

BASES PHYSIQUES ET PHYSIOLOGIQUES DE LA PLONGÉE SOUS-MARINE

par **J. CHOUTEAU**

Professeur de Physiologie Animale à
la Faculté des Sciences de Marseille

I. - INTRODUCTION

L'homme est un animal à respiration pulmonaire aérienne qui vit normalement à la surface du globe à la pression atmosphérique. La curiosité, des nécessités économiques ou militaires ont conduit l'homme, depuis fort longtemps, à essayer de poursuivre ses activités dans des milieux différents. La plongée sous-marine ou plus généralement subaquatique est une de ses tentatives. Comme toutes les autres : vie en altitude — au froid — en confinement — en apesanteur, la vie en plongée a posé des problèmes d'adaptation complexes.

L'eau en effet n'est pas le milieu naturel de l'homme et ceci pour deux raisons majeures :

a) l'eau n'est pas respirable pour l'homme, d'abord à cause de la teneur plus faible en oxygène (l'eau de mer à 20°C contient 0,536 % d'oxygène alors que l'air en contient environ 21 %) et ensuite de l'impossibilité pour l'homme d'utiliser cet oxygène dissout (l'homme possède des poumons, les poissons disposant de branchies peuvent utiliser cet oxygène).

b) l'eau est 800 fois plus dense que l'air :

1 litre d'eau pure pèse 1.000 grammes, soit 1 kilogramme.

1 litre d'air pèse 1,293 gramme.

ceci a pour conséquence le fait qu'un homme à la surface du globe subit la pression de la colonne d'air qui le surmonte, mais lorsqu'il descend sous l'eau il s'y ajoute la pression de la colonne d'eau au-dessus de lui. Ceci va donc conduire à envisager une vie sous pression qui représente l'essentiel de la physiologie de la Plongée.

II. - RESPIRATION SOUS L'EAU - PRINCIPE D'ÉQUIPRESSION

Le fait que l'eau ne soit pas respirable est un problème relativement aisé à résoudre et il l'est, plus ou moins bien depuis des temps assez reculés. Plusieurs solutions ont été utilisées :

1° La **plongée en apnée** est la plus ancienne. Le plongeur respire en surface, retient sa respiration et plonge en apnée inspiratoire, avec le stock d'air contenu dans ses poumons. Très vite (1 à 3 minutes) il doit remonter ayant consommé son oxygène et accumulé du gaz carbonique. Dans ces conditions, en immersion la cage thoracique du plongeur est comprimée, ses organes abdominaux également, repoussant ainsi vers le haut le diaphragme, le volume pulmonaire est diminué et l'air emmagasiné dans les poumons est donc comprimé. La durée d'immersion peut être un peu augmentée par une hyperventilation préalable ; celle-ci a pour effet d'augmenter la pres-

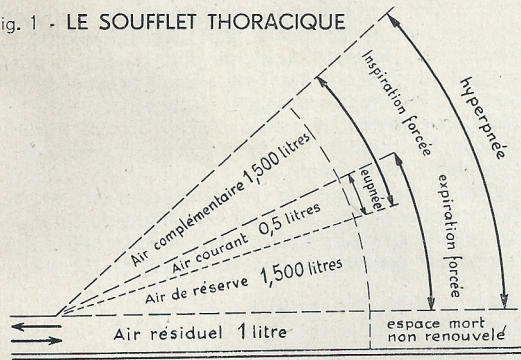
sion partielle d'oxygène alvéolaire et d'abaisser celle du gaz carbonique (*) ou encore par inhalation d'oxygène pur ou d'un mélange suroxygéné. Cette méthode est la base de la plongée libre pratiquée par les plongeurs de perles, de corail, d'éponges et les chasseurs sous-marins. Cette solution, apparemment simple, dont les limitations sont évidentes, pose toutefois des problèmes physiopathologiques compliqués, comme en témoignent malheureusement de nombreux accidents mortels, mais qui sortent du cadre de cet exposé.

2° L'**utilisation d'enceintes rigides, closes et résistantes à la pression** alimentées en oxygène (O²) ou en air à la pression atmosphérique à partir de réservoirs, le gaz carbonique (CO²) et la vapeur d'eau (H²O) exhalés étant absorbés par de la chaux sodée. C'est le cas des sous-marins, bathyscaphes, soucoupes plongeantes, tourelles d'observation type Galeazzi.

(*) Le présent travail correspond aux cours professés depuis 1957 aux Stages de Moniteurs de la F.F.E.S.S.M. à Niolon et depuis 1960 aux Stages de Plongée du C.I.P. de Bendor (Protection Civile, sapeurs-pompiers, C.R.S., Gendarmerie Nationale, T.C.F., Club Méditerranée, etc.).

(*) En effet dans la respiration normale (eupnée) une faible partie du volume pulmonaire (0,500 l., air courant) est renouvelée à chaque inspiration-expiration. Dans l'hyperventilation (hyperpnée) un volume beaucoup plus grand est renouvelé (1,500 l. air complémentaire + 1,500 l. air de réserve) : Fig. 1.

Fig. 1 - LE SOUFFLET THORACIQUE



Ici se posent surtout des problèmes de résistance des matériaux, de propulsion et de confinement. (Fig. 2 a).

3° Alimentation en air à partir de la surface.

Pour cela on peut envisager l'utilisation d'un tube dépassant par une extrémité la surface de l'eau, l'autre étant dans la bouche du plongeur immergé. Cette solution simple et élégante se heurte toutefois à de graves limitations. En effet avec un tube (tuba classique) de 30 à 35 cm de long on peut respirer la tête sous l'eau.

Dans ces conditions la pression totale supportée par le thorax du plongeur ($PA + PH : 1 + 0,020 = 1,020 \text{ kg/cm}^2$) est peu différente de la pression atmosphérique ($PA = 1 \text{ kg/cm}^2$). Pour une immersion de 50 cm la respiration devient déjà très pénible et à 2 mètres elle devient impraticable. Ceci est dû au fait (fig. 2 b) que l'air apporté par le tuyau est à la pression atmosphérique ($PA = 1 \text{ kg/cm}^2$) alors que la cage thoracique du plongeur se trouve à une pression plus élevée (pression atmosphérique $PA +$ pression de la colonne d'eau $PH =$ pression hydrostatique) qui est ici de $1,200 \text{ kg/cm}^2$. Le plongeur subit alors les mêmes phénomènes que le plongeur en apnée (compression thoracique et abdominale) et s'il peut expirer, il est incapable d'inspirer l'air de la surface dont la pression est trop faible.

Nous voyons donc ici la première intervention du milieu physique où se pratique la plongée. Pour s'en affranchir sous cet aspect il faut respecter le principe d'équipression, base de la réalisation des caissons et des scaphandres lourds et autonomes. Ce principe peut être énoncé en disant : « Que pour maintenir la ventilation pulmonaire d'un plongeur immergé au voisinage des conditions de la dynamique pulmonaire à l'air libre, il faut lui faire inhaler un

mélange gazeux sous une pression égale à la pression hydrostatique s'exerçant au niveau de sa cage thoracique ». Cet énoncé n'est d'ailleurs pas tout à fait exact, la densité du mélange gazeux, nous le verrons plus loin, intervenant également.

Ce principe étant posé, trois types principaux de réalisations pratiques ont été apportés résolvant le principe de la respiration sous l'eau :

— **La cloche à plongeur** : encore une des plus anciennes (fig. 2 c). Un récipient ouvert à l'extrémité inférieure est immergé, emprisonnant un certain volume d'air. Au fur et à mesure de la descente la pression s'exerce à l'interface eau-air (couteau) fait monter le niveau d'eau dans la cloche, y comprimant ainsi l'air dont la pression est constamment égale à $PA + PH$. (Le volume de l'air diminue en fonction de la loi Mariotte). Le plongeur peut donc y respirer sans difficulté, la pression du gaz respirable étant égale à la pression subie par son thorax et son abdomen. L'autonomie est ici fonction du volume d'air initial pouvant aller d'un simple chaudron (Lebeta des anciens) coiffant la tête du plongeur, à un tonneau ou une enceinte plus vaste (cloche catalane, cloche de Halley).

Ce dispositif a ultérieurement été perfectionné par une alimentation en air comprimé à partir de la surface. C'est ainsi que les premiers scaphandres à casque (simplement lestés et posés sur les épaules) ou les modernes cloches à plongeurs, sont alimentés à l'aide d'une pompe pneumatique ou d'un compresseur en air à une pression $PA + PH$ égale à la pression hydrostatique refoulant l'eau à la partie inférieure du casque ou du caisson par où l'air, en excès, s'échappe librement (fig. 3 a).

— **Le scaphandre lourd à casque** (fig. 3 b). Le scaphandrier est revêtu d'un habit étanche mais souple transmettant la pression et il est coiffé d'un casque rigide avec hublots et soupape d'évacuation, couvrant les épaules et le haut de la cage thoracique. Le casque est alimenté en air comprimé par un compresseur en surface, le débit étant réglé par une vanne manipulée par le scaphandrier. L'homme respire l'atmosphère du casque constamment renouvelée par la pompe, et l'habit souple se comporte comme une membrane réalisant automatiquement l'équipression entre l'intérieur et l'eau ambiante.

