



C O L L E C T I O N
D I R I G É E P A R J E A N B O R N A R E L

G R E N O B L E

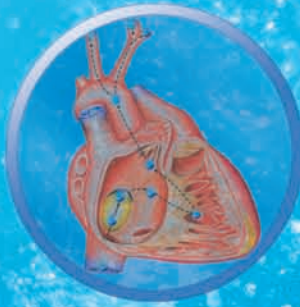
S C I E N C E S

LA PLONGÉE SOUS-MARINE

L'ADAPTATION DE L'ORGANISME ET SES LIMITES

Nouvelle édition

 **Philip FOSTER**



5 m
10 m
15 m
18 m
21 m
24 m
27 m
30 m
33 m
39 m



Extrait de l'information

EDP
SCIENTES

LA PLONGÉE SOUS-MARINE
L'ADAPTATION DE L'ORGANISME ET SES LIMITES
nouvelle édition

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences est un centre de conseil, expertise et labellisation de l'enseignement supérieur français. Il expertise les projets scientifiques des auteurs dans une démarche à plusieurs niveaux (référés anonymes, comité de lecture interactif) qui permet la labellisation des meilleurs projets après leur optimisation. Les ouvrages labellisés dans une collection de Grenoble Sciences ou portant la mention « Sélectionné par Grenoble Sciences » (« *Selected by Grenoble Sciences* ») correspondent à :

- » des projets clairement définis sans contrainte de mode ou de programme,
- » des qualités scientifiques et pédagogiques certifiées par le mode de sélection (les membres du comité de lecture interactif sont cités au début de l'ouvrage),
- » une qualité de réalisation certifiée par le centre technique de Grenoble Sciences.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

On peut mieux connaître Grenoble Sciences en visitant le site web :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

On peut également contacter directement Grenoble Sciences :

Tél. : (33)4 76 51 46 95 - e-mail : grenoble.sciences@ujf-grenoble.fr

Livres et pap-ebooks

Grenoble Sciences labellise des livres papier (en langue française et en langue anglaise) mais également des ouvrages utilisant d'autres supports. Dans ce contexte, situons le concept de **pap-ebook** qui se compose de deux éléments :

- » un **livre papier** qui demeure l'objet central avec toutes les qualités que l'on connaît au livre papier,
- » un **site web corrélé** ou **site web compagnon**, qui propose :
 - › des éléments permettant de combler les lacunes du lecteur qui ne posséderait pas les prérequis nécessaires à une utilisation optimale de l'ouvrage,
 - › des exercices de training,
 - › des compléments permettant d'approfondir, de trouver des liens sur internet...

Le livre du **pap-ebook** est autosuffisant et certains lecteurs n'utiliseront pas le site web compagnon. D'autres pourront l'utiliser, et chacun à sa manière. Un livre qui fait partie d'un **pap-ebook** porte en première de couverture un logo caractéristique et le lecteur trouvera le site compagnon à l'adresse internet suivante :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr/pap-ebook/nom de l'auteur du livre>

Grenoble Sciences bénéficie du soutien du
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et de la **Région Rhône-Alpes**.
Grenoble Sciences est rattaché à l'**Université Joseph Fourier de Grenoble**.

LA PLONGÉE SOUS-MARINE L'ADAPTATION DE L'ORGANISME ET SES LIMITES

nouvelle édition

Philip FOSTER



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - France

La plongée sous marine **L'adaptation de l'organisme et ses limites**

Cet ouvrage, labellisé par Grenoble Sciences, est un des titres du secteur Sciences de la vie et de la santé de la Collection Grenoble Sciences d'EDP Sciences, qui regroupe des projets originaux et de qualité. Cette collection est dirigée par Jean Bornarel, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1.

Comité de lecture de l'ouvrage

- › **J. ETERRADOSSI**, Professeure à la Faculté de Médecine de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
- › **B. GARDETTE**, Directeur de Recherche Scientifique COMEX, Marseille
- › **F. SAYETAT**, Professeure à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
- › **M. TANCHE**, Professeur à la Faculté de Médecine de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
- › **J. WOLKIEWIEZ**, Directeur du Centre Hyperbare du CHU de Nice

