

# LA DÉCOMPRESSION

## ASPECTS THEORIQUES ET PEDAGOGIQUES



Mémoire présenté par Bernard SCHITTLY  
MF2 N° 1318

*En vue de l'obtention du titre d'  
Instructeur Régional*

*Avril 2007. Correction janvier 2016 en bleu*

## PREFACE

Lorsqu'on veut s'attacher à développer un ouvrage sur la plongée, un nombre incalculable de dilemmes se posent... parmi ceux-ci : à quel genre de lecteurs le texte sera-t-il adressé ? Faut-il rentrer dans des polémiques sachant que les évidences dans le domaine n'existent pas encore ? Faut-il être « politiquement correct » au risque de passer sous silence les nouvelles tendances ? Faut-il démolir les « dogmes » fédéraux ou autres.....etc, etc....

Je dois bien admettre que Bernard a pris des risques en voulant être correct dans sa démarche tout en essayant de ne « fâcher » personne. La prudence est toujours présente dans son texte et malgré tout, il se permet de flirter avec les limites des connaissances actuelles dans le domaine de la décompression.

Il est vrai que le plongeur ne doit pas être ballotté par les diverses discussions de spécialistes mais il n'en demeure pas moins une personne qui doit être correctement informée afin de prendre les bonnes décisions en cas de doute ou de dilemme.

La plongée doit être considérée comme une activité ayant lieu dans un milieu extrême et comme telle, il faut y appliquer les règles des milieux extrêmes comme dans le cas de la haute montagne, l'espace, la banquise arctique...etc.....

On peut s'inspirer des règles des Inuits afin de vivre dans les milieux extrêmes :

- Connaître l'environnement
- Connaître ses limites personnelles
- Ne pas se battre contre l'environnement (rester humble)
- Ne pas prendre de risques (le milieu est assez risqué comme cela)
- Même en groupe, dans les milieux extrêmes on est essentiellement seul (prendre ses responsabilités en connaissance de cause)

La plupart des items proposés par cette peuplade sage, seront nourris par l'ouvrage de Bernard, on ne peut donc que le recommander vivement.



Dr. Costantino Balestra PhD

Professeur de Physiologie  
Dir. Du Laboratoire de Physiologie Environnementale et Occupationnelle  
Haute Ecole Paul Henri Spaak, Pôle Universitaire Bruxelles-Wallonie  
Université Libre de Bruxelles  
Vice-Président de DAN Europe pour La recherche et l'Education  
Professeur au Collège Européen de Baromédecine

## REMERCIEMENTS

À Georges Livet qui me fait l'honneur d'être mon parrain et de partager mon amitié. Il m'a appris tellement de choses et en a encore tant à m'apprendre. Pour sa relecture attentive du mémoire et ses conseils pédagogiques.

À Yves Gaertner qui m'a soutenu, encouragé et conseillé. Il a l'art de me faire remettre en cause tous les acquis.

À Laurent Marcoux, mon maître, à qui je dois tout. Ses conseils avisés sont précieux. Son amitié est un réconfort.

À Jean Pierre Imbert et son épouse Patricia, pour tous les enseignements qu'ils m'ont donnés et tous les échanges que nous avons vécus.

À Tino Ballestra qui fait voler en éclats les idées reçues, pour son enseignement, sa préface et sa relecture attentive du mémoire.

À Jean Marc Belin pour sa relecture pertinente et son autorisation à reproduire quelques-uns des textes de son mémoire.

À Renaud Jourdan avec qui j'ai le plaisir de partager ma passion du recycleur et qui me fait progresser dans ce domaine et dans bien d'autres.

À Michel Gauchet pour sa confiance en moi.

À Guy Legloan qui a toujours su me pousser vers le haut.

À l'ensemble des instructeurs de l'Est, pour leur soutien, leur amitié et leurs conseils. Ils sont mes références et mes repères.

À tous mes amis plongeurs, et ils sont nombreux de par le monde, pour m'avoir initié, supporté, formé, écouté et partagé avec moi la passion de la plongée.

Aux amis avec qui nous avons fabriqué ce bel outil qu'est l'Alsace Nautile Club.

À Sylvie Marcoux, qui a passé ses vacances à la relecture et à la correction de ce mémoire.

À Eliane, qui accepte toutes mes absences et qui me permet de vivre pleinement ma passion. Pour la confiance qu'elle me témoigne. Sans elle, je ne serai rien. Avec tout mon amour.

## LA DÉCOMPRESSION

	<i>Page</i>
Introduction	6
Historique	7
Les différents modèles de décompression	13
A. Le modèle par perfusion.	13
1° Le modèle Haldanien	13
2° Le modèle de Bühlmann.	15
B. Le modèle par diffusion.	19
C. Les modèles à Micro-Bulles.	19
1° Le modèle VPM.	19
2° Le modèle RGBM.	23
D. Les modèles mixtes	23
La genèse des micro-bulles	24
1° Les micro-noyaux de CO <sub>2</sub> ou gaz nucléi.	24
2° La cavitation.	24
3° La tribonucléation.	24
4° Les bulles de CO <sub>2</sub> capillaires.	24
Les différentes méthodes de décompression	26
1° Par paliers	26
2° En continu	26
3° À l'oxygène	26
4° À ppO <sub>2</sub> constante	27
5° Les rinçages	27
La clinique des bulles	28
Sujets « bulleurs, non bulleurs »	28
Le signe de l'Assubest .	28
La maladie de décompression	30
Les accidents de décompression en plongée loisir	32
A. Mécanismes des ADD.	33
1° - Scénario des accidents cérébraux.	33
2° - Scénario des accidents OAM.	34
3° - Scénario des accidents médullaires.	34
4° - L'aéroembolisme de la surpression pulmonaire.	35
B. Délais de survenue des ADD.	35
C. Profondeur, durée et ADD.	36
D. Fréquence des différents types d'ADD.	36
E. Les différents types d'accidents :	36
1° Les médullaires.	36
2° Les cochléo-vestibulaires.	37
3° Les ostéo-arthro-musculaires.	38
4° Les centraux.	38

5° Le malaise de décompression (ou Stress de décompression).	39
6° Les accidents cutanés.	39
7° Les accidents rares.	40
F. Les circonstances favorisantes.	41
1° Les circonstances favorisantes de nature physiologique	41
a) La déshydratation	41
b) L'essoufflement	41
c) Le froid	41
d) La sédentarité	42
e) L'obésité	42
f) Le sexe féminin	42
g) L'âge avancé	42
h) La fatigue	42
i) Le tabac	42
j) Le stress	43
k) Les shunts pulmonaires	43
l) Le FOP	43
m) L'altitude et l'avion après la plongée.	44
n) L'absence de plongée de réadaptation	45
2° Les circonstances favorisantes liées aux profils de plongée	45
3° Les accidents inexplicables	46
G. Conduite à tenir.	46
H. Prise en charge hospitalière.	47
I. Les séquelles.	48
J. Les diagnostics différentiels	48
Les accidents aux mélanges.	49
A. Le Nitrox.	49
1° Le Nitrox en circuit ouvert	49
2° Le Nitrox en recycleur	49
B. Le Trimix.	49
1° Trimix en circuit ouvert.	49
2° Trimix en circuit fermé.	50
Les moyens de décompression	51
A. Les tables :	51
1° Les MN 90	51
2° Les MT 92	51
3° Les Récréation Dive Planner	51
4° Les tables en altitude	51
5° Les tables Nitrox	51
6° Les tables Trimix	51
B. Les ordinateurs.	51
C. Les logiciels de décompression.	53
D. Les perspectives.	53
Approche pédagogique de la décompression	54
A. Généralités	54
B. Les différents niveaux et brevets.	55
Conclusion.	69
Bibliographie.	70

## Introduction

La décompression est l'ensemble des phénomènes mécaniques et chimiques induits par une baisse de pression ambiante. L'étude de cette décompression est une science jeune, moins de 100 ans, forcément imparfaite, et évidemment perfectible.

Pour faciliter sa compréhension et établir des tables, les scientifiques ont commencé par modéliser. Cette modélisation se poursuit encore de nos jours, bien qu'elle ait beaucoup évolué depuis Haldane. Elle répond à des impératifs commerciaux. La réalisation de tables et surtout d'algorithmes est un marché porteur. L'ordinateur va également devenir une nécessité, les nouvelles approches intégrant tellement de paramètres que la gestion en sera impossible sans calculateur.

La physiologie a également fait des progrès très importants depuis Bert, mais c'est certainement le domaine où il reste le plus de choses à découvrir. Quelques équipes poursuivent les travaux. Elles apportent des éclairages nouveaux sur les accidents et leurs circonstances favorisantes, ainsi que sur la physiologie de la décompression. Ces études qui semblent limitées à la plongée sont en fait très utiles dans la compréhension de bien d'autres domaines, comme le cancer, le vieillissement et l'athérosclérose. Les études spatiales ont également eu des retombées dans le domaine de la plongée.

J'aborderai dans ce mémoire les principaux modèles de décompression, puis je présenterai les accidents de décompression en plongée loisir en essayant de les comprendre. L'étude en sera exhaustive. Il s'agit d'actualiser les connaissances dans ce domaine, de nombreux enseignants restant persuadés que certains dogmes sont toujours d'actualité.

Pour recueillir les informations et les actualiser, il s'agit de trouver des sources fiables, de rencontrer les chercheurs concernés, de dénicher les références bibliographiques et les mémoires, thèses et autres ouvrages. Ensuite il faut en retirer les éléments importants et les transcrire en réalisant un travail de synthèse. Ce mémoire devrait pouvoir servir de base de travail et d'outil de réflexion à un futur formateur de cadre. En effet, la collecte des sources est difficile et prenante. Ce fascicule devrait faciliter la tâche des futurs MF 2.

J'enchaînerai sur des réflexions pédagogiques concernant la décompression et ses accidents.

Je ne parlerai pas de la toxicité de l'oxygène dans ce mémoire, mais uniquement de son utilisation en tant qu'agent thérapeutique dans le traitement des accidents de décompression et de son utilisation pour la décompression, soit sous forme d'oxygène, soit sous forme de Nitrox.

Mon objectif est donc de permettre l'actualisation des connaissances des cadres fédéraux et des futurs formateurs de cadre. Cette actualisation aura des répercussions sur les contenus de formation et par voie de conséquences sur la pédagogie à mettre en œuvre par ces cadres fédéraux.

## HISTORIQUE

L'histoire de la plongée est très ancienne. Au IX<sup>e</sup> siècle avant JC, une fresque assyrienne montre un plongeur muni d'une réserve d'air. (33)

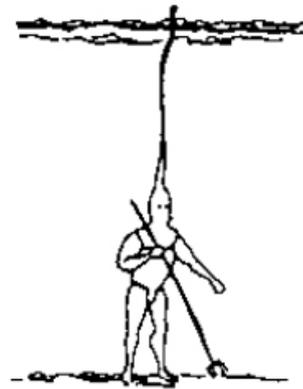
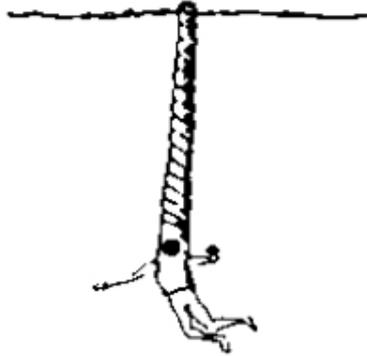


Les Grecs et les Romains avaient déjà imaginé des systèmes pour explorer les fonds marins (33)

Plus tard, pendant le moyen âge, puis la renaissance, des artistes et des savants ont dessiné des machines à plonger, totalement irréalisables, mais fort jolies. (33)



Léonard de Vinci invente les palmes, étudie des systèmes de tubes respiratoires et des systèmes pour emporter des réserves d'air (33).

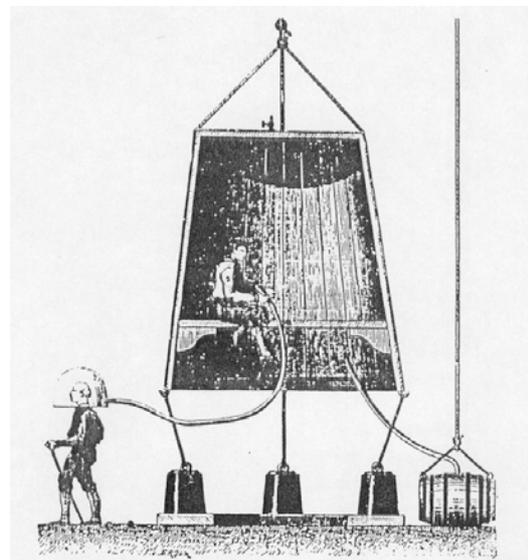
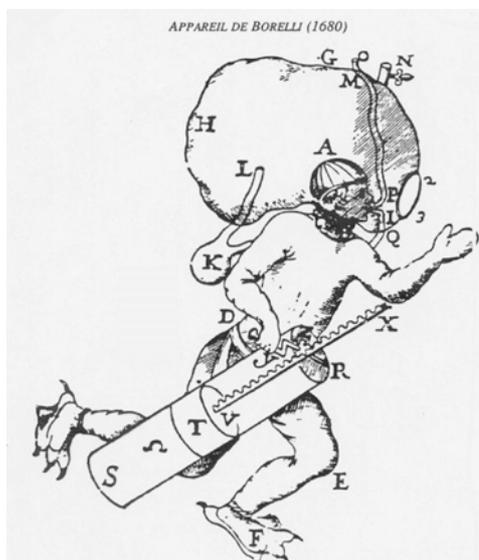


Les bases de la décompression, ont vraiment commencé lors de la découverte des pressions et de leurs systèmes de mesure : Torricelli en 1644 invente le tube barométrique et Pascal en 1653 pose les bases de l'Hydrostatique. Il a donné son nom à l'unité de pression : le Pascal ou Pa.

En 1661 BOYLE découvre la compression des gaz. Il réalise des expériences en pression sur des vipères : lors de la dépression, les vipères vont convulser et présenter des bulles visibles sous la peau. Toutefois, il n'établit pas la responsabilité de l'azote.

L'abbé MARIOTTE en 1676 énonce la loi des gaz.

En 1689, Borrelli va imaginer un scaphandre, et Halley en 1690 va concevoir une cloche de plongée.

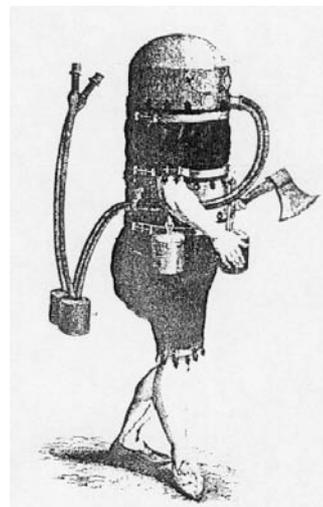


En 1755, deux découvertes importantes vont faire date :  
Black découvre et étudie le CO<sub>2</sub>  
Priestley découvre l'oxygène.

En 1774, Lavoisier étudie le rôle de l'oxygène et démontrera en 1788, son rôle indispensable à la vie, avant d'être guillotiné en 1794.

En 1793, Dalton énonce sa loi sur les mélanges gazeux.

En 1796 : scaphandre de Klingert.



En 1803, William Henry énonce sa loi sur la dissolution des gaz.

Il faudra attendre près de 75 ans pour qu'une avancée significative ait lieu dans le domaine de la décompression. En revanche, pendant ce temps fleurissent les premiers recycleurs, les premiers systèmes de détendeurs et les casques lourds. La construction de ponts et de tunnels et l'aménagement portuaire crée de nombreux emplois en hyperbarie et le travail sous pression fait aussi apparaître de nombreux accidents.

1828 : Les frères Deane déposent un brevet pour un nouvel équipement de plongée.

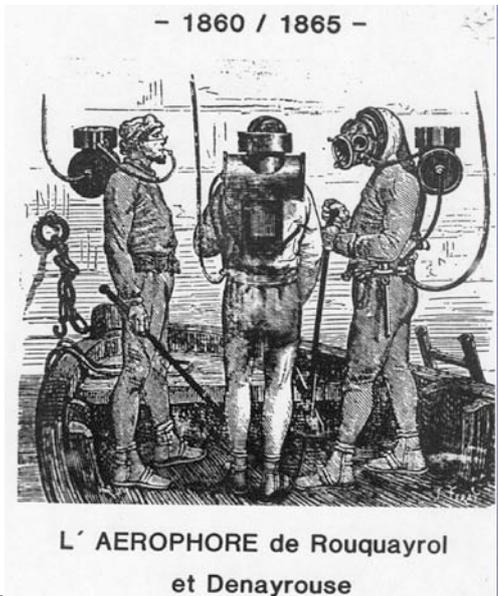
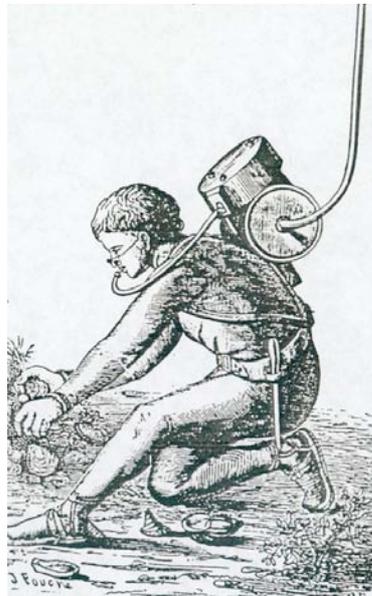
1840 : Auguste Siebe améliore l'appareil de John et Charles Deane. Le premier scaphandre pied lourd est né.



En 1841, Triger est le premier à décrire un accident de décompression. Il préconise la friction à l'alcool des articulations douloureuses et ne se préoccupe pas du résultat.

En 1854, Pol et Watelle étudièrent de façon plus suivie les accidents de décompression (ADD) et notèrent que le phénomène était associé à une baisse rapide de pression après un séjour en surpression. Ils s'aperçurent aussi qu'un retour en pression supérieure après un ADD permettait de soulager certains symptômes. Ils ouvraient ainsi la voie des futurs caissons thérapeutiques.

Il faut attendre 1861 avec BUCQUOY pour voir apparaître la première hypothèse sur les bulles : « les gaz du sang...repassent à l'état libre sous l'influence de la décompression...et occasionnent des accidents comparables à ceux d'une injection d'air dans les veines » et il conseille de : « prendre toutes les précautions nécessaires pour obtenir une décompression lente... ».



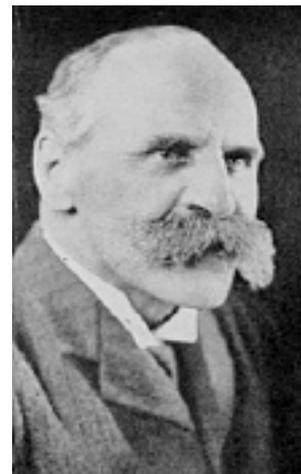
Jules Verne en 1869 écrit 20 000 lieues sous les mers.



*Paul Bert*

En 1878, Paul Bert publie un ouvrage majeur : La pression barométrique (10), ouvrage récapitulatif de ses travaux sur l'hyperbarie. Il met en évidence le rôle du  $\text{CO}_2$  et de l'azote dans les accidents de décompression. Il met également en évidence le rôle favorable de l'oxygène comme traitement des ADD, tout comme son rôle toxique sur le système nerveux central.

En 1908, John Scott Haldane (22) publie ses tables de décompression. Il répondait à une commande de la Royal Navy qui souhaitait diminuer les accidents de ses plongeurs, en mettant au point une procédure de remontée. Le principe de ses tables avec son modèle mathématique, reste utilisé de nos jours, dans la plupart des tables et ordinateurs de plongée.



*John Scott Haldane*

À partir de là, les choses vont s'emballer et une multitude de travaux vont fleurir. En même temps qu'Haldane, Leonard Hills construit un modèle à diffusion, avec remontée lente, qui ne sera pas retenu par la Royal Navy.

Les recherches sont financées par les militaires, avec pour objectif le développement des sous-marins et l'utilisation des plongeurs comme arme de guerre. Plus tard, c'est le développement pétrolier avec la réalisation des plates-formes off-shore qui motive les travaux.

Entre les deux guerres A.R. Behnke développe la plongée à l'Héliox à l'US Navy.

Valery Hempleman (23) construit un modèle à diffusion à partir de 1953 pour la Royal Navy.

Michaël Powell en 65 montre que les micro-bulles ne sont pas prédictibles, il s'agit d'un phénomène aléatoire.

Workmann (41) publie en 1965 des travaux où il introduit la notion de M Values, qui sera reprise quasiment partout. Cette théorie va entraîner la modification des tables US Navy.

En 1966, Brian Hills (25) propose un nouveau modèle basé sur la thermodynamique des bulles. Il fut le premier à souligner l'aspect aléatoire de la transition entre phase dissoute et phase gazeuse dans les tissus sursaturés. Son idée était de programmer l'état stable de plus faible énergie.

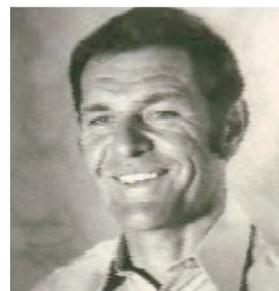
À la fin des années 60 apparaît un instrument de mesure, basé sur les ultrasons, servant à mesurer l'effet Doppler. Le Doppler sert à mesurer le nombre et la taille des micro-bulles.

Spencer se base sur cet outil pour réaliser des tables en 1970.

D'autres auteurs utilisent le Doppler pour étudier les bulles circulantes chez le plongeur : Masurel en 77, Le Chuiton en 79. Kisman le Canadien travaille sur un programme d'échange avec Masurel, lors des expériences de la Comex, (31, 33, 36)

Tom Hennessy et Valery Hempleman en 77 essaient de fusionner perfusion, diffusion et microbulles. Le principe est impossible à modéliser. (24)

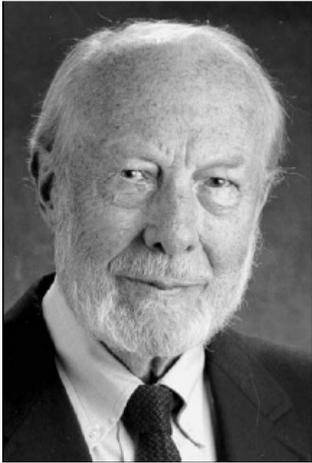
David Yount, (42) chercheur de Hawaï, passera toute sa vie scientifique à étudier des bulles dans des bacs de gélatine. Ses travaux vont déboucher sur un modèle à micro-bulles : le VPM, qui date également de 77.



Albert Bühlmann, entre les années 60 et 70, reprend le modèle Haldanien : utilisation de M Values, prise en compte de la composition de l'air alvéolaire avec la vapeur d'eau. La nouveauté concerne surtout les tables en altitude, qui ont été spécifiquement calculées mais jamais validées. Ses tables servent de base à de nombreux ordinateurs, comme les Aladin de Uwatec. (17)

Le Dr Fructus pour les tourelles Cx70, utilise une formulation de type M Value, inspirée de Workmann. Il ne tient pas compte de la tension de vapeur d'eau. (26)

En 1983, Nishi au Canada élabore les tables DCIEM (*Defense And Civil Institute Of Environmental Medicine, D.C.I.E.M.*). Celles-ci intègrent un modèle de perfusion et de diffusion et avant publication, les profils ont été testés par Doppler.



Christian Lambertsen publie la contre diffusion isobarique en 1989, toutefois, le premier article y faisant référence date de 1975. Il étudie la toxicité pulmonaire de l'oxygène et crée les UPTD, Unit of Pulmonary Toxic Dose.

1990 : Publication des tables MN 90, qui servent de support à la FFESSM pour les examens de table.

Bruce Wienke (40) dans les années 90, élabore à partir du VPM un modèle commercial, fondé sur les micro-bulles, le RGBM (44), modèle utilisé dans certains ordinateurs, mais dont la justification scientifique ne peut se vérifier, justement pour les mêmes raisons commerciales.

1992 : Jean Pierre Imbert (26,27) élabore les MT 92 en se référant à la base de données de la Comex.



Toujours dérivé du système VPM, en 97 Ross Heminway élabore les bases du modèle de décompression V Planner (52) utilisé par 70 % des plongeurs tech.

Les recherches se poursuivent, malgré la réduction du financement des travaux. Les militaires, DAN, et quelques équipes, surtout en Norvège, sous la direction de A.O. Brubakk, continuent les études et publient des travaux intéressants. Brubakk et Wissloff (15, 47) font des expériences sur les rats et sur les micro-noyaux gazeux.

Le laboratoire de physiologie environnementale de l'Université libre de Bruxelles effectue également des travaux passionnants sous la direction de Constantinesco Ballestra, en physiologie de la plongée (1, 2, 3, 46).

## LES DIFFERENTS MODÈLES DE DÉCOMPRESSION.

Un modèle de décompression est une approche mathématique dont l'objectif est de quantifier et de décrire les diverses manifestations de l'azote dans la décompression. Nous allons passer en revue différents modèles. Ces modèles comprennent en fait deux hypothèses : l'une qui va porter sur les critères d'ascension donc la vitesse et l'autre sur l'échange gazeux, perfusion ou diffusion.

### A. Le modèle par perfusion.

C'est le modèle Haldanien (22) par excellence. La majorité des modèles actuels sont construits sur ce modèle.

#### 1° Le modèle Haldanien.

Haldane dans son approche évoque un certain nombre d'hypothèses, que je vais vous exposer :

Afin de mener à bien les expériences, il fallut trouver une espèce animale proche de l'homme pour expérimenter les effets de la décompression. Les mauvaises langues disent que le choix de Haldane se porta sur la chèvre parce qu'il y en avait dans le pré à côté de sa maison ! Il est vrai que c'était un animal facile à se procurer en Grande-Bretagne, mais c'est aussi un animal réputé pour sa docilité et surtout 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 ADD 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 (22) 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 ADD.

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 bar de pression absolue. Contrairement à leur première hypothèse, ils observèrent qu'il était possible de les décompresser jusqu'à 3 bar sans accidents ; de même, après exposition prolongée à 8 bar, il fut possible de décompresser les animaux jusqu'à 4 bar. 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 d'ADD n'était à craindre.

Haldane émit alors les hypothèses suivantes :

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 duraient 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 d'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 : à 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 intercapillaires, 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. La modélisation des échanges gazeux tissulaires selon Haldane formule le théorème fondamental suivant : « la variation de pression de gaz dissous dans un tissu ne dépend que de son taux de perfusion ».

Hypothèse 6 : pendant toute la durée de la plongée et de la désaturation le taux de perfusion des différents tissus demeure constant.

Hypothèse 7 : l'organisme est composé de 5 tissus, de périodes 5, 10, 20, 40 et 75 minutes.

Haldane conçut deux tables séparées : la première pour des plongées « d'une durée normale » c'est à dire une durée totale de remontée d'environ 30 minutes maximum, la seconde pour des plongées « au-delà d'une durée normale » prévoyant un temps total de remontée de 42 à 238 minutes. Ces deux tables concernaient des plongées jusqu'à 62 m (34 brasses) avec une vitesse de remontée variable de 6 à 9 m/min jusqu'à 25 m, de 10 m/min pour des plongées entre 25 et 40 m et de 12 à 15 m/min pour des plongées entre 45 à 62 m.