— **Le scaphandre autonome type Cousteau-Gagnan** (fig. 3 c) : Le plongeur emporte sur son dos des réservoirs d'air comprimé à 180 kg/cm^2 et respire l'air de ces récipients par l'intermédiaire d'un détendeur fixé sur les bouteilles et situé au niveau de la partie supérieure de la cage thoracique. Ce

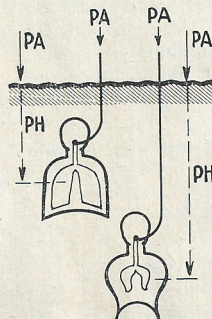
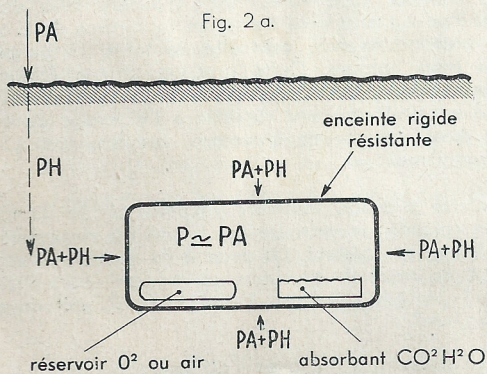


Fig. 2 b.

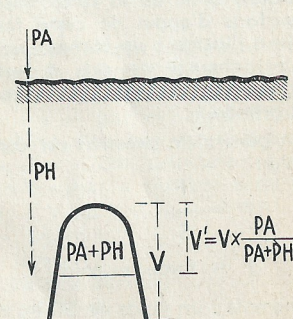


Fig. 2 c.

détendeur fonctionne à la demande et réalise l'équipression grâce à une membrane qui subit la pression de l'eau.

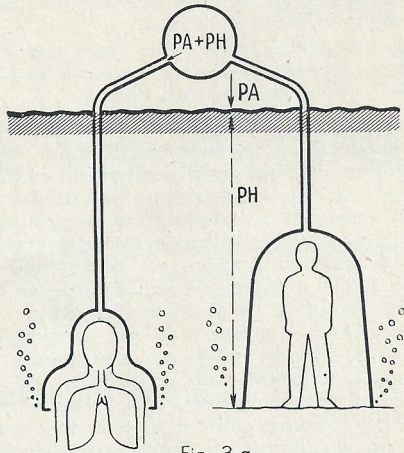


Fig. 3 a.

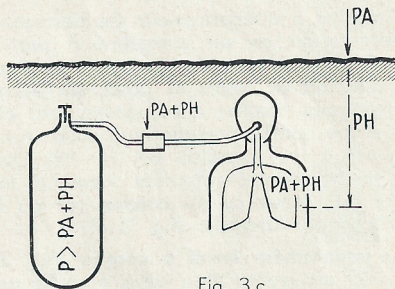


Fig. 3 c.

Si le problème de la respiration sous l'eau est donc résolu, les problèmes qui vont se poser au plongeur, souvent à son insu, vont surtout découler de l'existence de la pression due à la densité élevée de l'eau. Ceci va donc nous amener à envisager les problèmes concernant la « vie sous pression » ou plus généralement la « vie en atmosphère compri-

mée ». Ces problèmes se sont posés dès l'utilisation des premiers scaphandres et caissons hydropneumatiques, sous forme d'accidents plus ou moins graves, souvent mortels que l'on dénommait « coup de pression ». C'est au physiologiste français Paul Bert, en 1878, que revient le mérite d'avoir élucidé la nature de ces troubles et du même coup d'avoir créé la physiologie de la plongée.

Cette physiologie de la plongée n'est, en fait, qu'une physiologie normale de l'individu perturbée par le milieu physique particulier dans lequel il évolue et elle est dominée par deux ordres de facteurs :

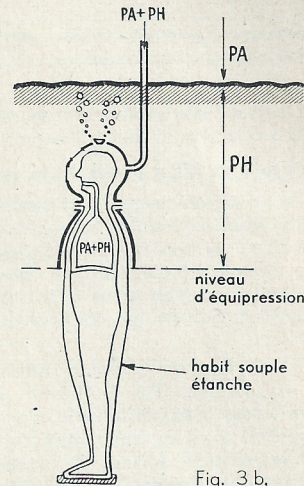


Fig. 3 b.

— quelques principes de physique élémentaire dont les conséquences sont simples et rigoureuses.

— des phénomènes biophysiques et biochimiques plus complexes dont le caractère rigoureux peut être masqué plus ou moins par l'intervention de facteurs individuels.

Nous allons examiner ces différents facteurs et voir leurs conséquences physiologiques et pathologiques.

III. - LOIS PHYSIQUES DE LA PLONGÉE

A. - NOTION DE PRESSION

Un corps pesant exerce sur un support horizontal une force égale à son poids. Si ce support est déformable, la déformation sera fonction non seulement du poids, donc de la force appliquée, mais aussi de la surface d'appui de cette force. Cette notion est facile à illustrer : un homme sur la neige s'y enfonce, s'il est chaussé de skis il reste à la surface, car dans ce cas son poids est réparti sur une surface plus grande.

En général la pression est donnée par une formule simple :

$$P = \frac{F}{S} \quad \text{ou} \quad P = \text{pression}$$

$$F = \text{force ou poids} \quad S = \text{surface}$$

Exemple : un poids de 50 kg d'une base de 10 cm² exerce une pression de :

$$P = 50/10 = 5 \text{ kg/cm}^2.$$

B. - PRESSION ATMOSPHERIQUE

Le globe terrestre est entouré d'une couche d'air pesante qui est l'atmosphère. Cette couche n'est pas homogène car les couches inférieures, pressées par les couches supérieures, sont d'autant plus denses que l'on est plus près du sol. A la surface de la terre la pression exercée est celle de toute l'atmosphère qui nous entoure. Cette pression atmosphérique ou barométrique n'est normalement pas ressentie car elle est uniformément répartie à l'extérieur du corps et dans les cavités (poumons, oreilles, sinus...) de l'organisme.

Cette pression équilibre (expérience de Toricelli) une colonne de mercure de 1 cm² de section et de 760 mm de hauteur. La densité du mercure étant de 13,6 la pression exprimée en kg/cm² sera 76 cm × 1 cm² × 13,6 = 1,033 kg/cm², soit en gros 1 kg/cm².

La pression varie avec l'altitude :

TABLEAU I

Altitude (dans l'air)	P. en mm Hg	P. en kg/cm ²
10.000 mètres	198	0,270
5.000 »	405	0,552
1.000 »	673	0,915
500 »	715	0,973
100 »	751	1,021
0 (niveau de la mer)	760	1,033
— 100 mètres	769	1,045
— 500 »	809	1,100
— 1.000 »	862	1,171

L'examen du tableau montre qu'il faut s'élever à 5.000 mètres pour diminuer la pression de moitié environ et à 10.000 mètres pour la diminuer au quart. Une descente spéléologique en grottes souterraines à — 1.000 mètres n'augmente la pression que de 138 gr/cm², donc très faiblement.

C. - MESURE DES UNITES DE PRESSION

La mesure de la pression atmosphérique peut se faire avec le baromètre à mercure ou des baromètres anéroïdes. Pour la mesure de pressions supérieures à la pression atmosphérique (réservoir de gaz comprimés, manomètre de profondeur ou bathymètre), on utilise des manomètres métalliques dont la particularité est d'indiquer 0 à la pression atmosphérique. Ces manomètres donnent donc une **pression relative** à la pression atmosphérique. La **pression absolue** est la pression relative (lue sur le manomètre) + la pression atmosphérique.

Divers systèmes d'unités de pression sont utilisés :

— **Unités liquides** : cm ou mm de mercure (Hg)
1 Atmosphère = 760 mm ou 76 cm de Mercure

On peut utiliser également le mètre ou le centimètre d'eau douce ou d'eau de mer dont les densités sont respectivement 1 et 1,026. Dans ces conditions :

1 Atmosphère = 10,336 m d'eau douce
= 10,07 m d'eau de mer

— **Kg/cm²** : c'est une unité courante mais non légale du système M.Kf.S.

— **Unité légale du Service des Mines** (système M.T.S.), c'est :

Le Pièze (pZ) = 1 Sthène/m²
(Le Sthène = 102 kg poids)

Pratiquement on utilise un sous-multiple qui est :
L'Hectopièze (HpZ) = 1,02 kg/cm², soit sensiblement 1 Atmosphère.

— **Unité météorologique** (système C.G.S.) c'est :

Le Bar = 10⁶ dynes/cm² = 1,02 kg/cm²
= 750 mm de Hg
Le Millibar = 10³ dynes/cm² = 1,02 g/cm²
0,75 de mm de Hg

(La dyne = 1/981 g poids = 100 millionièmes de Sthène = 0,00102 g).

Dans ce système, la pression atmosphérique normale est de 1,013 millibars.

Nous donnons en annexe une table de conversion des mesures anglo-saxonnes en mesures françaises.

D. - VARIATIONS DE PRESSION EN PLONGEE

Elles vont découler des notions acquises précédemment. Nous avons vu que 10,33 m d'eau douce et 10,07 m d'eau de mer correspondent à 1 Atmosphère, en conséquence tous les 10 m de profondeur environ

le plongeur supportera une pression supplémentaire de 1 Atm soit environ 1 kg/cm² venant s'ajouter à la pression atmosphérique.

En gros, nous pouvons dresser un tableau donnant pour quelques profondeurs d'immersion les pressions relatives et absolues : (*)

TABLEAU II.