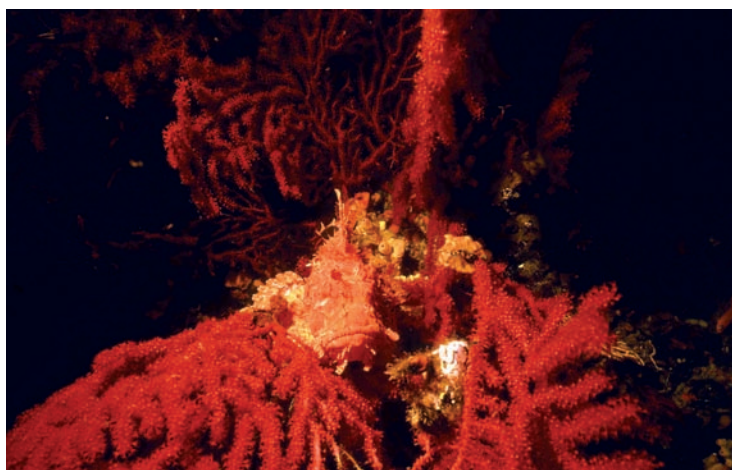
Cette nouvelle édition de *La plongée sous marine* a été suivie par Laura CAPOLO pour la partie scientifique et par Sylvie BORDAGE du centre technique Grenoble Sciences pour sa réalisation pratique.

L'illustration de couverture est l'œuvre d'Alice GIRAUD, d'après des éléments fournis par l'auteur.

Autres ouvrages labellisés sur des thèmes proches (chez le même éditeur)

La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels (*J.P. Franc et al.*) • Analyse statistique des données expérimentales (*K. Protassov*) • Outils mathématiques à l'usage des scientifiques et ingénieurs (*E. Belorizky*) • Méthodes numériques appliquées pour le scientifique et l'ingénieur (*J.P. Grivet*) • Bactéries et environnement. Adaptations physiologiques (*J. Pelmont*) • Enzymes. Catalyseurs du monde vivant (*J. Pelmont*) • Endocrinologie et communications cellulaires (*S. Idelman & J. Verdeti*) • Cinétique enzymatique (*A. Cornish-Bowden, M. Jamin & V. Saks*) • Biodégradations et métabolismes. Les bactéries pour les technologies de l'environnement (*J. Pelmont*) • Enzymologie moléculaire et cellulaire, T. 1 et 2 (*J. Yon-Kahn & G. Hervé*) • La biologie, des origines à nos jours (*P.V. Vignais*) • Science expérimentale et connaissance du vivant. La méthode et les concepts (*P. Vignais, avec la collaboration de P.M. Vignais*) • Histoire de la science des protéines (*J. Yon-Kahn*) • Le régime oméga 3. Le programme alimentaire pour sauver notre santé (*A. Simopoulos, J. Robinson, M. de Lorgeril & P. Salen*) • Gestes et mouvements justes. Guide de l'ergomotricité pour tous (*M. Gendrier*) • Radiopharmaceutiques. Chimie des radiotraceurs et applications biologiques (sous la direction de *M. Comet & M. Vidal*) • Physique et biologie. Une interdisciplinarité complexe (sous la direction de *B. Jacrot*)

ISBN 978-2-7598-552-5
© EDP Sciences, 2010



Photos O. PUTHON

Vj ku' r ci g'kpvgpvkqpcmf 'igh'dncpm

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 - HISTORIQUE	3
1.1 - Bref historique de la plongée	3
1.2 - Bref historique de la médecine de la plongée	6
2 - PHYSIQUE	9
2.1 - Unités de mesure du système international SI	9
2.2 - Poids	10
2.3 - Pression	12
2.4 - Pression de l'air ou pression atmosphérique	13
2.5 - Pression dans l'eau ou pression hydrostatique	15
2.6 - Pression absolue	17
2.7 - Table de conversion des pressions	19
2.8 - Le principe d'ARCHIMÈDE	20
2.9 - Flottabilité	22
2.10 - Structure d'un gaz	24
2.11 - Composition de l'air	25
2.12 - Définition d'un gaz parfait	26
2.13 - Loi de BOYLE-MARIOTTE	26
2.14 - Loi de CHARLES	29
2.15 - Loi de DALTON	30
2.16 - Loi de HENRY	32
3 - ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE	41
3.1 - Introduction	41
3.2 - L'oreille	41
3.3 - Le thorax	43
3.4 - L'appareil circulatoire	44
Le cœur	44
Le cycle cardiaque	48
La circulation	51