~~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.~~

Pour Haldane, son principal défi était de trouver un autre moyen qu'une «décompression lente et uniforme» pour éviter le risque de formation de bulles pathogènes à la remontée. En 1905, c'était la seule solution proposée (Hill et Greenwood avec une vitesse de 0,5 m/min, Paul Bert avec 0,6 m/min de 20 m à la surface et 0,5 m/min entre 30 et 20 m, Denayrouze avec 1 m/min).

Cette approche n'était pas satisfaisante car :

- elle rendait les remontées tellement longues qu'elle interdisait, dans les faits, les plongées profondes ;
- elle imposait la même durée de remontée quelque soit le temps d'exposition au fond, alors même qu'il est déjà prouvé à l'époque que le risque d'accident augmentait avec la durée de l'exposition et restait faible pour de courtes expositions.

Haldane aboutit à la création de la remontée par paliers avec la prise en compte de la pression et de la durée d'exposition pour déterminer la profondeur et le temps des paliers. Dans son principe, cette approche est toujours en vigueur dans tous les modèles, y compris les plus

récents. (*Un grand merci à Alain Foret pour sa correction, je vous renvoie à son ouvrage : Alain Foret ; Prévention de la maladie de décompression, traduction de la publication originale de J.-S. Haldane, Editions Téthys, 2008*). (Correction de janvier 2016).

Grâce à ce concept, la Maladie De Décompression (MDD) 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 ( $P_p$  gaz dissous dans le tissu /  $P$  absolue) voisin de 2.

Au cours de la plongée à l'air, à la descente, il y a compression des gaz inhalés : leurs  $P_p$  augmente ( $P_p$  : Pression partielle). Il se crée un gradient de pression de l'alvéole vers les tissus via le sang avec augmentation de la pression de l'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 un dégazage 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 intra-tissulaires).

Ce concept mathématique a le grand mérite d'être simple, modélisable, facile à calculer.

Il est bien évident qu'il est faux : il fait abstraction de la diffusion, considère que les tissus sont homogènes, que la perfusion est constante et que l'échange est linéaire. Chaque hypothèse formulée peut être critiquée.

Toutefois, il n'en est pas moins vrai que ce modèle reste le plus utilisé dans le monde et qu'il est rarement pris en défaut dans la pratique. Aucune autre méthode de calcul n'est arrivée à la détrôner, ni à faire la preuve de sa supériorité.

## **2° Le modèle de Bühlmann.**

Ce modèle est utilisé dans la plupart de nos ordinateurs. Bühlmann publie en 1983 la première édition de *Tauchmedizin* (17), qui est le seul ouvrage complet sur la décompression depuis celui de Paul Bert, et qui reprend la plupart des concepts tant physiques que physiologiques et relate la plupart de ses expériences.

Bühlmann n'a pas « inventé » la plupart des concepts présentés dans son livre. Il reprit les travaux effectués par d'autres avant lui et affina le modèle (légèrement). Les éléments majeurs du modèle de dissolution des gaz furent développés par John S. Haldane, Robert D. Workman (US. Navy) et Heinz R. Schreiner (chercheur américain). Bühlmann s'appuya largement sur les travaux de Robert Workman et communiqua fréquemment avec Schreiner, en tant que collègue, à la fin des années 60 et au début des années 70. (4, 5)

Workman (41) utilisa les données issues de la recherche de l'US Navy pour établir le concept des M Values comme critère limite de remontée. Elles sont exprimées sous la forme d'une relation linéaire entre la sursaturation tolérée dans les « tissus » compartiments et la pression ambiante. Les M Values de Workman sont basées sur la pression partielle du gaz inerte en question, et non sur la pression totale du gaz respiré. Workman explique comment les compartiments ayant une période courte tolèrent une sursaturation plus importante que ceux ayant une période longue. Workman développa également une procédure de calcul détaillée qui est la base de celle employée aujourd'hui. Un peu plus tard, un collègue de Workman, William R. Braithwaite, modifia la procédure de Workman pour inclure le calcul « de la pression ambiante tolérée », c'était le moyen de déterminer une tentative de premier palier.

Schreiner expliqua le modèle de décompression avec des termes d'éléments de physiologie actuels comme le transport des gaz du sang vers les tissus, solubilité des gaz dans les fluides du corps, pourcentage de graisse et composition des « tissus » compartiments, et pressions partielles alvéolaires des gaz. Il établit un concept très important : la pression totale des gaz inertes d'un compartiment est égale à la somme des pressions partielles de chaque gaz inerte présent dans le compartiment, même si ceux-ci ont des périodes différentes. Une autre contribution de Schreiner est d'avoir résolu l'équation différentielle décrivant l'échange des gaz lorsque la pression ambiante varie de façon linéaire. C'est la solution générale de l'équation différentielle, dont l'équation instantanée n'est qu'une solution particulière. La solution générale permet de calculer directement la pression partielle en gaz inerte d'un compartiment, en fonction du temps (à condition que le taux de variation soit constant).

Bühlmann a repris ces concepts dans son ouvrage et dans son approche de la décompression.

Les principales modifications présentées par Bühlmann, concernent la « composition de l'air » et l'utilisation de M Values (pour Maximal Values) au sein de chaque compartiment.

- a) **L'air alvéolaire.** Bien sûr, Bühlmann n'a pas changé la composition de l'air, mais il tient compte de la composition de l'air alvéolaire, c'est-à-dire celui qui va réellement participer aux échanges gazeux. Les alvéoles sont un espace où sont brassés les gaz frais respirés et des gaz provenant du sang veineux. Il s'ensuit un savant mélange où, en plus de l'azote et l'oxygène, on va retrouver de la vapeur d'eau provenant de l'humidification de l'air respiré et du gaz carbonique issus de la respiration cellulaire. Le métabolisme de l'organisme utilise une partie de l'oxygène apporté par le sang et produit du CO<sub>2</sub>. Selon l'effort physique du moment, la quantité d'oxygène métabolisé pourra varier. C'est pourquoi, plus on consommera d'oxygène, moins on en rejettera et plus on rejettera de CO<sub>2</sub>. La composition du gaz alvéolaire pourra donc légèrement varier en fonction du rapport O<sub>2</sub> consommé / CO<sub>2</sub> rejeté. Ce rapport est le Quotient respiratoire Rq. Les valeurs s'échelonnent de 0,7 à 1 selon les physiologistes, la condition physique et l'effort fourni. Bühlmann considère que le rapport est de 1.

Il faut bien comprendre que la « place » occupée par la vapeur d'eau et le CO<sub>2</sub> se fait au détriment de l'azote et de l'oxygène. De plus, la pression de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub>O est constante, quelle que soit la valeur de la pression ambiante. Cette notion est intéressante mais non essentielle à une pression atmosphérique, mais **devient fondamentale en plongée en altitude.** (4, 5) Je vais développer ce point.

Les valeurs retenues par Bühlmann pour la vapeur d'eau et le CO<sub>2</sub> sont de 0,063 bar. Cette valeur est fixe, quelle que soit la pression ambiante. Ainsi, pour calculer le gaz intra-alvéolaire présent dans l'alvéole, on utilise la formule suivante :

$$P_i = (P_{amb} - 0,063 \text{ bar}) \times \% \text{ du gaz inerte}$$

Avec :  
 P<sub>i</sub> = pression du gaz inerte  
 P<sub>amb</sub> = pression ambiante ou P absolue  
 0,063 bar = pression de CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O

% = pourcentage du gaz inerte dans le mélange respiré.

À pression absolue élevée, l'incidence est minime. En altitude, comme la pression ambiante baisse, la proportion prise par la vapeur d'eau et le CO<sub>2</sub> est plus importante. De même, à petite profondeur, donc aux paliers proche de la surface, la prise en compte de l'air alvéolaire est essentielle, d'autant plus qu'on est en pleine phase de désaturation.

Nous allons prendre un exemple chiffré avec le **calcul de l'azote** dans l'air inspiré, selon que l'on prenne en compte la composition de l'air classique (21/79) ou la composition de l'air alvéolaire :

Pression	Air 21/79	Air Alvéolaire	≠
1 bar	$1 \times 0,79 = 0,79$	$(1 - 0,063) \times 0,79 = 0,74$	- 6,4 %
0,7 bar	$0,7 \times 0,79 = 0,553$	$(0,7 - 0,063) \times 0,79 = 0,503$	- 9 %
En altitude 0,7 bar, au palier de 3 m = 1 bar	$1 \times 0,79 = 0,79$	$(1 - 0,063) \times 0,79 = 0,74$	- 6,4 %

L'écart d'azote est donc un peu inférieur à 10%.

Nous allons prendre le même exemple chiffré avec le **calcul de l'oxygène** dans l'air inspiré intra-alvéolaire, selon que l'on prenne en compte la composition de l'air classique (21/79) ou la composition de l'air alvéolaire :

Pression	Air 21/79	Air Alvéolaire	≠
1 bar	$1 \times 0,21 = 0,21$	$(1 - 0,063) \times 0,21 = 0,196$	- 6,4 %
0,7 bar	$0,7 \times 0,21 = 0,147$	$(0,7 - 0,063) \times 0,21 = 0,133$	- 9 %
En altitude 0,7 bar, au palier de 3 m = 1 bar	$1 \times 0,21 = 0,21$	$(1 - 0,063) \times 0,21 = 0,196$	- 6,4 %

L'écart d'oxygène est exactement le même que pour l'azote, soit un peu inférieur à 10%.

Sur le plan physiologique, ces écarts sont importants à plusieurs niveaux :

- Les taux de gaz inertes en altitude sont inférieurs à ceux attendus, donc la limite de sursaturation des compartiments sera plus rapidement atteinte en tenant compte de la composition de l'air alvéolaire. Ce raisonnement est le même que celui de la MN 90 en altitude.
- Le taux d'oxygène est également inférieur à celui qui est attendu. Tant qu'on est en plongée « profonde », Dalton compense. Mais au palier, en pleine phase de désaturation, là où l'oxygène prend toute son importance, on se rend compte que la PpO<sub>2</sub> est plus basse que celle qu'on avait imaginée. (D'où l'intérêt accru de l'oxygène ou du moins d'un mélange riche en oxygène au palier).

La physiologie respiratoire en altitude est mal connue dans le domaine de la plongée. Les échanges gazeux sont perturbés par l'hypoxie relative, il y a une tendance à l'œdème aigu du poumon (OAP) qui ralentit les échanges et à l'œdème cérébral qui provoque des maux de tête (mal des montagnes).

Ceci me conduit à faire un parallèle avec les tables MN 90 qui ne tiennent aucun compte de ces phénomènes. L'adaptation des tables MN 90 à l'altitude résulte d'une gymnastique mathématique. Ces tables n'ont jamais été conçues ni validées pour cet usage. Elles ne prennent pas en compte la réalité physiologique. De plus, Mariotte va encore venir compliquer les choses : comme la pression sera moindre, les bulles vont pouvoir grossir plus. Diminuer la profondeur des paliers en altitude, comme indiqué dans le manuel fédéral des tables MN 90, équivaut à favoriser la croissance des bulles. De plus, l'organisme sera plus vite en sursaturation critique, puisque le palier sera moins profond. Cette situation, cohérente sur le plan mathématique, est tout à fait aberrante sur le plan physiologique.

Tous ces arguments me font dire qu'il n'est pas logique d'utiliser les tables MN 90 en altitude. Bien sûr, cette réflexion devrait avoir des implications pédagogiques dont je parlerai plus tard.

En altitude, avec le système de M Value de Bühlmann, qui sera vu au paragraphe suivant, on ne peut pas définir de profondeur équivalente. On doit refaire un calcul original de la table, ce qui a été fait par Bühlmann. Ces tables ont été réellement testées en altitude. Elles sont disponibles et faciles à utiliser. Elles sont également intégrées dans la plupart des ordinateurs utilisant les algorithmes ZH-L ... ADT.

b) **Les M Values.** Les concepts clé de Bühlmann sont les suivants:

La variation des périodes entre deux gaz est inversement proportionnelle à la racine carrée de leur masse moléculaire. Ceci est une relation bien connue des chimistes, qui s'appelle « la loi de Graham » . Elle s'applique particulièrement bien lorsque les gaz traversent une fine membrane poreuse, un processus appelé effusion qui est un dérivé de la diffusion.

La tolérance à la sursaturation, dans un compartiment est basée sur le volume excédentaire du gaz toléré par l'organisme dans ce compartiment. La pression partielle tolérée entre deux gaz différents d'un même compartiment variera selon leur solubilité dans le moyen de transport qui amène ces gaz au compartiment (plasma sanguin, dans le cas qui nous intéresse).

La M Value globale pour un compartiment multi gaz, chaque gaz ayant une M Value propre, variera selon la proportion de chacun des gaz présents dans le compartiment, selon l'hypothèse de Bühlmann. (4, 5)

Pour une pression ambiante donnée, une M Value est définie comme étant la pression maximale qu'un compartiment (tissu) hypothétique peut supporter sans présenter de symptôme de maladie de décompression. Les M Values représentent la limite de l'écart toléré entre la pression du gaz inerte et la pression ambiante, et ce, pour chaque compartiment. En d'autres termes, les M Values sont des limites de surpression tolérée, tension critique, limite de sur-saturation. Le terme M Value est communément utilisé par les concepteurs de logiciel de décompression. (4, 5)

### **Quelle est la nouveauté de la M Value par rapport à la Sursaturation critique Sc de nos tables MN 90 ?**

En fait Haldane admettait qu'un rapport de pression de  $\frac{1}{2}$  était satisfaisant.

Cependant, les compartiments rapides, qui éliminent le gaz très vite, ont une tolérance bien supérieure aux compartiments plus lents. Les MN 90 ont donc attribué à chaque compartiment une valeur différente, mais fixe. Cette valeur est supérieure à 2 dans les compartiments rapides et devient inférieure à 2 à partir du compartiment 30'. Les M Values déterminent une Sc pour chaque compartiment, mais à la différence des MN 90, cette valeur est variable selon la profondeur (pression absolue)  $M = f(P \text{ abs})$ .

Le modèle Bühlmann repose sur un échantillonnage de notre organisme en 16 compartiments. Ce modèle date de 1990 et est baptisé ZH-L16 : ZH signifie Zürich, ville où Bühlmann a effectué ses recherches et L signifie limite, 16 est le nombre de compartiments. À chaque compartiment, sont attribués deux jeux de paramètres : l'un pour l'azote, l'autre pour l'hélium. Chaque jeu de paramètre est constitué des informations habituelles concernant la diffusion (période) et des capacités maximales de dissolution (les M Values). La capacité limite de sur-stockage d'un compartiment dépend de la pression ambiante (absolue). (4, 5)

Il existe également un modèle plus ancien datant de 1983 : le ZH-L12 avec 12 compartiments.

L'introduction de ces M Values permet de rectifier les tables en fonction des expérimentations : Par exemple, si on considère une zone de profondeur avec beaucoup d'accident, pour les réduire, on modifie les M Values en les durcissant. On peut aussi augmenter le « conservatisme » en

prenant comme profondeur de palier un pourcentage des M Value : Par exemple 80% de la M Value, ce qui permet de sécuriser plus la décompression. Des artifices mathématiques permettent également en « distordant » ces M Values d'introduire des paliers profonds, élément que Bühlmann n'avait pas prévu.

Comme on le constate, ces modèles se prêtent bien à un usage informatique et ces algorithmes ont donc été introduits dans la plupart des ordinateurs de plongée, avec plus ou moins de modifications.

## **B. Le modèle par diffusion.**

C'est un modèle moins connu, élaboré par Hempleman (23) à partir de 1952, pour la Royal Navy.

Celui-ci supposa qu'une simple approche mono-tissulaire donne une solution satisfaisante aux problèmes de la décompression.

Il avait remarqué que les ADD (les bends) survenaient après des plongées profondes de courte durée 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 limite de gaz sans qu'une douleur n'apparaisse.

Il supposa alors que les capillaires étaient rangés en nappes et parallèlement autour des cartilages. Afin de rendre compte de 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 entourée par des couches de tissus infiniment plus épaisses. Ce modèle basé sur la diffusion, donna en travaillant sur l'équation de Fick la formule suivante :

$$Q = P \cdot (t)^{1/2}$$

- \* 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 de type hyperbolique avec :

$$C_s = \text{Profondeur} (=P) \cdot (t)^{1/2}$$

Selon l'hypothèse retenue par Hempleman le facteur essentiel de la charge/décharge en azote est la diffusion limitante plutôt que la perfusion limitante : recevant par le sang de l'azote dissous, le tissu n'en prélève qu'une partie car il y a limitation due à la lente diffusion de l'azote dans ce tissu. Ce modèle s'harmonisait bien avec la compréhension de la charge/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 problème haldanien. (34)

## **C. Les modèles à Micro-Bulles.**

### **1° Le modèle VPM ou Varying Permeability Model.** (ou Modèle à Perméabilité Variable)

Ce modèle se fonde avant tout sur les bulles de gaz. La connaissance de ces bulles est très ancienne, mais leur étude exhaustive est récente.

Au départ, on est en présence de gaz dissous, aussi bien chez le plongeur que chez le non-plongeur. Ces gaz dissous sont le CO<sub>2</sub> et l'azote.

Ensuite, intervient la notion de noyaux gazeux, dont l'origine sera détaillée dans le chapitre suivant. Ces noyaux gazeux, également appelés gaz nucléi, sont très petits, indétectables au Doppler. L'étude en a été difficile : ils sont très petits, non visibles à l'œil nu, donc il faut les visualiser au microscope. Ils ont également une durée de vie très courte, sauf s'ils ont la « matière » pour survivre. Enfin, dans un milieu très pur, ces gaz nucléi sont absents. David Yount (42) a passé sa vie à l'université de Hawaï à étudier des bulles dans des bacs de gélatine mis sous pression. Hempleman, Hennessy et JP Imbert s'y sont intéressés également (23, 24, 26, 27).

Le modèle VPM stipule que tout plongeur commence sa plongée avec un certain nombre de noyaux gazeux dont le nombre et la taille sont déterminés au départ.

Ces noyaux gazeux servent d'amorce à des micro-bulles, beaucoup plus grosses que les gaz nucléi, détectables au Doppler.

Ces micro-bulles subissent la loi de Mariotte, mais leur taille ne dépend pas que de la pression. Elle dépend de deux autres facteurs :

La tension superficielle. C'est cette tension superficielle qui permet à une bulle, par exemple de savon, de vivre. Dès que la pression de l'air augmente et devient supérieure à la tension de la bulle de savon, elle implose. De même, si son rayon augmente elle est plus fragile (Loi de Laplace).

Les surfactants. Les surfactants sont des molécules dont une extrémité aime bien l'eau, et l'autre pas. Ces surfactants ne trouvent leur place que si une interface gazeuse se présente. Sur la surface d'un noyau gazeux, les surfactants vont s'installer en rang serrés, leur partie hydrophile plongeant dans le tissu ou le liquide, leur partie hydrophobe dans le gaz. Leur présence à l'interface, permet de réduire l'énergie inter-faciale, et donc, d'augmenter la surface, et donc pour nous plongeurs, d'avoir un plus grand nombre de bulles.

Pour faire grossir ces bulles, il suffit de les nourrir : Elles se gavent des gaz dissous, en phase de décompression, donc elles absorbent de l'azote et s'il y en a, pourquoi pas du CO<sub>2</sub>.

Ce modèle fonctionne avec autant de gaz inerte que souhaité. Dans la plongée aux mélanges ternaires, où ce modèle est très utilisé pour calculer les paliers, il faut bien sûr ajouter l'hélium. Voici un résumé du modèle présenté par Jean Marc Belin, sur une traduction et interprétation de Eric Baker (4, 5) :

*« Le modèle prédit que tout être humain possède un capital initial de micro-noyaux. La distribution de ces noyaux est exponentielle dans tous nos tissus, quel que soit le compartiment considéré : beaucoup de petits noyaux et quelques gros.*

*Au cours de son immersion, le plongeur va subir les effets des variations de pression et les micro-noyaux vont évoluer (grossir ou rétrécir) en fonction des valeurs de tension des gaz dissous et de la pression ambiante (effet Boyle/Mariotte + diffusion gazeuse).*

*Les expériences ont montré que l'organisme était capable de supporter indéfiniment un certain nombre de bulles ou bien un nombre de bulles plus important mais pendant un temps limité. Nous aurons donc deux manières de calculer selon le paramètre choisi ; Il faut noter que pour des plongées de durée moyenne à longue, les deux façons de calculer mènent au même résultat.*

*Le modèle VPM va chercher à calculer le nombre maxi de bulles « saines » que l'organisme peut tolérer indéfiniment. Mais on ne connaît pas le nombre de noyaux présents, aussi, le modèle*

VPM va contourner le problème en établissant un lien entre le nombre de bulles (et donc le volume gazeux) et le diamètre minimum des noyaux qui seront excités par une sursaturation donnée. En effet, pour provoquer la croissance d'un noyau, il faut lui appliquer une sursaturation minimale. En dessous de cette valeur, le noyau ne sera pas excité. Connaissant la distribution des noyaux en fonction de leur taille, on en déduit « le nombre de noyaux excités » et donc le volume gazeux dégagé.

Les paramètres nécessaires aux calculs :

Calcul de la tension des gaz dissous:  $P = P_{io} + R(t - 1/k) - [P_{io} - P_0 - (R/k)]e^{-kt}$

-  $P_{io}$  = pression initiale du gaz inerte respiré (alvéolaire) moins la vapeur d'eau

-  $P_0$  = pression du gaz inerte présente au départ dans le compartiment

-  $R$  = variation de la pression du gaz respiré en fonction de la variation de la pression ambiante

c'est simplement le taux de descente ou remontée multiplié par le pourcentage de gaz inerte

-  $t$  = temps d'exposition (ou intervalle)

-  $k$  = constante liée à la période du compartiment

Sont également nécessaires aux calculs les paramètres suivants :

$r_0$ : le rayon minimal de la bulle qu'on peut exciter pour grossir

$\gamma$ : gamma, la tension de surface du noyau gazeux.

$\gamma_c$ ; la tension de réduction du noyau

$\lambda$ : le volume de bulles maxi tolérable

$T$ : le temps de régénération des noyaux (2 semaines environ)

Le profil de la plongée (vitesse de descente et de remontée, profondeur atteinte, durée, gaz respirés, ...)

Avec ces éléments, VPM va traquer le rayon critique des noyaux tout au long de la plongée. Au cours de la descente, il va calculer la réduction du noyau initial due à la vitesse de compression, et au cours de la remontée, il va moduler le gradient limite de sursaturation pour que des noyaux de rayon inférieur au rayon critique ne soient pas excités. Pour les plongées courtes, VPM acceptera que ce rayon critique soit dépassé à condition que ce soit pendant un laps de temps restreint qui ne permette pas un dépassement du volume critique. Le gradient est la différence entre la tension des gaz dissous et la pression ambiante.

1°- Analyse du modèle VPM :

*Paliers plus profonds*

Un profil calculé avec VPM impose les premiers paliers à une profondeur beaucoup plus importante qu'avec les modèles traditionnels. Par contre, les derniers paliers (plus proches de la surface) sont beaucoup plus courts qu'avec ces mêmes modèles Haldaniens

*Déco plus courte*

Pour des plongées de faible durée, la durée totale de décompression est plus longue, mais le phénomène s'inverse rapidement dès que le temps de plongée devient significatif.

Si palier OXY, paliers précédents plus courts

Une des conséquences de ce modèle, lorsqu'on utilise de l'oxygène au palier de - 6 m, est de raccourcir également les paliers précédents.

*Importance de la descente et prof max (pression de réduction)*

Le profil de descente affecte la valeur du gradient critique. En effet, le modèle postule qu'au cours de la compression, plus la différence entre la tension des gaz dissous et la pression ambiante sera importante, plus la réduction des noyaux de départ sera importante (Mariotte, mais surtout diffusion des gaz de la bulle vers les tissus) d'où un rétrécissement du noyaux favorable au plongeur. Plus on descend vite, meilleur c'est (il y a certainement des limites !) En tout cas cela explique pourquoi il vaut mieux effectuer la partie la plus profonde de la plongée en premier.

2°- VPM : un nouveau regard sur la décompression

*Explication du plus profond en premier (pression de réduction : voir ci-dessus)*

*Explication du délai d'apparition des symptômes.*

*Une partie du délai est due au processus physiologique de la MDD et aux différentes réactions de l'organisme qui s'enclenchent. Mais une autre partie du délai est due aux vitesses de diffusion qui interviennent au niveau de la bulle après un dépassement de sursaturation critique.*

*Pas d'effort avant, pendant et après la plongée.*

*Tout effort musculaire provoque la création de nouveaux micro-noyaux qui viennent perturber le pronostic des modèles. (Ces nouveaux micro-noyaux n'étant pas pris en compte).*

*Pourquoi les tissus courts supportent des sursaturations plus élevées.*

*La sursaturation provoque la croissance des bulles, mais les tissus courts éliminent rapidement les gaz inertes (la tension chute rapidement) et les bulles n'auront pas le temps de grossir suffisamment longtemps pour devenir pathogènes, ce qui n'est pas le cas dans les tissus lents.*

### 3° VPM et ses limites

*a - Pas de nouvelle génération de bulles (on fait avec ce qu'on avait au départ)*

*Bien qu'on sache qu'il existe des possibilités d'apparition de nouveaux noyaux, principalement suite à un effort physique, VPM ne comptabilise que les noyaux initiaux. D'un autre côté, il est vrai que VPM ne comptabilise pas réellement le nombre de noyaux, il le déduit plutôt du rayon critique excitable. Aussi, en agissant sur le paramètre « rayon critique de départ » (en l'augmentant) on obtient à peu près le même effet.*

*b - Attention aux gaz employés !!!*

*Encore plus qu'avec les modèles Haldaniens, la composition des mélanges de décompression est très importante. Les transitions doivent être judicieuses et les passages d'un gaz à un autre (ayant des coefficients de diffusion et de dissolution différents) doivent être planifiés avec soin.*

*c - Ne tient pas compte non plus du coefficient de dissolution*

*VPM est un modèle qui tente de prévoir l'évolution des bulles au cours de la plongée, en fonction des variations de pression. Or, pour une même pression, on sait qu'il y a des gaz qui se dissolvent beaucoup (CO<sub>2</sub>) et d'autre peu (Hélium). Il est évident qu'au cours de la remontée, une bulle en état de sous saturation et donc susceptible de grossir, va trouver plus de matières pour croître dans un environnement riche en gaz. Ce qui veut dire qu'une bulle aura plus de peine à grossir dans un environnement d'hélium que dans un environnement d'azote (à tension et pression égales).*

*En d'autres termes, pour une pression de 1 b, à saturation, on aura environ 20 ml d'azote par litre de sang, tandis qu'on aura jusqu'à 400 ml de CO<sub>2</sub> ! (bien entendu, cet exemple est un cas extrême, chaque couple gaz/tissu possède son propre coefficient de dissolution). Ces différences de quantité de gaz dissous (pour une même pression) ne sont prises en compte par aucun modèle bien qu'on suppose que ce phénomène ait une grande incidence en décompression notamment lors des changements de gaz. Attention à ne pas provoquer une croissance brutale des noyaux gazeux par un changement de gaz inadapté. Et ce n'est pas le léger ajustement du rayon critique qui fera la différence (0,8 micron pour l'azote et 0,7 micron pour l'hélium)*

*Dans le cadre des plongées aux mélanges, il est fréquent d'invoquer le phénomène de sursaturation provoquée par une contre-diffusion isobare. Ce phénomène s'explique assez bien en tenant compte uniquement des différences de vitesse de diffusion entre le gaz entrant (plus grande diffusion comme l'hélium) et le gaz sortant (diffusion plus faible, comme l'azote). Mais dans le cadre de la plongée loisir, ce type de changement de gaz n'intervient qu'à la descente sur des tissus sous-saturés, c'est pourquoi le plongeur Tek n'est absolument pas concerné par ce phénomène qui reste un exercice de « laboratoire ».*

*Par contre, de nombreux articles relatent des incidents (principalement vestibulaires) suite au passage à un mélange riche en azote en remplacement d'un mélange riche en hélium lors de la remontée. Il faut vraisemblablement rechercher les causes du côté de la dissolution plutôt que de*

*la diffusion. Le remplacement d'un gaz peu soluble par un gaz plus soluble agit comme un amplificateur de bulle. N'oubliez donc pas que c'est également ce qui se passe souvent lorsque vous atteignez la surface et que vous respirez à nouveau de l'air !!! Considérez donc la surface comme un palier avec son changement de mélange spécifique et faites en sorte de pouvoir effectuer ce changement sans risque. À l'heure actuelle, aucun modèle ne sait prédire avec exactitude ce qui se passe lors des changements de gaz. (4, 5) »*

Le modèle a été mis en équation par Younblood en 1997, ce qui a donné naissance à un logiciel de décompression qui s'appelle V-Planner (52), édité par Ross Heminway. C'est un shareware, téléchargeable sur Internet, qui subit des mises à jour en fonction des retours sur les ADD rencontrés par les utilisateurs.