Profondeur (dans l'eau)	P. relative	P. absolue (kg/cm ²)
0	0	1
5 mètres	0,5	1,5
10 »	1	2
20 »	2	3
30 »	3	4
40 »	4	5
60 »	6	7
70 »	7	8
80 »	8	9
100 »	10	11

On constate immédiatement qu'il suffit de descendre à 10 mètres pour doubler la pression alors qu'il faut s'élever à 5.500 mètres pour la diminuer de moitié. Par ailleurs, de 0 à 10 mètres, la pression absolue double, pour la doubler encore, il faut passer de 10 à 30 mètres, pour la doubler une nouvelle fois il faut passer de 30 à 70 mètres. Les variations de pression sont donc d'autant plus rapides que l'on est plus près de la surface. Cette notion, nous le verrons, est très importante.

E. - ACTION DE LA PRESSION SUR LA MATIERE ET L'ORGANISME

Très schématiquement l'organisme humain est constitué par des solides (les os), des liquides (tissus, sang) et des cavités remplies de gaz (oreilles, sinus, poumons, tube digestif).

— **Les liquides sont incompressibles**, ils se contentent de transmettre intégralement la pression, c'est ce qui explique d'ailleurs qu'une colonne d'eau prise entre 0 et 10 mètres ou entre 70 et 80 mètres correspond toujours à 1 Atm., soit 1 kg/cm². (En fait, ils sont très légèrement compressibles, ce qui intervient en particulier dans le cas des bathyscaphes où l'essence du flotteur varie de volume).

— **Les solides sont également incompressibles**, la pression, si elle s'exerce uniformément sur eux, ne les modifie donc pas. Par contre, si elle s'exerce non uniformément (sur une seule face d'un plan, par exemple), un solide, suivant sa rigidité et son élasticité, peut subir une déformation irréversible ou réversible pouvant aller jusqu'à la rupture ou le bris. (C'est le cas d'un réservoir d'air comprimé qui peut éclater si la pression intérieure est supérieure à celle compatible avec la résistance des matériaux constitutifs).

— **Les gaz sont compressibles** et leur volume varie en fonction de la pression selon la **loi de Mariotte**. Cette loi s'exprime en disant : « Que le produit de la pression par le volume d'un gaz est constant » ou encore : « Que le volume d'un gaz est inversement proportionnel à sa pression », ceci pour une température donnée. La formule suivante exprime cette loi :

$$P \times V = RT = \text{Constante}$$

ou P = pression en kg/cm²

V = volume en litres

R = constante des gaz parfaits

T = température absolue.

(*) Les chiffres sont arrondis et valables pour l'eau de mer et l'eau douce, la correction eau de mer - eau douce étant négligeable (moins de 150 g/cm² pour 50 m. de profondeur).

Le tableau suivant donne le volume d'un ballon de 1 litre à différentes pressions :

TABLEAU III

Profondeur (mer) ou Altitude	Pression (kg/cm ²)	Volume (litres)	P. × V.
5.500 mètres (Alt.)	0,5	2	1
0 (niveau de la mer)	1	1	1
10 mètres	2	0,5	1
30 »	3	0,25	1
70 »	8	0,125	1

F. - CONSEQUENCES DE LA LOI DE MARIOTTE

1° La loi de MARIOTTE s'applique lorsqu'un gaz est isolé du milieu ambiant donc lorsqu'il est dans une cavité close. C'est le cas des gaz de l'intestin, des bulles incluses dans le néoprène mousse des habits isothermiques, de l'air emprisonné entre l'habit et le corps. Au cours de la descente, ces gaz vont donc se comprimer et diminuer le volume total du plongeur, ce qui va modifier sa flottabilité. En effet (fig. 4), en vertu du principe d'ARCHIMEDE, le plongeur subit, comme tout corps plongé dans un liquide, une poussée de bas en haut égale au volume du liquide déplacé. Son poids apparent dans l'eau sera égal à la différence entre son poids dans l'air et le

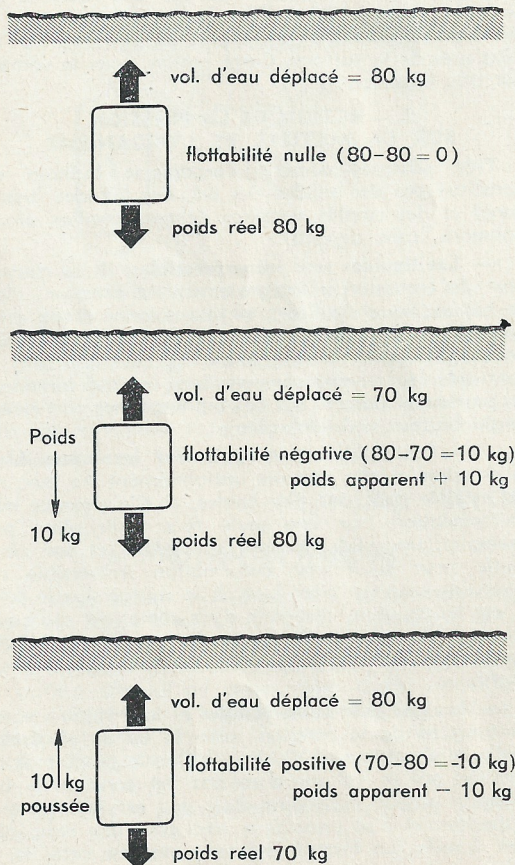


Fig. 4 - PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

poids du volume d'eau déplacé. La pesée du plongeur a pour but d'équilibrer ces deux forces antagonistes (ceinture de lest de plombs) pour une profondeur donnée. Mais cet équilibre instable est détruit par la

variation de profondeur qui entraîne une variation de volume des gaz inclus, le mouvement qui s'ensuit vers le haut (flottabilité positive) ou vers le bas (flottabilité négative) s'accélère de lui-même s'il n'est pas compensé immédiatement par des variations de volume. (Le plongeur autonome peut réaliser ces variations par le jeu de l'inspiration ou de l'expiration.)

Ce problème de la pesée est particulièrement important chez le scaphandrier lourd dont l'habit est totalement étanche et contient un volume d'air important. Si une descente brusque et rapide s'amorce et si elle n'est pas immédiatement compensée, elle entraîne le "squeeze" (écrasement) ou "coup de ventouse", accident typique du scaphandrier lourd. L'habit plaque et le corps est aspiré par le casque rigide qui se comporte comme une ventouse, entraînant des fractures et des hémorragies mortelles. Inversement, si une remontée rapide s'amorce, non compensée par la mise en jeu de la soupape d'évacuation d'air, l'air de l'habit augmente de volume, l'habit se distend et devient rigide, l'homme surgit en surface, les bras en croix, incapable de tout mouvement. C'est la "remontée en ballon" ou "blowing up" des Anglo-Saxons.

Chez le plongeur autonome, ces problèmes sont importants également, bien qu'il ne craigne pas ces deux types d'accident. En effet, un plongeur, correctement pesé pour une immersion de 10 à 20 mètres, sera trop lourd à 40 ou 60 mètres du fait de la compression de son habit et de son intestin.

2° Si le volume gazeux est en communication avec l'extérieur comme c'est le cas des gaz des poumons, les variations de pression vont se traduire par des variations de masse de gaz. Ainsi un plongeur dont les poumons ont une capacité totale de 4,5 litres, aura à 40 m un volume qui sera toujours de 4,5 litres mais à 5 kg/cm² de pression (en raison du principe d'équipression cité plus haut). Ceci correspond à un volume détendu à la pression atmosphérique de $5 \times 4,5 = 22,500$ litres.

Ce fait nous entraîne à envisager la consommation d'air aux différentes immersions et, par là même, l'autonomie du plongeur : supposons un plongeur équipé d'un réservoir de 20 litres de capacité contenant de l'air comprimé à 150 kg/cm². La quantité totale d'air emportée est de $20 \times 150 = 3.000$ litres = 3m³ détendus à la pression atmosphérique. En effort modéré, le plongeur consomme 30 l./mn d'air ; en négligeant la remontée et la descente, nous aurons les autonomies suivantes :

TABLEAU IV

Profondeurs	Pression (kg/cm ²)	Volume/minute détendu à la P.A.	Durée (Minute)
0 m ..	1	30	100
10 m ..	2	60	50
30 m ..	4	120	25
70 m ..	8	240	12,5

Cet exemple est, bien entendu, purement théorique, ces temps devant inclure la descente et la

remontée, les temps de palier. Le débit ventilatoire peut aussi varier (*).

3° Si un volume gazeux, normalement en communication avec l'extérieur (oreille moyenne, sinus, poumons), ne l'est plus pour une raison quelconque, des accidents vont se produire lors des variations de pression. Ces accidents appelés **barotraumatismes** sont dus à des déséquilibres de pression entre les cavités anormalement closes et le milieu ambiant.

Ainsi l'**oreille moyenne** est séparée de l'oreille externe par une membrane souple : le tympan, et elle est en communication avec les voies respiratoires par la trompe d'Eustache, alors que l'oreille externe communique avec le milieu ambiant. Si, au cours de la descente l'air comprimé ne peut pénétrer dans l'oreille moyenne par suite d'une obstruction de la trompe, les deux faces du tympan sont en déséquilibre de pression et, pour une certaine valeur de celui-ci, le tympan cédera, son élasticité n'étant pas illimitée. Il est facile d'éviter cet accident en compensant l'équilibre en soufflant par le nez ou en déglutissant (manœuvre de VALSALVA).

De même les **sinus** sont des cavités osseuses de la face et du crâne normalement en communication avec les voies respiratoires, leur obstruction (par un simple rhume de cerveau) crée également un déséquilibre douloureux beaucoup plus difficile à compenser.

