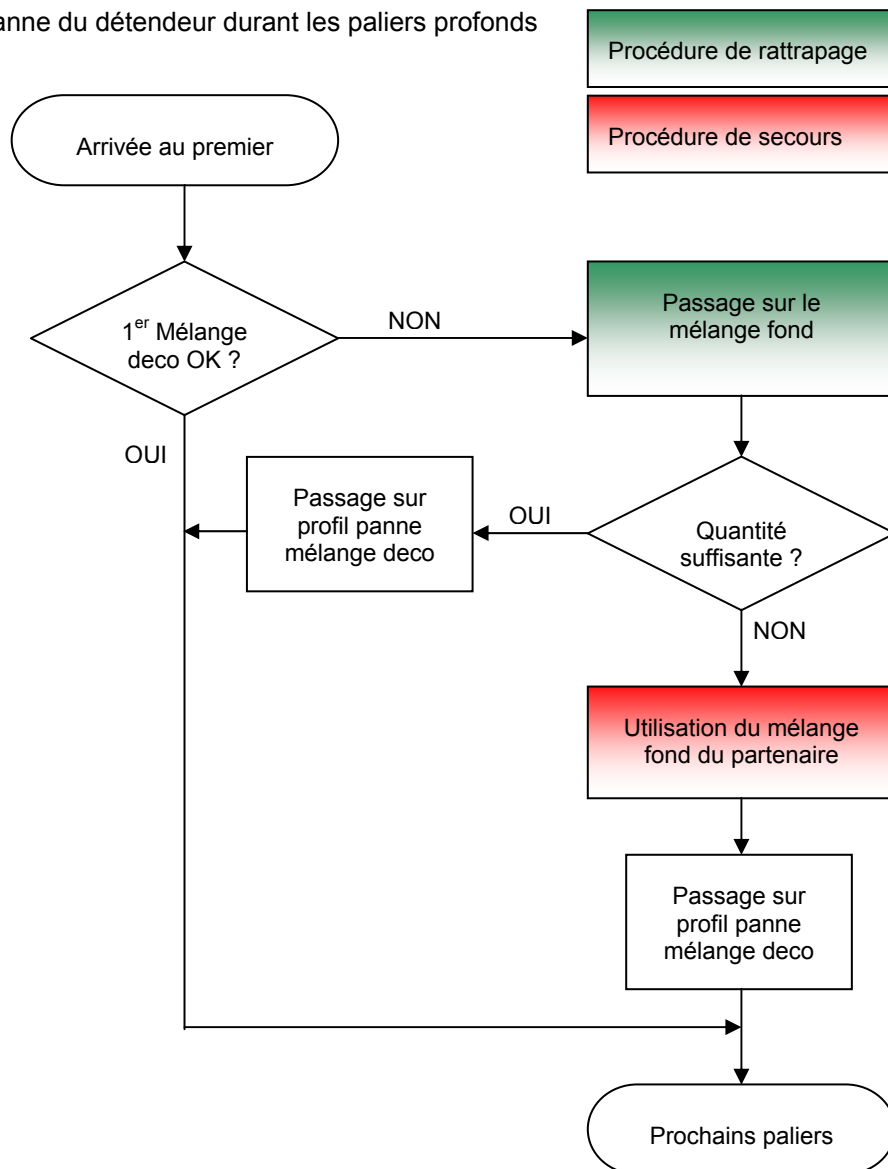
Activités	
→ Objectif plongée	Explo, épave, photo, film, assistance apnée, spéléo, record
→ Profondeur maximale	--
→ Parcours, caps, orientation	--
Buble Check	
→ Robinets du mélange fond	Ouverts
→ Vanne d'isolation mélange fond	Ouverte selon les configurations
→ Robinets des mélanges deco	Fermés sous pression
→ Manomètres	Sous pression, indiquent les mêmes paramètres
→ Détendeurs	Fonctionnent + ne fusent pas
→ Inflateur combinaison et purges	Branché + fonctionnent + pas de fuites
→ Inflateur Wings et purges	Branché + fonctionnent + pas de fuites
→ Instruments	Indiquent les mêmes paramètres + réglés
→ Phare(s)	Fonctionnent
Communications	
→ Signaux manuels et lumineux	--
→ Ardoise	--
→ Parachute(s)	Couleurs différentes (rouge = OK, rouge + jaune = besoin de gaz)
Décompression	
→ Stratégie	Bühlmann, Pyle, WKPP, Grandients Factors, RGBM
→ Contrôle	Instruments, table(s), ordinateur(s)
→ Profils	Durée plus courte (un, voir deux) Dépassement de durée (un, voir deux) Dépassement profondeur Dépassement de durée et profondeur Panne de mélange travel et deco Panne de mélange travel et deco avec dépassement durée Remontée d'urgence contrôlée
Equipement	
→ Configuration	Mélanges fond, décompression, détendeurs, positions, fixations
→ Protection thermique	Combinaison étanche, chauffage
→ Locomotion	Propres moyens, scooter
First aid	
→ Analyse ABC	Aériennes (conscience), Bouche (ventilation), Coeur (circulation)
→ Oxygénothérapie	Type (ouvert, recycler), Capacité, Mano-détendeur, Limites
→ Trousse de secours	--
→ Moyen(s) de communication	Téléphones fixes, portables, VHF
→ Evacuation	Accès aux secours, route, chemin
Gaz	
→ Analyse des gaz et étiquetage	Vérifier la qualité et la quantité
→ Genre des gaz	Mélanges fond et deco : HélioX, Trimix, Oygène pur, Nitrox, Air
→ Quantité des gaz	Réserve mélange fond et deco (33% et 50%)
→ Changement des gaz	Descente, remontée, profondeur(s)
Horaires	
→ Heure d'entrée et de sortie	--
→ Durée au fond	--
Interrogations	
→ Gaz	Manque, panne, perte de gaz, intoxication
→ Décompression	Profils d'urgence (voir plus haut)
→ Environnement	Courant, houle, filets, animaux, épaves
→ Personnel	Perte partenaire, essoufflement, ivresse, pression psychologique
→ Equipement	Fuites, débits continu, dysfonctionnement, perte
→ Divers	Miction, déshydratation

3.3.4. Les procédures

Un imprévu et le plongeur Tech doit faire preuve de souplesse adaptative, on dit qu'il se raccroche à une procédure de rattrapage. Un accident et le plongeur passe sur les procédures de secours, parfois l'un puis l'autre. On rentre donc dans le problème de sécurité, à savoir la nécessité de planifier ses ennuis et rationaliser ses réponses. Le plongeur en plus des procédures normales, a besoin de préparer ses procédures de rattrapage et de secours.

Les procédures de secours ne sont pas une nouveauté. En principe, le problème est déjà connu et vous savez prendre en charge les cas principaux tels qu'un accident de décompression ou une surpression pulmonaire. Les conduites à tenir sont détaillées dans tous les manuels de plongée. Il est plus difficile de se faire un avis sur les actions à mettre en œuvre lorsqu'un plongeur fait une crise hyperoxique au palier ou boit un jus de filtre à chaux sodée. Disons que suivant les conditions, la mise au point de ces procédures peut demander du travail.

Exemple : Panne du détendeur durant les paliers profonds



3.3.5. La technique du questionnement « QFS »

En plongée Tech il faut prévoir l'imprévu, il faut établir des procédures pour se sortir d'une situation qui n'était pas dans le script initial et qui n'est pas encore une urgence. Il n'y a pas encore péril en la demeure mais il faut prendre une décision. Le QFS (Que Fait-on Si) est un outil qui permet d'identifier et de retenir les procédures de rattrapage. Ci-après quelques exemples, la liste n'est pas exhaustive.

Constatations	Actions
Je dépasse la profondeur planifiée	Passage sur profil + 3 mètres
Je dépasse le temps de séjour planifié	Passage sur profil + 3 minutes
Je dépasse la profondeur et temps de séjour planifiés	Passage sur profil + 3 mètres et 3 minutes
Je remonte trop lentement	Passage sur profil + 3 minutes
Je remonte trop rapidement	Passage sur profil de remontée d'urgence
Je remonte au bout de 2 minutes de durée au fond	Passage sur profil durée plus courte
Le site prévu est introuvable	Je remonte
Je perds mon partenaire	Je remonte
Deux instruments ont des indications différentes	J'utilise l'instrument indiquant la valeur maximale
Il y a du courant en surface et/ou au fond	Je ne lutte pas, je remonte
Je suis essouffé	Je remonte
Je me prend dans un filet	Je découpe le filet à l'aide de mon sécateur et je remonte immédiatement
Je consomme dans la réserve des tiers (fond)	Je planifierai mieux la prochaine plongée
Je consomme dans la réserve des moitiés (deco)	Je planifierai mieux la prochaine plongée
Mon détendeur principal fuse	Je ferme le robinet correspondant et je passe sur le détendeur de secours et remonte
Mon détendeur de secours ne fonctionne pas après avoir passé sur ce dernier	Je demande de l'air à mon binôme
Mon manomètre fuit	Je ferme rapidement le robinet correspondant
Le robinet de mon détendeur principal fuit	Je ferme le robinet d'isolation de mon bi
La bouteille relais du mélange deco est vide au moment de passer dessus	Passage sur mélange fond et utilisation du profil panne mélange deco
Le détendeur du mélange deco part en débit continu	Passage sur mélange fond et utilisation du profil panne mélange deco
Manque de mélange deco avant la fin des paliers	Utilisation autre mélange deco (si existant) et utilisation du mélange du partenaire Passage sur mélange fond (si normoxique) à la profondeur des paliers et demande de gaz en surface
Je perd le Run Time	Passage sur profil + 3 minutes
Je perd la planification de la décompression	J'utilise la table de secours
Je ne retrouve pas l'ancre	J'utilise mon parachute et dévidoir
Je part en décompression dérivante	J'effectue mes paliers coûte que coûte
Je perds mon parachute/dévidoir principal	J'utilise mon parachute/dévidoir de secours
Je m'emmêle dans mon parachute en le lançant	Je découpe le fil à l'aide de mon sécateur
J'ai des nausées aux paliers	J'effectue mes paliers coûte que coûte
J'ai un besoin urgent d'uriner	J'utilise un urinator ou des couches
La sangle de mon masque se rompt	J'utilise mon masque de secours
La sangle d'une de mes palmes se rompt	Je remonte, le cas échéant à l'aide de mon binôme
Mon phare principal s'éteint	J'utilise ma lampe de secours
L'un de mes gants étanche prend l'eau	J'utilise des sous-gants en néoprène
La purge de ma combinaison étanche fuit	Je remonte à l'aide de mon stab
La purge de ma wings fuit	Je remonte à l'aide de mon parachute de palier
L'inflateur de ma combinaison/stab se met en débit continu	Je débranche l'inflateur en question
Le palier à -3 mètres est impossible à cause de la houle	Passage sur profil palier à -3 mètres impossible

3.4. La formation

3.4.1. Généralités

La maîtrise de la technique nécessaire à la pratique de la plongée Tech (planifications, utilisation de différents gaz, utilisation de parachutes, rigueur de la décompression, etc...) nécessite obligatoirement le suivi d'une formation spécifique en fonction de ses besoins. Cette formation doit être dispensée par des moniteurs formés par des organismes reconnus et compétents. Ce type particulier de plongée est aujourd'hui copié sur des méthodes et des techniques professionnelles. Ces méthodes de plongée peuvent paraître plus contraignantes qu'en plongée loisir, mais c'est de cette façon uniquement que vous pourrez aborder ce type de plongées avec le maximum de sécurité. La structure de formation diffère selon les organismes de formation. Elles comprennent généralement une ou plusieurs étapes permettant la maîtrise de l'utilisation des Nitrox avant d'accéder à l'utilisation du Trimix.

3.4.2. Les organismes de formation

La plupart des écoles de plongées Tech forment des plongeurs aptes à planifier et effectuer d'une façon autonome des plongées avec des mélanges synthétiques suroxygénés autres que l'air. Ces organismes sont :

- CMAS (Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques) en Suisse CMAS.CH
- TDI (Technical Diving International)
- IANTD (International Advanced Nitrox and Technical Divers)
- TSA (Trimix Scuba Association)
- ETDS (European Technical Diving School)
- EEPM (Ecole Européenne de Plongée aux Mélanges)
- ANDI (American Nitrox Divers Incorporated)
- DSAT (Diving Science And Technology)
- PTA (Pure Tech Agency)



3.4.3. Formation Plongeur Trimix niveau 1 CMAS.CH

- **But et organisation**

Donner au plongeur une bonne compréhension des problèmes et des techniques spécifiques de la plongée avec Trimix « normoxic » (mélange gazeux Trimix avec une FO₂ > 18% respirable en surface) et de l'équipement supplémentaire nécessaire pour ces plongées.

Donner au plongeur une compréhension claire des aspects physiques et physiologiques des plongées avec Trimix « normoxic », ainsi qu'aux stratégies utilisées.

Donner au plongeur une compréhension claire des méthodes de planification des plongées trimix « normoxic » y compris l'évaluation des risques, le choix de l'équipement, la configuration de l'équipement, la gestion des gaz, la planification d'urgence, la décompression accélérée et de l'appui de surface.

- **Admission au cours**

- Age minimal 18 ans
- P*** CMAS.CH ou équivalent
- Plongeur Nitrox confirmé CMAS.CH ou équivalent
- 150 plongées comme P*** dont 20 plongées comme plongeur Nitrox confirmé
- Certificat médical valable selon CMAS.CH

- **Organisation et durée formation**

- 24 h de formation théorique en salle
- 6 plongées de min. 300 minutes au total avec un max. de 2 plongées/jour avec intervalle de surface > 3h

- **Equipement**

- Tous les équipements en parfait état et certifiés par un organisme officiel (EMPA, CE)
- L'instructeur doit fournir tous le matériel de cours et les gaz nécessaires (sauf argon)
- Le participant utilise du matériel prévu et certifié pour l'usage avec mélanges autre que l'air (service O₂)
- Le participant doit être équipé avec du matériel dont il a la parfaite maîtrise et doit disposer de :

Bi-bouteille, 2 bouteilles déco, Wing avec 2 sacs (si combi étanche, 1 seul suffit), Runtime boards et Wet Note, 2 détendeurs dont un 1^{er} étage avec tuyau de longueur (1.90 à 2.20 m) et 1^{er} étage avec tuyau longueur standard, 2 manomètres, 2 lampes (dont 1 réserve), 2 outils de coupage, 2 masques, 1 dévidoir avec 100m de ficelle, 2 bouées de déco rouge et jaune (alimentées par bouteille séparée ou sur Mix fond), 1 combi de plongée propre à la température de l'eau (si combi étanche, l'alimentation doit être séparée), 2 instruments de mesures de temps et profondeur (ou 2 ordinateurs de plongée appropriés)

- **Limitations lors de la formation**

- Profondeur maximale : 60m
- Temps minimum de plongée : 300min
- END maxi : 30m (PN₂ max = 3.2 bars)
- PO₂ maxi : 1.3 bar Mix fond et 1.6 bars Mix déco
- SNC maxi : 85%
- Dans l'eau rapport moniteur-élève : 1/2
- Elèves sous la surveillance directe d'un moniteur TX
- FO₂ Mix fond : > 18%

3.4.4. Connaissances théoriques et pratiques Plongeur Trimix niveau 1 CMAS.CH

• Connaissances théoriques

- Physiologie et physique. Propriétés des gaz, gaz réel, notions END, MOD, SNHP, Best Mix, solubilité gaz (O₂, N₂, He) dans les tissus du corps humain. Effets et toxicité des gaz (O₂, N₂, CO, Ar, etc...). Aperçu d'autres gaz inertes. Effets à long terme de la plongée profonde, PFO et plongée profonde. Formation de bulles et Deep-stop
- Planification et choix des mélanges (fond, travel, déco), standards et définis par le plongeur, Best mix, Nitrox, Hélicair, Trimix, marquage bouteilles
- Planification de la consommation et réserve des gaz (fond, travel, déco), perte de mélange déco et procédures de secours. Effets de l'oxygène, CNS, flux sanguin cérébral, réduction capacité vitale. RunTime, temps de déco et premier secours
- Equipement Trimix, équipements de base, réels, balise. Equipement pour la déco (couleurs bouées), station de déco, systèmes d'hydratation
- Température et ses effets, chaleur corporelle, symptômes hypothermie, hyperthermie, utilisation de gaz pour inflation (Argon)
- Planification de la plongée et déco, phases de la plongée (descente, fond, remontée), stratégies de décompression, gestion de la sécurité, rapports en surface
- Tables de déco Trimix existantes, tables individuelles (software), utilisation correcte des tables déco et Runtime

• Connaissances pratiques

- Planifier et exécuter une plongée Trimix normoxic dans les limites imposées par les gaz choisis
- Démontrer les méthodes d'essais du mélange Trimix normoxic
- Exécuter tous les contrôles et les changements de gaz prévus
- Démontrer sa capacité à s'équilibrer correctement en équipement complet
- Démontrer la capacité de manipuler correctement les bouteilles de décompression
- Démontrer sa capacité à gérer la perte du masque
- Démontrer sa capacité à utiliser correctement un outil de coupage
- Démontrer sa capacité à gérer une situation avec épuisement du gaz
- Démontrer sa capacité à savoir utiliser correctement et de façon sûre la bouée et le dévidoir (engagement des bouées déco rouge et jaune)
- Exécuter d'une manière sûre une plongée avec démonstration d'une perte de gaz
- Démontrer sa capacité à savoir isoler un robinet qui fuit ou premier étage défectueux
- Démontrer sa capacité à posséder les requis psychiques et physiques nécessaires à effectuer une plongée Trimix

3.4.5. Formation Plongeur Trimix niveau 2 CMAS.CH

- **But et organisation**

Donner au plongeur une compréhension claire des aspects physiques et physiologiques en ce qui concerne la plongée avec Trimix « sous normoxic », ainsi qu'aux stratégies utilisées.

Donner au plongeur une bonne compréhension des problèmes et des techniques spécifiques de la plongée avec Trimix « sous normoxic », de l'équipement supplémentaire nécessaire pour ces plongées et de la configuration de l'équipement.

Donner au plongeur une compréhension claire des méthodes de planification des plongées trimix « sous normoxic » y compris l'évaluation des risques, le choix de l'équipement, la configuration de l'équipement, la gestion des gaz, la planification d'urgence, la décompression accélérée et de l'appui de surface.

- **Admission au cours**

- Age minimal 18 ans
- Plongeur Trimix normoxic CMAS.CH ou équivalent
- 10 plongées Trimix normoxic après la formation plongeur Trimix normoxic, dont 2 plongées Trimix dans le dernier mois
- Certificat médical valable selon CMAS.CH

- **Organisation et durée formation**

- 8 h de formation théorique en salle
- 4 plongées avec au moins 300 minutes au total avec un maximum de 1 plongées/jour

- **Equipement**

- Tous les équipements en parfait état et certifiés par un organisme officiel (EMPA, CE)
- L'instructeur doit fournir tous le matériel de cours et les gaz nécessaires (sauf argon)
- Le participant utilise du matériel prévu et certifié pour l'usage avec mélanges autre que l'air (service O₂)
- Le participant doit être équipé avec du matériel dont il a la parfaite maîtrise et doit disposer de :
Bi-bouteille, mélange travel, bouteilles déco, Wing avec 2 sacs (si combi étanche, 1 seul suffit), Runtime boards et Wet Note, 2 détendeurs dont un 1^{er} étage avec tuyau de longueur (1.90 à 2.20 m) et 1^{er} étage avec tuyau longueur standard, 2 manomètres, 2 lampes (dont 1 réserve), 2 outils de coupage, 2 masques, 1 dévidoir avec 100m de ficelle, 2 bouées de déco rouge et jaune (alimentées par bouteille séparée ou sur Mix fond), 1 combi de plongée propre à la température de l'eau (si combi étanche, l'alimentation doit être séparée), 2 instruments de mesures de temps et profondeur (ou 2 ordinateurs de plongée appropriés)

- **Limitations lors de la formation**

- Profondeur maximale : 85m lors de la formation, après formation, la profondeur maximale est de 95m
- Temps minimum de plongée : 300min
- END maxi : 30m (PN₂ max = 3.2 bars)
- PO₂ maxi : 1.2 bar Mix fond et 1.6 bars Mix déco
- SNC maxi : 85%
- Dans l'eau rapport moniteur-élève : 1/2
- Elèves sous la surveillance directe d'un moniteur TX
- FO₂ Mix fond : < 18%

3.4.6. Connaissances théoriques et pratiques Plongeur Trimix niveau 2 CMAS.CH

- **Connaissances théoriques**

- Approfondir les connaissances acquises lors de la formation plongeur Trimix « normoxic ».
- Tables de décompression et Runtime
- Différentes méthodes de décompression
- Calcul de Best Mix
- Lois des gaz (gaz réel – idéale)
- Planification et choix des mélanges (fond, travel, déco), standards et définis par le plongeur, Best mix, Nitrox, Hélicair, Trimix, marquage bouteilles
- Planification de la plongée et de l'équipement
- Configuration de l'équipement hydrodynamique (inclus positionnement des bouteilles Mix travel et déco)
- Procédures en cas d'accidents, premiers secours
- Risques physiologiques lors de l'utilisation de différents mélanges gazeux et refroidissement
- Effet narcotique de l'oxygène (Théorie de Meyer Overton) et toxicité des gaz (O₂, N₂, CO, Ar, etc...), notions et limites (CNS, OTU, END, MOD au niveau de la mer et en altitude)
- SNHP, stress, vasodilatation, CDI, déshydratation, approvisionnement de liquides sous l'eau

- **Connaissances pratiques**

- Planifier et exécuter une plongée Trimix confirmée dans les limites imposées par les gaz choisis
- Démontrer les méthodes d'essais de tous les mélanges Trimix
- Exécuter tous les contrôles et les changements de gaz prévus
- Démontrer sa capacité à s'équilibrer correctement en équipement complet
- Démontrer la capacité de manipuler correctement les bouteilles de décompression
- Démontrer sa capacité à gérer la perte du masque
- Démontrer sa capacité à utiliser correctement un outil de coupage
- Démontrer sa capacité à gérer une situation avec épuisement du gaz
- Démontrer sa capacité à savoir utiliser correctement et de façon sûre la bouée et le dévidoir (engagement des bouées déco rouge et jaune)
- Exécuter d'une manière sûre une plongée avec démonstration d'une perte de gaz
- Démontrer sa capacité à savoir isoler un robinet qui fuit ou premier étage défectueux
- Démontrer sa capacité à posséder les requis psychiques et physiques nécessaires à effectuer une plongée Trimix

3.4.7. Formations WKPP GUE DIR

Pour faire simple, on peut dire que tout ceci se résume à 2 organisations et un concept, le tout orchestré par 2 hommes. George Irvine est à la tête du WKPP et Jarrod Jablonski dirige le GUE. Les 2 hommes partageant les mêmes idées, on retrouve donc la plupart des concepts DIR dans les cursus des 2 organisations.

- **WKPP**

Woodville Karst Plain Project, organisation dédiée à l'étude de la plaine karstique de Woodville (Floride). Cette organisation est donc entièrement tournée vers la plongée souterraine des grands réseaux de Floride. Actuellement dirigée par George Irvine, cette organisation a mis en oeuvre des matériels et procédures très strictes qui lui ont permis d'effectuer de remarquables explorations sans accident. L'exploration la plus spectaculaire fut celle réalisée par George Irvine et Jarrod Jablonski en 1999 à la source de Wakulla (5000m à -90m).

- **DIR**

Do It Right, 3 mots derrière lesquels se cachent des matériels et une manière de procéder :

Scooter Gavin (tow behind) développé par Gavin et Irvine
Hygiène de vie : condition physique hors du commun (marathon conseillé). Plongée à 2 (et qu'entre DIR, sinon danger). Blocs dorsaux reliés avec vanne d'isolation. 1 détendeur principal et 1 octopus (longueur et emplacement réglementaire) blocs relais alu neutres dans l'eau, tous portés du même côté. De l'autre côté, on trouve les blocs accu pour l'éclairage, surtout pas de casque et phare principal sur le dessus de la main. Combinaison toile (pas de néoprène). Bouée une vessie (style Halcyon). Tout ce qu'on emmène est utile, sinon on le laisse à la maison.

La décompression est sans doute un domaine où l'apport a été le plus important, le profil de remontée ne respecte pas les schémas classiques, paliers profonds et courts. Gestion des changements de gaz (toujours beaucoup d'hélium) et diminution des derniers paliers. Les mélanges de décompression sont également standardisés et à base de Trimix, l'azote est banni et pour finir de l'oxygène pur à -6m.

- **GUE**

Global Underwater Explorer. Organisation beaucoup plus « large » que le WKPP dans la mesure où son domaine d'activité est la plongée Souterraine et Mer. L'enseignement est très proche du DIR, sauf peut-être pour la décompression qui est plus conventionnelle. Ce sont eux qui commercialisent Deco Planner.

Plongeurs spéléo DIR en CCR passif



4. Décompression

4.1. Introduction

Les connaissances sur ce sujet vaste et complexe enseignés dans le cadre de la plongée loisir sont généralement suffisantes mais lorsque l'on commence à respirer des mélanges autres que l'air, il convient de faire particulièrement attention à cette phase délicate de la plongée qui peut durer plusieurs heures.

Planifier une décompression n'est pas chose aisée, c'est plus un art qu'une application car rien n'est établi de façon définitive. On pense trouver la solution quand la science découvre une autre théorie. En plongée Tech, la gestion de la décompression doit se faire avec rigueur. Les modèles de décompression (Haldaniens, à bulles, mixtes) les logiciels, le choix des mélanges fond et décompression, le type de décompression (à PO_2 variable ou constante) sont autant de paramètres qui vont influencer la durée de la décompression et la forme du profil mais aussi sur les gaz embarqués et donc l'organisation de la plongée et son déroulement. Modifier un facteur peut entraîner des changements en cascade. Comme d'habitude, il va falloir trouver des compromis et surtout LE compromis adapté aux plongées effectuées et au plongeur qui les effectue.

4.2. Les modèles de décompression

4.2.1. Généralités

La presque totalité des modèles de décompression reposent sur le concept de Haldane, il s'agit d'une représentation de la charge et décharge en gaz inerte dans laquelle le facteur principal est le taux de perfusion des tissus, et où l'organisme est divisé en compartiments, chacun étant caractérisé par sa période et par des critères de remontée. A la base, l'hypothèse de Haldane, qui conduit à une solution dite exponentielle car la courbe représentative de la tension de gaz inerte en fonction du temps est, en termes mathématique ou physique, une courbe exponentielle. Or le modèle de Haldane présente beaucoup de raccourcis pour ne pas dire de simplifications majeures. Pourtant ce modèle a connu un succès jamais démenti, et d'ailleurs les tables avec lesquelles nous plongeons, de même que les algorithmes de la plupart de nos ordinateurs de plongée reposent sur ce bon vieux modèle. En fait le succès du modèle doit beaucoup à la souplesse du système, rien n'est définitivement figé, et l'histoire de la décompression montre bien que depuis presque un siècle le nombre de compartiment varie, de même que les périodes associées ou les critères de remontée.

Par exemple, il existe un système à 12 compartiments (type MN90), un système à 8 compartiments (modèle ZHL8-ADT de Bühlmann), où un système à 16 compartiments (tables 86 de Bühlmann). Pour certains modèles les périodes vont de 3 à 120 minutes, pour d'autres, de 4 à 635 minutes. Enfin on rencontre divers critères de remontée, par seuils fixes (coefficients de sursaturation critique), par seuils variables selon la plage de profondeur (M-values de Workman ou coefficients a et b de Bühlmann). Ces critères de remontée, se matérialisent en général par des jeux de paliers ou bien encore, grâce à l'utilisation des ordinateurs de plongée, par le système des profondeurs plafonds (décompression en continu, par exemple chez Suunto).

Modèles souples, modulables, adaptables, les chercheurs ne s'y sont pas trompés et ont très souvent retravaillé à partir du modèle de Haldane, quitte à améliorer le système par leurs propres apports.

Or d'autres pistes sont suivies et répondent à un besoin croissant, celui de mieux maîtriser certains profils de plongée (plongées en mélange, longues et profondes), il s'agit de profils que traditionnellement le plongeur évitait tant que la table était le seul outil de décompression. La littérature spécialisée et certains articles s'en étant fait largement l'écho, on s'intéresse désormais à l'origine des bulles, à leurs conditions de croissance, aux possibilités de shunts pulmonaires ou cardiaques. D'autres chercheurs au contraire cherchent une modélisation probabiliste du phénomène.

4.2.2. Le modèle de Haldane

Afin de mener à bien les expériences de physiologie hyperbare et subaquatique, il fallut trouver une espèce animale proche de l'homme pour expérimenter les effets de la décompression. Le choix de Haldane se porta sur la chèvre parce que c'était un animal facile à se procurer en Grande-Bretagne, et que sa physiologie était parfaitement connue. En particulier son rapport masse grasse/masse maigre et son taux de perfusion (débit cardiaque/masse corporelle) sont voisins de ceux de l'homme.

Une étude préalable avait montré que cet animal était capable de présenter des accidents de décompression ayant la même expression que chez l'homme, et en particulier les bends. Le primate fut éliminé du fait de son attitude peu calme face à la douleur.

La démarche de Haldane et de ses collaborateurs a été de rechercher la relation entre une pression P_1 , à laquelle séjourne un animal pendant un temps prolongé, et la pression P_2 à laquelle il faut décompresser rapidement pour qu'il développe un accident de décompression.

Pour commencer, ils exposèrent des chèvres à une profondeur de 45 pieds (-14 m) durant 2 heures puis les décompressèrent rapidement : seules quelques chèvres ressentaient, semblait-il, quelques douleurs. Ils en conclurent donc qu'une différence de pression de 1 bar pouvait être tolérée.

Dans une deuxième série d'expérience, ils exposèrent des chèvres à 6 bars. Contrairement à leur première hypothèse, ils observèrent qu'il était possible de la décompresser jusqu'à 3 bars sans accidents. De même, après exposition prolongée à 8 bars, il fut possible de décompresser les animaux jusqu'à 4 bars. La conclusion s'imposait d'elle-même : le facteur pathogène n'était pas la différence de pression P_1-P_2 , mais le rapport P_1/P_2 . Avec P_1/P_2 égal à 2, aucun signe n'était à craindre.

Haldane émit alors l'hypothèse suivante :

Hypothèse 1

Si tous les tissus d'un organisme sont équilibrés avec la pression ambiante à la suite d'un séjour prolongé à cette pression, alors le rapport 2/1 est applicable dans toutes les situations de décompression, pour tous les tissus de cet organisme.

Dans la réalité, les séjours des scaphandriers ou des tubistes ne dureraient pas nécessairement aussi longtemps, et le retour à la pression atmosphérique ne s'effectuait pas par réductions successives de la pression de moitié. Il était donc nécessaire de déterminer comment se faisaient les échanges dans l'organisme lorsque le séjour était interrompu avant que tous les tissus fussent saturés.

Pour cela, on considère un homme respirant de l'air à la pression atmosphérique normale, qui est brutalement élevé au temps $t=0$ à la pression P_1 . Cette nouvelle pression de l'air se transmet instantanément aux gaz contenus dans les alvéoles pulmonaires. L'azote de ce mélange se dissoudra donc dans le tissu pulmonaire, puis dans la circulation pulmonaire. On sait que les molécules de gaz mettent 0.01 seconde pour atteindre le capillaire et que le temps de présence du sang dans le lit capillaire pulmonaire est d'environ 1 seconde.

Haldane en déduit donc une deuxième hypothèse :

Hypothèse 2

A la sortie des poumons, le sang artériel est complètement équilibré avec la pression des gaz régnant dans les voies aériennes. Si les pressions de gaz respirés changent, alors les pressions des gaz dissous dans le sang artériel changeront instantanément de la même façon.

Le sang artériel distribue ainsi les gaz dissous à tous les tissus de l'organisme. Pour pouvoir calculer ce qui se passe dans un tissu donné, Haldane fait les hypothèses supplémentaires suivantes :

Hypothèse 3

La pression des gaz dissous est uniforme à l'intérieur d'un tissu. En effet, les vitesses de diffusion des molécules de gaz sont très grandes au regard des distances inter capillaires, et pourvu que le tissu soit de composition homogène, l'existence de gradient de pression de gaz n'y est pas possible.

Hypothèse 4

Par analogie avec les échanges pulmonaires, on considère qu'à la sortie du tissu, le sang veineux est complètement équilibré avec la pression du gaz dissous dans le tissu. Par conséquent, puisque la pression du gaz est homogène dans le tissu, la pression du gaz dissous dans le sang veineux est égale à la pression du gaz dissous dans le tissu.

Hypothèse 5

Le tissu est isolé, il n'échange de gaz qu'avec la circulation sanguine et elle seule.

Dans ces conditions, on considère un tissu de volume V dans lequel un gaz, ayant un coefficient de solubilité s_2 est dissout à la pression P_1 . Il est vascularisé à un débit de volume v (ml/s). Le débit sanguin artériel est forcément égal au débit sanguin veineux sans quoi le tissu serait le siège d'une variation de volume.

Le gaz est dissout dans le sang avec un coefficient de solubilité s_1 .

A l'instant $t=0$, la pression du gaz dissous dans le sang artériel change pour une valeur P_1 . Le débit de gaz entrant dans le tissu est donc de $P_1 s_1 v$, alors que le débit de gaz quittant le tissu est $P s_1 v$.

La quantité de gaz accumulée dans le tissu est égale à la différence entre la quantité entrante et la quantité sortante, soit $(P_1 - P) s_1 v$. Si pendant un intervalle de temps Δt , la pression a varié d'une valeur ΔP , la quantité de gaz dissous dans le tissu a varié de $\Delta P s_2 V$. Comme le système est isolé, ces 2 termes sont égaux et on peut écrire :

$$\Delta P / \Delta t = (P_1 - P) s_1 v / s_2 V$$

Le rapport s_1 / s_2 est constant

Le rapport v / V représente le débit sanguin par unité de volume du tissu, c'est à dire le taux de perfusion

La modélisation des échanges gazeux tissulaires selon Haldane formule donc le théorème fondamental suivant : la variation de pression de gaz dissous dans un tissu ne dépend que de son taux de perfusion. Or pour pouvoir intégrer l'égalité, il faut que le terme $s_1 v / s_2 V$ soit constant, Haldane fait l'hypothèse suivante :

Hypothèse 6

Pendant toute la durée de la plongée et de la désaturation, le taux de perfusion des différents tissus demeure constant.

Si $s_1 v / s_2 V = \text{constante} = k$, alors l'égalité s'intègre pour donner finalement l'expression bien connue :

$$P = P_1 * (1 - e^{-kt})$$

Notons au passage que cette expression n'est vraie que pour P constant, c'est-à-dire pendant le séjour sur le fond ou au palier. Une des propriétés de la fonction exponentielle, est qu'elle peut se caractériser par sa période $T = \text{Log } 2 / k$, intervalle de temps pendant lequel sa valeur double ou diminue de moitié. Haldane fit donc l'hypothèse complémentaire suivante :

Hypothèse 7

L'organisme est composé de 5 tissus, de périodes de 5, 10, 20, 40 et 75 minutes.

Les raisons pour lesquelles la période de 75 minutes a été choisie plutôt que 80 demeurent obscures. Une explication possible est que Haldane considérait ce tissu comme saturé à 95 % au bout de 5 heures (4 périodes de 75 min). Haldane pensait en effet qu'il fallait seulement 4 périodes pour que le corps humain soit équilibré avec une nouvelle pression extérieure.

Haldane conçut 3 tables séparées : la première concernait les plongées qui demandaient moins de 30 minutes de décompression, la seconde concernait celles qui demandaient plus de 30 minutes de décompression et la dernière concernait les plongées profondes de plus de -100 mètres. Toutes les décompressions étaient caractérisées par une remontée rapide jusqu'au premier palier puis une remontée lente des paliers à la surface : cette approche est restée longtemps valable.

Grâce à ce concept la MDD (maladie de décompression) s'explique ainsi :

- Il y a saturation d'un tissu lorsque l'équilibre est atteint : égalité entre la pression du gaz libre et la tension du gaz dissous : autant de molécules de gaz à entrer qu'à sortir du tissu.
- La désaturation d'un tissu survient lors de la décompression : les molécules de gaz inertes quittent les tissus, selon une courbe exponentielle inverse de la saturation.
- La sursaturation est un état instable où la somme des pressions partielles des gaz dissous est supérieure à la pression ambiante : la vitesse de décompression excède la vitesse à laquelle le gaz inerte peut-être éliminé des tissus, la formation de bulles survient alors au-delà d'un certain seuil critique, défini par un coefficient de sursaturation ($P_{\text{partielle gaz dissous dans le tissu}} / P_{\text{hydrostatique}}$) voisin de 2.
- Au cours de la plongée à l'air, à la descente, il y a compression des gaz inhalés : leur Pression partielle augmente. Il se crée un gradient de pression de l'alvéole vers les tissus via le sang avec augmentation de la P_{Air} , transmise à l'alvéole puis au sang puis à l'ensemble des tissus.
- L'azote se dissout jusqu'à équilibre entre les différents compartiments et s'accumule donc dans les tissus.
- La saturation est atteinte si la durée d'immersion est suffisamment longue et à une profondeur suffisante. Elle dépend aussi des différents tissus, définis par leurs périodes, ceux contenant des graisses ayant une affinité majorée pour l'azote par rapport à l'eau. Une importante vascularisation ou circulation (travail, chaleur, exercice...) favorisera de même la saturation.
- A la remontée, se crée une décompression avec par conséquent un gradient de pression inverse et donc une redistribution des gaz des tissus vers le sang : c'est la désaturation grâce au relargage alvéolaire.
- Elle peut être explosive si la remontée est trop rapide (gradient de pression trop important) avec sursaturation critique dépassée dans certains tissus : des bulles se forment in situ (intra vasculaires ou intratissulaires) probablement à partir de noyaux gazeux préexistants, générés par des mécanismes de cavitation et de frottements visqueux (tribonucléation). Elles sont ensuite drainées par la circulation veineuse. Théoriquement, les Pressions partielles des gaz artériels sont en équilibre avec celles des gaz alvéolaires : pas de sursaturation artérielle. Donc des bulles en réseaux artériel sont passées par un shunt droit / gauche (foramen ovale perméable).

4.2.3. Critique du modèle de Haldane

Le modèle de Haldane constitue la première approche de modélisation mathématique de la décompression. Mais il repose sur certaines hypothèses simplificatrices qui peuvent être discutées :

- Le coefficient de sursaturation (hypothèse 1) est mis en défaut par sa validité limitée à un domaine d'application extrêmement étroit. Le fait qu'il soit inapplicable dans les décompressions de saturation en est la démonstration.
- L'hypothèse 2 décrit les échanges pulmonaires de gaz inertes selon un modèle à perfusion limité. Or des expérimentations permettent d'émettre des réserves sur ce modèle.

En 1978, Giry et Coll ont mesurés, par spectrométrie de masse, les pressions partielles des gaz inertes dissous dans l'aorte d'animaux (lapins) placés en saturation à 4 bars. Le changement en échelon rectangulaire des gaz inhalés (remplacement de l'air par un mélange hélium-oxygène à 20% d'oxygène) montre que les pressions des gaz évoluent selon des fonctions sigmoïdes.

De plus, la somme des pressions partielles des gaz inertes dissous devient de façon transitoire supérieure à la pression atmosphérique ambiante, et donc à la somme de la pression partielle des gaz alvéolaires. Le calcul montre que cette sursaturation isobare ne peut être expliquée par l'inégalité des rapports ventilation/perfusion, ni par l'existence de shunts intra pulmonaires. On est donc conduit à envisager une limitation par diffusion des échanges alvéolo-capillaires de gaz inertes, ce qui revient à dire que contrairement à ce que pensait HALDANE, les échanges gazeux ne sont pas complets en un seul passage, et que le sang artériel n'est pas en équilibre à la sortie des poumons, avec le gaz alvéolaire:

- Il en est de même pour les échanges capillaro-tissulaire (hypothèse 4).
- L'hypothèse 3 qui pose l'homogénéité d'un compartiment tissulaire est contredite par les expérimentations de Lightfoot et Coll (1986) qui démontre que, quelle que soit la plus petite fraction de tissu vivant que l'on considère, il n'est pas possible de décrire les échanges de gaz inertes en son sein avec moins de deux exponentielles. Elles correspondent en fait à la solubilisation des gaz dans la fraction aqueuse et dans la fraction lipidique du tissu.
- L'hypothèse 5 ne peut non plus se justifier sur le plan anatomophysiologique il n'existe aucune raison pour qu'un compartiment de l'organisme soit isolé de manière étanche des compartiments qui l'entourent. L'eau du milieu interstitiel suffit à elle seule pour assurer la continuité matérielle.
- L'hypothèse 6, que le taux de perfusion reste fixe pendant toute la durée de la plongée et de la décompression est une approximation qui ne peut se justifier que pour des plongées suivies de décompressions de courte durée (pas ou peu de palier).
- L'hypothèse 7, illustre le caractère arbitraire du modèle construit par Haldane. Le nombre de compartiments n'a en effet aucune signification anatomophysiologique.

De plus, l'apparente symétrie mathématique des formules de saturations $P = P_1 * (1 - e^{-kt})$ et désaturations $P = P_f \cdot e^{-kt}$ est étayée par la symétrie des deux courbes. L'équation définie pour la saturation est certainement utilisable. L'équation de la désaturation ne considère que la forme dissoute, le gaz dissous s'éliminant beaucoup plus vite que sous la forme bullaire ; la forme bullaire n'est pas prise en compte par la formule. Le gaz peut s'accumuler dans les tissus et il ne se retrouve plus sous forme dissoute dans le sang veineux. La courbe de désaturation n'est donc pas symétrique à celle de la saturation.

En conclusion, cette discussion aboutit à mettre en question un certain nombre d'idées toutes faites qui semblent s'être perpétuées de génération en génération de plongeur.

La première réalité est que le modèle de Haldane est biologiquement faux : il est en effet incapable, quelles que soient les triturations qu'on lui fasse subir, de décrire les phénomènes tels qu'ils sont enregistrés chez l'être vivant. Ne pas tenir compte de certains faits (diffusion, hétérogénéité des tissus, mauvaise vascularisation de certains tissus) ne signifie pas que Haldane les méconnaissait. Mais les considérant comme négligeables ou du moins bien approximés par son modèle, la détermination des paramètres comme la sursaturation critique suffisait à gommer les difficultés. Le travail de Haldane ne doit être considéré ni comme un modèle, ni comme une théorie, mais beaucoup plus simplement comme une technique de calcul.

Malgré tout ceci, la méthode de Haldane reste l'outil le plus employé pour le calcul des décompressions. Aucune autre méthode de calcul n'est arrivée à la détrôner, ni à faire la preuve de sa supériorité. La méthode de Haldane, grâce à son approximation et l'indéterminisme de ses paramètres, permet de s'adapter à toutes les situations.

4.2.4. Les modèles néo-Haldaniens

Le modèle de Haldane fut remanié maintes et maintes fois par modification du nombre de compartiments, des périodes et des paramètres de remontée. Pour l'US Navy, Yarbrough en 1937 établissait des tables sur les « tissus » 20, 40 et 75 minutes seulement.

En 1956, Dwyer réintroduisit les tissus courts et un tissu de 120 minutes ainsi qu'une notion de coefficient de sursaturation variable pour un même tissu en fonction de la profondeur.

En France, les tables GERS 65 sont calculées sur un modèle Haldanien à 3 et 4 tissus (selon les tranches de profondeurs) avec deux jeux de coefficients de sursaturations constants pendant toute la remontée. Une évaluation statistique de la sécurité des tables GERS 65, entre 1966 et 1987, a été effectuée. Un nombre non négligeable d'accidents étaient survenu avec respect des tables. Ceci constitue, en fait, une des raisons qui ont conduit à l'établissement de nouvelles tables : les tables de la Marine Nationale de 1990 (MN 90). Les tables MN 90 ont été calculées selon la méthode Haldanienne classique à 12 compartiments avec coefficients constants.

La variabilité des seuils de sursaturation critique en fonction de la profondeur fut définitivement structurée en 1965 par Workman aux Etats Unis. Plutôt que d'associer à chaque compartiment un seul coefficient de sursaturation critique comme dans le modèle Haldanien d'origine, Workman attribua à chaque plage de profondeur son propre seuil, appelé M-value.

Une M-value, ou valeur maximum, est pour une profondeur donnée et un compartiment donné, la tension maximum admissible d'azote à cette profondeur.

$$M = M_0 + (a * D)$$

D : profondeur

M₀ : tension maximum admissible quand D = 0

a : coefficient déterminé expérimentalement

A la suite des travaux de Workman, les tables de l'US Navy puis la majeure partie des tables et modèles ultérieurs utilisèrent les systèmes des M-values.

A partir de 1984, la COMEX a commencé une expérimentation, qui a duré trois ans, dont l'objectif était d'améliorer les performances des tables officielles françaises de 1974. Une étude statistique importante a été conduite par Imbert. La COMEX disposait d'une banque de données, informatisée, riche d'environ 150'000 rapports de plongée. La conception des nouvelles tables a été réalisée en cinq étapes :

1. Evaluation des tables existantes (incidence ADD 1 /1000)
2. Calcul des nouvelles tables
3. Test des nouvelles tables sur certains sites de travaux sous-marins (avec pour certaines plongées à risque des surveillances écho-doppler)
4. Réalisation des modifications requises en fonction des résultats sur les sites

Présentation des nouvelles tables aux autorités : les actuelles MT 92 (Médecine du Travail)

4.2.5. Le modèle de Bühlmann

Chez nous, cette fois, le professeur Bühlmann choisit des seuils variables comme critère de remontée à partir d'un modèle Haldanien.

Chaque compartiment étant muni de 2 coefficients a et b déterminés expérimentalement, le seuil est défini par la pression absolue minimum admissible (P_{adm}) à la remontée :

$$P_{adm} = (PN_2 - a).b$$

PN_2 : tension d'azote dans le compartiment considéré

a : coefficient de sur-saturation critique 1

b : coefficient de sur-saturation critique 2

Tableau des tissus selon Bühlmann et coefficients a et b pour l'azote et l'hélium

Tissus (n°)	T pour N ₂ [min]	a pour N ₂	b pour N ₂	T pour He (min)	a pour He	b pour He
1	4.0	1.2599	0.5050	1.51	1.7424	0.4245
1b	5.0	1.1696	0.5578	1.88	1.6189	0.4770
2	8.0	1.0000	0.6514	3.02	1.3830	0.5747
3	12.5	0.8618	0.7222	4.72	1.1919	0.6527
4	18.5	0.7562	0.7825	6.99	1.0458	0.7223
5	27.0	0.6667	0.8126	10.21	0.9220	0.7582
6	38.3	0.5933	0.8434	14.48	0.8205	0.7957
7	54.3	0.5282	0.8693	20.53	0.7305	0.8279
8	77.0	0.4701	0.8910	29.11	0.6502	0.8553
9	109.0	0.4187	0.9092	41.20	0.5950	0.8757
10	146.0	0.3798	0.9222	55.19	0.5545	0.8903
11	187.0	0.3497	0.9319	70.69	0.5333	0.8997
12	239.0	0.3223	0.9403	90.34	0.5189	0.9073
13	305.0	0.2971	0.9477	115.29	0.5181	0.9122
14	390.0	0.2737	0.9544	147.42	0.5176	0.9171
15	498.0	0.2523	0.9602	188.24	0.5172	0.9217
16	635.0	0.2327	0.9653	240.03	0.5119	0.9267

Mais l'apport essentiel de Bühlmann concerne la plongée en altitude. En effet, il prit l'air alvéolaire comme référence de gaz respiré. Or en altitude le pourcentage d'azote dans l'air alvéolaire s'éloigne nettement du pourcentage usuel reconnu dans l'air (79 % environ) :

- D'une part la pression de vapeur d'eau reste à peu près fixe malgré la modification d'altitude
- D'autre part la pression partielle de gaz carbonique n'évolue que très peu (et si elle varie en altitude, c'est à cause de l'hyperventilation générée par l'hypoxie).

Par complémentarité, la pression partielle d'azote n'est pas celle que fournit la loi de Dalton appliquée à l'air respiré.

A partir de ses travaux, Bühlmann produisit en 1986 2 jeux de tables, la première de 0 à 700m d'altitude et la seconde de 701 à 2500m d'altitude. Ces tables sont utilisées en Suisse et dans le monde ainsi que largement dans les algorithmes d'ordinateurs de plongée du marché actuel.

Notons toutefois que certains auteurs tels Le Pechon signalent qu'en haute altitude, l'hypoxie de fait est un facteur favorisant et aggravant de l'accident de décompression, ce qui devrait conduire à rendre nettement plus sévères les tables de plongée en altitude, option que ne retient pas Bühlmann.

4.2.6. Le modèle d'Empleman

En vue de la préparation des nouvelles tables Royal Navy, un développement nouveau et intéressant fut introduit par Hempleman en 1952. Celui-ci suggéra qu'une simple approche mono-tissulaire puisse donner une solution satisfaisante aux problèmes de la décompression.

Il avait remarqué que les accidents de décompression (les bends) survenaient après des plongées profondes de courtes durées ou des plongées à faible profondeur, mais longues. Il en conclut qu'un seul tissu était incriminé dans les bends : le cartilage articulaire peu vascularisé, et que celui-ci ne pouvait supporter qu'une quantité critique de gaz sans avoir apparition de la douleur.

Il supposa alors que les capillaires étaient rangés en nappes et parallèlement autour des cartilages. Afin d'exprimer la diffusion des molécules de gaz à travers le tissu cartilagineux (avasculaire), il considéra que le tissu était irrigué par une mince couche de sang entouré par des couches de tissus infiniment épaisses. Ce modèle basé sur la diffusion, donna en travaillant sur l'équation de FICK la formule :

$$Q = P * t^{1/2}$$

Q : quantité de gaz dans le tissu
P : pression ambiante
t : temps d'exposition

La valeur choisie de Q critique = 500 est une constante qui permet de créer une courbe de sécurité avec :

$$Cs = \text{Profondeur (=P)} * t^{1/2}$$

En comparant la courbe avec celle de l'US Navy, on peut remarquer des temps en minutes assez similaires.

Prof (mètres)	Prof (pieds)	US Navy (min)	Q =500
15m	50	100	100
18m	60	60	69
21m	70	50	51
24m	80	40	39
27m	90	30	31
30m	100	25	25
33m	110	20	21
36m	120	15	17
45m	190	5	7

A l'inverse de Haldane qui supposait la symétrie entre l'absorption et l'élimination du gaz inerte par le corps, Hempleman considérait que l'élimination du gaz était une fois et demi plus lente que l'absorption.

Ce modèle s'harmonisait bien avec la compréhension de la charge et décharge dans les tissus cartilagineux, mais certaines hypothèses simplificatrices dans l'application des lois de la diffusion soulevaient au moins autant de questions que le modèle Haldanien. Il apparaissait inconcevable d'assimiler un organisme humain à un feuilletage uniforme, tranche infiniment fine entourée de deux couches infiniment épaisses.

Le modèle Haldanien pu être mis en défaut dès 1942. En effet, Behnke, aux Etats Unis, mettait en évidence l'existence de bulles asymptomatiques dans toute situation de décompression, y compris les décompressions « indemnes ». Ainsi les échanges gazeux sont perturbés pendant la décompression, la phase gazeuse n'obéit plus au modèle Haldanien et modifie l'évolution de la décharge de l'azote encore dissoute. L'existence de ces bulles silencieuses devait connaître son heure de gloire avec Spencer.

4.2.7. Le modèle de Spencer

Dans les années 1970, le Dr Spencer aux Etats Unis, observa la présence de bulles détectées par l'intermédiaire d'un doppler dans le sang des plongeurs après qu'ils avaient effectué des plongées n'ayant produit aucun symptôme de décompression. Plus précisément cette détection par ultrason mettait l'accent sur des embolies de gaz veineuses (appelées « venous gas emboli » ou VGE) et que celle-ci étaient en complète corrélation avec l'apparition des bends. Aucun bends ne se développait sans une détection antérieure de VGE.

Le concept actuel des US Navy qui voulait qu'il n'y ait aucun problème lors de la remontée pour un temps illimité passé à - 9 mètres était loin d'être confirmé. Diverses expériences de plongées exécutées en mer démontrèrent une augmentation d'apparition de VGE et de bends sensibles par rapport à celles exécutées en atmosphères sèche (caisson). Ce qui revient à penser qu'une table développée à partir d'un caisson est moins sécurisante qu'une table établie à l'aide d'expérimentation in situ.

En utilisant le modèle de décompression de Haldane, on exposa à diverses pressions des plongeurs humains et on observa à l'aide du doppler l'apparition et le pourcentage des VGE développés. En comparant ces données (donnant des bends et des VGE) avec d'autres tables (US Navy, British Navy, Hempleman), on s'aperçut que la relation :

$$P * t^{1/2} = Cs$$

Notée par Hempleman semblait correspondre à la banque de données Spencer. Les courbes se ressemblaient approximativement. On considéra que 20 % d'apparition de bulles et moins de 5 % de douleurs articulaires faibles (qui se résolvent avec l'absorption de 2 aspirines) représentaient un compromis raisonnable. En extrapolant ces données expérimentales de 20 % de VGE, on déduisit une courbe limite de décompression entre 6 et 60 mètres définie par l'équation :

$$P = 490 * t^{-0.51} \text{ ou bien } t = (465 / P)^2$$

t : durée maximale en min au fond (sans faire de palier)

P : profondeur en pied

Remarque :

Pour Hempleman, $t_{max} = (500 / P)^2$

Pour Spencer, $t_{max} = (465 / P)^2$

Les résultats sont très voisins, avec Spencer plus sévère. Certains ordinateurs de plongée actuellement sur le marché, intègrent les tables de Spencer dans leur algorithme.

4.2.8. Le concept du volume critique des bulles

Le modèle de Haldane ainsi que les modèles dérivés s'intéressait à la quantification de la charge et de la décharge des tissus en azote, mais pas du tout à la genèse des bulles apparaissant de façon asymptotique. A partir des années 70 les études portèrent davantage sur les bulles elles-mêmes.

Dès 1966 Hills en Australie s'intéressa à la thermodynamique des bulles. Une publication de Hills en 1971 mettait en lumière une distinction jusque là peu développée : l'accident de type articulaire d'une part, l'accident neurologique d'autre part. En effet par simple modification du profil de remontée Hills démontra qu'il pouvait au choix induire chez le cobaye animal un accident de type articulaire ou neurologique. La distinction trouvait dès lors toute son importance et chez les auteurs modernes on classe désormais les accidents de décompression en deux catégories : le type I (douleurs articulaires ou bends) et le type II (accident neurologique). En fait les travaux de Hills suggéraient que si les accidents de type I sont reliés à la charge d'azote reçue, donc aux modèles déterministes de type Haldaniens, en revanche les accidents de type II relèvent des mauvais profils de plongée et de la production d'un surcroît de bulles artérielles.

Des études sur les conditions d'équilibre des bulles intravasculaires furent menées, notamment par Clément au Laboratoire de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Centrale en France, puis Yount à Hawaï à partir de 1980, et conduisirent au modèle dit VPM (perméabilité variable des bulles). S'il n'a pas engendré de tables de plongée utilisables, ce modèle mit l'accent sur la notion de noyau gazeux, par opposition aux bulles, et sur le rôle de ces noyaux dans la production de bulles circulantes asymptotiques ou pathogènes :

- Une bulle ou un noyau gazeux est une phase gazeuse limitée par une interface gaz/tissu ou gaz/liquide
- Une bulle suit la loi de Mariotte, de diamètre allant de quelques dizaines de microns jusqu'au millimètre, elle est sphérique (du moins en milieu liquide et isotrope)
- Un noyau gazeux est de diamètre très faible (le micron). Ses variations de volume n'obéissent pas à la loi de Mariotte, de même que la perméabilité au gaz ne suit pas les lois de diffusion. En particulier, pour éliminer un noyau gazeux, il faut une pression nettement supérieure à celle envisagée habituellement pour réduire les bulles.

La théorie du volume critique des bulles fut énoncée à peu près à la même époque par Hempleman et Hennesy, et reprise d'ailleurs plus tard en France par Imbert pour évaluer l'influence des profils de plongée, à l'occasion de la conception des Tables du Ministère du Travail, dites MT92. Enfin Hennesy a proposé récemment une structuration du modèle. Il ressort de cette théorie que :

- Les noyaux gazeux sont produits en permanence dans l'organisme par cavitation (niveau cardiaque) et par frottements (tribonucléation)
- Sans exposition hyperbare ces noyaux demeurent des noyaux, mais s'ils apparaissent dans un contexte où la tension de gaz inerte environnante est plus élevée que la pression ambiante, les noyaux se transforment en bulles en se nourrissant de l'azote dissous voisin, du gaz carbonique tissulaire et de la vapeur d'eau due à la cavitation
- Si les bulles sont générées dans les tissus articulaires (tendons...) des douleurs locales apparaissent, c'est l'accident de type I

➤ Si les bulles sont générées dans les capillaires, elles vont être transportées jusqu'au filtre pulmonaire. Et là l'accumulation des bulles entraîne une baisse de la performance du filtre pouvant aller jusqu'à des « shunts » pulmonaires. Or si une bulle est réinjectée dans la circulation artérielle, elle peut migrer en aval vers le système nerveux, lequel est déjà chargé en azote dissous à cause de sa richesse en lipides. Dans un tel site la bulle n'aura qu'à se nourrir d'azote, grossir, provoquer l'ischémie du tissu et enfin l'accident neurologique : le type II. Il faut ajouter les shunts cardiaques comme facteurs favorisants, avec le foramen ovale pour lequel il y aurait perméabilité. En effet des travaux en 1992 de Cross, Evans, Thomson, Lee et Shields font états que 30% environ de la population présente un foramen ovale plus ou moins perméable.