## **2° Le modèle RGBM ou Reduced Gradient Bubble Model.**

Bruce Wienke (40), développe une adaptation du VPM qu'il appellera le RGBM (Reduced Gradient Bubble Model). Brillant mais intéressé, Bruce Wienke développera son modèle sur une base commerciale. Le RGBM ne sera jamais publié scientifiquement mais plutôt vanté dans des publications racoleuses et confuses. Néanmoins, il sera vendu à de nombreux fabricants d'ordinateurs dont Uwatec.

Il est difficile d'en évaluer la pertinence, les bases de calcul étant brevetées.

Pour les modèles intégrés dans certains ordinateurs, comme le Suunto et les Mares, ils se réclament de RGBM, mais ne le sont pas vraiment. Il semblerait que ces logiciels ne se soient pas totalement affranchis des méthodes de décompression « Haldaniennes ». Les critères de remontée semblent être toujours basés sur des limites traditionnelles auxquelles on a ajouté un contrôle limitatif supplémentaire calculé sur le modèle à bulles (4, 5).

## **D. Les modèles mixtes**

À partir des modèles exposés, on peut imaginer toutes les combinaisons.

La combinaison entre le modèle à perfusion et une vérification des micro-bulles au Doppler a été réalisée par Spencer. Les DCIEM canadiennes (*Defense And Civil Institute Of Environmental Medicine*) utilisent la combinaison d'un modèle à perfusion, diffusion et contrôle doppler pour la validation.

La combinaison entre modèle à perfusion, diffusion et micro-bulles a également été effectuée par Hennessy et Hempleman. Il est impossible à modéliser, car trop complexe. Ceci signifie qu'au mieux on puisse réaliser des tables, mais qu'il est impossible d'effectuer des calculs « simples » permettant d'utiliser ce modèle dans un ordinateur (24).

Actuellement, plusieurs ordinateurs intègrent les modèles de base de Bühlmann et y rajoutent un soupçon de RGBM qui permet de durcir le modèle de base, surtout lors de la plongée « Yoyo ». C'est le cas des derniers Uwatec de la famille « Smart » ou des Suunto.

## LA GENÈSE DES MICRO-BULLES.

### 1° Les micro-noyaux de CO<sub>2</sub> ou gaz nucléi.

L'origine de ces noyaux gazeux est intéressante à connaître. Nous avons déjà vu que dans un milieu très pur, ces noyaux gazeux n'existent pas (42). On a fait des expériences sur de l'eau distillée, en mettant de l'air sous pression de façon importante. Lors de la décompression, même très rapide, on n'a pas observé de bulles. Ces gaz nucléi ne se rencontrent que dans certaines impuretés : l'eau non distillée qui servait à David Yount à fabriquer sa gélatine, entre autres. De même, du sang isolé de l'organisme, mis en pression et décomprimé rapidement ne génère pas de bulles.

D'où viennent alors ces micro-noyaux gazeux ? Ils sont formés à partir du CO<sub>2</sub> dissous. Il y a essentiellement trois méthodes de production dans l'organisme, que nous allons détailler.

### 2° La cavitation.

Par analogie, une hélice de bateau qui tourne vite en eau de mer, produit des bulles alors qu'elle n'effleure pas la surface. C'est l'accélération importante qui produit ces bulles à partir du gaz dissous. Dans l'organisme, ce phénomène se rencontre à plusieurs niveaux : les bifurcations des grosses artères, l'accélération du sang après éjection du ventricule gauche dans la crosse de l'aorte. Cette accélération permet de transformer le gaz dissous en gaz gazeux. En posant son demi de bière sur une table, on produit une accélération et la mousse remonte sur le dessus de la bière. Comme M. Jourdain faisait de la prose sans le savoir, nous venons de faire de la cavitation sans le savoir.

### 3° La tribonucléation.

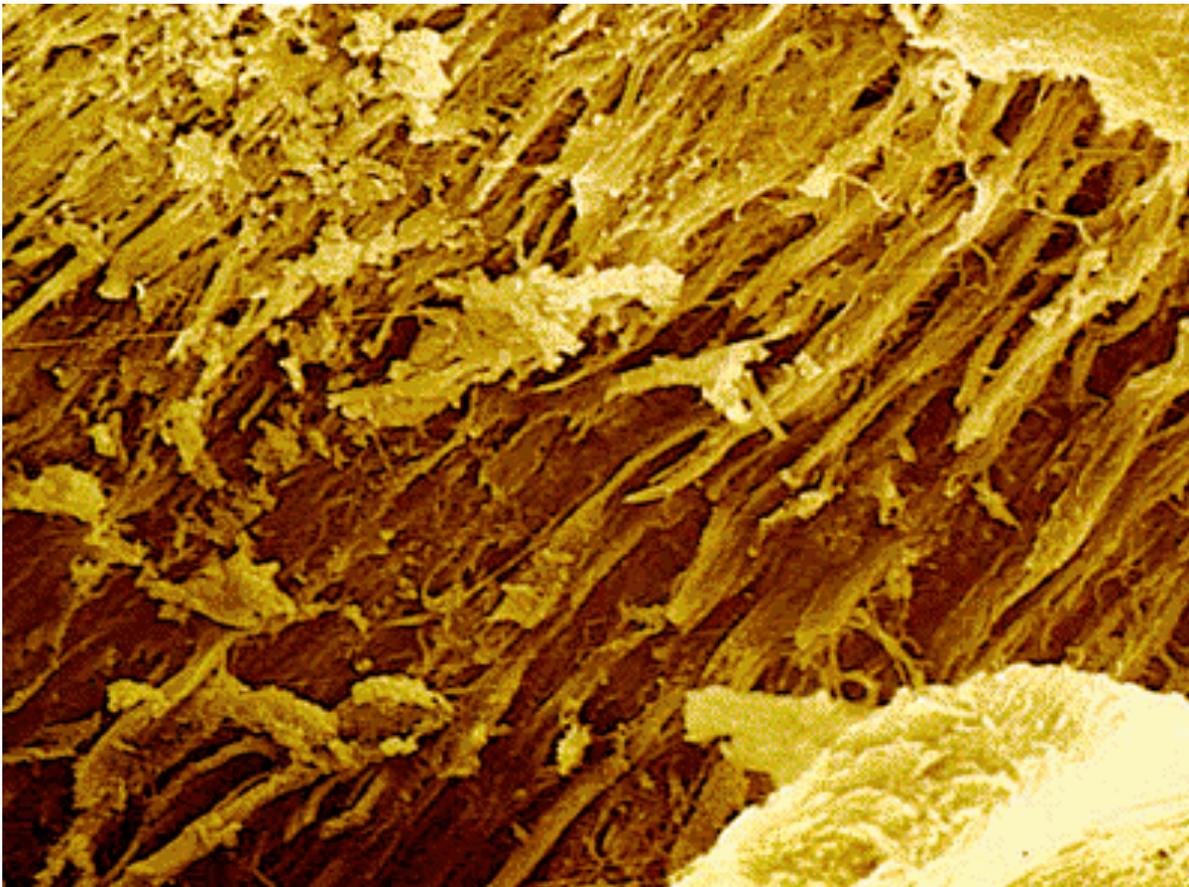
C'est une forme particulière de cavitation, qui résulte du frottement de 2 membranes. On prend 2 feuillets qui sont plus ou moins collés et on les sépare brutalement. Cette séparation va créer un vide. Le comblement de ce vide crée une accélération du fluide avec des tourbillons qui produit des noyaux gazeux. Ce phénomène s'observe au niveau des valves cardiaques, particulièrement les valves mitrales et aortiques. Le même phénomène s'observe aussi du côté droit, mais ne pose normalement pas de problèmes au plongeur, en l'absence de shunt droit gauche. Ce phénomène pourrait aussi se rencontrer au niveau musculo-tendineux, lors du frottement des masses musculaires les unes sur les autres, lors des mouvements.

### 4° Les bulles de CO<sub>2</sub> capillaires.

C'est une notion récente. Ce phénomène est connu depuis 2004-2005. (15, 16, 47) Des bulles de CO<sub>2</sub> sont observées dans les anfractuosités des capillaires et des vaisseaux sanguins. Des photographies réalisées avec un microscope électronique à balayage apportent la preuve de l'existence de ces bulles.

La paroi d'un vaisseau sanguin n'est pas vraiment lisse. La jonction entre les cellules de l'endothélium vasculaire présente des creux qui sont en retrait de la lumière du vaisseau sanguin. C'est dans ces creux que se déposent des poches de gaz, essentiellement du CO<sub>2</sub>.

Cette notion a permis une nouvelle approche de la décompression.



*Endothélium vasculaire au microscope électronique à balayage : on se rend compte des nombreuses cavités et irrégularités.*

Nous allons faire un peu de chimie pour avancer : la combinaison d'un radical d'azote avec un radical oxygène forme la combinaison d'oxyde nitrique écrite NO. Cette molécule a le pouvoir de dilater les vaisseaux, donc d'en lisser les parois. Elle agit sur la musculature des vaisseaux sanguins. Les radicaux NO inhibent également l'agrégation plaquettaire bien connue des plongeurs. Ils empêchent la margination des globules blancs et des plaquettes, ce qui signifie que ces cellules ne peuvent plus adhérer aux parois, donc l'écoulement sanguin sera moins turbulent, puisque la paroi est plus lisse (13, 30). À quoi tout cela va-t-il nous servir ?

En lissant la paroi des vaisseaux avec un médicament fournissant des radicaux NO (de la trinitrine par exemple, ou du sildénafil, mieux connu sous son nom commercial, le Viagra<sup>®</sup>), ces creux régressent, voire disparaissent. Les poches de gaz sont alors mobilisées et éliminées au niveau du filtre pulmonaire. Les expérimentations animales sur ce modèle (15, 47) ont été très poussées et une réduction significative des ADD chez le rat a été observée.

Une méthode de production endogène de radicaux NO existe également, c'est tout simplement l'effort physique. Les militaires du groupe des plongeurs démineurs ont effectué des études sous la direction de J.E. Blatteau, E. Gemmp et F. M Galland (11, 19). Il s'agit de voir quel type d'effort est à réaliser et dans quel délai avant la plongée pour limiter ces micro-noyaux et les ADD. Pour l'instant ces études se poursuivent.

Comme on peut le constater, ces notions de micro-noyaux gazeux et leurs applications en plongée sont essentielles. Elles permettent de comprendre la genèse des ADD et déboucheront probablement sur des mesures préventives. (1, 2, 3, 19, 46)

La bulle se compose donc au départ de CO<sub>2</sub>, puis s'enrichit des autres gaz inertes dissous, azote ou hélium.

## LES DIFFERENTES METHODES DE DECOMPRESSION

Après avoir vu les différents modèles de décompression et la genèse des bulles, nous allons aborder brièvement les différentes méthodes de décompression.

**1° Par paliers** : c'est la méthode la plus communément utilisée, celle que nous pratiquons tous. Les paliers sont indiqués par les tables classiques ou l'ordinateur. La tendance va aux paliers profonds, nous reprendrons cette notion dans le chapitre sur les scénarii d'accidents. En effet, ces paliers profonds doivent permettre l'élimination des bulles avant leur taille « critique ».

Mais, au fait, d'où vient cette notion de palier profond ? Historiquement tout est parti d'un ichtyologue américain, Richard Pyle (28), qui collectait des poissons à grande profondeur (vers 100 m). Pour éviter que la vessie natatoire des poissons n'éclate lors de la remontée, il s'est arrêté à mi-profondeur, pour percer cette vessie natatoire avec une fine aiguille. Il s'est rendu compte, qu'après ces pauses à mi-profondeur, il ne ressentait plus du tout le « coup de barre » d'après plongée, et a donc marqué cet arrêt, même lorsqu'il ne remontait pas de poissons.

Empiriquement, beaucoup de plongeurs tech ont utilisé cette méthode pour réduire la fatigue d'après plongée.

Les tables traditionnelles n'en tiennent pas compte (sauf artifices mathématiques), puisque l'objectif est de remonter le plus « vite » possible au palier pour limiter l'absorption de gaz dissous, limiter la consommation de gaz et désaturer le plus vite possible les compartiments rapides.

Toutefois, le modèle VPM, donne une justification à ces paliers profonds. La profondeur et la durée de ces paliers ne sont pas encore bien définis et restent l'objet de controverses dans le monde de la plongée tech. Les recherches actuelles (2, 3) semblent montrer que le palier profond devrait avoir une durée de l'ordre de 2 minutes 30 secondes et être situé à 80 % de la M Value du compartiment directeur, donc en général un des compartiments rapides.

Les militaires français (Centre de médecine hyperbare de Toulon) ont démontré que les paliers profonds à l'air n'apportent non seulement pas de réduction du nombre des ADD, mais en augmentaient la fréquence. Il n'est donc plus logique aujourd'hui de préconiser les paliers profonds à l'air. Il est même logique de demander aux gens utilisant un outil de décompression RGBM de désactiver cette fonction pour les plongées à l'air. Au trimix ou à l'héliox ce palier profond reste indispensable, vu la vitesse de désaturation de l'hélium. (Correction janvier 2016).

**2° En continu** : ceci sous-entend que pendant toute la remontée, la décompression se fera. Elle est essentielle en complément avec les paliers, et se caractérise par la vitesse de remontée. Celle-ci change selon les tables, et varie dans des proportions assez importantes : de 20 mètres minutes dans les US Navy à 3 mètres minute entre les paliers dans la MN 90. L'avenir est à une réduction des vitesses de remontée dans les plongées à l'air ou du moins une réduction des baisses de pression. Cela permet d'avoir des vitesses assez rapides au fond et un ralentissement de plus en plus net à mesure que l'on approche de la surface. Cette notion est bien présente dans la plupart des algorithmes des ordinateurs.

Dans les plongées aux mélanges ternaires, vue la vitesse de relargage rapide de l'hélium, la vitesse de remontée doit être lente, au maximum de 9 à 10 mètres par minute, quelle que soit la profondeur.

**3° À l'oxygène** : cette méthode permet de diminuer la durée des paliers. Elle est utilisée par les plongeurs professionnels dans la MT 92 et figure dans la MN 90.

En plongée profonde, l'utilisation d'oxygène est de pratique courante, avec des mélanges Nitrox de plus en plus riches selon la proximité de la surface. Cette méthode permet de réduire les durées de paliers, mais nécessite une gestion rigoureuse de l'utilisation des gaz pour éviter l'hyperoxie.

Avec le modèle VPM, l'utilisation d'oxygène au palier permet même de raccourcir les paliers antérieurs (lors de la programmation de la plongée).

Quel est l'intérêt de l'utilisation d'oxygène ou de mélanges enrichis aux paliers : elle augmente le gradient de l'azote et accélère son élimination. Cet effet est partiellement contre balancé par l'effet vasoconstricteur de l'oxygène.

La décompression peut aussi s'envisager dans un caisson d'oxygénothérapie hyperbare : c'est ce que font certains corailleurs.

**4° À PpO<sub>2</sub> constante** : c'est une gestion de décompression entièrement électronique (VR 2, VR 3, Vision, V Planner) utilisée avec les recycleurs CCR. On utilisera donc ces modèles avec les recycleurs CCR électroniques : Buddy Inspiration, Evolution, Ouroboros, Mégalodons ; ou les CCR mécaniques : rEvo, Submatix ... Bien sûr, pour optimiser cette décompression, il est préférable d'avoir un capteur de PpO<sub>2</sub> dans la boucle du recycleur, pour que l'instrument de décompression connaisse à tout moment la teneur en oxygène du mélange respiré et adapte ses calculs.

**5° Rinçages à l'air** (ou au mélange fond) : c'est une méthode encore très répandue, surtout aux USA, dont l'objectif est de limiter la toxicité de l'oxygène, tant sur le système nerveux que sur le poumon. Elle repose sur des calculs de toxicité réalisés par Bennet, qui sont absolument faux. Les problèmes de cette méthode sont multiples : difficultés de gestion des gaz et détendeurs puisqu'on fait des allers-retours avec des Nitrox riches et des trimix parfois hypoxiques ; le fait de reprendre de l'hélium en phase de désaturation peut favoriser une contre diffusion isobarique ; le fait de passer d'un mélange pauvre en azote à de l'air complique les calculs de décompression et est source d'accident. Cette méthode utilisée en médecine hyperbare lors des tables longues avec PpO<sub>2</sub> élevées, n'a pas à être transposée au monde de la plongée.

## LA CLINIQUE DES BULLES.

Les bulles « silencieuses », en dehors des situations accidentelles, se manifestent-elle d'une quelconque façon ?

Oui, on dispose de deux moyens de les détecter : le Doppler et la palpation.

**1° Sujets « bulleurs, non bulleurs » :** Les études Doppler ont montré que certains sujets étaient bulleurs d'autres moins. Masurel, Le Chuiton. Kisman et les militaires ont effectué des détectations Doppler chez les plongeurs (31, 33, 38).

La conclusion est que certains sujets « bullent » plus que d'autres, avec à la fois plus de bulles et des bulles plus grosses.

Toutefois, le profil de plongée est essentiel. De récentes études (2, 3) montrent que des profils de plongées bien codifiés permettent de réduire les bulles au point de les rendre indétectables chez la majorité des plongeurs.

La formation de bulles n'est donc pas une fatalité. D'après le concept Haldanien, les bulles n'apparaissent que si le rapport de  $\frac{1}{2}$  est dépassé dans la décompression. Ensuite, après les études Doppler, il était courant d'entendre que tous les plongeurs font des bulles. Comme toujours, la vérité se situe vraisemblablement entre les deux. Les profils de plongée non inversés, avec remontée lente, paliers profonds en plus des paliers traditionnels sont peu générateurs de bulles détectables.

Les études statistiques ont permis de démontrer qu'un sujet bulleur avait plus de risques de faire un ADD qu'un sujet non bulleur. Aujourd'hui cette assertion est très utilisée pour prédire le risque d'accident, soit chez un individu donné, soit selon le profil de plongée. (Correction de janvier 2016).

Jusqu'à très récemment, la seule manifestation connue, non accidentelle des bulles était le Doppler. Depuis 3-4 ans, une autre manifestation a été décrite.

**2° Le signe de l'Assubest :** L'ASSUBEST, ou ASSociation de médecine SUBaquatique de l'EST, est une association dont le but est d'assurer la formation et le perfectionnement des médecins de plongée. J'ai le plaisir de présider cette association.

Dans ce cadre nous réalisons un congrès annuel qui comporte outre la partie scientifique, des plongées sur toute la durée du séjour. Nous sommes donc conduits à réaliser des plongées successives (2 à 3 par jour) sur 5 à 6 jours consécutifs.

Lors de ces séjours, nous avons observé (37) une particularité clinique chez la quasi-totalité des plongeurs : la palpation effectuée au hasard sur une personne souffrant de cervicalgies banales a permis la découverte d'un emphysème sous-cutané. À partir de là, nous avons systématisé cette palpation.

En effet, au bout de 2-3 jours de plongées, nous avons palpé un emphysème sous-cutané de la partie cervicale et supérieure du tronc, chez la quasi-totalité des plongeurs. La palpation révélait des crépitations neigeuses, totalement asymptomatiques.

Les plongées s'effectuent dans des eaux tropicales chaudes. La durée d'une plongée est de l'ordre d'une heure, la profondeur entre 20 et 40 m, à raison de deux plongée par jour, plus parfois une plongée de nuit à une profondeur n'excédant pas 15 – 20 mètres. Le profil de plongée comporte un accès à l'espace lointain en début de plongée et une remontée lente. En fin de plongée, nous restons systématiquement entre 6 et 3 mètres sur une durée largement supérieure aux temps de paliers indiqués. Le moyen de décompression choisi est l'ordinateur de plongée.

Délai : les crépitations neigeuses apparaissent après 2-3 jours de plongées successives. Elles se palpent dès la sortie de l'eau et persistent de 2 à 6 heures.

Distribution : la quasi-totalité des plongeuses et plongeurs étaient concernés.

Localisation : surtout au niveau cervical postérieur, mais aussi dans les creux sus-claviculaires. La topographie est plutôt haute à la sortie de l'eau, puis les bulles migrent vers le bas : de cervical à la sortie de l'eau les bulles se retrouvent en position sus-claviculaire après quelques heures.

Interprétation.

Il s'agit sans doute d'un dégazage sous-cutané normal, lié à la désaturation en azote. Ces crépitations neigeuses sont non symptomatiques. Ce sont des bulles non pathogènes probablement produites « in-situ » dans le tissu adipeux sous-cutané. Elles sont absolument asymptomatiques, ce qui les distingue des puces et moutons et également de l'emphysème sous-cutané observé après certaines surpressions pulmonaires (13).

Il s'agit de la première description de ce type dans la littérature. L'Assubest se propose de poursuivre les recherches :

- Établir une relation avec les profils de plongée.
- Établir une relation avec les protocoles de décompression : les bulles restent-elles présentes en cas de paliers profonds ? Dans la même proportion, avec la même topographie ?
- Établir un parallèle avec le bullage artériel normal de la décompression en réalisant des Dopplers chez le même groupe de plongeurs. L'objectif est de vérifier une éventuelle relation entre le dégazage sous-cutané et le bullage artériel. La mise en évidence d'une corrélation entre clinique et Doppler pourrait simplifier certaines observations, chez les sujets « bulleurs-non bulleurs »

Un séjour aux Maldives (février 2006) n'a pas permis la mise en évidence de ces bulles sur un échantillon réduit de 4 personnes. Cependant les plongées étaient effectuées au Nitrox pour deux personnes et au Nitrox avec recycleur SCR pour deux autres personnes. Le nombre de plongeurs concernés ne permet pas d'en tirer des conclusions formelles.

Le congrès de novembre 2006, a permis d'effectuer 26 plongées sur 11 jours avec un groupe de 20 plongeuses et plongeurs.

Le même phénomène a été observé, mais seulement au bout du 8<sup>e</sup> jour de plongée. Tous les plongeurs étaient concernés sauf 1. Ces crépitations étaient présentes ensuite jusqu'à la fin du séjour. Elles apparaissent dès la sortie de l'eau, sont localisées au cou et dans les creux sus-claviculaires. Elles persistent entre 2 et 3 heures après la sortie de l'eau.

Les plongées pendant ce séjour étaient moins profondes que d'habitude, les plongées au-delà de 30 m n'étant effectuées que vers la fin du séjour. Le plongeur qui n'a pas présenté de bulles sous-cutanées a effectué moins de plongées que les autres (20 plongées seulement) et a effectué des plongées moins profondes, n'excédant pas 25 m.

Un séjour en Martinique (février 2007) a permis les mêmes constatations chez la plupart des plongeurs au bout de 3-4 jours. Les plongées étaient effectuées à l'air et étaient assez profondes, 40 m en moyenne.

La description de ces crépitations neigeuses sous-cutanées est la preuve de l'existence de bulles tissulaires, contestées jusqu'à très récemment par plusieurs spécialistes de la décompression.

En novembre 2007, l'ASSUBEST débutera l'étude comparative palpation versus Doppler, au sein de ce même groupe de plongeur.

Un séjour (novembre 2015) aux Raja Ampat m'a permis de voir que certains sujets présentaient un emphysème sous cutané alors qu'ils plongeaient avec un mélange Nitrox, entre 30 et 33 %.

## LA MALADIE DE DECOMPRESSION.

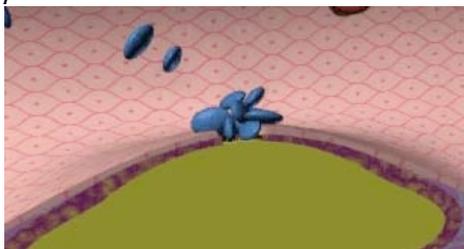
C'est l'ensemble des phénomènes mécaniques, biochimiques, physiologiques et immunologiques dus à la présence de bulles dans les vaisseaux sanguins. Cette maladie de décompression est à la base des accidents de décompression.

C'est un mécanisme extrêmement complexe, dont la compréhension fine nécessite des connaissances en biochimie et immunologie étendues. (13).

Je vais essayer d'être simple et nous allons voir ce qui se passe sur les différents plans.

- Sur le plan mécanique : la présence de bulles contre une paroi de vaisseau sanguin va provoquer par contact des lésions mécaniques. Par exemple, il y a des fibres qui se déchirent avec mise à nu de lipo-protéines des membranes qui ne sont pas en contact habituel avec le sang. La charge électrique de la bulle va également provoquer des réactions locales aux zones de contact. Ces phénomènes mettent en route une première cascade de réactions biochimiques facilitant la coagulation. Ce mécanisme est logique : prenons l'exemple d'une plaie, elle est en contact avec de l'air et c'est ce contact qui va mettre en route des phénomènes de coagulation. C'est la même chose dans le vaisseau lors d'un ADD, vu la présence de bulles de gaz !
- Sur le plan physiologique : activation des cellules de l'endothélium vasculaire, des plaquettes et des globules blancs.
  - o En amont de la lésion, libération de substances qui provoquent une inflammation. Cette inflammation provoque une vasodilatation en amont et un œdème.
  - o En aval de la lésion, vasoconstriction, donc ischémie et libération de radicaux libres de l'oxygène (2, 3, 30). Ces peroxydes sont très toxiques pour les tissus.
  - o Les substances libérées provoquent une agrégation des plaquettes, puis un renforcement de ce conglomerat de plaquettes par un réseau de fibrine.
  - o Ces mêmes substances provoquent également une adhésion des globules blancs, qui renforcent « l'obturation » plaquettaire.
- Sur le plan immunologique : mise en route d'un mécanisme plus tardif (environ vers la 6<sup>e</sup> heure) qui provoque une inflammation.