Un des plus graves accidents de la plongée est la **surpression pulmonaire**, qui apparaît lorsque la pression des gaz à l'intérieur des poumons devient supérieure à celle qui s'exerce extérieurement sur la cage thoracique. Ceci peut se produire lors d'une variation de pression excessivement brutale (décompression explosive des aviateurs) ou si la communication n'est pas libre entre les poumons et l'extérieur (spasmes de

la glotte, blocage volontaire de la respiration...). Dans ces conditions l'air des poumons se dilate en suivant la loi de MARIOTTE jusqu'aux limites d'élasticité des alvéoles pulmonaires, celles-ci finissent par se rompre provoquant une entrée d'air dans la circulation, et éventuellement un pneumothorax. Etant donné que les variations de pression et donc le volume sont d'autant plus grandes que l'on est plus près de la surface, c'est surtout dans les dix derniers mètres de la remontée que ces accidents peuvent survenir. Pratiquement, ils sont relativement rares chez les plongeurs, ils peuvent arriver en cas de panne d'air au fond et d'affolement, le sujet retient sa respiration réalisant ainsi les conditions du blocage. Ils sont plus fréquents dans les opérations de remontée libre d'un sous-marin coulé au fond. Leur prévention, c'est de maintenir le libre jeu de la respiration et, en cas de besoin, d'expirer constamment surtout durant les derniers mètres de la remontée.

Deux autres types d'accident sont dus aux effets mécaniques de la pression, ce sont : les **coliques des scaphandriers** et les **accidents de plaquage**. Les premiers sont dus à une distension d'une partie du tube digestif par le volume gazeux emprisonné. Ce type d'accident peut s'observer après la remontée du sujet si celui-ci a avalé de l'air au fond. Le plaquage intervient lorsque l'air d'un vêtement ou à l'intérieur du masque se trouve en dépression par rapport à la pression hydrostatique. Ce dernier cas s'observe fréquemment lorsque à la descente le plongeur ne souffle pas dans son masque par le nez, celui-ci se comporte comme une ventouse provoquant des hémorragies conjonctivales ou nasales.

L'ensemble de tous ces accidents peut facilement être évité lorsque le plongeur connaît ces quelques lois physiques et qu'il s'y conforme.

IV. - PHÉNOMÈNES BIOPHYSIQUES

Au cours de la plongée en scaphandre lourd ou autonome ou en caissons, nous avons vu que le plongeur respirait de l'air sous une pression égale à la pression hydrostatique d'immersion. Son organisme, ses tissus sont constitués par une proportion importante d'eau et de graisse susceptibles de dissoudre les gaz constituant le mélange respiratoire. Normalement l'homme vivant à la surface de la terre est saturé en gaz atmosphériques à la pression où il vit. Le problème qui se pose est de savoir comment les gaz comprimés vont, au cours de la plongée, se comporter vis-à-vis des tissus. Des lois physiques vont encore nous donner l'explication des phénomènes.

A. - LOIS DE LA DISSOLUTION DES GAZ

La solubilité d'un gaz dans un liquide, c'est-à-dire la quantité de gaz dissous par unité de volume d'un liquide est fonction de plusieurs facteurs :

1° **De la nature du gaz et du liquide.** - Autrement dit du coefficient de solubilité du gaz dans le liquide considéré. Le Tableau V, ci-contre, donne la solubilité de quelques gaz dans l'eau (gaz purs à la pression de 760 mm de Hg).

(*) Le débit ventilatoire/minute est égal au produit de l'air ventilé à chaque respiration par la fréquence respiratoire. Dans les conditions de repos la fréquence étant de 16 respirations/minute le débit est $16 \times 0,5$ (air courant) = 8 litres/minute. En hyperpnée avec une fréquence de 20/minute, il atteint $20 \times 3,5$ l. (capacité vitale) = 70 litres/minute. Avec une fréquence plus élevée et si la capacité vitale est un peu plus élevée le débit maximum peut atteindre 120 litres/minute.

(**) Ce qui, ramené à la même pression partielle de 760 mm de Hg donne respectivement : 1,85 ml % d'O₂ et 0,856 ml % de N₂, donc l'ordre des solubilités prévues par le tableau.

TABLEAU V

	ml %	0° C.	20° C.
H ₂ (Hydrogène)		2,1	1,8
O ₂ (Oxygène)		4,9	5,1
N ₂ (Azote)		2,3	1,6
CO (Oxyde de carbone)		3	2,3
CO ₂ (Gaz carbonique)		87,4	17,95

Aux pressions partielles respectives, 100 ml de sang artériel à 37° contient : 0,25 ml d'O₂ (pO₂ 100 mm Hg) et 1,04 ml de N₂ (pN₂ 573 mm de Hg) (ml = millilitre = centimètre cube) (**).

De plus, si l'azote est environ deux fois moins soluble que l'O₂ et cinq fois moins que le CO₂ dans l'eau (sang), il est beaucoup plus soluble dans les graisses (tissus nerveux, moelle osseuse) que l'oxygène : environ cinq à six fois plus.

2° **De la température** - La quantité dissoute diminue avec l'élévation de température, ce que l'on constate dans le Tableau V. Pour la physiologie humaine, ce facteur intervient peu, la température de l'organisme étant constante autour de 37° C.

3° **De la pression** - En effet, la **loi de HENRY** nous apprend que la quantité d'un gaz dissout dans un liquide à une température donnée est directement proportionnelle à la pression que le gaz exerce sur le liquide. Si l'on porte sur un graphique (fig 5 a) la quantité de gaz dissout en fonction de la pression, on obtient une droite de pente α correspondant au coefficient de solubilité.

Ainsi du sang placé sous de l'air à des pressions croissantes dissoudra de plus en plus d'oxygène et d'azote. **A l'équilibre**, si nous avons 1,04 ml % de N² à la pression atmosphérique, nous en aurons 2,08 % à 2 kg/cm², 3,12 ml % à 3 kg/cm², etc.

4° **Du temps** - En effet la dissolution n'est pas un phénomène instantané (pas plus que celle d'un morceau de sucre dans le café) ; elle s'effectue en suivant une courbe exponentielle qui tend vers un équilibre : la saturation. Cette courbe (fig. 5 b) est caractérisée par sa période (T), c'est-à-dire le temps nécessaire pour atteindre la demi-saturation. Ce phénomène est réversible et si on diminue ou on annule la pression du gaz sur le liquide, le gaz dissout se dégage en suivant une courbe strictement identique mais inversée. Si la variation de pression au-dessus du liquide est plus rapide que le rythme du dégagement, le liquide va être sursaturé en gaz par rapport à la pression extérieure. Pour un certain niveau critique de sursaturation, celle-ci étant exprimée par le rapport : pression du gaz dissous/pression ambiante, les gaz vont se dégager violemment en formant des bulles. (Ce que l'on observe lorsque l'on débouche, c'est-à-dire lorsque l'on met en contact brusquement avec la pression atmosphérique, le contenu d'une bouteille de champagne ou d'eau gazeuse.

5° Lorsque nous avons affaire, et c'est le cas de l'air, à un mélange gazeux, la dissolution de chacun d'eux est fonction de la pression mais aussi de leurs concentrations respectives. Ceci conduit à envisager la notion de **pression partielle d'un gaz**. Cette pres-

sion partielle (Pp) d'un gaz dans un mélange est donnée par la **loi de DALTON** : « La Pp d'un gaz dans un mélange est celle qu'il aurait s'il occupait seul le volume total du mélange et elle est égale à la pression totale du mélange multipliée par le pourcentage du gaz dans le mélange ». Donc :

$$\text{Pression partielle} = \text{Pression absolue} \times \text{Concentration.}$$

Ainsi, pour l'air sec à la pression atmosphérique, nous aurons :

$$\begin{aligned} Pp \text{ Oxygène} &= 1 \text{ kg/cm}^2 \times 21 \% \\ &= 0,21 \text{ kg/cm}^2 = 160 \text{ mm de Hg} \\ Pp \text{ Azote} &= 1 \text{ kg/cm}^2 \times 21 \% \\ &= 0,79 \text{ kg/cm}^2 = 600 \text{ mm de Hg} \end{aligned}$$

Cette notion est très importante du point de vue biophysique, mais également du point de vue biochimique que nous verrons plus loin. En effet, la plongée peut être pratiquée avec d'autres mélanges que de l'air et alors la notion de pression partielle prend une grande importance pour le calcul et l'utilisation de ces mélanges.

C'est ainsi que la pression partielle d'azote sera la même dans de l'air normal respiré à 20 mètres de profondeur et dans un mélange à 50 % d'oxygène et 50 % d'azote, respiré à 38 mètres de profondeur :

$$\begin{aligned} \text{Air à 20 mètres :} \\ Pp \text{ N}^2 &= 3 \text{ kg/cm}^2 \times 79 \% = 2,37 \text{ kg/cm}^2. \\ \text{Mélange O}^2 - \text{N}^2 \text{ à 50 \% à 38 m :} \\ Pp \text{ N}^2 &= 4,8 \text{ kg/cm}^2 \times 50 \% = 3,4 \text{ kg/cm}^2 (*). \end{aligned}$$

B . - RAPPEL DE PHYSIOLOGIE DE LA RESPIRATION

Pour comprendre utilement le comportement des gaz respiratoires, il n'est pas inutile d'ouvrir une parenthèse concernant le transport et l'utilisation des gaz respiratoires. Le Tableau VI suivant donne les valeurs moyennes des pressions partielles et des quantités de gaz dissous ou combinés, dans l'air, le sang et les tissus.