L'importance des mauvais profils de plongée (remontées trop rapides, profils yo-yo, successives rapprochées, plongées en dents de scie) est enfin expliquée dans l'apparition des accidents de type II :

- D'une part les remontées trop rapides engorgent le filtre pulmonaire en bulles et donc peuvent entraîner des shunts pulmonaires et des passages vers la circulation artérielle puis le système nerveux
- Ensuite les recompressions intempestives réduisent, la loi de Mariotte oblige, le volume des bulles agglomérées dans le filtre pulmonaire, et favorisent le passage vers le système artériel. Se trouvent ainsi légitimés des conseils largement connus depuis longtemps des plongeurs, mais mal argumentés jusque là :
- Remonter lentement
- Eviter les profils inversés, c'est-à-dire avec faible profondeur en début de plongée et profondeur plus importante en fin de plongée
- Eviter les yo-yo, plongées en dents de scie, et les successives rapprochées

4.2.9. L'algorithme "E-L" de Thalman

Dans les années 80, il fut décidé de tester à nouveau les US Navy dans le but de les incorporer dans un ordinateur.

En 1984, 835 plongées tests « humides » furent effectuées afin de créer un algorithme qui calculerait en temps réel des profils de décompression à l'air. Les plongeurs travaillaient la moitié du temps de plongée à une VO_2 max de 1.4l/min dans une eau relativement froide (55-65° F), l'intervalle entre les deux plongées était au minimum de 36 heures.

On observa dans la tranche de profondeur -15 à -57 mètres, la nécessité de tripler le temps total de décompression pour des plongées longues et peu profondes, et de doubler le temps total de décompression pour des plongées à plus grande profondeur mais plus courtes, si on désirait obtenir une décompression en toute sécurité.

A partir de ces observations, Thalman et le NEDU (Navy Experimental Dive Unit) développèrent un nouveau modèle de décompression incorporable dans un ordinateur. L'algorithme qu'ils utilisèrent fut le E-L Algorithm (E pour exponentiel et L pour linéaire : à opposer au E-E Algorithm : modèle de Haldane avec absorption et élimination de l'azote sous forme exponentielle).

Ce modèle décrit une absorption de l'azote par les compartiments de façon exponentielle, par contre l'élimination de l'azote se fait lentement de façon linéaire. Ce temps de décompression plus long induit un taux d'azote plus important dont il faudra tenir compte dans le cas des plongées successives.

4.2.10. Le modèle canadien du DCIEM

Les progrès dans la précision de la détection des bulles circulantes par effet doppler ont ouvert de nouveaux champs d'investigations : d'une part il n'est plus utile d'aller avec le cobaye observé jusqu'à l'accident, ensuite cette technique permet d'évaluer l'efficacité d'une table de plongée, enfin en abandonnant tout modèle déterminisme on peut construire des tables à partir de la seule observation de l'effet doppler.

Par exemple, Nishi au Canada pour les tables DCIEM, entre 1983 et 1986, tous les profils de plongées testés furent contrôlés par un microprocesseur. Les plongées successives furent testées jusqu'à 3 plongées mais par contre, la correction due à l'altitude ne fut pas vérifiée.

Ce modèle a l'originalité d'avoir lié l'effet de perfusion d'un tissu par un gaz inerte introduit par Haldane, avec l'effet de la diffusion décrit par Hempleman.

De plus à l'inverse de nombreux modèles, celui-ci a servi réellement à l'élaboration de tables utilisées encore aujourd'hui. On peut même dire qu'actuellement, c'est la table qui a été la plus testée parmi celles utilisées dans le monde, et est encore plus conservatrice que les tables de l'US Navy, de la Royal Navy et les tables Bühlmann.

4.2.11. Le modèle sigmoïdal de Wald

Lors des mesures d'échanges alvéolo-capillaires pratiquées par spectrométrie de masse chez l'animal à 5 bars après changement de gaz diluants inhalés (N_2 et He), il a été observé que ceux-ci ne suivaient pas une loi multi-exponentielle (modèle de Haldane) mais pouvaient être simulés par l'utilisation d'équations sigmoïdales établies par Wald en 1971 : c'est-à-dire une courbe qui démarre tangentielllement à l'axe des temps, présentant un « pseudo-délai ».

Ce modèle, établi par Wald pour rendre compte des transferts gazeux au travers d'une membrane de diffusion, décompose la structure étudiée en une série d'une infinité de compartiments en série : chaque compartiment de rang n se charge à partir du précédent $n-1$ et se vide dans le suivant $n+1$ uniquement par diffusion. Le « pseudo-délai » pourrait être interprété comme représentant les étapes de convection aérienne et sanguine entre les gaz inhalés et le compartiment (négligées dans le modèle Haldanien) : la perfusion et la diffusion auraient chacune leur rôle dans ce modèle.

Dans le modèle multi-exponentiel, tous les compartiments commencent à se charger dès le début de l'inhalation de gaz sous pression, alors que dans ce nouveau modèle, seuls se chargent les compartiments pour lesquels le délai imposé pour les échanges est en court, à l'inverse, si le compartiment a un délai long, il ne commencera à se charger en gaz que lorsque le délai sera passé.

La situation symétrique peut être prévue à la décompression. En effet, plus le compartiment est « lent », plus il présentera un long « retard » à la désaturation : celle-ci ne commencera qu'avec un délai. Dans les plongées successives, l'existence de ce délai implique, pour des plongées rapprochées, les compartiments les plus lents n'auront pas commencé à se désaturer. Ce phénomène permettrait d'expliquer pourquoi Imbert a dû tenir compte de majorations extrêmement importantes dans le cas de plongées successives à intervalles courts. Il faut donc admettre que les bulles intra-tissulaires provoquent un ralentissement des échanges du compartiment concerné et permet d'expliquer grâce au doppler un retard observé dans les flux maximaux de bulles circulantes.

L'utilisation de ce type de modèle pourrait permettre d'optimiser le calcul des tables, de tenir compte de la présence des bulles, et d'amener à des durées de décompression plus courtes pour des durées de séjour sur le fond faibles mais probablement plus longues pour des durées de séjour sur le fond longues ainsi que pour les plongées successives.

4.2.12. Les modèles probabilistes

La mise au point de tables de plongées calculées sur des paramètres déterminés empiriquement est cependant peu satisfaisante : les statistiques rapportent toujours des accidents qui surviennent malgré le respect des tables de décompression.

A l'évidence, les modèles utilisés ne correspondent que d'assez loin à la réalité, ne serait-ce qu'en raison des approximations nécessaires à leur établissement et à la difficulté de déterminer les vrais paramètres. C'est pourquoi, à la suite des travaux pour la conception de la nouvelle US Navy, il a été admis par la plupart des auteurs que le modèle mathématique n'a que peu d'importance. Ce qui compte, c'est l'étude statistique du risque. L'accident de décompression est alors considéré comme un événement aléatoire inéluctable. L'étude d'une base de données est la seule réalité sur laquelle se fonder pour en déterminer ses caractères.

Tous les modèles peuvent être qualifiés de déterministes en ce sens qu'ils reposent sur des paramètres figés, qu'il s'agisse des seuils S_c , des M-values de Workman, du volume critique des bulles, du paramètres « 500 » de Hempleman, du paramètres « 465 » de Spencer.

Un modèle probabiliste va proposer l'évaluation du nombre de risques d'apparition d'un accident de décompression à partir d'un profil de plongée (par exemple, pour une plongée de 20 min à -40 mètres sans palier, on aura une probabilité de 1.5% ou 0.015). Il y a un mérite immédiat dans cette façon de voir les choses, même si c'est cruel : la table parfaite n'existe pas.

Cette approche nouvelle est pour l'essentiel due à l'équipe oeuvrant aux USA pour la US Navy : Homer, Weathersby, Wienke, Thalman, Tikuisis, ... Les derniers travaux utilisent une technique probabiliste dite « analyse du temps de panne », avec étude de « fonctions de survie ». Entre autres avantages la souplesse de cette approche réside dans le fait qu'on peut s'appuyer sur un modèle déterministe, par exemple Haldanien, pour en faire un modèle probabiliste.

Le modèle probabiliste de décompression par analyse de « panne » a été utilisé pour :

- Estimer les risques des tables US Navy standard (1985)
- Les tables à saturation, tables nitrox et Air-Héliox (1986-1991)
- Comparer les tables US Navy, canadiennes (DCIEM) et Royal Navy (1986)

4.2.13. Le modèle de décompression statistique

Face à une science non exacte la seule approche efficace est l'estimation statistique. Utilisant des techniques analogues à celles de la pharmacologie, les concepteurs s'intéressent à des échantillons supposés représentatifs de la population visée. Respectant des méthodes de prise de décision et d'amélioration des paramètres (statistique interférentielle, tests d'hypothèses, méthode du maximum Likelihood) on valide ou on rejette un modèle.

Or les modèles actuels souffrent du manque de validation statistique, soit parce qu'ils ont été conçus et testés à une époque où les tests de validation étaient loin de répondre aux critères actuels, soit parce qu'ils ont effectivement été testés avec une méthodologie irréprochable, mais pour une population (travailleurs hyperbares, militaires,...) particulière qui n'est pas assimilable à la population des plongeurs de loisir. En effet dans le cadre de la plongée de loisir, l'âge, l'embonpoint, la méforme, le stress, la prise de médicaments, etc..., ne sont pas des critères de non-pratique alors qu'on sait qu'ils sont précisément des facteurs favorisant l'accident de décompression. C'est pour cela qu'actuellement des banques de données se constituent dans le monde de la plongée sportive et de loisir, avec des réticences et des difficultés opérationnelles, dans le but de disposer d'échantillons représentatifs sur lesquels on puisse faire de l'estimation.

4.2.14. Personnalisation de la gestion de la décompression

S'il est vrai que les pans d'ombre qui demeurent dans la compréhension globale du phénomène tendent à se réduire, grâce en particulier à la conjonction des modèles déterministes, des théories sur les bulles et de l'estimation statistique, il n'en demeure pas moins que la susceptibilité individuelle, voir la variabilité intra-individuelle d'un jour à l'autre échappent par essence même à toute loi générale. On peut donc penser qu'une technique capable de tenir compte de la spécificité de chaque individu puisse un jour apparaître.

En ce sens l'avènement et l'utilisation récents d'ordinateurs de plongée sont prometteurs : les plus récents sont réglables et tiennent compte de certains facteurs (température ambiante, ventilation accélérée pouvant indiquer un travail musculaire soutenu, pulsation cardiaque) réputés favorisant l'accident de décompression, et adaptent le protocole de décompression (exemple : l'algorithme ZH-L 8 ADT de Bühlmann). Si dans le futur des capteurs efficaces transmettent à l'ordinateur des paramètres tels que : taux de bulles circulantes dans le lit veineux, température périphérique, analyse sanguine et bien d'autres mesures qu'on n'ose imaginer, on aura alors une décompression personnalisée gérée par un algorithme adaptatif et instantanément évolutif.

Types	Base des modèles	Chercheurs	Années	Tables et logiciels
Déterministes	Perfusion limitante basé sur l'équation de Haldane	Haldane (UK)	Dés 1907	Tables US NAVY (USA)
		Workman (USA)	Dés 1960	Tables Ministère du travail
		Bühlmann (CH)	Dés 1960	Tables Suisses
Probabilistes	Diffusion limitante basé sur l'équation de Ficks	Hampleman (UK)	Dés 1958	Tables BSAC (UK)
	Thermodynamique des bulles	Hills (Australie)	Dés 1966 et 1971	--
	Bulles silencieuses	Spencer (USA)	Dés 1970	Tables DCIEM (Canada)
	Modèle à perméabilité variable (VPM)	Hampleman & Hennessy (UK) Yount & Hofmann (USA)	Dés 1977	--
			Dés 1986	--
	Modèle de bulle à gradient réduit (RGBM)	Wienke (USA) & Hennessy (UK)	Dés 1989	Tables propriétaires + Logiciel Abyss
Formalisation des hypothèses du VPM	Youghblood (USA) & Ross Hemingway	Dés 1997	Logiciel V-Planner	

4.3. La gestion de la décompression

4.3.1. Généralités

Les procédures de décompression sont complexes en plongée Tech. Il y a les problèmes du choix du modèle, du logiciel, des alternatives possibles en cas d'incident. En effet, beaucoup d'informations sont nécessaires au bon déroulement de ces procédures. Le plongeur Tech prudent doit prévoir au minimum 4 situations, à savoir :

- 1 profil normal
- 1 profil plus court (3 minutes au fond)
- 1 profil plus long (+ 3 minutes)
- 1 profil plus profond (+ 3 mètres)

Selon la complexité des plongées à effectuer, le nombre de profils peuvent être augmentés et adaptés selon les circonstances, perte mélange fond, perte mélange déco, remontée d'urgence, etc...

Cela fait de nombreux paramètres à avoir sous les yeux. Les tables justement, se compliquent rapidement avec la profondeur, la liste des paliers s'allonge et les passages de mélanges s'enchaînent. Il arrive un moment où il n'est plus possible de retenir quoique se soit et le problème se pose de présenter les tables de façon directement accessible. L'objectif est d'avoir une stratégie de sécurité précise et claire dans le domaine de la planification de la décompression, c'est-à-dire de définir l'ensemble des valeurs permettant l'établissement de la planification (voir tableau ci-après). Nous utilisons 2 types de profils, à savoir :

- **Profils de base** : Ensemble de profils ayant pour objectif de favoriser une décompression dans les meilleures conditions possibles.
- **Profils d'urgence** : Ensemble de profils ayant pour objectif de sortir de l'eau dans un temps limité.

Tableau des valeurs pour la gestion de la planification

	Profils de base	Profils d'urgence
Modèle VPM	VPM B/E	VPM Originel
Altitudes	700m	700m
Conservatisme	+ 4	Nominal
Réserve gaz	Mix fond : 1/3 du volume Mix déco : 1/3 du volume	Mix deco : si perte 1 gaz, plongée
Profils table	Durée : 4 profils (base + 4 durées)	Perte gaz : 3 profils / Mix déco
	Profondeur : 2 profils	Urgence : Profil court : 3 profils Perte avec O ₂ : 3 profils Perte sans O ₂ : 3 profils
Modèle / Logiciel	VPM / V-Planner 3.4	
Consommations	Mix fond + deco : 20l/min	
Vitesses	↓ de 0 à 60 mètres : 30m/min	
	↑ de 6 à 0 mètres : 6m/min	
Intervalle de surface	5 jours ou selon planning des plongées	
Saut profils	De 60 à 89 m = 3min	
	De 90 à 100 m = 2min	
	> 101 m = 1min	
Mix fond	PPO ₂ max : 1.2 bars (CMAS)	
	EAN max : 30 mètres (CMAS)	
Mix déco	PO ₂ max : 1.6 bars (CMAS)	
	ΔPN ₂ max : 0.8 bar % SNC max / plongée : 85%	

4.3.2. Planification et gestion des tables

L'établissement d'une planification doit passer par des étapes bien précises. Ces étapes doivent être rigoureusement respectées afin de réduire au maximum les risques d'introduire de fausses données dans la planification qui pourraient avoir des conséquences graves sur la qualité de la décompression.

- **Logiciel V-Planner**
 - Vérification des paramètres dans le panneau de configuration du logiciel
 - Choix de la profondeur et durée du profil de base et des mélanges fond et décompression
 - Vérification de la faisabilité des profils de base et urgence selon les paramètres du tableau ci-dessus

Configure les paramètres de plongée - B-swiss01

Profondeurs: Feet Metres

Conditions: Prof. profond 6 m Prof. dem. palier Ouvert CCR

Conservatismes: Nominal + Un + Deux

Données en altitude: Alt. plongée 700

Hrs à l'alt. plongée 0

Montée depuis 0

Tps voyage (hr) 0

V-Planner - B-swiss01

Intervalle surface 5 jours 48 hr 24 hr 000 Jours 00:00 hh:mm

PROFIL DE PLONGÉE

Intervalle surface = 5 jours 0 hr 0 min.

Altitude = 700m (s)

Conservatisme = + 4

Desc à 60m (2.02) on Trimix 14.0/46.0, 30m/min Descente.

V-Planner - B-swiss01

Plongée #1 avec les plans plus & moins supplémentaires

-- profondeur, temps -->

	90,15	90,17	90,19	90,21	90,23	93,15
21						
30						
32						
36						
40						
50						
55						
60						
65						
70						
75						
100						
25/25						
66	0 (18)	0 (20)	0 (22)	0 (24)	0 (26)	0 (18)
60	1 (19)	1 (21)	2 (24)	2 (26)	2 (28)	2 (20)
54	2 (21)	2 (23)	2 (26)	3 (29)	3 (31)	2 (22)
48	3 (24)	3 (26)	3 (29)	3 (32)	4 (35)	1 (23)
45						2 (25)
42	2 (26)	2 (28)	2 (31)	3 (35)	2 (37)	1 (26)
39	1 (27)	2 (30)	3 (34)	2 (37)	3 (40)	2 (28)
36	3 (30)	3 (33)	2 (36)	3 (40)	3 (43)	2 (30)
33	1 (31)	1 (34)	2 (38)	2 (42)	2 (45)	2 (32)
30	1 (32)	2 (36)	1 (39)	1 (43)	2 (47)	1 (33)
27	2 (34)	1 (37)	2 (41)	3 (46)	2 (49)	1 (34)
24	2 (36)	3 (40)	3 (44)	2 (48)	3 (52)	2 (36)
21	3 (39)	3 (43)	3 (47)	4 (52)	4 (56)	3 (39)
18	3 (42)	3 (46)	4 (51)	5 (57)	5 (61)	4 (43)
15	5 (47)	6 (52)	6 (57)	6 (63)	7 (68)	5 (48)
12	6 (53)	7 (59)	8 (65)	9 (72)	9 (77)	6 (54)
9	8 (61)	8 (67)	9 (74)	10 (82)	12 (89)	8 (62)
6	11 (72)	13 (80)	14 (88)	16 (98)	16 (105)	11 (73)
3	27 (99)	31 (111)	35 (123)	38 (136)	42 (147)	27 (100)
CNS %	39	43	48	54	58	40

Ces profondeurs et temps sont calculés avec:

Segments de plongée:

- **Fichier de planification (excel)**

- Initialisation des valeurs (mélange fond, deco, temps séjour, saut urgence, etc...)
- Importation des données
- Vérification des valeurs par comparaison à l'écran
- Impression du fichier de planification

The screenshot displays the 'Saisie des valeurs de la plongée' (Dive Value Entry) window. It is divided into several sections:

- Paramètres de base (Basic Parameters):** Includes dropdown menus for 'Profondeur' (90), 'Temps normal' (15), 'Temps minimum' (6), 'Temps transit' (0.30), and 'Saut temps' (2). There are also input fields for 'Saut profondeur' (3).
- Mélanges (Mixtures):** Includes dropdown menus for 'Oxygène Fond' (14), 'Helium Fond' (46), 'Mix Deco 1' (EAN 36), and 'Mix Deco 2' (EAN 75).
- Paramètres "Profils de base" (Basic Profile Parameters):** Includes dropdown menus for 'Algorithme' (VPM-B), 'Conservatisme' (4), and 'Altitude' (700m).

The background Excel spreadsheet shows a decompression plan for a 90m dive. It includes sections for 'Perte Gazs 90' (Gas Loss 90) and 'Urgence 90' (Emergency 90). Each section contains a table with columns for depth (63, 60, 57, 54, 51, 48, 45, 42, 39, 36, 33, 30, 27, 24, 21, 18, 15, 12, 9, 6, 3) and rows for different stages (TPP, 15', 17', 19', 21', 23', 15', 17', 19', 21'). The tables contain numerical values representing gas consumption and decompression times.

Seul un contrôle visuel permet d'affirmer que l'importation des données s'est correctement réalisée. En cas de doutes, il est nécessaire de recommencer l'opération. Une fois l'ensemble des profils importés dans le fichier Excel, il n'est pas superflu de comparer une nouvelle fois les valeurs importées avec une relance des calculs dans V-Planner ou avec une tierce personne, il en va de la qualité de la décompression.

4.3.3. La vitesse de remontée

La vitesse de la remontée est un facteur critique dans la conduite d'une bonne décompression. Il est nécessaire de limiter cette vitesse à 10m/min du fond vers le premier palier et 5m/min dans la zone des paliers, voire 1/min entre les derniers paliers (-9, -6 et -3 mètres) et la surface. Une remontée lente favorise l'élimination du nombre de micro-bulles circulantes.

4.3.4. Durant les paliers

- Limiter Les efforts en profondeur, ceux-ci augmentent la dissolution des gaz
- Eviter la manœuvre de Valsalva en remontant et aux paliers
- Respecter la vitesse entre les paliers
- Respecter la profondeur et la durée des paliers profonds (≥ 9 mètres)
- Avoir chaud aux paliers
- Adopter une position verticale aux paliers
- Effectuer un léger exercice aux paliers, en effet l'exercice accélère l'élimination des gaz inertes par augmentation du flux sanguin
- Utiliser des mélanges suroxygénés et/ou de l'oxygène pur sans dépasser 1.6 bars de pression partielle
- Boire afin de rétablir l'équilibre hydrique modifié par la plongée (il faut boire plus que sa soif)

4.3.5. Après les paliers

N'oublions jamais qu'à la sortie, si la décompression est terminée, l'élimination des gaz inertes se poursuit, aussi faut-il respecter les points suivants

- Pas d'effort après la plongée tout particulièrement durant la demi-heure qui suit le retour en surface
- Les premières 30 minutes devraient être considérées comme un palier de décompression
- En fonction du profil de la plongée, respirer 10 à 30 minutes d'oxygène pur. Attention, tenir compte des valeurs limite de la saturation du SNC (max 85% normes CMAS)
- Eviter un changement d'altitude conséquent après la sortie
- Boire constamment (de l'eau) pour rétablir l'équilibre hydrique de l'organisme, il faut boire **plus que sa soif**. L'eau a un double but : Premièrement, augmenter sensiblement la masse sanguine, rendant le sang plus fluide, donc facilitant son passage entre manchon et paroi du vaisseau, ensuite favoriser l'envie d'uriner pour éliminer une partie de l'azote dissous dans l'urine.

4.4. La fenêtre oxygène

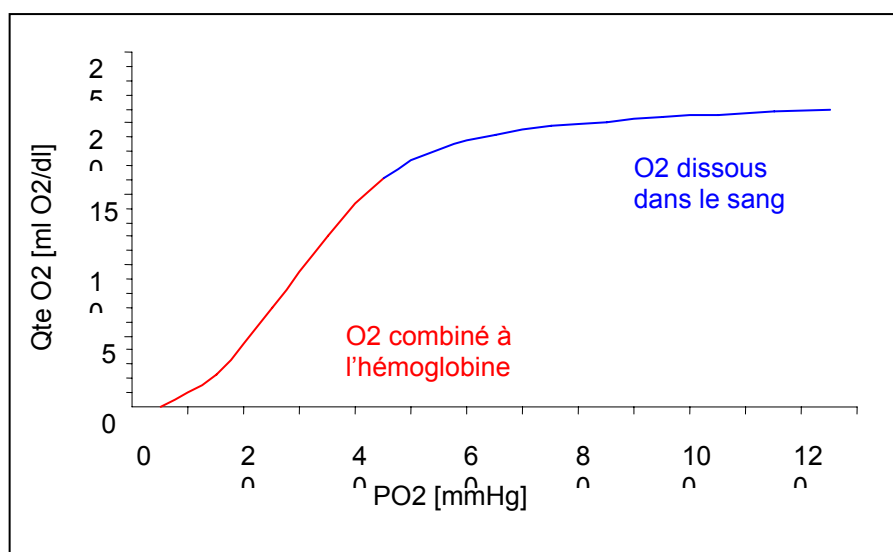
4.4.1. Généralités

C'est le Docteur Behnke qui a forgé l'expression « Oxygen window » que nous traduisons sans trop de conviction par « fenêtre oxygène ». Ce phénomène génère une sous-saturation naturelle des tissus liée au métabolisme. Dans les tissus, la somme des pressions partielles des gaz dissous est inférieure à la pression atmosphérique. La fenêtre oxygène permet aux bulles formées en décompression de se résorber et finir par disparaître. Pour comprendre ce phénomène complexe, il faut suivre le cheminement des gaz du poumon jusqu'à la cellule et raisonner sur un seul gaz, l'oxygène.

4.4.2. Transport de l'oxygène dans le sang

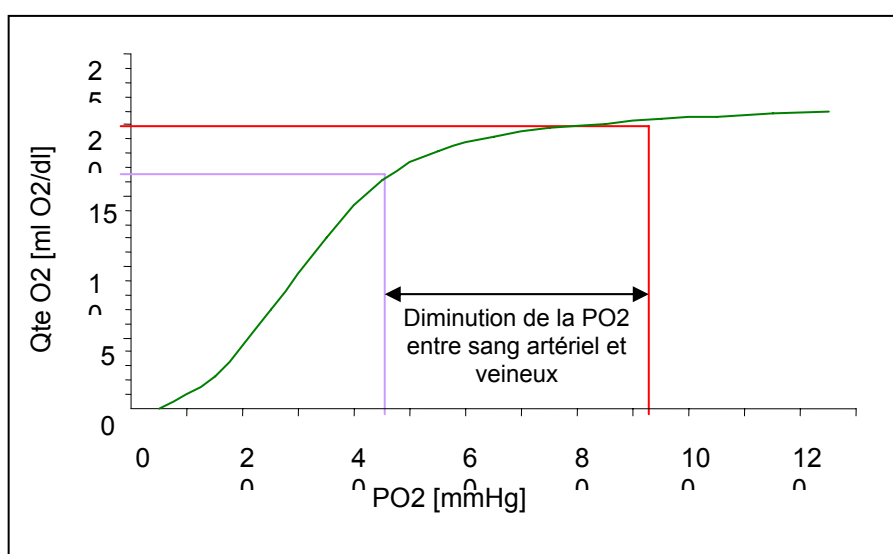
Les services fournis aux cellules par l'organisme incluent l'apport de nutriment, d'oxygène et l'élimination du dioxyde de carbone et de chaleur. Pour l'oxygène, le voyage se déroule en plusieurs phases et utilise des moyens de transport variés. Le premier passage est celui de la fine membrane alvéo-capillaire, qui permet l'embarquement pour le transport sanguin. Les molécules de gaz qui ont franchi la membrane se dissolvent ensuite dans le liquide du sang et sont transportées vers les différents tissus c'est la perfusion.

La quantité de molécules transportées dépend d'abord du débit sanguin, un facteur lié au métabolisme du moment. Elle dépend ensuite de la capacité des molécules à se dissoudre dans le liquide sanguin, un phénomène physique caractéristique de chaque gaz. La relation est linéaire, plus la pression partielle du gaz est élevée, plus la quantité de molécules dissoute est importante. L'oxygène et le dioxyde de carbone ont un statut privilégié et disposent d'un moyen de transport plus efficace, l'hémoglobine. L'hémoglobine est une protéine spécialisée du globule rouge qui peut établir, de manière réversible, des liaisons avec l'oxygène. On véhicule beaucoup plus de molécules d'oxygène avec l'hémoglobine que le sang ne pourrait en dissoudre dans son plasma. L'oxygène existe toujours en phase dissoute dans le sang et les tissus mais le nombre de molécules dissoutes est très faible comparé à celles combinées à l'hémoglobine. A cause de ce double transport la relation entre la quantité totale de molécules d'oxygène transportée par le sang et la PO_2 sanguine n'est plus linéaire.



4.4.3. La genèse de la fenêtre oxygène

Arrive enfin la dernière étape du voyage, la diffusion. Les molécules d'oxygène quittent le sang et diffusent à travers la membrane du capillaire dans les cellules avoisinantes. Au terme du voyage, la cellule consomme l'oxygène et le convertit en dioxyde de carbone. A cause de la demande, la PO_2 chute de 95 mmHg dans le sang à 44mmHg dans les tissus. Cependant, pendant que la PO_2 chute de 50 mmHg, la PCO_2 augmente seulement de 5mmHg. Il y a donc un déficit de 45 mmHg entre le côté artériel et veineux. Il y a 2 raisons à cela, d'abord tout l'oxygène consommé n'est pas transformé en dioxyde de carbone et ensuite le dioxyde de carbone est 20 x plus soluble que l'oxygène. Pour un même volume de gaz absorbé par un liquide, les gaz qui sont très solubles (CO_2) provoquent une pression partielle plus faible. Ainsi au niveau tissulaire à cause des différences de solubilité, la consommation d'oxygène entraîne une baisse de PO_2 plus importante que l'augmentation du dioxyde de carbone. Le résultat est une pression totale tissulaire inférieure à la pression ambiante, c'est la genèse de la fenêtre oxygène de Behnke.



4.4.4. Rôle de la fenêtre oxygène

Cette sous-saturation tissulaire joue un rôle majeur lorsqu'il s'agit de résorber des bulles créées en décompression. En 1910 Krogh (auteur du modèle d'échange gazeux capillaire à géométrie cylindrique) avait découvert ce phénomène mais n'avait pas su lui donner de nom. En 1969 Hills (inventeur de la décompression thermodynamique) développa le concept sous le nom d'«Inherent unsaturation» venue plus tard, l'expression n'obtint pas le même succès.

L'amplitude de la fenêtre oxygène varie avec la quantité d'oxygène présent côté artériel de la consommation métabolique locale. Disons que le métabolisme reste constant, et jouons avec l'oxygène artériel. Prenons le cas du plongeur. En surface, en conditions normales, le déficit est de l'ordre de 45 mmHg. Toujours en surface, si le plongeur respire de l'oxygène pur, la PO_2 alvéolaire va augmenter significativement autour de 500 mmHg. Au niveau artériel, la PO_2 aura déjà chuté à 450 mmHg. Lorsque le sang traverse le tissu, la même quantité d'oxygène est prélevée par le métabolisme et la PO_2 chute à 57 mmHg dans le sang veineux. Ainsi, avec une PO_2 inspirée importante, il n'y a pas de grande différence avec la PO_2 veineuse, et cela parce que la quantité de molécules d'oxygène dissoutes est faible par rapport à celle stockée dans l'hémoglobine.

Par contre, la sous-saturation locale dans le sang veineux augmentera significativement. Ainsi pour un plongeur au masque en surface la fenêtre oxygène sera de : **$O_w = P_{amb} - P_{eau} - P_{CO_2} - P_{O_2}$**

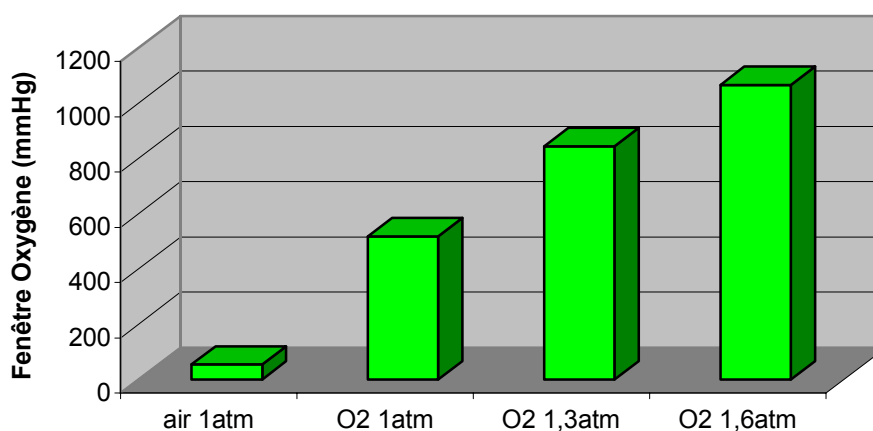
O_w : Fenêtre oxygène = [mmHg]
 P_{amb} : Pression ambiante = [mmHg]
 P_{eau} : Pression vapeur eau = [mmHg]
 P_{CO_2} : Pression partielle dioxyde de carbone = [mmHg]
 P_{O_2} : Pression partielle oxygène = [mmHg]

En reprenant la formule on obtient : **$O_w = 760 - 47 - 40 - 57 = 616 \text{ mmHg}$** de sous-saturation soit en [bar] $\Rightarrow O_w / P_{amb} \Rightarrow 616 / 760 = 0.81 \text{ bar}$. Pour un plongeur au palier à -6 mètres respirant une PO_2 de 1.6 bar, la fenêtre oxygène atteindra : **$O_w = 1210 - 47 - 40 - 57 = 1066 \text{ mmHg}$ soit 1.4 bar**. On découvre ainsi la valeur de la respiration d'oxygène en décompression et son effet sur le contrôle de la croissance des bulles.

4.4.5. Evolution de la fenêtre oxygène

Il est intéressant d'analyser la fenêtre oxygène lorsqu'on respire de l'oxygène à -3 et -6m. La figure suivante montre l'évolution de la fenêtre dans diverses circonstances. Quand on respire de l'oxygène à -6m, la fenêtre oxygène vaut 1066 mmHg. Si on respire l'oxygène à -3m, elle est ramenée à 844 mmHg, soit une diminution de 222 mmHg. De plus, durant la période de respiration à l'oxygène, l'élimination des gaz inertes est dépendante de la profondeur. L'écart de pression partielle, qui génère le déplacement des gaz des tissus vers le sang, n'est pas contrôlé par la pression ambiante. Il est dirigé par la pression partielle régnant dans les tissus et dans le sang artériel. Aussi longtemps que la pression partielle du gaz artériel est nulle, le gradient pour l'élimination du gaz tissulaire est maximal. Respirer de l'oxygène à une profondeur plus importante, présente l'avantage de conserver une pression hydrostatique plus élevée qui maintiendra le gaz en solution. Si on respire un mélange contenant moins de 100% d'oxygène, alors une partie de la fenêtre oxygène sera occupée par le gaz inerte. Par exemple, si on respire un Nitrox 50% ou 80% à -6m, alors l'azote occupera une partie de la pression partielle de la fenêtre oxygène. La proportion de la fenêtre qui sera occupée dépendra de la PN_2 du tissu, ce qui permettra de déterminer combien d'azote diffusera du sang vers le tissu, ainsi que la PN_2 résultante.

Evolution de la fenêtre oxygène



4.4.6. Conclusion

D'un coté nous avons une consommation d'oxygène par l'organisme. Cette consommation d'oxygène est variable en fonction des individus, de l'effort physique fourni, de la température extérieure, etc., mais ce n'est pas ce qui nous intéresse ici. Ce qui est important, c'est que dans le sang veineux, la baisse de la pression partielle d'oxygène induite par une consommation d'oxygène fixe, est variable. Elle dépend de la PO_2 régnant dans le sang artériel.

D'un autre coté, nous avons une production de dioxyde de carbone (transformation d'une partie de l'oxygène métabolisé) qui provoque, dans le sang veineux une augmentation fixe de 5 mmHg quelles que soient les conditions. La différence entre la baisse importante de PO_2 et la faible augmentation de la PCO_2 est appelée fenêtre oxygène qui participe à la diminution de la saturation du sang veineux.

En plongée, nous avons la possibilité de diminuer la pression partielle du sang veineux en augmentant la fenêtre oxygène et pour l'augmenter, il nous faut augmenter la PO_2 du sang artériel, soit en augmentant le pourcentage d'oxygène du mélange respiré, soit en augmentant la profondeur à laquelle nous respirons l'oxygène (-6m plutôt que -3m) ou en agissant sur les deux facteurs à la fois, tout en restant dans les limites de toxicité acceptables.

Planifier la décompression avec un mélange dont la teneur en oxygène se rapproche toujours du maximum tolérable, alors pourquoi ne pas faire son dernier palier à l'oxygène pur à -6m ???

Cependant, il ne faudrait pas résumer ce phénomène relativement complexe en quelques lignes, comme il a été fait. Même si les autres informations ne permettent pas d'élaborer directement des règles pratiques de plongée, elles n'en contribuent pas moins à nous donner une « culture de la décompression » et nous montrent qu'en ce domaine bien du travail reste à faire.

4.5. Les paliers profonds

4.5.1. Généralités

De nombreux plongeurs Tech ont constaté une certaine fatigue, malaise ou somnolence au retour de plongées utilisant certains types de profils caractéristiques. La plongée profonde « coup de vent » qui est caractérisée par une profondeur relativement importante et un temps de fond assez court, produit souvent de tels symptômes. Pour ce type de plongée, les modèles conventionnels de décompression des gaz dissous génèrent un gradient important entre la profondeur fond et la profondeur du premier palier. Plusieurs plongeurs ont rapportés que s'ils ajoutaient des « paliers profonds » dans leurs profils (plus profonds que ceux générés par les calculs conventionnels), alors les symptômes post-plongée sont grandement réduits voir éliminés. Source de confusion et de controverse au sein de la communauté des plongeurs Tech.

Les observations empiriques des plongeurs ont amené au développement de méthodes arbitraires d'introduction des paliers profonds. Beaucoup de ces méthodes s'appuient sur un jugement individuel laissé à la discrétion de chacun plutôt que sur les bases de calcul de la décompression. Une analyse complète des profils de décompression qui utilisent des paliers profonds arbitraires, révèle qu'ils sont source de problèmes potentiels. Ceci inclus les arrêts effectués trop profonds ainsi qu'un allongement inapproprié des derniers paliers pour compenser l'accroissement de la saturation causée par les paliers profonds.

Depuis quelques années, il existe des algorithmes reposant sur les travaux de David Yount. La base de ces travaux est l'étude statistique des noyaux gazeux et de leur évolution lorsqu'ils sont soumis aux contraintes de la plongée (compression – décompression). Cette théorie de la perméabilité variable de l'enveloppe de la bulle ou VPM (Varying Permeability Model) a donné naissance à des logiciels reprenant partiellement cette théorie notamment le RGBM (Reduced Gradient Bubble Model) de Bruce Wienke. Des modèles dont sont déjà passés les logiciels V-Planner et Abyss ainsi que d'autres constructeurs d'ordinateurs de plongée.

4.5.2. Algorithmes conventionnels

Dans le domaine de la décompression, que ce soit en théorie ou en pratique, il y a un compromis à trouver entre une décompression suffisante (pas de symptômes de MDD) et une décompression économique (en temps de paliers, en consommation de gaz, en exposition, etc...). Les algorithmes conventionnels de gaz dissous, comme ceux développés par Workman et Bühlmann, cherchent à optimiser la décompression en permettant au plongeur de remonter jusqu'à la plus faible profondeur possible, ou plafond, basée sur la M_value qui limite la remontée pour ce compartiment (tissu).

Il y a 2 aspects économiques dans cette procédure : on accélère l'élimination des gaz des compartiments courts tandis qu'on minimise la charge des gaz inertes qui continue de s'accumuler dans les compartiments plus longs. Dans la pratique, les plongeurs reçoivent une formation traditionnelle qui précise la manière de prendre en compte le facteur temps lorsqu'ils quittent le fond et remontent jusqu'au premier palier.

Pour une plongée typique « en coup de vent », les calculs conventionnels autorisent une remontée relativement longue à partir du fond jusqu'au premier palier. Dans ce scénario, les gaz inertes des compartiments courts arrivent, ou s'approchent de la saturation lorsqu'on est au fond tandis que les compartiments longs ne sont que partiellement chargés. Ceci signifie que les compartiments courts contrôleront le début de la remontée car leur charge en gaz inerte sera proche de la M_value et ceci bien avant les compartiments plus lents. Le premier palier s'impose lorsque la charge en gaz inerte est égale ou proche de sa M_value .

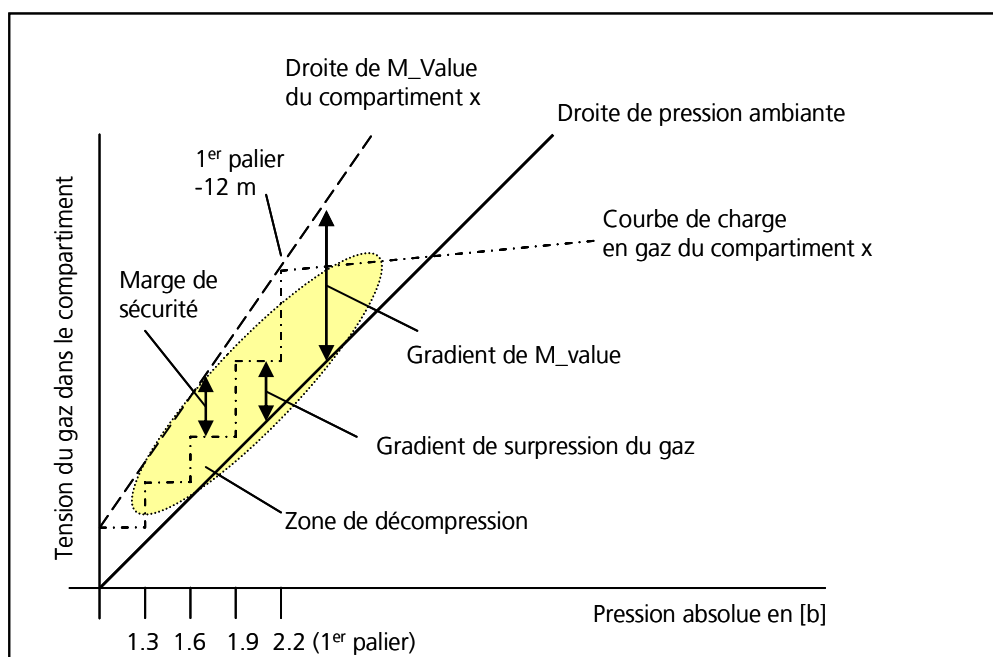
4.5.3. Bulles et gradient

Lorsque le concept de M_value fut présenté pour la première fois par le chercheur en décompression Robert D. Workman, on présumait que les gaz inertes ne sortaient pas de la solution sous forme de bulles, à moins qu'une M_value ne soit dépassée. Cette théorie a été depuis très controversée, cependant, on reconnaissait que les technologies futures seraient capables de donner plus de précision sur la présence et le comportement des bulles dans le corps des plongeurs. Workman savait que les méthodes de détection des bulles aux ultrasons, in vivo et in vitro, qu'on était en train d'explorer, allaient permettre une meilleure compréhension de la décompression, mais nous n'en étions qu'au début.

Depuis, les technologies Doppler à ultrasons se sont développées et ont été massivement utilisées dans le monde, pour la recherche sur la décompression. Cette même recherche a montré qu'il y a présence de bulles dans la circulation sanguine, pendant et durant de nombreuses plongées de toute sorte, y compris celles ne présentant aucun symptôme de MDD. En d'autres termes, un plongeur n'a pas besoin de dépasser une M_value pour générer des bulles. Ce fait a été constaté dans l'étude de la décompression, mais le mécanisme de formation et d'évolution des bulles n'est pas toujours pas très bien compris ni défini précisément. Les lois physiques, ainsi que de nombreux modèles, prédisent qu'on peut s'attendre à avoir des bulles de plus en plus nombreuses et de plus en plus grosses avec l'augmentation du gradient de surpression. Dans le modèle de dissolution des gaz, ceci signifie qu'il faut s'attendre à avoir plus de bulles lorsque la charge du compartiment en gaz inerte pointe plus loin au dessus de la droite des pressions ambiantes, sur le graphe des pressions.

4.5.4. Les M_Value

Ci-dessous, le graphe très simplifié des pressions représente la charge en gaz inerte d'un compartiment au cours de la décompression. Le diagramme complet pour les 16 compartiments présenterait 16 droites de M_value et 16 courbes de charges, comme celui que l'on trouve dans le logiciel Decoplan. Ces 16 courbes étant elles-mêmes l'addition des 16 courbes pour l'azote et des 16 courbes pour l'hélium. La zone de décompression se trouve située entre la droite de pression ambiante et la droite de la M_value. A droite de la pression ambiante, le compartiment ne désature pas, il est trop profond et peut même continuer d'absorber du gaz. A gauche de la droite de la M_value, la valeur maximum de surpression est dépassée, on est remonté trop haut. Au premier palier (-12 mètres), puis en surface, ce compartiment atteint la droite de la M_value, il atteint donc le maximum de sa surpression autorisée, soit 100% de la M_value. (courbes et valeurs n'ont qu'un but d'illustration, elles ne correspondent pas à une situation réelle).



Pour des raisons de commodité d'écriture et de calcul, certains chercheurs et concepteurs ont exprimés les M_value et les diverses notions s'y rattachant sous forme de pourcentage, ainsi :

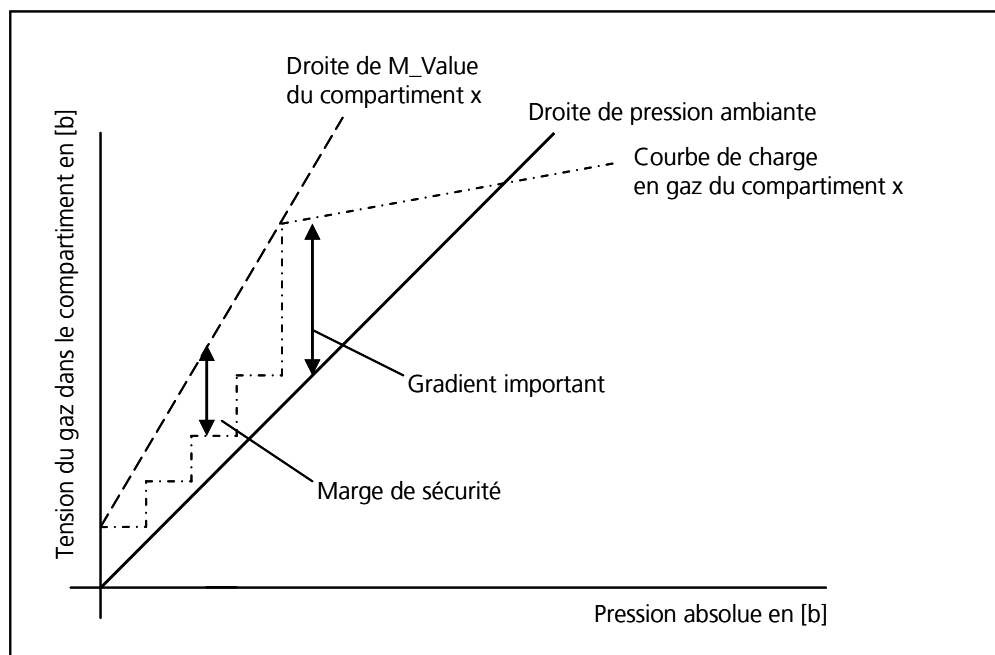
$$\%M_value = \text{Pression gaz} / M_value * 100$$

$$\%Gradient\ M_value = \text{Gradient surpression gaz} / \text{Gradient } M_value * 100$$

Ces valeurs et notions vont se retrouver dans les logiciels de décompression. Un faible % de M_value ou de gradient de M_value indiquera une position du compartiment proche de la droite de pression ambiante. A l'inverse, un pourcentage important indiquera une position proche de la droite de M_value, donc de la valeur critique. (Il est bien clair que les M_values ne délimitent pas une frontière certaine entre sécurité absolue et accident inéluctable, mais représentent une ligne tracée parmi des probabilités plus ou moins importantes).

4.5.5. Profils sans paliers profonds

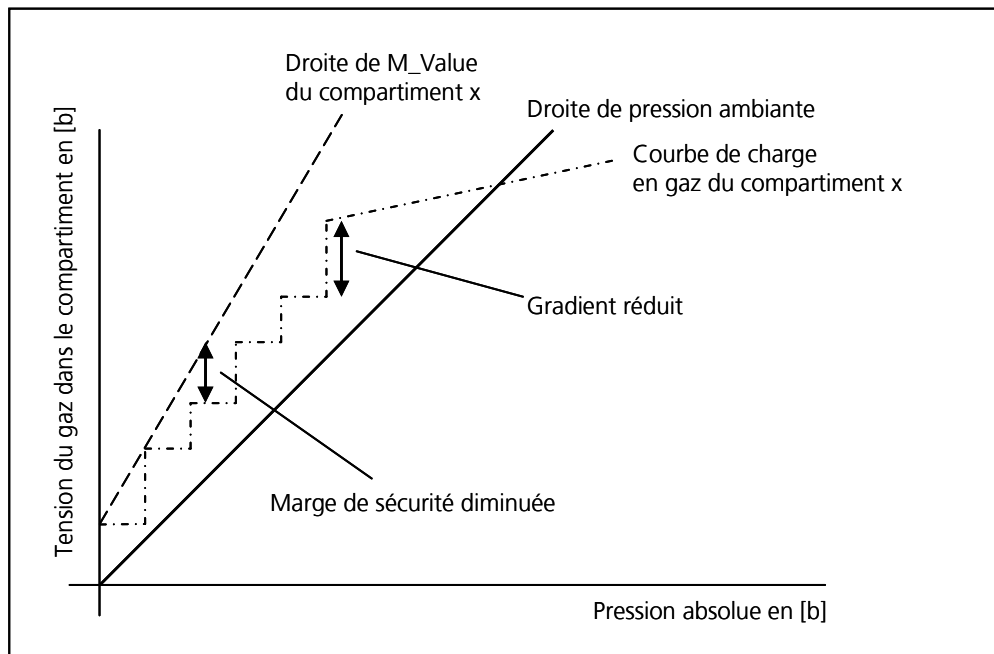
Dans un profil obtenu à l'aide d'une méthode conventionnelle (voir schéma ci-dessous), les compartiments rapides (courts) plus chargés en gaz, sont les compartiments directeurs, comme ils autorisent une surpression plus importante, la remontée rapide au premier palier va créer un important gradient de surpression. Par la suite, lorsque les compartiments lents (longs) deviendront directeurs, un tel gradient ne sera plus jamais atteint. Néanmoins, il est probable que ce fort gradient en début de décompression aura généré des bulles, nombre sans doute insuffisant pour causer un accident, mais capable de troubler la décompression au point d'entraîner un stress de la décompression. En tout cas, il est possible d'établir un lien de cause à effet entre un gradient de surpression important et des symptômes de fatigue post-plongée.



4.5.6. Profils avec la méthode Pyle

Méthode totalement empirique mise au point par le biologiste marin et plongeur Richard L. Pyle. Il calcule d'abord la décompression selon l'algorithme de Bühlmann, ensuite il divise par deux la différence entre la profondeur maximale et la profondeur du 1^{er} palier. Il s'arrête 2min à cette profondeur et il recalcule un multi-niveau avec le Pyle stop et recommence le processus jusqu'à ce que la profondeur Pyle soit proche de la profondeur du 1^{er} palier.

Cette méthode produisait des résultats avant que les facteurs de gradient (GF) ne soit découverts. Cependant cette approche soulève des difficultés potentielles. Selon le programme de décompression utilisé et ses méthodes de conservatisme, la charge en gaz des compartiments longs peut s'approcher de très près des M_values sur les derniers paliers, ceci est dû à l'accroissement de la charge de gaz causée par les paliers profonds. Le programme compensera pour les paliers profonds mais, à moins d'augmenter les facteurs de conservatisme, le programme n'assurera pas la même marge de sécurité pour les derniers paliers, contrairement à un profil conventionnel.



4.5.7. Profils avec la méthode WKPP

La logique de cette méthode est assez simple (tout semble simple chez les ricains), il faut laisser les gaz s'échapper des tissus avant de créer des bulles. Si des bulles apparaissent, les gaz ne pourront pas s'échapper des tissus. La remontée rapide vers la zone moins profonde est une bonne manière d'emprisonner les gaz dans les tissus par la formation des bulles qui se développeront (Mariotte). D'autre part, en créant des shunts pulmonaires ou cardiaques, les bulles dans le sang seront généralement emprisonnées par les poumons. Si cela se produit, les bulles peuvent bloquer la fonction pulmonaire et endommager les lits capillaires. Donc, en profondeur, il faut éliminer le gaz en solution formé dans les tissus avant l'apparition de bulles.

Le profil de remontée ne respecte pas les schémas classiques. Les paliers commencent profonds à 80% de la profondeur maximale (arrondi supérieur), pour une profondeur de -90 mètres, le 1^{er} arrêt est à -72 mètres. Les paliers profonds durent entre 20'' et 5' selon le temps passé au fond. A chaque changement de gaz, on reste au moins 2' à la même profondeur, le temps que la circulation sanguine fasse un tour complet.

Exemple d'un profil de -90 m, 15min avec un TX 15/50 calculé avec la méthode WKPP

The screenshot shows the ZPlanner software interface. The main window displays a dive plan for a 15-minute dive at 90m depth. The interface includes a menu bar (Open, Log, Print, Config, Calc, Help, Exit), a toolbar, and a main window with a list of stops on the left and a detailed dive plan on the right.

Surface Interval: 48 hr 24 hr Actual:

Deco gases: Yes No 32, 100

Open **Closed** Depth, time, mix, levels.

D: 81, 9, 11/51, 1.1-1.3
 81, 12, 11/51, 1.1-1.3
 81, 15, 11/51, 1.1-1.3
 81, 18, 11/51, 1.1-1.3
 81, 21, 11/51, 1.1-1.3
 81, 24, 11/51, 1.1-1.3
 81, 0, 12/43
 18, 0, 60
 120, 15, 7/65, 1.1-1.3
 120, 0, 12/60
 150, 15, 6/75, 1.1-1.3
 150, 0, 10/70
 60, 0, 25/45
 90, 15, 10/50, 1.1-1.3
 90, 0, 9/60
 90, 15, 12/56

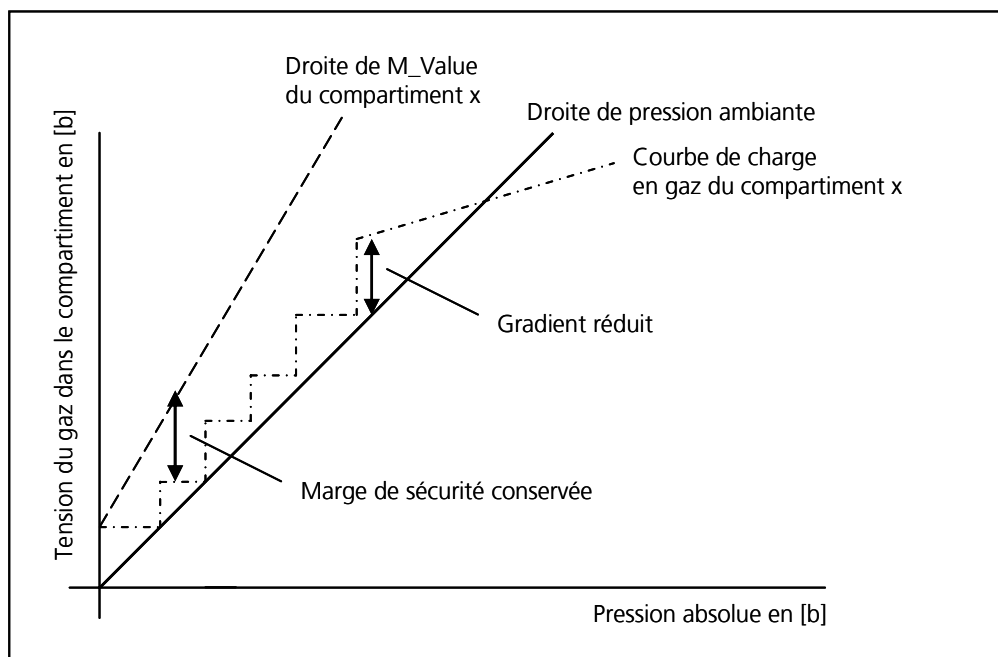
Zplan v1.03
 (c) Copyright 1997-98, William M. Smithers

DIVE PLAN

Waypoint at 90m for 15:00 (19) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 1.155, END 40
 Deep Stop at 72m for 0:25 (20) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.946, END 32
 Deep Stop at 69m for 0:25 (20) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.911, END 30
 Deep Stop at 66m for 0:25 (21) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.876, END 29
 Deep Stop at 63m for 0:25 (21) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.841, END 28
 Deep Stop at 60m for 0:25 (22) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.807, END 26
 Deep Stop at 57m for 0:25 (22) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.772, END 25
 Deep Stop at 54m for 0:25 (22) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.737, END 24
 Deep Stop at 51m for 0:25 (23) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.702, END 22
 Deep Stop at 48m for 0:25 (23) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.667, END 21
 Deep Stop at 45m for 0:25 (24) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.633, END 20
 Deep Stop at 42m for 0:25 (24) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.598, END 18
 Deep Stop at 42m for 0:25 (24) on Trimix 12.0/56.0, PPO2 0.598, END 18
 Deep Stop at 36m for 0:25 (25) on Nitrox 32.0, PPO2 1.408, END 36
 Deep Stop at 33m for 0:25 (25) on Nitrox 32.0, PPO2 1.315, END 33
 Norm Stop at 27m for 1:00 (26) on Nitrox 32.0, PPO2 1.130, END 27
 Norm Stop at 24m for 2:00 (28) on Nitrox 32.0, PPO2 1.037, END 24
 Norm Stop at 21m for 2:00 (30) on Nitrox 32.0, PPO2 0.944, END 21
 Norm Stop at 18m for 3:00 (33) on Nitrox 32.0, PPO2 0.851, END 18
 Norm Stop at 15m for 4:06 (37) on Nitrox 32.0, PPO2 0.758, END 15
 Norm Stop at 12m for 6:06 (43) on Nitrox 32.0, PPO2 0.666, END 12
 Norm Stop at 9m for 10:00 (53) on Nitrox 32.0, PPO2 0.573, END 9
 Norm Stop at 6m for 32:00 (84) on 100% Oxygen, PPO2 1.500, END 6

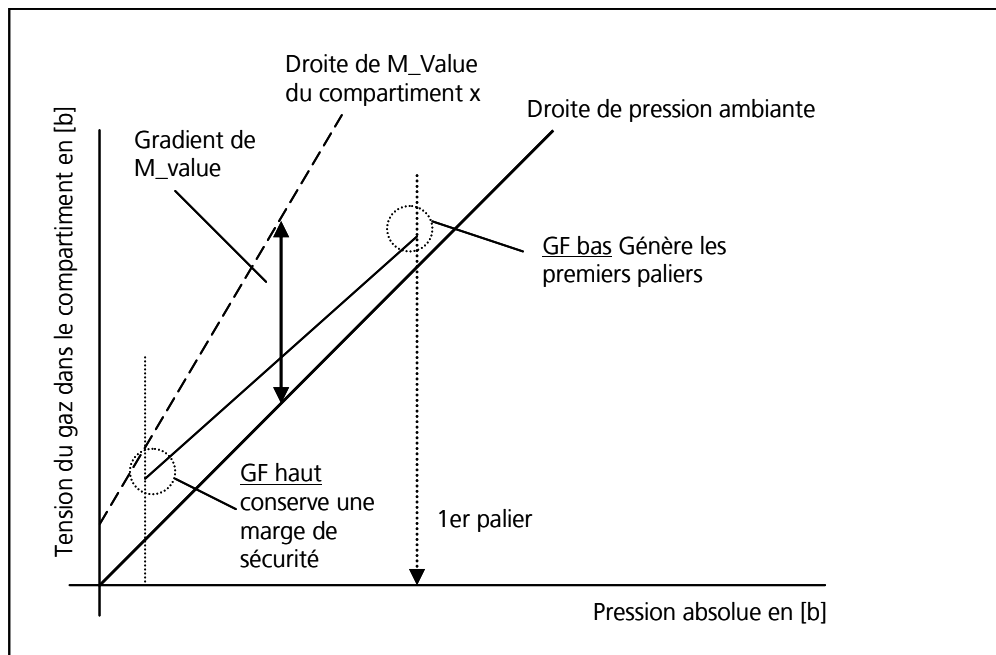
4.5.8. Profils avec la méthode des GF

Méthode mise au point et conçue par Erik C. Baker suggère que le stress de décompression post-plongée peut être réduit en commençant la décompression plus profondément que les modèles néo-Haldaniens ne le prescrivent. Baker imagina alors un moyen d'agir sur chaque compartiment et sur chaque palier, en contrôlant le pourcentage de M_value et de gradient de M_value. Cette méthode décrite « à facteurs de gradients » ou « Gradient Factor (GF) » en anglais. Un facteur de gradient est une fraction décimale (ou pourcentage) du gradient de M_value. Les GF permettent de générer des paliers profonds tout en imposant une marge de sécurité définie à l'avance, et ce durant toute la décompression (voir schéma ci-dessous). La programmation de paliers profonds dans un profil, augmentera généralement la durée des derniers paliers ainsi que le temps total de la décompression. Cependant, si le résultat est une vraie décompression réellement efficace, le concept de décompression économique n'en est pas compromis pour autant.