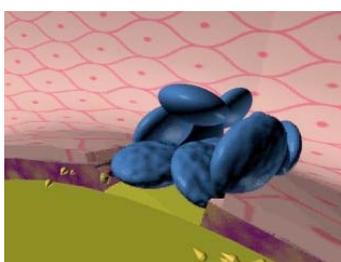
*Agrégation plaquettaire sur une plaie ou lésion de l'endothélium.*



*Renforcement de l'agrégation dans un deuxième temps, avec de plus en plus de plaquettes sur la « brèche »*



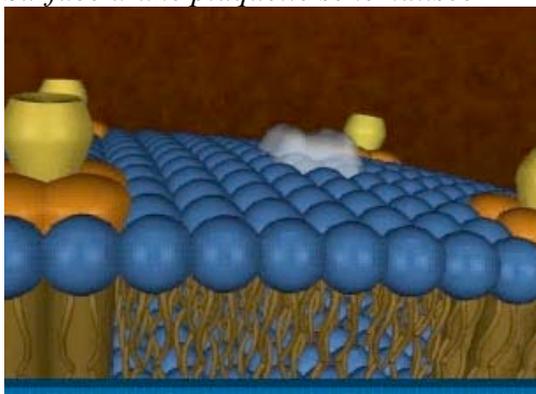
*3<sup>e</sup> temps : Déformation des plaquettes*



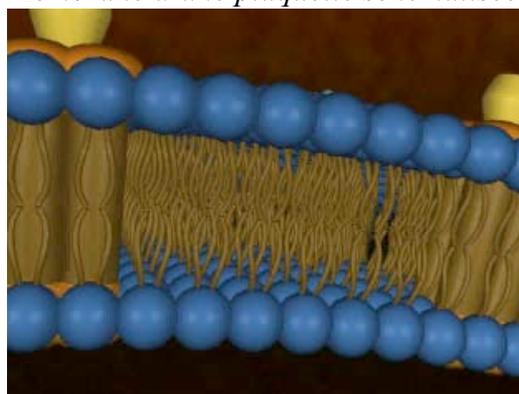
*Plaquette au microscope électronique à balayage*



*Surface d'une plaquette schématisée*

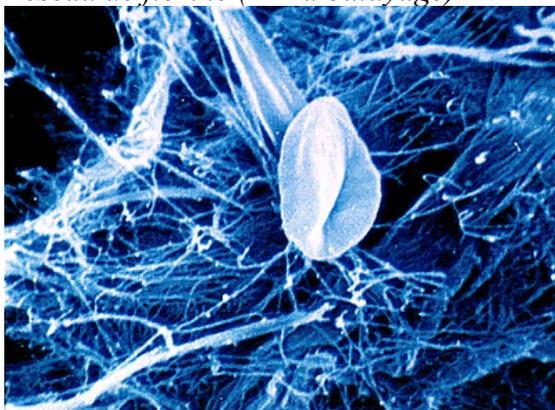


*Membrane d'une plaquette schématisée*

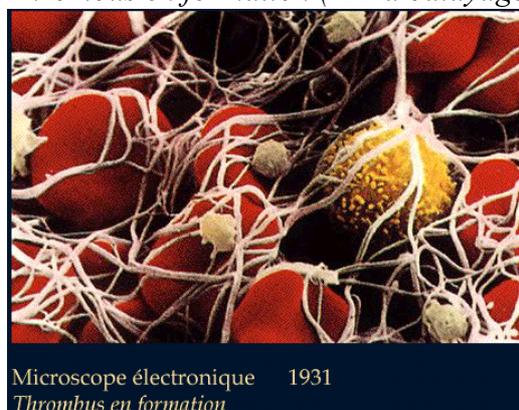


*Lors de l'agrégation plaquettaire, la surface de la plaquette se déforme, la structure membranaire constituée de phospholipides se modifie. La plaquette « attire » les autres plaquettes, puis se met en route un mécanisme tissant un réseau de fibrine, qui va provoquer un thrombus ou caillot.*

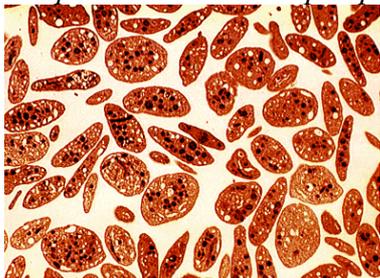
*Réseau de fibrine (ME à balayage)*



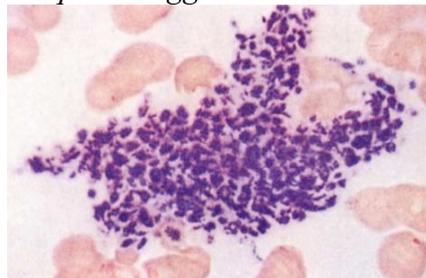
*Thrombus en formation (ME à balayage)*



*Plaquettes au microscope optique*



*Plaquettes agglomérées au MO.*



S'il fallait résumer la maladie de décompression, je dirais que ce sont les différents phénomènes dus aux bulles, qui conduisent à des phénomènes de coagulation renforçant l'ischémie et qui amènent une inflammation des tissus. C'est ce mécanisme biologique qui conduit à l'ADD et surtout à son aggravation. **Il s'agit de bien comprendre, que ce phénomène se poursuit, même si la bulle causale a déjà disparu.** Cette bulle a provoqué des lésions, qui mettent en route la maladie de décompression, puis la bulle disparaît, résorbée par les tissus alentour, et la maladie de décompression se poursuit.

En médecine interne, le même phénomène est bien connu : cela constitue la maladie endothéliale. Elle intervient dans différentes maladies, dont l'athérosclérose et la sclérose en plaque (30). Les radicaux libres interviennent dans les phénomènes de vieillissements (2, 3, 27, 30). Cela signifie que les recherches de physiologie fondamentale en médecine de plongée peuvent déboucher sur des applications variées dans des domaines de pathologie courante.

Aujourd'hui (janvier 2016), on appelle ce phénomène stress oxydatif. La cascade de réactions qui se fait en présence de la bulle, est très proche de la réaction qui se fait lors d'un infarctus du myocarde. La bulle déclenche la mise en route de toute une série de réactions de coagulation, très complexes, qui comportent plus de 13 enzymes et plus de 5 coenzymes. (Correction janvier 2016)

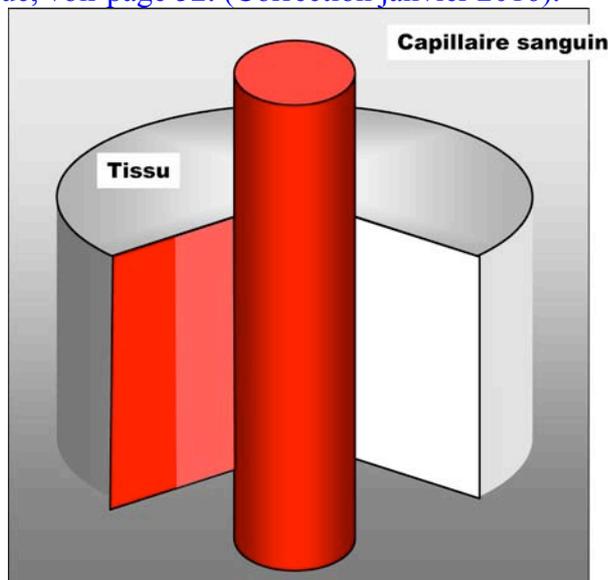
### LES ACCIDENTS DE DECOMPRESSION EN PLONGEE LOISIR.

Certains auteurs souhaitent changer le terme d'accident de décompression en accident de désaturation, plus proche de la réalité selon eux (9).

Un modèle de décompression est une projection mathématique, qui permet de simplifier la physiologie de la décompression, infiniment plus complexe. L'une des principales différences est que nous passons d'un compartiment à un tissu. Le compartiment est une notion simple, le tissu est une réalité anatomique qui ne présente pas d'homogénéité : sa saturation dépend de la perfusion et de la diffusion. Il n'est pas non plus saturé de façon homogène : prenons l'exemple des muscles. Certains muscles actifs en plongée vont être plus saturés que ceux qui sont au repos. De plus, le muscle qui travaille va présenter une saturation variable selon l'éloignement des fibres musculaires du capillaire qui le nourrit.

Le sang est un compartiment rapide, de même que le tissu cérébral et la moelle épinière. L'endothélium représente le premier tissu par sa surface et sa capacité de stockage. La peau représente le 2<sup>o</sup> tissu de l'organisme en surface et volume de stockage. Cette notion sera importante dans la compréhension des circonstances favorisant les ADD (1, 2, 3, 26).

La classification des ADD en deux types relève de la médecine hyperbare et date des années 80. Ce classement présentait un intérêt pour le choix du traitement en caisson d'oxygénothérapie hyperbare. Il met aussi en évidence deux mécanismes bien différents de genèse d'accidents de décompression. Les accidents du type 1 sont périphériques : cutanés et ostéo-arthro-musculaires (OAM), le malaise de décompression ; les accidents du type 2 sont neurologiques (médullaires et centraux) et cochléo-vestibulaires (13, 33). [Cette classification en type 1 et 2 n'est pas pertinente sur le plan pédagogique, voir page 52.](#) (Correction janvier 2016).



Plusieurs auteurs (23, 24, 25, 26, 28) ont compris très tôt que selon le profil de plongée, ils pouvaient déclencher des accidents ostéo-arthro-musculaires ou des accidents cérébraux. Il n'y a donc pas un accident de décompression, mais bel et bien plusieurs types d'accidents, dont nous allons étudier les mécanismes.

Je voudrais aussi exposer une réflexion sur les bulles : les bulles ne vont pas préférentiellement au cerveau en raison de l'anatomie des carotides ! Les bulles vont absolument partout. Elles suivent la circulation, comme les globules rouges. Mais elles ne provoquent de dégâts que si la circulation est « terminale ». Terminale signifiant qu'il n'y a pas de relai ; si une artère est bouchée, il n'y a pas d'autre artère pour prendre le relais. (Correction janvier 2016).

### **A. Mécanismes des ADD.**

Nous allons proposer différents scénarii à l'origine des trois types d'accidents développés (29).

#### **1° - Scénario des accidents cérébraux.**

Les micro-bulles ont été mises en place.

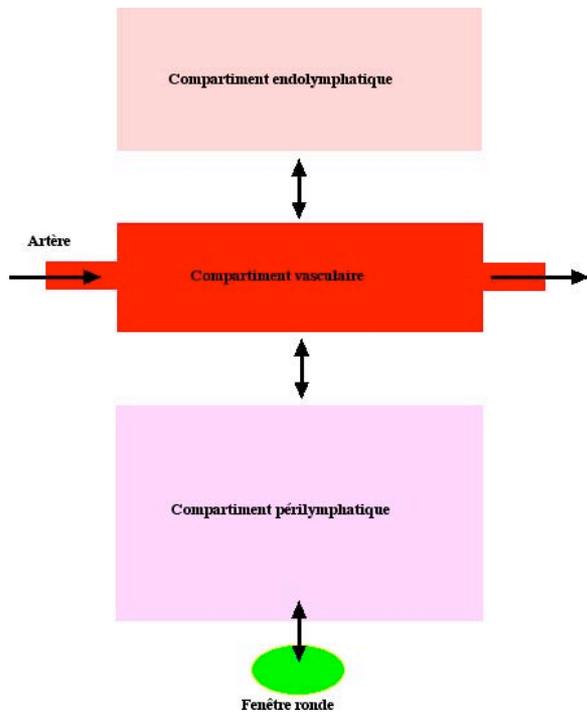
Le cerveau est un tissu rapide. En effet, malgré la présence de tissus lipidiques au niveau cérébral, le cerveau est considéré comme un tissu rapide en raison de sa vascularisation très riche. L'accident cérébral est donc influencé par le début de la remontée et la vitesse de remontée. Il est sensible aux paliers profonds qui permettent aux tissus rapides de désaturer plus sûrement.

Pour provoquer un accident cérébral, il suffit d'une plongée profonde avec remontée rapide ou de plongées « yoyo ». Lors de la remontée, les bulles vont s'enrichir d'azote et grossir. Normalement elles s'éliminent au niveau du filtre pulmonaire. Si la remontée est trop rapide, le filtre s'engorge et des bulles passent dans la grande circulation.

Pendant les plongées « yoyo », lors de la redescente, ces bulles vont subir une compression (Loi de Mariotte), ce qui va leur permettre de passer le filtre pulmonaire (effet shunt) et de retourner dans la grande circulation. Lors des manœuvres de Valsalva de la redescente, avec des oreilles qui passent mal à force de monter et descendre, il est également possible d'ouvrir un FOP pour ceux chez qui il est resté perméable.

Une fois dans la grande circulation, les bulles se gavent des gaz dissous et grossissent. De là, elles peuvent passer directement au niveau cérébral où elles vont boucher des artères et empêcher l'oxygénation du territoire qui en dépend. Ceci est le mécanisme des accidents centraux.

Les cochléo-vestibulaires font partie des accidents centraux. L'origine de ces accidents est plus complexe qu'il n'y paraît. Le mécanisme semble bien être une embolisation d'une artère terminale, mais pas forcément dans le territoire attendu. En effet, il n'existe pas moins de cinq zones cérébrales dont l'ischémie provoque un vertige, au même titre qu'une lésion de l'oreille interne. Ceci explique aussi pour quelle raison les explorations dans les accidents cochléo-vestibulaires sont si décevantes. Certains auteurs pensent également que l'hélium diffuse à travers la fenêtre ronde, fine membrane osseuse perméable à ce gaz et augmente donc ainsi la teneur en hélium dans l'oreille interne



(18)

Il y a également une hypothèse (18) fondée sur un nouveau modèle de l'oreille interne : celle-ci se composerait de 3 compartiments (endolymphatique, vasculaire et périlymphatique) dans lesquels les gaz diffusent par la voie vasculaire et par l'oreille moyenne (fenêtre ronde). Il y aurait un phénomène de contre-diffusion entre ces compartiments lors de la remontée en zone profonde, avec des signes apparaissant de façon décalée dans le temps, plus tard pendant la remontée.

Les circonstances favorisantes sont les successives, les intervalles courts et les plongées yoyo. Je voudrais également mentionner les séjours de plongée avec plongées successives sans repos récupérateur qui m'a permis de mettre en évidence le signe de l'Assubest.

75% des accidents en plongée loisir sont des accidents neurologiques. C'est donc un accident de type artériel. Il survient sur des temps de fonds relativement court : 15 ou 20'.

## **2° - Scénario des accidents ostéo-arthro-musculaires (OAM).**

Pour provoquer un accident OAM, il suffit de plonger longtemps, plutôt profond (40 m), et d'écourter les paliers proches de la surface.

Les tissus sont saturés d'azote dissous. Les micro-bulles vont se gaver de ces gaz dissous et grossir.

Les artères qui les transportent, surtout au niveau des zones très vascularisées autour des articulations, vont s'obstruer. L'occlusion de ces artères, va engendrer une douleur par effet mécanique sur les structures péri-articulaires.

Un autre scénario est que les bulles soient tissulaires, s'évacuent mal en raison de l'augmentation de leur taille, et provoquent des douleurs. Les douleurs sont la conséquence de la compression des structures vasculo-nerveuses.

Ce type d'accident ne représente que 25 % des cas en plongée loisir, mais 75 % des ADD en plongée professionnelle : la plongée est plus longue et le plongeur travaille au fond.

Ce type d'accident survient uniquement sur des durées de plongées approchant ou dépassant l'heure. Il implique les tissus lents et n'est pas sensible aux paliers profonds. Pour les réduire, il faut augmenter les paliers proches, comme c'est le cas dans les MT 92.

## **3° - Scénario des accidents médullaires.**

En temps de plongée, les accidents médullaires se situent entre 15' et 1 heure. Ils représentent 50% des accidents en plongée loisir.

Le mécanisme à l'origine des lésions de la moelle épinière est probablement l'occlusion veineuse.

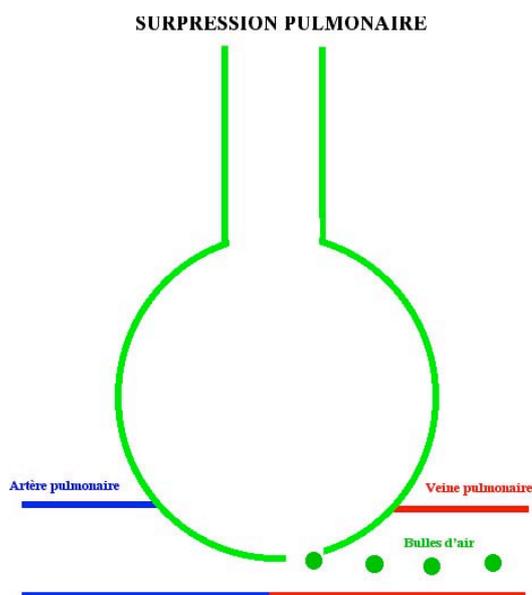
La moelle est un tissu cérébral rapide. La remontée engendre la désaturation rapide qui grossit les bulles veineuses. Ces bulles finissent par obstruer certaines veines au niveau de la moelle.

Les veines au niveau médullaire, tout comme les artères, sont de type terminal. Ceci signifie que si la veine est bouchée, il n'y a pas d'autre veine pour prendre la relève.

Cette obstruction a pour effet de provoquer une accumulation de toxine au niveau de la zone normalement drainée par cette veine bouchée : CO<sub>2</sub>, acides divers qui augmenteront le pH local, urée etc ... Ces toxines vont provoquer des lésions de la moelle et les symptômes qui s'y rattachent. **L'occlusion artérielle est également un mécanisme de l'accident médullaire, mais de fréquence moindre. (Correction janvier 2016)**

Ce type d'accident est favorisé par les plongées profondes et un temps de fond relativement plus long que pour les accidents centraux, mais plus court que pour les OAM. Il est une forme intermédiaire entre ces deux types d'accidents, et représente une fréquence très élevée.

#### **4° - L'aéroembolisme de la surpression pulmonaire.**



Il s'agit d'une rupture des alvéoles pulmonaires avec passage direct d'air dans le sang veineux pulmonaire, puis passage de cet air dans l'oreillette gauche, ensuite dans le ventricule gauche et diffusion principalement vers le cerveau, les carotides étant dans l'axe d'éjection du cœur gauche.

Comme je l'indique, il ne s'agit pas d'un ADD lié à l'azote, mais de bulles d'air qui bloquent directement les artères. La gravité de la surpression pulmonaire est liée à l'importance de cet aéroembolisme.

#### **B. Délais de survenue des ADD.** (6, 8, 9, 12, 28, 35, 39)

La majorité des ADD survient avant la deuxième heure suivant l'immersion.

50% des signes s'installent en moins de 30'.

76% des signes apparaissent en moins d'une heure.

Les seuls accidents qui surviennent au-delà de la deuxième heure sont les accidents de type 1.

Cette notion est intéressante à connaître : le temps de retour du site de plongée au local et l'apéritif qui s'en suivra est souvent proche des 2 heures, donc en l'absence de signe à ce moment-là, il y a peu de choses à craindre.

De très rares cas d'accidents graves ont été décrits après la 2° heure, voire avec un délai de 24 heures. Dans ce cas, la circulation lymphatique est impliquée. Associée à un effort physique assez intense, le cas auquel j'ai été confronté consistait en un semi-marathon après un stage

examen N4 pour un cadre MF2. En effet, la circulation lymphatique comporte des bulles et est très lente. Mais elle est accélérée par l'effort physique. On peut donc observer un relargage massif de bulles au delà de la 2<sup>ème</sup> heure. Pour en savoir plus, voir ADD et circulation lymphatique, sur <http://www.ancplongee.fr/wp-content/uploads/ADD-et-circulation-lymphatique.pdf> (Correction janvier 2016)

### **C. Profondeur, durée et ADD.** (6, 8, 9, 12, 28, 35, 39)

Les statistiques des caissons de Toulon et de Marseille donnent des repères très intéressants.

Les accidents vestibulaires surviennent pour une profondeur moyenne de 34 m.

Pour les OAM, la profondeur moyenne est de 41 m.

Pour les accidents médullaires, la profondeur s'échelonne de 37 à 53 m en moyenne selon gravité (plus c'est profond, plus c'est grave). Plus les signes d'accident médullaire surviennent tôt, plus le risque de séquelles sera élevé. C'est donc une véritable urgence thérapeutique, une lutte contre la montre pour faire admettre ces plongeurs au COH le plus tôt possible.

### **D. Fréquence des différents types d'ADD.** (6, 8, 9, 12, 28, 35, 39)

Les statistiques des caissons de Toulon et de Marseille montrent les chiffres suivants :

En tête, les accidents médullaires : ils représentent 48 % des ADD

En deuxième, les accidents cochléo-vestibulaires, ils représentent 25 % des ADD

En troisième, les accidents OAM, ils représentent près de 20 % des ADD.

Au total, on est donc proche des 100 %. Cela signifie que les autres types d'accidents sont rares, notamment les accidents cutanés.

À signaler que dans les statistiques de caissons, la moitié des accidents pris en charge est totalement inclassable : soit les signes de départ se sont estompés suite à l'administration précoce d'oxygène, soit qu'il s'agissait de « malaise de décompression », mal codifié qu'on verra plus loin dans l'exposé, soit il ne s'agit pas d'accident de décompression.

### **E. Les différents types d'accidents :**

#### **1° Les accidents médullaires.**

Ce sont donc les accidents les plus fréquents, environ la moitié de tous les ADD.

La symptomatologie dépend bien sûr du niveau lésionnel. Les lésions se font selon une symétrie horizontale, tout ce qui est au-dessus est indemne, ce qui est en dessous est lésé. Les lésions consistent en une parésie : troubles de la sensibilité, ou une paralysie : troubles de la motricité. Les différentes lésions peuvent cohabiter à des degrés différents. Plus la lésion est située haut au niveau de la moelle épinière, plus elle est grave : la tétraplégie atteint les 4 membres, la paraplégie uniquement les membres inférieurs.

Sont quasiment toujours présentes des lésions sphinctériennes, avec une impossibilité d'uriner, qui nécessitent un sondage évacuateur pour vider la vessie.

Le mode de déclenchement est fréquemment associé à une douleur lombaire ou dorsale brutale, en coup de poignard. Cette douleur peut passer pour une douleur aiguë du dos d'origine mécanique, déclenchée par une mauvaise manipulation d'un bloc de plongée par exemple. Dans ce cas, il y a un risque que les secours soient retardés. Or nous avons déjà vu qu'il s'agit d'une véritable urgence.

Pronostic : il est d'autant meilleur que la prise en charge est plus précoce. Les séquelles sont plus sévères si la plongée responsable a été plus profonde et si les signes sont survenus tôt. Elles sont de nature motrice (paralysie plus ou moins importante) ou sensitive (moins de sensibilité, perte de sensation du chaud ou froid, perte de la sensibilité douloureuse ou anesthésie douloureuse). Jamais évoqués dans les livres de plongée, des troubles de l'érection avec impuissance peuvent persister comme séquelle.

## **2° Les accidents cochléo-vestibulaires.**

Ces accidents sont en recrudescence, en rapport probablement avec le mode de plongée : yoyo, successives ...

La symptomatologie associe les signes cochléaires qui sont au premier plan, à des signes vestibulaires.

Les signes vestibulaires sont les vertiges, les nausées et parfois les vomissements. La station debout, voire assise est impossible, le sujet se couche au sol, et malgré cela les vertiges peuvent se poursuivre.

Les signes cochléaires sont la baisse de l'audition plus ou moins sévère et parfois des acouphènes. Les signes cochléaires sont au deuxième plan, vu l'expression sévère des signes vestibulaires.

Les vertiges ne sont pas seulement attribuables à un ADD, mais à tout un cortège de manifestations :

Les vertiges alternobariques, dus à une différence de pression entre les deux oreilles, en général bref, intense, survenant à la remontée, sans trouble de l'audition.

Les vertiges thermodifférentiels, dus à une différence de température de l'eau appliquée sur les oreilles (faire entrer de l'eau dans la cagoule de façon non symétrique). Le vertige est intense, très bref, sans trouble de l'audition.

Les vertiges barotraumatiques de l'oreille interne, dus à une compensation trop brutale lors de la descente, avec coup de piston labyrinthique. Le vertige est intense, se calme et récidive aux mouvements de la tête suite à une fuite du liquide labyrinthique. Les troubles de l'audition sont souvent au premier plan avec une douleur lors du phénomène de compensation. En l'absence de traitement, les vertiges persistent des années.

Le barotraumatisme de l'oreille moyenne peut aussi donner des vertiges : lors d'une rupture tympanique, en raison de l'irruption d'eau dans l'oreille moyenne.

Enfin, le mal de mer, par atteinte de la cochlée (mécanisme de compensation non adapté), provoque des vertiges, mais surtout des nausées et des vomissements, sans atteinte de l'audition. De plus, le contexte est connu, le plongeur sachant le plus souvent qu'il est sujet au mal de mer.

Voici un tableau de synthèse :

<b>Diagnostic</b>	<b>Mécanisme</b>	<b>Douleurs</b>	<b>Hypoacousie</b>	<b>Délai</b>	<b>Durée</b>	<b>Vertige</b>
<b>ADD</b>	Loi de Henry	Non	Oui, faible	Après la plongée	6 mois	++++

<b>Alternobarique</b>	Loi de Mariotte	Parfois, légères	Non	À la remontée	< 15'	++
<b>Barotraumatisme oreille interne</b>	Loi de Mariotte	Oui +++	Oui, +++	À la descente	À vie	++ Position de la tête
<b>Barotraumatisme oreille moyenne</b>	Eau dans oreille moyenne sur rupture tympanique	Oui le plus souvent	Oui, +++	À la descente	< 30'	+++
<b>Thermodifférentiel</b>	≠ de t°	Non	Non	N'importe	< 1'	++
<b>Mal de mer</b>	Désadaptation vestibulaire	Non	Non	Déjà avant la plongée	Variable	+

Comme je le mentionnais dans les scénarii d'accidents, la localisation de la lésion n'est pas uniquement dans l'oreille interne, mais peut se situer ailleurs au niveau cérébral ou cérébelleux (cervelet).

Pronostic : il est bon, l'organisme compensant assez bien avec le temps, mais les tests médicaux explorant les vertiges resteront parfois perturbés à vie. Peuvent également persister des acouphènes.

### **3° Les accidents ostéo-arthro-musculaires.**

Ces accidents se caractérisent par des douleurs articulaires, en général au niveau d'une grosse articulation : épaule, genou, hanche. Il s'agit donc d'une articulation « active ».

La douleur est progressivement croissante, sans notion de traumatisme. Elle apparaît parfois après deux heures. Elle est aggravée par la montée en altitude, que ce soit en avion ou un franchissement de col en voiture. Elle réagit mal aux traitements classiques : le paracétamol (Doliprane®) et les anti-inflammatoires ne soulagent pas.

Ce type d'accident aura tendance à récidiver, particulièrement dans le monde de la plongée professionnelle. Certains de ces accidents peuvent évoluer vers une ostéonécrose dysbarique (13) et donc provoquer des dégâts osseux irrécupérables.