(*) On note également usuellement les pressions partielles par les symboles pN², pO², pCO², etc.

L'Exploration Sous-Marine

3, Rue Louis-Astouin
(2^e rue à gauche en descendant
le Boulevard des Dames)
à MARSEILLE (2^e)

300 mètres d'atelier

Un personnel spécialisé dans la réparation de tout le matériel sous-marin

Epreuve de bouteilles - Gonflage compresseurs toutes marques - Révision détendeurs - Filtres Rampes - Bouteilles Tampons - Bi et Tri acier occasion revisés - Robinetterie neuve - Bi de 350 à 450 - Tri 600, etc.

Vente et réparation de tout le matériel de chasse et de plongée
aux meilleurs prix

TABLEAU VI
Pression partielle des Gaz en mm de Hg

	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Totale
Air inspiré	158	0,3	596	5,7	760
Air expiré	116	32	565	47 (**)	760
Air alvéolaire	100	40	573	47	760
Sang artériel	100	40	573	47	760
Sang veineux	40	46	573	47	706 (*)
Tissus	30	50	573	47	700 (*)
	ou moins	ou plus			
Concentration en % dans les mélanges (air) ou ml % (sang)					
Air inspiré	20,79	0,04	78,42	0,75	—
Air expiré	15,26	4,21	74,34	6,18	—
Air alvéolaire	13,16	5,26	75,40	6,18	—
	20	50	1,04		Total
Sang artériel	0,25	2,69	1,04		Dissout physiquement
	19,75	47,31	0		Corbiné
Sang veineux	16	60	1,04		Total

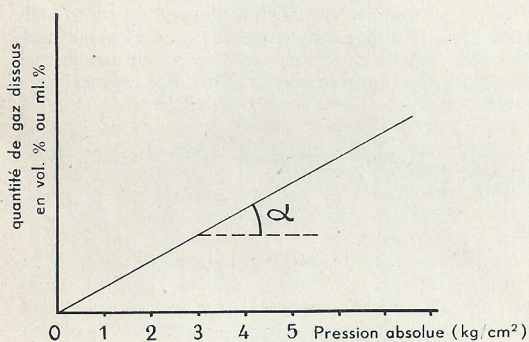


Fig. 5 a. - DISSOLUTION PHYSIQUE DES GAZ
(Loi d'Henry)

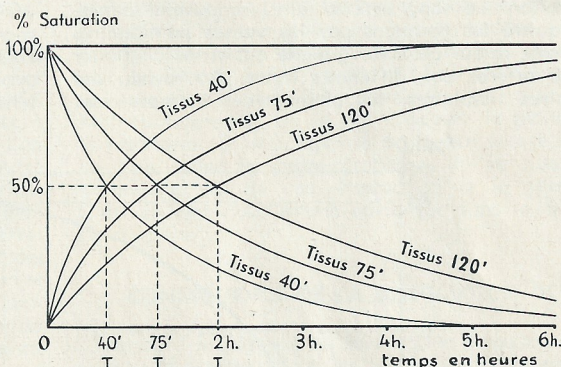


Fig. 5 b. DISSOLUTION DES GAZ EN FONCTION DE TEMPS
(saturation et désaturation)

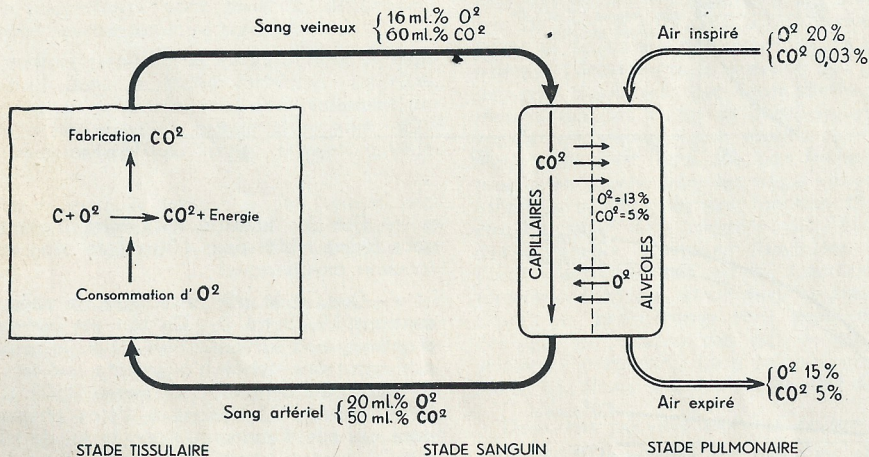


Fig. 6 - SCHEMA DU TRANSPORT DES GAZ RESPIRATOIRES

La respiration a pour objet de fournir à l'organisme l'oxygène qui est nécessaire à la combustion du matériel énergétique (fourni par l'alimentation ou ses propres tissus) et à l'évacuation du gaz carbonique produit par ces combustions. L'énergie libérée par ces oxydations est utilisée par l'organisme pour la vie

des cellules, le travail musculaire, la lutte contre le froid, etc.

La comparaison des pressions partielles et de concentration en O₂ et en CO₂ de l'air inspiré et expiré montre qu'environ 5 ml d'O₂ sont consommés et 4 ml de CO₂ rejetés pour 100 ml d'air ventilé (**).

(*) La différence avec 760 mm Hg est due aux vitesses de diffusion et de libération des combinaisons chimiques.

(**) p_{H₂O} ou tension de vapeur d'eau à la t° de 37° C.

(***) La différence de composition entre l'air inspiré et l'air alvéolaire s'explique par la saturation en vapeur d'eau des alvéoles pulmonaires d'une part et par l'existence d'un espace mort (air résiduel) d'autre part.

L'air alvéolaire partiellement renouvelé à l'inspiration est en équilibre avec le sang par l'intermédiaire d'un réseau de capillaires sanguins alvéolaires de très grande surface (100 à 150 m²). La totalité du sang de l'organisme (environ 7 l) met un peu moins d'une minute pour traverser ce réseau. La succession des phénomènes respiratoires est schématisée fig. 6. Le sang veineux amené par les artères pulmonaires, appauvri en O² et enrichi en CO², arrive au niveau des poumons. C'est la différence de pression partielle des gaz entre l'air alvéolaire et le sang qui va conditionner les échanges gazeux qui s'effectuent par un simple phénomène de diffusion à travers le mince épithélium des alvéoles. pO² alvéolaire étant plus grande (100 mm Hg) que pO² veineuses (40 mm Hg), l'oxygène passe des alvéoles dans le sang. Par contre, pCO² veineuse (46 mm Hg) étant plus grande que pCO² alvéolaire (40 mm Hg), le CO² passe du sang vers les alvéoles d'où il sera rejeté à l'expiration. Le sang artériel ainsi renouvelé (hématosé) quitte les poumons par les veines pulmonaires pour faire retour au cœur gauche qui va le distribuer par les artères aux différents tissus. Au niveau des capillaires tissulaires, les phénomènes inverses vont

HENRY. Ceci est dû au fait que celle-ci ne s'applique qu'à la dissolution physique du gaz. Or, si une certaine quantité, faible d'ailleurs, d'O² et CO² est dissoute à l'état physique, la plus grande partie est sous forme de **combinaisons chimiques** qui ne suivent plus cette loi, mais sont tout de même sous la dépendance de la pression partielle des gaz.

1° **L'oxygène entre en combinaison avec l'hémoglobine** (Hb) contenue dans les hématies (globules rouges) pour donner de l'oxyhémoglobine (HbO²). Cette combinaison, qui correspond à l'équilibre : $Hb + O_2 \rightleftharpoons HbO_2$, suit en fonction des pressions partielles d'oxygène une loi complexe représentée par la figure 7 a. Cette courbe sigmoïde montre que pour pO² = 0, toute l'hémoglobine est sous forme réduite (Hb) et que plus la pression partielle augmente plus il y a d'oxyhémoglobine, donc d'oxygène fixé; toutefois, pour les pressions partielles élevées (voisines de celle de l'air alvéolaire : pO² = 100 mm Hg) la courbe s'aplatit et une augmentation ultérieure de pO² n'assure qu'une faible fixation d'O² (*). L'examen de cette courbe où nous avons noté pour quelques points remarquables la teneur d'oxygène en ml pour 100 ml de sang montre :

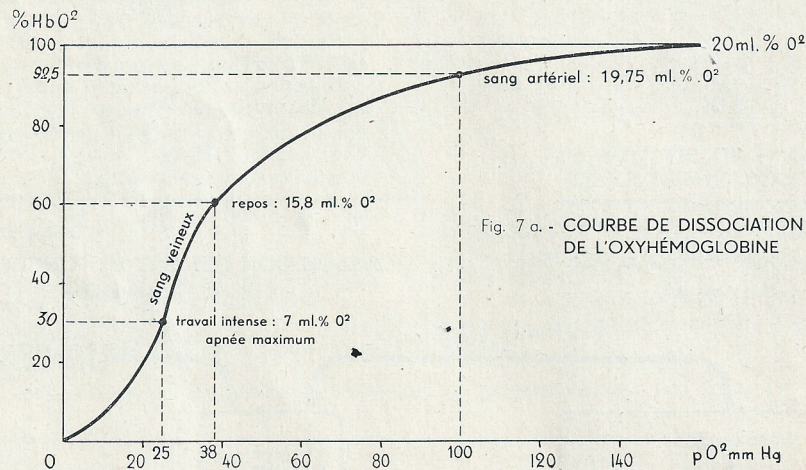


Fig. 7 a. - COURBE DE DISSOCIATION DE L'OXYHÉMOGLOBINE

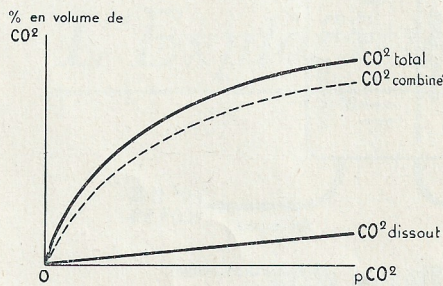


Fig. 7 b. - COURBES DE DISSOCIATION DU CO²

avoir lieu ; O² diffusera dans le sens : sang → tissus, et CO² dans le sens : tissus → sang. Le sang veineux fait retour au cœur droit par les veines et le cycle recommence.