L'arbre vasculaire	52
Les pressions dans le système cardio-vasculaire	53
La constitution du sang	56
3.5 - La cellule	59
3.6 - L'appareil respiratoire	60
Conditions de mesure et d'expression des volumes des gaz	60
La respiration	60
Mécanique ventilatoire	63
Résistance du poumon au flux d'air	69
Travail respiratoire	71
Echanges de gaz au niveau de l'alvéole	75
Transport de l'oxygène dans le sang	78
Transport du gaz carbonique dans le sang	82
Rythme respiratoire	82
4 - PHYSIOLOGIE : ADAPTATION À LA PLONGÉE	85
4.1 - Le détenteur	85
4.2 - Mécanique ventilatoire en profondeur	87
4.3 - Travail respiratoire en profondeur	92
4.4 - Contrôle respiratoire en profondeur	99
4.5 - Energie utilisée par l'exercice musculaire au fond et consommation maximale d'oxygène	101
4.6 - Adaptation cardiovasculaire en plongée sportive à l'air : le <i>blood shift</i>	103
4.7 - Adaptation de l'oreille : l'équilibration	104
5 - DÉCOMPRESSION	109
5.1 - Introduction	109
5.2 - La bulle	109
5.3 - La bulle et l'accident de décompression.	112
5.4 - Les concepts de la décompression	116
5.5 - La modélisation de la décompression	128
5.6 - Les tables de décompression actuelles : MN 90, COMEX, BSAC'88.	132
5.7 - Le profil de plongée	147
6 - MODÈLES DE LA DÉCOMPRESSION	153
6.1 - Introduction au développement des modèles dynamiques de bulles.	153
6.2 - Nouveau modèle dynamique de bulles : intégration de paramètres physiologiques.	155
7 - QUESTIONS SUR LES ORDINATEURS DE PLONGÉE	171
7.1 - Historique	171

7.2 - Introduction sur les ordinateurs de plongée, questions	171
7.3 - La complexité de la physiologie et de la biologie	172
7.4 - L'élément probabiliste	172
7.5 - Objectif de l'ordinateur et types de logiciels commercialisés.	173
7.6 - L'algorithme VVAL18	174
7.7 - L'algorithme RGBM.	175
7.8 - La mesure des paramètres de la plongée.	176
7.9 - Evaluation du profil de plongée et calcul instantané de la remontée	178
7.10 - Que penser du logiciel des ordinateurs ?	179
7.11 - Quelle est l'expérience actuelle des ordinateurs ?	180
7.12 - Quel avenir pour les ordinateurs ?	180
8 - PLONGÉE AU NITROX	183
8.1 - Physiologie, toxicité et tolérance à l'oxygène	183
8.2 - Gestion de l'exposition à l'oxygène et prévention de la toxicité.	194
9 - PATHOLOGIE	203
9.1 - Les phases de la plongée et l'accident	203
9.2 - Les barotraumatismes	203
Mécanisme	204
Les barotraumatismes de l'oreille	204
Les barotraumatismes des sinus	205
Les barotraumatismes dentaires.	206
Le placage de masque	207
La surpression pulmonaire	207
L'embolie gazeuse artérielle paradoxale.	210
Le barotraumatisme gastrique	213
9.3 - Les accidents biochimiques.	214
La narcose à l'azote	214
L'intoxication au gaz carbonique.	216
9.4 - Les accidents de décompression.	217
La classification des accidents de décompression.	217
Conduite à tenir	217
Le <i>bend</i> ou accident ostéo-arthro-musculaire.	217
Les accidents cutanés	219
Les accidents médullaires	219
Les accidents cérébraux.	221
Les <i>chokes</i>	222
Les accidents vestibulaires	222
Les facteurs favorisant de l'accident de décompression	223

10 - CONTRE-INDICATIONS À LA PRATIQUE DE LA PLONGÉE SPORTIVE . .	227
10.1 - Générales	227
10.2 - ORL	227
10.3 - Stomatologie	228
10.4 - Appareil respiratoire	228
10.5 - Appareil cardiovasculaire	229
10.6 - Hématologie	231
10.7 - Neurologie	231
10.8 - Psychiatrie	231
10.9 - Profil psychologique du plongeur	232
10.10 - Ophtalmologie	232
10.11 - Endocrinologie	232
10.12 - Appareil digestif	233
10.13 - Orthopédie	233
11 - QUELQUES ASPECTS PARTICULIERS	235
11.1 - La femme et la plongée	235
11.2 - L'âge et la plongée	238
11.3 - L'enfant et la plongée	240
ANNEXES	243
1 - Certificat médical - FFESSM	243
2 - Annexe au chapitre 6	244
2.1 - Equations	244
2.2 - Détails des étapes intermédiaires nécessaires avant le calcul de $R_b(t)$. .	245
2.3 - Simulation et Programme	247
BIBLIOGRAPHIE	251
LISTE DES SYMBOLES	283
INDEX	289

INTRODUCTION

Le poète a dit : *la mer est le miroir de l'homme*.