4.5.9. Réglages des GF

Dans la pratique, deux valeurs de facteur de gradient sont à paramétrer, le GF haut et le GF bas. Le GF bas va définir la profondeur du premier palier, plus sa valeur sera faible (proche de 0), plus le palier sera profond et débutera près de la droite des pressions ambiantes. Le GF haut définira la marge de sécurité, plus sa valeur sera élevée (proche de 1), plus on sera proche de la droite des M_values et plus la sécurité sera réduite. La ligne imaginaire tracée entre le GF haut et le GF bas symbolise la droite que le profil ne pourra traverser, une nouvelle droite des M_value et ainsi générée, située entre celle définie par Bühlmann et la droite des pressions ambiantes, et d'inclinaison variable. Selon les logiciels, les GF s'écrivent entre 0,01 et 1 (décimal) ou entre 5 et 100 (pourcentage). Faire démarrer très tôt (profond) sa décompression influe naturellement sur la durée des paliers supérieurs dans le sens de l'allongement. Une question se pose immédiatement, quelles valeurs de GF utiliser ? Des facteurs individuels (âge, poids, forme physique et psychique, etc...) et liés à la plongée (profondeur, froid, profils, etc...). D'origine, les logiciels proposent par défaut des valeurs de 20 à 30 pour le GF bas et de 70 à 80 pour le GF haut. Ce n'est pas une mauvaise idée de s'y tenir lors des premières immersions, quitte à augmenter la valeur du GF haut si l'on se sent en pleine forme après la plongée ou bien de diminuer sa valeur dans le cas contraire.



4.5.10. Profils avec la méthode VPM/RGBM

Le modèle RGBM (Reduced Gradient Bubble Model) développé au début des années 90 par Wienke tire ses sources du modèle VPM de Yount. Ce modèle suppose que les bulles vasculaires croissent à partir de noyaux gazeux pré-existants d'un rayon proche de 1 micron. Il est en effet difficile de fabriquer une bulle à partir de zéro car il faudrait des niveaux d'énergie considérable pour démarrer le processus de croissance d'une bulle. Le micro noyau gazeux est donc une petite bulle « prête à l'emploi ». Ce modèle appartient à la famille des modèles di-phasiques où une phase gazeuse cohabite avec une phase dissoute, cet ensemble a des propriétés contradictoires. Pour éliminer les gaz dissous, l'objectif du modèle de Haldane est de faire remonter le plongeur le plus vite possible près de la surface, la remontée est rapide et les paliers sont effectués proches de la surface car dans ces conditions se crée le « gradient » favorable à la sortie des gaz dissous dans les tissus. Pour éliminer la phase gazeuse, et c'est là l'idée nouvelle des modèles récents, le plongeur est maintenu relativement profond. Le gaz peut alors sortir de la bulle qui réduit sa taille jusqu'au rayon critique. En effet, c'est une propriété remarquable des bulles de gaz comme des bulles de savon, que de devenir instable et s'écraser dès que le rayon descend en dessous d'une certaine valeur critique. Comme ces 2 phases doivent disparaître, la stratégie de la décompression doit ménager « la chèvre et le chou », c'est-à-dire la phase dissoute et la phase gazeuse. La vitesse de remontée est donc choisie de façon à éviter qu'aucune bulle n'augmente de taille dans aucun des tissus. On obtient ainsi ces nouveaux profils caractérisés par des vitesses de remontée lentes et des paliers profonds. Ce modèle est relativement complexe car il a besoin d'hypothèses sur la distribution initiale des noyaux gazeux et la nature des tissus.

Exemple d'un profil de -90 m, 15min avec un TX 15/56 calculé avec la méthode VPM

V-Planner - Yvan

Plongeur Carnet Sauve. Imprimer Config Calc Perte gaz + ou - P. retour À Propos Quitter

Plongée suivante Plongée 2

Intervalle surface 5 jours 48 hr 24 hr 000 Jours 00:00 h:mm

Duvert SCR CCR

V-Planner 3.70 par R. Hemingway, VPM code-programme par Erik C. Baker.

Modèle de décompression: VPM - B/E

PROFIL DE PLONGÉE

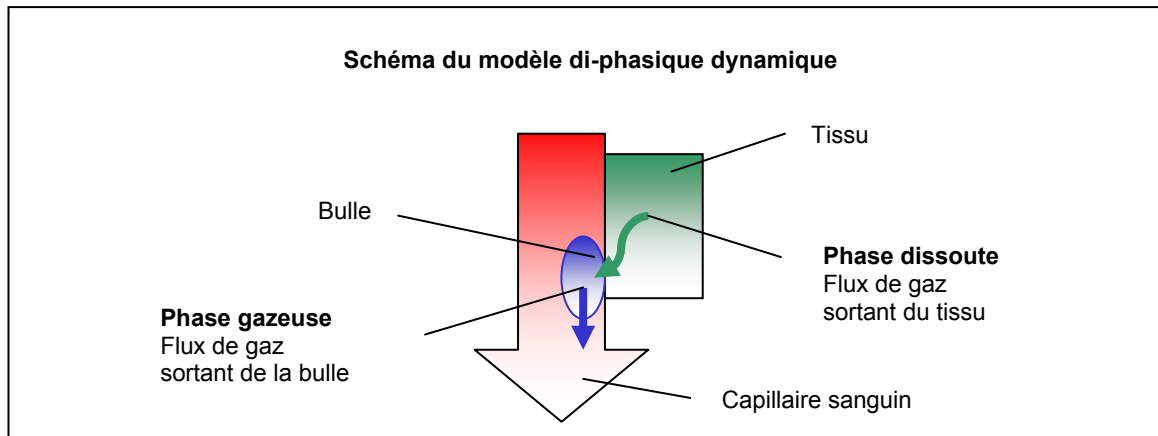
Intervalle de surface = 2 jours 0 hr 0 min.
Altitude = 700m (s)
Conservatisme = Nominal

Desc à 30m	(2)	Trimix 12/56	15m/min	Descente.
Desc à 90m	(4)	Trimix 12/56	30m/min	Descente.
Niveau 90m	10:57 (15)	Trimix 12/56	1.19 ppO2	30m ead, 34m end
Rem. à 63m	(17)	Trimix 12/56	-10m/min	Remontée.
Palier à 63m	0:18 (18)	Trimix 12/56	0.87 ppO2	20m ead, 22m end
Palier à 60m	1:00 (19)	Trimix 12/56	0.83 ppO2	18m ead, 21m end
Palier à 57m	1:00 (20)	Trimix 12/56	0.80 ppO2	17m ead, 19m end
Palier à 54m	1:00 (21)	Trimix 12/56	0.76 ppO2	16m ead, 18m end
Palier à 51m	1:00 (22)	Trimix 12/56	0.73 ppO2	15m ead, 17m end
Palier à 48m	1:00 (23)	Trimix 12/56	0.69 ppO2	13m ead, 15m end
Palier à 45m	1:00 (24)	Trimix 12/56	0.66 ppO2	12m ead, 14m end
Palier à 42m	1:00 (25)	Trimix 12/56	0.62 ppO2	11m ead, 13m end
Palier à 39m	1:00 (26)	Nitrox 32	1.56 ppO2	32m ead
Palier à 36m	1:00 (27)	Nitrox 32	1.46 ppO2	30m ead
Palier à 33m	1:00 (28)	Nitrox 32	1.37 ppO2	27m ead
Palier à 30m	1:00 (29)	Nitrox 32	1.27 ppO2	24m ead
Palier à 27m	1:00 (30)	Nitrox 32	1.18 ppO2	22m ead
Palier à 24m	2:00 (32)	Nitrox 32	1.08 ppO2	19m ead
Palier à 21m	2:00 (34)	Nitrox 32	0.99 ppO2	17m ead
Palier à 18m	4:00 (38)	Nitrox 32	0.89 ppO2	14m ead
Palier à 15m	4:00 (42)	Nitrox 32	0.80 ppO2	12m ead
Palier à 12m	6:00 (48)	Nitrox 32	0.70 ppO2	9m ead
Palier à 9m	10:00 (58)	Nitrox 32	0.61 ppO2	6m ead
Palier à 6m	36:00 (94)	Oxygen	1.60 ppO2	0m ead
Surface	(94)	Oxygen	-10m/min	Remontée.

Le dégazage commence à 71.6m

OTU pour cette plongée: 115
CNS Total: 81.9%

3725.4 ltr Trimix 12/56



4.5.11. Conclusion

Avec l'accès au Trimix, les plongeurs vont pouvoir plonger encore plus profond parce que l'hélium est très permissif (aucun effet sur le système nerveux et s'élimine plus rapidement que l'azote), le problème est que les accidents de décompression restent et que s'ils surviennent, ils sont vraiment très graves, souvent mortels. L'enthousiasme n'a rien à voir avec la physiologie, ni la décompression avec un sport, aussi il faut se méfier des décompressions profondes qu'on comprend encore mal, il faut travailler ses mélanges pour essayer d'y échapper. Mais alors, quelle méthode utilisée ?

Comme c'est souvent le cas en plongée Tech, cela dépend ! Cela de plusieurs facteurs comme (plongée spéléo, mer, circuit ouvert/fermé, DIR, etc...). Une solution reste un compromis entre les différents modèles comme ceux utilisés par le logiciel V-Planner qui utilise un modèle VPM avec la prise en compte de la loi de Boyle-Mariotte durant la remontée (VPM-B comme Boyle) et les paliers sont déterminés par la méthode des GF (Gradient Factors) de Baker. Avec un recycleur à circuit fermé, c'est beaucoup plus simple car la décompression se fait à PO_2 constante.

Plongeurs recycleurs Inspiration



4.6. Interruption des paliers

4.6.1. Généralités

En cas de difficultés, le plongeur Tech doit planifier une procédure en cas de non-respect d'une partie ou de la totalité des paliers de décompression. Actuellement deux méthodes sont utilisées, la méthode de l'US NAVY et la méthode Bühlmann. Attention, aucune de ces méthodes n'a été scientifiquement validée et faite l'objet de recherches. Cependant, mieux vaut prévoir et appliquer le cas échéant, une procédure non validée que de ne rien prévoir du tout.

4.6.2. Méthode US NAVY (USN)

En cas d'interruption d'une partie ou de la totalité des paliers l'US Navy préconise de procéder de la manière suivante :

- Paliers profonds (plus de 12 mètres) → Refaire tous les paliers
- Paliers moins profonds (de 12 à 3 mètres) → On remplacera les durées des paliers selon le tableau ci-dessous :

Tableau des procédures en cas d'interruption de paliers

Paliers	Procédure
12 mètres	multiplié par 0.25 la durée du palier à 3 mètres
9 mètres	multiplié par 0.33 la durée du palier à 3 mètres
6 mètres	multiplié par 0.5 la durée du palier à 3 mètres
3 mètres	multiplié par 1.5 la durée du palier à 3 mètres

Attention jamais redescendre en cas de symptômes ou de temps en surface de plus de 5 minutes

4.6.3. Méthode Bühlmann

- **Interruption palier non profond (3 et 6 mètres)**

- Refaire les paliers précédents et multiplié par 1.5 le palier interrompu et le suivant.

- **Interruption des paliers profonds (≥ 9 mètres) ou aucuns paliers effectués**

- Descendre à la moitié de la profondeur maximale y rester 5 min. et effectuer l'intégralité des paliers en comptant le temps de séjour, la durée de la remontée (même rapide), 3 min max. en surface, 5 min à la mi-profondeur.

- **Remontée trop rapide (avant les premiers paliers)**

- Attendre le temps jusqu'au Runtime normal puis continuer de remonter.

Exemple : Un plongeur remonte de -60m à -20m en 1min, il doit rester à 20m durant 3 min, c'est-à-dire la durée d'une remontée à 10m/min.

Attention jamais redescendre en cas de symptômes ou de temps en surface de plus de 3 minutes

4.7. Les accidents de décompression

4.7.1. Généralités

Il faut admettre qu'avec le développement de la plongée Tech, les centres hyperbares auront bientôt à traiter de nombreux accidents de décompression au Trimix. On a quelques éléments pour se rassurer, d'abord les plongeurs Tech sont généralement bien éduqués et ils sauront éviter les erreurs grossières. Ensuite, les tables Trimix sont des tables évoluées, avec des paliers profonds et des mélanges Nitrox suroxygénés, qui minimisent les bulles circulantes. Enfin l'hélium est plus facile à éliminer que l'azote.

Il y a aussi de quoi s'inquiéter, d'abord les plongées Trimix sont parfois profondes et il y a beaucoup de gaz à éliminer. De plus, si les plongeurs ne sont pas correctement formés, s'ils utilisent des tables taillées dans des logiciels récupérés sur l'Internet, bref s'ils font n'importe quoi, on va tomber dans le pathétique.

4.7.2. Les bases de notre compréhension

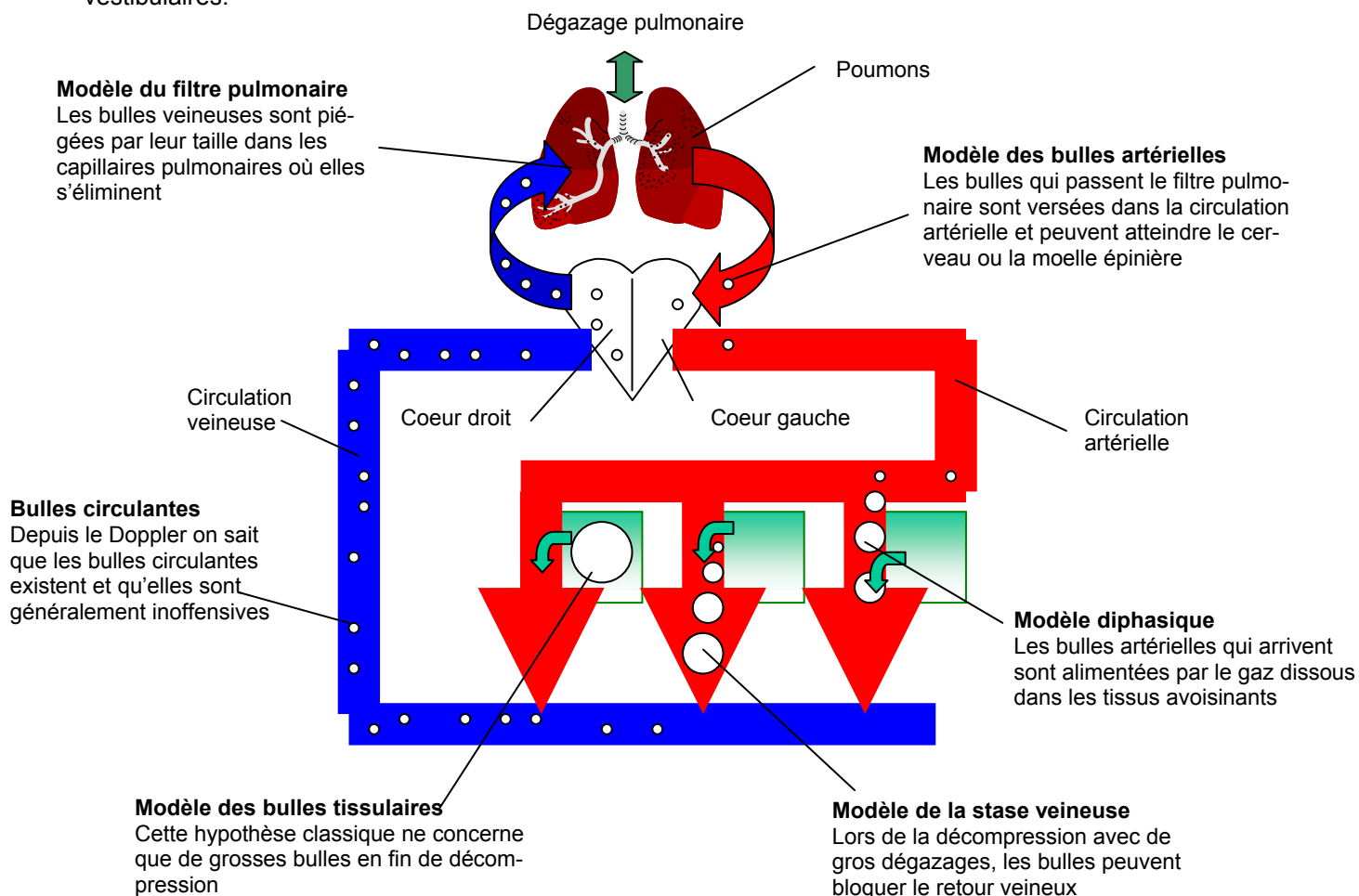
Comment évolue le risque d'accident de décompression quand on passe de plongée à l'air à la plongée au Trimix ? Pour explorer ce côté obscur de la force des choses, il faut faire appel à des faits qui ne sont pas encore disponibles dans le monde de la plongée sportive. Il faut remonter aux débuts de la plongée offshore, celle des « PPLI » ou Plongées Profondes Légères d'Intervention, quand les plongeurs professionnels ressemblaient un peu aux plongeurs Tech. Avec le Trimix, le problème des accidents de décompression est situé à cheval entre les accidents à l'azote et les accidents à l'hélium. A priori les plongées Trimix entraînent comme les autres plongées tous les types d'accidents de décompression. Pourtant, la répartition des symptômes n'est pas la même qu'avec l'air. L'hélium est peu soluble mais très diffusible, c'est un gaz qui a la fâcheuse tendance à faire des petites bulles qui donnent des accidents différents des plongées à l'air. De même, les accidents neurologiques de type médullaire sont peu communs, en tout cas cantonnés à des temps de fond de durée importante, au moins deux heures, peu compatible avec la plongée autonome.

Pour essayer de comprendre, revenons au phénomène initial. Le passage d'un gaz inerte de sa forme dissoute à sa forme gazeuse est reconnu comme la première cause des accidents de décompression. Ce passage s'effectue dans les liquides du corps humain à partir des micros noyaux gazeux, qui sont de très petites quantités de gaz non dissoute présentes dans l'organisme. Un tel processus intervient lorsqu'une décompression trop rapide excède la vitesse à laquelle la diffusion et la circulation sanguine peuvent éliminer le gaz à travers les poumons sans formation d'une phase gazeuse. Le développement des symptômes dépend de la quantité de gaz présent et de sa localisation. Les bulles gazeuses peuvent perturber les fonctions corporelles de la façon suivante :

- En obstruant les vaisseaux (artères, veines) et le système lymphatique, donc en diminuant ou en bloquant la circulation sanguine
- En comprimant les tissus, provoquant une diminution de la circulation sanguine ou lymphatique, et de ce fait, interférant avec les échanges gazeux et le métabolisme
- En déchirant les tissus, des groupes de cellules, et en formant des espaces artificiels
- En provoquant des perturbations secondaires de certaines fonctions organiques. Par exemple l'augmentation de la perméabilité des vaisseaux sanguins provoque une perte des liquides circulants et une concentration des globules sanguins. Les symptômes varient en fonction de la localisation de l'accident.

4.7.3. Les principaux mécanismes de l'accident de décompression

Le modèle le plus simple et le plus ancien est celui de la bulle tissulaire. Il se présente sous différents noms selon les auteurs mais sa base mathématique est la même : coefficients de sursaturation, M-Values, Modèle du volume critique, etc . . . Ce modèle décrit assez bien les grosses bulles qui apparaissent en fin de décompression et qui peuvent être responsable des douleurs articulaires. De tels accidents arrivent surtout en plongée commerciale et particulièrement en saturation. Ce ne sont pas des accidents de plongée graves et de plus ils sont peu fréquents (moins de 25%) chez les plongeurs sportifs. Les bulles silencieuses ou les bulles circulantes ont été détectées avec le Doppler. Elles traduisent le dégazage des tissus mais pas forcément le risque d'accident de décompression, ce qui fait la difficulté des études de détection Doppler. En effet, le sort le plus vraisemblable d'une bulle circulante est d'arriver aux poumons où elle sera piégée dans les capillaires alvéolaires et éliminée par diffusion des gaz qu'elle contient. Le modèle du filtre pulmonaire a permis d'expliquer comment des bulles pouvaient passer sur le versant artériel par des shunt (shunt cardiaques ou shunt pulmonaire) ou à la suite de manœuvres (Valsalva, effort en sortie de plongée, plongées successives, plongées yo-yo). Les bulles artérielles sont redistribuées dans les tissus où elles risquent de grossir si elles sont alimentées par un tissu en train de dégazer. On explique ainsi les accidents neurologiques, centraux ou spinaux. Les modèles diphasiques dynamiques prennent en compte de petites bulles artérielles pré-existantes dont ils s'efforcent de contrôler la taille durant la remontée. La stratégie consiste à sortir le gaz à la fois des bulles et des tissus et conduit à des profils de remontée à vitesses ralenties et paliers profonds. Ils interviennent dans des plongées profondes de courte durée connues pour entraîner des accidents de type vestibulaires.



4.7.4. L'effet des bulles

Malgré des formes très variées, les accidents de décompression atteignent préférentiellement certains organes comme la moelle épinière, le cerveau, l'oreille interne, les tendons. Plusieurs mécanismes de lésions ont été mis en évidence. Les dommages créés par les bulles sont dus à la fois à des phénomènes biochimiques et à des phénomènes mécaniques (embolies gazeuses).

- **Les phénomènes biochimiques**

Les bulles sont des corps étrangers qui blessent les cellules. Certains médiateurs chimiques sont alors activés étant responsables de la MDD, ces médiateurs agissent rapidement, ceci est comparable à une allergie par piqûres d'insectes. Des expériences sur l'animal ont montré que ces médiateurs peuvent occasionner une MDD et qu'elle peut être prévenue par l'introduction d'antagonistes ou d'inhibiteurs de ces médiateurs.

- **Les phénomènes mécaniques (embolies gazeuses)**

Les bulles du sang veineux arrivent au cœur où elles peuvent être détectées par ultrasons, mais il n'y a pas de correspondance directe entre fréquence des bulles et accident de décompression. Cependant, le risque augmente avec la quantité de bulles. En effet, les bulles entrant dans les poumons sont filtrées par la circulation pulmonaire. Au-delà d'une certaine quantité, variable selon la capacité de filtration des individus, une partie passe dans la circulation artérielle provoquant de façon aléatoire des embolies gazeuses en aval. Le cerveau est la principale cible des embolies gazeuses, plus que la moelle. De même, la fermeture du shunt inter-auriculaire n'est pas constante et certains individus adultes conservent, dans certaines conditions un passage droite-gauche par inversion de pression dans les oreillettes occasionnée par certains efforts et notamment la manœuvre de Valsalva, ce qui fait une raison de plus de l'éviter durant la remontée. Ces individus sont naturellement prédisposés aux accidents de décompression.

- **Le cas particulier de la moelle épinière**

Le drainage des veines périurales est aléatoire, il s'agit en fait d'un lac veineux, il n'y a pas de valvules, le sang circule dans un sens ou dans un autre, le débit sanguin est faible, le sang stagne longtemps. Les bulles fabriquées sur place vont y grossir et former des caillots.

- **Le blocage de la décompression**

La formation des bulles freine la décompression. Tobias a illustré cet effet en mesurant l'élimination du Krypton dans une main avec et sans formation de bulles. C'est pourquoi, il est dangereux de raccourcir les paliers profonds et il est important de respecter la vitesse de remontée pour aller au premier palier. En effet, ne pas respecter ces paliers provoque la formation de bulles qui, même si elles n'ont pas de conséquences en elles-mêmes, ralentissent la désaturation et augmente le risque d'accident. De même, la multiplicité des bulles résiduelles après une première plongée perturbe la décompression de la plongée suivante. De plus, la recompression permet à certaines bulles de changer de place avant de grossir de nouveau au retour, par exemple après avoir franchi le filtre pulmonaire. Ce phénomène s'amplifie de plongée en plongée, d'où l'impossibilité de conduire sans risque plusieurs plongées successives.

4.7.5. Les puces et moutons

Pas de revue digne de ce nom sans une mention des puces et moutons, pourtant ces phénomènes sont rares, plutôt liés à la plongée en caisson ou en vêtement sec. Ils sont encore moins probables avec l'hélium qui diffuse à travers la peau. Les bulles apparaissent dans les vaisseaux sanguins ou lymphatiques de la peau qui drainent les liquides extra cellulaires. Elles sont irritantes et peuvent provoquer la libération de substances responsables de démangeaisons et de légères douleurs. L'expansion de la bulle est possible sans une augmentation significative de la pression tissulaire. Ces symptômes sont souvent bénins, une petite réduction de la circulation sanguine ou lymphatique est sans importance.

4.7.6. Les douleurs articulaires (Bends)

Les tissus connectifs formés à partir de fibres de collagène constituent la structure des tissus non osseux, des ligaments et des tendons. Le tissu conjonctif est un tissu très sensible, en effet, une augmentation de pression de l'ordre de 15 mbar sur un tendon ou un ligament entraîne la douleur. Ces tissus fibreux sont aussi peu extensibles. Ils résistent à la pression et par conséquent, la présence de bulles gazeuses dans ces tissus entraîne une surpression locale qui stimule douloureusement les terminaisons nerveuses. La faible différence de pression provoquant la douleur indique qu'une légère recompression peut la soulager. On sait qu'une recompression de quelques mètres suffit à soulager les douleurs lorsque les symptômes sont déclarés assez tôt. On sait également qu'on n'a jamais observé une modification pathologique des tissus au niveau d'une douleur articulaire.

Les accidents de type douleur articulaires sont rares en plongée unitaire HélioX car il faut beaucoup de gaz dissous pour former de grosses bulles nécessaires pour déclencher les symptômes. L'expérience de la plongée offshore a montré qu'il faut vraiment passer en saturation pour rencontrer ce genre d'accrochage.

4.7.7. Les problèmes respiratoires

On a constaté depuis longtemps que les bulles sont présentes dans le système veineux en décompression, même si le plongeur ne présente aucun symptôme. On les appelle les bulles circulantes, et elles sont détectées en plongée à l'air dans les veines drainant les tissus adipeux. Les bulles sont transportées par le sang jusqu'aux poumons au niveau desquels elles se trouvent piégées dans les capillaires. Les poumons sont évidemment adaptés aux échanges gazeux mais seulement lorsque le gaz se localise dans les alvéoles. L'élimination des bulles se fait sans aucun symptôme tant que l'apport de gaz de décompression n'est pas trop important. Une quantité de 5 ml de gaz arrivant au poumon peut être ressentie sous forme d'une douleur passagère.

Une trop grande quantité de bulles gazeuses arrivant au poumon à la suite d'une décompression inadéquate peut causer une détresse respiratoire sérieuse avec douleur retro-sternale, toux sèche et une sensation d'extrême fatigue. Les problèmes respiratoires sont seulement associés aux accidents graves, aux décompressions explosives. Il est par conséquent, indispensable de préparer suffisamment nos plongées pour éviter ce genre de drame.

4.7.8. Les problèmes neurologiques

Les problèmes neurologiques les plus importants sont ceux liés à la moelle épinière, ce qui se traduit par une paralysie, affectant souvent les deux jambes, accompagnée de troubles de la sensibilité. Cependant, les symptômes cérébraux peuvent être associés à des lésions du cerveau, révélées par des examens spécifiques. Les troubles de la vision, du langage ou les vertiges ne sont pas rares, mais entraînent rarement une incapacité permanente. On connaît 3 causes principales : Les bulles artérielles, tissulaires et stagnantes.

- **Les bulles artérielles (qui n'ont pas été éliminées au niveau des poumons)**

On sait que les bulles peuvent se former dans les veines au début de la décompression. Si elles arrivent à traverser le filtre pulmonaire durant la remontée et à se fixer dans la région de la moelle épinière, elles augmenteront de volume en raison de la diminution de la pression ambiante et de la grande quantité de gaz dissous dans les tissus avoisinants.

- **Les bulles tissulaires (qui entraînent une compression des tissus nerveux)**

On a constaté la présence de bulles dans les gaines nerveuses de la moelle épinière et les vaisseaux sanguins lors d'expériences animales. L'azote montre la plus grande tendance à former des bulles de cette façon. La constitution de la moelle épinière fait que le volume de gaz tolérable, avant l'apparition de problèmes circulatoires graves, est très faible en raison de la contre pression exercées par les parois rigides des vertèbres.

- **Les bulles stagnantes (qui se trouvent dans les réseaux veineux à circulation ralentie Azigos)**

Elles bloquent le circuit sanguin par un effet de barrage. Le risque majeur avec l'hélium est de générer des accidents de type neurologiques centraux. En particulier, l'expérience de la Comex avec des plongées HélioX unitaires de type « PPLI » a montré que les profils de plongée de courte durée associés avec une remontée au premier palier de grande amplitude, ont tendance à provoquer des accidents vestibulaires. L'accident vestibulaire n'est pas causé dans ce cas par une bulle dans l'appareil vestibulaire mais plutôt par une atteinte de la zone du cerveau responsable de l'équilibre. Cette zone est connue pour avoir une irrigation sanguine terminale, ce qui veut dire que les bulles qui s'y égarent ont tendance à s'y coincer. Il semble que l'accident de décompression typique de la plongée Trimix, disons après une plongée de 20 minutes à -75 mètres, soit l'accident vestibulaire.

4.7.9. Les facteurs favorisants

Facteurs individuels	Facteurs liés à la plongée
Age (> 40 ans)	Profondeur, durée trop importante (plongée saturante)
Excès pondéral (Obésité)	Plongées répétitives excessive (+ 2 plongées/jour), profil « yoyo », plongées altitude
Mauvaise forme physique	Vitesse de remontée > 15m/min (sans paliers intermédiaires)
Antécédents de traumatismes, de maladies graves, d'ADD, de FOP (Foramen Ovale Perméable)	Effort, fatigue pré-plongée (voyage, stress psychologique, déshydratation, hypoglycémie, etc...)
Longueur pratique de la plongée (> 10 ans)	Effort, froid, stress psychologique durant la plongée
Mauvaise hygiène de vie, prise de médicaments, alcool, tabac, alimentation trop riche en protéines	Effort, fatigue post-plongée (apnée, sport violent, déshydratation, hypoglycémie, etc...)
Perte de conditionnement due à la non répétition des plongées (plongée précédente depuis plus de 3 jours)	

4.8. La décompression à PO₂ constante

4.8.1. Généralités

Les principes qui régissent la décompression en circuit ouvert sont les mêmes que ceux en circuit fermés, mais le fait que les recycleurs à circuit fermés maintiennent une pression partielle d'oxygène constante, amène certaines différences qui peuvent avoir des conséquences inattendues.

Maintenir une pression partielle d'oxygène constante ne signifie pas que l'on maintienne une pression partielle constante des gaz inertes, loin s'en faut ! Or ce sont bien les gaz inertes qui dirigent la décompression.

La documentation sur le sujet est assez maigre et on retrouve dans les pratiques les mêmes diversités qu'en circuit ouvert, choix diluants fond comme on trouvait différents mélanges fonds et choix diluants pour la remontée comme on trouvait différents mélanges de déco. Décompression à 1.3 ou 1.6 comme on trouvait des adeptes de l'oxygène pur et ceux du Nitrox 80%.

Les plongeurs en recycleur sont souvent d'anciens plongeurs en circuit ouvert et il est donc normal que certaines philosophies aient été transposées. Or, en circuit ouvert comme en circuit fermé, le choix des mélanges utilisés est un élément primordial pour calculer sa décompression et le résultat de terribles compromis.

4.8.2. Le diluant fond Héliair

Pour les plongées dans la zone des 40 mètres, l'air est un excellent diluant et il permettra à la machine de fabriquer un Nitrox adapté à la profondeur. Pour des plongées plus profondes, il sera nécessaire d'utiliser un diluant à base d'hélium et c'est là que les choses se compliquent.

L'héliair est un mélange très utilisé par les plongeurs en recycleur à circuit fermé. Il s'agit d'ailleurs moins d'un mélange que d'une méthode de fabrication des trimix. On procède en injectant la quantité d'hélium souhaitée dans la bouteille puis on complète avec de l'air. Ce qui implique qu'on aura forcément des taux d'oxygène inférieurs à 20% et que plus le pourcentage d'hélium sera élevé, plus le pourcentage d'oxygène (et d'azote) sera faible. Exemples :

- Si on veut 30% d'hélium dans le mélange final, on aura un TX 14/30
- Si on veut 50% d'hélium dans le mélange final, on aura un TX 10/50
- Si on veut 65% d'hélium dans le mélange final, on aura un TX 7/65

Cette méthode présente de nombreux avantages. Tout d'abord, la bouteille n'a pas besoin d'être dégraissée car, à aucun moment, on introduit de l'oxygène pur. Ensuite, il est possible de compléter une bouteille qu'on a partiellement utilisée sans être obligé d'avoir un analyseur d'hélium et tout en conservant une bonne sécurité (à condition de refaire le même mélange que celui qui reste dans la bouteille). Par exemple, il reste 120 bars de TX 10/50 et on veut la compléter à 200 bars. Pour ce cas, la quantité d'hélium à ajouter sera égale à la moitié de la pression manquante (soit $(200 - 120)/2 = 40$ bars) et de compléter à l'air (40 bars). On obtiendra donc à nouveau un TX 10/50 à 200 bars et pour le vérifier, il suffit d'analyser l'oxygène (ce qui est plus facile et moins cher que pour l'hélium).

Si le pourcentage d'oxygène est de 10%, alors on est sûr que le pourcentage d'hélium sera bien de 50%, magique ! Toute dérive dans le pourcentage d'oxygène implique une dérive calculable dans le pourcentage d'hélium ! La pratique montre que si l'on est soigneux dans la confection du mélange, on conserve une bonne stabilité même après une quinzaine de remplissages. De plus, on peut corriger le tir : si il restait 120 bar dans la bouteille mais que le pourcentage d'oxygène était de 10.7% et bien on va ajouter un peu plus d'hélium que prévu (44 bars) pour ramener la valeur finale de l'oxygène à 10% et inversement.

Enfin, il faut reconnaître qu'avec cette méthode, il est aisé de fabriquer avec précision des trimix à faible teneur en oxygène (ex : TX 7/65), ce qui est difficile à réaliser habituellement par transvasement car nos matériels sont souvent analogiques et peu précis. Ici, on se sert de la composition de l'air (qui est stable quelle que soit la température, l'altitude, etc.) pour fabriquer le mélange.

Maintenant, si la méthode présente de nombreux avantages, le trimix obtenu, lui, présente certains inconvénients. Habituellement les plongeurs ne se soucient que du pourcentage d'hélium et ils ne se préoccupent pas du pourcentage d'oxygène, partant du principe que c'est le recycleur qui le régulera. Effectivement, si le diluant contient peu d'oxygène, ce n'est pas grave car la machine ramènera automatiquement cette valeur au set-point sélectionné. Mais, si ce diluant est susceptible d'être utilisé comme secours en circuit ouvert, son pourcentage d'oxygène est peut-être un peu faible et le pourcentage des gaz inertes un peu élevé. La zone d'utilisation de ce mélange sera restreinte.

➤ A -80m, la composition du mélange respiré avec un Hélicair 10/50 avec une PO_2 à 1.3 est de $O_2 = 14.5\%$, $He = 47.5\%$, $N_2 = 38\%$.

➤ A -120m, si nous souhaitons une PEA de 22m (confortable au niveau narcose et risque d'essoufflement), on choisira un Hélicair 5/75 et là, on se rend mieux compte de la faiblesse du taux d'oxygène comparé à celui de la boucle. La composition du mélange respiré avec ce mélange et une PO_2 à 1.2 est de :

Oxygène = 9.23%, Hélium = 71.66%, Azote = 19.11%

Avec seulement 5% d'oxygène dans le diluant, le passage sur circuit ouvert ne sera pas idéal, on va augmenter le pourcentage des gaz inertes respirés et le mélange ne sera viable que jusqu'à -30m.

Pour des plongées jusqu'à -80m, l'Hélicair semble bien adapté mais pour des profondeurs plus importantes, son intérêt diminue fortement.

4.8.3. Le diluant fond Trimix

Pour prévoir un éventuel passage en circuit ouvert, on peut être tenté d'optimiser la composition du diluant. Par exemple, au lieu d'emporter un Hélicair 10/50, on pourrait prendre un TX15/50.

Tableau comparatif entre un Hélicair 10/50 et un TX 15/50

Prof	Hélicair 10/50 avec PO ₂ 1.3 bar					Trimix 15/50 avec PO ₂ 1.3 bar				
	O2 [%]	He [%]	N2 [%]	PN2 [bar]	PNE [m]	O2 [%]	He [%]	N2 [%]	PN2 [bar]	PNE [m]
0m	20	0	80	0.8	--	20	0	80	0.8	--
6m	81.25	10.42	8.33	0.13	--	81.25	11.03	7.72	0.12	--
10m	65	19.44	15.56	0.31	--	65	20.59	14.41	0.29	--
20m	43.33	31.48	25.19	0.76	--	43.33	33.33	23.33	0.7	--
30m	32.5	37.5	30	1.2	5	32.5	39.71	27.79	1.11	3.9
40m	26	41.11	32.89	1.64	10.56	26	43.53	30.47	1.52	9.04
50m	21.67	43.52	34.81	2.09	16.11	21.67	46.08	32.25	1.94	14.19
60m	18.57	45.24	36.19	2.53	21.67	18.57	47.9	33.53	2.35	19.34
70m	16.25	46.53	37.22	2.98	27.22	16.25	49.26	34.49	2.76	24.49
80m	14.44	47.53	38.02	3.42	32.78	14.44	50.33	35.23	3.17	26.93

Bien que nous ayons 50% d'hélium dans les deux diluants, nous n'aurons pas les mêmes pourcentages réels dans la boucle respiratoire. Le pourcentage initial d'oxygène du diluant (que la machine réajustera en fonction du set-point) a donc des conséquences sur le pourcentage de chacun des gaz inertes. Ceci est dû au ratio He/N₂ initial qui est différent dans les deux diluants.

Avec le TX 15/50, lorsqu'on est à -80m, on s'aperçoit que le pourcentage d'oxygène du diluant (15%) est légèrement supérieur à celui de la boucle respiratoire (14.44%). Ce qui signifie que chaque injection de diluant à cette profondeur élèvera la PO₂ de la boucle au delà de la valeur du set-point. Avant toute nouvelle injection, la machine devra donc attendre que le métabolisme du plongeur ait suffisamment consommé d'oxygène pour que la PO₂ redescende en dessous de 1.3 bar. Il n'est pas souhaitable d'avoir un diluant qui puisse élever la PO₂ au dessus de la valeur du set-point. La machine est prévue pour ajouter de l'oxygène jusqu'à la limite sélectionnée, elle n'est pas conçue pour en retirer. A profondeur constante, seuls le métabolisme du plongeur peut faire diminuer la PO₂ de la boucle respiratoire ainsi qu'un rinçage au diluant si, et seulement si, la teneur en oxygène de celui-ci est inférieure aux besoins du recycleur.

Il serait donc dommage de se passer de cette possibilité de rinçage qui permet de diminuer la PO₂ de la boucle et de vérifier l'exactitude des valeurs indiquées par les sondes (à la suite d'un rinçage effectué à -80m avec un TX 10/50, les sondes doivent afficher une PO₂ de : $0.1 * 9 = 0.9$ bar).

4.8.4. Le diluant fond HélioX

On a peu de retour d'expérience sur l'utilisation de l'HélioX en plongée loisir, mais il y a quand même eu quelques expériences. En 1998, sur les conseils de Jean-Pierre Imbert, Olivier Isler a effectué sa plongée souterraine à La Doux de Coly à l'HélioX (plusieurs heures à une profondeur maximale de -60 mètres).

Par contre, les professionnels l'utilisent beaucoup, mais principalement pour des plongées à saturation. Pour ces plongées, la PO_2 est habituellement maintenue à 0.4b pendant le séjour au fond et même durant une grande partie de la décompression (qui se fait donc en continue et à PO_2 constante jusqu'à une zone proche de la surface).

- **Les avantages de l'Hélium**

- Confort respiratoire du plongeur (mais distorsion de la voix)
- Repousse les limites de la narcose pour les profondeurs importantes
- Permet une décompression plus rapide qu'avec l'azote (on parle ici de plongée à saturation)
- Un seul gaz à gérer pour la décompression
- On fixe la vitesse de remontée en fonction des tissus les plus contraignants
- On s'affranchit donc des changements de gaz inertes complexes et pas toujours prévisibles
- L'hélium est constitué de molécules très petites et il diffuse donc vite et facilement, peu de chance que des molécules restent piégées dans certaines parties de l'organisme (Ce qui en fait un gaz " prévisible ")

- **Les inconvénients de l'Hélium**

- Les échanges thermiques sont très rapides, ce qui fait que l'hélium refroidit très rapidement le plongeur : par échanges cutanées et par la respiration. Il faudra donc réchauffer les gaz respiratoires.
- A cause des pressions et des durées d'expositions importantes, on devra fortement limiter les doses d'oxygène absorbées par les plongeurs (d'où les 0.4 bars). A l'inverse de la plongée loisir, il ne sera pas non plus possible d'augmenter significativement la PO_2 lors de la décompression.

La plongée loisir Tech se trouve donc relativement loin des conditions et contraintes des plongées professionnelles. Cependant, lorsque les profondeurs deviennent importantes (il y a de plus en plus de plongeurs qui dépassent les 150m) ou que les durées d'exposition dépassent une ou plusieurs heures, les caractéristiques de la plongée " sportive " commence à se rapprocher de celles de la plongée professionnelle.

4.8.5. Choix des diluants fond

En surface, la tension d'azote (T_{N_2}) régnant dans notre organisme est d'environ 0.75 bar, ce qui ne correspond d'ailleurs pas à un état de saturation (la pression ambiante est de 1 bar). En réalité, nos tissus pourraient supporter au moins un bar d'azote sans être en état de sur-saturation.

Si on construit un trimix où la PN_2 n'est jamais supérieure à 1bar (un mélange non saturant en azote), alors l'azote contenu dans ce mélange ne posera pas de problème lors de la décompression car on n'augmentera pas sa charge initiale au cours de la plongée.

Par exemple, pour plonger à -80m, cela donnerait une PN_2 de 1b au fond, soit un mélange à 11% d'azote. En réalité, il n'y a qu'à -80m qu'on a une PN_2 de 1b. Pendant la descente (et la remontée), la PN_2 est inférieure à 1 bar. Et même au fond, il faudra un certain temps avant d'atteindre une tension de 1b (la saturation en azote). C'est pourquoi, lorsqu'il s'agit de brèves incursions, on peut se permettre des taux d'azote beaucoup plus important que cette limite théorique sans que ce gaz ne soit " directeur " dans la décompression.

Il serait donc dommage de se passer de cet avantage et c'est pourquoi on utilise le Trimix.

Par contre, ce raisonnement ne peut plus être tenu si la durée d'incursion ou la profondeur deviennent importants. Et c'est à ce moment que l'Héliox devient une alternative à prendre en compte.

Exemples sur des plongées « déraisonnables » :

- Dans le cas d'une plongée à -80m pendant plus d'une heure, il faudrait limiter le pourcentage d'azote à 11%. Cette valeur est faible et limite l'intérêt du Trimix.
- Pour une plongée de quelques minutes à -170m, il ne faudrait pas dépasser 6 ou 7% d'azote. A nouveau, l'intérêt d'avoir de l'azote est limité.
- Pour une plongée de plusieurs heures à -30m, le problème peut avoir d'autres solutions moins évidentes : Bühlmann avait fait réaliser une telle plongée avec respiration d'Héliox pendant la première partie de la plongée, puis passage sur Nitrox pendant la deuxième partie de la plongée. Attention, le changement de gaz a été fait au fond, bien avant d'effectuer la remontée.

Cette manière de présenter les choses s'appuie sur une vision Haldane/Bühlmann. Les arguments en faveur du Trimix ou de l'Héliox pourraient différer si on ne s'appuyait plus uniquement sur des vitesses de diffusion et des tensions maximales admissibles, mais sur le nombre et les caractéristiques des bulles et sur les échanges qui existent entre les micro-bulles et leurs environnements.

ATTENTION : L'utilisation d'un diluant Héliox implique que toute la plongée soit menée avec ce même gaz, y compris la décompression. Le changement brutal de l'hélium pour l'azote (CDI) donne des résultats aléatoires source d'accident de décompression.

4.8.6. Choix des diluants en décompression

Avec un recycleur en circuit fermé à PO_2 constante, le fait de changer de diluant lors de la remontée ne peut se justifier que par le désir de se débarrasser plus vite d'une partie de l'hélium et de l'échanger contre de l'azote. Alors qu'en circuit ouvert, le changement de mélange lors de la remontée se justifiait également par la prise de mélanges de plus en plus oxygénés afin de réduire le temps de décompression.

Ci-contre, la composition du mélange de la boucle respiratoire lorsqu'on remonte de -120m avec une PO_2 de 1.3. Le diluant est un TX 10/70.

On voit que pour maintenir une PO_2 de 1.3 bar, le pourcentage d'oxygène passera de 10% à -120 m, à 81% à -6m.

Cette augmentation progressive se fait au détriment des deux gaz inertes (hélium et azote).

Au fur et à mesure de la remontée, les pourcentages d'azote et d'hélium diminuent régulièrement mais il n'est évidemment pas possible de favoriser l'élimination d'un gaz au détriment de l'autre. Habituellement, en circuit ouvert, on cherche à conserver un pourcentage d'azote constant dans les différents mélanges de décompression, voire à l'augmenter légèrement au fur et à mesure qu'on s'approche de la surface. Mais ici, ce n'est pas possible. Or, il est de pratique courante de vouloir éliminer plus rapidement l'hélium. Pour cela, il faut changer de diluant au cours de la remontée.

Voyons maintenant ce qui se passe lorsque, à moins -40m, on change le diluant TX 10/70 pour de l'air.

Trimix 10/70 avec PO_2 1.3 bar			
Prof	O2 [%]	He [%]	N2 [%]
0m	20	0	80
6m	81.25	14.58	4.17
10m	65	27.22	7.78
20m	43.33	44.07	12.59
30m	32.5	52.5	15
40m	26	57.56	16.44
50m	21.67	60.93	17.41
60m	18.57	63.33	18.1
70m	16.25	65.14	18.61
80m	14.44	66.54	19.01
90m	13	67.67	19.33
100m	11.82	68.59	19.6
120m	10	70	20

Sur cet exemple, on voit qu'au moment du changement de gaz (à -40m), le pourcentage d'azote dans la boucle passe de 16.44% à 74% !!! Tandis que l'hélium disparaît complètement du nouveau mélange respiratoire. On a d'ailleurs le même phénomène lorsqu'on arrive en surface et qu'on respire l'air atmosphérique. C'est pour cela qu'il faut considérer la surface comme un palier et qu'il est conseillé de respirer encore quelques instants sur le mélange sur-oxygéné du recycleur avant de retirer l'embout.

Tout ceci n'est vrai qu'à la condition d'effectuer un rinçage efficace. Pour éviter ce pic d'azote, certains plongeurs effectue un rinçage partiel de la boucle, ceci signifie qu'on aura moins d'azote et qu'il restera un peu d'hélium, mais dans quelles proportions ???

Il est également possible d'utiliser un diluant qui ne soit pas de l'air, mais quel que soit le diluant utilisé, on ne pourra pas éviter d'augmenter (parfois considérablement) le pourcentage d'azote de la boucle respiratoire.

Trimix 10/70 avec PO ₂ 1.3 bar			
Prof	O2 [%]	He [%]	N2 [%]
0m	20	0	80
6m	81.25	0	18.75
10m	65	0	35
20m	43.33	0	56.67
30m	32.5	0	67.5
40m	26	0	74
40m	26	57.56	16.44
50m	21.67	60.93	17.41
60m	18.57	63.33	18.1
70m	16.25	65.14	18.61
80m	14.44	66.54	19.01
90m	13	67.67	19.33
100m	11.82	68.59	19.6
120m	10	70	20

On retrouve dans ces méthodes, ce qui se fait en circuit ouvert. Certains sont partisans des décompressions à l'air et aux Nitrox, tandis que d'autres préfèrent utiliser uniquement des Trimix afin d'avoir une courbe de désaturation plus régulière des deux gaz inertes. Bien qu'aucune de ces méthodes ne soit idéale, le choix dépendra du type des plongées à effectuer. Certains utilisent l'une ou l'autre méthode pour toutes profondeurs alors que d'autres utilisent jusqu'à -100m, un seul diluant et au-delà, 2 diluants (air ou Nitrox).

Résumé :

- **Avec 1 diluant :**

Elimination des 2 gaz est plus progressive et la logistique est simplifiée mais on ne pourra pas favoriser l'élimination d'un gaz au détriment de l'autre.

- **Avec 2 diluants :**

Optimisation de la durée de la déco surtout si elle est basée sur des modèles néo-Haldaniens (Workmann, Bühlmann) qui pénalisent grandement l'hélium et allongent exagérément la déco dès lors qu'on utilise des Trimix. Par contre, cette méthode provoque obligatoirement une nouvelle phase de charge en azote ce qu'on s'applique à éviter (risque CDI). Or, de nombreux plongeurs ont bâtis leur stratégie de décompression en fonction des résultats obtenus sur les logiciels, avec l'utilisation de mélanges à forte teneur en azote, on obtient une déco plus courte et qu'on pourrait croire optimisée, mais ce n'est pas forcément le cas.

4.8.7. Choix de la PO₂

Plus il y a d'oxygène dans le mélange respiratoire, moins il y aura de gaz inerte et plus la décompression sera courte. C'est cette devise qui sert à concocter ses mélanges. Mais il y a des limites à tout. L'oxygène est toxique et on ne peut pas augmenter impunément le pourcentage d'oxygène des mélanges respiratoires.

Lorsqu'on utilise un Nitrox 40% pour plonger à -30 mètres, il est vrai que la décompression sera plus rapide car il n'y a que 60% d'azote dans le mélange, à comparer aux 80% contenu dans l'air. Mais il ne faut pas oublier que chaque individu possède "un capital de tolérance" à l'oxygène et que chaque exposition entame ce capital. C'est pour cela qu'il est déconseillé de plonger plus de 2 heures d'affilé avec ce mélange, bien qu'on reste en deçà de la limite hyperoxique (variable) des 1.6 bar.

Autre exemple, si on envisage un Trimix pour plonger à -100m, on pourrait prévoir une PO₂ limite de 1.6 bar au fond. Un tel trimix serait alors composé de 14.5% d'oxygène et de 85.5% de gaz inerte (azote et hélium confondu). Mais le pourcentage d'oxygène de ce trimix serait dangereusement proche de la limite maximale théorique de 1.6 bar et l'exposition à ce trimix entamerait rapidement notre capital de tolérance.

Si on construit un trimix ayant une PO₂ fond plus modeste de 1.2 bar, la composition de ce trimix serait de 11% d'oxygène et de 89% de gaz inerte. Les 4.5% de gaz inerte en plus n'influeraient pas énormément le temps de décompression, de plus, notre capital de tolérance aura été moins entamé ; il sera alors possible de l'utiliser lors de la décompression en augmentant la PO₂ des gaz respirés jusqu'à 1.6 bar.

Résumé :

- **Au fond**

Plus la plongée est profonde, plus il fait froid, plus on fait d'efforts, plus il faut diminuer la PO₂. Il est inutile d'avoir une PO₂ supérieure à 1.3 bar et dans bien des cas, on choisira plutôt une valeur inférieure.

- **Déco phase 1**

La première partie de la déco s'effectue dans la zone profonde et se compose de courts paliers. On peut sélectionner une PO₂ de 1.3 (ce qui est la valeur par défaut de certains recycleurs).

- **Déco phase 2**

La dernière partie de la déco (là où les paliers sont les plus longs), on peut monter la PO₂ à 1.6 bar, à condition qu'on n'ait pas trop chargé pendant la plongée et que les paliers s'effectuent dans de bonnes conditions de confort.

De plus, des retours d'expérience ont montré que la tolérance à l'oxygène diminuait avec le froid et avec l'effort fourni. Il arrive ainsi que la limite théorique des 1.6 bar (et même 1.4) soit trop élevée pour certains type de plongée. Il est donc inutile de se surcharger inutilement au fond et mieux vaut s'économiser pour la décompression.

4.8.8. Gestion décompression à PO₂ constante

- **Les ordinateurs immergeables**

Le **Nexus** permet de calculer la décompression pour une plongée jusqu'à -60m avec un diluant air.

Le **VR2 et VR3** avec 2 algorithmes à choix et possibilité de commuter en plongée 2 valeurs SP, 10 mélanges de décompression et le passage sur OC. Gestion par PO₂ fixe ou par cellule oxygène externe.

Le **HS Explorer** avec 10 algorithmes à choix et possibilité de commuter en plongée 5 mélanges en OC et 5 mélanges en CCR et passage sur circuit ouvert. Gestion par PO₂ fixe ou par cellule oxygène externe.

- **Les logiciels de décompression à PO₂ constante**

GAP : modèle Bühlmann avec paliers profonds par GF

V-Planner : modèle VPM avec option de paliers profonds par GF

ZPlanner : modèle Bühlmann avec paliers profonds Pyle ou WKPP

Deco Planner : modèle Bühlman avec paliers profonds par GF

Pro Planner : modèle Bühlman avec paliers profonds Pyle

Abyss : modèle RGBM

- **Les ordinateurs classiques**

Pour les plongées effectuées avec un diluant air, il est possible d'utiliser un ordinateur immergeable classique gérant le Nitrox. Toute la difficulté revient donc à choisir le pourcentage d'oxygène (car celui-ci sera fixé pour toute la plongée). Si on programme le pourcentage d'oxygène qui règnera dans la boucle à la profondeur maximale, on va dans le sens de la sécurité mais on se pénalise fortement. Par exemple, à -30m et pour une PO₂ de 1.3 bar, on aura 32.5% d'oxygène dans la boucle respiratoire. On pourrait alors sans risque programmer le pourcentage d'oxygène de l'ordinateur à 32%. Mais on pourrait également considérer que lors de la descente, et surtout lors de la remontée et des paliers, on aura des taux d'oxygène allant jusqu'à 81%. On peut alors être tenté d'augmenter le pourcentage moyen d'oxygène.

Pour une plongée courte sans palier, ou avec très peu de palier, on passera peu de temps dans des zones de profondeurs où la boucle sera fortement oxygénée. Il peut alors être dangereux d'augmenter arbitrairement le pourcentage d'oxygène du calculateur. Par contre, pour des plongées qui nécessitent des décompressions significatives et où la durée d'immersion à faible profondeur va être importante, il est possible d'augmenter la valeur moyenne du taux d'oxygène. Si on a 20' de palier à effectuer, il peut être intéressant d'augmenter la valeur de l'oxygène respiré à 40%.

Air avec PO ₂ de 1.3 bar		
Prof	O2 [%]	N2 [%]
6m	81.25	18.75
10m	65	35
20m	43.33	56.67
30m	32.5	67.5
40m	26	74
50m	21.67	78.33

Il est évident que cette manière de procéder doit être utilisée avec précaution et en toute connaissance. Ce type de plongée doit être planifiée où l'on doit connaître à l'avance tous les paramètres. Aussi est-il possible de se construire une planification bâtie grâce un logiciel de décompression.

4.9. Les logiciels de décompression

4.9.1. Généralités

On les connaît et on les utilise depuis quelques années, les ordinateurs de plongée nous facilitent la vie. Longtemps critiqués, tout du moins au début, à l'époque où ils étaient gros comme des Game Boys, ils ont fini par acquérir leurs lettres de noblesse lorsque les statistiques ont montré qu'ils ne généraient pas plus d'accidents que les tables, à condition de les employer correctement. Ils sont pratiques car ils permettent de mieux coller au profil de plongée, en particulier lors de plongées à multi niveaux. Ils ne nécessitent peu, voire pas de manipulations durant la plongée. Ils permettent aussi de disposer de certains accessoires intéressants, tels que carnet de plongée avec profil détaillé, planification préalable et pour certaine, modification du pourcentage d'O₂ respiré. Et ils peuvent être déchargés sur un PC afin de voir en détail le profil réalisé.

Leur prix est devenu raisonnable pour un plongeur loisir qui ne souhaite pas trop investir dans son équipement et les ordinateurs de plongée commencent à séduire même des plongeurs débutants ou épisodiques.