L'examen du Tableau VI et de la figure 6 montre que le sang contient beaucoup plus d'oxygène et de gaz carbonique que ne le laisse prévoir la loi de

— Que la quantité maximum d'oxygène fixable sous forme HbH² pour 100 ml de sang est de 20 ml (pouvoir oxyphorique) ;

— Que, à la pO² alvéolaire, le sang artériel en contient 19,75 ml %. Ce fait est intéressant car il montre que la surventilation (*) ou la respiration d'O² pur avant une apnée n'augmente que très faiblement la quantité d'O² fixée sous forme HbO². C'est surtout la quantité d'O² dissout à l'état physique qui est dans ces cas augmentée selon la loi de HENRY. Seul cet O² dissout est utilisable pour les oxydations cellulaires, l'excès en est donc rapidement utilisé, la dissociation de HbO² n'agissant que pour maintenir une tension d'oxygène dissout compatible avec les échanges cellulaires. Si donc la pO² augmente fortement dans l'air inspiré du fait de la respiration d'air comprimé ou d'oxygène pur (dans les limites de l'hyperoxie) et par suite la quantité d'O² dissout, l'utilisation rapide de cet oxygène dissout fait qu'il ne jouera aucun rôle direct dans les phénomènes de décompression.

(*) C'est ainsi qu'une hyperventilation permettant d'obtenir une pO² alvéolaire de 120 mm Hg soit 17 % O² au lieu de la normale 100 mm Hg et 13 à 14 % O² n'augmente le % d'HbO² que de 1 à 2 % et cela beaucoup plus du fait de la diminution de pCO² qui favorise la fixation d'O² sous forme HbO² (effet BOHR).

— Que, dans les conditions de repos ou de travail modéré, l'organisme n'utilise qu'une faible partie de l'O² dont il dispose (4 ml %), cette quantité augmente avec l'effort ou dans une apnée par exemple. 8 ml % d'O² supplémentaire pouvant être utilisés. Le reste est inutilisable. En effet l'HbO², nous l'avons dit, est contenue dans les hématies et ne peut en sortir. L'oxygène est, lui, livré aux tissus et aux cellules sous forme dissoute et la dissociation de l'oxyhémoglobine assure la constance de cette quantité dissoute, utilisable. Lorsque la pO² est trop faible, l'oxygène ne peut être utilisé, c'est le cas lorsque le pourcentage d'HbO² tombe au-dessous de 30 %.

2° **Le gaz carbonique est en majeure partie transporté sous forme de combinaisons** : Bicarbonate de sodium (70 %) et composés carbaminés (carbémoglobine 20 %) (*) suivant une loi analogue à celle de l'oxygène. La courbe exprimant la fixation du CO² sanguin en fonction des pressions partielles est une hyperbole équilatère (fig. 7 b).

L'examen du Tableau VI montre que le sang contient une quantité importante de CO² sous forme de bicarbonate (CO³HNa), puisque le sang artériel après passage dans les poumons en contient environ : 50 ml %. Cette quantité fixe constitue ce que l'on appelle la Réserve Alcaline de l'Organisme. Outre son importance dans la régulation de l'équilibre acido-basique de l'organisme, ce taux fixe de CO² conditionne la permanence du rythme respiratoire. En effet le CO² est l'excitant normal et le plus important des centres respiratoires bulbaires : l'élévation de son taux dans le sang artériel accélère la respiration (et lorsque ce taux est anormalement élevé, il est la cause de l'essoufflement), l'abaissement de ce taux ralentit la respiration ou même l'arrête (**).

Cette action du CO² nous conduit à rappeler un élément important de physiologie respiratoire. Les mouvements respiratoires sont sous la dépendance d'un ensemble neuromusculaire comportant :

— Des centres respiratoires (inspiratoires et expiratoires) situés dans le bulbe rachidien, sollicités, c'est-à-dire excités en permanence et directement par des influences nerveuses et surtout chimiques (pCO² et accessoirement pO² du sang artériel qui les irrigue).

— Des nerfs moteurs partant de ces centres, provoquant la contraction des muscles respiratoires et expiratoires (par exemple muscles intercostaux et diaphragme).

— Des nerfs sensibles sollicitant indirectement les centres dont les plus importants sont constitués par les nerfs sensitifs crâniens permettant la parole, le chant, etc., les nerfs venant des chémorécepteurs situés dans le sinus carotidien et l'artère aorte et qui sont sensibles aux variations de pO² (et accessoirement aux variations de pCO²), et des fibres nerveuses du nerf vague provenant de récepteurs pulmonaires sensibles au degré d'inflation et de déflation des alvéoles pulmonaires (l'inflation donc l'inspiration excitant les centres expiratoires et donc entraînant par voie réflexe l'expiration : réflexe d'Héring-Breuer) (***) .

Si l'alternance rythmique des mouvements inspiratoires et expiratoires est sous la dépendance des nerfs sensibles des poumons, le fonctionnement constant des centres respiratoires est surtout sollicité par la pCO² (directement) et la pO² (réflexe des chémorécepteurs). Le second facteur est surtout important en anoxie (diminution du taux d'O² dans l'air inspiré) et le facteur normalement dominant est le premier, c'est-à-dire la pCO². On a pu dire : « que le gaz carbonique était une véritable hormone respiratoire réglant son propre taux physiologique » : toute élévation dans le sang artériel entraînant une hyperventilation (éliminant le CO² en excès) et toute diminution une hypoventilation (donc retenant le CO²).

3° Pour fermer cette longue parenthèse, il nous reste à considérer le cas du gaz inerte : l'azote (ou dans les mélanges artificiels utilisés en plongée : l'hélium, l'hydrogène par exemple), diluant l'oxygène atmosphérique (ou du mélange). Comme le montre le tableau VI, son taux est constant dans le sang artériel et le sang veineux, ce qui montre qu'il n'est pas consommé par l'organisme. Son transport obéit uniquement à des lois physiques de dissolution. Malheureusement, en ce qui concerne la plongée ou la respiration d'air comprimé, sa teneur élevée (79 % de l'air) pose le grave problème de sa dissolution progressive et de son évacuation à la remontée. C'est ce que nous allons envisager dans la suite de ce chapitre.

C. - CONSEQUENCE DE LA DISSOLUTION DES GAZ

Pendant la plongée ou la vie sous pression les gaz vont se dissoudre (selon les lois vues précédemment : pression et temps) dans le sang qui se sature rapidement grâce à l'énorme surface de contact que représentent les fins capillaires des alvéoles pulmonaires. Le sang artériel ainsi saturé arrive aux différents tissus et leur livre des quantités de gaz proportionnelles à l'écart entre la pression des gaz sanguins et des gaz tissulaires. Cet écart diminue au fur et à mesure que les tissus se chargent et la dissolution rapide au début, tend ensuite lentement vers la saturation. Des tissus les gaz viennent diffuser de proche en proche vers les tissus voisins. Cette dissolution sera naturellement fonction de la vitesse de circulation et de l'irrigation plus ou moins grande des différents territoires tissulaires. Elle tend vers l'état d'équilibre qui est la saturation. Lors de la remontée donc au retour vers la pression atmosphérique, ces phénomènes vont jouer en sens inverse dès que la pression des gaz intrapulmonaires sera inférieure à celle du sang veineux arrivant aux poumons. Les tissus seront alors en état de sursaturation.

Deux cas peuvent alors se présenter :

— Si la remontée est lente ou plus précisément s'effectue dans les conditions prévues par les tables de plongées, les gaz dissous vont se libérer au niveau des poumons et ceux des tissus diffuseront dans le sang, jusqu'à atteindre leur taux normal de saturation à la pression atmosphérique.

(*) Qu'il ne faut pas confondre avec la Carboxyhémoglobine résultant de la fixation de l'oxyde de carbone sur l'hémoglobine. Les pourcentages indiqués représentent la contribution des diverses formes dans la quantité de CO² expiré : 10 % restant correspondent au CO² dissout physiquement.

(**) Dans l'hyperventilation, ce facteur est un des plus importants pour la prolongation d'une année. Dans l'hyperventilation avec respiration d'un mélange suroxygéné s'y ajoute le fait que l'augmentation de pO² favorise l'élimination du CO² (effet Haldane réciproque de l'effet BOHR déjà cité).

(***) L'annonce original du réflexe d'Héring-Breuer (1868) disait que : « l'inspiration appelle l'expiration et vice versa ». En fait si dans l'hyperpnée ceci est exact, les phénomènes sont plus complexes et ceci ne s'applique pas dans l'eupnée.