Avec l'évolution des sciences et des techniques, elle a dévoilé certains de ses mystères. La féerie des paysages sous-marins suffit à provoquer l'enthousiasme, il n'est pas possible de demeurer insensible au vol majestueux d'une raie manta sur ces étranges coraux fluorescents vert lumineux ou orange de l'océan Pacifique. Les images de la vie subaquatique ont connu un large succès médiatique, d'abord avec les reportages du commandant COUSTEAU, puis avec les films **Le Grand Bleu**, **Atlantis** de Luc BESSON et enfin **Océans** de Jacques PERRIN et Jacques CLUZAUD. De nombreuses zones des fonds marins restent à explorer. Et l'archéologie sous-marine constitue une source de découvertes exaltantes.

Mais peut-être d'autres raisons viennent-elles contribuer à cet engouement ? En effet, lorsqu'il s'aventure sous la surface de l'eau, le plongeur pénètre dans un monde où les perceptions des organes des sens sont différentes. Et surtout, il ne progresse plus debout sur un plan dur, mais il évolue dans un univers à trois dimensions où règnent l'apesanteur et le silence. Le dépaysement est total. Le plongeur sportif avec son équipement de plongée, le scaphandre autonome, dispose d'une complète liberté de mouvements et de déplacements. Cependant, des règles très strictes régissent son séjour sous l'eau et la rigueur dont il doit faire preuve contraste avec l'apparente liberté que lui procure son appareil respiratoire. Des lois physiques et physiologiques incontournables gouvernent l'incursion de l'homme en milieu subaquatique. Un apprentissage est nécessaire pour évoluer sous l'eau en toute quiétude. L'enseignement correspondant est dispensé dans des structures appropriées, il est d'une part théorique et d'autre part pratique. Une meilleure connaissance de l'adaptation de l'homme sous l'eau et des dangers encourus en plongée sportive à l'air correspond à un réel besoin chez les plongeurs.

La plupart des ouvrages de médecine de la plongée restent très spécialisés et le plongeur dispose pour sa formation d'un choix de livres d'anatomie, de physiologie ou de physique dont la finalité n'est pas destinée à la compréhension de l'adaptation de l'homme sous l'eau. Le plongeur est contraint de glaner des informations dans différents ouvrages. Puis s'impose à lui un travail de compilation d'éléments dispersés.

Une réflexion m'a conduit, avec le Docteur Jean MERCIER-GUYON, alors Président de la Commission Médicale de la Fédération Française de plongée sous-marine, à constater la nécessité d'un document pédagogique destiné au pratiquant et au moniteur. Cette observation m'a incité à faire ce livre. Cet ouvrage réalise une syn-

thèse des données les plus récentes ; de ce fait, il intéresse aussi les médecins, médecins du sport ou spécialistes qui peuvent être confrontés dans leur pratique quotidienne à des patients plongeurs. Par ailleurs, l'intention de ce travail est de communiquer un certain nombre de messages, notamment sur la prévention et sur l'élaboration actuelle des tables qui ne repose pas sur un simple modèle mathématique de la décompression. La présentation et la rédaction du texte s'efforcent d'être didactiques. Au cours de la réalisation de ce livre, il est devenu évident qu'un texte dépourvu d'illustrations aurait été peu attrayant. Les planches couleurs originales constituent donc un outil pédagogique indispensable.

1 - HISTORIQUE

1.1 - BREF HISTORIQUE DE LA PLONGÉE

Des fresques crétoises, datant de 2 000 à 1 500 ans avant J.-C. et décrivant des scènes sous-marines remarquables par leur réalisme, ont été exhumées à la fin du siècle dernier. Les plus anciennes traces écrites ou dessinées des incursions de l'homme sous l'eau datent de l'Antiquité. Mais il ne fait aucun doute que l'homme préhistorique ait effectué des intrusions sous la surface de l'eau pour pêcher ou ramasser des pierres précieuses.