Mais les algorithmes de calcul sont très conservateurs (certains disent " pénalisant ") pour éviter tout accident et pour fonctionner sur les profils d'individus les plus variés possibles. Jeunes et vieux, gros et maigres, débutants et chevronnés, tous sont logés à la même enseigne. La peur des poursuites judiciaires est là, comme en témoignent les notices d'emploi couvertes d'avertissements en caractères gras et de têtes de mort significatives. De plus, même s'ils sont assez bien adaptés à la plongée loisir à l'air ou au Nitrox, certains modèles n'ont pas été réellement conçus pour la plongée nécessitant des paliers 2 modèles seulement permettent le changement de gaz durant la plongée, le NiTek X de Dive Rite et le VR3 de Delta P Technology.

4.9.2. Les limites des logiciels terrestres

Tout d'abord leur prix : il faut acheter le logiciel mais aussi avoir un ordinateur type IBM-PC (peu de logiciels fonctionnent sous Mac, loi du marché oblige). De plus, ils nécessitent une planification impérative de la plongée, puis un respect scrupuleux de ce plan de plongée. Impossible de changer de profil en cours de route, au gré des fantaisies ou des découvertes. Le site, sa profondeur et sa taille doivent être connus afin de garantir l'exactitude des paramètres de plongée. Ces logiciels permettent cependant de programmer des paramètres de secours (temps ou profondeur supérieur, perte du mélange déco, etc.) que l'on inscrit sur une ardoise ou que l'on imprime et plastifie afin de les avoir avec soi, prêt à toute éventualité. Cette phase de planification rend par conséquent ce type de logiciels moins intéressant pour des plongées sans palier ou avec une décompression limitée. Leur usage semble donc plutôt limité à la plongée aux mélanges, à la plongée profonde ou aux recycleurs. Mais ils permettent aussi des effets pédagogiques très intéressants pour un moniteur, en particulier lorsqu'il s'agit d'expliquer la saturation des compartiments ou l'influence des paramètres physiologiques ou physiques sur la décompression. Tout peut apparaître graphiquement en temps réel, sous le regard émerveillé des élèves qui considèrent tout à coup leur moniteur comme le fils caché de Haldane et de Bill Gates.

4.9.3. Les avantages des logiciels terrestres

En matière d'individualisation, cela s'améliore nettement. En effet les logiciels de planification offrent pour la plupart, la possibilité de prendre en compte beaucoup d'autres paramètres : température, effort fourni, âge, type de combinaison utilisée, gaz utilisé au fond ou pour la décompression, poids, forme physique. Le logiciel de planification, c'est aussi le moyen de calculer des profils très divers et plus extrêmes. Bien sûr, dans l'absolu, on est le premier à expérimenter la décompression pour le profil prévu, en particulier en ce qui concerne les plongées aux mélanges ternaires à l'Hélium, où les choses sont encore plus incertaines que pour l'air. Mais c'est tout de même mieux que les pratiques parfois empiriques et toujours aléatoires que certains utilisaient jusqu'à maintenant, du type " On rajoute 5 minutes à la profondeur la plus amusante, puis on majore le premier palier d'un tiers du temps nécessaire à la cuisson d'un œuf à la coque, palier effectué au Nitrox 32 % si l'on est assujéti à la TVA. "

En réalité seuls quelques spécialistes sont capables de concevoir des tables sur mesure pour des profils particuliers. Sans l'aide de ces spécialistes, autant faire confiance à des logiciels qui s'appuient sur des calculs souvent employés plutôt que de s'en remettre à des procédures à la limite de la tradition orale.

Ces logiciels de planification ont en outre l'avantage de permettre de programmer des facteurs de risque volontairement choisis, ainsi que d'offrir une palette d'outils de calcul, pour la consommation, le stock de gaz nécessaire ou la confection de mélanges. DR-X, un des premiers logiciels fut conçu il y a quelques années par Sheck Exley. Ce programme a un peu vieilli et surtout il n'est plus disponible et il semble que certaines de ses données sont contestées.

Tableau récapitulatif, non exhaustif, des logiciels actuellement sur le marché

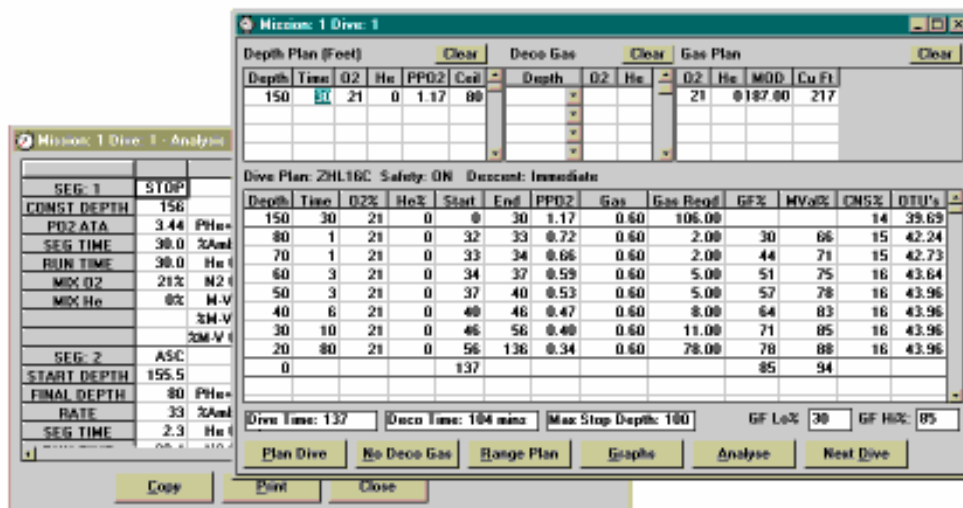
Fonctions	Pro Planner	Deco Planner	ZPlan- ner	V- Planner	GAP	Voya- ger	Abyss	Nauti- lus
Bühlmann	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pyle Stop	✓		✓					
GF		✓			✓			
VPM		✓		✓				✓
RGBM							✓	
DCAP								✓
Interface graphique		✓			✓	✓	✓	✓
Mode CCR	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Profils multiniveaux	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Calcul consommation	✓			✓	✓	✓	✓	✓
Calcul mélanges				✓	✓	✓	✓	✓

4.9.4. Pro Planner

Logiciel réalisé par Nick Bushell et Kevin Gurr, basé sur le modèle de Bühlmann ZH-L 16. C'est le logiciel intégré dans les ordinateurs VR2 et VR3. Ce logiciel permet la planification de la décompression pour des mélanges à l'air et au Nitrox jusqu'à -70 mètres, pour des mélanges Trimix en circuit ouvert jusqu'à -200 mètres et en circuit fermé au Nitrox et HélioX jusqu'à -300 mètres. Contrairement à d'autres logiciels, son cadre de travail se présente sous forme de tableaux que l'on renseigne en bonne partie au clavier. Ce logiciel permet également le calcul de la consommation.

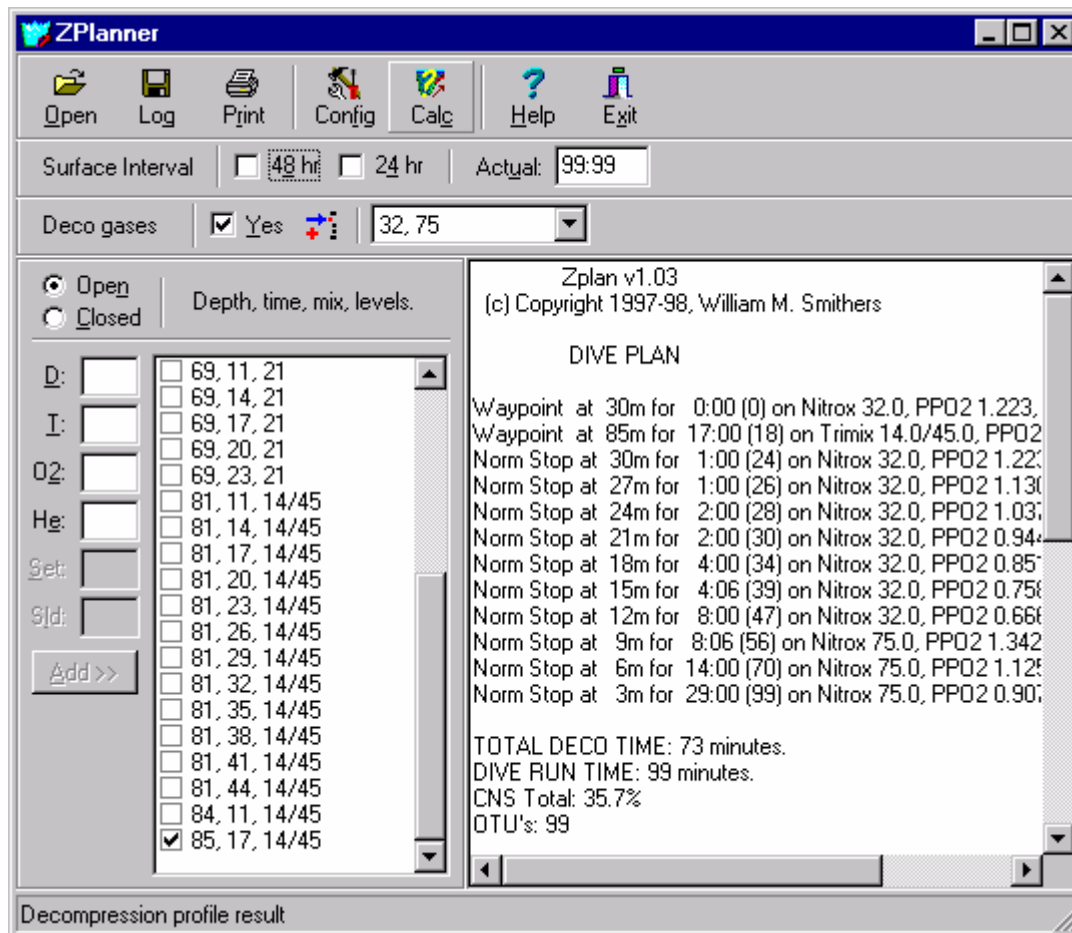
4.9.5. Deco Planner

Logiciel réalisé par Simon Tranmer, c'est le logiciel de GUE (Global Underwater Explorers), une association fondée par Jarrod Jablonski. En quelques années, ces plongeurs ont réalisés de considérables plongées souterraines et sur épaves. Ils ont également développé des techniques de configurations matérielles, de méthodes d'enseignement et de pratique de la plongée DIR (Doing It Right), presque une philosophie, le GUE est devenu un acteur incontournable de la plongée Tech aux USA et commence à faire quelques apparitions en Europe. Ce logiciel est basé sur les algorithmes de Bühlmann ZH-L 16 B et C et sur lesquels on intervient par les facteurs de gradient d'Erik Baker. Il gère les Nitrox, HélioX et Trimix jusqu'à -300 mètres environ. Son cadre de travail se présente sous forme de tableaux que l'on renseigne en bonne partie au clavier. Deco Planner offre d'intéressantes fonctions de représentation des profils de désaturation et d'analyse des plongées qui permettent de visualiser et de quantifier les effets des facteurs de gradients. Il comprend un logiciel de calcul des mélanges, complet, presque trop car on arrive à se perdre dans les paramètres. Deco Planner a été employé pour calculer une série de longues et profondes plongées, notamment les plongées sur l'épave du *Britanic* en 1999.



4.9.6. ZPlanner

Ce logiciel réalisé par William Smithers est un cas à part dans ce domaine, en effet ce logiciel est gratuit, ce qui lui a assuré une certaine popularité. L'Interface graphique permet de programmer l'intervalle de surface, les mélanges fond, les mélanges déco et les profils. Ce programme assez complet est basé sur le modèle ZHL-16 de Bühlmann, il est utilisable pour l'air, le Nitrox, le Trimix en circuit ouvert et fermé. Il donne la possibilité d'inclure les Pyle Stop ou ceux conçus par le WKPP (Woodville Karst Plain Project) de Georges Irvine. Par contre, il ne permet aucun calcul de mélanges, de stock d'air, ou de conservatisme par rapport à l'effort fourni ou la température. Ce logiciel est très utile pour l'élaboration de tables de secours notamment en circuit fermé. Pour ceux qui se poseraient la question le Z de Z-Plan est en hommage à son chat Zach. Il n'est malheureusement plus disponible sur Internet.



4.9.7. V-Planner

Ce logiciel réalisé par Ross Hamingway utilise le VPM (Varying Permeability Model) pour le calcul de la déco. Ces profils commencent plus profond que les modèles traditionnels, en tenant compte des micro-bulles, afin d'optimiser la décompression. Ces modèles (dit à micro-bulles) sont rapidement devenus la tendance de certains plongeurs Tech et utilisés par des organismes comme IANTD et NAUI. A la base, ces modèles simulent et mesurent le grossissement des micro-bulles, et fixent des limites en conséquence. Les résultats obtenus sont très similaires aux méthodes de calcul des paliers profonds (Pyle Stops, pêcheurs de perles, WKPP). La dernière version révisée par Erik Baker (VPM-B) est la prise en compte de la loi de Boyle-Mariotte durant la remontée (B comme Boyle) et les paliers sont déterminés par la méthode des GF (Gradient Factor), plutôt que par des M_values.

Le résultat final d'un profil VPM-B comprend des paliers profonds et peu profonds ressemblants à ceux des modèles Haldaniens. Un retour d'informations considérable des plongeurs a confirmé que le modèle VPM-B était valable sur un large éventail de profils de plongée (plongées singulières, plongées loisir avec décompression, plongées Trimix et recycleurs). Il y a également le modèle VPM-B/ (E comme Extended) ces modèles à micro-bulles les plus récents et les plus précis disponibles actuellement, ils ne nécessitent aucun facteur de correction des paramètres de profondeur (GF haut et bas) pour arriver au "bon" résultat.

V-Planner - B-swiss01

Plongeur Carnet Sauve. Imprimer Config Calc Perte gaz + ou - P. retour A Propos Quitter

Plongée suivante Plongée 2

Intervalle surface 5 jours 48 hr 24 hr 000 Jours 00:00 hh:mm

Duvert SCR CCR

Mélange Fond	Travel	Gaz Deco
Prof. temps, O2/He		O2/He
<input type="checkbox"/> 60, 18, 21		<input type="checkbox"/> 21
<input type="checkbox"/> 66, 21, 21		<input type="checkbox"/> 30
<input type="checkbox"/> 66, 27, 21		<input type="checkbox"/> 32
<input type="checkbox"/> 66, 33, 21		<input checked="" type="checkbox"/> 36
<input type="checkbox"/> 66, 6, 21		<input type="checkbox"/> 40
<input type="checkbox"/> 60, 30, 21		<input type="checkbox"/> 50
<input type="checkbox"/> 66, 15, 21		<input type="checkbox"/> 55
<input type="checkbox"/> 66, 18, 21		<input type="checkbox"/> 60
<input type="checkbox"/> 66, 27, 21		<input type="checkbox"/> 65
<input type="checkbox"/> 72, 6, 17/26		<input type="checkbox"/> 70
<input type="checkbox"/> 72, 15, 17/26		<input checked="" type="checkbox"/> 75
<input type="checkbox"/> 72, 18, 17/26		<input type="checkbox"/> 100
<input type="checkbox"/> 72, 27, 17/26		<input type="checkbox"/> 25/25
<input type="checkbox"/> 80, 12, 15/35		
<input type="checkbox"/> 80, 15, 15/40		
<input type="checkbox"/> 80, 6, 15/40		
<input type="checkbox"/> 80, 27, 15/40		
<input type="checkbox"/> 80, 27, 15/35		
<input type="checkbox"/> 80, 6, 15/35		
<input type="checkbox"/> 90, 6, 14/45		
<input type="checkbox"/> 90, 12, 14/45		
<input checked="" type="checkbox"/> 90, 15, 14/46		
<input type="checkbox"/> 90, 17, 14/45		
<input type="checkbox"/> 90, 19, 14/45		
<input type="checkbox"/> 90, 21, 14/45		
<input type="checkbox"/> 90, 24, 14/45		
<input type="checkbox"/> 92, 6, 14/45		
<input type="checkbox"/> 92, 12, 14/45		
<input type="checkbox"/> 92, 16, 14/45		

Ajout niveau ou gaz Ajout Deco

PROFIL DE PLONGÉE
 Intervalle surface = 5 jours 0 hr 0 min.
 Altitude = 550m (s)
 Conservatisme = Nominal

Desc à 60m (2:01) on Trimix 14.0/46.0, 30m/min Descente.
 Desc à 90m (3:31) on Trimix 14.0/46.0, 20m/min Descente.
 Niveau 90m 11:29 (15:00) on Trimix 14.0/46.0, 1.36 ppO2, 40m ead, 44r
 Rem. à 66m (17) on Trimix 14.0/46.0, -10m/min Remontee.
 Palier à 66m 0:36 (18) on Trimix 14.0/46.0, 1.03 ppO2, 28m ead, 31m er
 Palier à 60m 1:00 (19) on Trimix 14.0/46.0, 0.95 ppO2, 25m ead, 28m er
 Palier à 54m 2:00 (21) on Trimix 14.0/46.0, 0.87 ppO2, 22m ead, 24m er
 Palier à 48m 2:00 (23) on Trimix 14.0/46.0, 0.79 ppO2, 19m ead, 21m er
 Palier à 42m 2:00 (25) on Trimix 14.0/46.0, 0.71 ppO2, 16m ead, 18m er
 Palier à 39m 1:00 (26) on Trimix 14.0/46.0, 0.67 ppO2, 15m ead, 16m er
 Palier à 36m 2:00 (28) on Trimix 14.0/46.0, 0.63 ppO2, 13m ead, 15m er
 Palier à 33m 1:00 (29) on Nitrox 36.0, 1.51 ppO2, 25m ead
 Palier à 30m 1:00 (30) on Nitrox 36.0, 1.40 ppO2, 22m ead
 Palier à 27m 2:00 (32) on Nitrox 36.0, 1.30 ppO2, 20m ead
 Palier à 24m 1:00 (33) on Nitrox 36.0, 1.20 ppO2, 17m ead
 Palier à 21m 2:00 (35) on Nitrox 36.0, 1.09 ppO2, 15m ead
 Palier à 18m 3:00 (38) on Nitrox 36.0, 0.99 ppO2, 13m ead
 Palier à 15m 3:00 (41) on Nitrox 36.0, 0.88 ppO2, 10m ead
 Palier à 12m 4:00 (45) on Nitrox 36.0, 0.78 ppO2, 8m ead
 Palier à 9m 4:00 (49) on Nitrox 75.0, 1.40 ppO2, 0m ead
 Palier à 6m 6:00 (55) on Nitrox 75.0, 1.19 ppO2, 0m ead
 Palier à 3m 11:00 (66) on Nitrox 75.0, 0.97 ppO2, 0m ead
 Rem. à la surf. (66) on Nitrox 75.0, -6m/min Remontee.

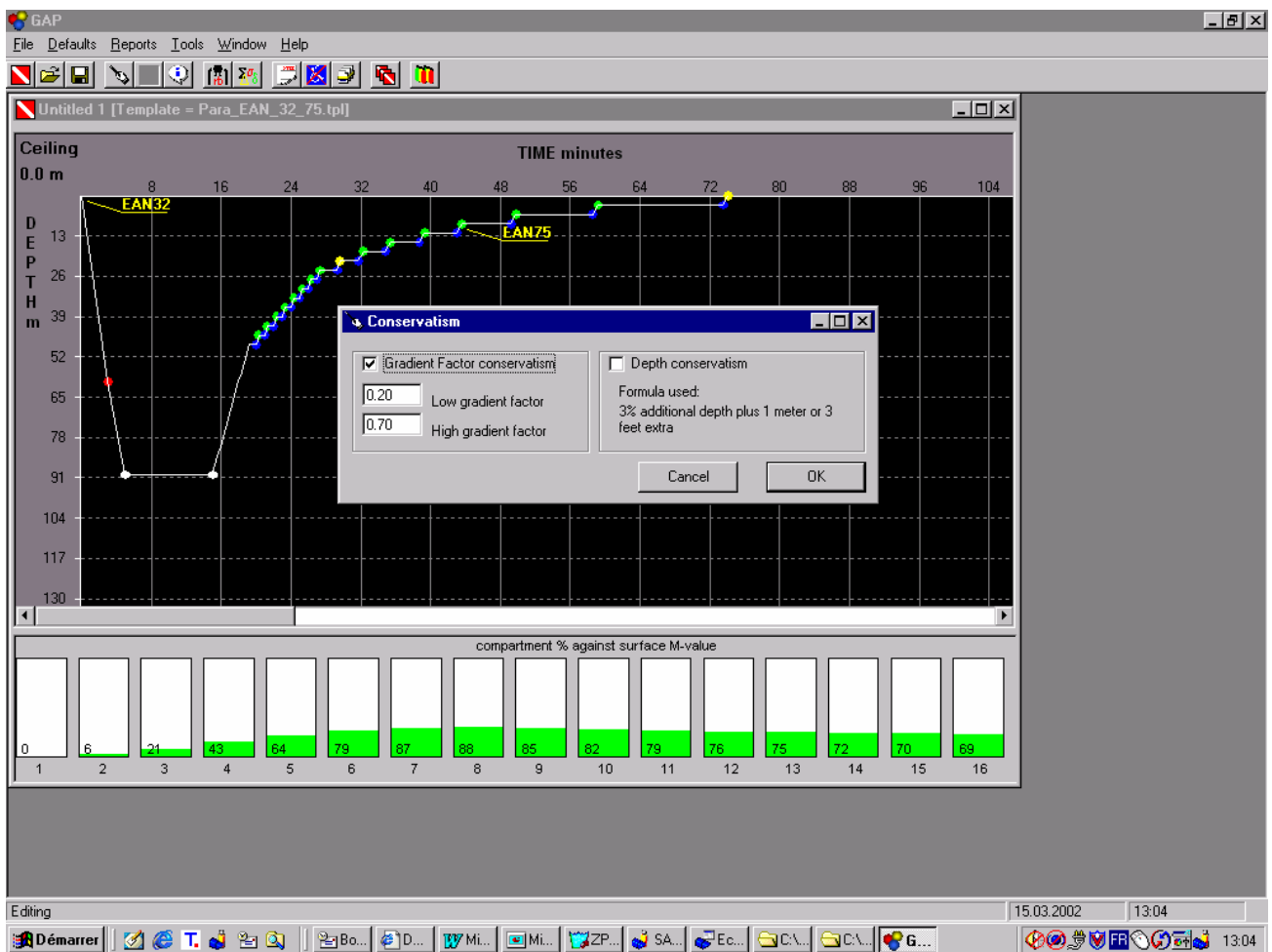
Le dégazage commence à 68.7m

OTU pour cette plongée: 73
 CNS Total: 26.8%

4262.3 fr. Trimix 14.0/46.0

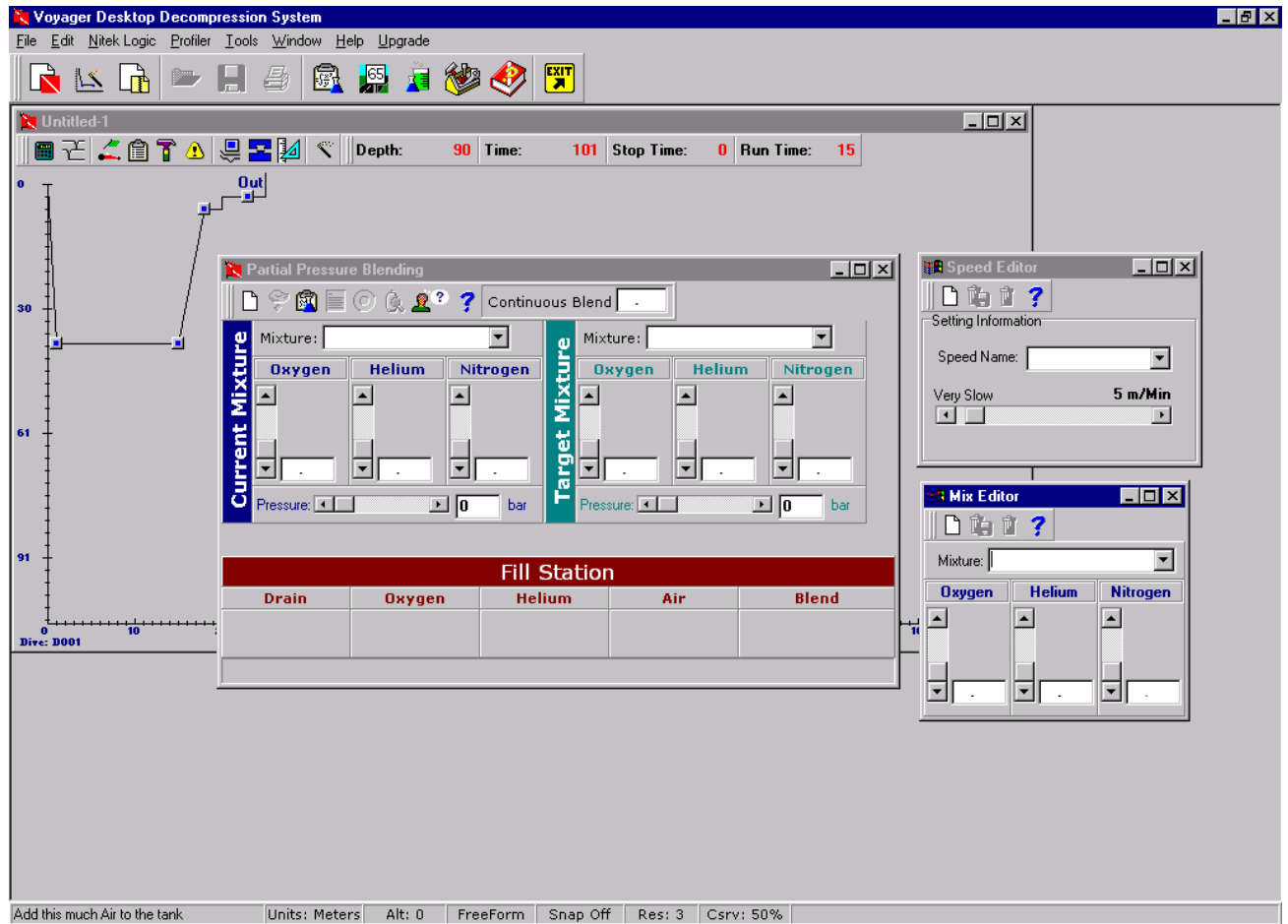
4.9.8. GAP

GAP (Gaz Absorption Program), réalisé par Peter Fjelsten est un programme assez complet basé sur le modèle ZHL-16 de Bühlmann, il est utilisable pour l'air, le Nitrox, le Trimix et pour les recycleurs. Il possède une interface graphique opposée à beaucoup d'autres programmes de décompression pouvant inclure les d'arrêts profonds conçu par Erik Baker. Il y a plusieurs techniques pour que GAP calcule un programme de décompression plus conservateur, quand tous les réglages de conservatisme sont à 100%, GAP vous donne l'algorithme de Bühlmann pur. Ceci a été entièrement testé dans l'intervalle normal de plongée (0-50 mètres) mais peut être trop libéral pour certains, spécialement hors de cette intervalle. A noter que la plupart des ordinateurs de plongée prétendent utiliser l'algorithme de Bühlmann utilisant en fait une version modifiée, plus conservatrice.



4.9.9. Voyager

Avec ce logiciel, on entre dans une autre gamme de planificateur de plongée, celle des tout intégré et des compatible Windows 95. L'interface graphique est très agréable à utiliser et donne accès à une multitude d'outils et de paramètres. Il est aussi très pratique pour essayer rapidement diverses situations de recharge, en créant un jeu de tables pour des circonstances non planifiées (variations de temps ou de profondeur). Il dispose d'un assistant agréable qui guide pas à pas dans la planification d'une plongée.



4.9.10. Abyss

C'est sans conteste le grand concurrent de Voyager car il est très complet, facile d'utilisation et complètement intégré Windows ou Mac OS. Il regorge d'outils qui permettent de confectionner des mélanges suivant plusieurs techniques, de convertir des unités différentes, de calculer des variations de pressions avec la température ou de connaître la profondeur équivalente pour tous types de mélanges. Pour planifier une plongée, il suffit de la créer et de la modifier en insérant ou supprimant des points d'arrêt qui tracent le profil et indiquent les gaz respirés et les vitesses respectées. Le calcul est automatique et si l'on modifie l'un des 800 paramètres, le calcul s'en trouve instantanément modifié. Abyss permet alors la sortie automatique de tous les paramètres de la plongée (gaz consommé et réserve, déco, limites O₂ N₂, etc.), ainsi que des tables de secours en cas de dépassement des paramètres. Ce logiciel est très visuel et didactique avec les courbes de saturation qui évoluent en temps réel. Il est donc très flexible pour toutes les configurations et est doté d'alarmes visuelles et sonores pour prévenir de limites telles que la toxicité de l'oxygène. Qui plus est une aide en ligne permet de vous référer rapidement aux définitions des différents termes et à l'utilisation des divers outils disponibles.

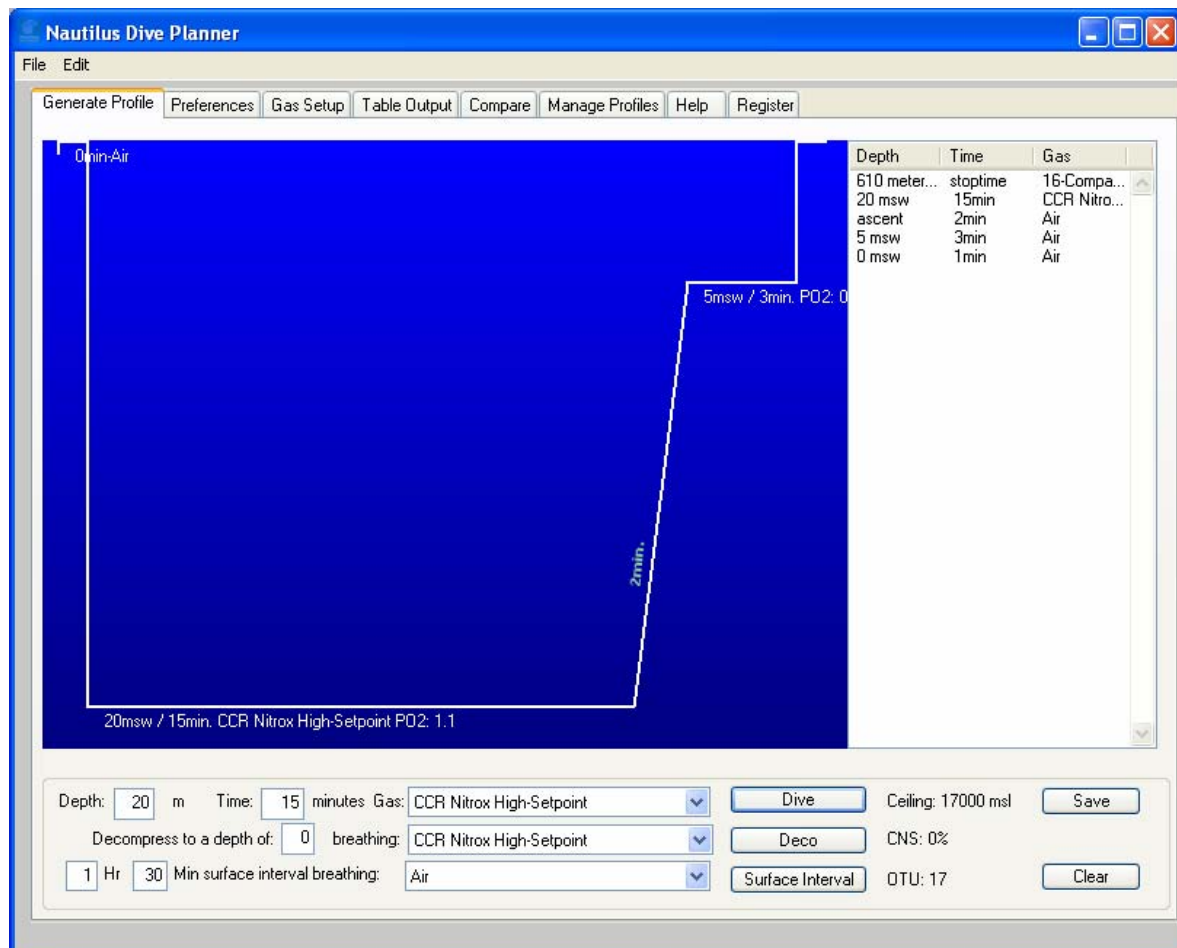
Chris Parret, son concepteur, a prévu un algorithme basé sur 32 compartiments utilisant l'algorithme RGBM (Reduced Bubble Gradient Model), ce qui le distingue des autres programmes de ce type. Abyss est disponible en 5 niveaux, en fonction des gaz utilisés et du type d'activité (loisir, Nitrox, Trimix, recycleurs, etc.).



4.9.11. Nautilus

Nautilus est une nouvelle génération de logiciel très complet utilisant une nouvelle approche pour la planification et la gestion de la décompression. Il fournit beaucoup d'informations au plongeur Tech qui doit efficacement projeter, comparer, et analyser ses profils. Ce logiciel ne fait aucune différence si le plongeur emploie 1, 3 ou 10 gaz. Il ne fait également aucune différence si le plongeur utilise un circuit ouvert ou un circuit fermé, ou une combinaison des deux. Il existe en 5 versions, Nautilus 140, 225, 330, 660 et RE, les chiffres indiquent la profondeur en pieds.

Le panneau de commande de ce logiciel permet à l'utilisateur de faire des choix rapides sur les composants importants du profil de façon simple et compréhensible. De plus ce logiciel permet à l'utilisateur de choisir parmi plusieurs algorithmes, comme : Hamilton-Kenyon (DCAP), Bühlmann ZHL-16, Hamilton-Kenyon Bubble Model (HKBM), Yount-Hoffman Variable Permeability Model (VPM) US Navy (Workman 1965). Nautilus permet à l'utilisateur de faire des ajustements sur les algorithmes par : l'utilisation du choix des gaz, planifier les profondeurs d'utilisation des gaz, choix de la valeur de PO₂, choix des temps d'arrêt et insérant des paliers profonds.



4.9.12. Les facteurs de conservatisme

Des recherches plus récentes indiquent que débiter la décompression plus profondément que les anciens algorithmes peu être bénéfique en réduisant les symptômes de MDD subcliniques. Vous devrez augmenter le conservatisme :

- Si vous effectuez des plongées en eau froide
- Si vous effectuez des plongées astreignantes, travaux, courants, etc . . .
- Si vous avez des antécédents de symptômes de MDD
- Si vous avez un excès pondéral
- Si vous fumez
- Si vous avez plus de 40 ans

4.9.13. Les ordinateurs Trimix

Actuellement, il existe 3 ordinateurs Trimix sur le marché, le VR2, VR3, le NiTek X et le HS Explorer.

- **Le VR3**

Développé par Delta P Technology. Il utilise 2 algorithmes à choix (Bühlmann ZHL-16 avec Pyle Stops ou VPM-B/E), profondeur maximale -300m, gestion de 10 mélanges en OC et 2 mélanges en CCR. Permet les changements de gaz en cours de plongée. Il peut prendre en compte 99 paliers de décompression et son programme est modifiable par une interface. Gestion par PO₂ fixe ou par cellule oxygène externe.



- **Le NiTek X**

Développé par Dive Rite. Il utilise un algorithme de Bühlmann ZHL-16 avec GF de Baker, profondeur maximale -120m, gestion de 7 mélanges, limitation de PO₂ à 1.6 bar. Il affiche le temps de remontée avec le mélange respiré sur le moment et est facile à utiliser.



- **Le HS Explorer**

Développé par HydroSpace Engineering INC. 10 algorithmes à choix (7 à base Bühlmann et 3 à base RGBM), profondeur maximale -180m, gestion de 5 mélanges en OC et 5 mélanges en CCR. Permet les changements de gaz en cours de plongée Gestion par PO₂ fixe ou par cellule oxygène externe.



4.9.14. Conclusion

Tous ces programmes sont expérimentaux et ne font pas l'objet de procédures de validation comme le sont les tables de décompression de type Bühlmann ou Comex 04, nous sommes par conséquent des cobayes volontaires. Alors ordinateurs de plongée ou logiciels de planification, que choisir ?

L'idéal est de toute manière d'utiliser les outils de son temps, en connaissant les limites de chacun. Le plongeur Tech, le plongeur en circuit fermé, le plongeur loisir à l'air ou au Nitrox, le moniteur de plongée, chacun a des besoins propres qui correspondent à des outils appropriés. Tout comme les plongeurs ont mis quelques temps à s'habituer au stab, puis à l'ordinateur de plongée, une période d'essai est nécessaire pour découvrir les avantages de ces logiciels de planification et pourquoi ne pas se familiariser d'abord avec les versions de démonstration.

Mark Elliott Vecci Cave Diving Expedition 2005



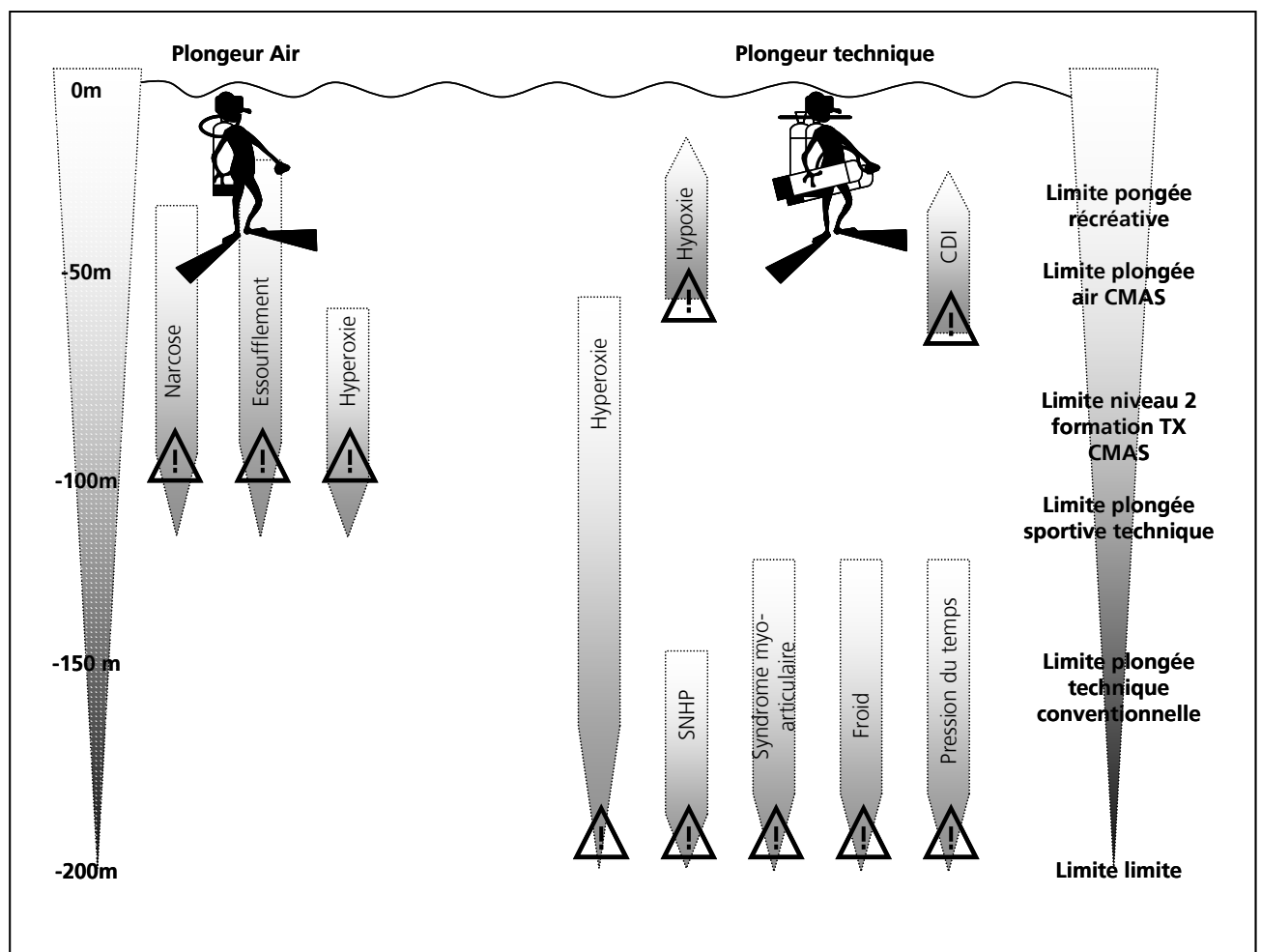
5. Limites physiologiques

5.1. Introduction

L'utilisation de l'air limite la profondeur de la plongée Tech (selon les organismes de formation, la législation, la physiologie). L'utilisation de mélanges synthétiques sous-oxygénés contenant de l'hélium permet de repousser certaines limites. Cependant, de nouvelles difficultés apparaissent, spécifiques à l'utilisation de ces mélanges.

Tableau comparatif des risques liés à l'air et au Trimix

Les risques liés à l'air	Les risques liés au Trimix
La narcose	L'hypoxie en surface
L'essoufflement	La déshydratation
L'hyperoxie en cas de dépassement de profon-	L'hyperoxie en cas d'erreur d'utilisation
	Le SNHP
	Le syndrome myo-articulaire
	La pression du temps
	Le froid
	La CDI



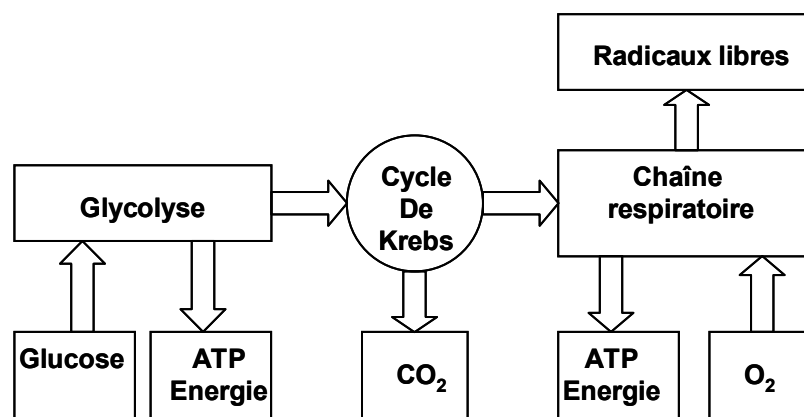
5.2. L'oxygène

5.2.1. Généralités

L'air est un drôle de mélange, à la louche, 21% d'oxygène et 79% d'azote. L'oxygène qui est indispensable à notre métabolisme est aussi très toxique. Heureusement, il est dilué par l'azote qui en même temps qu'il nous sauve, nous menace à son tour de quelques micros bulles indécrites. Un cocktail pour le moins paradoxal, mais qui ne fonctionne pourtant pas si mal. En plongée, les différences de pression influent sur la pression partielle d'oxygène dans nos poumons, et à plus forte raison en plongée aux mélanges, lorsqu'on commence à jouer avec des Nitrox. L'oxygène a beau être vital, il doit être respiré avec précaution.

5.2.2. La biochimie de l'oxygène

Le métabolisme de l'oxygène est la première source d'énergie des différentes formes de vie complexes. Cependant, vu les dangers d'oxydation inhérents à l'utilisation d'un gaz tel que l'oxygène, la nature a mis en place toute une série de transformations progressives pour protéger les cellules et assurer que l'énergie soit récupérée pas à pas. L'énergie est stockée sous forme d'ATP (adénosine tri phosphate), cette molécule est formée suivant diverses chaînes de réactions comme la glycolyse anaérobie qui produit relativement peu d'ATP. Cependant, l'acide pyruvique formé par glycolyse entre dans le cycle de Krebs qui grâce à la chaîne respiratoire, parvient à former 38 ATP par molécule. La plupart des ATP sont produits dans la chaîne respiratoire et l'oxygène n'intervient que très tard dans cette chaîne afin de former de l'eau en réagissant avec l'hydrogène. L'oxygène entre dans cette chaîne de réactions et donne des molécules très réactives, les radicaux libres d'oxygène, comme l'ion superoxyde O_2^- ou bien d'autres molécules comme le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 (eau oxygénée). En conditions normales, ces molécules oxydantes sont contrôlées par des enzymes (biocatalyseur, composé chimique synthétisé par un être vivant) protéique qui active une réaction biochimique spécifique comme la catalase ou bien la superoxyde dismutase prennent en charge ces radicaux libres. En conditions hyperbares, avec des pressions partielles d'oxygène élevées, l'oxygène entre plus tôt dans la chaîne de réaction et produit plus de radicaux libres. Les protections naturelles peuvent être dépassées car les activités ou les quantités enzymatiques ne sont pas suffisantes pour contrecarrer l'apport important de réactifs. Il y a danger pour l'intégrité cellulaire, c'est la toxicité de l'oxygène. On devine que nous retrouverons une telle toxicité dans des sites qui ont un besoin métabolique important, soit un grand nombre de molécules réactives par apport d'oxygène. Les deux sites préférentiels dans de tels cas sont le système nerveux central (effet Paul Bert) et les cellules des alvéoles pulmonaires (effet Lorrain-Smith).



5.3. La neurotoxicité de l'oxygène

5.3.1. Généralités

La toxicité neurologique de l'oxygène survient à partir d'une $PO_2 > 1.6$ bar. Cette toxicité se manifeste par une crise convulsive avec perte de connaissance appelée "effet Paul Bert", du nom de celui qui l'a mise en évidence. Cette crise à caractère épileptique est parfois précédée de signes avant-coureurs comme une accélération du rythme cardiaque (tachycardie), secousses musculaires, nausées, anxiété ou confusion, troubles de la vue. Ce seuil est atteint en plongée à l'air à une profondeur de -66 m. Lors de plongées au Nitrox, il faut recalculer la profondeur limite en fonction du taux d'oxygène dans le mélange, car ici, la profondeur limite sera plus facilement atteinte. Par exemple, si on respire du Nitrox contenant 40% d'oxygène, il ne faudra pas dépasser -30 m. L'apparition de cette crise est aussi fonction de la durée de l'exposition (le temps de latence est variable pour une même personne), de l'activité musculaire, et bien entendu, de la PO_2 respirée.

5.3.2. Symptômes

Ils se traduisent par des contractions musculaires, tintements et sifflement d'oreilles, vision floue, désorientation, aphasie (impossibilité de s'exprimer par la parole), nystagmus (va-et-vient rapide des yeux) ou l'incoordination. Les autres symptômes rapportés sont moins caractéristiques et peuvent être dus à une toxicité de l'oxygène ou à d'autres causes : tête légère, malaise, léthargie, nausée.

On distingue trois phases dans la crise hyperoxique :

- Une phase tonique, contractions musculaires
- Une phase clonique, secousses musculaires, morsure de la langue
- Une phase résolutive, inertie, reprise de la conscience, mais amnésie de la crise

Si la PO_2 est maintenue, le plongeur va de nouveau passer successivement par ces trois stades, ceux-ci s'aggravant dans le temps pour aboutir à une syncope. La crise hyperoxique s'interrompt d'elle même quand on cesse l'inhalation d'oxygène. La susceptibilité à l'hyperoxie varie chaque jour pour un même individu et peut être favorisée par :

- Le froid et fatigue
- L'hypercapnie
- Les efforts ventilatoires et physiques

Tableau des symptômes en fonction des pressions partielles d'oxygène

P02	Signes et symptômes
0.1 bar	Perte de connaissance, mort
0.12 bar	Hypoxie sérieuse, début des symptômes au repos
0.16 bar	Hypoxie moyenne, minimum pour un fonctionnement normal
0.21 bar	Normoxie
0.5 – 1.4 bar	Commencement de la toxicité
1.4 bar	Toxicité du système nerveux. Exposition maximale lors d'efforts
1.6 bar	Exposition maximale dans l'eau
1.9 bar	Maximum pour la recompression dans l'eau
2.0 bar	Limites extrêmes de l'exposition USN
2.8 bar	Exposition maximale à l' O_2 pur en caisson

5.3.3. Calcul de la neurotoxicité

Quand le plongeur a atteint le temps maximum pour une seule plongée, un intervalle de surface doit être observé. On modélise l'action de l'oxygène sur le système nerveux central au moyen d'un calcul appelé %SNC et au moyen de la table NOAA ci-dessus. Le total doit, bien sûr, être toujours bien inférieur à 100%, que ce soit pour une plongée par jour ou pour plusieurs plongées par jour. Si le plongeur atteint une toxicité oxygène du SNC de 85% et plus, il doit rester en surface en respirant de l'air au moins 2 heures. Quand dans la journée de plongée on atteint le temps maximum d'exposition (toxicité SNC < 100%), l'intervalle de surface doit être au minimum de 12 heures.

$$\text{TSNC} = t / t_{\text{max}} * 100$$

TSNC : toxicité oxygène du SNC = [%]

t : durée de plongée est le temps total d'immersion = [min]

t_{max} : durée maximale à une PO₂ selon la table NOAA = [min]

- **Exemple de calcul :**

Calculer la toxicité d'oxygène d'un plongeur qui effectue ses derniers paliers de 7 minutes à -9 mètres, 13 minutes à -6 mètres et 26 minutes à -3 mètres en sachant qu'il respire un Nitrox 75% ?

- **Solution :**

Palier -9 mètres : PO₂ = FO₂ * P ⇒ 0.75 * 1.9 = 1.425 bars arrondi à 1.5 bars ⇒ t_{max} = 120 minutes

Palier -6 mètres : PO₂ = FO₂ * P ⇒ 0.75 * 1.6 = 1.2 bars ⇒ t_{max} = 210 minutes

Palier -3 mètres : PO₂ = FO₂ * P ⇒ 0.75 * 1.3 = 0.975 bars arrondi à 1 bars ⇒ t_{max} = 300 minutes

TSNC 1 (palier -9 mètres) = t / t_{max} * 100 ⇒ 7 / 120 * 100 = 5.9 % (arrondi)

TSNC 2 (palier -6 mètres) = t / t_{max} * 100 ⇒ 13 / 210 * 100 = 6.2 % (arrondi)

TSNC (palier -3 mètres) = t / t_{max} * 100 ⇒ 26 / 300 * 100 = 8.7 % (arrondi)

TSNC tot = TSNC 1 + TSNC 2 + TSNC 3 ⇒ 5.9 + 6.2 + 8.7 = **20.8 %**

Tableau des pressions partielles limites selon NOAA (National Oceanographic & Atmospheric Administration)

PO ₂ Respirée	Durée maximale pour une plongée/jour	Durée maximale pour plusieurs plongées/jour	Exposition exceptionnelles
0.6 bar	720 min	720 min	--
0.7 bar	570 min	570 min	--
0.8 bar	450 min	450 min	--
0.9 bar	360 min	360 min	--
1.0 bar	300 min	300 min	--
1.1 bar	240 min	270 min	--
1.2 bar	210 min	240 min	--
1.3 bar	180 min	210 min	240 min
1.4 bar	150 min	180 min	180 min
1.5 bar	120 min	180 min	150 min
1.6 bar	45 min	150 min	120 min
1.7 bar	--	--	75 min
1.8 bar	--	--	60 min

5.3.4. L'influence de la rétention du dioxyde de carbone sur la toxicité de l'oxygène

Plusieurs études montrent que la profondeur augmentant, le taux d'oxygène élevé et l'augmentation de la densité de gaz diminuera notre rythme respiratoire, et de ce fait, le taux d'élimination du dioxyde de carbone. Ceci augmenterait le niveau sanguin de dioxyde de carbone, même si tous les plongeurs ne diminuent pas leur rythme respiratoire dans la même proportion. Le docteur Lanphier étudia le problème sur des plongeurs qui respirent plus lentement durant leurs plongées que lorsqu'ils sont au sec – ainsi nommés « carbon dioxide retainers ». Il découvrit que ces plongeurs seraient plus susceptibles à la toxicité neurologique centrale de l'oxygène lors de la respiration de mélanges Nitrox.

5.3.5. La CNS Clock

La difficulté réside dans le fait que la plongée loisir se pratique généralement avec des plongées répétitives. Alors, comment calculer une dose toxique sur plusieurs expositions ? Sur ce point, DSAT (Diving Science And Technology corp.) a ajouté au temps d'exposition le calcul d'un indice qui se cumule au fur et à mesure des plongées. Il ne faut pas dépasser 100% d'indice par 24 heures, la valeur 100% correspondant à la valeur de la NOAA pour une exposition continue. C'est ce qu'on appelle en anglais la « CNS Clock », en français « l'horloge du système nerveux central ».

Par exemple, le tableau suivant donne les valeurs du coefficient pour différentes expositions à 1.2 bar d'oxygène. Exemple en considérant trois plongées de 105 min, 72 min et 42 min à 1.2 bar d'oxygène.

$(105 \times 50\%) + (72 \times 30\%) + (42 \times 20\%) = 100\%$, en temps d'exposition on obtient 239 min ceci rejoint la durée totale permise par les tables NOAA pour une durée de 24 heures, à savoir 240 min.

Tableau du coefficient de l'horloge oxygène pour une valeur de la PO₂ de 1.2 bar (DSAT)

Durée (min)	11	21	32	42	53	63	74	84	95	105	116	126	137	147	158	168
Coefficient (%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80

5.3.6. Respiration de l'oxygène à pression partielle élevée

Les analyses du docteur Harabin donnent un seuil limite de 1.7 bars (7 mètres pour un plongeur en exercice quand on considère seulement les « convulsions » et les symptômes « définis ». C'est dangereusement près de 7.6 mètres (1.76 bar), profondeur à laquelle des convulsions ont été rapportées. Remonter à 6 mètres (1.6 bar) donne un peu plus de marge.

La limite de la NOAA pour la plongée avec Nitrox à 1.6 bar est de 45 minutes pour une plongée normale et de 120 minutes pour une plongée à exposition exceptionnelle. Durant une plongée à –30 mètres avec Nitrox faite au centre hyperbarique de la Duke University, respirant 1.6 bar de PO₂ durant un exercice intense, une convulsion est apparue après 40 minutes. Peut-être que cette convulsion ne se serait pas manifestée avec un niveau moins élevé d'exercice, mais cela semble indiquer que la limite de la NOAA de 45 minutes pour 1.6 bar lors d'une plongée avec Nitrox n'est pas déraisonnablement prudente.

Respirer 100% d'oxygène durant la décompression à –6 mètres est une pratique courante en plongée commerciale, et à cette profondeur, la pression partielle est de 1.6 bar. A cette faible profondeur, au repos, la possibilité de toxicité du système nerveux central à l'oxygène est associée à un risque faible. Cependant, lors des opérations de plongée Trimix sur l'épave du Lusitania, un cas de convulsion à l'oxygène a été rapporté à –6 mètres.

5.3.7. Les doses maximales d'oxygène

Au sec on peut utiliser l'oxygène jusqu'à -12 mètres. C'est l'introduction des cloches de palier qui a permis les progrès majeurs réalisés par les spéléos en plongée profonde. Le problème est qu'une cloche de décompression peut se fixer dans le rocher ou se coincer au plafond dans une cavité. En mer, pas question de manipuler une tonne de lest à partir d'un petit support de surface. Le mieux qu'on puisse faire en mer, c'est d'effectuer ses paliers au clame et au repos et de planifier ses mélanges jusqu'à 1.6 bar de PO_2 . Malheureusement dans l'eau, le risque de convulsion est déjà présent avec 1.6 bar de PO_2 et il faut mettre en place des procédures adaptées (barre de décompression à -6m, longe de palier, surveillance, procédure de rattrapage, air break). Il est déconseillé de descendre en dessous de 800 mbar de PO_2 pour des décompressions sévères. L'idéal bien sûr est le recycleur qui permet de travailler à PO_2 constante. En circuit ouvert, pour rester dans la plage des 1.6 bar – 0.8 bar de PO_2 , il faut enchaîner les mélanges de décompression. Classiquement on utilise 2 bouteilles relais pour changer de mélanges durant la remontée.

5.3.8. Conclusion

Les convulsions sont le symptôme le plus grave et celui à éviter à tout prix, vous devez toujours garder à l'esprit que la toxicité de l'oxygène est imprévisible, des convulsions sont apparues à de faibles profondeurs dans des conditions où la plupart des experts n'auraient jamais pensé qu'elles puissent survenir. Dans ces conditions, l'utilisation de mélanges suroxygénés ou sous-oxygénés doit être planifiée et effectuée avec prudence. En utilisant un scaphandre autonome à circuit ouvert, trois zones peuvent ainsi être considérées :

☺ **Zone verte $PO_2 \leq 1.4$ bar (90 mètres avec un mélange Trimix 14/45)**

Tant que ce niveau ne sera pas dépassé, les autres limitations du scaphandre autonome à circuit ouvert limiteront le temps au fond à des durées où la toxicité de l'oxygène est fort peu probable, même pour des durées se rapprochant des quatre heures.

☹ **Zone orange $PO_2 > 1.4 > 1.6$ bar**

La probabilité de la toxicité de l'oxygène est faible, mais la marge d'erreur est très mince comparée à 1.4 bar. Des variations personnelles, des incursions profondes imprévues et la possibilité d'exercices en cas d'urgence augmentent la possibilité de toxicité de l'oxygène. La prudence est de rigueur et des niveaux de 1.5 à 1.6 bar devraient être réservés à des conditions où le plongeur fait des efforts modérés comme durant un palier de déco.

☹ **Zone rouge $PO_2 > 1.6$ bar**

Ne franchissez jamais cette limite, il est évident que des expositions courtes à des niveaux supérieurs sont possibles, mais les convulsions le sont également. Un exercice modéré peut déclencher la crise convulsive pour un plongeur. Finalement, la plongée Nitrox peut étendre les séjours au fond ou diminuer le risque d'accident de déco, cela dépendant de la manière dont elle est utilisée, mais elle introduit le risque de toxicité de l'oxygène. Les maladies de décompression surviennent rarement dans l'eau et sont très rarement mortelles. Si une convulsion à l'oxygène apparaît, ce sera presque toujours sous l'eau, compliquant énormément la récupération du patient et le traitement. Ainsi, bien que la probabilité des convulsions soit faible, les conséquences peuvent être sévères. L'expérience ainsi qu'une formation adéquate sont essentielles.