Pronostic : bon, sauf si la lésion évolue vers l'ostéonécrose, soit moins de 10 % des accidents OAM.

### **4° Les accidents centraux.**

Ce sont des lésions cérébrales, à l'exclusion de celles provoquant les vertiges.

La symptomatologie dépend bien sûr des zones atteintes.

Les lésions se font selon une symétrie verticale, avec une parésie ou une paralysie lors d'une atteinte des zones sensibles ou motrices. Ce sera donc la moitié gauche ou droite du corps qui sera touchée. Il peut y avoir des atteintes non symétriques l'audition ayant fait l'objet du chapitre précédent. Les troubles de la parole après la sortie de l'eau (et avant l'apéro) doivent évoquer un ADD cérébral. Les troubles visuels relèvent également de cette cause.

En général, les accidents centraux sont en rapport avec un shunt droit-gauche et doivent faire chercher un FOP ou des shunts pulmonaires.

Une autre cause de ces accidents centraux est la surpression pulmonaire, par passage direct d'air dans les veines pulmonaires aux niveaux des alvéoles lésées. C'est la gravité de ces lésions qui fait le pronostic de la surpression pulmonaire.

Le pronostic dépend de la vitesse de la prise en charge initiale et de la gravité des lésions au départ. Le cerveau souffre vite de l'anoxie et les séquelles peuvent être graves.

### **5° Le malaise ou stress de décompression.**

C'est une entité particulière, difficile à classer. Le malaise de décompression se caractérise par une fatigue intense après la plongée, anormale. Cette fatigue se complète par un sentiment de mal-être. Ce malaise de décompression peut être le prélude à un ADD. On l'attribue à un dégazage trop important, avec engorgement au niveau pulmonaire.

Cette hypothèse n'est pas validée, il peut y avoir beaucoup d'autres causes à ce malaise : hypoglycémie, froid ...

### **6° Les accidents cutanés.**

Un petit mot sur les accidents cutanés : Les accidents cutanés pour lesquels j'ai été consulté sont tous survenus à plus de 24 H après la sortie de l'eau, dans un contexte particulier : plongées successives, prise de l'avion dans un délai de moins de 24 H et révélation de ces accidents cutanés dans l'avion. J'ai eu connaissance sur la région Alsace (Caisson d'oxygénothérapie hyperbare de Haute-pierre, centre hospitalier d'Altkirch, recrutement propre) de 4 cas sur plus de 10 ans. C'est donc une complication rare.

Ceci récuse le vieux dogme, que les accidents cutanés peuvent être le signe annonciateur d'un accident neurologique !

Pronostic : pas de séquelle, uniquement un mauvais souvenir.

Jusqu'à il y a peu de temps, les accidents cutanés étaient résumés par le « bestiaire » : les puces et les moutons. Depuis quelques temps est décrite une autre forme d'ADD : le livédo réticulaire, ou livédo reticularis ou cutis marmorata. Il s'agit de lésions cutanées consistant en des marbrures +/- marquées.

Le lien entre ces lésions cutanées et les ADD a été établi il y a moins de 10 ans.

Restait à comprendre la raison d'être de ces lésions, comment et pourquoi de telles lésions apparaissent-elles ? Diverses publications ont fleuri dans les revues de médecine hyperbare, surtout de langue anglaise. En particulier, plusieurs articles de Peter Wilmhurst, auteur anglais, démontraient une relation entre la présence d'un FOP et les cutis marmorata. Cela compliquait encore la compréhension : une bulle part de la circulation D vers la G sans passer le filtre pulmonaire, puis va emboliser dans un territoire cutané. Mais la topographie du territoire concerné ne correspond pas une artère précise et il y a de nombreuses « collatérales », donc pas de circulation terminale. Comment alors expliquer ces lésions ?

Une réponse possible vient d'être publiée dans le journal « Diving and Hyperbaric Medicine » volume 45, N°2, June 2015. Les auteurs sont une équipe de médecins néerlandais, d'Amsterdam, avec Tom CPM Kemper comme référent.



L'article un ADD chez une plongeuse de 30 ans, de type cutis marmorata. En parallèle, l'équipe a fait des recherches expérimentales sur 22 cochons, en injectant de l'air dans leurs carotides. La conclusion est que les 22 cochons ont développés une lésion cutanée typique de cutis marmorata. Ceci voudrait dire que cette lésion est une manifestation cutanée d'un accident cérébral. Le cerveau lésé sécrèterait une substance chimique qu'on appelle des neuropeptides (protéines sécrétées par le cerveau) et qui provoquerait cette lésion cutanée. Ce mécanisme est parfaitement connu dans d'autres maladies.

Cela implique que ces lésions ne sont pas bénignes, d'ailleurs leur apparition après la sortie de l'eau est assez précoce, 30 minutes en moyenne. On en déduit que la conduite à tenir est la même que pour un accident grave. (Correction janvier 2016).



### **7° Les accidents rares.**

On peut être confronté à des accidents de type embolie pulmonaire gazeuse ou infarctus du myocarde. Ces accidents sont très peu fréquents et ne s'observent que dans les surpressions pulmonaires sévères. À ce moment, l'aéroembolisme est tellement important qu'on peut observer des signes

- d'infarctus du myocarde : douleur thoracique avec l'impression que le cœur est pris dans un étau, douleurs de la base du cou, du bras et de la main G.
- ou d'embolie pulmonaire : toux, gêne respiratoire, crachats sanglants, douleurs thoraciques à type de coup de couteau.

L'intensité douloureuse et les conséquences de l'obstruction des artères concernées peuvent entraîner des pertes de connaissance. Les conséquences de ces embolisations peuvent également entraîner le décès.

## **F. Les circonstances favorisantes.**

Elles sont en général bien connues. Nous allons essayer d'en étudier les mécanismes fins.

### **1° Les circonstances favorisantes de nature physiologique :**

**a) La déshydratation :** Elle altère la fluidité du sang. L'hématocrite augmente, donc le sang est plus « épais » et s'écoule moins bien. Cela diminue la qualité des échanges et augmente le risque d'accident. Cette circonstance aggravante est presque toujours retrouvée au cours d'un ADD. Statistiquement c'est l'élément le plus important. La volémie est longtemps maintenue constante et lors des ADD, quand on constate que l'hématocrite augmente, il y a souvent une déshydratation des tissus. L'eau est prélevée au niveau des muscles (crampes) et des autres tissus, pour maintenir constant le plus longtemps possible l'hématocrite (1, 2, 8, 13).

La déshydratation est favorisée par la plongée de deux façons :

- L'air détendu est sec et doit être humidifié par les voies aériennes supérieures, donc le corps donne de l'eau à l'air respiré et perd cette eau.
- La diurèse augmente par les effets :
  - o du froid : vasoconstriction périphérique, augmentation de la pression artérielle dans le noyau central, diminution de la sécrétion d'hormone anti-diurétique, donc augmentation de la diurèse.
  - o de la pression hydrostatique : augmentation de la pression artérielle dans le noyau central par afflux du sang (appelé blood shift par les anglo-saxons) qui se trouve normalement en périphérie, donc augmentation de la diurèse pour faire baisser cette pression.

La diurèse augmente, donc le sang se concentre puisqu'on ne boit pas pendant la plongée. Il faut prévenir cette déshydratation par une augmentation de la prise de boisson avant plongée. Et l'envie d'uriner me direz-vous ? Elle dépend de la taille de votre vessie. Le Dr Grousset (21) disait qu'il y a deux catégories de plongeurs : ceux qui urinent dans leur combinaison et ceux qui mentent à ce sujet ! Si l'inévitable se produit une urine diluée (si on est bien hydraté) ne sent quasiment pas et dans tous les cas l'urine est stérile.

**b) L'essoufflement :** il est le résultat d'une augmentation de la production endogène de CO<sub>2</sub>. Il y a donc hyperventilation d'une part et vasodilatation d'autre part. La vasodilatation augmente la diffusion et la saturation tissulaire. Après la sortie de l'eau, le CO<sub>2</sub> reprend une valeur normale et la vasodilatation régresse, donc la désaturation sera plus risquée.

L'essoufflement pose un autre problème, celui de la surconsommation avec risque de panne d'air et celui de la panique avec rupture de palier, voire surpression pulmonaire. Tous ces phénomènes conduisent à l'ADD (48, 49).

L'essoufflement peut être dû à plusieurs causes :

- Effort en plongée : courant, recherche de performance ...
- Mauvaise condition physique, fatigue ...
- Contraintes matérielles : fonctionnement du détendeur, viscosité de l'air et profondeur ...

Mon amie Penny Glover avait l'habitude de dire que le CO<sub>2</sub> est l'ennemi du plongeur. C'est une belle métaphore qui peut être largement utilisé en pédagogie.

**c) Le froid :** Classiquement on dit que le froid est générateur d'ADD par son action sur le CO<sub>2</sub>. On rejoint donc le mécanisme de l'essoufflement, dont le froid est une des causes.

Un autre mécanisme mérite qu'on s'y arrête : le froid provoque une vasoconstriction, donc la peau ne sera pas vascularisée et par là même pas saturée. Cependant, lors de la plongée, la même quantité d'azote va être absorbée par l'organisme en application de la loi de Henry. Donc, les

autres tissus seront plus saturés, ils vont absorber la part qui se serait normalement répartie dans la peau (qui est rappelons-le, le deuxième tissu par son importance). Donc en fin de plongée, les gradients seront plus élevés (1, 2).

**d) La sédentarité** : Ce qui importe ce sont les fonctions physiologiques : adaptation du cœur, des poumons, des muscles à l'effort. Une personne en bonne condition physique, entraînée, a de bonnes fonctions physiologiques et ne présente pas de sur-risque (1, 2). Même si certains secteurs seront moins bien perfusés, cela n'entraîne pas de problèmes. À l'inverse, un sujet même jeune, s'il n'est pas entraîné présente un facteur de risque. Ses fonctions sont mal adaptées à l'effort, souvent cette personne va présenter une technique médiocre et donc consommer beaucoup plus qu'un sujet expérimenté ou entraîné, et fournir un effort plus important à plongée équivalente. Il est donc parfaitement logique de recommander à nos plongeurs d'améliorer ou de maintenir leurs capacités physiques.

**e) L'obésité** : C'est une circonstance aggravante classiquement décrite qui mérite qu'on l'étudie un peu. En fait, la graisse est un réservoir tampon, pour stocker de l'azote. Le phénomène serait donc inverse de ce qu'on vient de voir pour la peau et le froid. C'est un tissu relativement lent, donc non générateur d'accidents graves. Si la condition physique du sujet est bonne, l'obésité n'est pas un facteur aggravant. Les graisses seront bien vascularisées et joueront bien leur rôle de tampon. Ceci se vérifie au DOPPLER, les sujets « enrobés » ont moins de bulles que les autres (1, 2). [Mais n'est vrai que chez les sujets en bonne condition physique. \(Correction janvier 2016\).](#)

**f) Le sexe féminin** : On trouve encore des ouvrages où il est fait mention que les femmes font plus d'ADD que les hommes, en raison d'une proportion plus élevée de masse grasse dans la répartition corporelle. Ceci est absolument faux, je viens de l'expliquer. Les statistiques ne montrent aucune prédisposition féminine aux ADD, on trouve le même ratio hommes femmes chez les licenciés que chez les personnes ayant fait un ADD. De plus, les femmes ont souvent un comportement plus « raisonnable » que les hommes en plongée.

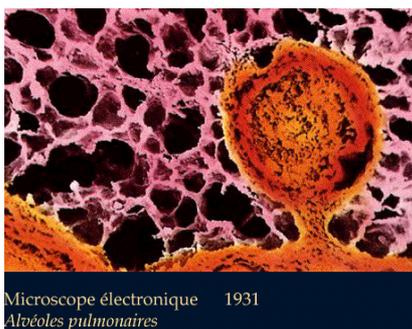
**g) L'âge avancé** : L'âge moyen des accidentés augmente. Ceci ne veut pas dire que l'âge est une circonstance aggravante. C'est un biais statistique, l'âge moyen des plongeurs augmentant, il est logique que celui des accidentés augmente. Ce qui importe c'est la condition physique. Si celle-ci est bonne, l'âge n'est pas un facteur pénalisant. (1, 2). [Ceci introduit la notion d'âge physiologique et non pas d'âge chronologique. On a des sujets de plus de 70 ans qui sont marathoniens, ils auront moins de risque qu'un jeune sédentaire. \(Correction janvier 2016\).](#)

**h) La fatigue** : Il est difficile d'expliquer pourquoi la fatigue augmente le risque d'ADD. Il y a un lien statistique très fort, aussi important que pour la déshydratation (8). Sur le plan physiologique, la fatigue se définit comme étant une baisse de la force motrice (1, 2). Quand on a voyagé toute la nuit, et qu'on plonge dès le petit matin, il n'y a pas de baisse de force motrice. Mais on peut avoir une déshydratation quasi permanente dès qu'on voyage longtemps. Il y a aussi une baisse de vigilance et de concentration qui entraînent peut-être une technicité moindre. Enfin, il y a souvent une impasse sur la plongée de réadaptation, et faire le Donator quand on n'a pas plongé depuis quelques mois est pour le moins imprudent.

**i) Le tabac** : Les fumeurs ont un filtre pulmonaire moins performant. La ventilation alvéolaire se fait moins bien suite à une réduction du calibre des bronchioles. Il y a eu de nombreuses études à ce sujet : à Genève, à Annecy... L'étude des bulles circulantes au DOPPLER montre que les bulles sont nombreuses et durent plus longtemps chez les fumeurs que chez les non-fumeurs (2). Néanmoins, on ne dispose pas de statistiques permettant d'incriminer le tabac sur le plan de l'accidentologie. Il y a également plus de shunts pulmonaires chez le fumeur (1, 2)

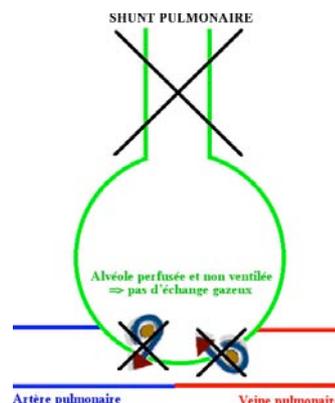
**j) Le stress** : C'est une discussion qui commence à se faire jour. Les spécialistes des caissons (Eric Bergmann, Bruno Grandjean) pensent que le stress intervient dans les circonstances favorisantes (9). Sur le plan physiologique, le stress est une réaction de défense de l'organisme, pour faire face à une agression quelconque. Le cerveau sécrète de l'adrénaline, qui provoque une accélération cardiaque, respiratoire, une augmentation de la force motrice, une augmentation de la consommation d'oxygène et de la production de CO<sub>2</sub>. Il est aussi vasoconstricteur. Cette adaptation de l'organisme permet de mettre le « turbo » afin de le sortir d'une situation potentiellement dangereuse. Elle est saine tant qu'elle ne se renouvelle pas trop souvent. Par quel biais le stress augmenterait-il le risque d'accident ? L'augmentation du CO<sub>2</sub> en serait-elle responsable ? Si le stress n'est pas contrôlé, il y a risque de surpression pulmonaire. De plus amples investigations méritent d'être menées avant d'en tirer une conclusion.

**k) Les shunts pulmonaires :**



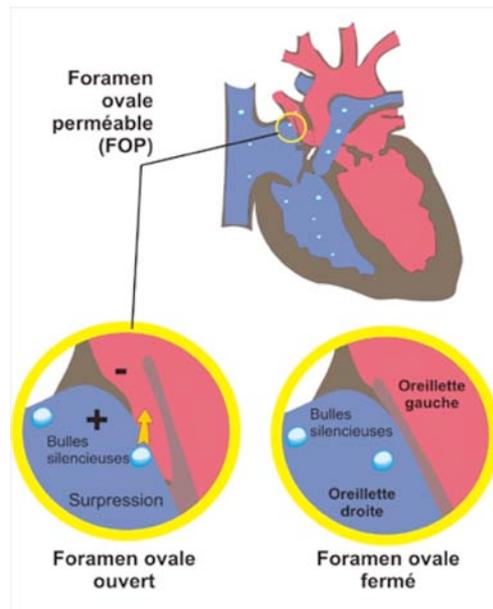
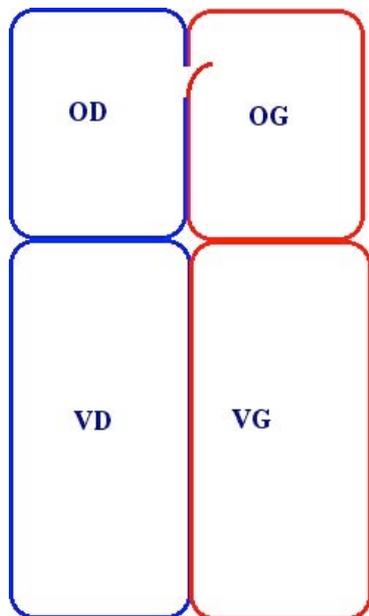
Ils sont présents chez 10 à 11% des plongeurs (1, 2) et susceptibles de favoriser le passage de bulles de la droite vers la gauche, en évitant l'élimination au niveau du filtre pulmonaire. Ils pourraient être responsables d'accidents de type cérébraux ou cochléovestibulaires. Ils sont plus nombreux chez le fumeur.

Leur détection peut se faire par Doppler crânien : on injecte des microbulles en intra-veineux, on demande au sujet de faire un Valsalva forcé et on recherche la présence de bulles artérielles au niveau crânien. La présence de bulles signe le passage droite-gauche, mais ce passage peut également être dû à un FOP.



**l) Le FOP** : ou Foramen Ovale Perméable. (3, 20, 43, 44, 45, 46) C'est un vestige de la vie embryonnaire. Le passage du sang fœtal à travers le FOP est une condition de survie du fœtus. Il s'agit d'une membrane qui fait clapet entre les deux oreillettes. Au cours du développement de l'enfant, ce clapet se ferme par soudure des membranes les unes aux autres. Jusque vers l'âge de 8 ans, il y a 40% des enfants qui gardent un FOP perméable. À l'âge adulte, environ 30% des adultes présentent un FOP perméable. L'ouverture ou la fermeture de ce clapet est une affaire de pression.

Si la pression droite est supérieure à la pression gauche, le passage peut s'ouvrir en cas de persistance du FOP. C'est ce qui passe chez le fœtus où la pression droite est supérieure à la pression gauche. À la naissance, quand le poumon commence à respirer, les pressions s'inversent et le FOP se ferme. Chez l'adulte, en cas de FOP persistant, si la pression droite dépasse la pression gauche, du sang passe directement de l'oreillette droite vers l'oreillette gauche. Ce sang chez le plongeur peut contenir des bulles en phase de décompression et dans ce cas seulement, le FOP est un facteur favorisant de l'ADD. Lors du passage des bulles à gauche, elles empruntent le trajet préférentiel du sang vers le cerveau, en raison de l'orientation des artères carotides. Le FOP et les shunts pulmonaires vont donc favoriser les accidents cérébraux (y compris ceux de type cochléovestibulaires).



La recherche d'un FOP se fait par échographie trans-oesophagienne : il s'agit pour le sujet d'avaler une sonde échographique, jusqu'au niveau de l'œsophage en arrière du cœur. Cette phase est très désagréable et ne peut se faire sous anesthésie, la participation volontaire du sujet étant requise pour la suite. Ensuite on injecte au sujet des microbulles en intra-veineux, et comme pour le Doppler trans-crânien on lui demande de pousser fort et on recherche le passage de bulles de l'oreillette D vers l'oreillette G. Quand les conditions d'examen sont bonnes, on peut également voir l'ouverture elle-même du FOP sans bulles. Les autres méthodes de recherche du FOP, notamment l'échographie trans-thoracique, ne sont pas des méthodes fiables, elles ne sont donc pas recommandées.

Les conditions d'ouverture du FOP sont les Valsalva « forcés », les efforts importants, avec blocage respiratoire, de quelque cause que ce soit. C'est donc le comportement du plongeur qui permet une ouverture du FOP et qui représente un facteur de risque et non le FOP lui-même.

Il faut aussi arrêter d'attribuer au FOP la responsabilité des accidents autres que cérébraux. Chez un plongeur qui fait un accident médullaire ou AOM, la découverte d'un FOP n'explique pas l'accident ! Il faut donc bien relativiser le rôle de ce vestige embryonnaire dans la genèse des ADD.

Lors d'un récent colloque de formation de moniteurs, on m'a rapporté que des médecins fédéraux prônaient la recherche systématique d'un FOP chez des plongeurs préparant un niveau 4 ! Cela n'a aucun sens, la présence d'un FOP n'étant responsable d'un accident que si le comportement du plongeur est inadapté. Il vaut donc mieux déployer de l'énergie pour apprendre aux plongeurs à ne pas faire de « surpression » droite après une plongée, plutôt que de dépister pour rien des futurs cadres. (1, 2)

Il faut également être bien conscient que le 1/3 des plongeurs a un FOP, y compris dans les niveaux élevés et je ne me vois pas interdire au tiers de ces plongeurs la pratique de leur activité favorite !

Chez les plongeurs militaires, la découverte d'un FOP n'est plus une contre-indication.

**m) L'altitude et l'avion après la plongée :** c'est un facteur de risque qui découle d'une augmentation du gradient d'azote. En altitude la  $PpN_2$  est plus basse, donc la charge en azote d'un tissu atteint plus rapidement le seuil critique. En clinique, on a rapporté des accidents OAM qui s'aggravent en voiture à la montée d'un col et s'améliorent à la descente. Les douleurs s'aggravent aussi en avion. La prise de l'avion après la plongée nécessite des éclaircissements, y compris le « no fly » affiché sur les ordinateurs. Beaucoup de plongeurs prennent ce « no fly » pour une vérité première. Je vous cite l'article de J.M. Belin (4) :

*« La plupart des ordinateurs de plongée indiquent une durée à respecter avant de prendre l'avion. Cette période devrait correspondre à une désaturation totale. Cependant, il existe de telles différences entre les indications fournies par les différents ordinateurs du marché, qu'on peut se poser des questions. »*

*D'après Buhlmann, la période « Do not fly » doit permettre à tous les compartiments, même le plus long, de suffisamment désaturer pour supporter une chute brutale de pression jusqu'à une certaine valeur) sans qu'aucune tolérance de sursaturation ne soit dépassée. La « certaine valeur en question » est la pression habituelle régnant dans un avion commercial. Elle est à peu près équivalente à la pression atmosphérique régnant à 6000 pieds (1800m). Cependant, en cas d'urgence, la pression peut se retrouver à la pression ambiante régnant à l'altitude de vol. Aussi, par mesure de prudence, est-il plus prudent de tabler sur une altitude de 13000 pieds (3900m). L'ordinateur Aladin va même plus loin en prenant 15000 pieds, soit 4500 m.*

*Pour vous embrouiller encore un peu plus (ou vous faire réfléchir), voici un petit exemple:*

*Après une même plongée, l'Aladin Air X indique un « do not fly » de 9h, alors que le scubapro Buddy indique 24h. Tausim (un logiciel allemand présent sur le site <http://www.achim-und-kai.de/kai/>. sur lequel on trouvera également cet article), calcule quant à lui, une durée de 17h (mais avec une pression cabine de 1800m). où est la bonne réponse?*

*D'ailleurs, pour ajouter à la confusion, il faut préciser que Tausim n'est pas plus précis car il arrive qu'avec une plongée profonde ou longue, les simulations de calcul faisant intervenir les compartiments lents, tombent sur une valeur négative du logarithme à cause des limites du modèle Buhlmann. Dans ce cas, on doit utiliser un compartiment un peu moins long, ce qui fausse le calcul. Ainsi, si on se sert de moins de 16 compartiments pour effectuer le calcul, on trouve une durée sous-évaluée.*

*Nous avons précisé que l'Aladin, par mesure de sécurité, se basait sur une pression cabine équivalente à 15000 pieds. Comment, dans ce cas, expliquer que l'Aladin indique une durée de 9h, ce qui est bien inférieur à ce qu'indiquent les calculs basés sur 13000 pieds?*

*C'est parce que l'Aladin se base sur les compartiments de période moyenne au lieu d'utiliser le plus lent.*

*L'expérience a montré que les symptômes d'ADD produit lors d'un vol effectué trop tôt, affectent (principalement ou uniquement ???) les compartiment de période intermédiaire.*

*Alors que l'Aladin s'appuie sur le modèle ZHL 8 ADT qui est plus conservateur (spécialement lors des plongées successives), et non sur le ZH-L16, on pourrait être amené à penser que le temps indiqué avant de pouvoir prendre l'avion, est un peu maigre. Malheureusement, il n'y a rien dans la notice qui précise les compartiments utilisés pour le calcul.*

*Comment fait le Scubapro ? Il indique simplement le temps nécessaire pour terminer la désaturation. En utilisant le modèle ZH-L16, les quatre compartiment les plus longs ne sont pratiquement jamais impliqués dans les profils de plongée, aussi le temps 'do not fly' est toujours plus long que celui indiqué par Tausim. Le fait d'utiliser le temps nécessaire pour terminer la désaturation va toujours dans le sens de la sécurité. Cependant, cela signifie également que le 'do not fly' issu de deux ou trois plongées par jour, et quelque fois plus, pendant plusieurs jours, peut allègrement dépasser les 24h. Combien de plongeurs accepteraient de ne pas plonger les deux derniers jours de leur séjour plongée?*

*Comment font les autres fabricants d'ordinateur? A ce propos, ils invoquent 'le secret de fabrication'. Ou donnent des informations floues et inutilisables. C'est le côté obscur des ordinateurs de plongée qui constitue un risque potentiel pour le plongeur.*

*Bref, avant de prendre l'avion vous devez être « Nitrogen clean ». Ce qui signifie qu'il est plus prudent d'avoir complètement désaturé. »*

**n. L'absence de plongée de réadaptation :** elle est surtout connue pour réapprendre les automatismes, adapter le lestage. Mais la plongée de réadaptation joue également un rôle physiologique dans la désaturation en permettant à l'organisme la mise en place de protections vis-à-vis des microbulles : antioxydants, anti radicaux libres, anti thrombotiques ... Cette protection reste acquise entre 7 et 10 jours. Au-delà, toute plongée devra être une plongée de réadaptation, donc rester dans la courbe de sécurité et ne pas dépasser 30 mètres. A ne pas confondre avec la réadaptation à la narcose ... (Correction janvier 2016)

## **2° Les circonstances favorisantes liées aux profils de plongée :**

Il s'agit de tous les mécanismes qui favorisent le grossissement des bulles et le passage au niveau des shunts : yoyo, successives, consécutives, profils inversés, remontée rapide, efforts après la plongée...

Les efforts en plongée, les mauvais réglages de matériel, le surlestage ... tout ce qui contribue à augmenter le CO<sub>2</sub> et la consommation.

La bête panne d'air est un motif fréquent de rupture de palier et un grand pourvoyeur de caissons (48, 49).

Il est évident, que quel que soit l'ordinateur ou les tables utilisés, le comportement du plongeur est le principal facteur de risque. Ceci doit être clairement compris et enseigné.