Un bas-relief assyrien, remontant à 900 avant J.-C. et conservé au British Museum, représente des soldats nageant sous l'eau et respirant par un tube l'air contenu dans une gourde accrochée sous la poitrine. Ces outres devaient être comprimées par la pression de l'eau à la profondeur d'intervention et ne permettre qu'une ou deux inspirations. Ce procédé est intéressant car il illustre l'une des premières tentatives de l'homme pour emporter avec lui sa réserve d'air nécessaire à la respiration sous l'eau. A cette époque, l'idée relève du génie car l'existence de l'air n'est pas connue ; il faudra attendre des siècles avant sa mise en évidence et son caractère indispensable à la survie.

En 325 avant J.-C., ALEXANDRE LE GRAND, roi de Macédoine, au retour de son expédition jusqu'à l'Indus, campe avec son armée sur les rives du Golfe Persique. Il est élève d'ARISTOTE et, comme lui, avide de connaître les mystères de la nature. ALEXANDRE n'est pas non plus insensible à la splendeur du site : la mer turquoise, limpide comme de l'eau de source, laisse contempler les magnifiques plateaux coralliens. Les coraux de soie, arbustes fleuris aux couleurs éclatantes, rose, rouge, orange, bleu, en passant par toutes les nuances où se mêle le blanc, sont seulement à quelques centimètres sous l'eau. Un peu plus loin, les mérous innombrables côtoient les poissons-anges, les poissons-trompettes, les poissons-papillons, entourés par des myriades de demoiselles dorées. Toutes les plus belles teintes et les habits de carnaval sont réunis pour un grand ballet subaquatique. Peut-être aussi a-t-il consulté les augures. ARISTOTE rapporte qu'il aurait déclaré : *Les Dieux m'ont barré la route de l'Asie insondable et indiqué celle de la mer ... Je ne veux pas conquérir la mer, je veux surprendre ses secrets.* Peut-être voulait-il des perles car il déclare : *Voyez ces perles ! Elles proviennent du fond du golfe. Les hommes les ont pêchées.* ALEXANDRE s'est entouré de savants qui ont mesuré les distances et dessiné les *stadiasmos*, cartes marines des Grecs. Au bord du golfe Persique, l'idée des savants est de fabriquer l'ancêtre de la cloche de plongée ou *tonneau d'ALEXANDRE*, appelé *corimpha*

par ARISTOTE. Un homme debout peut s'installer dans ce tonneau de bois, recouvert de peau d'âne et enduit de poix pour assurer l'étanchéité. La cloche ne comporte pas de socle et un lestage précis assure la stabilité verticale de l'ensemble. Lorsque le tonneau s'enfonce sous l'eau, à une dizaine de mètres de profondeur, le niveau de l'eau, sous l'effet de la pression hydrostatique, monte dans la cloche et atteint les hanches du passager. L'air emprisonné dans la partie haute de la cloche ne peut s'échapper et il est comprimé selon la loi de BOYLE-MARIOTTE. Le plongeur sous le tonneau d'ALEXANDRE respire pour la première fois de l'air comprimé à la pression ambiante. Cependant, l'autonomie reste limitée par la quantité d'oxygène contenue dans l'air emporté, ainsi que par la toxicité du gaz carbonique rejeté dans la cloche. ALEXANDRE a lui-même plongé dans son tonneau ; il est revenu émerveillé, peut-être aussi un peu épouvanté par le spectacle dont il a pu être le témoin.

Après ALEXANDRE, l'idée de la cloche à plongée sombre un peu dans l'oubli. Quelques récits du Moyen-Age relatent l'incursion d'hommes sous l'eau.

Vers la fin du XVII^e siècle, Denis PAPIN et Edmund HALLEY apportent une innovation majeure à la cloche de plongée. L'air à l'intérieur de la cloche est renouvelé par des tonneaux contenant de l'air comprimé à une pression supérieure à celle du fond. L'exécution de tâches sous-marines devient réalisable.

Le tonneau de LETHBRIDGE en 1715 représente une invention pragmatique. La figure 1.1 est basée sur les plans de l'inventeur conservés au British Museum et sur une photographie noir et blanc d'une reconstruction.