5.4. La pneumotoxicité de l'oxygène

5.4.1. Généralités

L'inflammation des alvéoles des poumons, connue sous le nom d'effet « Lorrain Smith » apparaît après un séjour de plus de deux heures à une $PO_2 > 0.5$ bar (en théorie, un plongeur qui passerait 2 heures à -15 mètres s'expose à ces lésions). A la différence de l'effet Paul Bert, l'effet Lorrain Smith n'est pas un accident aigu, bien qu'il provoque un œdème pulmonaire si on le laisse évoluer. Cette toxicité intervient de façon non encore élucidée totalement, les hypothèses sont que les alvéoles se collapsent ou que les enzymes des cellules formant les alvéoles ne jouent plus leurs rôles. On imagine encore un phénomène d'oxydation de tape inflammatoire qui augmente l'épaisseur des membranes alvéolaires limitant ainsi la diffusion de l'oxygène vers le sang et en même temps l'élimination du dioxyde de carbone. Tout comme l'effet « Paul Bert », l'effet « Lorrain Smith » est une toxicité de l'oxygène lié au temps et à la durée d'immersion. Cet accident toxique pulmonaire est du à de longues expositions à une PO_2 basse comprise entre 0.5 et 1 bar. Il faut enfin savoir que l'effet « Lorrain Smith » peut apparaître avant la crise convulsive !

5.4.2. Symptômes

Les symptômes objectifs de la toxicité pulmonaire sont la toux mais surtout une diminution significative de la capacité vitale pulmonaire des individus atteints (brûlures alvéolaires, oedème pulmonaire).

5.4.3. Calcul de la pneumotoxicité

Cette toxicité a été quantifiée en OTU (Oxygen Toxicity Unit) suite aux expériences conduites.

1 OTU = O_2 pur pendant 1minute à 1 bar. Elle est mesurée par la réduction de la CV (Capacité Vitale), cela correspond à une réduction de cette capacité de 2% avec 615 OTU ET 4% avec 825 OTU.

Devant les risques de toxicité pulmonaire durant la décompression et les traitements hyperbares, une modélisation s'est mise en place avec comme découpage les unités de toxicité pulmonaires (UPTD en GB) calculées pour les expositions air, oxygène et mélanges. En 1989 vit l'apparition d'un nouveau terme désignant les UPTD, par Hamilton (chercheur hyperbarique américain), les doses d'oxygène tolérées ou OTU (Oxygen Toxicity Unit) par l'organisme, terme plus en rapport avec la physiologie de l'oxygène et en plus, nettement plus optimiste.

Dose = OTU/min * t

Dose : dose maximale d'oxygène = [OTU]

OTU/min : dose maxi en fonction de la durée

t : temps d'exposition à une PO_2 déterminée = [min]

- **Exemple de calcul :**

Combien de temps puis je respirer de l'oxygène à une pression partielle de 1.6 bar sans dépasser la dose maximale admissible par journée de plongée ?

- **Solution :**

Voir table 1.6 nous donne 1.92 d'OTU/min \Rightarrow

Dose = OTU/min * Du \Rightarrow Du = Dose / OTU/min \Rightarrow 850 / 1.92 = 442 minutes, soit plus de 7 heures.

Table OTU (selon R.-W. Hamilton)

PO₂	OTU / Minute
0.5 bar	0
0.6 bar	0.27
0.7 bar	0.47
0.8 bar	0.65
0.9 bar	0.83
1.0 bar	1.00
1.1 bar	1.16
1.2 bar	1.32
1.3 bar	1.48
1.4 bar	1.63
1.5 bar	1.78
1.6 bar	1.92

Table REPEX (limites d'exposition à la toxicité pulmonaire)

Jours exposition	OTU quotidiennes	Total sur période	Jours exposition	OTU quotidiennes	Total sur période
1	850	850	9	330	2970
2	700	1400	10	310	3100
3	620	1860	11	300	3300
4	525	2100	12	300	3600
5	460	2300	13	300	3900
6	420	2520	14	300	4200
7	380	2660	14 - 30	300	N/A
8	350	2800			

Le but de cette table est de calculer votre charge en oxygène durant votre plongée en fonction du temps et de la PO₂ respirée. Cette méthode permet également, vu que les unités sont totalisables, de trouver le total des OTU pour plusieurs plongées dans la journée.

5.4.4. Prévention

La dose maximale lors d'une journée de plongée ne doit pas dépasser 1500 OTU. Attention, comme la plongée ne peut être envisagée sans la possibilité de suivre un traitement hyperbarique qui peut aller jusqu'à l'assimilation de 650 OTU à anticiper dans la journée de plongée, soit $1500 - 650 = 850$ OTU. La dose maximale lors d'une plongée ne doit pas dépasser 850 OTU.

5.5. L'hypoxie

5.5.1. Généralités

Le pourcentage d'oxygène doit être de 16% au minimum dans l'air afin de maintenir nos fonction vitales intactes. Certains mélanges fonds contiennent moins d'oxygène et, de ce fait peuvent être hypoxique en surface ou durant la phase de descente. De plus il faut tenir compte qu'une brusque baisse de la PO_2 provoque une perte de connaissance sans signe avertisseur.

5.5.2. Symptômes

Accélération du rythme respiratoire, tachycardie, hallucinations, perte de connaissance, collapsus, arrêt respiratoire, arrêt cardiaque.

Tableau des effets du manque d'O₂ en fonction du pourcentage respiré

% du CO ₂ en volume	PCO ₂	Symptômes
≤ 16 %	≤ 0.16 bars	Pouls et respiration ↗ Attention ↘ Mouvements délicats ↘
≤ 10 %	≤ 0.1 bars	Conscience mais jugement erroné Insensibilité Fatigue, cyanose apparaît
= 6 à 7 %	= 0.06 à 0.07 bars	Nausées, vomissements Efforts impossibles Cyanose intense
< 6 %	< 0.06 bars	Respiration irrégulière Convulsion Syncope et mort

5.5.3. Prévention

Une bonne connaissance de l'utilisation des mélanges et du matériel est indispensable. Dans le cas des recycleurs, une attention toute particulière doit être apportée à la composition du mélange présent dans le sac ou le faux poumon ainsi qu'au montage des soupapes et à l'alimentation en mélange gazeux.

5.6. La narcose (N₂)

5.6.1. Généralités

L'ivresse des profondeurs ou la narcose est la conséquence de la toxicité neurologique de l'azote. Le mécanisme est encore mal connu, mais une des hypothèses les plus probables est l'altération de la transmission des influx nerveux (sensitifs et moteurs), cette altération proviendrait de la fixation d'azote dans la gaine de myéline entourant chaque cellule de la fibre nerveuse. Cette fixation serait favorisée par la présence d'une tension partielle de dioxyde de carbone relativement importante. La narcose n'est pas le fait exclusif de l'azote, c'est celui des gaz inertes, plus le poids moléculaire est élevé est plus la narcose est rapide d'où l'impossibilité de remplacer l'azote par autre chose que de l'hélium ou de l'hydrogène. En comprimant très lentement, ce phénomène peut être minimisé voire aboli, il disparaît totalement à saturation. Ce n'est pas la narcose qui limite donc l'emploi de l'air en profondeur pour les professionnels qui travaillent à saturation à l'azote-oxygène, mais le risque d'essoufflement.

5.6.2. Symptômes

Les symptômes sont variables d'un individu à l'autre, peuvent varier d'un jour à l'autre, selon le gaz inerte utilisé et selon les circonstances d'exposition, ils apparaissent dès le seuil de pression partielle caractéristique de chaque gaz et augmentent avec la profondeur. Pour l'azote, les manifestations sont nettes à partir d'une pression absolue de 5 bars (40 mètres). Les plongées fréquentes permettent d'augmenter la tolérance personnelle qui disparaît après quelques semaines sans plonger, le froid, la fatigue, les exercices musculaires, le manque d'entraînement, la perte des repères visuels diminuent cette tolérance.

- **Signes subjectifs**

Modification de l'humeur et du comportement, sens critique diminué, fuite des idées, sensation d'activité fébrile, désintérêt vis-à-vis de l'environnement, perte du sens de l'orientation, modification de la sensation du temps, viscosité mentale, augmentation du dialogue intérieur, ordres récents mal exécutés, perte de la mémoire immédiate, euphorie ou anxiété, instabilité de l'humeur, fantasmes.

- **Signes objectifs**

Force musculaire diminuée, altération de la coordination (travaux fins mal exécutés, écriture déformée), tact diminué, seuil douloureux augmenté, trouble de l'équilibre.

5.6.3. Les facteurs favorisant

- La compression rapide
- L'essoufflement
- Le froid
- Le manque d'entraînement

En outre, les gaz inertes si dissolvent dans les lipides des membranes cellulaires et empêchent alors le passage de l'oxygène, l'hypoxie qui en résulte serait un facteur aggravant de la narcose.

5.6.4. La profondeur narcotique équivalente (PNE)

Pour les Anglo-Saxons END (Equivalent Narcotic Depth). C'est la profondeur à laquelle on obtiendrait, lors d'une plongée au ternaire, la même pression partielle d'azote qu'avec de l'air. Pour vérifier la dose narcotique d'un mélange à une profondeur donnée, il suffit d'appliquer la formule suivante :

$$PNE = [(FN_2 * P) / 0.79 * 10] - 10$$

PNE : profondeur narcotique équivalente = [m]
FN₂ : fraction d'azote dans le mélange ternaire = [%]
P : pression absolue = [bar]

- **Exemple de calcul :**

Quelle est la profondeur narcotique équivalente d'un mélange ternaire 15/45 à -80 mètres (14% d'oxygène, 45% d'hélium et 40% d'azote).

- **Solution :**

$$PN_2 \text{ Trimix} = FN_2 \text{ Trimix} * P \Rightarrow 0.4 * 9 = 3.6 \text{ bars}$$

$$PN_2 \text{ air} = PN_2 \text{ Trimix} / 0.79 \Rightarrow 3.6 / 0.79 = 4.55 \text{ bars}$$

$$\text{Prof. relative} = PN_2 \text{ air} * 10 \Rightarrow 4.55 * 10 = 40.5 \text{ mètres}$$

$$PNE = \text{Prelative} - 10 = 40.5 - 10 = \mathbf{35.5 \text{ mètres}}$$

Ainsi, avec ce Trimix on aura la même dose d'azote qu'avec un mélange d'air respiré à -35.5 mètres.

5.6.5. Limites

Tableau des pressions partielles limites d'azote

Gaz	Conditions	Pression partielle max.
A l'air	normales ou difficiles	5.6 bars
En mélange	normales ou difficiles	3.2 bars (CMAS.CH)

5.6.6. Prévention

- Entraînement régulier aux plongées profondes
- Bonne forme physique et psychique
- L'adaptation n'est qu'une maîtrise des symptômes
- Profondeur narcotique équivalente à -30 mètres
- L'adaptation aux plongées profondes disparaît après 1 semaine

5.7. L'essoufflement (CO₂)

5.7.1. Généralités

L'hypercapnie est une augmentation de la pression partielle du dioxyde de carbone PCO₂, cette dernière peut augmenter chez certains individus, en fonction de l'effort et/ou du matériel utilisé et des conditions de plongée. Certaines personnes ont même des prédispositions naturelles à la rétention du dioxyde de carbone on les appelle des reteneurs de dioxyde de carbone. L'essoufflement, est une mauvaise adaptation du rythme respiratoire à l'effort, pouvant résulter également d'une mauvaise condition physique ou d'une descente dans le bleu rapide après un palmage énergique.

Une des cause de l'essoufflement est la densité de l'air respiré ceci est d'autant plus vrai que les profondeurs atteintes avec ce type de plongée sont importantes.

- à -40 m, diminution de 50 % de la capacité respiratoire
- à -60 m, diminution de 60 % de la capacité respiratoire
- à -90 m, diminution de 70 % de la capacité respiratoire

5.7.2. La densité des gaz

La densité des gaz augmentent proportionnellement à la pression, ainsi en surface, 1 litre d'air pèse 1.3 g, à -60 mètres (Pabs = 7 bars) ce même litre pèse 9.1 g, d'où l'intérêt de respirer des mélanges plus légers que l'air en remplaçant l'azote par un gaz plus léger, l'hélium par exemple.

Tableau de la densité des gaz

GAZ	Hydrogène	Hélium	Azote	Oxygène
Poids moléculaire	2	4	28	32

5.7.3. Mécanismes de l'essoufflement

L'essoufflement est dû à des facteurs mécaniques, le travail des muscles respiratoires est augmenté (intérêt de l'entraînement). L'hypercapnie n'est qu'une conséquence de la fatigue et de l'insuffisance respiratoire. Quand le dioxyde de carbone augmente, le sujet s'excite et ne peut pas contrôler sa respiration, contrairement à ce qui est parfois écrit dans les manuels de plongée sportive, **le seul moyen pour récupérer un essoufflement est de remonter** pour que les muscles respiratoires puissent à nouveau travailler efficacement et non d'essayer de calmer le plongeur au fond ce qui aggrave inévitablement son état. Il faut faire la distinction entre un plongeur capable de s'arrêter quand il sent l'essoufflement le guetter, de celui qui « fait des bulles », le premier n'est pas encore essoufflé alors que le second l'est. Ne pouvant être raisonné, il faut le remonter de toute urgence. Les mélanges (ternaires ou binaires) diminuent donc le risque d'essoufflement en diminuant la masse volumique et en diminuant le travail des muscles respiratoires (on rappelle que PN₂ max = 3.2 bars, ce qui correspond à une profondeur équivalente à l'air d'environ -30 mètres). Il faut aussi noter que la résistance du détendeur qui s'accroît avec la pression est un facteur de risque supplémentaire.

Tableau des effets de la toxicité du CO₂ en fonction du pourcentage respiré

% du CO₂ en volume	PPCO₂	Symptômes
< 2 %	< 0.02 bar	Rien
2 %	0.02 bar	Rythme et amplitude respiratoire ↗ Maux de tête
5 %	0.05 bar	Essoufflement, sueurs, face congestionnée, Cyanose
7 %	0.07 bar	Torpeur, vertige, nausées, ralentissement du rythme respiratoire
> 7 %	> 0.07 bar	Augmentation effets précédents, syncope et mort

5.7.4. Prévention

L'essoufflement est la première cause d'accident en plongée profonde à l'air, la plupart des accidents mortels en profondeur sont imputables à l'essoufflement et non la narcose. Les sources d'essoufflement les plus fréquentes sont :

- Mauvais équilibrage
- Effort de palmage trop intense, notamment dans la manœuvre de remorquage ou en cas de lutte contre le courant
- Manœuvre non maîtrisée
- Manque d'entraînement
- Qualité des mélanges fabriqués médiocre

5.8. Le froid

5.8.1. Généralités

Sujet crucial en plongée aux mélanges, les capteurs nerveux du froid sont cutanés et profonds (hypothalamus). On notera l'absence des capteurs au niveau des poumons. Dans le cas d'une agression cutanée violente, les réactions sont essentiellement nerveuse, hyperventilation, frissons intenses, vasoconstriction réflexe, spasmes, syncope et noyade. Dans le cas d'une agression lente (cas du plongeur habillé en général), les réactions nerveuses sont réduites, voire absentes. La température centrale diminue, l'organisme réagit en produisant plus de chaleur et en réduisant ses pertes thermiques par vasoconstriction. Les premiers symptômes graves apparaissent vers 35°C, nausées, crampes, trouble du rythme cardiaque, la syncope survient vers 32 °C.

Soulignons l'absence de réaction au refroidissement d'origine pulmonaire, ce refroidissement essentiel en plongée profonde est donc sournois. En effet, le corps se refroidit par l'intérieur (poumons).

5.8.2. Pertes par respiration

En plongée, l'air inspiré est couramment à une température inférieure à 10 °C. L'air ou les gaz expirés sont portés à une température voisine de 30 °C. La dépense d'énergie pour réchauffer et humidifier ces gaz est proportionnelle à la quantité de gaz inspirés, et par conséquent à la profondeur. A –100 mètres, la perte thermique est de l'ordre de 100 watts pour un plongeur qui ventile 20 litres/minute. A –50 mètres, cette perte thermique est de l'ordre de 60 watts. Ces pertes peuvent se calculer de la manière suivante :

$$\text{Presp} = V * (\text{Texp} - \text{Tinsp}) * M * \text{Cp}$$

Presp : pertes respiratoires = [W]

V : débit respiratoire = [mol/sec] En surface, le débit moyen est de 0.03 mol/sec

Texp : température du gaz expiré = [°C]

Tinsp : température du gaz inspiré = [°C]

M : masse volumique du gaz = [g/l] M de l'air = 1g/l

Cp : chaleur spécifique du gaz = [J/°C/mole] Cp de l'air = 20 J/°C/mole

- **Exemple de calcul :**

Calculer les pertes en surface et à –80 mètres de profondeur en sachant que les températures de l'air expiré et inspiré sont de 31°C respectivement 16 °C ?

- **Solution :**

$$V_{\text{surf}} = P_{\text{abs}} * V_{\text{moy}} \Rightarrow 1 * 0.03 = 0.03 \text{ mol/sec}$$

$$\text{Pertes en surface} = V_{\text{surf}} * (\text{Texp} - \text{Tinsp}) * M * \text{Cp} \Rightarrow 0.03 * (31 - 16) * 1 * 20 = \mathbf{9 \text{ Watts}}$$

$$V_{\text{fond}} = P_{\text{abs}} * V_{\text{moy}} \Rightarrow 9 * 0.03 = 0.27 \text{ mol/sec}$$

$$\text{Pertes au fond} = V_{\text{fond}} * (\text{Texp} - \text{Tinsp}) * M * \text{Cp} \Rightarrow 0.27 * (31 - 16) * 1 * 20 = \mathbf{81 \text{ Watts}}$$

5.8.3. Pertes cutanées

Elles sont dues à la convection et à la conduction des fluides qui entourent le plongeur. La formule générale qui permet de calculer les pertes thermiques par convection et conduction est :

$$P_{cut} = (T_{cut} - T_{amb}) / k1 + K2 + K3 + K4$$

P_{cut} : pertes cutanées = [W]

T_{cut} : température cutanée = [°C]

T_{amb} : température ambiante = [°C]

K : coefficient de déperdition calorifique = [°C/W]

Il est commode de considérer que nous sommes protégés par plusieurs couches de vêtements, notamment :

k1 : couche limite d'eau = 0.003 à 0.015 °C/W

k2 : néoprène 7mm = 0.09 °C/W

k3 : souris 5mm air = 0.07 °C/W

k4 : couche graisseuse = 0.025 à 0.07 °C/W

L'air a une conductivité thermique bien plus faible que celle de l'eau. Les matières plastiques, le caoutchouc, les fibres ont des conductivités intermédiaires. Il en résulte que la meilleure protection thermique est l'air (ou un autre gaz ayant une conductivité plus faible, l'argon) que le plongeur interpose entre l'eau et lui.

- **Exemple de calcul :**

Calculer les pertes cutanées d'un plongeur équipé d'un vêtement sec 7mm, d'une souris 5mm, d'une corpulence forte dans une eau calme à 10 °C ?

- **Solution :**

$$K_{tot} = k1 + k2 + k3 + K4 \Rightarrow 0.015 + 0.09 + 0.07 + 0.07 = 0.245 \text{ °C/W}$$

$$P_{cut} = (T_{cut} - T_{amb}) + k_{tot} \Rightarrow (37 - 10) + 0.245 = \mathbf{110 \text{ Watts}}$$

Auxquels il faut rajouter les pertes respiratoires. On constate qu'au delà de -100 mètres, les pertes respiratoires sont souvent plus importantes que celle par conduction/convection. Ces pertes deviennent telles qu'au delà de -80 mètres la thermogénèse ne permet pas de les compenser et que l'abaissement de la température centrale est inévitable. Au-delà de -120 mètres de profondeur et d'après la réglementation, les plongeurs professionnels doivent respirer des gaz réchauffés et ont une combinaison avec circulation d'eau chaude. Etant donné les problèmes posés par le froid, l'utilisation d'une combinaison étanche est indispensable.

Thermogénèse = L'organisme produit de la chaleur, donnons quelques chiffres.

- Au repos et à jeun = 60 à 80 Watts
- Au repos en ayant froid = 250 Watts
- Effort modéré (palmage soutenu) = 300 Watts

5.8.4. Dette thermique

Un déficit thermique provoque un abaissement de la température centrale d'environ 1 degré par watt heure et par kilo. Ainsi, un individu de 75 kg exposé à une dette thermique de 75 watts, se refroidit d'un degré par heure. Les mélanges contenant de l'hélium provoquent une perte thermique plus faible que l'air. En effet, la quantité d'énergie nécessaire pour réchauffer l'hélium est moins importante que celle nécessaire pour réchauffer l'air. En revanche, l'hélium étant plus conducteur de la chaleur, les échanges se font de façon très violente dans la partie supérieure des voies respiratoires. Les muqueuses, à cet endroit, sont thermosensibles et leur refroidissement brutal provoque des réactions nerveuses extrêmement inconfortables et une sécrétions abondante au binaire, atténuées par l'emploi du ternaire. En revanche, la présence d'hélium dans la combinaison ou dans la tourelle entraîne un accroissement considérable de l'échange thermique cutané. Au total, un plongeur qui respire de l'héliox, se refroidit plus vite que dans les mêmes conditions au ternaire ou à l'air, c'est pourquoi l'héliox a cette réputation de « grand froid ».

5.8.5. Les échanges de chaleur

Quatre mécanismes d'échange de chaleur existent chez l'homme :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement ou la radiation
- L'évaporation

- **La conduction**

La conduction correspond à l'échange de chaleur de proche en proche à travers un solide ou un fluide immobile, cette quantité de chaleur échangée dépend :

- De la conductibilité thermique
- De la différence de température entre les lieux d'échange
- De l'épaisseur du solide considéré

Il faut savoir que l'eau possède une conductibilité **24 fois supérieure à l'air** (0.6 pour l'eau et 0.025 pour l'air), cependant, en plongée sous marine, les vêtements de protection portés par les plongeurs permettent de créer une « couche limite », qui correspond à une fine couche de liquide de température intermédiaire variant peu et limitant ainsi les échanges de chaleur par conduction. Cette couche limite correspond à l'eau entre la peau et la combinaison, cette eau est peu renouvelée et est donc réchauffée par le corps.

Exemple : Barre métallique chauffée à une extrémité, insaisissable de l'autre. Il en est de même pour l'homme, si vous placez sa peau en contact avec une paroi ou de l'eau froide ou chaude, de la chaleur va s'échanger par conduction du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

- **La convection**

Il s'agit là d'échange d'énergies thermiques entre un corps et un fluide en mouvement de température différente. Un corps plongé dans l'eau va avoir tendance à réchauffer l'eau au contact de la peau et comme celle-ci est en mouvement, elle sera en permanence renouvelée par de l'eau froide, l'importance des échanges par convection dépend :

- De la différence de température entre la peau et le fluide considéré
- De la vitesse de déplacement du fluide
- De la nature du fluide défini par son coefficient de convection

On comprend pourquoi on se refroidi très vite dans l'eau, d'autant que ces pertes sont importantes (l'eau, même sans courant, peut occasionner des pertes de 100 Watt/m²/°C)

Exemple : Convecteur électrique dans une pièce, crée un courant, les molécules froides de l'air venant remplacer les chaudes jusqu'à réchauffement de la pièce.

- **Le rayonnement ou radiation**

La radiation correspond à un transport d'énergie sous forme infrarouge entre la peau et la surface qui l'entoure. Dans l'eau ce rayonnement disparaît. Par contre, il intervient de façon non négligeable dans les tourelles de plongées dont les parois sont parfois à 4°C.

Exemple : Le soleil chauffe l'atmosphère terrestre.

- **L'évaporation**

L'évaporation est un puissant moyen de lutte contre la chaleur, pour évaporer de l'eau (passage de l'état liquide à l'état de vapeur), il faut de l'énergie. Cette énergie est fournie par la peau, ce qui entraîne un abaissement de sa température. Dans l'eau, le passage à l'état de vapeur ne pouvant se faire, il n'existe pas d'évaporation (combinaison sèche exclue). Attention, cela ne veut pas dire que la sueur n'existe pas, mais que sa transformation en vapeur ne peut se faire, donc pas de déperdition de chaleur.

Exemple : Dans l'air, la transpiration refroidi la peau en s'évaporant.

En résumé, les pertes en plongée sous-marine se font essentiellement **par conduction et convection**, ces pertes dépendent de la différence de température entre le corps et l'eau et de l'épaisseur de la couche limite (qui elle-même dépend de la vitesse de déplacement du liquide et de la turbulence du liquide). Par conséquent, il faut toujours garder une température constante et tenir compte que ces pertes existent et quelles sont d'autant plus importantes quant on respire un mélange à base d'hélium.

5.8.6. Moyens de lutte et prévention

Dans un premier temps, l'organisme diminue les pertes de chaleur par vasoconstriction des vaisseaux sanguins périphériques, afin de diminuer les échanges avec l'extérieur en réduisant la différence de température entre la peau et la température ambiante. Ceci entraîne donc une baisse de la température locale (principalement mains et pieds). Ce mécanisme permet d'économiser de la chaleur mais, présente un inconvénient, s'il se prolonge, il finit par provoquer des gelures (appelées froidures dans l'eau) par défaut d'apport d'oxygène dans les tissus.

Ensuite, l'organisme va produire de la chaleur par contraction des muscles car celle-ci produit de la chaleur, le problème est que ce mécanisme s'épuise assez rapidement et ne produit pas énormément de chaleur, ce sont les classiques frissons.

Le troisième moyen de lutte, consiste à adopter un comportement adapté. Il s'agit surtout de se protéger contre le froid par des vêtements. On peut mesurer physiquement la quantité de chaleur qui passe à travers les vêtements. De nombreux progrès ont été réalisés pour diminuer cette quantité de chaleur qui s'échappe.

5.8.7. Prévention

- Régime alimentaire, 4500 à 5500 calories / jour
- Avant de plonger en eau froide, sucres et vitamines B + C et bonne forme physique
- Combinaison étanche indispensable, si pas suffisant, prévoir un système de chauffage
- Sous-vêtements chauds
- En eau froide, limiter la durée de séjour et les paliers, prévoir des profils moins longs

5.8.8. Conclusion

Bien que rarement grave, l'hypothermie en plongée favorise les accidents (abaissement de la température → diminution de la circulation sanguine → vasoconstriction des vaisseaux → élimination plus difficile des microbulles → accident de décompression. Ne pas hésiter à signaler que vous avez froid, avoir froid sous l'eau impose la remontée.

5.9. La déshydratation

5.9.1. Généralités

L'hydratation doit être une priorité, au cours de la plongée, le plongeur respire de l'air sec, pourtant quand il expire, il rejette de la vapeur d'eau, il se déshydrate donc progressivement. Ce phénomène est insensible pour des plongées normales de quelques dizaines de minutes, mais pour une immersion de plusieurs heures, la perte en eau peut se chiffrer à plusieurs litres. Il faut environ 6 heures pour réhydrater un plongeur à la suite d'une immersion profonde. Pour cela, il vaut mieux des apports modérés, mais constants au cours de l'immersion, plutôt que des apports massifs avant et après la plongée.

5.9.2. Mécanisme

On peut « perdre » de l'eau de plusieurs manières par la sudation, par la ventilation et par la diurèse :

- La sudation, réaction de la thermogenèse vis-à-vis d'un accroissement de la température ambiante, conduit à l'élimination d'eau sous forme de sueur
- La ventilation en plongée puise, par l'intermédiaire des sécrétions des muqueuses sinusales dans les réserves en eau de notre organisme pour assurer l'apport nécessaire à l'air fourni par le détendeur pour atteindre l'hygrométrie réclamée par l'hématose
- La pression mécanique engendrée par la combinaison provoque une vasoconstriction périphérique plus ou moins accentuée → légère hypertension artérielle. Le mécanisme régulateur rétablit la pression artérielle à une valeur normale en provoquant l'élimination d'une partie de l'eau du plasma sanguin vers la vessie (diurèse)
- Après la plongée qui a vu se mettre en place ces divers mécanismes, on enlève sa combinaison dès le retour au bateau. La vasoconstriction périphérique s'annule et entraîne une légère chute de tension artérielle. Le déficit général en eau n'est pas négligeable et on note une sensible diminution du débit de drainage des espaces intercellulaires

5.9.3. L'alcool

L'organisme humain est conçu de manière qu'on urine moins quand on transpire plus. Il s'agit là d'un mécanisme de défense du corps pour éviter de trop importantes pertes d'eau. L'ingestion de boissons alcoolisées bloque ce mécanisme de défense et augmente ainsi ces pertes en eau. En fait l'alcool inhibe la synthèse et la libération de l'hormone HAD (anti-diurétique). De cette manière le corps élimine plus de liquide qu'il n'en absorbe et se déshydrate. Il s'ensuit une diminution du volume sanguin et une stimulation du centre de la soif. Si l'on continue à boire des boissons alcoolisées, un cercle vicieux tend à s'installer.

5.9.4. Conclusion et prévention

- Favorise l'accident de décompression et l'hypothermie
- Perte d'humidité par respiration d'un air sec
- Eviter l'alcool car il favorise la déshydratation
- La prévention consiste à boire de l'eau après la plongée ou mieux pendant l'immersion pour rétablir l'équilibre hydrique de l'organisme, il faut boire **plus que sa soif**

5.10. Le SNHP (syndrome nerveux des hautes pressions)

5.10.1. Généralités

Le SNHP (Syndrome Nerveux des Hautes Pressions) est la vraie limite de la plongée autonome, il apparaît à l'Héliox et au Trimix à partir de -180 mètres en compression rapide (30m/min). Le SNHP serait dû à la pression hydrostatique et à la vitesse de compression trop rapide. Quand la pression augmente, tout se détraque, parce que la vie c'est de la chimie, et la chimie dépend de la pression.

Pour accéder aux hautes pressions, il faut laisser le temps à l'organisme de s'adapter. C'est ainsi qu'après une compression de plus de 10 jours, les plongeurs de l'expérience Comex Physalie VI établissent un premier record à -610 mètres, avec dans le caisson un mélange d'oxygène et d'hélium (Héliox).

5.10.2. Symptômes

Il y a malgré tout un effet de seuil et les premiers symptômes (réversibles heureusement) n'apparaissent pas avant -180 mètres, 150 mètres pour les plus sensibles. Viennent d'abord des douleurs articulaires, le fameux « no joint juice syndrome », littéralement les articulations sans jus, puis viennent les tremblements, d'autant plus importants que la vitesse est grande, parfois aussi les plongeurs ont des hallucinations auditives ou visuelles, enfin dans les pressurisations sévères, les plongeurs sont pris de nausées ou de vomissements.

En plongée autonome, pour descendre à grande profondeur, il faut aller vite car les réserves de gaz sont limitées et la durée de la décompression est rebutante. En descendant rapidement, le plongeur s'expose à un SNHP sévère au delà de -200 mètres. Il est perturbé, il pense et agit lentement, il a du mal à fixer son attention sur un chiffre, il risque de rater une manœuvre d'équipement. Cependant à l'inverse de la narcose, il reste parfaitement lucide et conscient de son état. Au delà de -180m, les professionnels plongent systématiquement à saturation, le tableau ci-dessous montre les durées minimales de compression et de décompression utilisées dans ce cas.

	100 mètres	200 mètres	300 mètres
Compression (heures)	0.25	2	24
Décompression (jours)	3	6	10

5.10.3. Prévention

Comment faire reculer le SNHP ? On ne peut pas trouver de références dans les expérimentations modernes où les pressurisations d'une part se font en caisson, d'autre part sont très lentes. Il faut revoir les plongées des temps anciens, Bühlmann a envoyé un plongeur à -320 mètres pour tester des tables profondes, le plongeur en est mort d'ailleurs et ne peut pas servir d'exemple. Pour lutter ou retarder les symptômes violents du SNHP, on pourrait penser d'augmenter le taux d'azote (5 à 10 % dans le mélange) mais cela n'est pas recommandé, d'abord parce que les données invalident l'hypothèse selon laquelle le SNHP est annulé par la narcose (Dr Bennett), il est seulement masqué, ensuite parce que la densité des gaz augmente avec l'azote et pose des problèmes ventilatoires, risque d'essoufflement.

5.11. Le syndrome myo-articulaire

5.11.1. Généralités

Des troubles articulaires et musculaires peuvent survenir en fonction de la vitesse de compression. Pour certains, le seuil d'apparition serait dès –80 mètres si on descend à 30 m/min, à –150 mètres si on descend à 5 m/min. En pratique, en tourelle, on n'observe guère de problèmes à 30 m/min jusqu'à –150 mètres (sur les chantiers en saturation le temps normal pour atteindre –100 mètres est d'une heure).

5.11.2. Mécanisme

Ce syndrome serait dû à la différence de tension des gaz dissous entre le liquide synovial et le cartilage. En pratique, ce syndrome ne concerne pas le plongeur sportif dont la profondeur d'intervention est limitée à – 150 mètres.

5.11.3. Symptômes

Ils sont provoqués par les mouvements d'amplitude poussée. Douleurs et craquements surtout au niveau des épaules et des genoux, sensation de raideur surtout au niveau des mains et des pieds. A la remontée, il ne reste aucune séquelle.



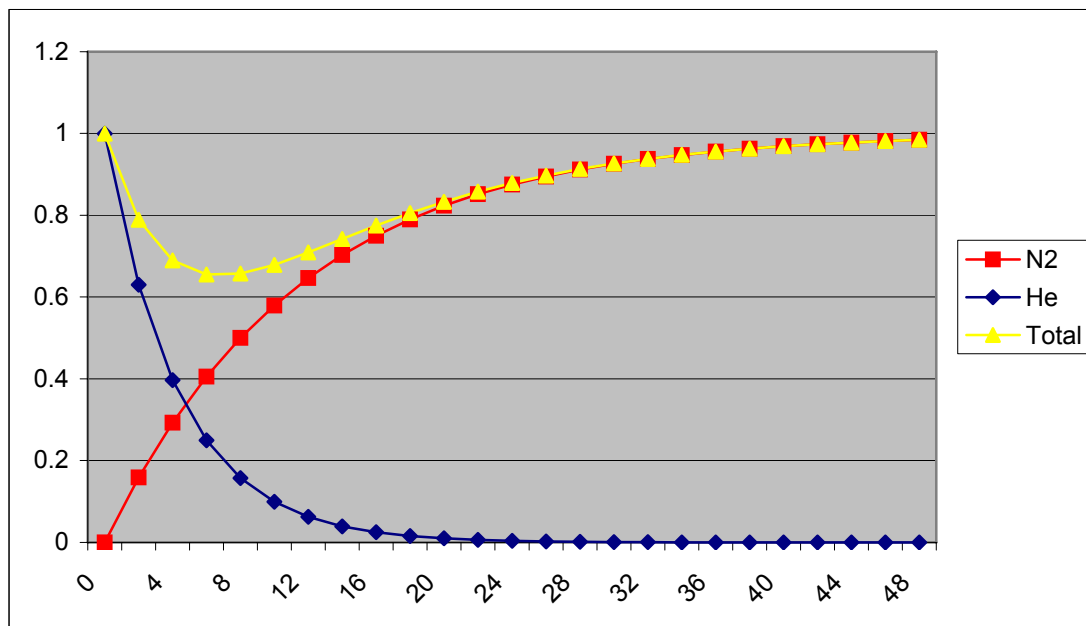
Plongeurs COMEX lors de l'opération Hydra VIII

5.12. La CDI (contre diffusion isobare)

5.12.1. Généralités

Lors d'une plongée aux mélanges, en plus des lois déjà assimilées comme la toxicité de l'oxygène, le pouvoir narcotique de l'azote et l'augmentation de la viscosité des gaz avec la profondeur, il va falloir prendre en compte de nouvelles règles applicables lors des changements de gaz respiratoires.

Au cours d'une plongée, il semble qu'on puisse passer sans risque d'un mélange riche en azote à un mélange riche en hélium, ceci est d'autant plus vrai que cette pratique s'effectue lors de la descente, donc ce changement s'accompagne d'une augmentation continue de la pression ambiante et provoque ainsi une « sous saturation » des gaz inertes qui va dans le sens de la sécurité. Cette pratique est courante et aucun compte rendu n'a jamais mentionné d'incident impliquant ce moment précis de la plongée.



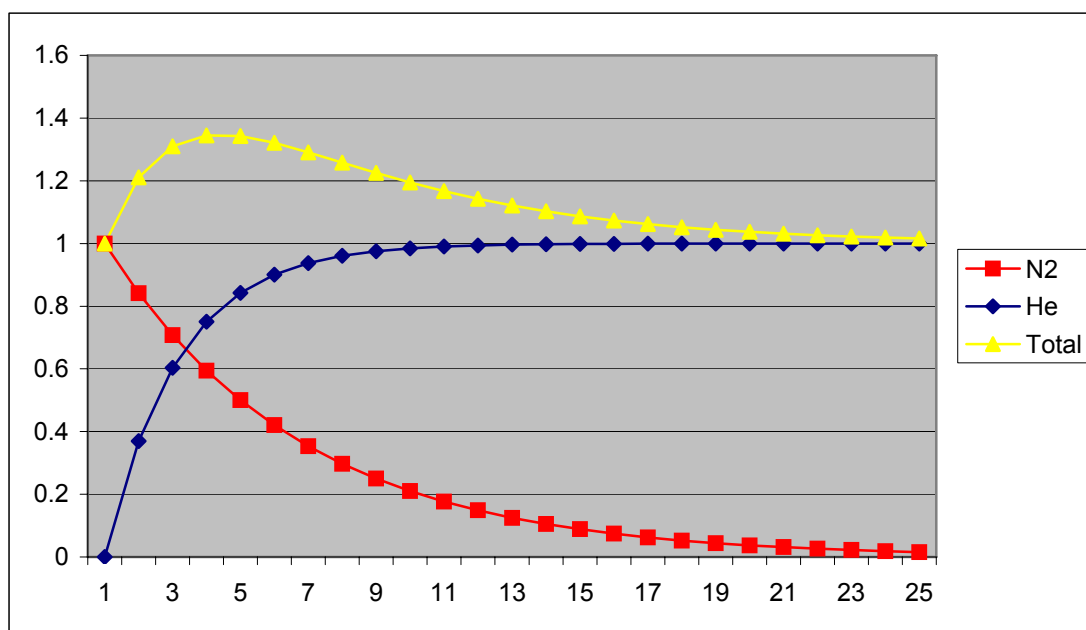
L'inverse ne se fait pas sans risque, le passage d'un mélange riche en hélium à un mélange riche en azote peut provoquer un dysfonctionnement grave au niveau de la membrane cellulaire des neurones. Ce phénomène connu sous le terme de CDI (Contre-Diffusion Isobare) est complexe car il dépend de la pression, de la nature des tissus, du sens des gaz et des propriétés de chaque gaz.

5.12.2. Mécanisme

Pour appréhender le mécanisme de ce phénomène, il est essentiel de comprendre la solubilité des gaz dans les tissus de l'organisme. Dans les tissus gras, l'hélium est deux fois plus soluble que l'oxygène, mais l'azote est deux fois plus soluble que l'hélium. Ceci signifie que les tissus de l'organisme se saturent à des degrés différents dépendant du gaz inerte respiré. La loi de Henry stipule que la solubilité d'un gaz dans un liquide est proportionnelle à la pression que le gaz exerce sur ce liquide. En d'autres termes, plus vous plongez profond, plus la quantité de gaz inerte dissoute dans votre organisme augmente. Mais rappelez-vous que les gaz sont solubles à des taux différents. Au fur et à mesure que vous remontez, les gaz dépassent la saturation et ils sont évacués du sang par les poumons. Cependant, si vous changez de gaz, et plus particulièrement si vous passez à un mélange riche en azote comme l'air, l'hélium va se dissoudre dans les tissus plus vite que l'azote ne s'élimine et ceci va créer une situation de sursaturation, d'où les bulles d'hélium apparaissant dans le sang. L'apparition de ces bulles peut survenir sans qu'il y ait de variation de profondeur, d'où le terme isobare qui signifie « même pression ».

Pour que ce phénomène ait lieu, il faut qu'on passe d'un gaz à diffusion rapide, à un gaz fortement soluble. C'est le cas qu'on rencontre lorsqu'on passe de l'Héliox ou du Trimix à l'air au cours de la remontée d'une plongée profonde ou lorsqu'on gonfle un vêtement sec avec un mélange à base d'hélium en respirant de l'air. Ce phénomène s'accompagne d'une formation importante de bulles et il est **d'autant plus rapide et violent que le changement de gaz aura été réalisé à grande profondeur.**

Gaz	Poids moléculaire	Solubilité (eau)	Diffusion
Hélium	4.003	0.0086	plus rapide
Azote	28.02	0.0130	moins rapide



5.12.3. Prévention

Afin de minimiser ce processus est de préférer le Trimix à l'Héliox, en effet l'azote contenu dans le mélange fond permettra de réduire l'écart entre le pourcentage d'azote de ce mélange et celui contenu dans le mélange de décompression. De plus, si il doit y avoir augmentation du pourcentage d'azote respiré, on cherchera à effectuer le changement à des pressions les plus faibles possibles (donc à des profondeurs plus proches de la surface). Le consensus actuel recommande de passer au Nitrox aux environs de – 30 mètres. Cette profondeur se situe à un point optimal où la PO_2 peut être tolérée en toute sécurité est suffisamment élevée pour réduire la PN_2 de notre mélange à un niveau relativement proche de la PN_2 du Trimix fond. De plus, en maximisant la PO_2 nous bénéficions du phénomène connu sous le nom de « fenêtre d'oxygène ». De façon simple, c'est le mécanisme par lequel l'oxygène dissout dans le sang est absorbé et métabolisé par nos cellules de préférence à celui présent sous forme combinée avec l'hémoglobine qui ne contribue absolument pas à la PO_2 . Aux pressions partielles élevées, c'est le pourcentage prédominant de l'oxygène inspiré.

5.12.4. Conclusion

- Durant la plongée, ne jamais utiliser le mélange fond pour gonfler la combinaison étanche, préférez l'utilisation d'air ou d'Argon qui plus est améliore le confort thermique
- Durant la remontée, ne laissez jamais votre pression partielle d'azote augmenter, remontez avec votre Trimix fond aussi près de la surface qu'il est possible de le faire en toute sécurité
- Durant la décompression, évitez de passer à l'air lors de la décompression, à la place, préférez l'utilisation du Nitrox ou de l'oxygène pur, il résultera de cette procédure un léger allongement du profil de décompression

6. Mélanges

6.1. Introduction

Un mélange respiratoire, c'est de l'oxygène et des gaz neutres de remplissage. En plongée Tech, il y a plusieurs mélanges, un pour le fond et un (voir plusieurs) pour la remontée. Que ce soit pour le fond ou pour la remontée, le choix des mélanges est un élément primordial pour calculer sa décompression et c'est le résultat de terrible compromis.

6.2. Les gaz neutres

6.2.1. Généralités

L'air que nous respirons est composé de 20.9% d'oxygène, 79.1% d'azote et 0.033% de dioxyde de carbone, plus quelques traces de gaz rares. Les pressions partielles de chacun de ces gaz évoluent différemment en fonction de la profondeur et atteignent des seuils de toxicité plus ou moins rapidement. En modifiant les pourcentages de ces gaz, on peut obtenir un seuil de toxicité plus bas. Ainsi, l'oxygène est toxique à partir d'une pression de 1.6 bar, atteinte à -66 m. Pour descendre plus profond il suffit donc de baisser le pourcentage d'oxygène. Cependant, la diminution du pourcentage d'oxygène impose une augmentation du pourcentage d'azote, et donc un risque de narcose à l'azote plus important, à moins d'introduire un 3^{ème} gaz.

6.2.2. Le choix des gaz neutres

Pour le fond, il faut un gaz de remplissage avec des atomes les plus légers possible. La densité et les résistances à l'écoulement entraînent le plongeur dans le cercle vicieux des modifications ventilatoires, de la rétention de dioxyde de carbone et de l'essoufflement. Si le gaz est diffusible (hélium), il sature et désature rapidement des tissus. S'il est soluble (azote), il se charge en quantité et devient difficile à éliminer. La solubilité dans les graisses et le pouvoir narcotique son liés. Mais que choisir comme gaz, alors ?

- **L'azote (N₂)**

Nous avons tous connu un jour ses effets. A un seuil de profondeur d'environ 4 bars (PN₂ de 3.16 bars) il représente la menace primaire pour les plongeurs profonds qui respirent des mélanges où il est le principal gaz inerte.

- **L'hydrogène (H₂)**

Plus facile à respirer car il est encore plus léger que l'hélium, il permet une respiration à des profondeurs supérieures à -450 m. Il agit en réduisant le SNHP, mais à des profondeurs supérieures à -150 m la narcose hydrogène agit comme un psychotrope ou hallucinogène d'une manière un peu similaire au LSD. En concentration avec un taux d'oxygène supérieure à 4% à 1 bar, l'hydrogène est hautement inflammable. De plus sa technologie reste l'exclusivité de la Comex et que peu de personnes en connaissent les secrets.

- **L'argon (Ar)**

Est abordable mais lourd et plus soluble et narcotique que l'azote.

- **Le néon (Ne)**

A été utilisé plusieurs fois aux USA avec succès, légèrement plus dense que l'hélium, il n'a pas d'effet narcotique. Son inconvénient, il est cher, plus lourd et plus soluble encore.

Tableau comparatif des gaz

	Azote (N ₂)	Hélium (HE)	Néon (NE)	Hydrogène (H ₂)	Argon (AR)
Poids moléculaire [g/mol]	28	4	20	2	39
Aisance respiratoire	Difficile en profondeur	Facile à toutes profondeurs	Relativement facile	Plus facile que l'hélium	Facile à toutes profondeurs
Potentiel narcotique	1	0.23	0.28	0.54	2.33
Narcose	Narcotique si P > à -40m	Non narcotique	Peu narcotique	Narcotique à grande profondeur	Très narcotique
Coût	Faible	Elevé	Très élevé	Faible	Faible
Utilisations	Plongée loisir	Plongée Tech sportive	--	Plongées à saturation	Inflation
Risques	--	SNHP	SNHP	Explosif si FO ₂ > 4%	--

L'hélium et l'hydrogène se comportent de façon satisfaisante comme gaz inerte. L'hydrogène sature et désature 3.7 fois plus vite que l'azote. L'argon est inacceptable car il est plus lourd et plus soluble que l'azote. Le néon est beaucoup plus léger mais légèrement plus soluble que l'hélium. L'hélium est moins narcotique sous pression et est moins soluble que l'azote, cependant sa diffusivité est plus grande. Sa solubilité est moindre que l'azote d'un facteur de 3 à 5 et sa diffusivité est plus grande d'un facteur de 2.65.

6.2.3. L'hélium

Finalement l'hélium n'est pas si mal, léger, il est facile à respirer mais crée des distorsions vocales et une plus grande perte calorifique par conduction. C'est un gaz extrêmement pénétrant qui peut endommager des tubes sous vide, les manomètres et les appareils électroniques (qui ne seraient pas affectés par l'azote). Le SNHP voir même des convulsions peuvent se produire lors de compression rapide jusqu'à -150 m ou lors de plongée à des profondeurs supérieures à -430 m. L'addition d'une petite quantité d'azote dans le mélange respiratoire facilite la décompression, améliore la distorsion vocale, réduit le SNHP et diminue la perte calorifique. Découvert en 1868, ce gaz tient son nom du grec Helios qui veut dire soleil, en particulier à cause de la forte densité de ce gaz dans la composition de cette étoile. L'hélium est un gaz rare, donc cher, car on ne le trouve qu'aux USA, en Pologne, en Russie et en Inde.

Tableau des avantages et inconvénients de l'hélium

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> → Non toxique → Inodore, indolore → Inerte → Non explosif → Effets narcotiques nuls → Faible densité permettant une résistance à la respiration quasi inexistante. → Diffusible (10 x plus que l'azote) → Peu soluble (2 x moins que l'azote) 	<ul style="list-style-type: none"> → Conduit la chaleur 5 fois plus vite que l'air → Peut provoquer lors de la descente des arthralgies et des raideurs des articulations → A partir de -150 mètres SNHP peut apparaître → Rare donc cher → Nécessite une décompression légèrement plus longue lors des plongées courtes et une décompression plus rapide lors des plongées longues, par rapport à l'air.

6.2.4. Utilisation de l'hélium

- **En 1945**, Zetterstrom est le premier à utiliser un mélange Trimix lors d'une plongée à -152 m. Il utilise des gaz de transfert incluant des mélanges hyperoxiques et hypoxiques à base d 'O₂/N₂ avant de switcher sur un 4/24/72. Il souffre d'hypoxie et de maladie de décompression (MDD) et meurt par la faute d'un des membres de l'équipe de surface qui hissa sa plate-forme trop tôt.
- **En 1959**, Hans Keller et Albert Bühlmann mettent au point une procédure de décompression sur un mélange HélioX, exécute une plongée à -222 m qui ne requiert que 45 minutes de décompression.
- **En 1962**, Keller et Small atteignent une profondeur de -305 m, mais les deux hommes perdent connaissance et Small ainsi qu'un plongeur de soutien, Whittaker, meurent par la faute d'un des membres de l'équipe de surface.
- **En 1965**, Workman publie des tables de décompression pour l'utilisation du Nitrox et de l'HélioX.
- **En 1981**, trois hommes de l'équipe d'Atlantis III battent le record du monde en caisson à -686 m au Duke Medical Center pour une étude du Dr Peter Bennett et découvrent que 10% d'azote ajouté à l'HélioX éliminent le SNHP.
- **En 1994** Jim Bowden bat le record du monde de plongée sur un mélange Trimix atteignant une profondeur de -282 m à Zacaton au Mexique son collègue Sheck Exley meure à cause d'une consommation excessive de gaz.
- **Nos jours**, utilisé couramment pour la pratique de la plongée Tech.

6.2.5. La décompression à l'hélium

Selon la loi de Graham, la vitesse de diffusion entre 2 gaz est inversement proportionnelle à la racine carrée de leur poids moléculaire, et de par sa solubilité, il se sature 2.65 fois plus vite que l'azote dans le corps humain. Les compartiments se désaturent également 2.65 fois plus rapidement. Par conséquent l'hélium nécessite un profil de décompression qui lui est propre, cela oblige à des paliers plus longs et plus profonds qu'un profil similaire à l'azote. Selon Bühlmann, l'être humain tolère 1.383 fois plus d'hélium que d'azote pour une pression ambiante donnée ainsi que les surpressions relatives d'hélium.

Rares sont les tables testées en détail pour le Trimix, et beaucoup d'entre elles sont basées sur les courts travaux du professeur Bühlmann, les résultats montrent pourtant que, selon le profil, la décompression au Trimix est généralement moins longue que celle à l'HélioX.

Le résultat d'une plongée Trimix est que l'hélium sort d'abord et l'azote ensuite. Il faut effectuer des paliers profonds pour commencer la décompression avec l'hélium mais nous pourrions presque la terminer avec des tables à l'air. Retenons seulement que l'hélium est plus facile à éliminer que l'azote (2 x moins soluble) et que plus le Trimix sera riche, et plus nous serons du côté de la sécurité. C'est pourquoi on planifie généralement des équivalences air entre -30 et -50 mètres. La clef de l'utilisation de l'hélium est une descente et une remontée lente, d'ailleurs, des paliers de décompression supplémentaires sont nécessaires avec tous les mélanges contenant de l'hélium.

6.3. Les mélanges de fond

6.3.1. Généralités

Le but d'un tel mélange est de respecter 3 éléments essentiels d'un point de vue physiologique :

- Garder un niveau d'oxygène efficace et sûr tout au long de la plongée
- Réduire ou éliminer les effets indésirables des gaz inertes (narcose, SNHP) et permettre leur élimination
- Réduire la densité du gaz respiré afin de minimiser le travail ventilatoire et éviter l'accumulation de dioxyde de carbone

Il existe un certain nombre de mélanges fond :

- L'Héliox est un mélange composé d'hélium et d'oxygène
- L'Héliair est un mélange composé d'hélium et d'air ou l'oxygène est < à 21%
- L'Hélitrox est un mélange composé d'hélium et de Nitrox ou l'oxygène est > à 21%
- Le Trimix est un mélange composé d'hélium, d'air et d'oxygène
- Le Triox est un mélange composé d'hélium avec une fraction d'oxygène est > à 21%
- L'Hydreliox est un mélange composé d'hydrogène, d'hélium et d'oxygène à < 4%
- L'Hydrox est un mélange composé d'hydrogène et d'oxygène à < 4%
- Le Néox est un mélange composé de néon et d'oxygène

En plongée Tech sportive, 2 types de mélanges fond sont utilisés, les ternaires et les binaires.

6.3.2. Les mélanges binaires

Ces mélanges ont été largement utilisés en plongée professionnelle, ce qui permet d'avoir du recul quand à leurs usages et aux procédures qui y sont liées. Grâce aux binaires, on supprime les effets de la narcose, mais ce type de mélange respiré est plus froid, plus cher et plus propice au SNHP. Etant un mélange binaire, cela simplifie la modélisation mathématique de la décompression (normal, il n'y a qu'un seul gaz à éliminer).

6.3.3. Les mélanges ternaires

Le Trimix est la combinaison de 3 gaz, comme son nom l'indique, ces 3 gaz sont l'oxygène, l'hélium et l'azote, le but de ce mélange est d'avoir la combinaison d'oxygène et d'azote la meilleure possible pour des plongées profondes, l'hélium permettant de minorer les concentrations d'oxygène et d'azote. Le Trimix est beaucoup plus répandu en plongée sportive qu'en plongée professionnelle, il possède exactement les inconvénients correspondant aux avantages de l'Héliox et inversement.

On pourrait imaginer une plongée technique tout à l'Héliox mais la tradition est au Trimix, d'abord pour des raisons de coûts, ensuite parce qu'un peu de narcose permet de mieux gérer l'angoisse du plongeur technique. On met donc un peu d'azote dans l'hélium comme on met de l'eau dans son vin, à regret. On contrôle ensuite la narcose résiduelle, on introduit la profondeur équivalente de narcose, un réglage qui permet de doser les effets narcotiques en fonction du taux d'hélium. Pour les mélanges destinés aux grandes profondeurs, le pourcentage d'oxygène nécessaire étant très bas, on peut directement mélanger l'hélium à l'air, sans avoir besoin de rajouter d'oxygène, le mélange ainsi obtenu s'appelle Héliair. Pour les autres mélanges Trimix, les bouteilles sont gonflées avec de l'oxygène, de l'hélium et un mélange d'air filtré.

6.3.4. Ternaires ou binaires

Le choix pour une utilisation sportive est simple si l'on considère d'emblée les problèmes liés à la physiologie, les binaires s'avèrent plus dangereux. Les risques pour l'oreille interne, liés au phénomène de contre diffusion isobare et les problèmes liés au froid, nous font préférer les ternaires. Un autre argument, de faible poids en regard de la sécurité, est le prix.

Tableau comparatif des binaires et ternaires

	Fabrication	Coût	Température	SNHP	Déco.	Expérience	Utilisation
Héliox	– compliquée	+ élevé	+ froid	+ propice	+ longue	+ longue	Professionnelle
Trimix	+ compliquée	– élevé	– froid	– propice	– longue	– longue	Sportive

6.3.5. Le choix du mélange fond

Pour choisir la teneur des différents gaz qui vont composer le mélange fond, on doit tenir compte de plusieurs facteurs. Attention également car certains Trimix ne sont pas respirables en surface, leur faible teneur en oxygène les rendant hypoxiques à faible pression ambiante.

- **La pression partielle d'oxygène**

Cette pression ne doit pas excéder 1.2 bars (recommandation CMAS). Chaque mélange de gaz utilisé dans la partie profonde de la plongée (Trimix) doit comporter une teneur en oxygène ne dépassant pas cette pression partielle au cours de la plongée. Les mélanges Nitrox, quant à eux, peuvent atteindre une pression partielle maximale de 1.6 bars en tenant compte de la valeur SNC (Système Nerveux Central) au cours de la décompression.

- **La profondeur narcotique équivalente (END)**

C'est la profondeur à laquelle on obtiendrait, lors d'une plongée au ternaire la même pression partielle d'azote qu'avec de l'air. Cette profondeur équivalente-narcose doit se situer hors de tout risque de narcose (END = 3.2 bars selon recommandation de la CMAS). Ainsi un Trimix 15/35 (15% d'oxygène, 35% d'Hélium, le reste d'azote) contient la même dose narcotique à -80 mètres que l'air à -30 mètres.

- **Fixer la profondeur maximale à atteindre**

Ainsi que le temps passé au fond, on pourra ainsi calculer la quantité de gaz à emporter, tenant compte d'une réserve de sécurité suffisante (minimum règle des tiers).

6.3.6. L'oxygène au fond

De l'oxygène il en faut un peu pour respirer mais pas trop pour ne pas s'exposer. On ne joue avec l'oxygène dans les Trimix comme on le fait avec les Nitrox. Cent millibars (0.1 bar) d'oxygène en plus abaisse la profondeur équivalente d'un mètre et on ne va pas risquer des convulsions pour si peu. Pour information, les professionnels utilisent une valeur de PO_2 de 0.4 bars pour les plongées à saturation.

Au contraire, le froid, les efforts et le stress réduisent la tolérance à la toxicité de l'oxygène et on aurait tendance à baisser la PO_2 pour s'offrir une marge de sécurité. Sur un chantier offshore au large de Bombay, un plongeur a convulsé avec 1.7 bar de PO_2 après 30 minutes de sortie de la tourelle.

Cependant, il ne faut pas oublier que le mélange fond est aussi le premier mélange de décompression et qu'on a particulièrement besoin d'oxygène dans la première phase de la remontée (à cause des micros noyaux gazeux).

Dés janvier 2006 pour la formation des plongeurs Trimix, la CMAS a limité la valeur de PO_2 à 1.2 bars pour le mélange fond. Actuellement, la plupart des plongeurs Tech utilisent une valeur de PO_2 comprise entre 1.2 et 1.4 bars.