### **3° Les accidents inexplicables :**

On trouve souvent dans la littérature, le terme d'accident « immérité ». Il concerne un plongeur qui a respecté toutes les procédures, qui ne présente aucune circonstance favorisant et qui, malgré tout, fait un ADD. Le terme d'immérité ne se justifie pas. Si un plongeur ne respecte pas les procédures par manque de maîtrise, par accident ou autre, on ne peut pas dire de lui qu'il « mérite » son accident au cas où il en ferait un ! Fort heureusement, toutes les erreurs de procédures ne sont pas suivies d'accident. Je pense que le terme d'inexpliqué est plus adéquat.

### **G. Conduite à tenir.**

Il faut réagir vite, c'est une urgence absolue. Les séquelles seront d'autant moindres que la prise en charge initiale sera rapide et que le transfert vers un service spécialisé se fera vite (6, 8, 9, 12, 28, 35, 39).

Sur le terrain, la priorité va à l'oxygénothérapie : 15 litres par minute au masque si l'accidenté est conscient et ventilé. En cas de troubles respiratoires, ventilation au BAVU. Il n'y a aucune exception à l'administration d'oxygène sur le terrain. C'est le médicament majeur de la prise en charge d'un ADD.

Comment agit l'oxygène ? Le fait d'administrer de l'oxygène pur n'augmente pas l'oxygène dissout ni la saturation qui est déjà maximale. Il augmente simplement le gradient de l'azote dissout et en permet donc l'élimination plus rapide. L'oxygène possède également des propriétés anti-inflammatoires, récemment mises en évidence. (Carl Nathan. Nature. Vol 422. April 2003, p 675 - 676)

Il n'est pas inhabituel de voir disparaître les signes d'ADD sous oxygène. Ce fait est bien connu des plongeurs et des médecins de plongée, mais pas forcément du médecin urgentiste. La disparition des signes d'ADD ne permet en aucun cas d'interrompre l'administration d'oxygène et ne dispense pas de la prise en charge par un service d'oxygénothérapie hyperbare. Cette notion devrait être enseignée avec le RIFAP. En effet, un phénomène rebond est possible après une amélioration transitoire, il s'agit donc de mettre en œuvre toutes les mesures préventives : pas d'interruption de l'administration de l'oxygène jusqu'à l'arrivée aux urgences.

L'hydratation : proposer à boire, selon les désirs de l'accidenté. Il ne sert à rien de le forcer à boire pour provoquer des vomissements. On ne propose pas de boisson lorsqu'il y a des vertiges, des nausées ou des vomissements. La boisson proposée est au choix de l'accidenté : eau plate (ou à bulles si cela correspond à ses goûts), thé sucré ou non ... Pas d'alcool ; en aucun cas.

L'aspirine est à proposer, sauf en cas de vertiges, nausées ou vomissements, de même qu'en cas de refus de l'accidenté (crainte ou allergie). Le niveau de preuve d'efficacité de l'aspirine est faible et son administration n'est pas essentielle. La France reste un des seuls pays où elle est recommandée. Toutefois, une remarque sur les différentes formes d'aspirine s'impose : l'arrêté du 22/06/98 impose comme contenu de la trousse de secours de l'aspirine en poudre non effervescente. Cela élimine les autres formes : gélules, comprimés, comprimés effervescents ... Dans la pharmacopée française (50), il n'y a que deux formes parmi plus de 75 existantes qui répondent à cette exigence, dosée à 500 mg, c'est l'Aspégic® 500 et la Catalgine® normale 500. La propriété de l'acétylsalicylate de DL-lysine (Aspégic®) est intéressante à connaître : elle agit dans un délai inférieur à 30', parce que cette forme soluble est rapidement assimilée et bien tolérée sur le plan de l'estomac. L'acétylsalicylate en carbonate monosodique (Catalgine®) est

moins soluble et diffuse moins vite. Les autres formes auraient une action trop retardée (jusqu'à 4 H) pour être intéressantes dans cette indication. L'utilisation de l'aspirine dans la surpression pulmonaire a longtemps été l'objet de débat, parce qu'il y a le risque d'aggraver un saignement. Cette question n'a pas lieu d'être. Tant que l'utilisation de l'aspirine reste recommandée en France, son administration doit être proposée. En effet, un plongeur n'a pas à faire de diagnostic fin et surtout pas le diagnostic différentiel entre un ADD et une surpression pulmonaire. Ceci est du ressort des spécialistes hospitaliers, qui auront déjà bien du mal malgré toutes leurs méthodes d'investigation. Dès qu'il y a suspicion d'ADD, la conduite à tenir doit être celle adaptée à un ADD. De plus, le pronostic de la surpression pulmonaire ne dépend nullement du saignement mais bel et bien de la gravité de l'aéroembolisme associé.

Une bonne nouvelle, l'Aspirine a disparue du Code du Sport. Son niveau de preuve était très faible, c'est la raison pour laquelle les autres pays l'ont abandonnée depuis longtemps. Il y a eu des études sur le rat pour l'utilisation d'autres antiagrégants plaquettaires qui ont donnés de bons résultats, en particulier le Clopidogrel. Mais ce médicament n'est à manier que par les médecins, il ne figurera donc pas dans la trousse de secours du parfait plongeur ! Qu'on se rassure, si on décide d'abandonner l'aspirine, on ne compromet nullement les chances de guérison des plongeurs accidentés. (Correction janvier 2015)

Passer un message d'alerte, installer confortablement la personne, la réchauffer ou la mettre à l'abri de la chaleur, de la pluie ... Remplir la fiche d'évacuation du plongeur recommandée par MedSubHyp (49). Il est important que le message d'alerte mentionne « accident de plongée », le CROSS ou le SAMU auront des réactions adaptées.

*Une remarque concernant le fonctionnement des SAMU. Selon la région ou le département, les attitudes des SAMU vont différer. Je crois qu'il est de la mission du président de la commission médicale régionale (à charge pour lui de déléguer aux présidents des commissions départementales si elles existent) de mettre en place les protocoles de prise en charge. Je vous rapporte le protocole mis en place au département 67. Le SAMU a pour mission dès qu'il s'agit d'un accident de plongée, d'alerter le caisson et d'y conduire l'accidenté directement, et impérativement sous oxygène (On m'a rapporté le cas d'un ADD qui a été admis à Mulhouse et envoyé en ambulance à Haute-pierre pour être caissonné. Le transfert a été effectué sans oxygène !). Le master du caisson aura donc été prévenu et il n'y aura pas de retard de prise en charge de l'accidenté par une personne compétente. J'ai également constaté un dysfonctionnement lors de l'accès direct d'un plongeur accidenté : un ami qui présentait un accident OAM de l'épaule s'est présenté aux urgences de Haute-pierre (hôpital où se situe le caisson à Strasbourg). Il a dû attendre 3 heures avant d'être vu par l'interne de garde, qui l'a renvoyé à domicile avec du paracétamol ! Le responsable du caisson a été avisé et depuis toute personne se présentant aux urgences a simplement à signaler à l'accueil qu'il s'agit d'un accident de plongée. Le responsable du caisson est alerté et la prise en charge est immédiate. Le nouveau protocole fonctionne, il a déjà été expérimenté par un plongeur avec un accident médullaire qui s'était rendu à l'hôpital par ses propres moyens.*

Prévenir le président de club et le responsable technique.

## **H. Prise en charge hospitalière :**

La base du traitement sera le caisson d'oxygénothérapie hyperbare.



*Illustration gracieusement prêtée par Franck Wisson.*

Comment agit l'OHB ? De trois façons :

- Augmentation de l'oxygène dissout, donc meilleure perfusion de la zone lésée.
- Action anti-inflammatoire de l'oxygène par l'intermédiaire d'une enzyme : HIF-1 $\alpha$  (Hypoxia Inductible Factor 1 Alpha)
- Diminution de la taille des bulles par la loi de Mariotte, cette action est secondaire.

Les tables thérapeutiques utilisées sont essentiellement au nombre de 4.

Le reste de la prise en charge est moins bien codifié et est une affaire d'équipe : corticoïdes utilisés comme anti-inflammatoires, héparine utilisée comme anticoagulant, vasodilatateurs, oxygénateurs ... Ces médicaments sont censés combattre la maladie de décompression (13, 33, 43, 44, 45).

La réhydratation est réalisée par toutes les équipes : perfusion de remplissage.

### **I. Les séquelles :**

Elles sont de moins en moins lourdes, mais ce n'est pas une raison pour se reposer sur nos lauriers et crier victoire. Les plus importantes séquelles se trouvent dans les accidents médullaires. Elles seront d'autant moindres que la prise en charge initiale sera bonne et que l'acheminement vers le COH sera rapide (6, 8, 9, 12, 28, 35, 39, 48). Le délai de prise en charge initiale est certes tributaire de la performance des moniteurs qui encadrent l'activité, mais aussi du signalement des symptômes par le plongeur accidenté. Il ne faut pas négliger le « déni » de l'accident par la victime. Ce « refus » de l'accident par la victime est à l'origine de près de 50 % des retards de prise en charge selon les statistiques du CROSS de 2001 à 2005 (12). Cette notion aura des implications pédagogiques.

### **J. Les diagnostics différentiels des ADD :**

Un diagnostic différentiel est une pathologie qui a les mêmes signes qu'un ADD mais n'en est pas un.

Il y a tout d'abord la surpression pulmonaire, qui peut donner un accident qu'on appellera de décompression (et non de désaturation). Le mécanisme a été vu plus haut.

Il y a aussi toutes les maladies qui donnent des signes identiques : accident vasculaire cérébral etc ... Ce n'est pas au moniteur de plongée d'établir la cause de l'accident et dans le doute, on adopte la même conduite à tenir. De toutes façons, les accidents vasculaires cérébraux sont des urgences et doivent être hospitalisées. Comme l'âge de nos plongeuses et plongeurs augmente, ce type d'accident se rencontre. (Correction janvier 2016)

Je voudrais aussi signaler le principal diagnostic différentiel de la surpression pulmonaire, qui est l'œdème aigu d'immersion, abrégé AOP d'immersion. L'OAP d'immersion est beaucoup plus fréquent que la surpression pulmonaire et à posteriori, quand on reprend des dossiers classés SP on se rend compte que c'était d'authentiques OAP ! Si vous voulez en savoir plus, consultez le lien suivant : <http://www.ancplongee.fr/wp-content/uploads/OAP-dimmersion-MF2.pdf>

## **LES ACCIDENTS AUX MÉLANGES.**

Les mélanges sont les Nitrox et les Trimix.

### **A. Le Nitrox.**

#### **1° Le Nitrox en circuit ouvert**

Je n'ai pas connaissance d'ADD suite à une plongée au Nitrox. Ce mélange remplit donc bien son rôle de prévention des ADD, autant par la baisse relative d'azote dans le gaz respiré que par la limitation de profondeur induite par la toxicité de l'oxygène. Il y a donc une très bonne sécurisation des plongées par les Nitrox.

Il semblerait que DAN ait eu connaissance d'ADD au Nitrox, mais c'est le comportement des plongeurs qui était à incriminer et non le gaz (2).

#### **2° Le Nitrox en recycleur**

Nous disposons des statistiques de la marine nationale (11), qui dénombrent 14 ADD pour 500.000 plongées sur plus de 23 ans. La répartition est classique avec une grande majorité d'accidents médullaires, quelques cochléo-vestibulaires et quelques OAM. Ces accidents ont la particularité de toujours survenir au delà de 35 m. Autre phénomène remarquable : la plupart de ces accidents sont survenus dans la courbe de sécurité. Il faut toutefois savoir qu'il ne s'agissait pas de plongées loisir, les efforts fournis étant importants au cours de telles plongées. Donc la production de CO<sub>2</sub> est élevée et l'on connaît son rôle aggravant dans les ADD. La marine nationale met à l'étude la mise en place d'un capteur de CO<sub>2</sub> sur ses recycleurs, avec pour objectif de réduire encore la fréquence des accidents.

En plongée loisir, je n'ai pas connaissance d'ADD survenu avec des recycleurs, ni en SCR, ni en CCR.

### **B. Le Trimix.**

Aujourd'hui les accidents de décompression aux mélanges ne surviennent qu'avec les Trimix.

#### **1° Trimix en circuit ouvert.**

14 ADD en 5 ans sur la Méditerranée, tous dans le Var (7). Les accidents survenus dans le Var relèvent tous du même formateur et des mêmes méthodes de décompression : Il s'agit de l'ordinateur VR3 ou des tables informatiques V Planner. Ces accidents sont survenus sur environ 1000 plongées Trimix, pour des profondeurs entre 80 et 103 m. Comparativement, un autre

groupe, ayant également un millier de plongées et utilisant des tables IANTD, n'a présenté aucun ADD. Mais ces tables sont beaucoup plus pénalisantes pour les paliers proches alors que les paliers profonds le sont moins et sont un peu moins longs.

On rencontre essentiellement 2 types d'accidents :

- Les OAM représentent 9 cas. La caractéristique de ces OAM est le délai d'apparition très court, moins de 15' par opposition aux AOM à l'air dont délai est souvent long. Ces accidents surviennent parfois dès la montée sur le bateau, favorisé probablement par l'effort (équipement lourd) voire pendant le palier. Ils sont certainement favorisés par l'effort (rôle du CO<sub>2</sub>, des shunts)
- Les cochléo-vestibulaires représentent 4 cas. Ceux-ci sont également très précoces, survenant parfois au palier.

Il y a à déplorer un seul accident de type médullaire.

On ne retrouve donc pas les fréquences des accidents à l'air. Ceci est peu surprenant. En effet, les plongées au Trimix consistent souvent en une incursion plus ou moins rapide à grande profondeur, avec temps de fond n'excédant pas 15 à 20' et ne sont donc pas propices aux accidents médullaires.

Les accidents cochléo-vestibulaires pourraient être dus à un mauvais changement de gaz lors de la décompression (45). Il y a aussi une hypothèse consistant à penser que l'hélium a une grande affinité pour l'oreille interne. Enfin, il semble que la diffusion du ou des gaz inertes présents dans l'oreille moyenne soit possible à travers la fenêtre ronde. La fenêtre ovale offre trop peu de surface d'échange, vue la présence de l'étrier et des ligaments stapédo-vestibulaires. Mais ce phénomène de diffusion trans-membranaire paraît accessoire (18).

## **2° Trimix en circuit fermé.**

Les accidents sont rares. Les circuits fermés de type militaire Mixgers 78 utilisent des mélanges ternaires. Il n'y a aucun ADD à déplorer.

En plongée loisir, j'ai été confronté à deux ADD de type OAM (de l'épaule à chaque fois) avec des recycleurs à circuits fermés Buddy Inspiration. Le premier plongeur a guéri sous oxygène, administré sur le bateau, sans passage au caisson. Le deuxième plongeur a été caissonné à Haute-pierre. Il n'y a pas de séquelles à déplorer.

Dans le Var, on note deux accidents en recycleur CCR Buddy Inspiration. Les deux accidents sont de type OAM, ils ont été traités par OHB et ont guéri sans séquelle (7).

Le nombre d'accident aux mélanges est donc réduit. Cela tempère le catastrophisme de quelques moniteurs qui prédisaient une avalanche d'accident avec l'avènement de la plongée tech.

Toutefois, il convient de rester prudent et de limiter la plongée tech aux gens qui en ont à la fois la technicité et les moyens intellectuels. Il s'agit d'éduquer les plongeurs ayant des comportements à risques et de leur apporter les connaissances leur permettant de pratiquer sans mettre leur vie en danger. Mais ce travail est difficile et il n'existe pas encore d'outil commun permettant de faciliter cet apprentissage, ni de dépister les plongeurs ayant des comportements à risques.

## LES MOYENS DE DECOMPRESSION.

Les moyens de décompression utilisés découlent des modèles de décompression vus au chapitre 2.

### **A. Les tables :**

Il y a de nombreux modèles, je ne les aborderai évidemment pas tous.

1° Les MN 90 : Pour marine nationale 1990. Elles servent de support à l'enseignement FFESSM et les différents niveaux de plongée sont évalués sur les connaissances de ces tables. Elles sont en revanche peu utilisées dans la pratique. Elles imposent la plongée dite « carrée ». Les tables qui les remplacent sont en cours d'évaluation chez les militaires. Les MN 90 sont également utilisées pour la décompression Nitrox. Il y a simplement un calcul pour adapter le taux d'azote au mélange considéré. Ce ne sont pas des tables conçues au départ pour le Nitrox. Les Sc ou coefficients de sursaturation critique à la différence du modèle de Haldane ne sont pas égales à 2, mais variables selon le compartiment concerné. Les statistiques des accidents ont servi à modifier et adapter les coefficients de sursaturation. À la différence des M Values, les Sc ne varient pas avec la pression ambiante. Je me suis déjà exprimé sur leur « adaptation » à l'altitude.

2° Les MT 92 : Pour ministère du travail 92. Elles sont enseignées aux brevets d'état option plongée sous-marine. Elles sont utilisées en plongée professionnelle, notamment chez les pompiers et dans les unités de plongée en gendarmerie. Elles permettent des plongées à des profondeurs différentes, intègrent les paliers à l'oxygène.

3° Les Récréational Dive Planner : tables PADI. Vitesse de remontée 18 m / min ou moins. Aucune limitation du nombre de plongées par jour. Pour les intervalles de surface : si le groupe de sortie est W ou X, intervalle imposé de 1 h, si le groupe est Y ou Z, intervalle de surface de 3 h pour toutes les autres plongées de la journée. Il y a eu une validation de ces tables par contrôle Doppler sur un (faible) échantillon de plongeurs. Il est difficile de connaître le degré de fiabilité de ces tables, il n'y a pas de communication sur les accidents qui leur seraient imputables.

4° Il n'existe qu'un seul modèle de tables en altitude, ce sont des tables Bühlmann. Elles tiennent compte de la composition de l'air alvéolaire et utilisent des M Values pour déterminer la profondeur des paliers. Ces M Values existent pour chaque compartiment considéré, et sont variables en fonction de la profondeur. Elles ont été validées. Elles sont présentes dans la plupart des ordinateurs de plongée.

5° Il existe des tables Nitrox, notamment dans le BSAC (fédération anglaise). Elles semblent très peu pénalisantes, restons prudents quant à leur utilisation.

6° IANTD dispose de tables Trimix d'une très bonne fiabilité, mais bien sûr assez pénalisantes. Il n'y a pas eu d'accidents en France avec ces tables.

### **B. Les ordinateurs :**

Les tables Bühlmann, (ADT pour adaptatives) converties sous forme informatique, sont présentes dans presque tous les ordinateurs de plongée.

Pro-Planner est également utilisé dans certains modèles : VR2, VR3.

Le HS Explorer utilise un modèle RGBM.

Les Suunto et Mares utilisent des versions « dérivées » du RGBM, panachées de zestes Haldaniens.

## Les principaux ordinateurs sur le marché

	<p><b>Aladin Nitrox Pro</b> Ordinateur d'une conception ancienne, qui ne gère qu'un gaz il à été « relooké » et permet de gérer un NITROX comprenant entre 21 et 50% d'oxygène. Il peut être muni d'un transmetteur qui mesure la pression dans la bouteille et le débit ventilatoire. Modèle de décompression :Bühlmann ZHL8-ADT. Prix : entre 600 et 900 euros suivant la configuration <a href="http://www.uwatec.com/french/SPEC-ER.htm">http://www.uwatec.com/french/SPEC-ER.htm</a></p>
	<p><b>Suunto Vytec</b> Cet ordinateur permet de gérer trois NITROX qui contiennent entre 21 et 99% d'oxygène. Il peut aussi être muni d'un transmetteur. Prix : entre 550 et 950 euros suivant la configuration <a href="http://www.suunto.com/">http://www.suunto.com/</a></p>
	<p><b>Suunto Vyper</b> Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Il peut aussi être muni d'un transmetteur. Ordinateur basic qui convient bien au débutants Prix : de l'ordre de 350 euros <a href="http://www.suunto.com/">http://www.suunto.com/</a></p>
	<p><b>Mares M1 RGBM</b> Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Il utilise l'algorithme RGBM qui permet de gérer en option des paliers profonds. Prix : de l'ordre de 300 euros <a href="http://www.mares.com/">http://www.mares.com/</a></p>
	<p><b>Océanic Versa Pro</b> Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Le design de l'écran est particulièrement convivial. <a href="http://www.oceanicworldwide.com">http://www.oceanicworldwide.com</a></p>
	<p><b>VR2 &amp; VR3</b> Ce sont deux ordinateurs multi-gaz en circuit ouvert ou recycleur (CCR –SCR) le VR2 (4 gaz) est axé sur le Nitrox tandis que le VR3 (10 gaz) intègre le NITROX, TRIMIX, HELIOS, HELIAIR. Prix : VR2 de 750-800 euros VR3 : de l'ordre de 1200 euros <a href="http://www.vr3.co.uk/vr2.htm">http://www.vr3.co.uk/vr2.htm</a> <a href="http://www.vr3.co.uk/vr3.htm">http://www.vr3.co.uk/vr3.htm</a></p>
	<p><b>Buddy Nexus</b> Cet ordinateur est un peu particulier puisque cet appareil a été conçu au départ pour être utilisé avec les recycleurs en circuit fermé (CCR) mais il peut être utilisé en mode circuit ouvert. Il est prévu pour être utilisé avec deux gaz. Prix : de l'ordre de 500 euros <a href="http://www.apvalves.com/Nexus.html">http://www.apvalves.com/Nexus.html</a></p>
	<p><b>Dive Rite Nitek 3 et Nitek He</b> Ce sont des ordinateurs multi-gaz qui permettent de gérer des mélanges contenant de l'oxygène, de l'azote, de l'hélium dans des proportions allant de 0 à 100%. Nitek 3 gère 3 mélanges composés d'O2 et de N2 et le Nitek He 7 mélanges composés de O2, N2 et He. Prix : Nitek 3 de l'ordre de 500\$ Nitek He : de l'ordre de 1100 \$ <a href="http://www.dive-rite.com/">http://www.dive-rite.com/</a></p>
	<p><b>HydroSpace Engineering Inc. HS Explorer</b> <i>Le must en matière d'ordinateur multi-gaz.</i> Cet ordinateur permet de gérer 10 gaz différents dont les proportions, d'oxygène, d'azote et d'hélium varient entre 0 et 100%, il peut être utilisé en circuit ouvert ou pour des recycleurs. Il est possible de lui connecter jusqu'à trois sondes de PpO2 pour contrôler la fraction d'oxygène dans les boucles des recycleurs à circuit fermé ou semi-fermé et établir ainsi un protocole de décompression suivant l'algorithme RGBM ( Reduced Gradient Bubble Model ). Il peut aussi servir d'analyseur O2. Prix : Entre 1200 et 1300\$ <a href="http://www.hs-eng.com/">http://www.hs-eng.com/</a> Dans ce Cd-Rom vous trouverez le manuel de cet ordinateur ainsi qu'un programme de simulation qui sont reproduits avec l'autorisation de HydroSpace Engineering</p>

### **C. Les logiciels de décompression :**

V Planner (52), dérivé du modèle VPM, est utilisé par 70 % des plongeurs tech. Le modèle est évolutif, les mesures de sécurité sont renforcées sur les retours d'accidents. Il y a 1 à 2 mises à jour par an. Ce sont des run time très peu pénalisants et ceux qui ont l'habitude de les utiliser les « durcissent » en mettant de l'altitude ou en prenant un conservatisme maximal (réglable de 0 à 5).

Pro-planner est un modèle panachant les algorithmes de Bühlmann et du VPM (51). Il impose des paliers profonds probablement trop profonds et trop longs. Ce modèle est utilisé dans les VR 2 et VR 3. Les paliers proches de la surface sont plutôt courts.

### **D. Les perspectives :**

L'amélioration des modèles existants passe par une réduction de la vitesse de remontée. Les paliers profonds sont également un élément de sécurité, mais ils ne doivent être ni trop profonds, ni trop longs. L'état actuel des recherches chez DAN, montre que les premiers paliers doivent être situés à peu près à 80 % de la première M Value ! ceci pour comprendre que les modèles « sûrs » seront informatiques, car trop difficile à gérer. En effet, je ne me sens pas capable de savoir quel est mon compartiment directeur, puis de prendre 80 % de sa M Value pour la profondeur du palier ...

L'amélioration de la sécurité par rapport aux ADD doit également intégrer une réflexion sur les successives, particulièrement sur un séjour long. La tendance commerciale est aux plongées multiples : deux à trois plongées par jour et une plongée de nuit. En Thaïlande plusieurs structures proposent jusqu'à cinq plongées par jour, je les ai testées en 1999. Pour sécuriser les plongées, ils imposent l'ordinateur et en mettent un à disposition pour ceux qui n'en ont pas. Le responsable (français) d'une de ces structures est aujourd'hui en fauteuil roulant pour un ADD médullaire. Il est difficile de vouloir assurer une sécurité maximale et un maximum de plongées ! Je reste persuadé qu'un repos de 24 H doit être respecté au moins une fois par semaine.

La « vraie » prise en compte de la température de l'eau (et non pas son simple affichage) pourrait être un facteur de sécurité.

La prise en compte de la consommation serait également intéressante : elle est le reflet de l'effort fourni, donc du CO<sub>2</sub> produit. Pour les recycleurs, l'adjonction d'un capteur de CO<sub>2</sub> devrait encore améliorer la décompression. L'utilisation d'un recycleur de type semi-fermé est de toute façon un moyen de limiter les ADD. Le recycleur est promis à un bel avenir en plongée ...

Enfin, les différentes méthodes de durcissement sont à exploiter en fonction de la forme physique, du nombre de plongées, des efforts fournis. Ces moyens existent pour beaucoup d'ordinateurs : le niveau de « conservatisme » dans la terminologie anglaise, le niveau de micro-bulles dans les Aladins, le mode altitude dans les Suunto ...

Peut-on envisager à l'avenir des capteurs transcutanés d'oxygène et de CO<sub>2</sub> reliés à un ordinateur pour optimiser la décompression ? Ce n'est pas illusoire, vue la vitesse des progrès dans le monde de l'électronique.

## APPROCHE PEDAGOGIQUE DE LA DECOMPRESSION.

### A. Généralités.

🍏 Quelles leçons pouvons-nous tirer des éléments présentés, directement applicables à l'enseignement de la plongée ?

En préambule, je voudrais citer les conclusions du mémoire de DIU de médecine hyperbare de mon ami le docteur Benoît Brouant (14). Il a étudié au sein d'un groupe de plongeurs (un peu moins de 100) de tous niveaux leurs connaissances sur les ADD. Les médecins et professions paramédicales étaient exclus, de même que les plongeurs en formation niveau 1. Les conclusions sont édifiantes : seuls 40 % des plongeurs ont été capables de citer spontanément des signes d'ADD. Les signes qui sont cités en premier sont les puces et les moutons. Les signes neurologiques et vestibulaires semblent connus par moins de 8% des plongeurs.

Cela doit directement nous interpeller dans notre façon d'enseigner cette matière, d'autant que la prévention de ces accidents est la base même de cet enseignement.

Partant de l'adage que les premières choses enseignées sont celles qui se retiennent le mieux, il semble utile de modifier le plan de cours des ADD. En effet, il n'est pas pertinent de maintenir la classique présentation : type 1 puis type 2. Les plongeurs n'ont pas tous la capacité de restaurer les éléments essentiels s'ils ne sont pas enseignés par ordre d'importance.