Figure 1.1 - Le tonneau de LETHBRIDGE

Le tonneau, cylindre aux dimensions d'un homme, hermétiquement clos, emporte son passager et un volume d'air à la pression atmosphérique. Un hublot de verre permet la vision sous l'eau. Les bras sortent du tonneau par des ouvertures garnies de manchons d'étanchéité en cuir. Le travail sur des sites sous-marins est possible. LETHBRIDGE procède lui-même aux essais à Plymouth. Il se fait descendre de plus en plus bas. Vers 18 mètres, il éprouve une violente douleur aux bras. A cette profondeur, la pression absolue est de 2,8 bars. Cette expérience est intéressante pour démontrer les effets cardiovasculaires de la pression sous l'eau sur l'organisme, particulièrement parce que LETHBRIDGE respire de l'air à la pression atmosphérique à l'intérieur du tonneau. Les vaisseaux sanguins des bras sont comprimés et le sang est refoulé vers le thorax (*blood shift*), provoquant des effets similaires à ceux de l'apnée. D'autre part, au terme de trente minutes d'immersion, le plongeur doit tirer sur la cordelette pour être remonté car les premiers effets de l'intoxication au gaz carbonique, vertiges et maux de tête, commencent à se faire sentir. Bientôt, la fortune va sourire à LETHBRIDGE. Il utilise son invention pour l'exploration des trésors et des épaves engloutis.

Le XIX^e siècle voit l'avènement des *pieds lourds*. En 1829, l'Allemand Auguste SIEBE dépose un premier brevet. Le plongeur respire de l'air comprimé qui lui est envoyé de la surface par un tuyau. L'équipement est lourd ; il consiste en un casque de cuivre équipé de hublots. L'étanchéité de l'habit est assurée par du caoutchouc. L'air comprimé pulsé dans le casque gonfle l'habit. Pour compenser cette flottabilité positive, le scaphandrier est équipé de semelles de plomb. Il se déplace en marchant au fond et peut effectuer différentes tâches sous-marines.

C'est également au XIX^e siècle qu'apparaît l'ancêtre du scaphandre autonome actuel. Les Français Benoît ROUQUAYROL et Auguste DENAYROUSE mettent au point le *réservoir-régulateur* en 1864. Le plongeur est toujours relié à la surface par un cordon ombilical qui l'approvisionne régulièrement en air comprimé. Cependant, le plongeur porte sur ses épaules une réserve d'air comprimé de huit litres qui lui permet une certaine autonomie. Le régulateur délivre l'air à *la demande*, il est posé sur le réservoir dorsal. Il comporte déjà une *casserole* et un *bec de canard* (soupape d'expiration). Mais cette invention est en concurrence directe avec les *pieds lourds*. La respiration dans un casque offre un plus grand confort respiratoire. Cependant, les clapets de la casserole présentent une résistance mécanique. Les hublots du casque permettent une vision sous-marine parfaite. Le plongeur équipé du réservoir-régulateur ne porte pas de masque ; sa cornée se trouve en contact direct avec l'eau et sa vision du milieu sous-marin est floue et déformée.

La plongée moderne naît véritablement au XX^e siècle avec l'invention du scaphandre autonome en 1942 par Emile GAGNAN et le Commandant Jacques-Yves COUSTEAU, décrite plus loin, à la section *Le détendeur*. La plongée devient un sport de loisir. Mais le XX^e siècle est celui des exploits et la conquête des fonds sous-marins est devenue une nécessité. Le record de la profondeur atteinte par un plongeur est impressionnant. Il est de - 534 mètres d'eau de mer lors de l'expérience HYDRA VIII réalisée par la COMEX en 1988, en plongée opérationnelle.

Une nouvelle expérience, HYDRA X, conduite sous la direction du Dr B. GARDETTE, en octobre 1992, a permis à trois plongeurs de la COMEX (S. ICART, T. MAVROSTOMOS et R. PAYOT) de séjourner à –675 mètres de profondeur, en respirant un mélange composé d'*Hydreliox*. Cette plongée d'essai s'est déroulée dans un caisson, et un test en immersion à –701 mètres a été réussi. Pour atteindre ces profondeurs, le plongeur est soumis à la physiologie de l'extrême. Il respire des mélanges de gaz plus légers que l'air. En effet, l'air ne peut plus être utilisé au-delà de 60 mètres car il présente des inconvénients majeurs.