6.3.7. Le mélange idéal

Tous les mélanges possibles peuvent être calculés pour obtenir le bon Trimix à respirer, en fonction de la profondeur et de la durée de la plongée. Il faut un Trimix qui optimise à la fois les effets de l'oxygène et ceux de l'azote. Comme il a déjà été dit, la plupart des plongeurs Trimix utiliseront une pression partielle d'oxygène de 1.2 à 1.4 bars et une profondeur équivalente narcotique située entre -30 et -50 mètres.

Tout plongeur Tech doit être capable de calculer son mélange fond, en fonction de ses propres capacités, cela implique donc une bonne connaissance de ses compétences et de sa condition physique.

6.3.8. Calcul du mélange idéal

Quel sera le mélange Trimix optimal pour une plongée effectuée à -90 mètres ?

- **Rappel pour la limite des gaz**

Pour l'oxygène $\Rightarrow PO_2$ max au fond = 1.2 bars (limite CMAS)

Pour l'azote $\Rightarrow PN_2$ max au fond = 3.2 bars (limite CMAS)

- **Rappel pour Dalton**

$$P_{\text{gaz}} = P \cdot F_{\text{gaz}}$$

$$P = P_{\text{gaz}} / F_{\text{gaz}}$$

$$F_{\text{gaz}} = P_{\text{gaz}} / P$$

$$FO_2 = PO_2 / P \Rightarrow 1.2 / 10 = 0.12 \text{ soit } \mathbf{12 \% \text{ d'oxygène}}$$

$$FN_2 = PN_2 / P \Rightarrow 3.2 / 10 = 0.32 \text{ soit } \mathbf{32 \% \text{ d'azote}}$$

$$FHe = F_{\text{total}} - (FO_2 + FN_2) \Rightarrow 1 - (0.12 + 0.32) = 0.56 \text{ soit } \mathbf{56 \% \text{ d'hélium}}$$

- **Résultat**

Le mélange Trimix pour cette plongée à -90 mètres sera composé de 12 % d'oxygène, 56 % d'hélium et 32 % d'azote, **soit un Trimix 12/56.**

6.4. Les mélanges de décompression

6.4.1. Généralités

Pour simplifier un mélange de décompression c'est un mélange avec un gaz neutre et de l'oxygène, à prendre au bon moment et au bon endroit durant la remontée. C'est déjà le plan du raisonnement.

6.4.2. Le gaz neutre

Pour commencer, il faut choisir le gaz neutre du mélange fond car il conditionne la suite. Entre l'hélium et l'azote, le choix est pourtant facile. L'azote est soluble et peu diffusible, il s'élimine difficilement en décompression. Il a même tendance à faire de grosses bulles, responsables des douleurs articulaires en fin de décompression. L'hélium est peu soluble et très diffusible, il s'élimine rapidement. Le seul ennui est qu'il a tendance à faire des petites bulles et cause de préférence des accidents vestibulaires, surtout dans les plongées de courte durée avec une longue remontée au premier palier. Si ce n'est le coût et la température, nous ne plongerions qu'à l'Héliox. Les plus sages et les mieux nantis d'entre nous deviendront des plongeurs recycleurs et rempliront leur bouteille de 3 litres de diluant à l'Héliox.

Constatation des plongeurs recycleurs à circuit fermé « quand je gère la déco avec un VR3 avec un mélange Héliox, je sors plus lentement qu'un plongeur à l'air ! ». Désolé si la préhistoire est si longue. Sachez qu'un VR3 implémente de base un sage modèle de Bühlmann. (Depuis 12 mois, il existe une version permettant de choisir le modèle de décompression, Bühlmann ou VPM). Ce modèle (Bühlmann), malgré tout le respect qu'on lui doit, n'a jamais fait dans sa vie qu'un jeu de tables à l'air (très réussi), quelques essais avec l'Héliox (catastrophiques) et jamais rien avec le Trimix. Sa vision de l'hélium est qu'il faut s'en méfier. Pour les autres concepteurs de tables des années 70, l'augmentation de la profondeur entraînait des difficultés qui les obligeaient à prendre des marges de sécurité énormes, qui reportaient des retards importants sur les tables à basses profondeurs. Toute notre expérience en tables hélium unitaire est empreinte de mauvais souvenirs. Pourtant quand les choses sont bien faites, c'est le contraire qui apparaît. En plongée commerciale, la vitesse de décompression de saturation à l'héliox est 2 x plus rapide que celle au Nitrox et avec de bien meilleurs résultats. Résultats largement validés par la base de données Comex. Pour résumé, l'hélium est le gaz dont nous avons besoin. Les profils ne sont pas les mêmes, c'est vrai parce les bulles n'ont pas la même taille, et il faut des paliers profonds avec l'hélium. Encore 50 ans de recherches et nous aurons les tables que nous méritons. Dans cette ère lointaine et idéale, les tables Héliox seront plus courtes que les tables à l'air.

6.4.3. Changement de gaz neutre

Si on descend avec de l'hélium au fond, on peut se poser la question de le quitter en décompression. En théorie, il suffit de passer de l'hélium à l'azote pour augmenter le gradient de gaz et accélérer les échanges. C'est la raison pour laquelle les plongeurs Tech passent du Trimix au Nitrox. C'est vrai si on raisonne en quantité de gaz dissous, pur résultat de la physique des échanges gazeux. Bühlmann a testé de multiples gaz de déco lors des plongées profondes de Hans Keller. Le plongeur passait de l'Héliox au Trimix, puis à l'air et au Nitrox, pour finir à l'Argox et à l'oxygène. Mais à partir d'un certain moment, les charges des différents gaz neutres deviennent difficiles à suivre. Dans une décompression Hélio ou Trimix, l'air et les Nitrox en excès peuvent transformer la remontée en une décompression azote.

Si on raisonne en termes de bulles, c'est plus discutable. Intervient alors des phénomènes de contre-diffusion qui font que les bulles se vident plus difficilement que les tissus. C'est un domaine obscur de l'hyperbarie qu'il ne vaut mieux pas aborder ici, surtout que le résultat peut se résumer à « tant qu'il n'y a pas trop d'hélium ni d'azote, il n'y a pas trop de soucis ». Pas trop d'azote signifie une PN_2 maxi de 3.2 bars, cela tombe bien car c'est déjà le maximum que vous acceptez de respirer à cause de la narcose (END = 30 mètres). En somme, si vous respectez une END de -30 mètres, vous évitez aussi les problèmes de CDI.

Fait dans les années 70, la Comex utilisait des tables tourelles à -120m avec un mélange fond Hélio. Pendant la décompression, les plongeurs étaient transférés dans un caisson rempli d'air entre 50m et 40m. A la suite d'accrochages répétés, il fut décidé de remplir les caissons à l'Héliox. L'amélioration de la sécurité fut spectaculaire, avec les mêmes tables. Pour résumer, le meilleur mélange de décompression est encore l'héliox. On peut concéder d'utiliser des Nitrox, mais pas avec trop d'azote, soit une END de 30m. Ne jamais remonter une pression partielle d'azote en décompression, utiliser de préférence des Trimix intermédiaires.

6.4.4. L'oxygène en décompression

L'oxygène en plongée a des effets, tantôt bénéfiques (gradient, fenêtre oxygène), tantôt nocifs (hypoxie, vasoconstriction, hyperoxie) il faut jouer serré.

Côté négatif, la toxicité de l'oxygène est le facteur limitant, la barre est placée à 1.6 bars. Pourtant, à partir d'un certain engagement, on mettra l'oxygène en décompression au taquet. Mieux vaut améliorer ses techniques de plongée et gérer un mélange à PO_2 de 1.6 bars que de s'exposer aux bulles de la décompression avec une protection oxygène réduite.

Côté positif, cela se joue entre la tension de gaz et la pression partielle. Ces grandeurs sont liées par la loi de Henry mais les conséquences ne sont pas les mêmes selon qu'on s'intéresse à l'une ou l'autre. Si on raisonne en termes de physiologie, on raisonne en quantité d'oxygène. Le scénario est le suivant. L'oxygène inspiré passe facilement de l'alvéole pulmonaire au sang artériel. Il s'y dissout et se combine à l'hémoglobine. L'hémoglobine transporte efficacement l'oxygène si bien que la quantité dissoute est comparativement très faible. Dans 100ml de sang, il y a normalement pour 20ml d'oxygène combiné et seulement 0.3 ml d'oxygène dissous. Ainsi, respirer de l'oxygène à pression partielle élevée n'augmente pas de façon significative la quantité d'oxygène tissulaire. L'oxygène remplace seulement l'azote au niveau du poumon, ce qui est très utile. La différence entre tension de gaz dissous et pression de gaz inspiré augmente. Le dégazage s'accélère et la décompression est plus rapide.

Si raisonne en termes de physique de la bulle, on raisonne en termes de pressions. Les pressions régissent la stabilité de la bulle, les différences de pressions règlent les échanges à travers sa surface. Mais la biologie nous fait cadeau d'une sous-saturation tissulaire permanente. Les liquides sont incompressibles. La somme des pressions de chaque gaz n'est pas égale à la pression ambiante et on peut trouver des sur-saturation et sous-saturation dans les milieux vivants. Si on se place au niveau de la cellule, l'oxygène y est transformé en dioxyde de carbone. En terme moléculaire, c'est équilibré (à peu près un oxygène pour un dioxyde de carbone). En termes de pression, c'est très déséquilibré. La chute de pression liée à la consommation d'oxygène est bien plus élevée que l'augmentation de pression liée à la production de dioxyde de carbone. La raison est que le dioxyde de carbone est 20x plus soluble que l'oxygène. La conséquence est une sous-saturation normale de 54 mmHg dans le sang veineux que l'on appelle la « fenêtre oxygène ».

En décompression, en respirant l'oxygène à PP élevée, on augmente la sous-saturation tissulaire. On dit qu'on « ouvre » la fenêtre oxygène pour mieux s'opposer à la formation et à la croissance des bulles. Rajouter de l'oxygène est une vieille recette pour sécuriser les tables de décompression. La mise en œuvre dépend de la méthode de plongée. Les tables MN90 proposent des tables air avec sortie à l'oxygène pur à -6m. Le nombre de mélanges de déco s'il existe un maximum évident de PO_2 , il existe aussi une limite inférieure en dessous de laquelle il ne fait pas descendre. On perd alors sur les 2 tableaux, échanges gazeux et croissance de bulle. Même avec des vitesses de remontée lente le résultat est hasardeux. Des études de décompression en saturation avec 400 mbar de PO_2 ont été conduites récemment en Norvège. Une PO_2 égale à 500 mbar semble un minimum avec des vitesses très lentes. C'est la raison pour laquelle on enchaîne les mélanges de déco en plongée en circuit ouvert. Chaque nouveau mélange permet de relever la PO_2 . L'expérience montre qu'il ne faut pas descendre en dessous de 800 mbar de PO_2 pour des décompressions sévères. L'idéal en décompression est la PO_2 constante, c'est ainsi que sont conduite les décompressions dans les caissons en plongée commerciale. Si vous n'avez pas votre classe III (brevet scaphandrier professionnel à l'INPP), une PO_2 constante de 1.1 à 1.3 bars avec un recycleur à circuit fermé (pub) ressemble à ce que vous pouvez faire de mieux en attendant.

Plongeur recycleur Inspiration sur le Rubis



6.4.5. Comparatif des mélanges de décompression

Comparons 8 mélanges pour une plongée au Trimix 14/46 de 18 minutes à 90 mètres, la décompression a été calculée avec le logiciel V-Planner, les paramètres sont : Conservatisme = niveau + 4 / Altitude = 700m. Algorithme = VPM / PO₂ max jusqu'à 45% = 1.1 bar / PO₂ max de 45% à 99% = 1.55 bar / Eau = douce

Tableau comparatif des durées de décompression

GAZ	Air	O ₂ pur	EAN 60	Air + O ₂ pur	Air + EAN 60	EAN 32 + EAN 80	EAN 32 + O ₂ pur	TMX + EAN 60
Décompression mélange fond = [min]	8	51	45	8	8	25	25	6
Décompression premier gaz = [min]	72	28	47	38	17	20	29	24
Décompression second gaz = [min]	--	--	--	20	39	32	26	39
Décompression totale = [min]	80	79	92	66	64	77	80	69
Prof. changement gaz = [mètres]	42	6	15	42 + 6	42 + 15	24 + 9	24 + 6	45 + 15
Volume du mélange fond = [litres]	4'810	9'496	7'779	4'807	4'807	6'323	6'323	4'579
Volume du premier gaz = [litres]	3'168	804	1'617	2'193	1'271	1'096	1'445	1'756
Volume du premier gaz = [litres]	--	--	--	575	1'349	991	667	1'349
Volume total de gaz = [litres]	7'978	10'300	9'396	7'575	7'427	8'410	8'435	7'684
SNC = [%]	15.7	31.3	29.3	27.8	28.4	32.9	34.3	29

Comparaison des mélanges de décompression

GAZ	Air	O ₂ pur	EAN 60	Air + O ₂ pur	Air + EAN 60	EAN 32 + EAN 80	EAN 32 + O ₂ pur	TMX + EAN 60
Durée décompression	☺	☺	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Volume des gaz	☺	☹	☺	☺	☺	☹	☹	☺
Optimisation des mélanges	☺	☹	☺	☹	☺	☺	☺	☺
Facilité de fabrication	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☹
Coûts de fabrication	☺	☹	☺	☹	☺	☺	☺	☹
Risque contre-diffusion	☹	☺	☺	☹	☹	☺	☺	☺
Risque hyperoxie	☺	☹	☺	☹	☺	☺	☹	☺

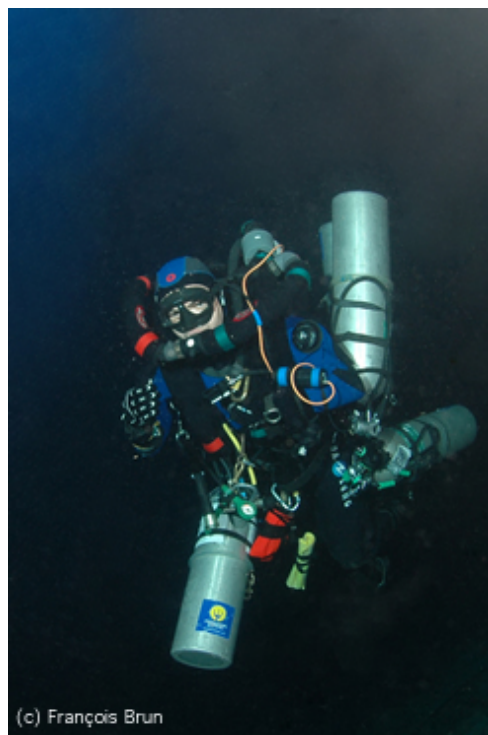
6.4.6. Conclusion

Il n'existe malheureusement pas LE meilleur mélange de décompression, là encore le choix est le résultat de compromis. Ce choix dépendra de nombreux facteurs comme, le profil de plongée, le logiciel de décompression, le type du mélange fond, la profondeur, les coûts, la fabrication des mélanges.

Une formule existe afin de déterminer le nombre de mélanges de déco à utiliser, en fonction de la durée de séjour, de la fraction d'hélium dans le mélange fond et de la pression absolue maximale. Si le résultat est supérieur à un coefficient de 120, il faut utiliser un 3^{ème} gaz de décompression. Une autre solution afin de se simplifier l'existence est de passer sur recycleur à circuit fermé (CCR). Par conséquent et pour résumé :

- Préférer l'Héliox comme mélange fond et début de la décompression
- Dans un monde réel fait de compromis et de renoncements, on utilise des Trimix, des Nitrox et de l'oxygène pur
- Plonger avec une END maximale de -30m (recommandation CMAS), même pour les mélanges de décompression
- Ne relevez jamais la PN_2 en déco si possible
- Mettez l'oxygène au taquet, compensez le risque de technique et l'organisation (station dérivante, plongeur d'accompagnement, Air break, etc...)
- Ne dépassez pas 1.6 bars de PO_2 et descendez pas en dessous de 0.8 bar de PO_2
- Utilisez autant de mélanges de décompression qu'il le faut
- Utilisez des Trimix intermédiaires à la place de l'air
- Utilisez des mélanges standardisés, laissez votre cerveau reptilien régler les changements de mélanges
- **La meilleure décompression est celle à PO_2 constante (recycleur à circuit fermé) !!!**

Pascal Bernabé avec son recycleur Voyager



6.5. Le gaz d'inflation

6.5.1. Généralités

Les mélanges contenant de l'hélium ne peuvent pas être utilisés pour l'inflation à cause du phénomène de contre-diffusion et aux problèmes liés à leurs conductivités thermiques importantes. Seuls, 2 gaz sont acceptables pour l'inflation, l'argon et le dioxyde de carbone. L'argon a un faible index de diffusion et une grande solubilité dans les tissus, il y a donc peu de risque de contre-diffusion dans un profil de plongée typique. De plus, il améliore l'isolation de 50% par rapport à l'air. Certains plongeurs utilisent l'argon de soudure industrielle (disponibilité et coûts) apparemment sans poser de problème. Cependant, l'argon de soudure contient approximativement 25% de dioxyde de carbone. Attention, car si le dioxyde de carbone est exposé à l'humidité provenant de la transpiration, il provoque des irritations et des démangeaisons.

Tableau comparatif des gaz

	Azote	Hélium	Oxygène	Air	Argon	CO ₂
Chaleur spécifique (Cp) [1 cal/g*°C]	0.25	1.24	0.22	0.24	0.12	0.2
Conductivité thermique [cal/sec*cm*°C]	6.4	36.9	6.6	6.42	4.4	--
Conductivité thermique en % par rapport à l'air	--	586	--	100	68.2	62.4
Pouvoir isolant	Bon	Très faible	Bon	Bon	Très bon	Très bon

Une calorie est la quantité de chaleur requise pour monter la température de 1 gramme d'eau pure de 1°C. Il faut 243.3 calories pour monter la température de 100 grammes d'air de 10 °C et 1204 calories pour l'hélium, soit environ 5 fois plus de calories ou d'énergie calorifique (Cp air \Rightarrow 0.24 * 100 * 10 = 243.3 cal).

Malgré que la masse d'un mélange d'hélium entrant et sortant du système respiratoire soit inférieure à celle de l'air, le volume reste le même. Et c'est précisément le point important lorsque l'on mesure les pertes calorifique via l'appareil respiratoire. Le poids moléculaire (M_{mix}) d'un mélange gazeux est la somme des poids moléculaires individuels (M_i), multiplié par la fraction de leur volume (X_i).

$$M_{mix} = M_i * X_i \text{ ou } M_{mix} = (M_1 * X_1) + (M_2 * X_2) + \dots (M_n * X_n)$$

6.5.2. L'inflation à l'air

Comparées à la conductivité de l'air ou du Nitrox comme référence, le dioxyde de carbone et l'argon ont une conductivité thermique plus faible, alors que celle de l'hydrogène et de l'hélium est plus élevée. L'hélium pur conduit la chaleur environ 6 fois plus rapidement que l'air. L'argon conduit la chaleur à 68.2 % de la vitesse de l'air. Alors à l'exception d'une plongée dans une eau très froide avec un mélange à base d'hélium, l'air est une alternative acceptable par rapport à l'argon pour l'inflation d'une combinaison sèche.

- Le métabolisme de base brûle environ 82 watts
- Nager en immersion à 0.5 noeud brûle 270.7 watts
- Nager à 0.85 noeud, brûle 474.1 watts
- Nager à 1 noeud, brûle 609.4 watts

6.5.3. Manipulation et utilisation

L'argon doit être manipulé avec soins lors de la proximité d'équipement de plongée ou de réanimation. Le Dr. Hamilton suggère d'ajouter un peu d'oxygène médical à l'argon pour atteindre une FO_2 d'au moins 0.10 de façon à ce qu'il puisse maintenir la vie. L'intention est de prévenir en cas de respiration accidentelle une hypoxie des tissus et une issue fatale lors de plongées typiques d'entraînement Trimix. L'Argox ne devrait être respiré qu'en dernier recours pour sauver sa vie lorsque toutes les autres options ont échouées. Gardez à l'esprit que l'argon est hautement soluble et de ce fait beaucoup plus narcotique que l'oxygène et l'azote. Une fois absorbé son élimination est plus difficile.

6.5.4. Précaution et secours

Il est recommandé d'installer une valve de surpression sur un des ports MP du premier étage comme précaution en cas de rupture du siège haute pression dont l'effet serait d'arracher le flexible d'inflation de votre bouteille d'argon. Vous pouvez aussi monter une buse d'air ou un deuxième étage qui tous deux lâcheront la surpression liée à la rupture du siège HP. Si vous tombez en panne d'argon ou rencontrez un mauvais fonctionnement du détendeur, débranchez simplement le flexible MP d'argon et reconnectez l'inflateur de secours pour gonfler votre combinaison sèche. Si vous utilisez votre combinaison pour établir votre flottabilité et maintenir une isolation thermique, gonflez d'abord votre wing pour établir votre flottabilité et après seulement échangez les inflateurs si vous êtes équipé pour et terminez votre plongée. Purgez votre combinaison de l'air ambiant et remplissez-la en surface à partir d'une bouteille haute capacité de façon à économiser votre réserve de plongée.

6.6. Fabrication des mélanges

6.6.1. Généralités

Un mélange de gaz prédéterminé est obtenu par le mélange de gaz purs ou de mélanges gazeux. Plusieurs méthodes existent pour la préparation des Nitrox et Trimix. Le choix d'une méthode par rapport à une autre dépend de plusieurs facteurs (coûts, espace disponible, stabilité de l'espace de remplissage, etc...).

La fabrication des mélanges gazeux peut être dangereuse et nécessite une bonne connaissance des mélanges, ainsi qu'une compétence acquise et reconnue. Une personne est reconnue apte à effectuer des mélanges après avoir effectué une formation adéquate dans une structure agréée. Nulle autre personne qu'un technicien ne doit préparer des mélanges. Cette règle est impérative car toute erreur de calcul ou de manipulation peut avoir des conséquences graves. La tolérance de fabrication pour l'utilisation des tables est de 1% pour l'oxygène et de 5% pour l'azote et l'hélium. Par ailleurs, il faut tenir compte de 2 dangers majeurs au cours de la fabrication artisanale des mélanges :

- La difficulté de manipuler l'oxygène avec l'impossibilité de faire transiter par un compresseur habituel un mélange contenant plus de 32% d'oxygène et la nécessité d'avoir des bouteilles dégraissées si on veut transférer de l'oxygène comprimé d'une bouteille dans une autre (risque d'explosion au contact de graisse)
- La nécessité de laisser les mélanges s'homogénéiser 12 heures pour les Nitrox et 24 heures pour les Trimix avant leur utilisation

6.6.2. Compressibilité des gaz

La compressibilité des gaz varie suivant plusieurs facteurs, qui sont la densité moléculaire du gaz, la température et la pression à laquelle le gaz est comprimé. La plupart des méthodes de calcul sont basées sur des gaz parfaits, sans tenir compte de leurs différences, ce qui voudrait dire que tous les gaz auraient alors la même densité moléculaire. Dans ce cas, à température constante, la compression de n'importe quel gaz serait aisément calculable et l'on utiliserait les mêmes données pour tous les gaz. En réalité, si l'oxygène et l'azote ont des densités moléculaires voisines, l'hélium est bien moins dense que les autres. Tout calcul de compression doit donc tenir compte non seulement des données habituelles, mais aussi des variations de compressibilité dues à la densité moléculaire du gaz. L'hélium, le moins dense des 3 gaz employés dans la fabrication du Trimix, est aussi le plus compressible à haute pression. Plus la pression est élevée, plus grande sera la variation du pourcentage d'hélium dans le mélange. Par exemple, si l'on comprime et l'on mélange ensemble, à la même température, 100 bars d'oxygène et 100 bars d'hélium, le mélange obtenu contiendrait 54% d'oxygène et 46% d'hélium. Ce phénomène est à prendre en compte lors de la fabrication du Trimix, car ce résultat va à l'inverse de ce que l'on veut obtenir, à savoir un taux d'oxygène plus bas et un taux d'hélium plus élevé. Il faut cependant souligner que l'emploi d'une méthode « parfaite » ne débouche pas forcément sur un résultat parfait, car il faut aussi tenir compte des légères variations de compressibilité dues à la présence d'autres gaz, des variations de température, inévitables avec nos méthodes de gonflage artisanales, mais aussi du manque de précision des instruments tels que manomètres et analyseurs.

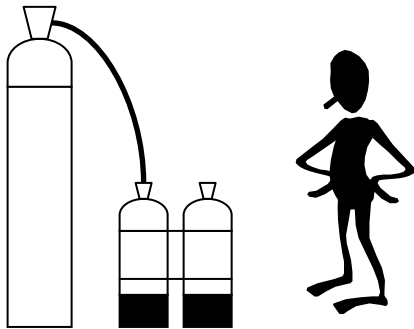
6.6.3. La fabrication par pression partielle

Cette méthode découle directement de la loi de Dalton sur les pressions partielles. Elle est de loin la plus couramment utilisée dans l'industrie puisqu'elle requiert un investissement initial minimal et quelle est relativement simple d'application. Un autre avantage de cette méthode est que l'équipement nécessaire se transporte facilement, permettant ainsi les expéditions dans des régions éloignées.

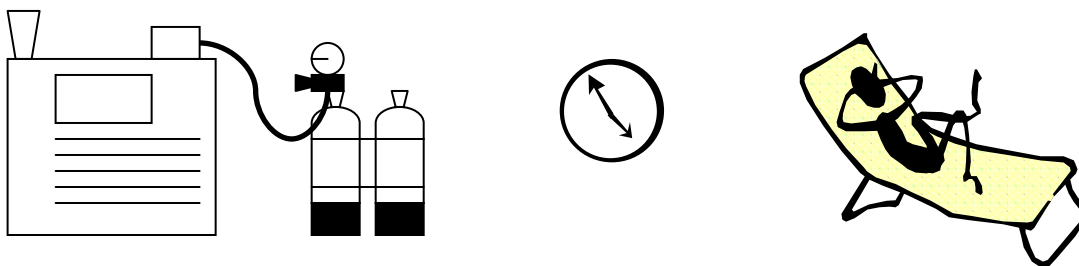
Puisque cette méthode implique l'utilisation d'oxygène pur ou de mélanges riches en oxygène, supérieurs à 40%, le système doit répondre aux critères d'entretien des systèmes d'oxygène et l'équipement utilisé doit être compatible oxygène. Bien que les calculs de mélange par pressions partielles soient simples, la justesse du mélange dépend du soin apporté par le mélangeur à son travail. La température et la compressibilité variable des gaz imposent de nombreux ajustements où l'expérience de ce dernier se révèle être un atout précieux. Les bouteilles de plongée contenant du Trimix ne doivent pas obligatoirement être dégraissées, comme c'est le cas pour la préparation du Nitrox. Si le Trimix est préparé sur la base d'un mélange Nitrox à la teneur inférieure à 40% et d'hélium, ou bien dans la fabrication d'un Héliair, le matériel n'est jamais mise ne présence d'oxygène pur ou en teneur élevée, il n'est donc pas utile de le dégraisser. Par contre, le dégraissage devient obligatoire dans le cas d'utilisation ou d'adjonction d'oxygène pur.

- **Gonflage des Nitrox**

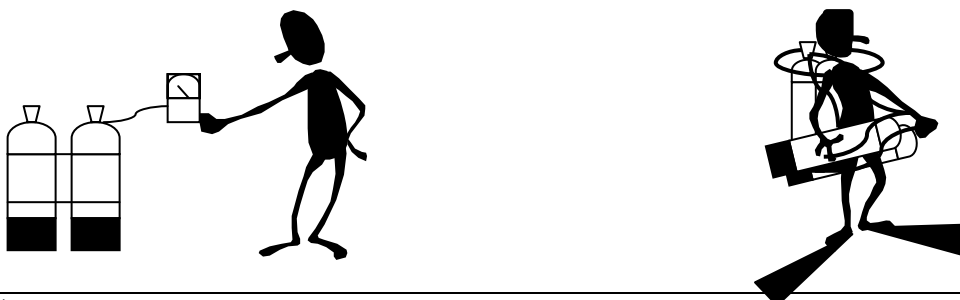
1. Remplissage de l'oxygène



2. Ajout d'air purifié (clean air) puis laisser le mélange s'homogénéiser 12 heures

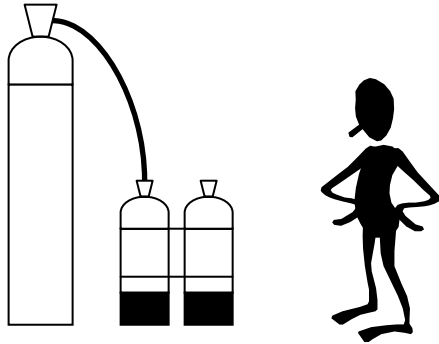


3. Analyse des gaz et il ne reste plus qu'à consommer (comme toute bonne chose avec modération)

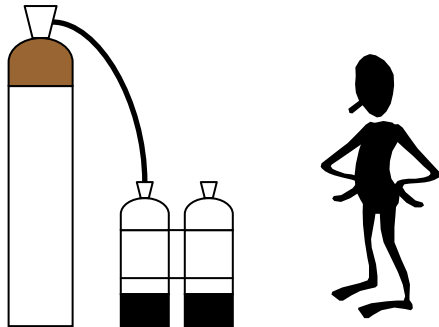


- **Gonflage des Trimix**

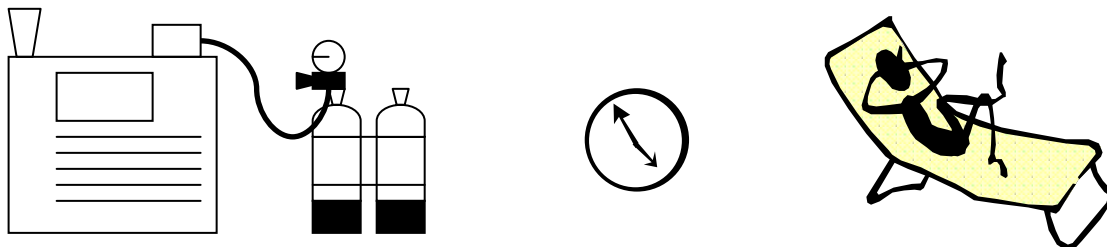
1. Remplissage de l'oxygène



2. Remplissage de l'Hélium



3. Ajout d'air purifié (clean air) puis laisser le mélange s'homogénéiser 24 heures



4. Analyse des gaz et il ne reste plus qu'à consommer (comme toute bonne chose avec modération)



6.6.4. Calculs pour la fabrication des Nitrox

Pour fabriquer des Nitrox avec la méthode des pressions partielles on utilise 2 formules :

- **Sans recyclage**

$$PO_2 = P2 * (F2 - 0.21) / 0.79$$

- **Avec recyclage**

$$PO_2 = P2 * (F2 - 0.21) / 0.79 - P1 * (F1 - 0.21) / 0.79$$

PO₂ : pression d'oxygène à ajouter (si ajout d'air)

P1 : pression résiduelle dans le cylindre

P2 : pression requise dans le mélange final

F1 : fraction d'oxygène du gaz résiduel dans le cylindre

F2 : fraction d'oxygène désirée dans le mélange final

Ces formules sont valables pour autant que le mélange soit complété avec de l'air, si l'on complète le mélange avec un Nitrox 32, les valeurs seront de 0.32 respectivement 0.68.

- **Exemple de calcul sans recyclage :**

On désire un mélange Nitrox 40% dans un bloc à 200 bars. Calculer la valeur de la PO₂ à introduire dans le bloc ?

- **Solution :**

$$PO_2 = P2 * (F2 - 0.21) / 0.79 \Rightarrow 200 * (0.4 - 0.21) / 0.79 = \mathbf{48 \text{ bars}}$$

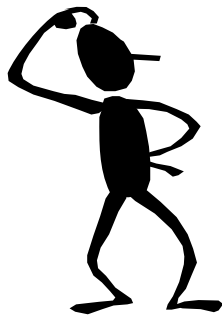
- **Exemple de calcul avec recyclage**

Un bloc a un mélange Nitrox 32% avec 80 bars, on désire un mélange Nitrox 60% à 200 bars. Calculer la valeur de la PO₂ à introduire dans le bloc ?

- **Solution :**

$$PO_2 = P2 * (F2 - 0.21) / 0.79 - P1 * (F1 - 0.21) / 0.79 \Rightarrow$$

$$PO_2 = 200 * (0.6 - 0.21) / 0.79 - 80 * (0.32 - 0.21) / 0.79 = \mathbf{87 \text{ bars}}$$



6.6.5. Calculs pour la fabrication des Trimix

Pour fabriquer des Trimix avec la méthode des pressions partielles on utilise 2 formules :

$$PH = P2 * FH2 - P1 * FH1$$

$$PO_2 = P2 * FO2 - P1 * FO1 - \frac{[0.21 * (P2 * FN2) - (P1 * FN1)]}{0.79}$$

- PH : pression d'hélium à ajouter
- PO₂ : pression d'oxygène à ajouter
- P2 : pression requise dans le mélange final
- P1 : pression résiduelle dans le cylindre
- FH2 : fraction d'hélium désirée dans le mélange désiré
- FH1 : fraction d'hélium du gaz résiduel dans le cylindre
- FO2 : fraction d'oxygène désirée dans le mélange désiré
- FO1 : fraction d'oxygène du gaz résiduel dans le cylindre
- FN2 : fraction d'azote désirée dans le mélange désiré
- FN1 : fraction d'azote du gaz résiduel dans le cylindre

Ces formules sont valables pour autant que le mélange soit complété avec de l'air, si l'on complète le mélange avec un Nitrox 32, les valeurs seront de 0.32 respectivement 0.68.

- **Exemple de calcul sans recyclage :**

On désire un Trimix 15/50 dans un scaphandre à 230 bars. Calculer la valeur de la pression d'hélium et d'oxygène à ajouter ?

- **Solution :**

$$PH = P2 * FH2 - P1 * FH1 \Rightarrow 230 * 0.5 - 0 * 0 = \mathbf{115 \text{ bars}}$$

$$PO_2 = P2 * FO2 - \frac{0.21 * (P2 * FN2)}{0.79} \Rightarrow PO_2 = 230 * 0.15 - \frac{0.21 * (230 * 0.35)}{0.79} \cong \mathbf{13 \text{ bars}}$$

Le reste du mélange sera complété par de l'air (ou un Nitrox 32) jusqu'à la pression finale désirée.

- **Exemple de calcul avec recyclage :**

On désire un Trimix 15/40 dans un scaphandre à 230 bars, alors qu'il nous reste un Trimix 12/60 à 80 bars. Calculer les valeurs de la pression d'hélium et d'oxygène à ajouter ?

- **Solution :**

$$PH = P2 * FH2 - P1 * FH1 \Rightarrow 230 * 0.4 - 80 * 0.6 = \mathbf{44 \text{ bars}}$$

$$PO_2 = P2 * FO2 - P1 * FO1 - \frac{[0.21 * (P2 * FN2) - (P1 * FN1)]}{0.79} \Rightarrow$$

$$PO_2 = 230 * 0.15 - 80 * 0.12 - \frac{[0.21 * (230 * 0.45) - (80 * 0.28)]}{0.79} \cong \mathbf{3.5 \text{ bars}}$$

Le reste du mélange sera complété par de l'air (ou un Nitrox 32) jusqu'à la pression finale désirée.

⚠ Attention, ces calculs ne tiennent pas compte des variations de compressibilité dues à la densité moléculaire des différents gaz et de la température lors de la fabrication.

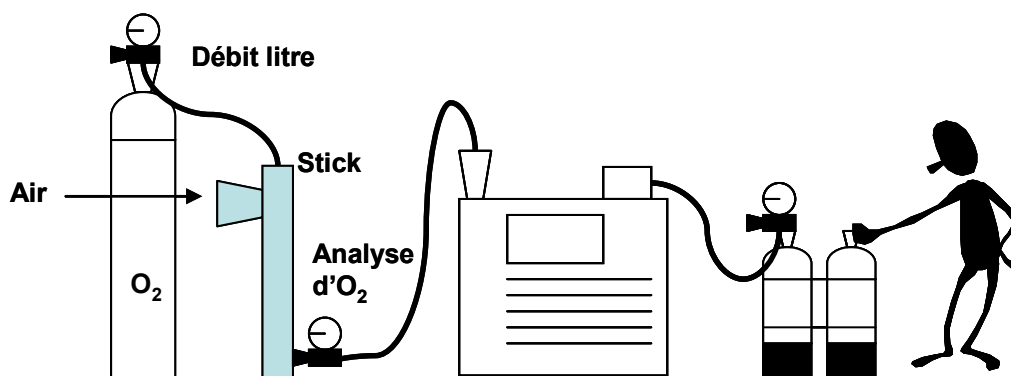
6.6.6. La fabrication automatique

Cette méthode repose sur les mêmes principes que le mélange par pressions partielles à la différence que le processus est entièrement automatisé. Le mélangeur saisit les spécifications du mélange désiré sur un panneau de contrôle et le système asservi par un microprocesseur prend la relève et complète le mélange. Cette méthode assure une extrême justesse du mélange pour 2 raisons : D'une part, l'élimination du facteur humain réduit les erreurs causées par les manipulations des valves et des manomètres. D'autre part, un modèle thermodynamique est intégré au système permettant les ajustements pour les variations de température et les facteurs de compressibilité des gaz. Enfin, une alarme audio-visuelle annonce que le mélange est terminé et que l'utilisateur doit analyser son mélange. Les coûts d'opérations sont minimaux puisque le système est autonome et ne nécessite pas l'intervention humaine.

6.6.7. La fabrication par mélange continu

La principale caractéristique de cette méthode, est que le mélange a lieu à la pression atmosphérique. Un analyseur lit ensuite la concentration en oxygène du mélange avant de le compresser dans des bouteilles tampons ou dans des blocs. Les mélanges sont généralement restreints à 40% de concentration d'oxygène même si la méthode permet des mélanges plus riches.

Ici plus de calculs, un analyseur d'oxygène est installé entre le stick en l'entrée du compresseur, la lecture du pourcentage d'oxygène se fait en direct, et on règle le débit d'oxygène en fonction du pourcentage désiré et on ne dépasse pas 40%. Les avantages de ce système sont nombreux, on peut vider totalement le tampon d'oxygène, plus de lien entre la pression dans la bouteille d'oxygène et le pourcentage du Nitrox réalisable, le remplissage s'effectue rapidement (aussi rapidement que l'air), on peut gonfler les blocs « à la chaîne », les mélanges sont utilisables de suite, on peut simplifier la fabrication du Trimix, dégraissage des blocs inutile. Les inconvénients sont la limitation à 40% du procédé et éventuellement le coût du stick, l'analyseur est nécessaire dans tous les cas.



6.6.8. La fabrication par séparation moléculaire

Cette méthode se base sur le principe de perméabilité sélective pour séparer les gaz. Chaque gaz a sa propre perméabilité qui lui permet de se dissoudre et se diffuser à travers une membrane à un taux plus ou moins élevé. Ce taux permettra aux gaz rapides de se séparer des gaz lents.

L'air pressurisé alimente une cartouche composée de groupes de membranes semi-perméables formées de petites fibres vides en polymère. Au moment où l'air passe à travers les fibres, l'oxygène, un gaz rapide donc davantage perméable, passe à travers la membrane. L'air riche en oxygène est recueilli sur le côté de la cartouche alors que l'air riche en azote sort par l'extrémité aval de cette dernière. Bien qu'il existe plusieurs méthodes, le débit à la sortie d'azote contrôle généralement la concentration en oxygène du Nitrox.

L'avantage principal de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas d'oxygène pur, puisque que rôle de la cartouche-membrane est d'enlever l'azote de l'air pour produire le Nitrox. Elle peut donc être utilisée à des endroits où l'approvisionnement en oxygène pur est limité, voir impossible. Toutefois, le Nitrox est limité à 40% de concentration d'oxygène et les coûts de l'investissement initial sont élevés.

6.6.9. L'achat direct des mélanges

Bien que cette méthode semble simple puisqu'elle consiste à acheter le Nitrox directement du fournisseur, elle comprend quelques désavantages. Premièrement, l'utilisateur est limité à une concentration fixe en oxygène, soit 32% ou 36%. Deuxièmement, elle nécessite l'emploi d'un surpresseur puisqu'après quelques remplissages la pression de la cascade chutera sous les 167 bars, ce qui n'est pas suffisant pour remplir les cylindres. Troisièmement, ces mélanges sont dispendieux. Enfin, si un cylindre comprend un gaz résiduel différent de celui de la cascade, il devra être purgé avant le nouveau remplissage, ce qui représente un gaspillage de gaz coûteux.

Tableau comparatif des méthodes de mélanges

Méthodes de fabrication	Coûts	Simplicité	Dégraissage blocs	Fraction d'oxygène	Précision	Utilisation B50
Pression partielle	Faibles	Moyenne	Nécessaire	De 21 à 99%	Moyenne	Moyenne
Automatique	Elevés	Grande	Nécessaire	De 21 à 99%	Elevée	Moyenne
Débit continu	Moyen	Grande	Pas nécessaire	Max. 40%	Elevée	Grande
Séparation moléculaire	Elevés	Grande	Pas nécessaire	Max. 40%	Elevée	Grande
Achat direct	Elevés	Grande	Nécessaire	De 21 à 99%	Elevée	Moyenne

6.7. Analyse et marquage des mélanges

6.7.1. Généralités

L'analyse des mélanges est obligatoire. La confection des mélanges doit être étalée dans le temps pour éviter les grands écarts de température d'une part et pour permettre une parfaite homogénéité du gaz d'autre part. L'analyse consiste à mesurer la PO_2 avec un analyseur d'oxygène et la PHe avec un analyseur d'hélium. Analyser la PO_2 des mélanges est considéré comme suffisant en tout cas pour les Nitrox et l'Héliair. En effet à partir de cette analyse il n'y a aucun problème à déduire le taux d'azote. Pour les Trimix il est préférable d'analyser le taux d'oxygène et d'hélium avec 2 analyseurs, toutefois il est admis, sous réserve d'une grande rigueur dans la réalisation des opérations, d'analyser la seule PO_2 .

Le taux d'hélium du Trimix offrira certaines imprécisions qu'il faudra minimiser avec soin. Chaque bouteille de mélange doit être analysée au moins 2 fois avant son utilisation en plongée, en ce qui concerne sa teneur en oxygène. Une des 2 analyses obligatoires et les mesures de pression doivent être effectuées ou supervisées par l'utilisateur des mélanges qui notera de manière indélébile et lisible par tous, le type de mélange et la MOD (profondeur maximale d'utilisation). L'analyse doit être faite après le délai de stabilisation du mélange (24 heures). A noter que le brassage des bouteilles (on les roule) accélère l'homogénéité du mélange.

6.7.2. Précision des mélanges

Il est admis que le pourcentage d'oxygène lors de l'analyse ne doit pas s'écarter de plus de 1% de la valeur nominale souhaitée. (Ex : Pour un mélange à 10% d'oxygène, le pourcentage déterminé par l'analyse doit être compris entre 9.9% et 10.1%) et 5% pour l'hélium. Il est à noter que toutes les valeurs, notamment celles de la PO_2 , celles des profondeurs minimales et maximales sont calculés sur la base du pourcentage réel trouvé lors de l'analyse. Un Nitrox ou un Trimix "raté" (pourcentage différent de celui escompté) reste néanmoins utilisable, il suffit d'adapter sa profondeur d'utilisation pour respecter les seuils de PO_2 et d'intégrer les valeurs réelles des pourcentages des gaz pour le calcul des procédures de décompression.

Dédé en pleine préparation d'un mélange Trimix

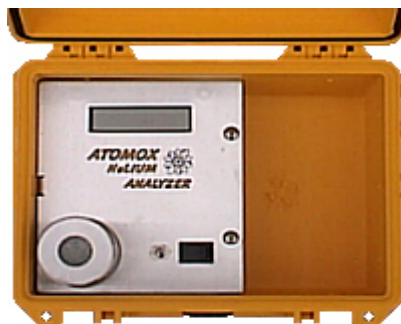


6.7.3. L'analyseur d'hélium

La mesure de l'hélium s'effectue en comparant en continu le mélange à analyser au gaz de référence (air). Cette comparaison est effectuée dans un capteur anti-déflagration contenant 2 cellules. Le gaz de référence est scellé dans une cellule fermée et ne change pas. Le gaz analysé passe à travers la 2ème cellule. Les filaments font partie du circuit monté en pont de Wheatstone. Lorsque la composition du gaz testé change, sa conductivité thermique change aussi. Cela signifie qu'il va transporter moins de chaleur à travers les filaments. Du fait que la résistance des filaments est liée à leur température, leur résistance changera en fonction de la composition du gaz testé. Un tel changement provoque un déséquilibre au niveau du pont de Wheatstone, entraînant alors un signal électrique en sortie proportionnel. Cette technique permet à ce type d'analyseur (Atomox) de fournir une mesure précise de tous changements dans la composition du gaz testé. Les capteurs utilisés dans les analyseurs Atomox sont assemblés spécifiquement pour cet usage. La durée de vie attendue des capteurs est de 10 ans. Le temps de réponse de l'analyseur au changement de composition du mélange peut être affecté par la longueur de la ligne d'alimentation en gaz, les « chambres » de mélanges, ou toute autre obstruction physique. Le temps de réponse est en règle générale rapide (<15s). La concentration d'hélium est mise à jour toutes les 1 seconde lorsque l'analyseur est en fonctionnement.

L'hypothèse de base du fonctionnement de l'analyseur est que l'on connaît les composants du mélange (par exemple : oxygène, azote, hélium). Les quantités non significatives (<1% du total) ou autres traces de gaz ne modifiant pas de manière significative le résultat de l'analyse pouvant être ignorés. Le capteur n'étant pas spécifique, il n'indiquera pas si le mélange contient du monoxyde de carbone, de l'argon ou un autre gaz, il déterminera uniquement le changement de conductivité thermique par rapport au gaz contenu dans la cellule de référence. On part du principe que la différence est le résultat de l'ajout d'hélium dans le mélange.

Analyseur d'hélium ATOMOX



6.7.4. L'analyseur d'oxygène

Sans lui pas de plongée Tech, car on ne sait pas ce que l'on respire ou alors on plonge à l'air et à l'O₂ pur. Pièce maîtresse de l'équipement du plongeur Tech, il est composé d'une cellule et d'un boîtier de lecture. L'âme d'un analyseur est sa cellule, le boîtier n'est qu'un millivoltmètre amélioré. Ces appareils sont utilisés depuis longtemps dans le domaine médical. Leur venue à la plongée est assez récente mais depuis quelques années l'offre s'est considérablement étoffée, tant en appareils qu'en cellules de remplacement (les cellules ne sont pas éternelles, même si des progrès en durabilité ont été fait). Une cellule est une pile, une pile à oxygène. Plus la pression d'oxygène à sa surface est importante, plus la tension qu'elle délivre est élevée.

Si l'on branche un millivoltmètre entre ses pôles, on peut connaître la PO₂ et ses variations. Une cellule mesure la PO₂ et pas la FO₂. Il se trouve qu'à pression ambiante (1 bar) on peut facilement passer de l'une à l'autre, ce qui n'est plus vrai dès que l'on change la pression. Sur les recycleurs, les oxymètres indiquent la PO₂, seuls quelques modèles sophistiqués affichent la FO₂, ils ont besoin pour cela d'un capteur de pression et d'effectuer un calcul de compensation. La tension moyenne dans l'air des cellules est de l'ordre de 8 à 12 mV, certaines pouvant fournir 25 mV. Leur durée de vie dans l'air est actuellement annoncée à 40 mois par les fabricants. Il est plus raisonnable de compter sur une durée de vie de 18 à 24 mois. Les analyseurs du commerce coûtent entre 200 et 500 euros, les cellules de rechange entre 90 et 120 euros.

- **Le débit**

Pour qu'une cellule oxygène fournisse une mesure fiable, elle doit recevoir uniquement le gaz à analyser et doit travailler à la pression atmosphérique. On peut utiliser pour cela un manodétendeur-débitre médical ou un détendeur avec débitre à tube, un débit de 2 litres/min est suffisant. La cellule ne doit pas être verrouillée de manière étanche sur l'alimentation en gaz, sinon la pression risque de monter. La plupart des kits sont livrés avec un « T » dont une branche reçoit la cellule et l'autre est destinée à être fixé au robinet du bloc (à l'aide d'un adaptateur DIN) ou simplement maintenue à la main.

- **La calibration**

La calibration consiste, avant chaque utilisation de l'analyseur, à vérifier la valeur affichée en présence d'un gaz connu. Il devra afficher 21% dans l'air et 100% dans l'oxygène pur. Au besoin, on corrige la valeur à l'aide du bouton de calibration (potentiomètre). Des variations minimales sont tolérables, en raison des changements de pression atmosphérique, d'hygrométrie et de température mais aussi de la précision de l'appareil de lecture de la cellule ainsi que son usure. Quand la valeur affichée est instable et nécessite plusieurs corrections successives, c'est signe que la cellule est usée. De même lorsque l'on calibre à l'air, mieux vaut utiliser celui d'un bloc qui aura une température et hygrométrie proche du gaz à analyser. Il existe également des tables de compensation température/hygrométrie disponible chez les fabricants ou sur le Net. On peut calibrer avec d'autres gaz (hélium, air, oxygène pur) mais les cellules n'étant pas parfaitement linéaires (elles le sont de plus en plus), il est préférable d'utiliser le gaz dont la FO₂ est la plus proche du mélange que l'on doit analyser. Certains fabricants préconisent une triple calibration (0, 100 et 21), c'est sans doute bénéfique pour la précision, même si c'est beaucoup de manipulations, donc de sources d'erreurs. Cette méthode était nécessaire lorsque la tension à vide des cellules n'était pas nul, les cellules actuelles sont beaucoup plus performantes de ce point de vue aussi, le triple étalonnage est donc moins important.

- **La précision**

Les fabricants annoncent une précision de 1% à pleine échelle qui correspond à la précision des cellules qu'ils utilisent (sans doute les appareils sont-ils parfaits). A ces erreurs, il faut ajouter celles éventuelles de l'opérateur lors de la calibration et des opérations de mesures. Estimer qu'un Nitrox lu à 35% se situe entre 34.5 et 35.5% semble un pessimisme raisonnable. Cela montre qu'il n'est guère intelligent de jouer trop près des limites de PO₂ lors de l'utilisation des mélanges.

Kits d'analyses d'O₂ (de g. à d.) Dive Rite et OMS



6.7.5. Le marquage des mélanges Nitrox

Les bouteilles de plongée contenant du Nitrox doivent être étiquetées de façon visible afin que le plongeur sache et voit exactement quel mélange il va respirer et à partir de quelle profondeur il peut le respirer en toute sécurité. On trouve donc sur les bouteilles relais une ou plusieurs étiquettes indiquant en gros le type de mélange (OXYGENE ou NITROX) ainsi que le pourcentage précis et la profondeur maximale d'utilisation du gaz. Exemples : EAN 75 / 11m ou Nitrox 32% / 40m

6.7.6. Le marquage des mélanges Trimix

Les bouteilles de plongée contenant du Trimix doivent être labellisées par une inscription TRIMIX ou CUSTOM MIX bien visible, ainsi que les teneurs de chacun des gaz composant le mélange. En principe on indique d'abord le taux d'oxygène et ensuite celui de l'hélium, exemple : TRIMIX 14/46.

Les structures de plongée Tech fournissent en général de larges autocollants à apposer sur les bouteilles. Ces autocollants se distinguent aisément des autres par leur couleur. Si le vert et le jaune sont couramment utilisés pour le marquage des bouteilles de Nitrox, le Trimix quant à lui se repère par un marquage rouge.

6.8. Quantité des mélanges

6.8.1. Généralités

Il faut se rendre compte que le stock de gaz est limité et que même si l'on a plusieurs bouteilles avec soi, elles ne contiennent pas toutes la même chose, ce qui rend les possibilités d'échange plutôt limitées. On peut avoir des bouteilles de gaz qui attendent à un pendeur ou à un endroit précis, ou prévoir un narguilé qui fournit du gaz au palier, mais il faut alors être sûr de revenir au bon endroit, ce qui est plus pratique en plongée spéléo qu'en mer lorsqu'il y a du courant ou en lac.

Aussi la règle veut-elle que l'on prévoit une réserve de gaz plus importante, afin de palier toute éventualité et d'emporter cette réserve avec soi. Il faut donc connaître sa consommation de gaz en fonction de l'effort que l'on va fournir et prévoir un facteur de sécurité supplémentaire.

6.8.2. Calcul de consommation moyenne

En connaissant sa consommation moyenne en surface, le plongeur Tech peut facilement déterminer son autonomie en gaz à différentes profondeurs et durant les différentes phases de la plongée à l'aide de la formule suivante :

$$C_{\text{moy}} = (P_{\text{fin}} - P_{\text{ini}}) * Ca / d * P_{\text{abs}}$$

- C_{moy}** : consommation moyenne = [litres]
- P_{fin}** : pression finale dans le bloc = [bars]
- P_{ini}** : pression restante dans le bloc = [bars]
- Ca** : capacité du bloc = [litres]
- d** : durée de la plongée = [minutes]
- P_{abs}** : pression absolue = [bars]

- **Exemple de calcul :**

Un plongeur équipé d'un bi-bouteille de 15 litres à 200 bars a passé 15 minutes à une profondeur moyenne de -90 mètres, la pression restante dans ses bouteilles est de 100 bars, quelle est sa consommation moyenne ?

- **Solution :**

$$C_{\text{moy}} = (P_{\text{fin}} - P_{\text{ini}}) * Ca / d * P_{\text{abs}} \Rightarrow (200 - 100) * 30 / 15 * 10 = \mathbf{20 \text{ litres par minutes.}}$$

Cette mesure est à calculer régulièrement car elle dépend beaucoup de la condition physique et de l'expérience du plongeur. Elle est également fonction des efforts fournis durant la plongée, du stress, de l'état général et du matériel utilisé. Néanmoins chaque plongeur devrait connaître cette valeur, en particulier pour calculer son autonomie lorsqu'il plongera à une profondeur donnée.

Pour la planification de la consommation, l'organisme TDI recommande d'utiliser la valeur de 30 litres/min en surface.

6.8.3. Calcul de consommation totale

Une fois connue la consommation moyenne de surface, une simple multiplication permet de calculer ce qui sera consommé durant la plongée.

$$\mathbf{C_{tot} = P_{abs} * d * C_{moy}}$$

Ctot : consommation totale = [litres]

Cmoy : consommation moyenne = [litres]

d : durée de la plongée = [minutes]

Pabs : pression absolue = [bars]

Une règle prudente est toujours d'avoir plus de gaz que nécessaire et de se ménager une ample réserve en cas de mauvaise surprise (panne de gaz du binôme, effort important, fuite de gaz, utilisation abusive du Direct System, gonflage imprévu d'un parachute, etc . . .). Le choix de la bouteille s'effectue en fonction du stock à emporter mais aussi de l'encombrement et du poids de la bouteille.

6.8.4. Réserve des mélanges fond

La réserve de gaz doit respecter au minimum la règle des tiers ou une règle plus contraignante si nécessaire. Ce calcul est différent suivant le type de plongée.

- **Plongées sous plafond :**

Il s'agit de consommer un tiers à l'aller, un tiers au retour et garder un tiers en réserve, on fait demi-tour dès le tiers consommé.

- **Plongée mono-gaz :**

Deux tiers du gaz est consommé durant la plongée, paliers compris le dernier tiers reste en réserve en cas de besoin, on remonte donc avant la fin du second tiers.

- **Plongée multi-gaz :**

Deux tiers du gaz est consommés à l'arrivée de la profondeur de changement de gaz, on remonte donc avant la fin du second tiers.

6.8.5. Réserve des mélanges de décompression

Chaque bouteille relais doit être calculée en fonction de la consommation prévue aux paliers avec, là aussi au minimum une réserve équivalente à 1/3 de gaz en plus, voir la 50% de gaz en plus. La prudence impose de toujours calculer les temps nécessaires en utilisant n'importe lequel des gaz emportés, ce qui peut imposer des stocks de gaz importants, en particulier lorsque les paliers à effectuer sont tellement longs qu'ils ne se mesurent plus avec une montre mais un calendrier.

6.8.6. Détermination du profil de décompression et du volume des gaz

Déterminons le volume de gaz à emporter pour une plongée de 15 minutes à –90 mètres avec un Trimix 14/46, les paliers ont été calculés avec le logiciel V-Planner version 3.4, la consommation moyenne est de 20 litres par minutes pour le mélange fond et les mélanges de décompression.