Il me paraît donc indispensable de privilégier l'enseignement des accidents médullaires, puis des cochléo-vestibulaires. Le reste est d'une importance moindre.

🍏 L'enseignement des tables en altitude dérivées des MN 90 est une vue de l'esprit. La base de calcul est erronée. Elle ne tient compte que des taux « estimés » d'azote et non pas de l'air alvéolaire dont les teneurs en vapeur d'eau et CO<sub>2</sub> sont significativement différentes des bases de calcul au niveau de la mer. L'exemple que j'ai proposé dans le chapitre sur le modèle Bühlmann illustre bien le fait que les MN 90 ne sont pas adaptées à la plongée en altitude. De ce fait, la gymnastique « cérébrale » que nous enseignons me paraît inadaptée. Elle repose sur une base « mathématique » fautive, elle n'est pas utilisable en réalité et ne correspond pas à un besoin de nos plongeurs, sauf très rares exceptions. Dès lors, est-il pertinent de maintenir cet enseignement sur les tables en altitude ? A mon avis non ! Les adaptations de ces tables au Nitrox relèvent d'un principe semblable à celui de l'altitude, sans reposer sur une théorie fautive. Elles sont donc plus « logiques » à enseigner, et peuvent largement remplacer l'enseignement des tables en altitude et servir de base à l'évaluation lors des examens de niveau 4. Si des plongeurs souhaitent plonger en altitude, on peut leur proposer d'utiliser les tables Bühlmann. D'autre part, si ces plongeurs utilisent un ordinateur de plongée, il y a de fortes chances que ces algorithmes y soient intégrés.

🍏 Je voudrais passer en revue les différents niveaux fédéraux et les différentes qualifications. J'utiliserai le modèle du manuel du moniteur et y inclurai mes réflexions et commentaires personnels en rapport avec la décompression. *Elles seront notées en italique, caractères gras et bleu.* Quels sont les besoins de nos plongeurs ? En réponse à ces besoins, que devons-nous proposer comme enseignement ? Comment l'évaluer ? Certains contenus pourraient être donnés à titre d'information et non évalués ...

Enfin, ces réflexions doivent évidemment déboucher sur une pratique qui permette la prévention des ADD. De façon générale, la notion de binôme est à développer, de même que la notion de planification des plongées. Le comportement pendant la remontée est essentiel : cohésion de la palanquée, maîtrise du niveau d'immersion, maîtrise de la vitesse de remontée en adéquation avec le mode de décompression choisi, comportement après la plongée, remontée sur le bateau ... Cet enseignement relève de la pratique avant tout.

## **B. Les différents niveaux et brevets.**

### **1° PLONGEUR NIVEAU I**

Compétence n° 6 : CONNAISSANCES THEORIQUES ELEMENTAIRES

<b>Connaissances, savoir-faire et savoir-être</b>	<b>Commentaires et limites</b>	<b>Critères de réalisation</b>
<p>- Le principe de l'accident de décompression; symptômes courants et prévention; <i>L'analogie de la bouteille de Perrier suffit.</i> Présentation de la table et de l'ordinateur de plongée. <i>Insister sur l'ordinateur.</i> La courbe de sécurité des tables fédérales</p>	<p>- Aucune recherche de mécanisme et aucun problème de table n'est exigible.</p>	<p>- Savoir que l'ADD est dû à la dissolution du N2 sous pression.  Connaître les paramètres de lecture d'une table, ainsi que ceux d'un ordinateur.  Courbe de sécurité. <i>À connaître.</i></p>

*Les propositions actuelles me semblent en bonne adéquation avec les besoins du niveau I. Vu la généralisation de l'ordinateur, une bonne info est utile. La connaissance de la courbe de sécurité est également un élément servant de repère à un plongeur niveau 1.*

### **2° PLONGEUR NIVEAU II**

Compétence n° 6: " CONNAISSANCES THEORIQUES "

<b>Connaissances, savoir-faire et savoir-être</b>	<b>Commentaires et limites</b>	<b>Critères de réalisation</b>
<p>- Causes, symptômes, prévention et conduite à tenir pour l'ensemble des accidents pouvant survenir dans le cadre de l'autonomie ou de l'espace lointain. Physiologie de base.  <i>Les ADD devraient être cités par ordre de fréquence décroissant, afin de permettre une bonne mémorisation des ADD médullaires et cochléo-vestibulaires.</i></p>	<p>- Le niveau II n'a pas à connaître les mécanismes fins ni les traitements qui suivront. Une information sur les actes de secourisme peut lui permettre d'aider ou du moins de ne pas gêner l'intervention  <i>La conduite à tenir enseignée dans le RIFAP peut déjà être dispensée à ce niveau : comment agir si on soupçonne un ADD.</i></p>	<p>- Evaluation par oral ou par écrit</p>
<p>- Utilisation des tables fédérales actualisées pour les conditions correspondantes à la pratique: plongées simples, consécutives, successives, procédures de remontées anormales, rapides, lentes.  - Ordinateurs de plongée.  <i>Une mise en parallèle avec les tables, avantages inconvénients ... peut permettre une meilleure compréhension des deux.</i></p>	<p>- Les problèmes doivent rester simples et réalistes. Une information sur la plongée Nitrox peut être donnée (sans réalisation de problèmes). La plongée en altitude est exclue (sauf information dans le cas de clubs pratiquant dans cette configuration).  - Il s'agit de préciser les conditions d'emploi et les limites d'utilisation.</p>	<p>- Evaluation par écrit. Exactitude du raisonnement et du résultat. La rapidité est un critère secondaire.  <i>La notion de planification des plongées devrait être évaluée, y compris en pratique.</i></p>

Notions physiques simples permettant de comprendre les effets du milieu, les principes de fonctionnement du matériel, l'autonomie en air, la flottabilité.	- Rester à des problèmes de physique correspondant à une pratique de niveau 2	- Evaluation par écrit.
--	---	-------------------------

*Il faut prendre en compte le « déni » de l'accident par la victime, c'est à enseigner dès le niveau deux, pour éviter d'éventuels retards au déclenchement des secours et de la mise en route de l'oxygénothérapie.*

### **3° PLONGEUR NIVEAU III**

Compétence n° 6 : CONNAISSANCES THEORIQUES

<b>Connaissances, savoir-faire et savoir-être</b>	<b>Commentaires et limites</b>	<b>Critères de réalisation</b>
- Symptômes, prévention, conduite à tenir pour l'ensemble des accidents pouvant survenir dans le cadre des activités de plongée.  <i>Mêmes remarques qu'au niveau 2 : enseignement des ADD par ordre de fréquence</i>	- Le plongeur niveau III n'a pas à connaître les mécanismes fins ni les traitements qui suivront. L'accident de décompression sera particulièrement développé.  <i>Le RIFAP doit être maîtrisé.</i>	- Evaluation par écrit ou par oral.  <i>Une mise en situation pratique est souvent très révélatrice des difficultés à prendre en charge ce type d'accident. Relève du RIFAP.</i>
- Utilisation des tables fédérales. - Gestion de l'air	- Les problèmes doivent rester réalistes et correspondre à la pratique. L'utilisation des tables en altitude peut être enseignée.  <i>Une info simple stipulant que les procédures ne sont pas les mêmes me semble suffisante pour l'altitude.</i>	- L'évaluation est réalisée par écrit, éventuellement en situation (planchettes et tables à bord).  <i>Pour l'altitude, une info simple non évaluable me semble suffisante.</i>
- Utilisation des ordinateurs de plongée.  - Planification de la plongée lorsque coexistent plusieurs méthodes de décompression.  <i>La planification est essentielle, autant pour la gestion d'air que pour la déco. L'ordinateur, qui sera leur méthode de choix, ne devra pas être négligé.</i>	- Il s'agit surtout de préciser les conditions d'emploi et les limites de leur utilisation.  - Impérativement la solution adoptée doit permettre le maintien de la cohésion de la palanquée.	- Evaluation par écrit ou par oral.  <i>Une évaluation en situation pratique de la planification permettrait de vérifier si ces notions théoriques sont bien acquises.</i>

*L'enseignement des tables en altitude, vue leur inexactitude, ne me semble pas pertinente à ce niveau. D'autant que la pratique de la plongée en altitude est plus qu'anecdotique ! Si la culture « locale » comporte des plongées en altitude, on peut proposer (et apprendre à utiliser) les tables Bühlmann en altitude.*

### **4° PLONGEUR NIVEAU IV "CAPACITAIRE"**

Compétence n° 7 : CONNAISSANCES THÉORIQUES

<b>Connaissances</b>	<b>Commentaires et limites</b>	<b>Critères de réalisation</b>
PHYSIQUE appliquée à la plongée		Epreuve de physique par écrit et

<p>:</p> <p>Pression partielle : règles de Dalton :</p> <p>*Toxicité des gaz. Notions sommaires sur les Nitrox.</p> <p>Dissolution de N<sub>2</sub> dans le corps : *Loi de Henry. Connaissance du modèle de Haldane : notion de compartiment. Connaissance très succincte de l'existence d'autres modèles : diffusion, bulles circulantes,...</p> <p><i>La genèse des bulles mérite d'être connue, de même que le modèle VPM</i></p>	<p>Problèmes chiffrés simples avec des résultats qui tombent juste. Les mélanges ternaires ou binaires autres que les Nitrox n'ont pas à être traités.</p> <p>Les calculs se limiteront à des périodes entières, la maîtrise de la formule exponentielle est hors sujet, de même que le calcul de la durée d'un palier.</p> <p><i>En effet, les ordinateurs mentionnent ces phénomènes.</i></p>	<p>comportant au moins 3 problèmes différents et indépendants.</p> <p>Savoir calculer des limites de toxicité et des % des mélanges.</p> <p>Savoir calculer une tension de N<sub>2</sub>. L'utilisation du Sc, calcul de la profondeur d'un palier pour un compartiment donné.</p> <p><i>Pas d'évaluation « chiffrée » sur VPM.</i></p>
<p>ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE</p> <p>Anatomie des appareils ventilatoire et circulatoire :</p> <p>*Petite et grande circulation : le cœur. Importance de la circulation cérébrale. Localisation des chémorécepteurs et barorécepteurs.</p> <p>Physiologie de la ventilation et de la circulation :</p> <p>Motricité de la cage thoracique. Volumes pulmonaires (soufflet et pneumogramme). Révolution cardiaque.</p> <p>Échanges alvéolaires et transport des gaz respiratoires par le sang : Air inspiré, air expiré, air alvéolaire et hématoxémie. Propriétés de l'hémoglobine. Oxygène. Transport du CO<sub>2</sub> : Plasma et hématies.</p>	<p>Etablir le rapport entre l'activité des muscles de la ventilation (Diaphragme, muscles releveurs et abaisseurs des côtes) et les volumes ventilatoires. Se limiter aux définitions de diastole générale, systole auriculaire et ventriculaire.</p> <p>Construction d'un schéma montrant la diffusion des gaz par différence de Pp. Constance de la Pp de CO<sub>2</sub> alvéolaire en fonction de la profondeur.</p>	<p>Preuve d'anatomie et de physiologie par écrit.</p> <p>Savoir réaliser des schémas de principe et placer des légendes sur des schémas anatomiques muets.</p> <p>Pouvoir représenter le soufflet pulmonaire et établir le rapport avec le pneumogramme. Savoir décrire une révolution cardiaque.</p> <p>Savoir justifier par la physiologie les mécanismes de certains accidents.</p>
<p>La régulation du CO<sub>2</sub> sanguin.</p> <p>Anatomie et fonctionnement de l'oreille. Audition et équilibration</p> <p>Notions sur le système nerveux</p>	<p>Formes de transport différentes pour le CO<sub>2</sub> et l'O<sub>2</sub>.</p> <p>Explication des deux fonctions de l'oreille.</p> <p>Définir : Cerveau, cervelet, tronc cérébral, moelle épinière et nerfs.</p>	<p>Savoir reproduire un schéma de principe et savoir interpréter une planche anatomique</p> <p>Localisation de ces organes.</p>
<p>PROCÉDURES DE DÉCOMPRESSION</p>		<p>Epreuve par écrit pouvant comporter deux types de problèmes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- utilisation des tables MN90 actualisées</li> <li>- étude de cas concrets mettant en jeu diverses procédures de décompression.</li> </ul> <p>Savoir résoudre tous les cas de</p>

<p>Utilisation des tables fédérales</p> <p>Tous les cas d'utilisation et toutes les possibilités de lecture : plongées simples, successives, consécutives, remontées "anormales" (lentes, rapides, paliers interrompus). Utilisation de l'O2 aux paliers et en surface. Altitude. Utilisation théorique en cas de plongée au Nitrox.</p> <p>Connaissance sur les calculateurs.</p> <p>Cohabitation des procédures de décompression différentes.</p>	<p>Eviter les problèmes irréalistes mais travailler plutôt sur des cas concrets nécessitant une maîtrise de l'utilisation de la table (vitesse d'utilisation).</p> <p><i>L'altitude, vu ses approximations, ne me semble pas être un élément essentiel. Son enseignement n'est qu'une « gymnastique » cérébrale et ne correspond ni à un besoin, ni à une réalité. Cf généralités.</i></p> <p>Ne pas envisager un catalogue des performances mais enseigner les principes d'utilisation et les limites de ces appareils.</p> <p>Étude des solutions permettant de concilier le respect de la liberté du choix de chaque plongeur avec les impératifs de la plongée en collectivité : sécurité et cohésion des palanquées.</p>	<p>figures avec une bonne fiabilité et rapidement.</p> <p><i>Le mode d'action de l'oxygène et pourquoi il présente un intérêt dans la déco et les accidents mérite d'être bien compris.</i></p> <p>Établir les parallèles avec l'utilisation de la table MN90 actualisées.</p>
<p>ACCIDENTS</p> <p>Barotraumatisme : oreilles, sinus, dents, surpression pulmonaire, placage de masque, estomac.</p> <p>Accidents de décompression : aigu et chronique.</p> <p>Accidents toxiques : Essoufflement, hyperoxie et narcose.</p> <p>Accidents de l'apnée.</p> <p>Noyade.</p> <p>Autres accidents liés au milieu : le froid.</p> <p>Les animaux toxiques, la flore, le courant, la houle, les filets...</p>	<p>La grande variabilité des symptômes devra être bien assimilée afin que les connaissances du futur plongeur niveau IV ne soient pas enfermées dans des scénarios trop rigides. On cherchera donc à privilégier les connaissances se rapportant à des cas concrets qui ne correspondent pas forcément à la description théorique avec exactitude. Les symptômes décrits devront être systématiquement envisagés en association avec les mécanismes dont ils sont la conséquence.</p>	<p>Epreuve écrite</p> <p>Savoir décrire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Circonstances possibles de l'accident.</li> <li>- Manifestations observables et conséquences.</li> <li>- Connaissances physiologiques des mécanismes mis en cause.</li> <li>- Secourisme (le traitement médical peut être évoqué pour information).</li> <li>- Prévention. Insister sur le rôle de Guide de la Palanquée.</li> </ul>

*L'ordre d'enseignement des ADD pourrait être le même que pour les autres niveaux, pour favoriser la mémorisation et l'importance relative des différents accidents. Les mécanismes fins des circonstances favorisant devraient être développés. Les notions de délais sont également importantes.*

## **5° BREVET D'INITIATEUR**

### FORMATION INITIALE

Connaissances, savoir-faire et savoir être	Commentaires et limites	Critères de réalisation
--	-------------------------	-------------------------

Séances de formation théorique (transmission de connaissances).	Expliquer la pratique à l'aide d'éléments de théorie.	Limité au niveau 1. ( le niveau 2 sera traité au cours de GC4 ).
---	---	--

### STAGE EN SITUATION

Groupe de compétences GC.3

Transmission des connaissances au niveau I

Connaissances, savoir-faire et savoir être	Commentaires et limites	Critères de réalisation	Evaluation
Etre capable de présenter et de transmettre des connaissances théoriques	L'objectif est de donner aux stagiaires des outils pédagogiques : (analogies, démonstrations, manières de mettre en évidence un phénomène, etc.). Donner des références bibliographiques.	Réflexion sur la manière de présenter ou d'illustrer des connaissances théoriques, conduite par le formateur. Mises en situations pratiques du stagiaire sur des thèmes ciblés.	Validé par le tuteur de stage sur le livret pédagogique

*L'enseignement au niveau 1 n'est pas particulièrement « facile » et le tuteur devra veiller à l'adéquation de l'enseignement aux besoins.*

### MODULE COMPLEMENTAIRE

Groupe de compétences GC.4 (suite)

( Groupe optionnel, réservé aux titulaires du niveau IV)

Transmission des connaissances au niveau II.

Connaissances, savoir-faire et savoir être	Commentaires et limites	Critères de réalisation	Evaluation
Maîtrise des connaissances théoriques.	Les acquis du niveau IV. après une remise à niveau, doivent constituer la capacité minimale de l'élève initiateur en matière de connaissance.	Le recours à une évaluation écrite doit permettre de mettre en évidence les éventuelles faiblesses que le stagiaire devra travailler ensuite individuellement.	Validé sur le livret pédagogique initiateur par un MF2 ou BEES2 licencié FFESSM.
Etre capable d'identifier les connaissances qu'il est strictement nécessaire de dispenser aux plongeurs préparant le niveau II.	Identifier le volume de connaissances et leur degré de difficulté que le plongeur niveau II. doit acquérir.	Réflexion animée par le formateur.	
Etre capable d'intégrer des connaissances théoriques dans le cycle de séances d'apprentissage.	Savoir associer aux leçons pratiques du niveau II les éléments théoriques nécessaires à leur compréhension.	Réflexion du stagiaire animée par le formateur visant à identifier parmi les connaissances à transmettre, les cours pratiques auxquels elles sont liées (pré-requis).	
Etre capable de présenter et de transmettre des connaissances théoriques.	Structurer la présentation ( plan ). Utilisation de tableau et rétro projecteur, etc. Les thèmes du niveau II : Accidents, réglementation,	Animation de séances courtes (1/2 heure) , en stricte relation avec la pratique.  Les pré requis de	

	décompression, effets du milieu, principes de fonctionnement du matériel, autonomie, flottabilité, règles de protection de l'environnement.	compréhension ( physique, anatomie, physiologie) seront intégrés dans le développement des thèmes et ne feront pas l'objet de cours spécifiques ( transversalité).	
--	---	--	--

*Le groupe optionnel GC 4 est tout à fait adapté. Dommage qu'il soit optionnel et qu'il soit si peu réalisé.*

## **6° MONITORAT FEDERAL 1er DEGRE**

3 - Pédagogie théorique: coefficient 4

Le candidat est supposé développer devant un groupe d'élèves un sujet précis concernant la plongée (niveau technique des élèves : du débutant jusqu'au plongeur préparant le capacitaire Niveau IV F.F.E.S.S.M.).

Il convient de préciser qu'il s'agit d'une épreuve de pédagogie et que le candidat doit démontrer ses capacités d'enseignant, c'est-à-dire ses possibilités de transmettre ses connaissances à des élèves.

Le niveau des élèves auquel s'adresse cet exposé est défini au candidat par le jury responsable de l'épreuve.

Le sujet de l'exposé est tiré au sort par le candidat parmi une liste de questions établies par le jury responsable de l'épreuve et portant sur le programme suivant :

— **Principales lois physiques régissant la plongée.**

— Le scaphandre et son fonctionnement.

— L'équipement.

— La préparation à la plongée.

— La technique individuelle du plongeur.

— **Les tables de plongée.**

— **Les accidents.**

— La plongée en collectivité.

Le candidat dispose de 15 à 30 minutes pour préparer son sujet et de 15 à 30 minutes pour l'exposer.

*Chez le MF 1, j'aurais plusieurs remarques à faire.*

*Sur le plan de la connaissance fondamentale, les stagiaires pédagogiques ont souvent d'importantes lacunes, qui portent à la fois sur les connaissances en accidents et les connaissances de la décompression.*

*Je pense que le futur MF 1 doit connaître le modèle Bühlmann, leitmotiv des ordinateurs, de même que le VPM. Il doit pouvoir porter un regard « critique » sur certains comportements en formation fondés sur des connaissances : remontées rapides, yoyo ...*

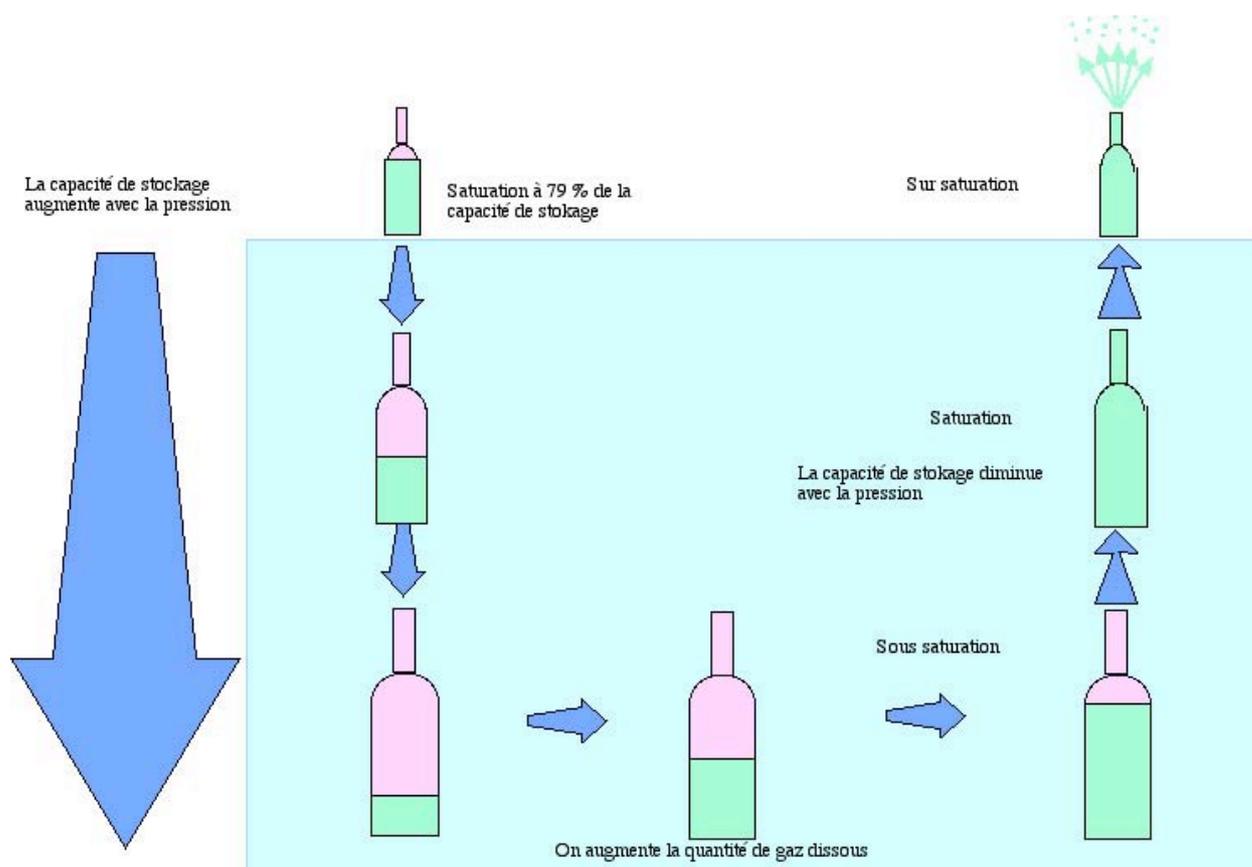
*Il doit également avoir du recul sur l'utilisation de l'ordinateur et certains éléments donnés par celui-ci, comme la notion de « No fly ».*

*Sur le plan pédagogique, la façon d'enseigner sera bien sûr influencée par ses propres connaissances.*

*L'enseignement des ADD devrait intégrer les fréquences des accidents, la bonne maîtrise des circonstances favorisantes.*

*L'enseignement de la saturation pourrait intégrer dans son approche, le fait que la saturation augmente avec la profondeur, à l'inverse du volume dans la loi de Mariotte. Sur le plan visuel,*

*on pourrait faire apparaître cette augmentation de la capacité de stockage. Ce terme vient de la traduction d'un travail de Baker ; il signifie que notre organisme peut absorber d'autant plus de gaz inerte que la pression absolue augmente.*



*En ce qui concerne l'évaluation en examen, les éléments de calculs de table devraient être retirés des questions d'examen. En effet, leur enseignement fait appel à beaucoup de connaissances et laisse peu de liberté pédagogique : trop de contenu et peu de possibilités d'adaptation. Sur ce type de sujet, le candidat ne pourra pas exprimer ses talents pédagogiques, mais exposera surtout ses connaissances.*

*Cela pose le problème de façon générale des connaissances théoriques du MF1. Par opposition au BEES 1, il n'y a aucune évaluation sur les connaissances théoriques du MF1. Beaucoup d'Instructeurs s'entendent à dire que les connaissances théoriques des niveaux 4 baissent de façon générale. En CTR Est, lors du stage initial, les tests de connaissances réalisés montrent à l'évidence une mauvaise maîtrise de la théorie du niveau 4, chez la grande majorité des stagiaires. J'ai fait la même constatation en CTR Corse.*

*Cette évaluation des connaissances est donc très utile. Elle permet aux stagiaires de se rendre compte de leurs lacunes et donne aux instructeurs un argument pour les inciter à « réviser ».*

*Mais ce test est facultatif, il n'apparaît pas dans les contenus de formation (alors qu'il est proposé dans le GC 4 des initiateurs). Il pourrait être utile d'envisager une évaluation sommative chez les stagiaires pédagogiques, portant sur les connaissances niveau 4 étendues de connaissances sur les modèles de Bühlmann et le VPM. Les connaissances en accidentologie devraient également être étoffées.*

*Cette évaluation pourrait se situer lors du stage initial ou conditionner l'entrée en stage initial. Elle aurait l'avantage de permettre au stagiaire de se consacrer à la pédagogie en s'affranchissant du contenu.*

*Elle pourrait aussi être effectuée à l'entrée au stage final. Cette méthode laisse plus de temps au stagiaire pour parfaire ses connaissances minimales indispensables. Mais la première formule me semble plus pertinente.*

## 7° MONITORAT FÉDÉRAL 2ème DEGRÉ

### ANNEXE II

#### Programme des épreuves

#### A — ÉPREUVES THÉORIQUES

##### 2 - La décompression Coefficient 4 . Durée 1h30

Cette épreuve est destinée à vérifier les connaissances du candidat dans le domaine fondamental que constitue la fixation de l'azote (ou d'autres gaz inertes) dans l'organisme soumis à l'hyperbarie.

- Les transferts d'azote en hyperbarie
- Modélisation de l'organisme : Le modèle le plus courant : Haldane
- Notions **succinctes** sur l'existence d'autres modélisations
- L'utilisation pratique des tables fédérales
- L'utilisation de l'ordinateur de plongée
- Les accidents de décompression

*Les notions succinctes sur les autres modèles sont insuffisantes. Une connaissance du modèle Bühlmann me semble utile, des notions sur les M Values également, de même que la prise en compte de l'air alvéolaire pour le calcul des tables. De façon générale, le contenu de ce mémoire pourrait servir de base de travail sur les connaissances requises au MF 2.*

#### B — ÉPREUVES PÉDAGOGIQUES

##### 8 - Pédagogie théorique : coefficient 4

Le candidat est supposé démontrer à un groupe de stagiaires moniteurs la façon de faire un exposé à des élèves dont le niveau technique peut être celui du débutant complet jusqu'à celui du plongeur préparant le brevet de Plongeur Autonome Niveau IV Capacitaire.