1.2 - BREF HISTORIQUE DE LA MÉDECINE DE LA PLONGÉE

Dans l'Antiquité, au VI^e siècle avant J.-C., ARISTOTE relate déjà que les pêcheurs de perles et d'éponges éprouvent des douleurs dans les oreilles au fur et à mesure de la descente. Mais il ne relie pas cette manifestation à l'effet de la pression de l'eau sur l'oreille.

Après une période d'ombre au Moyen-Age, il faut attendre les premières cloches de plongée pour voir apparaître de curieuses manifestations chez les plongeurs. L'irlandais Robert BOYLE constate pour la première fois, en 1670, l'apparition de ces troubles. Il réalise même des expériences. Il comprime puis décomprime une vipère à l'aide d'une pompe et provoque ainsi l'apparition d'une bulle d'air dans l'oeil du serpent. SPALDING, ingénieur écossais, perfectionne la cloche de HALLEY en 1775 et est la victime d'un mal étrange. SPALDING et son fils, à l'occasion d'une plongée comme tant d'autres, s'écroulent sans connaissance lorsque la cloche fait surface. Inconscients et paralysés, ils meurent en quelques heures. Leurs décès sont imputés à une crise d'apoplexie.

Il faut attendre la publication en 1878 de l'ouvrage du Français Paul BERT, ***La Pression barométrique, recherches de physiologie expérimentale***, pour que les nombreux mystères de la respiration d'air à une pression différente de celle de l'air atmosphérique, au niveau de la mer, soient éclaircis. Paul BERT énonce l'origine des troubles dus à la décompression (voir section *La Bulle et l'accident de décompression*). Il classe les pathologies et conseille la décompression lente lors du retour à la pression atmosphérique. Il propose la recompression thérapeutique pour lutter contre les effets de décompressions rapides. Il décrit aussi la narcose à l'azote. Il expose la toxicité de l'oxygène à partir d'une pression de 15 atmosphères d'air pur. L'effet Paul BERT est la toxicité de l'oxygène sur le cerveau. Son livre constitue l'ouvrage de référence des bases de la physiologie hyperbare.

En 1906, le Professeur John Scott HALDANE, au service de la Royal Navy, met au point des procédures de décompression. A l'issue d'une longue expérimentation animale, il propose un modèle mathématique de la décompression (voir section *Les concepts de la décompression*). Il est aussi à l'origine des premières tables de décompression. Ensuite, de nombreux physiologistes se sont penchés sur la décompression, apportant des améliorations ou des modifications aux premières théories.

Au cours de l'aventure sous-marine, les explorateurs sous-marins ont vite compris que, pour évoluer sous l'eau, plusieurs voies s'offrent au plongeur, avec une physiologie différente pour chacune d'elles. La première technique est de plonger sans respirer pendant une durée de quelques secondes à quelques minutes, pour des personnes entraînées, c'est l'apnée. Une autre solution consiste à s'immerger et à respirer de l'air atmosphérique, à condition que la pression de l'eau ne s'applique pas sur le thorax. Cette technique trouve sa réalisation dans le tonneau de LETHBRIDGE. Le scaphandre rigide de type JIM (aux Etats-Unis) est le fruit de l'évolution technologique, mais il est énorme et le plongeur est recouvert d'une véritable cuirasse avec des joints articulés. Cette solution, très inconfortable, limite beaucoup la capacité de se mouvoir et d'effectuer des tâches. La dernière voie, la plus explorée, est celle de respirer de l'air ou un mélange de gaz à la même pression que l'eau ambiante. Les techniques de plongée à l'air comprimé sont nombreuses : la cloche à plongée, les pieds lourds, les tourelles et le scaphandre autonome actuel. Grâce à ces inventions, le travail sur des sites sous-marins est permis. Mais des conditions physiques et physiologiques incontournables régissent l'accès de l'homme au milieu hyperbare.

La physiologie et la médecine de plongée ont suivi avec un certain décalage dans le temps l'évolution de ces techniques. Le milieu du xx^e siècle marque le début de la course vers la physiologie de l'extrême. Pour aller plus profond, le plongeur doit respirer des mélanges gazeux contenant de l'hélium et (ou) de l'hydrogène et de l'oxygène (plongée à saturation). La décompression s'effectue très lentement car la désaturation complète des tissus de l'organisme nécessite quelques jours. L'océanographe n'est plus exposé aux inconvénients de l'air respiré à une pression élevée. Cependant, dans l'expérience PHYSALIE I (COMEX, 1968), lors d'une plongée expérimentale à l'héliox à - 335 mètres, le Dr. X. FRUCTUS, le Pr. R. BRAUER et le Pr. R. NAQUET décrivent de curieuses manifestations nerveuses dues à l'hélium apparaissant chez les plongeurs. C'est le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions (SNHP). Pour éviter ce phénomène, de l'hydrogène est ajouté au mélange de gaz respiré. L'hydrogène a donc un rôle protecteur vis-à-vis du SNHP, mais il est narcotique à des pressions partielles élevées.