— Si la remontée est trop rapide, l'état instable de sursaturation, défini plus haut, atteint sa valeur critique et les gaz se dégageront dans les tissus eux-mêmes sous forme de bulles pouvant être entraînées dans la circulation et créer des obstacles empêchant des échanges vitaux.

Ces bulles sont responsables des « accidents de décompression » connus sous diverses dénominations : « Mal des caissons », « Aéroembolisme », « Coup de pression », « Maladies des scaphandriers ».

Suivant la localisation et l'importance des bulles les accidents seront plus ou moins graves et se manifesteront de diverses manières :

Accidents cutanés (puces, moutons), ostéomusculaires (bends), nerveux (paralysie, paraplégies, etc.). Ces problèmes seront traités en détail par ailleurs.

La prévention de ces accidents repose sur le respect des **tables de décompression** donnant pour chaque profondeur d'immersion et durée de séjour : les vitesses de remontée, les durées des paliers près de la surface et les coefficients de plongées successives. Le but des paliers de décompression est de maintenir le coefficient de sursaturation au-dessous de sa valeur critique par une élimination progressive des gaz dissous durant la descente et le séjour au fond. Leur traitement s'effectue par **recompression** en caissons et décompression lente après soulagement des douleurs ou disparition des troubles.

D. - PRINCIPES DU CALCUL D'UNE TABLE DE PLONGÉE (*)

Les bases théoriques de ce calcul sont les notions de physique et de physiologie indiquées au cours de ce chapitre. Nous n'avons toutefois considéré dans le cycle respiratoire que trois éléments : air alvéolaire, sang, tissus. En ce qui concerne les tissus il y a lieu de préciser que dans le cas du calcul d'une table il faut considérer l'organisme comme divisé en **divers tissus**, différenciant par leur composition chimique et par leur vascularisation (irrigation sanguine plus ou moins abondante et rapide). On peut les caractériser anatomiquement (tissus sanguins, musculaires, nerveux, adipeux, osseux) et en fonction de leur vitesse de saturation en gaz par leur période T définie plus haut

C'est ainsi que l'on peut définir des tissus se saturant très rapidement comme le sang (période de 3 à 4 minutes), des tissus lents comme la moelle épinière et les tissus adipeux (période supérieure à 120 minutes) et des tissus intermédiaires.

Pour des raisons de simplification on choisit par exemple (table française du G.E.R.S.) trois tissus de période T = 40', 75' et 120', en adoptant pour chacun un coefficient de sécurité (correspondant à un coefficient de sursaturation admissible c'est-à-dire inférieur à la valeur critique) qui est par exemple respectivement de 2,3 pour le tissu 40' et de 2 pour les tissus 75' et 120'. Connaissant la durée du séjour

au fond (la durée de la descente étant incluse dans ce temps) des courbes du type de la fig. 5 b ou leurs abaques linéaires correspondantes permettent de déterminer le pourcentage de variation de tension (ou pression) des gaz dans les divers tissus. En multipliant cette valeur par la différence de pression positive ou négative (**), on obtient la valeur absolue de cette variation, et en y ajoutant la pression initiale (***) , on obtient la pression finale des gaz dissous pour le temps et la profondeur donnée.

Cette valeur divisée par le coefficient de sécurité donnera pour chaque tissu la profondeur du premier palier. On choisira naturellement la profondeur la plus grande (en général imposée par le tissu le plus rapide). La durée de séjour à ce palier sera conditionnée par la tension de gaz admissible à atteindre pour permettre la remontée au palier suivant (ou à la surface s'il n'y a qu'un seul palier à 3 mètres). Cette tension est égale au produit : pression hydrostatique du palier suivant x coefficient de sécurité et la durée sera celle nécessaire pour que la tension finale définie plus haut tombe à cette valeur (****).

Le but des paliers ainsi calculés est de maintenir la tension des gaz dissous au-dessous de la valeur critique et non d'assurer une désaturation complète de l'organisme. Celle-ci est en effet, surtout vers la fin, en raison de la forme exponentielle du phénomène, très lente. Si bien que durant plusieurs heures après la remontée, l'organisme contient une quantité de gaz dissous supérieure à la normale et cela surtout dans les tissus de période longue, dont la désaturation comme la saturation est la plus lente. Ces tables tiennent compte de cela et le coefficient C de plongée successive indique précisément la tension de gaz dissous dans le tissu le plus lent choisi, au moment de la sortie de l'eau. Ce coefficient impose une majoration à ajouter à la durée réelle d'une plongée ultérieure pour rentrer dans la table. Cette majoration diminue lorsque augmente l'intervalle entre les plongées et s'annule lorsque cet intervalle dépasse 6 heures (on admet alors que la désaturation est pratiquement totale pour tous les tissus).

Enfin, il faut insister sur le fait qu'une table est calculée en fonction d'une vitesse de remontée donnée (20 mètres/minute pour la table du G.E.R.S.), le temps de remontée est alors négligé dans les calculs. Si la remontée s'effectue à une vitesse plus lente (comme celle de 7,50 m des anciennes tables calculées pour des scaphandriers lourds) les tissus lents dont la tension finale est plus faible continuent à se charger entre le fond et la profondeur du palier.

Un cas particulier est posé pour la plongée en altitude, la pression atmosphérique y étant inférieure à celle du niveau de la mer et par suite pour une même profondeur la différence de pression entre la surface et le fond sera plus grande en altitude. Cette différence intervenant dans le calcul des tables vu précédemment, il importe donc de calculer une pro-

(*) Pour plus de détails nous renvoyons à la conférence « Calcul d'une Table de Plongée » prononcée le 2 juin 1962 à la F.F.E.S.S.M. par M. le Pharmacien-Chimiste en Chef du G.E.R.S. de la Marine Nationale PERRIMOND-TROUCHET et parue dans « Touring Plein Air », n° 176-177 (déc. 1962 et janvier 1963) et à qui nous empruntons les données que nous donnons ici.

(**) Les lois de saturation à la descente ou de désaturation à la remontée sont admises comme étant symétriques mais de signe opposé.

(***) Supposée pour tous les tissus, au départ, en équilibre avec la pression atmosphérique, soit 1 kg/cm².

(****) Elle sera donnée par la courbe ou l'abaque linéaire. On calcule le % de variation :

Tension finale - Tension admissible en fin de palier.

Tension finale - Pression hydrostatique du palier.

et on lit le temps correspondant pour le tissu considéré.

S'il y a plusieurs paliers on refait les mêmes opérations.

fondeur et une pression fictive en mer correspondantes. La formule calculée par le G.E.R.S. donne cette profondeur P :

$$P = p \frac{H}{h}$$

p étant la profondeur réelle atteinte en lac et H et h les pressions atmosphériques respectivement au niveau de la mer et au niveau du lac de montagne, exprimées en mètres d'eau ou en mm de Hg (10 m = 760 mm Hg).

Ainsi à 2.000 mètres une plongée à 40 mètres correspondra à :

$$P = 40 \times \frac{595}{760} = 50 \text{ mètres.}$$

C'est donc avec cette profondeur de 50 mètres qu'il faudra entrer dans la table et le palier correspondant à 3 mètres en mer devra se faire à :

$$3 = p \times \frac{595}{760}$$

$$\text{d'où } p = 3 \times \frac{760}{595} = 2,34 \text{ m.}$$

E. - EN GUISE DE CONCLUSION A CE CHAPITRE, il convient d'ouvrir une dernière parenthèse.

Les tables de plongées ne peuvent avoir une valeur absolue. Leur calcul repose sur des données où un certain empirisme règne encore, leur expérimentation n'est que statistique et par suite leur application vaut pour la moyenne des individus d'un type moyen et d'état physiologique normal (ou peut-être plus simplement courant), et pour une plongée standard. La dispersion des individus, c'est-à-dire l'écart à cette moyenne explique parfaitement que certains ayant

respecté une table peuvent malgré cela avoir un accident et que d'autres ne les ayant pas respectées s'en tirent indemnes. Juger sur ces cas extrêmes n'est pas logique, c'est sur l'ensemble d'une population que doit porter ce jugement.

Lorsqu'un individu ne rentre plus dans le cadre moyen, sommairement défini plus haut (corpulence particulière, travaux sous-marins dans des conditions particulières de t°, effort, etc.), il est bien évident que les précautions doivent être renforcées, les coefficients de sécurité augmentés et le choix d'une table de décompression plus sévère envisagé. De même, si l'on plonge loin de toute possibilité de traitement, il y a intérêt à se placer dans les conditions les plus favorables et donc choisir la table couvrant la sécurité la plus grande.

Cela est comparable à l'automobiliste qui roule à 100 km/heure sur une bonne route, s'il repasse en hiver sur cette même route, aujourd'hui verglacée, la sécurité lui imposera de rouler à une allure beaucoup plus lente, bien que les possibilités de sa machine n'aient pas changé.

Ce choix des tables est possible, l'ouvrage du G.E.R.S. « La Plongée », donne la table française jusqu'à 40 mètres, la table américaine, la table anglaise et une table italienne. Point n'est besoin de se quereller, le choix est libre et facile. Si de la discussion jaillit la lumière, par contre querelles et polémiques sont stériles et au contraire vont à l'encontre du but recherché en semant le trouble et la confusion chez ceux dont les connaissances ne leur permettent pas de se faire une opinion personnelle. Le but est d'appliquer une table en sachant les raisons qui commandent son utilisation et les bases qui ont servi à son établissement, le rôle du moniteur est d'assurer l'enseignement nécessaire pour atteindre ce résultat.