Le candidat doit démontrer ses qualités pédagogiques de formateur de cadres, c'est-à-dire son aptitude à enseigner à autrui la meilleure façon de transmettre des connaissances à des élèves.

Le niveau des élèves auxquels cet exposé est supposé s'adresser, est défini au candidat par le jury responsable de l'épreuve.

Le sujet de l'exposé est tiré au sort par le candidat parmi une liste de questions établies par le jury responsable de l'épreuve et portant sur le programme suivant :

- Principales **lois physiques** régissant la plongée.
- Le scaphandre et son fonctionnement.
- L'équipement.
- La préparation à la plongée.
- La technique individuelle du plongeur.
- **Les tables de plongée et le décompression.**
- La plongée en collectivité.
- L'anatomie, la physiologie et **les accidents.**

Le candidat dispose de vingt minutes pour préparer son sujet.

Remarque : Les contenus de formation associés à ce programme précisent les attentes et les limites concernant le contrôle des connaissances du MF2 (annexe 4).

### ANNEXE III

#### Connaissances Théoriques - Contenus de formation

Le candidat au MF2 doit s'appuyer sur les connaissances théoriques du plongeur niveau IV, avec une parfaite maîtrise de ces notions, de façon à développer des considérations transversales.

#### 1 - EPREUVE D'ANATOMIE, DE PHYSIOLOGIE ET DE PHYSIOPATHOLOGIE DU PLONGEUR.

Connaissances théoriques	Commentaires & limites	Critères de réalisation
Echanges gazeux	Echanges gazeux : échanges d'azote (ou de gaz inerte), élimination alvéolaire du CO <sub>2</sub> Différentes formes de transport des gaz : différence entre forme dissoute et forme combinée <i>Notions de gaz alvéolaire avec vapeur d'eau et CO<sub>2</sub></i>	Réalisation de schémas mettant en évidence les processus de transfert des gaz Savoir différencier les formes de transport du CO <sub>2</sub> et de l'O <sub>2</sub> .  <i>Comprendre que la pression de vapeur d'eau et de CO<sub>2</sub> est fixe quelle que soit la pression atmosphérique.</i>

#### 2 - LA DECOMPRESSION

Connaissances théoriques	Commentaires & limites	Critères de réalisation
Les transferts d'azote en hyperbarie.	Passage alvéole <-> sang sang <-> tissus Hétérogénéité des tissus de l'organisme vis à vis de l'azote.	Connaître le principe de diffusion.
Modélisation de l'organisme : Modèle le plus utilisé : Haldane.	Saturation et désaturation d'un compartiment ( graphique ) Notion de sursaturation critique. Profondeur de palier. Principe de la majoration.	Détermination d'une tension d'azote dans un compartiment (limité à des périodes entières) Détermination de la sursaturation critique. Détermination d'un compartiment directeur Déterminer une profondeur de palier. Utilisation de graphiques
Les avancées actuelles des connaissances sur la décompression	Principes généraux. Notions succinctes.	Connaître l'existence d'autres modèles.
L'utilisation pratique des tables fédérales.	Toutes utilisations possibles des tables (même des cas pratiques relativement improbables). L'objectif est d'évaluer la maîtrise de l'outil. et la compréhension des principes.	Savoir établir un profil de plongée à partir de l'utilisation des tables. Comprendre la démarche dans tous les cas possibles d'utilisation. Possibilité d'épreuves avec de multiples cas en temps limité
L'utilisation de l'ordinateur de plongée et autres procédures de décompression.	Principe de fonctionnement à l'exclusion de toute notion sur l'électronique. Comparaison des paramètres des tables et de l'ordinateur. Les limites de l'utilisation.	Savoir choisir la table ou l'ordinateur en fonction du type de plongée. Savoir identifier des erreurs d'utilisation et connaître les protocoles d'urgence.

	La cohabitation des procédures de décompression.	Connaître les règles de sécurité qui permettent de faire cohabiter des procédures différentes.
Les accidents de décompression.	Naissance des bulles pathogènes. Facteurs déclenchants : SP, CO2... Circulation des bulles : bulles artérielles, shunts, FOP... Localisation des bulles et symptômes. Manifestations plus rares de l'ADD. Facteurs favorisants. Prévention et traitements.	Le candidat doit être capable d'établir précisément les rapports de causes à conséquences.

*De façon générale, ces notions doivent être bien acquises par le MF 2. Elles sont évaluées à plusieurs niveaux : théorie et péda théorique, voire péda pratique et organisationnelle. Ce qui manque souvent au stagiaire MF 2 c'est un document de travail qui lui permette d'acquérir les connaissances nécessaires. Il va trouver ces notions dans des ouvrages divers, dispersés, pas toujours faciles à se procurer, onéreux et avec soit un contenu qui va au-delà de ses besoins (Broussolle) ou qui est insuffisant. La collecte des données « utiles » a été un de mes moteurs pour la réalisation de ce mémoire.*

## **8° PLONGEUR NITROX**

Compétence n° 3 : CONNAISSANCES THÉORIQUES

<b>Connaissances</b>	<b>Commentaires et limites</b>	<b>Critères de réalisation</b>
Différences entre air et Nitrox, avantages et inconvénients de ce dernier.  - Causes, symptômes, prévention et conduite à tenir pour l'ensemble des risques supplémentaires rencontrés lors de plongées Nitrox.  - Facteurs favorisants la survenue d'un accident. - Seuil hyporexique.	- Le plongeur Nitrox n'a pas à connaître les mécanismes fins, ni les traitements qui suivront.  - Une information sur les actes de secourisme peut lui permettre d'aider ou au moins de ne pas gêner.  <i>- La conduite à tenir (RIFAP) peut lui être enseignée.</i>	- Évaluation par oral ou par écrit.
- Calcul des profondeurs équivalentes  - Exemples de courbes de sécurité au nitrox.	- Les problèmes doivent être simples et réalistes. La plongée en altitude est exclue (à l'exception d'une information pour les plongeurs Nitrox pratiquant en altitude).	- Évaluation par écrit.
- Les tables Nitrox et les ordinateurs de plongée Nitrox.	- Aucune théorie : il s'agit seulement de préciser les conditions d'emploi et les limites d'utilisation.	- Pas d'évaluation mais seulement une information.

## **9° PLONGEUR NITROX CONFIRMÉ**

Compétence n° 3 : CONNAISSANCES THÉORIQUES

Connaissances	Commentaires et limites	Critères de réalisation
- Identiques à celles du PLONGEUR NITROX, auxquelles il convient d'ajouter :		- Evaluation par écrit ou par oral.
- Courbes de sécurité selon divers mélanges usuels.  - Calcul des profondeurs équivalentes en altitude.  - Différentes façons de quantifier la crise hyperoxique : seuil, compteur SNC. - Différentes façons de quantifier la toxicité pulmonaire : UPTD, OTU	- Les problèmes doivent rester réalistes.  <i>Ne devrait pas être enseigné : inadéquation avec le niveau et la pratique.</i>  <i>Une info sur les SNC est à faire, d'autant que la plupart des ordinateurs de plongée l'intègrent.</i> <i>L'enseignement de la toxicité pulmonaire devrait être définitivement abandonné.</i>	- Evaluation par écrit.  <i>Une évaluation écrite sur les SNC ne me semble pas utile. Une utilisation raisonnable des Nitrox suffit.</i> <i>Aucune évaluation sur la toxicité pulmonaire.</i>
- Les tables et ordinateurs nitrox : approfondissement : cas de l'altitude. Eléments de calcul des tables nitrox fédérales.	Aucune théorie : il s'agit seulement de préciser les conditions d'emploi et les limites d'utilisation.  <i>Les éléments de calculs de tables Nitrox fédérales doivent être enseignés sans théorie ? Donc on enseigne uniquement la façon de s'en servir. Ainsi, on ne parle pas d'éléments de calcul des tables.</i>	- Pas d'évaluation mais seulement une information.  <i>Il y a une incohérence sur ce sujet.</i>

*Il y a plusieurs notions qui se contredisent et qui font que cet enseignement ne me paraît pas adapté :*

*La plongée en altitude au Nitrox en cursus fédéral n'apparaît qu'au niveau MF 2. Ici, il faudrait enseigner cette notion à des niveaux 2 ! De plus, vu la pratique de la plongée Nitrox en altitude, cette notion ne me paraît pas pertinente.*

*Les éléments de calcul des tables Nitrox fédérales sont en inadéquation avec le niveau requis : Niveau 2. De plus, la colonne « commentaire et limite » demande de ne faire aucune théorie. Comment approfondir la plongée en altitude au Nitrox sans faire de théorie ? Je propose donc de ne pas l'enseigner.*

*En ce qui concerne les notions de SNC, UPTD et OTU, un dépoussiérage me semble utile.*

*- Sur le plan neurologique, la toxicité de l'oxygène est mal quantifiable, elle fait surtout appel à un effet de seuil, qui est la PpO<sub>2</sub> supérieure à 1,6 bar. Au-delà de cette valeur, la crise convulsive se déclenche fréquemment et plus ou moins rapidement. La notion de compteur SNC n'est qu'une simplification à visée pédagogique, elle ne repose pas sur une réalité physiologique. Cependant, elle est intégrée dans la plupart des ordinateurs Nitrox. Une information sur le sujet est donc utile. À mon avis, cette notion ne devrait pas faire l'objet d'une évaluation, pour l'obtention de ce niveau.*

*- Sur le plan pulmonaire, la notion d'UPTD repose sur des études très sérieuses effectuées par Lambertsen au début des années 70. Il a étudié l'impact de l'oxygène sur la capacité vitale. La critique qu'on peut formuler sur le sujet concerne justement l'utilisation de la capacité vitale comme critère de toxicité, c'est une donnée trop variable, trop peu reproductible. Actuellement, il conviendrait d'utiliser la ductance du CO, qui est une mesure beaucoup plus*

*précise de l'état de l'alvéole et du surfactant. Par la suite, ces notions d'UPTD ont été transformées en OTU, pour en faciliter l'usage courant. Elles ne sont qu'un approfondissement de ce fameux effet Lorrain Smith. Le plongeur Nitrox n'a pas des durées d'expositions suffisantes pour y être confronté. D'autre part, il est clairement dit dans le livret sur le Nitrox de Blanchard et Kersalé (recommandé officiellement par la CTN) qu'il n'y a pas lieu de dépasser deux heures par jour de plongée Nitrox. L'enseignement sur la toxicité pulmonaire est carrément inadapté, l'exposition au risque Lorrain Smith ne se rencontrant pas lors des plongées Nitrox « normales ». Le risque n'apparaît que lors des plongées recycleur dépassant les 5 ou 6 heures par jour. Ce sont donc des plongées de type « records ou plongées souterraines ». Elles sortent du cursus de plongée loisir fédéral.*

## **10° QUALIFICATION DE PLONGEUR TRIMIX ÉLÉMENTAIRE**

*Je ne commenterai pas la formation pratique qui est à mon sens l'élément essentiel dans la formation de ces plongeurs Trimix. La planification de la plongée est avant tout une affaire de pratique, même si elle nécessite des connaissances théoriques.*

### Compétence n° 6 : CONNAISSANCES THEORIQUES

<b>Connaissances, savoir-faire et savoir-être</b>	<b>Commentaires et limites</b>	<b>Critères de réalisation</b>
Différence entre la plongée à l'air, la plongée Nitrox et la plongée Trimix	On s'appuiera d'une part sur l'expérience du stagiaire dans l'espace lointain, et d'autre part sur son expérience de plongée au Nitrox	Evaluation orale ou écrite
La Plongée profonde : - Dangers et règles de sécurité - Le matériel spécifique.	Les concepts de sécurité s'appuient sur ceux établis et utilisés en plongée profonde et en plongée souterraine.	Evaluation orale ou écrite
Rappels et compléments de physique appliquée à la plongée Trimix	On insistera tout particulièrement sur les règles de pression absolue et de pression partielle ainsi que la loi de Dalton	Evaluation orale ou écrite
Compléments d'information sur les accidents biochimiques	On insistera sur les valeurs limites des pressions partielles de chacun des gaz	Evaluation orale ou écrite
- Utilisation des tables :	Choix de la profondeur du temps. Prise en compte des risques de dépassement du temps et de la profondeur.	Evaluation écrite sur des profils de plongée réels et pratiqués
- Planification de la plongée	Calculs de consommation, seuils des gaz inertes, profondeur équivalente de narcose. Calcul des profondeurs limites en fonction des mélanges	
- Planification de la décompression	Calcul de la consommation en fonction du choix du mélange de décompression PMU (profondeur maximum d'utilisation). Définir le déroulement et les besoins en cas d'application d'une procédure de rattrapage	
La décompression en plongée Trimix. Présentation des tables, des logiciels de décompression et des	Principes utilisés dans la conception des tables. Les problèmes doivent correspondre aux plongées	Évaluation orale et écrite <i>Ces éléments me paraissent très difficilement assimilables par un niveau 3. De plus, une évaluation</i>

ordinateurs de plongée gérant les mélanges Trimix	effectuées.	<i>écrite compliquerait encore les choses. Une bonne maîtrise de la pratique me semble plus utile pour ce niveau.</i>
Le froid en plongée Trimix	On mettra l'accent sur la durée de la plongée associée à l'usage d'hélium et d'un vêtement sec	Evaluation orale ou écrite
Rappel du fonctionnement des analyseurs d'oxygène et d'hélium	Présentation des modèles utilisés	Evaluation orale
Réglementation	Divers arrêtés (22 juin 1998, 9 juillet 2004 ....)	Evaluation orale ou écrite

## **11° QUALIFICATION DE PLONGEUR TRIMIX**

### Compétence n° 3 : CONNAISSANCES THÉORIQUES

<b>Connaissances, savoir-faire et savoir-être</b>	<b>Commentaires et limites</b>	<b>Critères de réalisation</b>
Rappels et compléments de physique appliquée à la plongée Trimix.	On insistera tout particulièrement sur les règles de pression absolue, de pression partielle, des profondeurs limites et du choix du meilleur mélange.	Ecrite.
La plongée profonde : • Dangers et règles de sécurité. • Le matériel spécifique.	On insistera sur la notion de «plafond».	Ecrite.
Les dangers de l'Hypoxie.	Danger de l'utilisation d'un mélange fond avec des mélanges hypoxiques en surface.	Ecrite.
Complément sur les dangers de l'essoufflement.	Importance de la composition du mélange.	Ecrite.
Compléments sur les accidents de décompression	Mécanismes, symptômes et prévention d'un accident de décompression spécifique à une plongée Trimix.	Ecrite.
Le froid en plongée Trimix	Causes, prévention contre le froid	Ecrite.
Syndromes liés à la compression : SNHP et Syndrome myo-articulaire	Mécanismes, symptômes.	Ecrite. <i>Cet enseignement est culturel. Les profondeurs atteintes en plongée loisir n'exposent pas au SNHP.</i>
Logiciels de plongée et ordinateurs multi gaz.	Principes d'utilisation et limites de ces dispositifs. On insistera sur une utilisation raisonnée des paramètres possibles.	Édition d'une table pour un profil donné avec différents conservatismes.

*Le choix d'une évaluation écrite peut être discuté. En général les formations Trimix se font par tout petits groupes, et des évaluations orales formatives me semblent acceptables.*

## **12° LA QUALIFICATION RECYCLEUR**

### **Recycleur semi fermé au Nitrox**

#### Compétence n° 1 : CONNAISSANCES THÉORIQUES COMMUNES

<b>Connaissances</b>	<b>Commentaires et limites</b>	<b>Critères de réalisation</b>
Physiologie : •Travail respiratoire,	Spécificités de la respiration en recycleur.	Information et rappels.

•Echanges gazeux.		
Prévention et traitement des accidents ; hyperoxie, hypoxie, hypercapnie, inondation du circuit, inhalation de poussières de chaux, risques infectieux.	Aspects généraux et risques communs à tous les types de recycleurs.	Évaluation par écrit ou par oral.
Procédures de décompression.	Description des moyens couramment utilisés : tables, logiciels, ordinateurs. Critères de choix.	Évaluation par écrit ou par oral.

*L'adéquation me paraît bonne. Savoir utiliser les méthodes de décompression usuelles, notamment les différents ordinateurs. L'approche que Renaud Jourdan préconise dans son mémoire (29) est très performante dans ce domaine.*

---

## CONCLUSION.

J'ai pris beaucoup de plaisir à réaliser ce mémoire, à rencontrer des grands noms de la décompression comme Tino Ballestra et Jean Pierre Imbert, à être en contact avec des passionnés comme Jean Marc Belin ainsi que mes parrains Georges Livet et Yves Gaertner.

J'ai appris beaucoup de choses sur la décompression et la réalisation de ce mémoire a été très enrichissante pour moi sur le plan culturel.

Que faut-il retenir de ces quelques pages : que rien n'est acquis ! La décompression bouge, d'anciens dogmes volent en éclats. Il faut savoir se remettre en cause.

J'espère que ce mémoire arrivera à atteindre ses objectifs : actualiser les connaissances sur la décompression et sur les accidents de plongée, constituer une base de travail pour les cadres et futurs formateurs de cadre afin de parfaire leurs connaissances et de partager des réflexions pédagogiques.

Les nouveautés en physiologie de la plongée risquent de se développer de façon exponentielle, ce mémoire ne sera d'actualité qu'un bref temps. De nouvelles tables et de nouveaux algorithmes sont dans les starting block ! Il faut donc rester curieux, mais également critique de ces nouveautés, voir ce qu'elles apportent réellement : effet d'annonce, poudre aux yeux ou réel progrès.

Le comportement du plongeur reste essentiel dans la prévention des accidents. Savoir planifier ses plongées, avoir un comportement correct dans l'eau, développer la notion de binôme, maîtriser ses profondeurs d'immersion et ses remontées, ~~ne pas hésiter à faire des paliers profonds~~, placer le bon sens au-dessus des ordinateurs et ne pas hésiter à rallonger un palier quand on se sent fatigué, sont autant d'éléments qui participeront à notre sécurité.

Il faut améliorer notre pédagogie pour limiter les plongées « yoyo » en mettant en place une progression correcte, sans « griller » les prérequis qui vont nous conduire à l'échec et nous mettre en danger.

L'amélioration de cette sécurité rime avec un accroissement du plaisir ! Moins d'efforts inutiles, une meilleure forme en sortant de l'eau, plus de temps au fond pour observer la faune et la flore vont dans ce sens.

Dans ces conditions, nous pourrions vivre encore longtemps notre passion.

## BIBLIOGRAPHIE

1. BALESTRA C. La décompression. Communication au colloque scientifique de la CMAS 2006. Lausanne (Suisse) janvier 2006 .
2. BALESTRA C. Physiologie de la plongée. Colloque ANC. Bruxelles (Belgique) janvier 2007.
3. BALESTRA C., GERMONPRE P. et al. Intrathoracic pressure changes after Valsalva strain and other maneuvers: implications for divers with patent foramen ovale. *Undersea Hyperb Med* 1998 25(3): p 171-4.
4. BELIN Jean-Marc. Les dessous de la décompression. Traductions d'Eric Baker. Avis d'experts. Juin 2002.
5. BELIN Jean-Marc. Les modèles de décompression. Mémoire d'Instructeur Régional. CTR Midi Pyrénées FFESSM. Mars 2005.
6. BERGMANN Eric et al. Prise en charge des accidents de plongée dans les Bouches du Rhône. Etude rétrospective de 1991 à 1999.
7. BERGMANN Eric. Les accidents au Trimix. Rencontre nationale des médecins fédéraux. Hôpital Cochin, 9 décembre 2006.
8. BERGMANN Eric. Entretiens personnels.
9. BERGMANN Eric, GRANDJEAN Bruno. Accidents de plongée : le temps du bilan. *Subaqua* n° 209, 2006 p 38-39.
10. BERT Paul. La pression barométrique. (1878). Réédition du CNRS Paris, 1979.
11. BLATTEAU et al. Plongée aux mélanges gazeux autres que l'air avec appareils respiratoires à recyclage des gaz. *Médecine et armées*. 2006, 34, 2.
12. BONNAFOUS Marc. Les accidents de plongée traités par le CROSS-MED. Constat et propositions d'amélioration. Mémoire d'enseignement militaire supérieur premier degré. Janvier 2007.
13. BROUSSOLLE B., MELIET J.L. et al. Physiologie et médecine de plongée. Ellipses. 2ème édition 2006.
14. BROUANT Benoit. Évaluation dans une population de plongeurs de leur connaissance des accidents de plongée. DIU de médecine Hyperbare : Université de Nancy 2002.
15. BRUBAKK A., WISLOFF U. and al. A single air dive reduces arterial endothelial function in man. *The Journal of Physiology*. Volume 566 Issue 3 Page 901 August 2005.
16. BUGA G.M., GOLD M.E., FUKUTO J.M., IGNARRO L.J. Shear stress-induced release of nitric oxide from endothelial cells grown on beads. Department of Pharmacology, University of California, School of Medicine, Los Angeles 90024.
17. BÜHLMANN Albert. *Tauchmedezin*. Springer Verlag. Berlin. 1984.
18. DOOLETTE D.J, MITCHELL SJ. Biophysical basis for inner ear decompression sickness. *J Appl Physiol* 94 : 2145-2150, 2003.
19. GALLAND F.M. Effet protecteur sur la décompression d'un exercice physique. Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. Société de physiologie et de médecine subaquatique et hyperbare de langue française. Marseille 2005. Tome 15. N°1 p 11-16.
20. GERMONPRE P.,BALESTRA C. "Risk of decompression illness among 230 divers in relation to the presence and size of patent foramen ovale." *Eur Heart J* 2004 25(23) : p 2173-2174.
21. GROUSSET André. Cours théoriques destinés aux stagiaires BEES 1. CREPS d'Antibes. Mai 2005.
22. HALDANE J.S. et al. The prevention of compressed air illness. *Journal of Hygiene*, 1908 Volume 8, p 342-443.
23. HEMPLEMAN H.V.. History of decompression procedures. In *Physiology and Medicine of Diving* 4th Edition, pp342-375. Ed.P.B.Bennett and D.H. Elliott, W.B.Saunders Company Ltd, London. (1993).
24. HENNESSY T.R. Le site initial, l'évolution et les effets des microbulles de décompression. Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. 2002, tome 12 numéro 2. P 101-138.

25. HILLS Brian. A thermodynamic and kinetic approach to decompression sickness. Ph.D. Thesis, Adelaïde, 1966.
26. IMBERT Jean Pierre. Entretiens personnels
27. IMBERT J.P, BONTOUX M. A method for introducing new decompression procedures. UHMS Workshop on Validation of Decompression Schedules. Bethesda, Maryland. 1987.
28. JONIO Véronique. Les accidents de plongée dans les Bouches du Rhône. 1997-1999. Mémoire de DIU de médecine subaquatique et hyperbare : Université de Marseille 2000.
29. JOURDAN Renaud. Les recycleurs en plongée loisir : Utopie ou réalité ? Mémoire d'Instructeur Régional: CTR Est FFESSM Octobre 2004.
30. KIEFFER Pierre. La maladie endothéliale. Colloque ASSUBEST. Bali-Komodo novembre 2006.
31. LE CHUITON J. Contribution à l'étude des phénomènes bullaires intravasculaires survenant en cours de décompression après plongée. Thèses de sciences en Physiologie, Université Cl. Bernard Lyon 1979.
32. LE PECHON J.C. Médecine de la plongée et du travail en atmosphère hyperbare. La physique et ses applications à la plongée. Cochin. Paris.
33. LIVET Georges. Les accidents de décompression en plongée sportive. Mémoire d'Instructeur National. Commission Technique Nationale FFESSM 1988.
34. LOISEAU Stéphane. Les tables de décompression. Mémoire de DIU de médecine hyperbare. Université d'Angers 2002.
35. MASSIANI Jean François. Influence du délai d'apparition et du délai de prise en charge sur le pronostic des ADD. DIU de médecine hyperbare : Université de Marseille 2000.
36. MASUREL G. Contribution à l'étude du rôle physiopathologique des bulles générées chez l'animal et chez l'homme par un séjour en atmosphère hyperbare. Thèse n°17-87, Université Cl. Bernard, Lyon 1979.
37. SCHITTLY Bernard. Découverte d'un nouveau signe clinique en plongée. Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. 2005. Tome 15. N° 1 p 17-18.
38. SPENCER M.P, CAMPBELL S.D. Development of bubbles in venous and arterial blood during hyperbaric decompression , Bull Mason Clinic 1968.
39. STANGHELLINI Edwina. Prise en charge préhospitalière des accidents de plongée dans les Bouches du Rhône. 1991-93 / 1994-96. Thèse de doctorat en médecine : Université de Marseille, 1997.
40. WIENKE B.R.. Decompression theory. Los Alamos, 1988 NM 87545. Abstract.
41. WORKMAN R.D. Calculation of Decompression Schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives. Research report 6-65, USN Experimental Diving Unit, Washington D.C. 1965.
42. YOUNT David. Application of a bubble formation model to decompression sickness in rats and humans. Aviat. Space Environmental Medecine. 1979.

## **1. PUBLICATIONS CONSACREES A LA DECOMPRESSION**

43. Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. 2002 Tome 12. Supplément. Société de physiologie et de médecine subaquatique et hyperbare de langue française, Marseille.
44. Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. 2003 Tome 13. Supplément. Société de physiologie et de médecine subaquatique et hyperbare de langue française. Marseille.
45. Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. 2004 Tome 14. Numéro 2. Société de physiologie et de médecine subaquatique et hyperbare de langue française. Marseille.

## **2. PUBLICATIONS DISPONIBLES SUR INTERNET**

46. BALESTRA C. Coincer la bulle. [http://www.plongeur.fr/wiki/index.php/Coincer\\_la\\_bulle](http://www.plongeur.fr/wiki/index.php/Coincer_la_bulle)
47. BRUBAKK A.O. Site répertoriant les travaux publiés entre 1982 et 2001. <http://dspace.mclibrary.duke.edu/items-by-author?author=A.+O.+Brubakk>

48. GRANDJEAN Bruno. Statistiques des accidents de plongée. Disponible sur Internet : <http://perso.orange.fr/gjl/crc/medic.html>
49. MEDSUPHYP. Site Internet. <http://www.medsuphyp.com>

### 3. OUVRAGES DIVERS

50. VIDAL 2006 Le dictionnaire, Vidal éditeur 2006.

### 4. LOGICIELS DE DECOMPRESSION TELECHARGEABLES SUR INTERNET

51. PRO PLANNER :  
<http://www.divingshop.com/Shop/ShopProductDetail.asp?fdShopProductId=62>
52. V PLANNER : [http://www.hhssoftware.com/v-planner-fr/index\\_gs.html](http://www.hhssoftware.com/v-planner-fr/index_gs.html)



*Hippocampe pygmaea* photographié par Denis Greff. Bunaken. Sulawési. Indonésie. Novembre 2004.