Une autre voie, entièrement nouvelle, la respiration en phase liquide, a été explorée par le physiologiste hollandais KYLSTRA en 1959 avec succès sur des animaux. Peu après, un autre physiologiste suédois, LUNDGREN, immerge des souris dans une solution de fluorocarbure renfermant de l'oxygène. Les souris paraissent noyées dans le liquide du récipient, mais sont toujours bien vivantes à la fin de l'expérience... A partir de 1970, l'U.S. Navy entreprend des expériences dans ce domaine. L'homme se prête même à l'expérimentation. Un volontaire se laisse introduire une solution saline fluorocarbonée dans un poumon. Le sujet a respiré en phase liquide très normalement et n'a présenté par la suite aucun trouble pathologique.

Vj ku' r ci g' k' p v g p v k p c m { ' i g h v' d r e p m

2 - PHYSIQUE

2.1 - UNITÉS DE MESURE DU SYSTÈME INTERNATIONAL SI

Un consensus international a défini des unités pour mesurer les valeurs physiques. Ces unités sont légales depuis 1961. Elles sont rattachées à des grandeurs physiques universelles liées aux propriétés de la matière. Elles sont conservées au Pavillon Breteuil à Sèvres, près de Paris : étalon de longueur, le mètre en platine iridié, ou, étalon de masse, le kilogramme en platine iridié.

Il existe deux principales classes d'unités :

UNITÉS DE BASE

Unité de base	Dimension	Nom S.I.	Symbole S.I.
Longueur	L	mètre	m
Masse	M	kilogramme	kg
Temps	T	seconde	s
Température	K	kelvin	K

Le 0 degré CELSIUS correspond à 273,25 degrés sur l'échelle KELVIN. Et un intervalle de 1 °C est strictement égal à un intervalle de 1 K.

UNITÉS DÉRIVÉES

Elles s'écrivent par une expression mathématique utilisant les symboles de base.

Unité dérivée	Dimension	Nom S.I.	Symbole S.I.
Surface	L^2	mètre carré	m^2
Volume	L^3	mètre cube	m^3
Masse volumique	$M L^{-3}$	kilogramme par mètre cube	$kg m^{-3}$
Vitesse	$L T^{-1}$	mètre par seconde	$m s^{-1}$
Accélération	$L T^{-2}$	mètre par seconde carrée	$m s^{-2}$
Force	$M L T^{-2}$	newton	N
Pression	$M L^{-1} T^{-2}$	pascal	Pa

- US Navy	144		
- MN 90	133		
tension			
- artérielle	236		
- tissulaire d'azote dissous	120, 121		
- tissulaire d'un gaz dissous	110, 117, 131		
- tissulaire maximale d'azote dissous	120		
- tissulaire partielle d'azote dissous	122		
tétraplégie	219, 220		
tissu directeur	135		
Toynbee (manœuvre de)	107		
trachée	62		
travail			
- élastique externe	96		
- expiratoire	73		
- inspiratoire élastique	73		
- inspiratoire non-élastique	73		
- respiratoire	71		
- respiratoire en profondeur	92		
tympan	42		
U			
unité de dose pulmonaire toxique (UPTD)	189		
unités de mesure			
du système international S.I.	9		
V			
Valsalva (manœuvre de)		43, 105	
valve d'admission		87	
valvule		45, 46	
vasoconstriction		103	
ventilation			
- maximale volontaire		97	
- minute		87	
ventricule		45, 48	
vertige		43, 203, 221	
viscosité (d'un gaz)		70	
vitesse			
- d'élimination d'un gaz inerte		109	
- de remontée		135	
volume			
- courant		66	
- de réserve expiratoire		66	
- de réserve inspiratoire		66	
- résiduel		66	
volume critique de bulles (hypothèse de Hennessy & Hempleman)		128	
voyage en avion			
- après la plongée		143	
W			
Workman (valeur M de)		110	

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v' d n e p m