- **Profil et gaz**

Niveau 90m	11:28 (15)	on Trimix 14.0/46.0,	1.36	ppO ₂ ,	40m ead,	44m end
Palier à 66m	0:36 (18)	on Trimix 14.0/46.0,	1.03	ppO ₂ ,	28m ead,	31m end
Palier à 60m	1:00 (19)	on Trimix 14.0/46.0,	0.95	ppO ₂ ,	25m ead,	28m end
Palier à 54m	2:00 (21)	on Trimix 14.0/46.0,	0.87	ppO ₂ ,	22m ead,	24m end
Palier à 48m	3:00 (24)	on Trimix 14.0/46.0,	0.79	ppO ₂ ,	19m ead,	21m end
Palier à 42m	2:00 (26)	on Trimix 14.0/46.0,	0.71	ppO ₂ ,	16m ead,	18m end
Palier à 39m	1:00 (27)	on Trimix 14.0/46.0,	0.67	ppO ₂ ,	15m ead,	16m end
Palier à 36m	3:00 (30)	on Trimix 14.0/46.0,	0.63	ppO ₂ ,	13m ead,	15m end
Palier à 33m	1:00 (31)	on Nitrox 36.0,	1.51	ppO ₂ ,	25m ead	
Palier à 30m	1:00 (32)	on Nitrox 36.0,	1.40	ppO ₂ ,	22m ead	
Palier à 27m	2:00 (34)	on Nitrox 36.0,	1.30	ppO ₂ ,	20m ead	
Palier à 24m	2:00 (36)	on Nitrox 36.0,	1.20	ppO ₂ ,	17m ead	
Palier à 21m	3:00 (39)	on Nitrox 36.0,	1.09	ppO ₂ ,	15m ead	
Palier à 18m	3:00 (42)	on Nitrox 36.0,	0.99	ppO ₂ ,	13m ead	
Palier à 15m	5:00 (47)	on Nitrox 36.0,	0.88	ppO ₂ ,	10m ead	
Palier à 12m	6:00 (53)	on Nitrox 36.0,	0.78	ppO ₂ ,	8m ead	
Palier à 9m	8:00 (61)	on Nitrox 75.0,	1.40	ppO ₂ ,	0m ead	
Palier à 6m	11:00 (72)	on Nitrox 75.0,	1.19	ppO ₂ ,	0m ead	
Palier à 3m	27:00 (99)	on Nitrox 75.0,	0.97	ppO ₂ ,	0m ead	

Trimix 14/46 = 4464.2 litres

Nitrox 36 = 1283.1 litres

Nitrox 75 = 1349.4 litres

- **Calcul des capacités blocs**

$$Ca = Vco + (Vco * 0.333) / Pb$$

Vco : volume consommé = [litres]

Pb : pression bloc = [bars]

Ca : capacité bloc = [litres]

$$Ca \text{ mix fond} = Vco + (Vco * 0.333) / Pb \Rightarrow 4465 + (4465 * 0.333) / 230 \Rightarrow (4465 + 1487) / 230 \cong \mathbf{26 \text{ litres, soit un bi de 2 x 15 litres 230 bars.}}$$

$$Ca \text{ mix deco 1} = Vco + (Vco * 0.333) / Pb \Rightarrow 1284 + (1284 * 0.333) / 200 \Rightarrow (1284 + 428) / 200 \cong \mathbf{9 \text{ litres, soit un mono de 10 litres à 200 bars.}}$$

$$Ca \text{ mix deco 2} = Vco + (Vco * 0.333) / Pb \Rightarrow 1350 + (1350 * 0.333) / 200 \Rightarrow (1350 + 450) / 200 \cong \mathbf{9 \text{ litres, soit un mono de 10 litres à 200 bars.}}$$

6.8.7. Conclusion

Comme nous l'avons vu, la plongée Tech impose l'utilisation de différents gaz, ceux-ci doivent être de qualité et prévus en quantité suffisante.

- Type de gaz pour les mélanges fond, intermédiaire(s) et déco en fonction du profil de la plongée
- Quantité de gaz pour les mélanges fond, intermédiaire(s) et déco en fonction du profil de la plongée
- Analyse des gaz avant la plongée
- Gaz pour les procédures d'urgence (oxygène pur, systèmes Wenol, etc...)

7. Matériel

7.1. Introduction

S'il y a une activité en plongée où la fiabilité et le choix du matériel jouent un rôle essentiel, c'est bien en plongée Tech. En effet, il est arrivé à tout plongeur de commencer une plongée loisir à l'air en ayant une pièce d'équipement défectueuse : un détendeur qui fuse légèrement, une sangle ou un embout en voie de rupture, un Direct-System un peu dur au gonflage, un lestage pas tout à fait adapté. Cela ne présentait que peu de risques car la surface n'était jamais bien loin, tout comme l'aide de l'inséparable binôme et le stock d'air suffisait largement pour gérer n'importe quelle situation. En plongée Tech, les choses changent, la surface se fait cruellement lointaine et distante. Le stock de gaz disponible doit être consommé avec modération, quant au binôme, entre son temps de réaction et sa mobilité réduite par le matériel, il ne sera éventuellement opérationnel qu'après de longues secondes.

Le maître mot devient **réelle autonomie**, le plongeur Tech doit être capable de gérer la totalité des problèmes prévisibles qui pourraient survenir lors d'une plongée technique, et ce, sans l'aide de personne. Tout cela nécessite une réflexion approfondie concernant le matériel à emporter et les situations d'urgence envisageables.

L'équipement d'un plongeur Tech constitue un ensemble, un système et non un rassemblement plus ou moins réfléchi d'accessoires emportés suivant l'humeur et les besoins. Chaque pièce d'équipement doit avoir un usage et un emplacement précis qui ne doit être changé ou supprimé qu'après mûre réflexion sur les avantages et les inconvénients potentiels de ce changement.

Pascal Bernabé testant un recycleur Voyager redondant à Trieste



7.1.1. Redondance

La plongée aux mélanges a une éthique qui est sa règle d'or la redondance. Cette redondance multiple est une règle très simple, c'est d'avoir suffisamment d'équipements pour parer à tout problème. En effet, la défaillance en plongée arrive toujours au plus mauvais moment (loi de Murphy). Ce qui implique que chaque pièce d'équipement indispensable est doublé. Cela est vrai pour le stock de gaz, mais aussi pour les moyens de contrôler la décompression (mesure de la profondeur, du temps et profil de décompression) ou la flottabilité.

Mais attention, le mieux est souvent l'ennemi du bien. L'image que l'on a généralement du plongeur Tech est celle d'un pauvre bougre surchargé de bouteilles, couvert de tuyaux, étincelant d'anneaux en inox et chancelant sous le poids d'un matériel qu'il a du mal à porter sur terre et à transporter sous l'eau, autant dire l'antithèse de l'hydrodynamisme, de l'aquaticité et de la légèreté.

Il faut de la mesure dans tout et nul n'est besoin d'emporter des palmes de rechange ou 5 couteaux. Une surcharge de matériel ne ferait qu'interférer avec la mobilité du plongeur, déjà sérieusement compromise. A grande profondeur, tout ce matériel peu hydrodynamique peut être à l'origine d'un essoufflement. Comment imaginer qu'un plongeur puisse réellement à l'aise lorsque son équipement a dépassé la masse critique, le poids du matériel étant supérieur à son propre poids ? Les discussions font rage quant à la meilleure configuration. Mais elle dépend en réalité des circonstances et des individus. La meilleure configuration, c'est souvent celle qui nous est la mieux adaptée, celle que l'on a testée, que l'on connaît sur le bout des doigts et que notre binôme connaît, même quand l'urgence et le stress font oublier tout le reste.

Un plongeur équipé pour une plongée à -130 mètres à Dahab (T'es sûr que t'as assez de bouteilles Sacha ?)



7.2. Les bouteilles du mélange fond

7.2.1. Généralités

C'est le mélange principal du plongeur Tech, dans la mesure où c'est celui qui nécessite la quantité la plus importante. C'est celui qui prend généralement place dans le dos du plongeur, sous la forme d'une, de 2, voire de 3 bouteilles pour les plus audacieux ou les plus prudents. Il est essentiel de connaître sa consommation afin de calculer le stock nécessaire à emporter. En plongée Tech le minimum de bouteilles est de 2, soit Bi 2x10, 2x12, 2x15, 2x18 voire 2x20 litres pour les costauds.

Scaphandre bi-bouteille 15 litres avec bouteille d'inflation



7.2.2. La robinetterie

Pas de plongée Tech sans le scaphandre ad hoc. Toutes les bouteilles, et il peut y en avoir un certain nombre, sont équipées de préférence avec une connexion DIN. Elles sont plus solides, plus compactes et présentes moins de risques en cas de choc. La règle est de ne pas mélanger les types de raccord différents (DIN ou INT), dans le pire des cas, on peut toujours enlever sous l'eau un détendeur d'une bouteille pour le mettre sur une autre dont on a besoin. Il en sera quitte pour une bonne révision après la plongée, mais c'est tout de même mieux que plus de détendeur utilisable. Hors de l'eau, lors des manutentions, mieux vaut mettre des bouchons de protection sur les filetages des robinetteries DIN, car vissez un détendeur avec quelques grains de sable et tout l'ensemble est endommagé. En fonction du stock nécessaire et du principe de redondance, le plongeur va choisir le type de bouteilles le mieux adapté à ses besoins.

Robinet modulable avec vanne d'isolation



7.2.3. Les gaz respirables

Avec l'augmentation des pressions partielles en profondeur, les gaz respirés doivent impérativement être d'une qualité irréprochable. Une faible concentration de monoxyde de carbone ou de dioxyde de carbone n'est pas dangereuse en surface mais devient problématique en profondeur. Sans parler que la manipulation d'oxygène pur impose des normes de filtration draconiennes afin d'éviter la présence de graisse. Les gaz utilisés seront donc :

- De l'oxygène pur ou des Nitrox prémélangés
- De l'hélium pur au moins de type 45, c'est-à-dire pur à 99.995 % ou un prémélange
- De l'air filtré

Une filtration très efficace est essentielle afin de s'assurer que la teneur en huile est inférieure à $0,1 \text{ mg/m}^3$ en présence d'oxygène. Un maximum de rigueur est essentiel afin d'éviter tout souci au niveau des mélanges respirés. Ces mélanges ne doivent être confectionnés que par un technicien compétent et non un bricoleur qui « sait ce qu'il fait ». Par précaution, l'utilisateur du mélange ou des mélanges doit analyser la teneur en oxygène et éventuellement celle de l'hélium.

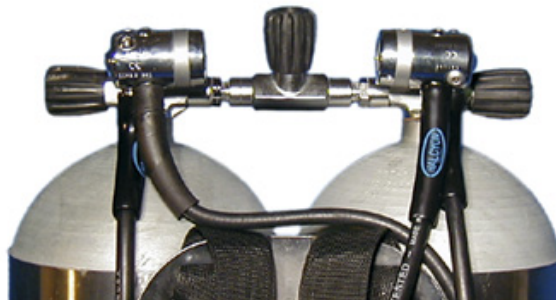
7.2.4. La configuration

- **Bi avec deux bouteilles séparées**

Ce qui oblige à alterner la respiration sur chaque bouteille (30 ou 50 bars puis passage sur l'autre détendeur). Ainsi, en cas de problème sur une bouteille (choc sur la robinetterie, rupture d'un joint torique, etc...), la quantité de gaz dans une bouteille sera sensiblement la même que dans l'autre. C'est une sécurité, mais aussi la contrainte d'une gestion constante des détendeurs. Cela s'explique surtout dans une configuration de plongée Solo ou spéléo lorsqu'il faut une sécurité maximale.

- **Bi avec barre d'accouplement et robinet d'isolation central**

On respire sur les deux bouteilles en permanence mais en cas de problème, on ferme le robinet d'isolation afin d'être sûr de conserver au moins le contenu de la bouteille qui n'a pas de fuite. C'est moins rapide à fermer car la gymnastique du bras pour fermer la vanne centrale nécessite un peu d'entraînement. Il existe également la télécommande de robinet central, cette solution n'est pas recommandée en cas de plongée solo (en cas de fuite du robinet d'isolation, il y a panne totale de gaz si aucune autre bouteille n'est disponible). Le principe est de pouvoir gérer une perte de gaz inopinée dans l'une des bouteilles (extrusion d'un joint torique de robinetterie, détendeur en débit continu, etc...) sans pour autant perdre la totalité du gaz. Pour faciliter la manipulation des robinetteries et éviter toute confusion, les robinets des bouteilles sont complètement ouverts, à l'exception du robinet d'isolation central qui n'est ouvert que d'un ou 2 tours.



7.3. Les bouteilles relais

7.3.1. La contenance

Les bouteilles utilisées ont en général une contenance allant de 4 à 12 litres, rarement plus. On peut parfois préférer des bouteilles en aluminium ou acier-carbone afin de ne pas être exagérément trop lourd. Tout est une question de préférence et de commodité. Cependant, une bouteille de 10 litres se manipule aussi facilement qu'une de 6 litres si on a bien configuré son équipement. Par contre, pour une même quantité de gaz, il faut moins de pression, cela veut dire qu'on manipule l'oxygène à pression plus faible et qu'on peut en tirer plus de la rampe B50, on est du côté de la sécurité et on vide mieux la rampe.

7.3.2. La configuration

Les bouteilles doivent être positionnées de manière à ce que la bouteille contenant le mélange le plus riche en oxygène soit la plus difficilement accessible, car la dernière à être utilisée. C'est une question de préférence et de connaissance de son propre matériel. Il ne doit pas avoir de possibilité de confusion entre les détendeurs (position différentes, formes différentes, 2^{ème} étage dans une pochette spéciale, etc...).

On peut privilégier la bouteille riche en oxygène portée du côté droit, mais accessible par la majorité des droitiers que celle du côté gauche. On peut également utiliser le pense-bête (riche = right). L'essentiel c'est de fixer une règle et de ne jamais la changer.

Bouteilles relais acier-carbone, (de h. en b.) 12 litres et 7 litres



7.3.3. Fixation

Au nombre de 2 par bouteille (en haut et en bas) pour assurer un bon équilibre, les fixations choisies doivent être solides et efficaces (pas d'ouverture accidentelle), mais permettre une ouverture facile en cas de besoin, même avec des gantes. Certains modèles proposent même une poignée de portage reliant les 2 mousquetons.

Fixations pour bouteilles relais



Plongeurs DIR avec leurs bouteilles relais positionnées uniquement à gauche



7.4. Les détendeurs pour le mélange fond

7.4.1. Choix et type des détendeurs

Les détendeurs utilisés pour le mélange fond doivent avoir trois qualités essentielles :

- **Simplicité**

Les détendeurs doivent être à l'épreuve des pannes. Ils doivent être solides et tolérants sur les conditions d'utilisation. En cas de besoin, un plongeur doit même pouvoir démonter son 2^{ème} étage de détendeur sous l'eau, si celui-ci a accumulé des sédiments à l'intérieur et n'est plus utilisable.

- **Adaptabilité**

La configuration des détendeurs doit permettre de répondre efficacement à tout type de problèmes sous l'eau. Au niveau des tuyaux, il faut éviter toute boucle et toute longueur inutiles, qui sont autant de risques d'accrochage. Certains fabricants vendent les tuyaux moyenne et haute pression en différentes longueurs, ce qui permet d'avoir une configuration « au plus court », le plus près possible du corps.

- **Performance**

Lorsque l'on parle de plongées profondes, nul doute qu'un détendeur performant est nécessaire. Il doit être capable de délivrer suffisamment de gaz en cas d'effort ou d'urgence, à n'importe quelle profondeur et même s'il est branché sur un tuyau de deux mètres. Tout cela indique qu'un détendeur compensé est un minimum, mais ne suffit pas. Il faut en plus, un détendeur qui soit testé et utilisable dans les conditions de plongée prévues et dont les performances soient suffisantes au niveau du débit fourni. L'entretien régulier ne devient plus un conseil judicieux mais plutôt une nécessité absolue, afin de minimiser les risques de défaillance technique et de garantir des performances optimales.

D'autres considérations peuvent venir en complément dans le choix d'un détendeur de plongée aux mélanges. En cas de plongée sous glace ou en eau froide par exemple. Un kit anti-givre ou une conception particulière sont à considérer pour éviter le problème d'un détendeur en débit continu.

7.4.2. Modèles de détendeurs

Voici les Ferrari des détendeurs, ceux qui sont spécialement conçus pour aller très profond, bien au-delà du raisonnable. Et même s'ils sont taillés pour l'extrême, on peut aussi les utiliser pour la plongée sportive, voire pour la plongée de loisir... Tout est une question de sécurité !

Nous vous présentons 5 "bêtes de course", des détendeurs hors du rang, capable de descendre à plus de -200 mètres. Ces détendeurs sont utilisés par les recordmen de profondeur, comme Pascal Bernabé (-330m), Olivier Isler (-165m), John Benett (-308m). Si ces champions les utilisent, on peut leur faire confiance, voici les 5 petits bijoux :

1. le Tekstar de Comex Pro

2. le TX 200 d'Apeks

3. l'Abyss Explorer d'Abysmal Diving

4. le DR 2000 de Dive Rite

5. le Xstream de Poseidon

7.4.3. Configuration de l'ensemble

Quelle que soit la formule adoptée, chaque bouteille est équipée d'un détendeur, ce qui augmente vite le nombre de tuyaux lorsque l'on ajoute manomètre et direct system.

D'un usage de plus en plus répandu, le tuyau long (entre 1.5 et 3 m suivant les modèles, mais 2 mètres suffisent en général) permet de donner de l'air à un autre plongeur avec une amplitude maximale et sans peur de se gêner durant la sortie d'un passage étroit d'une épave. Même en pleine eau, il est difficile de remonter confortablement lorsque l'on est très proche d'un autre plongeur chargé en bouteilles et intimement maintenu par un tuyau d'un mètre. Au lieu de cela, on utilise la longueur désirée de ce tuyau long, en fonction des circonstances, grâce à divers systèmes d'accrochage qui permettent de s'adapter aux besoins du moment.

Configurations scaphandre DIR



(De g. à d. configurations scaphandre autre que DIR, détail scaphandre avec tuyau long)



7.4.4. Les techniques de respiration

- **Respirer sur les deux détendeurs**

Si l'on a un Bi avec 2bouteilles séparées ou une configuration Sidemount, il faut respirer alternativement sur chaque bouteille. Le plus simple est souvent d'avoir un détendeur positionné à droite et l'autre à gauche, ce qui permet de savoir facilement sur quelle bouteille on respire. Ces détendeurs sont toujours à portée de bouche, accrochés autour du cou au moyen de sangles ou de tube chirurgical.

- **Respirer sur le tuyau court**

Si l'on a un Bi couplé, on peut décider de respirer sur le détendeur ayant un tuyau court, le tuyau long étant rangé avec soin au moyen de tubes chirurgicaux, sur le côté droite, ou horizontalement sous la robinetterie. L'important est de pouvoir tirer facilement ce tuyau de secours sans risque d'emmêlement ou de blocage, et d'avoir le détendeur très facilement accessible en cas de panne de gaz du binôme.

- **Respirer sur le tuyau long**

Avec un Bi couplé, on peut également respirer sur le détendeur ayant un tuyau long, celui-ci n'étant pas rangé dans le tube chirurgical mais partiellement ou entièrement déployé, passant sur le côté droit, puis derrière la tête (il ne doit pas être bloqué par les bouteilles relais). En cas de problème, le tuyau long est donné au plongeur en panne de gaz, la longueur totale étant immédiatement disponible en penchant la tête en avant pour dégager le tuyau. Le tuyau long ne nuit pas aux performances du second étage et est plus facile à donner à quelqu'un en panne de gaz (c'est le détendeur le plus visible, immédiatement disponible, et dont on est sûr du bon fonctionnement et du contenu).

7.4.5. Le choix des manomètres

Partie intégrante du détendeur, le manomètre doit être toujours visible sans pour autant être gênant.

- **Pour les bouteilles du mélange fond**

Il faut un manomètre par bouteille, avec une indication claire de la bouteille correspondante (étiquetage ou tout simplement un manomètre à gauche et un à droite). Pour un bi avec barre d'accouplement un seul manomètre suffit, généralement venant du côté gauche et fixé à un anneau par un mousqueton ou un élastique court.

- **Pour les bouteilles relais**

Les manomètres peuvent être montés sur les tuyaux très court afin d'éviter les longueurs inutiles. Si le mélange contient plus de 40% d'oxygène, le manomètre devra être adapté à l'utilisation de l'oxygène.

7.5. Les détendeurs pour le mélange de décompression

7.5.1. Choix et types des détendeurs

Les détendeurs utilisés sur les bouteilles relais n'ont pas besoin d'avoir de très hautes performances, car ils ne sont utilisés qu'à faible profondeur. En revanche, ils doivent être confortables en bouche et ne pas se mettre en débit continu. Ces détendeurs doivent correspondre au type de mélange contenu dans la bouteille à laquelle ils sont raccordés. En fonction du pourcentage d'oxygène, il pourra s'agir de détendeurs normaux (jusqu'à 40%) ou de détendeurs oxygène (plus de 40%).

7.5.2. Configuration de l'ensemble

Il est essentiel d'être parfaitement familiarisé avec l'ensemble détendeur-bouteille relais et de s'assurer que l'ensemble est disponible à tout moment en cas de besoin, et non coincé sous une bouteille relais ou par un mousqueton manipulable uniquement en surface.

7.5.3. Le marquage

Pour éviter toute confusion, cause principale des accidents de plongées profondes aux mélanges, il est important que chaque 2^{ème} étage soit clairement marqué, de préférence d'un modèle différent pour chacun. Là encore, un code de couleur n'est pas suffisant. Même par visibilité très réduite, le mélange doit être facilement reconnaissable, si ce n'est au toucher (mousqueton ou détendeur différent), au moins visuellement de très près. Il faut rendre impossible toute action précipitée qui, dans une situation d'urgence stressante, pousserait un plongeur à respirer sur le premier détendeur venu, surtout s'il s'agit de celui d'une bouteille de Nitrox 75% alors que le plongeur est à -60 mètres.

7.5.4. Le rangement

Chaque tuyau est rangé le long de la bouteille au moyen d'un incontournable tuyau chirurgical. Le tuyau et le deuxième étage du mélange le plus riche en oxygène sont placés de manière à ne pas être facilement accessibles, par exemple coincés entre le corps du plongeur et sa bouteille ou rangé dans une pochette difficile à défaire.

7.5.5. Hyperoxie

Le second étage du mélange déco le plus riche peut être équipé d'un système permettant de limiter les risques de noyade en cas de perte de conscience ou de crise de convulsion, sangle de maintien en bouche, couvre lèvres. Même si toutes ces précautions peuvent sembler exagérées de prime abord, des plongeurs très expérimentés ont payé de leur vie un moment d'inattention ou une négligence dans la configuration de leur équipement.

7.6. Les Wings

7.6.1. Généralités

Le système de flottabilité est, sans conteste, l'un des équipements les plus importants en plongée Tech, sans lui, difficile de remonter lorsqu'on est lourdement chargé de bouteilles. Dons pas de fausses économies dans ce domaine, il faut du volume et de la fiabilité. A l'exception des bouteilles relais (Sidemount) où le gilet de stabilisation classique peut être utilisé après adaptation, les Wings (ailes) ont su prouver leur supériorité. Ces Wings se déclinent en une variété impressionnante de modèles qui vont de la simple plaque en aluminium avec enveloppe dorsale, aux modèles plus perfectionnés avec renforts molletonnés, harnais modulables et doubles enveloppes. Tout est possible mais, là encore, simplicité est souvent synonyme de facilité d'emploi. l'important est d'avoir une plaque très solide pour supporter toute la charge et une enveloppe suffisamment grande pour assurer la flottabilité d'un plongeur chargé, le tout solidement fixé l'un à l'autre. Les Wings se caractérisent par :

- Leur contenance (volume minimum 25 litres) que n'ont pas les stabs classiques, dans la mesure où l'enveloppe peut se gonfler sans écraser la cage thoracique du plongeur
- Leur confort car la poitrine est dégagée pour accueillir une, voir plusieurs bouteilles relais
- Leur capacité de charge pour soutenir les bouteilles relais avec des anneaux inox aux endroits utiles

7.6.2. Fixation des Wings

La fixation sur le Bi se fait au niveau de la plaque dorsale, la Wing étant prise entre la plaque et la bouteille. 2 systèmes de fixation ont la faveur des plongeurs Tech.

- **Les sangles réglables**

Elles ont l'avantage de pouvoir être démonté pour le portage, mais peut bouger ou glisser en plongée. C'est le système le plus souvent utilisé pour un Bi constitué de bouteilles séparées.

- **Les cerclages métalliques**

Elles sont préformés à la taille des bouteilles. Cette fixation à demeure est d'une solidité à toute épreuve, ce système est idéal pour un Bi avec barre d'accouplement, car il n'y a aucun risque de torsion au niveau de cette barre et des raccords d'accouplement. Il est judicieux de vérifier régulièrement le serrage des écrous de fixation de la plaque et de tester la solidité de l'ensemble en surface. Un Bi qui se désaccouple au fond risque d'être à l'origine d'une expérience peu agréable à vivre.

7.6.3. Direct System

C'est le complément indispensable de la Wing, le modèle doit être rapide et efficace, même en profondeur et facile à manipuler, quelle que soit l'épaisseur des gants. Il doit toujours être à la même place afin d'être retrouvé, même par faible visibilité. Afin d'assurer l'accessibilité à tout moment, on peut le fixer solidement au tuyau annelé et à la bretelle gauche du harnais, au moyen du tuyau chirurgical. Le passer en dessous du bras gauche, le tuyau annelé passant quant à lui au dessus du bras. L'ensemble est bien maintenu mais la purge lente n'est pas utilisable à son maximum. Le fixer sur l'arrière du côté droit du plongeur, si la Wing est équipée d'un Direct System de secours pour une double vessie, qui doit être inaccessible en temps normal.

Wings Dive System et Dive Rite avec le harnais



Wings Halcyon pour plongeurs DIR



7.7. Les combinaisons

7.7.1. Généralités

Impossible de parler de plongée aux mélanges sans parler de protection isothermique. Les profils de dé-compression peuvent être longs, la température au fond fraîche et le gaz respiré avec ou sans hélium, contribue au refroidissement du plongeur. Une protection isothermique efficace est indispensable, même en mer apparemment chaude. L'idéal est la combinaison étanche qui sert ainsi de réserve de flottabilité au cas où un problème surviendrait à la Wing. Les principaux matériaux utilisés pour leur fabrication sont le néoprène et les toiles tri-laminées et le nylon enduit. Néoprène et toile ont chacun leurs partisans farouche et leurs détracteurs non moins farouche.

7.7.2. Combinaisons en néoprène

Facile à assembler, le néoprène épais (7mm) permet des tarifs plus avantageux que les autres matériaux. Parce qu'il est élastique et naturellement isolant, il dispense de sous-vêtements coûteux, du moins dans les eaux raisonnablement froides, et autorise une coupe près du corps favorable à l'hydrodynamisme. En revanche, c'est un matériau qui travaille à la pression, comme dans le cas d'une combinaison humide pour ne pas flotter aux paliers il faut se lester et la perte du volume en profondeur doit être compensée en gonflant davantage. Le phénomène est d'autant plus sensible que les profondeurs sont grandes, le néoprène épais et sa surface importante. L'écrasement du néoprène lui fait également perdre de son pouvoir isolant. Par ailleurs, les cellules du matériau finissent par se rompre, principalement aux articulations, et laissent passer de l'humidité qui est ensuite longue à évacuer.

7.7.3. Combinaisons en toile tri-laminées

Trois couches, en général une feuille de butyle prise en sandwich entre deux couches de nylon on à l'origine été développées pour l'OTAN comme protection contre les substances chimiques. Le résultat est un produit léger, solide, peu sensible à l'environnement et facilement réparable. Il n'a par contre aucune élasticité et aucune qualité d'isolation, ce sont les sous-vêtements qui assureront la protection thermique. Le fait de devoir accepter ces sous-vêtements impose une coupe plus large, moins hydrodynamique. On peut adapter les sous-vêtements aux températures rencontrées et le vêtement ne subit pas de changement de volume quelle que soit la profondeur atteinte.

7.7.4. Combinaisons en néoprène pré-compressé

Un compromis (encore un) entre les deux types susmentionnées existe, le néoprène pré-compressé. Il s'agit d'un néoprène standard qui est artificiellement écrasé jusqu'à ne plus mesurer qu'environ 4mm. Le résultat est un matériau plus souple que le tri-laminé, presque aussi solide lorsqu'il est revêtu d'une couche protectrice efficace, plus isolant et plus lourd. Il est aussi beaucoup plus difficile à assembler que le néoprène ordinaire, les prix sont donc supérieur aux toiles. Lorsque les sous-vêtements sont nécessaires, ils sont moins épais qu'avec une tri-laminée, la coupe peut-être plus hydrodynamique. Les changements de volumes en profondeur sont faibles.

7.7.5. Les sous-vêtements

Selon la combinaison et la température des eaux plongées, les types de sous-vêtements utilisables sont différents. Les matériaux et épaisseurs disponibles sont nombreux, du simple pyjama à la fourrure polaire multicouche la plus sophistiquée avec revêtement métallisée radiant. Certains comme le *Thinsulate*, présentent l'avantage d'être hydrophobes, ils repoussent l'eau et même en cas d'inondation de la combinaison gardent une part d'isolation (mais ils aiment l'huile, que véhicule la transpiration et demandent à être nettoyés régulièrement suivant la méthode préconisées par leur fabricant). Les tarifs varient eux aussi considérablement, les hauts de gamme dépassent le prix d'une combinaison humide de bonne qualité. D'une manière générale, les vêtements d'une pièce avec élastique de reprise sous les talons et les pouces sont préférables, ils restent en place lorsqu'on enfle la combinaison et ne tirebouchonnent pas durant le palmage. Il est bien sûr possible de porter plusieurs sous-vêtements l'un sur l'autre, c'est le principe du multicouches utilisé en montagne (on retrouve d'ailleurs les même matériaux). Mais contrairement à la montagne, la dernière couche n'est pas respirante, c'est la combinaison, contre laquelle la transpiration condense, il importe de choisir des matériaux la qui garderont aussi éloigné que possible de la peau. Les fibres naturelles ne sont pas les meilleures à ce jeu-là, le coton par exemple peut devenir une véritable horreur.

7.7.6. Les fermetures éclair

Les fermetures éclair sont les pièces maîtresses des combinaisons. Il existe des modèles travers de poitrine ou tour de cou qui permette à un plongeur de s'équiper seul. La majorité reste cependant située dans le dos d'une épaule à l'autre et nécessite l'aide d'un tiers pour être manœuvrée. Pour demeurer étanches, les fermetures doivent être l'objet de toutes les attentions : ne pas les plier, les protéger du sable, les rincer soigneusement, les fermer lentement, les enduire régulièrement de paraffine ou de graisse adaptée (selon les fabricants). Une fermeture étanche coûte cher et son échange demande l'intervention d'un professionnel, raisons supplémentaires de la soigner.

7.7.7. La diurèse

Le confort thermique qu'apportent les combinaisons sèches ne supprime pas la diurèse, qui est également une réaction au corps à l'augmentation de pression. Et là, quand il faut y aller . . . on ne peut pas y aller ! Lors de longues immersions c'est un problème qui peut devenir pénible. Différentes solutions existent pour y remédier. Ne pas boire avant la plonge est la plus mauvaise, la déshydratation est un facteur d'accidents de décompression. Les couches-culottes prévues pour l'incontinence sont aux dires des plongeurs les ayant utilisées une méthode très acceptable, en tout cas beaucoup plus que se tortiller en serrant les dents. Ils préconisent d'uriner un peu souvent plutôt que beaucoup en une seule fois car cela risque de saturer temporairement l'absorbant. La couche-culotte est le seul moyen utilisable par les femmes, puisque la dernière possibilité, la purge pipi (urinator de Dive Rite), est un fourreau pénien relié à l'extérieur par un cathéter et une vanne équipée d'un anti-retour. Ce système impose une découpe de la combinaison ainsi que des installations soignées, notamment en ce qui concerne le routage du tuyau. Il existe pour les femmes des collecteurs d'urine équipés de tuyaux, mais ils sont destinés aux personnes immobilisées sur un lit, peu probable que cela puisse résister au palmage.

7.8. Les instruments

7.8.1. Généralités

Les instruments dont a besoin un plongeur Tech, dépendent essentiellement du profil de plongée, des mélanges respirés et du mode de calcul de la décompression. Une seule règle reste incontournable est la redondance, **2** indicateurs de durée, **2** indicateurs de profondeurs, **2** jeux de tables immergeables (situées pas au même endroit).

7.8.2. L'ordinateur de plongée

Cela peut être une solution dans la mesure où des modèles gérant plusieurs gaz, voire des mélanges ternaires. Actuellement il n'existe sur le marché que 3 ordinateurs capables de gérer plusieurs mélanges à base d'hélium, le VR3, le NiTek X et l'HS Explorer. Cependant, ces appareils ne sont pas à la portée de toutes les bourses. Un ordinateur « Air » ou « Nitrox » peut également servir de profondimètre et de Timer, en tenant compte de la redondance des équipements de mesures.

7.8.3. Le profondimètre

Utilisez des profondimètres redondants qui sont donné pour une profondeur supérieure à la profondeur maximum de plongée et qui affichent avec précision les faibles profondeurs. De préférence, montez les côte à côte aux poignets.

7.8.4. Le timer

Utilisez un instrument de mesure du temps étanche avec un affichage en minutes. Une montre digitale avec un chronographe ou un chronomètre est idéal pour la mesure des temps de palier. Portez votre choix sur l'un d'eux qui ne peut pas être accidentellement arrêté, qui a un cadran phosphorescent et dont les chiffres sont faciles à lire. Le bouton start-stop devrait avoir une bague de protection pour prévenir une activation accidentelle. Une montre qui possède une fonction de temps intermédiaire qui est activé par erreur peut générer des erreurs dans la mesure du temps. Il est impératif de connaître le fonctionnement de sa montre-timer avant de s'engager dans une procédure de décompression puisque l'on en est dépendant. Pour la redondance il suffit d'une montre, d'un timer ou d'un ordinateur mais il est recommandé d'avoir deux instruments semblables.

7.8.5. Résumé

Il y a trois règles qui guident la sélection d'instruments :

- Fiabilité - Les instruments fonctionnent correctement
- Lisibilité - Les instruments sont facilement accessibles et lus
- Redondance - Le facteur crucial de la sécurité en plongée Tech. Si ce n'est pas crucial, débarrassez-vous en, réduisez

7.9. L'éclairage

7.9.1. Généralités

L'éclairage fait partie de l'équipement indispensable en plongée aux mélanges, dès que la profondeur devient importante ou qu'il y a un plafond (épaves, grottes), la lumière du soleil ne suffit plus à observer l'environnement immédiat ou les instruments de plongée. Il faut dans ce cas, s'équiper de phares et de lampes de secours. Quelques règles de base sont à observer :

- L'éclairage, au même titre que le reste de l'équipement à caractère VITAL doit être IMPERATIVEMENT DOUBLE (dans le pire des cas, voir même triple ou plus dans d'autres cas !) et configuré/fixé de manière intelligente, réfléchie et pratique.
- S'entraîner régulièrement à cette configuration afin de la maîtriser et d'en connaître les limites et les défauts, aucun système n'étant parfait. Durant une phase de formation ou lorsqu'on vient d'acquérir un nouvel éclairage, il est important de tester plusieurs configurations sur des plongées d'essai dont c'est le seul but. On n'essaye pas plusieurs équipements nouveaux en même temps (une inconnue à la fois).
- L'éclairage ne sera pas encombrant et laissera les mains libres.
- Son autonomie et sa profondeur maximale d'utilisation seront en rapport avec vos objectifs, avec une bonne marge (exemple : plongée à -75 mètres qui dure 1 heure, prévoir au moins 2 éclairages testés à -100/150 mètres, d'une autonomie de 3 à 4 heures). Ainsi une faiblesse de la lampe (choc), un dépassement du temps et/ou de la profondeur n'affecteront en rien la sécurité en spéléo, épave, plongée ou sortie de nuit.

Plongeur DIR avec son système d'éclairage



7.9.2. L'éclairage principal

Celui-ci sera un phare puissant. On évitera les gros phares à main, d'abord parce qu'ils sont trop encombrants et ne se portent qu'à la main. Leur puissance est, de plus, souvent inutile en plongée Tech. Si on en emmène tout de même un, veiller à l'assurer à la bretelle à l'aide d'une sangle/cordelette et d'un mousqueton, afin d'avoir la possibilité de le lâcher sans le perdre.

On leur préférera des phares avec le bloc accus/batterie séparé de la tête (spot). On peut ainsi fixer ce bloc accus à la ceinture, sur une bouteille relais, sur le harnais ou le scaphandre, sur un côté (position latérale) ou sous l'ensemble harnais/bouteilles, fixé avec des mousquetons ou par des sangles. On portera alors la lampe sur la tête, sur un casque (spéléo) ou sur la cagoule (corailleurs), fixée par des sangles type frontale ou dans une pièce en néoprène collée à la cagoule. Il y a aussi le système main-libre ou la tête de la lampe se trouve sur le dos de la main ou de l'avant-bras, permettant ainsi de se servir de ses doigts (système très répandu chez les plongeurs spéléo US et les plongeurs épaves). Dans tous les cas, certains ensembles ont l'interrupteur sur le spot, d'autres sur le pack batterie. Ce dernier choix permet aussi de prendre plus de puissance, surtout en eau chargée (laiteuse, trouble), car la source est déportée, loin des yeux. Alors que sur le casque, on ne dépassera guère 50 W halogène ou 10 W HID, et encore si l'eau est suffisamment limpide. De toutes manières, il est peu utile de dépasser 100 W en plongée Tech. Dans certains cas, l'éclairage, en mer, ne servira qu'à faire apparaître les couleurs d'une belle branche de corail sur un tombant ou de mieux observer les détails d'une épave profonde.

Pour cet éclairage principal, les lampes halogènes sont de plus en plus remplacées par des lampes HID, qui consomment moins d'énergie (beaucoup plus d'autonomie pour une même batterie) et procurent une belle lumière blanche, proche de celle du soleil. Une lampe HID de 10 W est à peu près l'équivalent d'un spot halogène de 50 W. Enfin, une nouvelle tendance est d'utiliser les LED pour ces phares, technologie autrefois plutôt réservée aux lampes de secours (environ 25 à 40 W maximum).

L'autonomie doit être adaptée à la durée des plongées envisagées. Il est bon de garder une bonne marge en cas d'usure des batteries et/ou de dérive importante du temps de plongée. Se rappeler aussi que l'on est parfois dans l'impossibilité de recharger entre deux ou même plusieurs plongées. L'autonomie de 4 à 8 heures proposé par plusieurs fabricants semble convenir à la spécificité de la plongée Tech.

Si l'eau est trouble, éviter les faisceaux de lumière larges, ils peuvent entraîner un halo, proche du phare, qui peut occasionner plus de gêne que de lumière. De toute manière un faisceau large ne sera utile qu'avec une bonne visibilité. Le faisceau étroit type « pinceau » sera plutôt utilisé en eau chargée ou si l'on veut voir loin devant.

7.9.3. L'éclairage de secours

En cas de mauvais ou non fonctionnement du phare principal, on emportera au moins une lampe de secours en mer ou lac, avec une puissance et une autonomie suffisantes pour lire ses instruments et remonter ou ressortir d'une grotte, de type halogène ou mieux LED (toujours pour les mêmes problèmes d'autonomie, 4 à 6 heures pour un spot halogène et 10 à 30 heures pour un spot à LED).

En spéléo, on a au minimum 2 lampes de secours, jusqu'à 3 ou 4 sur des plongées plus importantes. En Europe, elles sont traditionnellement réparties sur un casque. La tendance nord américaine, DIR, préconise de l'accrocher à la bretelle du harnais, bien plaquée avec des élastiques ou du tuyau chirurgical. Si on doit la prendre à la main rapidement, car on s'est retrouvé subitement dans le noir (votre beau phare HID vient juste de vous lâcher) on risque de trouver le temps long. On peut aussi accrocher une lampe au « cul » du scafandre ou sur une bouteille relais emportée, ou laissée en chemin ou aux paliers (spéléo). N'oubliez pas non plus que certaines lampes ne s'allument plus au delà d'une certaine profondeur, notamment les systèmes rotatifs. Il est donc important de les allumer avant l'immersion. C'est aussi un moyen de vérifier leur bon fonctionnement.

Et d'éviter de se retrouver subitement dans le noir. Si cela n'est pas bien fâcheux sur une plongée à -30 mètres en mer rouge, ce sera beaucoup plus délicat en spéléo ou dans une sombre épave bretonne ou méditerranéenne, couverte de filets à -80 mètres.

On peut enfin utiliser des bâtonnets lumineux à piles ou chimiques (cyalume). Ils peuvent être utilisés à la dernière limite pour suivre un fil ou lire les instruments, ou repérer une ligne de décompression, d'ancre ou les premières bouteilles de sécurité. Un flasheur sera alors peut être préférable.

Lampes de secours Dive Rite



7.9.4. Les batteries

Les batteries sont sans doute l'élément le plus contraignant d'une lampe. Elles doivent être rechargées régulièrement, de ces opérations dépendent leurs performances et leur espérance de vie. Une seule charge ou décharge peut être fatale. Actuellement, il existe 3 familles de batteries qui équipent les lampes de plongée, les batteries au plomb, les batteries au nickel et les batteries au Lithium.

- **Les batteries au plomb**

Du même genre que les batteries de voiture, remplies d'acide gélifiée, pour pouvoir être mises dans n'importe quelle position. Elles sont plus lourdes (ce qui peut remplacer le lest), mais aussi plus volumineuses, ce qui plus encombrant et souvent limitées en profondeur. En revanche, ce sont les moins chères et les plus faciles à trouver, elles se chargent facilement, sans effet mémoire. Elles doivent être chargées régulièrement.

- **Les batteries au Nickel**

Les plus répandus sont les Nickel Cadmium. L'électrolyte est composé d'éléments de 1.2 V. Par exemple, pour une batterie 12 V, 10 éléments sont nécessaires, alors que dans une batterie au plomb, il en faudrait 6. Mais ces 10 composants sont plus petits. On peut donc optimiser leur agencement, l'ensemble est généralement plus léger et prend moins de place. Un inconvénient cependant, lorsqu'on charge le phare, sans l'avoir totalement déchargé, il ne prendra par la suite qu'une fraction de sa capacité maximum, réduisant considérablement l'autonomie. Il est donc préférable de décharger complètement le phare avant sa recharge. C'est l'effet mémoire. Tout a un prix, et celui de ce type de batterie est sensiblement plus élevé que pour les batteries au plomb. Enfin le cadmium est un composant très polluant. Pour éviter ce désagrément, de nouvelles batteries sont sorties sur le marché, les batteries au nickel-hydrure-métallique (Ni-MH). Ils sont donc plus propres, sans effet mémoire, et à taille égale, d'une capacité supérieure de 30 à 40% et plus onéreux.

- **Les batteries au Lithium**

Ses principaux avantages sont une densité d'énergie spécifique et volumique élevée (4 à 5 fois plus que le Ni-MH) ainsi que l'absence d'effet mémoire. Enfin, l'auto-décharge est relativement faible par rapport à d'autres batteries. Cependant le coût reste important et cantonne le lithium aux systèmes de petite taille. Ce type de batterie fonctionne sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive, le plus souvent un oxyde de métal de transition lithié et une électrode négative en graphite. L'emploi d'un électrolyte aprotique (un sel LiPF₆ dissous dans un mélange de carbonate) est obligatoire pour éviter de dégrader les électrodes très réactives. La tension d'un élément est de 3.6 V. Le lithium commence à apparaître sous de nouvelles versions : Le lithium-ion polymère (Li-po), encore très chère mais peut être très fine et prendre toutes les formes), et le lithium-phosphate qui possède une sécurité améliorée pour un coût plus faible.

Tableau des caractéristiques des accumulateurs

Caractéristiques	Plomb	Nickel cadmium	Nickel Métal hydride	Lithium-ion	Lithium Ion Polymère
Symboles	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion	Li-po
Année commercialisation	1850	1950	1990	1991	1999
Cycles de vie	200 à 300 h	1500 h	300 à 500 h	500 à 1000 ou 2 ans	200 à 300 h
Charge / décharge					
Tension nominal/élément	2 V	1.2 V	1.2 V	3.6 V	3.7 V
Capacité nominale maximale	4000 Ah	1500 Ah	18 Ah	4.5 Ah	1.6 Ah
Stockage long	Chargé	Déchargé	Chargé	Chargé 40%	Chargé 40%
Tolérance à la surcharge	Oui	Moyenne	Très faible	Nulle	Très faible
Sensible à l'effet mémoire	Non	Oui	Non	Non	Non

De h. en b. Lampe Hartenberger Ni-Mh avec lampe halogène

Lampe Dive-Rite Pb avec lampe HID

Lampe GreenForce Ni-Mh avec lampe LED

Lampe de secours GreenForce lithium avec lampe LED



7.9.5. Les lampes

Le choix dépendra essentiellement des facteurs comme la solidité, la qualité de la lumière, la puissance, la durée de vie, l'application (photo, vidéo, spéléo, etc.). Actuellement, il existe 3 « famille » de lampes, halogène, HID et LED.

- **Lampes halogène**

Une lumière bien blanche, tant que les accus ont leur pleine puissance, puis plus jaune, lorsque la puissance décline, ce qui est un bon indicateur sur le fait que vous allez bientôt tomber en rade. Ce n'est pas le cas avec les HID. Un prix réduit, en regard du HID ou des LED. En revanche, une durée de vie de l'ampoule moins importante que LED et HID (50 à 200 heures maximum) et une consommation d'énergie supérieure à ses 2 « concurrentes ».

- **Lampes HID (High Intensity Discharge)**

Ampoules à décharge de gaz sans filaments internes, issues de l'aéronautique. Consommation énergétique de 25 % de sa puissance (en moyenne), ce qui donne une autonomie très intéressante avec une même batterie. Durée de vie moyenne 300 à 1000 heures. Bonne résistance électrique et mécanique. Lumière ultra blanche d'environ 6000 degré kelvin. 10 W HID = 50 W halogène. Attention, avec ce type de lampe il faut tenir compte des précautions suivantes :

➤ Ils émettent de puissants rayons ultra violets, il ne faut jamais diriger son faisceau lumineux vers l'œil. On risque de lui provoquer de graves lésions. Il faut être donc particulièrement prudent lors des plongées en binôme ou en groupe à ne pas diriger sa lampe sur un tiers. Facile avec une main libre, beaucoup moins lorsque les éclairages sont sur casque.

➤ Ils chauffent beaucoup. Pour éviter des risques d'incendie dû à la surchauffe, veiller à ce que la lampe ne soit jamais allumée à la surface, surtout par inadvertance. L'idéal est de l'allumer au début de l'immersion, et de l'éteindre, lors des paliers, ou de la sortie de la grotte en spéléo. Faire bien attention au type d'interrupteur lors de l'achat, sa qualité, fiabilité, protection éventuelle contre l'auto-allumage.

➤ Eviter de fréquents allumages/arrêts car ce type d'ampoule nécessite un temps de chauffe et un temps de refroidissement. (Ex : 5 minutes entre l'allumage et l'arrêt, puis une minute entre arrêt et remise en route).

- **Lampes LED (Light Emitting Diode)**

Sans doute le meilleur rapport qualité/prix/efficacité/autonomie avec une grande solidité électrique et mécanique et une très faible consommation d'énergie. Durée de vie moyenne de 50'000 heures. Température d'environ 6'000 degrés kelvin. Généralement utilisés entre 10 et 40 W.

Caractéristiques	Halogène	HID	LED
Résistance mécanique	moyenne	faible	élevée
Durée de vie	200 heures	1000 heures	50'000 heures
Prix	moyen	élevé	élevé
Consommation	élevée	moyenne	basse
Température	3000 à 4000 K	6000 K	5000 à 6000 K
Précaution allumage	non	oui	non

7.10. Le matériel collectif

7.10.1. Le narguilé oxygène

Utilisé lors de plongées profondes, ce système évite d'emporter un stock important de gaz. Généralement la bouteille d'oxygène est installée sur le bateau ou est immergée et maintenue par une bouée. Il est constitué de plusieurs deuxième étages qui flottent à -6 mètres fixés au pendeur ou à la barre de palier. Ces détendeurs doivent être faciles à respirer pour les plongeurs, mais pas trop car ils risquent de fuser dans le courant.

- **Débits continus**

On peut mettre un capuchon sur chaque deuxième étage ou une petite bague anti-débit continu dotée d'une position ouvert-fermé.

- **Fixation**

Le narguilé peut être fixé au pendeur lesté par une série de mousquetons espacés à intervalles réguliers. Cela permet au narguilé de coulisser librement et d'être facilement utilisé à -6 et -3 mètres.

- **Rinçage à l'air**

Une bouteille d'air au pendeur permet un rinçage régulier à l'air afin d'éviter les désagréments rencontrés lors de respiration prolongées d'oxygène pur (pneumotoxicité).

- **Sanglage**

Les détendeurs peuvent être équipés de sangles de maintien afin de diminuer la fatigue de la mâchoire lors de longs paliers. En cas d'hyperoxie, il y a également moins de risque d'entrée d'eau dans les voies aériennes.

- **Masques faciaux**

Ils permettent d'effectuer les paliers avec une meilleure isolation thermique et éventuellement de la communication sous-marine, par ailleurs ils limitent le risque de noyade en cas d'hyperoxie. Citons au passage, les rares chanceux qui ont la possibilité d'effectuer leur décompression au sec dans une cloche. Un tel appareillage apparaît timidement en plongée sportive, l'investissement financier et les contraintes logistiques étant tels que cela reste réservé qu'à des opérations ponctuelles et lourdes pour l'instant.

C'est également le cas pour les caissons de recompression gonflables qui permettent un traitement immédiat sur site en cas d'accident de décompression.

7.10.2. La trousse de premiers secours

- Oxygène pur (minimum 4 litres) ou système semi-fermé permettant le recyclage de l'oxygène expiré (Wenol)
- Trousse de premiers secours
- Eau potable (2 litres par personne)

7.11. Les accessoires et divers

7.11.1. Les couteaux

« L'expérience d'un plongeur est inversement proportionnel à la longueur de son couteau » Fort de ce principe, nombre de plongeurs débutants clament à tout vent qu'il y a longtemps qu'ils n'emportent plus de couteaux. Grand bien leur fasse, mais pour ceux qui tiennent avant tout à ne pas finir prisonniers d'un filet de pêche ou d'un câble électrique, un instrument de coupe est indispensable. Les sécateurs ont eux fait leurs preuves en plongée spéléo. Rien de mieux pour couper d'une seule main un fil détendu. Les modèles à enclume (une lame est aiguisée et tranche, l'autre qui lui est opposée est plate et sert d'appui) sont les plus efficaces, un sécateur à lames croisées (type ciseau) laisse souvent passer le fil entre les deux lames sans le couper. On trouve des sécateurs en acier inox dans les rayons jardinage et outillage de la plupart des magasins de bricolage. Si l'on doit couper des orins de forts diamètres, un sécateur n'est pas l'outil idéal (à moins d'être de taille adaptée). Un couteau à lame crantée lui est supérieur, qui, s'il dispose d'une extrémité plate et d'un démanilleur, peut rendre de nombreux services, notamment lors de l'installation ou de la récupération d'un mouillage immergé. Faut-il emmener un couteau et un sécateur ? Pourquoi pas, les couteaux à lame repliable occupent peu de place, mais une fois de plus ce sont les réalités des plongées qui dictent l'outil à privilégier. Un autre instrument est parfois proposé, le z-knife, cet instrument n'a pas son pareil pour trancher des fils à la volée, en dehors de cet usage il n'a guère d'emplois. L'intérêt d'un instrument de coupe est d'être facilement accessible, une gaine de mollet ne l'est pas, surtout lorsqu'on évolue avec plusieurs blocs de décompression. On peut fixer un couteau ou un sécateur sur l'avant bras, aux bretelles ou à la ceinture du harnais à l'aide de tubes chirurgicaux. Certains modèles sont livrés avec des gaines adaptables au harnais. Tous les couteaux, les sécateurs et les pièces inox rouillent plus ou moins en usage marin, c'est une oxydation de surface, un trempage dans un bain d'acide phosphorique leur rend très vite l'éclat du neuf.

De g. à d. Z-Knife, sécateur et couteau conventionnel



7.11.2. L'ardoise

Accessoire d'apparence anodine est en réalité fort utile au fond pour dessiner le plan d'une épave et communiquer avec d'autres plongeurs et avec la surface. Il permet surtout au d'avoir rapidement le plan de sa décompression (généralement imprimé sur une feuille plastique indéchirable). Plusieurs modèles sont disponibles, entre l'ardoise traditionnelle, à ranger dans une poche ventrale du harnais ou dans une poche cousue sur la combinaison, et l'ardoise courbe qui se fixe sur l'avant-bras du plongeur, tout est une affaire de goût.

7.11.3. Le tuyau chirurgical

La chambre à air a été progressivement remplacée par le tuyau chirurgical dont les utilisations peuvent être infinies. Fixé autour d'une bouteille, il permet de ranger les tuyaux qui traînent (tuyau long, détendeur, parachute, etc...). D'un diamètre plus petit, il devient sangle de cou permettant d'avoir le détendeur accroché, prêt à l'emploi et facilement détachable. Il peut enfin servir à fixer ou à maintenir en place couteau ou cisaille, manomètre et tuyau annelé de la bouée.

7.11.4. Les mousquetons

Ils se déclinent en multiples modèles, fixes, tournants, simples, doubles, à doigt pivotant ou coulissants. Le choix est affaire de goût, de montage et de disponibilité, à un détail près : les doigts pivotants (appelés type mer ou marine clip) ont tendance à capturer tout seul les fils qui passent à leur portée puis à les retenir fermement. Cela peut ne pas sembler gênant en mer, ça peut pourtant le devenir dans une épave où traînent cordages, fils électriques et vieux filets. Les marines clips sont intéressants lorsqu'il s'agit d'accrocher un cordage à la volée. Les doigts coulissants (appelés type spéléo ou cave clips) sont adaptés davantage de cas de figure. La taille des mousquetons sera guidée par la dextérité du plongeur. Les veinards qui plongent sans gants en eau tropicale pourront se contenter des plus petits modèles. Les porteurs de mouffles auront intérêt à viser les grandes tailles. Dans tous les cas les doigts coulissants se révèlent plus facile à décrocher que les pivotants. Dernier choix possible, inox ou laiton. L'inox est plus beau et plus solide, le laiton est beaucoup moins cher, demandera tout de même un bel effort pour être cassé et ne rouille pas non plus.

De g. à d. Swivel Bolt, Swivel Butterfly, Double Bolt, Boat clip



7.11.5. Le dévidoir

Ariane, jouvencelle crétoise éprise d'un aventurier athénien du nom de Thésée, se servit d'une pelote de fil pour éviter de se perdre dans un labyrinthe abritant un dangereux criminel connu des services de police de l'époque, sous le nom de Minotaure. Une fois le monstre tué, il ne restait plus qu'à commercialiser cette idée simple à l'usage de tous ceux qui s'aventurent dans des couloirs sinueux et mal fléchés.

Quelques millénaires plus tard, le principe fut repris, et amélioré, par les amateurs de plongée spéléo et d'épaves sous-marine. Le dévidoir était né. A priori rien de plus simple qu'un dévidoir : une bobine de fil plus ou moins épais et plus ou moins solide, enchâssée dans un cadre métallique ou plastique facilitant sa manipulation. En réalité, le dévidoir a de multiples usages en plongée, aussi bien au fond que lors de la remontée, non seulement lors de plongées sous plafond mais aussi lorsque la visibilité est limitée ou qu'il y a du courant. Petit tour d'horizon.

- **Le premier usage : le fil d'Ariane**

Les dévidoirs se déclinent en une grande variété de modèles, suivant qu'ils sont fermés, ouverts, ou qu'ils contiennent une plus ou moins grande longueur de fil. Certains servent à dérouler un fil qui servira à retrouver la sortie, d'autres, plus courts, à faire la jonction entre deux fils déjà installés.

En plongée épave, il est rare d'avoir besoin d'un dévidoir de 250 mètres, l'encombrement devenant alors un handicap. Par contre, pour ceux qui souhaitent entrer dans une épave (et en ressortir !), le dévidoir est un accessoire indispensable bien que peu employé. Une cursive, un escalier et quelques coups de palmes soulevant les sédiments suffisent à s'en convaincre. Les quelques secondes nécessaires à sa manipulation valent réellement la peine. Mais le dévidoir sert également lorsqu'il n'y a pas de plafond mais que la visibilité est réduite. Il sert à rester en contact avec le mouillage au fond et à pouvoir le retrouver sans hésitation en fin de plongée. Il permet d'explorer les alentours sans avoir à se soucier exagérément de l'orientation. Même par visibilité réduite, le plongeur est ainsi en partie libéré d'un souci : celui de s'assurer de remonter au mouillage, retrouvant ainsi une bouteille de secours ou un narguilé.

- **Le second usage : le parachute de palier**

Dès que le plongeur doit effectuer des paliers de décompression, il doit faire face à différents problèmes. L'idéal est bien sûr de remonter le long du mouillage ou d'une bouée mais cela n'est pas toujours facile ou possible. Vient alors la délicate situation du palier en pleine eau :

1. La profondeur d'un palier doit être exacte et constante durant toute sa durée.
2. S'il y a du courant, la dérive peut être si importante qu'il devient nécessaire d'emporter son passeport avec soi.
3. Le trafic des bateaux en surface exige que le plongeur se signale autrement que par ses simples bulles (et que dire de ceux qui utilisent un recycleur).

Dans ces cas là, le parachute de palier est un allié précieux. Pour qu'il soit bien gonflé et qu'il se dresse fièrement en surface, mieux vaut le remplir le plus tôt possible durant la remontée afin que la dilatation de l'air remplisse son office. Cela ajouté au fait que les paliers se font à différentes profondeurs, il devient nécessaire d'avoir un fil le plus long possible, sans pour autant courir le risque de s'emmêler dedans (ce qui permet de ne pas s'ennuyer au palier). La solution réside dans le dévidoir, qui fournit toujours la longueur de fil nécessaire.

- **Le souci de la dérive, 2 techniques sont alors possibles**

On accroche l'extrémité du fil d'Ariane à un point fixe au fond (morceaux d'épave, roche pointue, etc...). On remonte alors en déroulant le fil. On contrôle ainsi sa vitesse de remontée et sa profondeur d'immersion, mais on n'a pas de parachute de signalisation. Une fois arrivé en surface, on découvre avec consternation qu'il ne reste plus qu'à couper le fil d'Ariane utilisé, sans espoir de le récupérer.

On fait une boucle avec une petite cordelette (sans valeur, même sentimentale) que l'on accroche sur un point fixe au fond et l'on passe l'extrémité du fil d'Ariane dedans. Puis on accroche normalement le parachute de palier que l'on envoie en surface. Il ne reste plus qu'à dévider progressivement le fil pour se retrouver aux profondeurs de palier désirées. Une fois en surface, on détache le parachute et on enroule l'intégralité du fil sur le dévidoir. Pas de gâchis (sauf la cordelette, restée au fond). L'inconvénient est qu'il faut avoir sur le dévidoir, plus du double de la profondeur à laquelle on plonge. Dans un cas comme dans l'autre, le dévidoir sur un point fixe permet de lutter contre les effets du courant et de ressortir à seulement quelques mètres du point désiré.