V. - PHÉNOMÈNES BIOCHIMIQUES

L'action physiologique d'un mélange respiratoire dépend de la nature de ses constituants, de leur concentration et de la pression sous laquelle il est respiré. Autrement dit, cette action dépend de la pression partielle des constituants du mélange telle que nous l'a définie la loi de Dalton.

L'air normal que nous respirons contient :

- 79 % d'azote (N²),
- 21 % d'oxygène (O²),
- 0,3 % de gaz carbonique (CO²), taux qui peut augmenter jusqu'à 1 ou 2 % en atmosphère confinée, en ville industrielle, etc.

En outre, l'air contient des traces de gaz rares et peut contenir accidentellement des gaz toxiques tels que : l'oxyde de carbone, vapeurs d'huile et d'hydrocarbure, etc.

a) **L'oxygène**, gaz vital pour l'homme, existe sous une pression partielle de 0,21 kg/cm² ; cette valeur peut tomber à 0,17 kg/cm² (17 %) sans danger. Au-dessous, des troubles apparaissent avec syncopes anoxiques, brutales si le taux tombe au-dessous de 12 % (0,12 kg/cm²).

Respiré sous une pression partielle plus élevée que la normale, il est bien toléré jusqu'à une pression partielle de 1,7 kg/cm² lorsqu'il est pur et 2,3 kg/cm² lorsqu'il est respiré en mélange. Au-delà des accidents convulsifs avec perte de connaissance sont susceptibles d'apparaître.

L'utilisation de l'oxygène pour la plongée est donc limitée à une profondeur de 7 mètres lorsqu'il s'agit d'oxygène pur (1,7 kg/cm² de Pp O²). Au-delà, des crises convulsives entraînant la noyade apparaîtront au bout d'un temps plus ou moins long. Ici, le caractère mathématique n'est pas évident car la crise dépend d'une quantité de facteurs individuels, de la durée de séjour et de l'effort en plongée. Néanmoins la réalité statistique du phénomène interdit l'utilisation du scaphandre à oxygène pur au-delà de ces limites. Il faut insister sur ce point car un public nombreux est persuadé que la plongée à 40 m courante s'effectue avec des « bonbonnes d'oxygène » (sic). Si tel était le cas, il n'y aurait pas beaucoup de rescapés pour raconter leurs souvenirs.

Ces accidents avec l'air ne peuvent apparaître que pour une Pp O² plus grande que 2,3 kg/cm² soit une profondeur dépassant 100 m (11 kg/cm² de pression absolue) et sont soumis à la même variabilité individuelle, ce qui explique que des plongées de faible durée à l'air aient pu être réalisées de 100 à 130 mètres.

b) **L'azote**, gaz inerte, est considéré comme un simple diluant de l'oxygène. Par contre, lorsque sa pression partielle atteint une certaine valeur, il se révèle toxique par un mécanisme encore obscur et controversé. En plongée à l'air, des troubles apparaissent à partir de profondeurs variables avec les individus : 50 à 70 mètres.

Ces troubles décrits par les Anglo-Saxons sous le nom « nitrogen narcosis » sont appelés en France : « ivresse des grandes profondeurs ». Ce sont essentiellement des perturbations du comportement et du jugement, qui, du fait qu'elles surviennent en grande profondeur, peuvent entraîner la mort par noyade. Ces phénomènes conduisent à limiter à 90 m la plongée en scaphandre à air. Avec des mélanges oxygène-hélium ou oxygène-hydrogène, cette limite peut être reculée.

Diverses hypothèses concernant l'ivresse des profondeurs ont été envisagées sans support expérimental bien définitif. En particulier, à côté de l'hypothèse classique, rattachant l'ivresse à une action propre de l'azote dissous dans les graisses du tissu nerveux, un autre envisage l'accumulation de CO_2 dans l'organisme du fait de l'augmentation de densité du mélange respiratoire sous pression. Ceci perturberait la dynamique pulmonaire entraînant une rétention de CO_2 . Rien ne permet actuellement de départager les diverses hypothèses, qui toutes doivent avoir un fond de vérité.

c) **Le gaz carbonique** est un gaz toxique à partir de 3 ou 4 % (accélération de la respiration) ; au-delà, il entraîne de violents maux de tête et, à partir de 9 % dans l'air respiré, il est mortel par arrêt respiratoire.

L'air normal en contient très peu et des concentrations de 2 %, qui peuvent être respirées longuement et sans danger à la pression atmosphérique, deviennent dangereuses et mêmes mortelles en plongée.

Supposons un récipient chargé avec un air contenant 2 % de CO_2 (air prélevé dans une enceinte

confinée, au voisinage d'une cheminée, etc). Le $\text{Pp CO}_2 = 1 \times 2 \% = 0,02 \text{ kg/cm}^2$. Cet air respiré à 20 mètres de profondeur donnera de violents maux de tête et pourra provoquer une accélération respiratoire pouvant aboutir à l'essoufflement. En effet, le Pp CO_2 est alors de $3 \times 2 \% = 0,06 \text{ kg/cm}^2$ ce qui correspond à un air à la pression atmosphérique contenant 6 % de CO_2 . Respiré à 35 mètres, il sera mortel : $\text{Pp CO}_2 = 4,5 \times 2 \% = 0,09 \text{ kg/cm}^2$ ce qui correspond à un air atmosphérique à 9 % de CO_2 .

Un cas particulier de l'intoxication au gaz carbonique est **l'essoufflement**. Les combustions cellulaires de notre organisme produisent du gaz carbonique qui est normalement rejeté par la respiration. Cette production augmente en fonction de l'activité musculaire. En plongée, les appareils aussi perfectionnés soient-ils, nécessitant la respiration dans un embout buccal, apportent une gêne respiratoire qui peut être aggravée par l'effort. L'accumulation de CO_2 dans l'organisme augmente alors la fréquence respiratoire, ce qui, combiné avec la gêne respiratoire, entraîne l'essoufflement et ses conséquences d'autant plus dramatiques qu'elles se passent sous l'eau. Le remède en cas de début d'essoufflement est d'arrêter toute activité jusqu'à reprise d'un rythme respiratoire normal.

d) **Des gaz divers.** Des gaz comme l'oxyde de carbone, des hydrocarbures gazeux peuvent souiller l'air comprimé utilisé pour la plongée. Leur toxicité est trop connue à la pression atmosphérique pour qu'on y insiste. Toutefois, les traces ou des taux parfaitement tolérés en surface peuvent rapidement devenir toxiques en plongée du fait de l'augmentation de pression partielle de ces gaz.

VI. - CONCLUSION

De ce rapide tableau, l'on peut conclure que l'application des lois physiques de la pression et de la dissolution des gaz représentent l'essentiel de physiologie du plongeur. Si l'homme vivant sa petite vie tranquille à la surface de la terre peut ignorer comment il vit, comment il respire, le plongeur doit être informé au moins des perturbations que la vie sous pression va entraîner dans le fonctionnement de son organisme. Cette connaissance lui permettra de respecter ces lois impératives. S'il les ignore ou s'il

les transgresse, il paiera un jour, et quelquefois lourdement, son ignorance ou sa négligence.

* Si le rôle du moniteur de plongée est d'assurer la diffusion des connaissances, en collaboration avec les médecins de la plongée, il leur faut pour cela connaître eux-mêmes parfaitement et de façon relativement approfondie ces questions. Ceci leur permettra en outre de considérer avec un esprit critique averti les progrès réels ou supposés en matière de plongée et de participer plus efficacement et plus intelligemment au perfectionnement en cette matière.

SERVICE TECHNIQUE



VENTE - ENTRETIEN - RÉPARATION

VENDOME

Spécialiste de la montre de plongée

129, Rue Paradis - MARSEILLE (6^e) - Téléph. 37-67-71

ANNEXE

Nous donnons à titre indicatif une table de conversion des principales mesures anglaises et américaines en mesures françaises, ce qui peut être utile pour les Ecoles de Plongée recevant des Anglo-Saxons :

Pour convertir :

in (inch) pouce
 ft (foot) pied
 Yd (yard)
 Cu. ft. (pied cubique)
 Cu in (pouce cubique)
 Cu. Yd (Yard cubique)
 Sq. ft (pied carré)
 Sq. in. (pouce carré)
 in. Hg (pouce de mercure)

 Lb (Livre)
 Lb/Sq. ft (Livre par pied carré)
 Lb/Sq. in (Livre par pouce carré)

 Mile (Mille anglais terrestre)
 Sq/Mile (Mille carré)
 ft/min (pied/minute)

en :

centimètre (cm)
 centimètre (cm)
 mètre (m)
 centimètre cube (cm³)
 centimètre cube (cm³)
 mètre cube (m³)
 mètre carré (m²)
 centimètre carré (cm²)
 kg/cm²
 atmosphère
 kg
 kg/cm²
 kg/cm²
 atmosphère
 km
 km²
 km/h

Multiplier par :

2,54
 30,480
 0,9144
 28.317
 16,387
 0,7645
 0,0929
 6,4516
 0,03455
 0,0334
 0,45359
 0,000488
 0,0703
 0,0681
 1,6093
 2,59
 0,01829

Fathom (brasse anglaise) = 6 pieds = 1,8 mètres

Brasse française = 1,6 mètres

Mille marin ou nautique = 1.852 m (nœud : vitesse 1 mille/heure)

**SOUPLESSE
 VITESSE
 PRÉCISION**

Gachette
ÉTOILE
 adaptable
 sur
 tous
 les
 modèles

CRÉATION brevetée France Etranger
**ESPADON
 LAZZARI**