- **Troisième usage : les techniques annexes**

Avoir sur soi un bout de longueur réglable peut s'avérer fort utile dans bien des situations. Cela permet par exemple de mesurer assez précisément une distance ou un objet sous l'eau. Pour cela, le mieux est d'avoir gradué le fil d'Ariane au préalable, de 3 mètres en 3 mètres par exemple. Ainsi cela peut aussi servir de point de repère au palier, en cas de défaillance du profondimètre.

Le dévidoir et le parachute peut également être utilisé pour baliser un objet ou une épave que l'on aurait trouvé sous l'eau, afin d'en noter la position exacte une fois de retour en surface. Autre utilisation : le fil d'Ariane peut servir de longe pour garder le contact avec son binôme si la visibilité est très réduite. On s'en sert alors à la manière d'une laisse réglable pour les chiens.

Différents types de dévidoirs



7.11.6. Le parachute

Accessoire indissociable du dévidoir, le parachute sert à signaler aux navires de surface la présence de plongeurs qui se rapprochent de la surface. Pour cela le parachute doit être de couleur visible (orange ou jaune) et suffisamment haut sur l'eau pour dépasser des crêtes formées par la houle. Le parachute peut également être utilisé lorsqu'on perd en partie ou en totalité son moyen d'équilibrage, on peut se tracter sur le parachute, un fil de bon diamètre et pas trop élastique est alors appréciable et les formes de poires sont meilleures à ce jeu-là que les formes de tubes. A volume égal, tous les parachutes ne sont pas identiques. Certaines caractéristiques peuvent améliorer grandement leur confort et leur facilité d'utilisation, il existe 3 types de parachutes, à savoir :

- **Le parachute de relevage**

En toile épaisse et rigide, équipé de purges, il est d'un volume dont l'hectolitre est l'unité de base. Assez encombrant, seuls les petits modèles peuvent servir aux paliers.

- **Le parachute de signalisation (les tubes)**

Les petits parachutes modèle « tubes » ont généralement un volume très réduit mais leur forme est visible de loin. Par mer formée, c'est une bonne solution, mais ce type de parachute est néanmoins difficile à envoyer profond, ayant tendance à se vider de son air durant la remontée. Les tubes deviennent maintenant disponibles dans des volumes sérieux (50 litres). Ils ont toutefois tendance à remonter en feuille morte et cela de manière d'autant plus marquée qu'ils sont longs, une raison supplémentaire de les choisir fermés.

- **Le parachute de palier (les poires)**

Le plongeur Tech, lourdement lesté par son matériel, est parfois ravi de se suspendre à son parachute pour effectuer confortablement ses paliers, en se maintenant à une profondeur idéale quelles que soit les conditions en surface. Il est nécessaire d'avoir un parachute d'une flottabilité suffisante (minimum 50 litres) et de le gonfler le plus possible (d'où l'intérêt de le gonfler au fond). Ce type de parachute oppose le plus de résistance à l'enfoncement, en revanche, bas sur l'eau, il est moins visible en surface que le tube de 1.5 à 2 mètres. Ils offrent aussi des volumes plus importants (dés 120 litres ou plus).

De g. à d. parachute tube, poire, poire avec alim. intégrée et parachute scubaba



- **Gonflage**

La plupart se gonflent de manière classique par le détendeur, d'autres ont une prise mâle de direct-system, d'autres encore intègrent une toute petite bouteille. L'inflation par bouteille séparée est également très pratique, la contrainte est le remplissage de la bouteille et son entretien (les blocs des Fenzy ont laissé des souvenirs).

- **Rangement**

On peut embarquer le parachute en le fixant sur un bloc à l'aide du tube chirurgical, certaines marques (Halcyon, Dive Rite) proposent une pochette occupant l'espace inutilisé entre le dos du plongeur et sa plaque. D'autres livrent leurs parachutes dans un fourreau qui se fixe au harnais. Certains relient à l'avance dévidoir et parachute et fixent l'ensemble sur un bloc relais ou dorsal, cela épargne une manœuvre lors du déploiement.

- **Le clapet anti-retour**

Ce système empêche le parachute de se dégonfler en arrivant en surface, il est réalisé à l'aide de becs de canard ou de systèmes de contre-cône et de clapet.

- **Couleur**

Elle doit permettre de le repérer facilement en surface, même par mauvaise mer. Orange ou jaune sont des couleurs à privilégier. Certains plongeurs emportent même 2 parachutes de couleurs différentes, l'un signifiant que tout va bien et l'autre signifiant un problème. Selon les recommandations de la CMAS, couleur orange = tout va bien et couleur orange et jaune (sur même ligne) = urgence.

8. Recycleurs

8.1. Introduction

Tout le matériel évoluant avec les progrès techniques, il en est de même du matériel pour la plongée Tech. Parmi toutes les évolutions possibles, les recycleurs sont pour beaucoup une solution particulièrement avantageuse aux problèmes de l'encombrement et de l'autonomie. En effet, les CCR (Closed Circuit Rebreather) ou les SCR (Semi Closed Rebreather) ont un tout autre fonctionnement que les scaphandres conventionnels à circuit ouvert, alors pourquoi gâcher du gaz à chaque expiration alors qu'on pourrait le réutiliser après recyclage ?

8.2. Fonctionnement

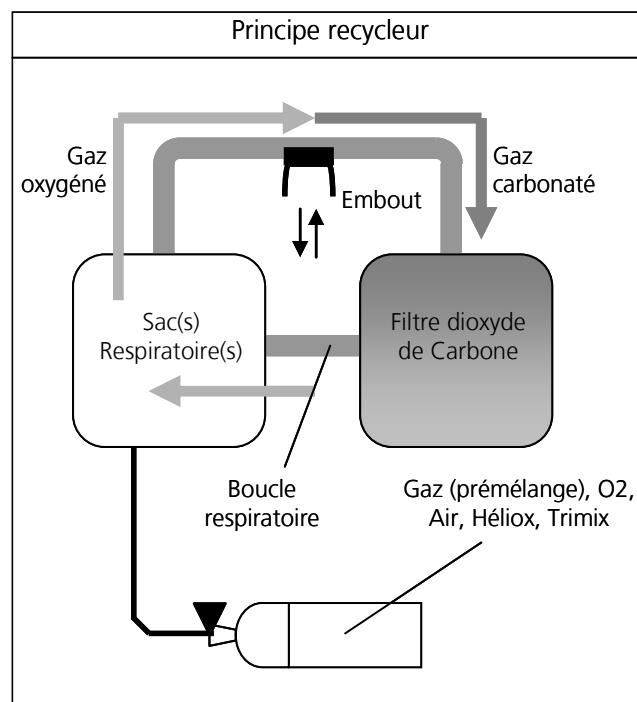
8.2.1. Généralités

Il est utile de se rappeler le mécanisme d'un scaphandre traditionnel pour comprendre comment un recycleur fonctionne. Les appareils de plongée disponibles sur le marché sont presque tous classés dans la catégorie "circuit ouvert". Ce type de matériel a d'abord été mis à la disposition des plongeurs loisirs par Jacques-Yves Cousteau, le plongeur respire un gaz comprimé à partir d'un détendeur. Les gaz expirés sont évacués sous forme de bulles à chaque respiration, d'où le terme "circuit ouvert". De par sa construction, le circuit ouvert n'est pas performant car le métabolisme du plongeur utilise seulement une petite partie du gaz respiré (env. 4%), d'où un immense gaspillage d'oxygène à chaque respiration. De plus, la quantité d'oxygène perdue de cette façon augmente avec la profondeur. En fait, un recycleur est un appareil qui recycle le ou les gaz que nous lui donnons à recycler et pour bien comprendre l'intérêt et le principe de fonctionnement de ces machines, faisons un rapide rappel de notions physiologiques.

Nous respirons un mélange composé de 21% d'oxygène et de 79% d'azote (diluant l'oxygène). La ventilation s'effectue chez l'adulte à un rythme d'environ 12 cycles/minutes au repos et peut atteindre 25 cycles/minutes au cours d'un effort intense. Une simple mesure à l'aide d'un analyseur d'oxygène indique que nous rejetons 17% d'oxygène à chaque expiration. Cette valeur est considérable car elle représente 80% de l'oxygène disponible. L'intérêt de réutiliser ces 17% est connu depuis toujours par les secouristes et les concepteurs de recycleurs. De son côté, le dioxyde de carbone produit du métabolisme doit être évacué sous peine de devenir nocif. Sa production est estimée à environ 80% de celle de la consommation d'oxygène (soit 0.8 litres/min de dioxyde de carbone produit pour 1 litre/min d'oxygène consommé). Rappelons que c'est le taux de dioxyde de carbone détecté dans l'organisme qui déclenche la ventilation. L'azote (ou d'autres diluants) n'intervient pas dans les échanges gazeux, mais nous devons en tenir compte lors de la décompression.

8.2.2. Les éléments d'un recycleur

Tous les recycleurs ont cependant des éléments en commun, les conceptions commencent toutes avec une boucle respiratoire équipée d'un embout qui permet au plongeur de respirer. Si l'ensemble de la boucle respiratoire était fabriqué dans un matériau rigide, le plongeur ne serait pas capable de respirer : le gaz expiré ne pourrait s'évacuer, et le plongeur ne serait pas capable d'inspirer (par analogie, tentez d'inspirer et d'expirer dans une bouteille de soda). Il doit donc y avoir une sorte de sac souple, relié à la boucle respiratoire, qui se gonfle lorsque le plongeur expire et qui se dégonfle lorsque le plongeur inspire. Ce sac se comporte, et c'est un terme assez approprié, comme un faux poumon. Si le plongeur continuait à inspirer et expirer à partir de cette boucle respiratoire, la quantité de dioxyde de carbone expiré par le plongeur atteindrait rapidement des seuils dangereux.



8.2.3. Le processus de filtration

La boucle respiratoire doit donc inclure également un absorbant de dioxyde de carbone. Chaque fabricant propose sa propre solution en fonction de la performance recherchée. La plupart de ce qui est couramment appelé chaux sodée est en réalité composé d'hydroxyde de sodium (env. 5%), d'hydroxyde de calcium (env. 80%) et d'eau (env. 15%), qui récupère et élimine le dioxyde de carbone du gaz expiré. Attention, certains produits ont un inconvénient majeur, ils produisent de la soude en présence d'eau, d'où le terme de «cocktail caustique». Ces éléments ont toutefois la particularité de réagir en présence de gaz acides comme le dioxyde de carbone. Une réaction exothermique se produit alors en plusieurs étapes et transforme le dioxyde de carbone en élément stable pour le fixer. Le dioxyde de carbone réagit avec l'eau présente dans l'absorbant et la vapeur d'eau provenant de l'expiration pour donner de l'acide carbonique.

La performance de la réaction diminue avec la faible température extérieure, c'est une des raisons pour laquelle il est conseillé de respirer plusieurs minutes dans le recycleur avant son utilisation. On prend ainsi l'habitude de « chauffer » la chaux pour démarrer le processus chimique. Il y a ensuite 2 étapes qui s'exécutent en parallèle.

- L'hydroxyde de sodium réagit avec l'acide carbonique pour donner du carbonate de sodium et de l'eau tout en dégageant de la chaleur. C'est la raison pour laquelle avec un recycleur on respire un mélange tiède et humide. C'est un élément de confort non-négligeable en comparaison avec un circuit ouvert où l'on respire un mélange froid et sec.
- L'hydroxyde de calcium réagit avec l'acide carbonique pour donner du carbonate de calcium (craie) et de l'eau tout en dégageant de la chaleur.

Evidemment, la seule cartouche d'absorbant de dioxyde de carbone ne saurait permettre au plongeur de respirer indéfiniment, l'oxygène de la boucle respiratoire étant consommé par le métabolisme du plongeur. Le recycleur doit donc être pourvu d'un dispositif permettant d'injecter de l'oxygène dans la boucle respiratoire afin de conserver le plongeur en vie. Par ailleurs, et simplement pour empêcher le plongeur de respirer le gaz qu'il vient juste d'expirer, le recycleur doit être conçu de telle sorte que le gaz respiré ne puisse circuler que dans un seul sens dans la boucle respiratoire. Cela se réalise généralement à l'aide de soupapes amont et aval positionnées de chaque côté de l'embout, le gaz inspiré ne peut donc venir que d'une seule direction, et le gaz expiré ne peut se rendre que dans la direction opposée. La vanne de fermeture de l'embout est un autre dispositif commun à la plupart des recycleurs et qui permet d'empêcher l'eau d'inonder la boucle respiratoire en cas de retrait de l'embout en plongée.

Plongeur DIR avec ses bouteilles relais et son recycleur passif Halcyon



8.2.4. Les avantages des recycleurs

En général, les recycleurs, et en particulier les CCR à gestion électronique, offrent 3 avantages fondamentaux par rapport au circuit ouvert traditionnel : une meilleure optimisation de l'utilisation du gaz, une décompression optimisée, et un fonctionnement pratiquement sans bruit.

- **Optimisation du gaz**

L'avantage le plus significatif du CCR (et dans une moindre mesure, le SCR) est qu'il augmente de manière importante l'optimisation du gaz. Normalement, un plongeur utilise seulement une petite fraction de l'oxygène inspiré. Lorsque le plongeur expire, la quasi-totalité de l'oxygène quitte les poumons sans avoir été consommée. Lorsque l'on utilise un scaphandre traditionnel, l'oxygène et les autres composants du gaz expiré sont évacués sous forme de bulles. Avec l'augmentation de la profondeur, l'inefficacité d'un circuit ouvert est encore accentuée : du fait de l'augmentation de pression à des profondeurs supérieures, beaucoup de molécules de gaz sont perdues à chaque expiration. Inversement, un recycleur, récupère la majorité ou la totalité du gaz expiré, le traite, et le renvoie au plongeur. Dans le cas du SCR, il n'y a presque pas de bulles expirées. Il n'y a pas de modifications liées à cette optimisation du gaz lors d'évolutions à des profondeurs plus importantes. Ainsi, plus la plongée est profonde, plus l'avantage est du côté des recycleurs (d'un point de vue de l'optimisation des gaz). Par exemple, une bouteille de plongée ordinaire contient assez de gaz pour qu'une personne moyenne puisse respirer pendant environ une heure et demi au repos en surface. La même bouteille durera seulement 45 min. à -10 mètres, et moins de 10 min. à -90 mètres. Mais si cette même bouteille était remplie d'oxygène et utilisée pour alimenter un recycleur circuit fermé, le plongeur pourrait théoriquement rester sous l'eau pendant 2 jours – indépendamment de la profondeur !

- **Optimisation de la décompression**

Cet avantage ne s'applique qu'aux CCR à gestion électronique et mécaniques, pas aux CCR à oxygène pur ni aux SCR. Les CCR à oxygène pur sont limités à des profondeurs où la décompression n'est pas un problème. La raison pour laquelle cela ne s'applique qu'aux CCR et pas aux SCR est relative aux différences de dynamiques du gaz respiré dans ces deux types de recycleurs. Comme décrit précédemment, les SCR maintiennent, plus ou moins, un pourcentage constant d'oxygène dans le gaz respiré, alors que les CCR maintiennent une pression partielle constante d'oxygène dans le gaz respiré. Tout au long de la plongée, le CCR maintient la concentration d'oxygène du gaz respiré à sa valeur maximale respirable. Cela signifie que la part du gaz respiré qui n'est pas de l'oxygène (celle qui impose une décompression), est réduite à son minimum. Cela permet au plongeur de rester plus longtemps pour un temps de palier équivalent ou de faire moins de palier pour un temps de plongée équivalent.

- **Silence**

Lors de l'expiration, un plongeur avec un équipement conventionnel rejette une quantité importante de bulles bruyantes. L'effet produit sur les habitants du monde sous-marin est variable, mais dans la plupart des cas, les poissons ont un comportement craintif et ils se refusent à laisser approcher un plongeur de trop près. Les SCR réduisent la quantité de bulles expirées, et les CCR l'éliminent entièrement. Avec les recycleurs, les plongeurs sont capables d'approcher la faune marine de beaucoup plus près tout en perturbant significativement moins leurs habitudes. Cela est particulièrement important pour la capture de spécimen et pour les activités photographiques.

8.2.5. Les inconvénients des recycleurs

Tous les types de recycleurs ont leur propre complexité. Ils induisent de nouvelles formes de risques que les plongeurs en circuit ouvert n'ont jamais rencontrés. La différence fondamentale entre un circuit ouvert et un recycleur est qu'en scaphandre, si un plongeur peut respirer et qu'il n'est pas en dehors des limites de profondeurs recommandées, le gaz respiré va le maintenir en vie (à condition que sa bouteille soit correctement remplie). S'il y a un problème avec le scaphandre, il est généralement assez évident, le plongeur en a connaissance et il peut prendre la bonne décision.

- **Discipline et entraînement**

Avec les recycleurs, la composition du gaz respiré peut être modifiée dynamiquement, et, au cours de la même plongée, la concentration d'oxygène peut s'éloigner de la plage d'utilisation normoxique. Dans le cas de recycleurs oxygène, si la boucle n'est pas correctement rincée avant la plongée, la quantité d'azote qui demeure dans le gaz respiré peut devenir excessive. Avec les recycleurs oxygène à ajout passif, il est possible que le plongeur respire tout l'oxygène présent dans la boucle avant que la soupape d'injection ne se déclenche, laissant ainsi seulement de l'azote. Dans le cas des recycleurs SCR, la concentration en oxygène dans la boucle dépend du niveau d'exercice effectué par le plongeur. Dans certaines conditions, spécialement lors d'efforts importants et/ou lors d'une remontée, la concentration en oxygène dans un SCR peut chuter à des seuils dangereusement bas. La faiblesse inhérente aux circuits fermés réside dans la confiance que l'on accorde à l'électronique pour contrôler la teneur en oxygène de la boucle respiratoire. Chaque photographe sous-marin le sait, l'électronique et l'eau (particulièrement l'eau salée) ne font pas bon ménage. En fait, les circuits fermés, ont acquis une réputation de non-fiabilité, largement due aux problèmes de contrôle de l'oxygène par l'électronique (ce qui conduit à trop ou trop peu d'oxygène dans la boucle). La plupart de ces problèmes peuvent être évités en rinçant correctement le recycleur avec de l'oxygène pur avant la plongée, en ajustant avec précaution le débit du gaz disponible, en rinçant la boucle avec du gaz frais avant d'entamer la remontée et en intégrant une ou plusieurs sondes oxygène dans les appareils à circuit fermés. Malheureusement, les symptômes liés à l'hypoxie et à la toxicité de l'oxygène ne peuvent pas être considérés comme des signes fiables et annonciateurs de la syncope. Il est donc de la responsabilité du plongeur de s'assurer en permanence, et méthodiquement, de la viabilité du mélange gazeux qu'il va respirer dans la boucle. Ce niveau de contrainte requiert une grande dose de discipline et d'entraînement. Ainsi les plongeurs en recycleur doivent dédier plus de temps à l'entretien de leur équipement que les plongeurs en circuit ouvert. De plus, les recycleurs sont généralement des produits plus compliqués que les équipements circuits ouverts, ce qui explique pourquoi ils demandent plus d'entraînements.

- **Coûts**

Un autre inconvénient des recycleurs est leur coût. Même les recycleurs de conceptions basiques peuvent coûter plusieurs milliers de francs, certains recycleurs à circuit fermé sophistiqué peuvent coûter jusqu'à 15'000 dollars ou plus. Cependant, après l'acquisition, les dépenses courantes ne sont pas significativement plus importantes que celles d'un scaphandre conventionnel surtout si on utilise le recycleur avec d'autres gaz que l'air (l'hélium par exemple). Un aspect non-négligeable est de convaincre son conjoint de l'utilité à acheter de telles machines, c'est comme la plongée Tech, à chacun sa technique.

8.3. Les types de recycleurs

8.3.1. Généralités

Il existe différents types de recycleurs actuellement utilisés par les militaires, l'industrie, la plongée loisir et plongée Tech. Malgré cela, tous les recycleurs ont tous un même but et doivent répondre aux 3 exigences suivantes :

- Récupération du gaz expiré
- Fixation du dioxyde carbone produit par l'organisme
- Ajout d'oxygène pour compenser celle métabolisée par l'organisme

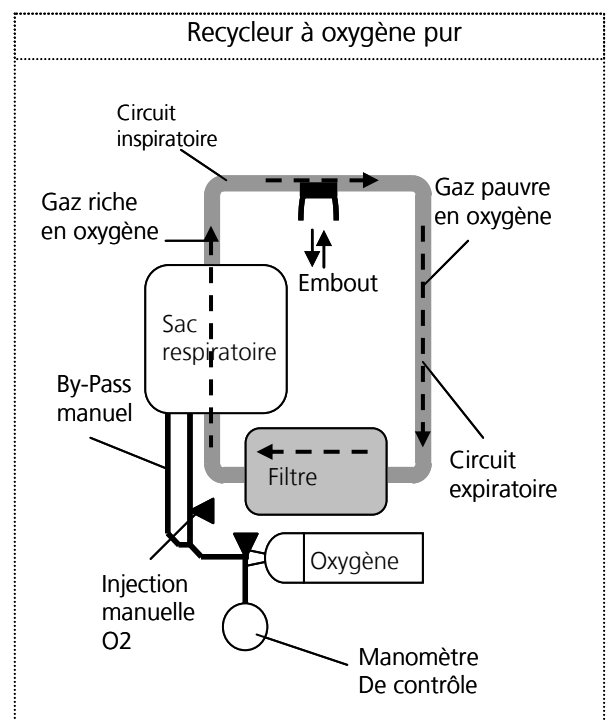
La différence fondamentale entre les 5 types de recycleurs (voir tableau ci-après) est la manière dont ils ajoutent du gaz dans la boucle respiratoire, et contrôlent la fraction d'oxygène dans le gaz respiré. Certains recycleurs sont inclassables, comme le RI2000 d'Olivier Isler (CH) par ailleurs il est possible pour certains d'appartenir à plusieurs catégories, le Submatix qui modifié, peut très bien s'utiliser en SCR (version ST et XT) avec un Nitrox ou en CCR (version SMS) avec un HélioX ou un Trimix pour les zones profondes.

Familles	Circuits fermés (CCR)			Circuits semi-fermés (SCR)	
	Types	Electronique	Mécanique	A oxygène pur	A injection massique
Gaz	Diluant et oxygène séparés	Diluant et oxygène séparés	Oxygène pur	Pré-mélange	Pré-mélange
Principes de fonctionnement	Injection d'O ₂ automatique. L'électronique maintient une valeur prédéterminée de PO ₂ . L'injection du diluant est en général manuelle	Injection continue d'O ₂ à un taux proche de la consommation moyenne du plongeur avec injection complémentaire si surconsommation d'oxygène	Recycleur ventral. Pendulaire : Un seul tuyau respiratoire et 2 passages dans le filtre Cyclique : deux tuyaux et un seul passage dans filtre CO ₂	Injection continue d'un mélange suroxygéné à un débit dépendant du mélange	2 faux poumons concentriques. (1 grand avec 1 petit à l'intérieur) Le petit faux poumon est rempli à chaque expiration, et purgé à chaque inspiration
Avantages	Grande autonomie Gestion optimale des gaz Décompression optimisée	Simplicité et fiabilité Décompression optimisée	Grande autonomie Faible encombrement et maintenance Robuste et simple	Facile, peu de surveillance Modulaire pour plongées au Trimix et/ou HélioX	Tout est mécanique, analyseurs oxygène inutiles
Inconvénients	Surveillance régulière PO ₂ Dépendant de l'électronique et des sondes oxygène	Mauvais rendement et consommation beaucoup de gaz	Faible profondeur (hyperoxie)	Consomme beaucoup de gaz (15 litres/min en Nitrox 32) Autonomie limitée	Mauvais rendement et consommation beaucoup de gaz Confort respiratoire dépendant de la position
Modèles	INSPIRATION EVOLUTION OUROBOROS PRISM TOPAZ MEGALODON OPTIMA CIS LUNAR CCR 2000	KISS SUBMATIX SMS EDO 08 COPIS REVO 2 VOYAGER	CRESSI ARO FROGS OMG CASTORO DRAEGER LAR III,V,VI IDA57, 64, 76	DRAEGER Leba57 RAY, DOLPHIN AZIMUTH UBS40 SUBMATIX ST, XT IDA 72, AKA60	DC55 MIXGERS HALCYON RB80 EDO 04

8.3.2. Le CCR à oxygène pur

Le CCR à oxygène pur est le système de recycleur le plus simple, et constitue une base de discussion pour des systèmes plus élaborés. Un recycleur oxygène est constitué des éléments de base décrits plus haut, avec en alimentation une bouteille d'oxygène pur pour compenser l'oxygène consommé par le plongeur. Certains recycleurs oxygène ajoutent de l'oxygène dans la boucle respiratoire à un débit constant qui est calculé pour être très proche de celui consommé par le métabolisme. Cependant, du fait d'efforts physiques, la quantité métabolisée par le plongeur peut évoluer pendant le déroulement de la plongée. En conséquence, un tel système d'ajout actif est susceptible d'ajouter trop d'oxygène pendant les périodes de faible activité (et donc un gaspillage du gaz de la boucle), et/ou pas assez d'oxygène pendant les périodes de travail intense (et donc l'obligation pour le plongeur d'ajouter de l'oxygène par une vanne manuelle). Beaucoup de recycleurs oxygène intègrent un système d'ajout passif, par lequel l'oxygène est ajouté dans la boucle à un rythme correspondant au métabolisme du plongeur. Une méthode simple permet de déclencher l'ajout du gaz à l'aide d'une valve mécanique actionnée lorsque le faux poumon est complètement aplati. Au fur et à mesure que le métabolisme du plongeur transforme l'oxygène en dioxyde de carbone et que le dioxyde de carbone est éliminé par la chaux de l'absorbant, le volume total de gaz dans la boucle respiratoire diminue. Il arrive un moment où une inhalation profonde du plongeur videra complètement le faux poumon (qui se replie sur lui-même), actionnant ainsi la valve mécanique qui injecte de l'oxygène. Le risque lié au recycleur oxygène est qu'il est impératif de rincer la boucle avec de l'oxygène pur avant le début de la plongée. Si une quantité suffisante d'autres gaz

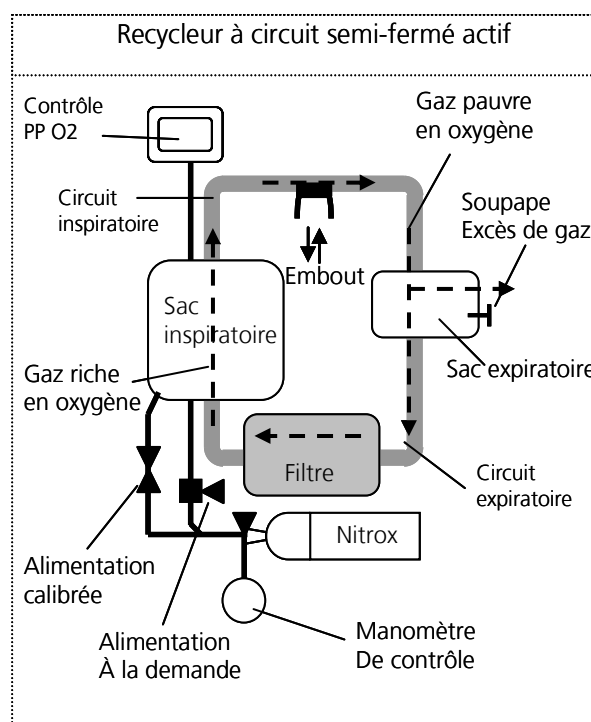
est présente dans la boucle, le plongeur risque l'hypoxie (quantité insuffisante d'oxygène) avant que le repli du faux poumon ne soit suffisant pour actionner la valve mécanique d'ajout d'oxygène. D'un point de vue conceptuel, les recycleurs à oxygène pur sont très simples car ils ne demandent pas un système élaboré de contrôle d'oxygène. Ils sont cependant également très limités dans leurs possibilités du fait de la toxicité de l'oxygène (excès d'oxygène) qui s'avère dangereux au-delà d'une profondeur de 6 mètres. Pour pouvoir descendre en toute sécurité à des profondeurs plus importantes, le mélange de la boucle respiratoire doit être composé d'autres constituants que de l'oxygène pur (par exemple de l'azote ou de l'hélium). On rencontre de tels recycleurs aux mélanges avec les recycleurs SCR et CCR.



8.3.3. Le SCR actif (recycleur à circuit semi fermé à débit massique constant)

Conceptuellement, identique au recycleur à oxygène pur, excepté que le gaz fourni est un mélange au lieu de l'oxygène pur. Le gaz est généralement injecté dans la boucle respiratoire à un débit massique constant. Cela signifie que quelle que soit la profondeur, un même nombre de molécules de gaz est introduit dans la boucle pendant une période de temps donnée. Le débit d'injection de ces systèmes doit être ajusté en fonction du pourcentage d'oxygène du gaz disponible, de telle sorte que le taux d'oxygène dans la boucle soit identique ou dépasse celle du plongeur. Comparé au CCR à oxygène pur, le SCR actif permet au plongeur de descendre à des profondeurs plus importantes sans risque important de toxicité liée à l'oxygène. L'inconvénient provient du fait que la partie de gaz disponible qui n'est pas de l'oxygène (azote, hélium ou les 2) est également ajoutée dans la boucle respiratoire à un taux constant. Cet autre gaz n'étant pas consommé par le plongeur continue de s'accumuler dans la boucle. Pour empêcher la conséquence évidente de l'augmentation de volume, cet excès de gaz doit être périodiquement évacué de la boucle. Dans l'idéal, seul le composant non oxygène du gaz respiré serait évacué de la boucle, réservant ainsi l'oxygène pour la consommation du plongeur. Etant donné que le gaz de la boucle est plus ou moins bien mélangé, une partie du gaz évacué est de l'oxygène (gaspillage). Un autre problème est que tout d'abord, la valeur du pourcentage d'oxygène de la boucle se situe quelque part en dessous du pourcentage d'oxygène du gaz fourni. Cela s'explique par le fait que le plongeur élimine plus rapidement l'oxygène de la boucle que ne sont éliminés les autres gaz du mélange. Par ailleurs, l'oxygène est ajouté dans la boucle à un taux constant mais cette consommation varie avec l'effort. Elle peut varier dans un facteur de 6

(conditions normales), et jusqu'à 10 (conditions extrêmes). Ces variations influent sur l'importance du décalage entre la fraction d'oxygène dans le gaz fourni et la fraction d'oxygène dans le gaz respiré. Afin de réduire le risque d'hypoxie, le pourcentage d'oxygène dans le gaz disponible et le débit auquel il est injecté dans la boucle doit être suffisamment important pour répondre aux besoins du plongeur lors d'efforts soutenus. Plus le pourcentage d'oxygène dans le gaz disponible est élevé, plus la profondeur est limitée à cause du risque de toxicité de l'oxygène pendant les périodes de faible activité. Par ailleurs, plus le taux d'injection du gaz est important, plus l'autonomie en gaz est réduite (gaspillage plus important). Devant la variabilité (habituellement imprévisible) des besoins en oxygène pour le plongeur et devant l'incapacité de le compenser, les SCR actifs sont fondamentalement inefficaces comparés à d'autres types de recycleurs.



8.3.4. Le SCR passif (recycleur à circuit semi-fermé à fuite proportionnelle)

Moins courants que les SCR à débit massique constant et afin de compenser leurs principaux défauts (manque d'autonomie et différence entre PO_2 présente dans la boucle et celle du mélange embarqué), le système d'ajout passif est une approche différente dans la conception des SCR. Ces modèles tentent d'ajuster le taux auquel le mélange fourni est ajouté dans la boucle pour coller au plus près des besoins du métabolisme du plongeur. La façon la plus simple pour réaliser cet ajustement en temps réel est de calquer le taux d'injection du gaz sur la fréquence respiratoire du plongeur. On élimine donc au rythme de la ventilation le dioxyde de carbone produit par l'organisme, donc plus on fait d'efforts, plus on ventile et plus on élimine.

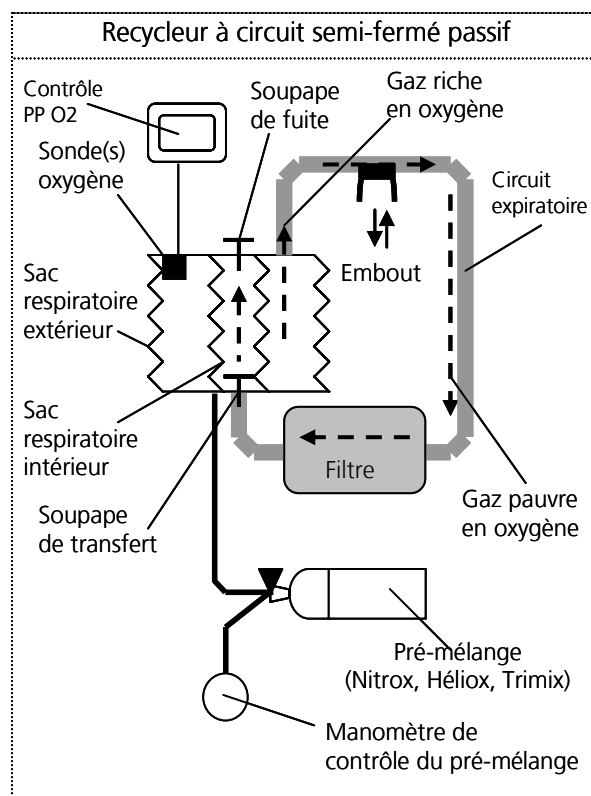
On dénomme ce système « passif » car l'ajout de gaz n'est pas automatique, il déclenché de manière mécanique par la ventilation, les SCR passifs fournissent du gaz frais à la demande. Par ailleurs, les SCR passifs offrent un autre avantage important comparé au SCR actifs, il est moins sujet à généré une hypoxie. La moindre défaillance du système demandera au plongeur des inspirations rapprochées qui seront rapidement détectées.

Avec ce type de recycleur une quantité de gaz proportionnelle au volume respiratoire est injectée dans la boucle à chaque ventilation, on ne renouvelle qu'une quantité du gaz présent dans la boucle. Un avantage de cette conception apparaît immédiatement, celui de l'autonomie. De plus, la quantité de gaz renouvelée reste constante quelle que soit la profondeur. Sa valeur correspond au rapport entre le volume renouvelé divisé par le volume total des faux poumons. La valeur de ce rapport est décidée par les constructeurs. Il

est appelé le taux de renouvellement ou « constant volume ratio » chez les anglosaxons. Plus le taux de renouvellement est élevé, plus la PO_2 dans la boucle est stable. Ces mêmes constructeurs doivent faire un choix, lorsqu'ils établissent ce ratio, entre la stabilité de la PO_2 dans la boucle et l'autonomie souhaitée.

Exemple : avec un taux de renouvellement de 25 %, lorsque le plongeur respire en surface avec un débit de 20 l/min, le système injecte 5 l/min de gaz frais et élimine 5 L/min de gaz vicié.

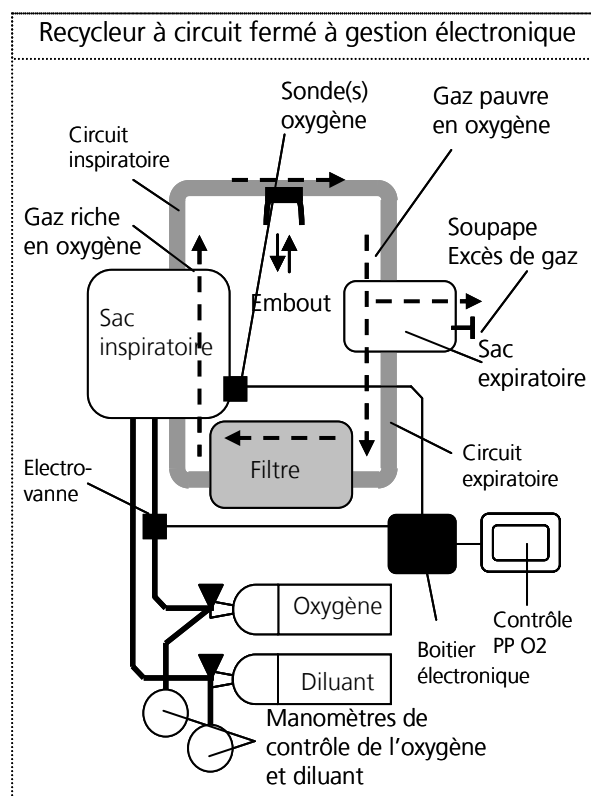
A une profondeur de 30 m (4 bars), le système injecte la même proportion ($\frac{1}{4}$) soit 20 l/min (puisque le plongeur respire maintenant 4×20 l/min, soit 80 l/min). Or, en conservant le même ratio, la quantité de molécules d'oxygène fournie en profondeur au plongeur est inévitablement beaucoup plus importante. Ce type de recycleur perd donc un peu de sa performance (autonomie) en profondeur.



8.3.5. Le CCR à gestion électronique

Comme les SCR, les CCR à gestion électronique fonctionnent avec des mélanges, permettant de descendre à des profondeurs bien supérieures à ce que ne peuvent le permettre les recycleurs à oxygène pur. Cependant, il y a plusieurs différences importantes et fondamentales avec les SCR. La première différence est la façon dont l'oxygène est ajouté dans la boucle. Alors que les SCR injectent de l'oxygène avec d'autres gaz, les CCR disposent d'au moins deux sources de gaz indépendantes. L'une contient de l'oxygène pur, injecté dans la boucle pour remplacer l'oxygène consommé par le plongeur. L'autre source de gaz est appelée le diluant. Il est habituellement composé d'air comprimé ou d'un mélange spécial comme un Nitrox, un HélioX ou un Trimix. Le diluant contient généralement assez d'oxygène pour être respiré directement à la profondeur d'évolution de la plongée à partir d'une bouteille équipée d'un détendeur. Cette source de gaz est utilisée pour maintenir un volume dans le système lors d'évolutions à des profondeurs supérieures où le volume de gaz dans la boucle se trouve comprimé. Dans certains recycleurs, le diluant est aussi utilisé comme source de gaz de secours en circuit ouvert pour répondre à un dysfonctionnement total de l'appareil. La seconde différence importante entre les CCR et SCR est la façon dont les deux systèmes maintiennent le pourcentage d'oxygène dans la boucle. Alors que la plupart des SCR maintiennent (plus ou moins) un pourcentage constant d'oxygène tout au long de la plongée, les recycleurs à circuits fermés maintiennent une pression partielle d'oxygène relativement

constante (PO_2) dans la boucle. Pour y parvenir, tous les CCR intègrent des capteurs électroniques d'oxygène qui surveillent la PO_2 dans le gaz respiré. Dans la plupart des cas, les CCR intègrent également un système de contrôle électronique de l'oxygène qui ajoute de manière automatique l'oxygène lorsque la PO_2 descend en dessous d'un seuil prédéfini (ce seuil est appelé le "Set-point" de PO_2). Comme on le verra ci-dessous, les CCR ont des avantages et des inconvénients comparés aux circuits ouverts et aux SCR. Toutes ces technologies de plongées ont des incidences importantes.



8.4. Le marché des recycleurs

8.4.1. Généralités

Ils tiennent la vedette depuis quelques années et la situation était jusqu'à présent bien confuse. Cela change, on peut penser que la longue mutation entre appareil militaire et appareil de plongée sportive est maintenant terminée, que la technologie se fige peu à peu et que les appareils aujourd'hui en démonstration seront là pour au moins cinq ans. Les 2 technologies principales (SCR et CCR) sont bien représentées. De plus, dans chaque technologie, on trouve les différentes variantes connues : par exemple le SCR à débit massique ou à déverseur, sac respiratoire en poitrine ou sac dans le dos, etc... Il y a même, pour chaque type, la possibilité de choisir entre un appareil haut de gamme avec gestion de la décompression incorporé et un appareil d'approche simplifié à l'extrême. De nombreux fabricants se sont penchés sur les recycleurs, certains ont affichés leurs prototypes, des modèles comme le SCR de Mares sont tenus en réserve, d'autres enfin sont encore secrets ou à l'état de projet. Aucun ne peut se permettre de rester absent d'un segment du marché a priori plein d'avenir. D'ores et déjà, des organismes de formation de plongée Tech (CMAS.CH, TDI, IANTD, TSA, GUE, ANDI, etc...) organisent des formations agréés par les fabricants pour l'utilisation de ces appareils.

8.4.2. Le marché des SCR

Voici une sélection des appareils actuellement sur le marché mondial. Abordables et plus simple à utiliser que les CCR. La liste n'est pas exhaustive et s'enrichira probablement dans l'avenir.

- **Le DOLPHIN**

Appareil allemand mis au point par Dräger qui a su profiter de son expérience militaire pour adopter le FGGIII et en faire l'Atlantis puis le Dolphin. Ce recycleur est devenu un matériel de référence mais commence à prendre de l'âge. Il utilise des mélanges Nitrox via 3 buses d'injection interchangeables. Bouteille de secours latérale et gilet incorporé. Options possible avec analyseur Oxy2 d'Uwatec et de l'Aladin Air X O₂.



- **Le RAY**

Le petit frère du Dolphin, ce recycleur simple est construit autour d'une enveloppe de gilet qui fait office de poumons. Configuration simple (chaux 1.5 kg, buse d'injection Nitrox 50). Alimentation par bouteille acier de 4 litres. Bail out intégré. Livré en standard avec oxymètre électronique.



- **L'ASYMUTH**

Appareil italien mis au point par OMG agréé CE dérivé d'un appareil militaire, simple entièrement mécanique et d'une grande souplesse d'utilisation, le réglage du débit se fait à l'aide d'une vis micro-métrique qui permet de définir le débit idéal en fonction de la richesse du mélange et de la consommation métabolique envisagée. La version AF avec 2 circuits indépendants (2 bouteilles de 10 litres avec (Nitrox + Trimix) permet une utilisation au-delà de 40 mètres. Son petit frère existe sous le nom d'UBS40.



- **L'HALCYON**

Appareil américain mis au point par Jack Kellon et conçu spécialement pour la plongée spéléo. Fonctionnant selon le principe de la fuite proportionnelle. La particularité du soufflet et qu'il est lesté pour minimiser l'influence de la position du plongeur. Cet appareil a été rendu célèbre par les plongées de Georges Irvine de l'équipe du WKPP. Formation uniquement dispensée par GUE, attention ça taxe !



- **L'EDO 04**

Appareil suisse mis au point par STDE (Swiss Technical Diving Equipment) simple et entièrement mécanique, le système est composé de 2 sacs respiratoires concentriques. A l'expiration les 2 sacs se remplissent avec le gaz expiré, tandis qu'à l'inspiration le contenu du sac intérieur est expulsé dans l'eau grâce à un système de soupape alors que le contenu du sac extérieur reste dans le circuit. Le gaz ainsi expulsé est remplacé automatiquement lorsque le sac arrive en bout de course et appuie sur une tige d'injection de gaz. Il existe un modèle à injection continue (type KISS), l'EDO 08 à flux massique constant.



- **Le SUBMATIX 100 ST et 100 XT**

Appareil allemand agréé CEE fonctionnant sur le même principe que les machines Dolphin et Ray utilisant le principe de buse à débit constant. Machine entièrement carénée composé de 2 blocs de 2 litres, d'un sac respiratoire dorsal et d'une cartouche de chaux au centre de 1.8 Kg. Appareil évolutif avec la version XT qui permet l'utilisation de 2 gaz prémélangés (1 x mélange fond et 1 x mélange déco).



- **L'UBS 40**

Appareil Italien développé par OMG pour la plongée loisir contrairement à son grand frère l'ASYMUTH. Compact, léger, ergonomique, il est conçu pour faciliter son utilisation et éviter les erreurs de montage. L'injection se fait manuellement par une robuste manette métallique fixée au stab. Il peut fonctionner avec des Nitrox allant de 32 à 60%. Pas d'injecteur à changer, il suffit de régler une molette intégrée à la manette d'injection et de la caler selon le Nitrox utilisé.



Types	Injection du mélange	Sacs respiratoires	Mélanges utilisés	Limite Prof.	Capacité filtre	Remarques
DOLPHIN	Débit massique par buse calibrée	2 dans le dos sous le carénage	Nitrox 32, 50 et 60	- 40 m	3 h	Option analyseur Oxy2
RAY	Débit massique par buse calibrée	2 sur la poitrine et 1 dans le dos	Nitrox 50	- 20 m	1.5 h	Option analyseur Oxy2
ASIMUTH	Groupe d'injection + manuel	2 dans le dos sous le carénage	Nitrox Trimix (AF)	- 40 m - 140m (AF)	3 h	
HALCYON	Renouvellement par fuite proportionnelle	1 dans le dos, monté en soufflet	Nitrox et Trimix	- 100 m	6 h	
EDO 04	Renouvellement par fuite proportionnelle	1 dans le dos, monté en soufflet	Nitrox et Trimix	- 40 m	8 h	Architecture redondante possible
UBS 40	Groupe d'injection + manuel	2 dans le dos sous le carénage	Nitrox 32 à 60	- 40 m	4 h	
SUBMATIX 100 ST	Débit massique par buse calibrée	1 dans le dos	Nitrox 32, 40, 50, 60, 80	- 40 m	3 h	Couplé avec ordinateur VR2
SUBMATIX 100 XT	Débit réglable manuel	1 dans le dos	2 Nitrox à choix	- 66 m	3 h	Couplé avec ordinateur VR2

8.4.3. Le marché des CCR

Voici une sélection des appareils actuellement sur le marché mondial. On constate également une diversité et évolution significative des recycleurs de ce type. Beaucoup de progrès ont été réalisés depuis le PHIBIAN d'OCEANIC ou le CIS-LUNAR de Bill Stone. Pour les frileux des modèles à gestion électronique, de nombreux modèles basés sur le principe KISS sont disponibles (COPIS, VOYAGER, rEvo).

- **L'INSPIRATION**

Appareil anglais conçu par AMBIANT PRESSURE et Dave Tomphson. Commercialisé depuis 1998 c'est devenu le recycleur à gestion électronique le plus vendu au monde. Le système utilise 2 contrôles indépendants (valeur PO_2 , check-list automatique, gestion intelligente des sondes d'oxygène, alarme sonore). Un appareil très complet et accessible. C'est le premier appareil de ce type à être agréé CE.



- **L'EVOLUTION**

Version légère de l'INSPIRATION, plus petit au niveau de la taille de l'appareil, du volume des bouteilles et de la capacité du filtre. L'évolution principale réside au niveau de la console (Vision incluant 2 ordinateurs sur 1 seule console) avec contrôles des batteries et de la température de la chaux. De plus, un logiciel de décompression basé sur le modèle à GF (facteurs de gradient) peut être intégré au système. Il est également agréé CE.



- **L'OPTIMA**

Appareil américain conçu par DIVE RITE et les organismes de formation TDI et IANTD est un recycleur de conception identique à l'INSPIRATION (prêt à plonger) avec bouteilles oxygène et diluant intégré. 2 contrôles indépendants (valeur PO_2 et ordinateur pour la décompression intégré) et ADV. L'épurateur consiste en une cartouche Extended Air placée judicieusement derrière la tête du plongeur (résistance respiratoire diminuée).



- **Le MEGALODON**

Appareil américain conçu par INNER SPACE SYSTEMS CORP. Adaptabilité, modularité et fiabilité sont ce qui caractérisent le plus le « MEG » Possibilité de choisir le type d'épurateur (axial, radial) en fonction des besoins. 2 contrôles indépendants (valeur PO_2 , charge batterie, voltage sondes, température canister). Une purge basse permet de purger le circuit en cas d'inondation et les 2 compartiments batteries sont étanches évitant toute émanation de gaz toxiques. Il existe une version mécanique du MEG basée sur le principe KISS. Le « COPIS » extérieurement identique au « MEG » pour 5'500 Euros. Micro fuite à 0.5 l/min complétée par une gestion manuelle de PO_2 (1 seule console).



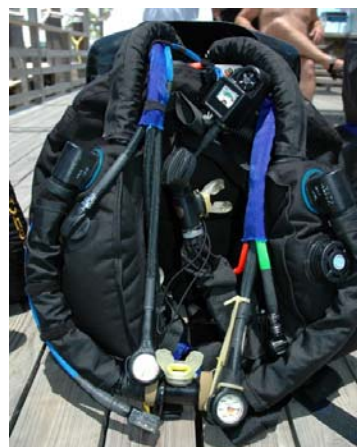
- **Le VOYAGER**

Appareil Italien conçu par AQUATEK, basé sur le principe KISS avec gestion manuelle de PO_2 avec possibilité de redondance. Ce recycleur est utilisé par le célèbre plongeur profond Pascal Bernabé. Il semble des progrès sont encore à réaliser au niveau processus de fabrication (recycleurs identiques sortant de fabrique). Il existe plusieurs modèles Voyager Sport, Voyager Tek, Voyager Redondant, Voyager V1 et V2,



- **Le PRISM TOPAZ**

Appareil américain conçu par STEAM MACHINE INC et Peter Ready. Architecture classique avec 2 faux-poumons à l'avant et 2 unités de contrôle des valeurs PO_2 , température chaux et dispositif HUD sur l'embout.



- **L'OUROBOROS**

Appareil anglais conçu par DELTA P TECHNOLOGY et Kevin Gurr. L'OUROBOROS ou « BORIS » pour les intimes est certainement la Rolls-Royce des recycleurs à gestion électronique (12'000 Euros). Architecture particulière car l'ensemble du système (faux-poumons, cartouche de chaux et ordinateur) se trouvent dans le dos protégé par un capot en carbone (excusez du peu). Toutes les connexions sont réalisées en tuyaux inox, l'épurateur est de type radial circulaire d'une capacité de 6h et les tuyaux de la boucle respiratoire sont issus de l'aéronautique. La gestion des paramètres usuels est réalisée par 2 consoles indépendantes (1 primaire contrôlant PO_2 , décompression, alarmes et l'autre indiquant simplement la PO_2) et 1 HUD.



- **Le SUBMATIX 100 SMS**

Evolution de la version 100 XT en CCR, cet appareil est entièrement mécanique (principe KISS) ou l'oxygène est réglé par débit constant (vanne KISS) et le diluant par un Bypass. C'est actuellement le seul appareil utilisable en France. Des améliorations ont été apportées par rapport au modèle de base (faux-poumons, tuyaux). Possibilité d'y ajouter une sonde avec VR3 et 1 HUD.



- **Le rEvo II**

Appareil belge entièrement mécanique (principe KISS) ou l'oxygène est réglé par débit constant (vanne KISS) et manuel et diluant par ADV. 2 afficheurs de PO_2 et HUD. Ce recycleur utilise un système ingénieux muni de double filtre (1.4 kg/filtre) pour optimiser l'utilisation de la chaux. Le hic reste la profondeur maximale d'utilisation (-80 mètres).



- **Le CIS-LUNAR MK5P**

Appareil américain conçu par Bill Stone est le seul recycleur à gestion électronique avec architecture redondante adaptée à la plongée spéléo utilisée par les meilleurs plongeurs Tech américains dont Richard Pyle. Gestion des paramètres usuels (PO_2 , décompression) avec possibilité de commuter rapidement d'un circuit à l'autre et passage sur circuit ouvert à l'aide d'un commutateur. POSEIDON a semble-t-il repris la fabrication et commercialisation du CIS-LUNAR.



- **Le KISS**

C'est avant tout un concept plutôt qu'un modèle d'appareil. Conçu par Gordon Smith, KISS veut dire Keep It Simple Stupid (gardez cela simple et stupide). Le principe de base est que le plongeur est entièrement responsable du contrôle du niveau d' O_2 dans son circuit respiratoire. L'oxygène est réglé par débit constant (vanne KISS) et le diluant par un Bypass. Si la profondeur varie, le plongeur peut ajouter de l' O_2 et du diluant au moyen d'un injecteur manuel.



- **Le CCR 2000**

Appareil américain conçu par Dan Wible c'est une version commerciale d'un appareil anciennement utilisé par l'US Navy (Mk15 et 15.5). Mis au point pour des professionnels susceptibles d'intervenir à grande profondeur. 2000 signifie en pieds la limite de ce recycleur (testé à 60 bars). Il semble que cet appareil ne soit plus commercialisé.



Types	Injection du mélange	Sacs respiratoires	Mélanges utilisés	Limite profondeur	Capacité filtre	Remarques
INSPIRATION	Electro-vanne commandée par 3 sondes d'O ₂	2 sur l'avant, en poitrine	Air Héliox Trimix	- 150 m	3 h	Gestion déco en option (Vision) Norme CE
EVOLUTION	Electro-vanne commandée par 3 sondes d'O ₂	2 sur l'avant, en poitrine	Air Héliox Trimix	- 150 m	3 h	Gestion déco intégré au système Norme CE
OPTIMA	Electro-vanne commandée par 3 sondes d'O ₂	2 sur l'avant, en poitrine	Air Héliox Trimix	nc	3 h	Gestion déco intégré au système
MEGALODON	Electro-vanne commandée par 3 sondes d'O ₂	2 sur l'avant, en poitrine	Air Héliox Trimix	> 200 m	4 h	Choix type épurateur (radial, axial)
COPIS	Micro fuite + injection manuelle	2 sur l'avant, en poitrine	Air Héliox Trimix	nc	Selon configurations	Choix type épurateur (radial, axial)
VOYAGER	Micro fuite + injection manuelle	2 sur l'avant, en poitrine	Air Héliox Trimix	nc	Selon configurations	Second circuit en option
PRISM TOPAZ	Electro-vanne commandée par 3 sondes d'O ₂	2 sur l'avant, en poitrine	Air Héliox Trimix	- 100 m	4 h	
OUROBOROS	Electro-vanne commandée par 3 (4) sondes d'O ₂	2 dans le dos	Air Héliox Trimix	- 200 m	6 h	Gestion déco intégré au système
SUBMATIX 100 SMS	Micro fuite + injection manuelle	2 dans le dos	Air Trimix	- 100 m	3 h	Gestion déco en option Norme CE
rEvo II	Micro fuite + injection manuelle	2 dans le dos	Air Trimix	- 80 m	3 h	Filtre longue durée en option
CIS LUNAR MK5	Electro-vanne commandée par 3 sondes d'O ₂	2 sur l'avant, en poitrine	Air Héliox Trimix	-152 m	4-12 h	2 circuits Indépendants commutables
KISS	Micro fuite + injection manuelle	Dépend de la configuration	Air Héliox Trimix	nc	Selon configurations	
CCR 2000	Electro-vanne commandée par 3 sondes d'O ₂	2 dans le dos	Air Héliox Trimix	nc	nc	Gestion déco intégré au système

8.4.4. Conclusion

Le développement de la plongée Tech passera indéniablement par les recycleurs. Que ce soit de type SCR ou CCR, ils offrent des capacités opérationnelles impressionnantes (silence, autonomie, gestion des gaz, optimisation de la décompression). La technique est connue et maîtrisée depuis longtemps par les constructeurs, le frein au développement de ces machines est souvent d'ordre financier.

Mais, ATTENTION, ces machines offrent de telles possibilités qu'on aurait tendance à aller au-delà de ses propres limites. Bien souvent des accidents mortels rappellent à l'ordre ceux qui ne respectent pas les procédures et la technique de plongée liée à l'utilisation de ces machines. La maîtrise de celles-ci doit se faire avec rigueur, étape par étape dispensée par des organismes reconnus et compétents.

9. Conclusions

Les conclusions que l'on peut dégager de ce recueil sont que la préparation d'un plongeur loisir pour l'amener à planifier et effectuer des plongées autonomes en circuit ouvert ou en recycleur contenant des mélanges synthétiques à base d'hélium, nécessite une solide formation théorique, pratique ainsi qu'un entraînement régulier.

Ce type particulier de plongée implique de la part de celles et ceux qui veulent la pratiquer une remise en question fondamentale sur les risques encourus et les conséquences souvent graves résultant d'accidents. La plongée Tech en circuit ouvert et/ou recycleur impose des investissements humains, matériels et financiers importants.

Ces nouvelles techniques sont amenées à se développer encore durant de nombreuses années. Le matériel, la formation et les techniques évolueront afin de nous permettre de pratiquer ce type de plongée avec le minimum de risques mais surtout avec **le maximum de plaisir !!!**

Nous souhaitons à vous, plongeuses et plongeurs, de pouvoir un jour utiliser ces techniques qui amélioreront de façon certaine la sécurité en plongée profonde aux mélanges.



10. Bibliographie et liens Internet

10.1. Bibliographie

- Plonger aux mélanges, Henry Juvenspan, Chistian Thomas, Ulmer, 1997.
- Plongée profonde et plongée technique, Cedric Verdier, Amphora, 2001.
- Nitrox Trimix, Jacques Vettier, Ulmer, 2003.
- La plongée Nitrox & Extended Range, Denis Sirven, TDI, 1996.
- Cours Nitrox avancé, John Simenon, TDI, 1997.
- Revues Octopus, Horizons Marine, Paul Poivert.

10.2. Liens Internet

10.2.1. Organisations

www.tdisdi.com
www.iantd.com
www.wkpp.org
www.gue.com
www.techdiver.com
www.tsaeurope.com
www.cmas.ch

10.2.2. Matériel Tech

www.vr3.co.uk
www.omsdive.com
www.dive-rite.com

10.2.3. Recycleurs

www.customrebreathers.com
www.halcion.net
www.omg-italy.it
www.apdiving.com
www.apvalves.com
www.jetsam.ca

10.2.4. Logiciels décompression

www.abysmal.com
www.nautilusdiveplanner.com
www.aquanaute.com
www.divevoyager.com
www.gap-software.com
www.hhssoftware.com

10.2.5. Divers

www.octopus-fr.com
www.subsport.ch
www.bubnotbub.com

11. Remerciements

Un remerciement tout particulier à Aldo Ferrucci instructeur Trainer TDI à Cavalaire et à Daniel Germanier instructeur Trainer TDI et CMAS de Sub-Sport à Neuchâtel pour leur aides techniques apportée à la création de ce recueil.

Merci enfin à nos femmes, nos amies, nos enfants qui acceptent les risques que nous prenons, qui acceptent nos théories parfois un peu bizarres, et qui nous laissent le temps de pratiquer et partager la plongée Tech.

Plongeur recycleur CCR prêt à plonger, respire bien Bob et n'oublie pas de penser à ta femme !!!



Areuse, le 16 juillet 2007