



HAL
open science

Physiologie de la plongée

Bernard Gardette

► **To cite this version:**

Bernard Gardette. Physiologie de la plongée: Etude réalisée chez l'homme et chez l'animal lors de plongées à l'air et aux mélanges. COMEX. 1982. hal-04510100

HAL Id: hal-04510100

<https://hal.univ-brest.fr/hal-04510100>

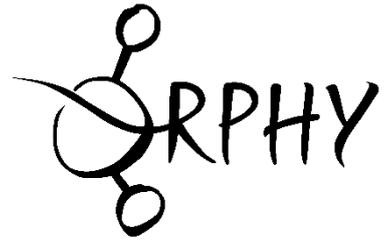
Submitted on 18 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



The present document is the property of COMEX SAS. It has been entrusted to the ORPHY laboratory, which scanned and uploaded it.

COMEX (Compagnie Maritime d'Expertises), established in 1962, has positioned itself in the offshore activities sector, where it held a leading international position, becoming the world's foremost company in engineering, technology, and human or robotic underwater interventions. Comex designed a Hyperbaric Testing Center in 1969 and developed its own research programs on various breathing mixtures used in deep-sea diving (helium and later hydrogen). These research efforts led to spectacular advancements in this field, including several world records, both in real conditions and simulations. Comex still holds the world record at -701 meters, achieved in its chambers during Operation HYDRA 10.

The ORPHY laboratory focuses on major physiological functions, their regulation, interactions, and their contribution to the development and prevention of certain pathologies. The primary mechanisms studied involve metabolic aspects (oxygen transport and utilization, energetics, etc.) and electrophysiological aspects (contractility and excitability), mainly related to respiratory, vascular, and/or muscular functions. These mechanisms are studied under various physiological and physiopathological conditions, ranging from the cellular and subcellular levels to the entire organism. In Europe, the ORPHY laboratory is one of the leaders in hyperbaric physiology and diving research.

Being a major player in innovation and expertise in the field of pressure, COMEX maintains a scientific archive from its experimental diving campaigns. The value of this archive is both scientific and historical, as it documents a remarkable chapter in the history of marine exploration and contains results obtained during dives that are very unlikely to be replicated in the future.

SCIENTIFIC
DOCUMENTATION
N° 11 2084

PHYSIOLOGIE DE LA PLONGEE

Etude réalisée chez l'homme et chez l'animal
lors de plongées à l'air et aux mélanges

BERNARD GARDETTE

PHYSIOLOGISTE - DIRECTION SCIENTIFIQUE

COMEX S.A.

MARS 1982

"Ils ont choisi la mer, ils ne reviendront plus.

Et puis s'ils vous reviennent les reconnaitrez-vous ?"

Paul FORT

SOMMAIRE

--- INTRODUCTION

HISTORIQUE DE LA PLONGÉE - LA CONQUÊTE DES GRANDES PROFONDEURS

- 1 - PLONGEE LIBRE OU PLONGEE EN APNEE 2.
- 2 - PLONGEE EN PRESSION ATMOSPHERIQUE 2.
- 3 - PLONGEE EN PRESSION : 2

LES LOIS PHYSIQUES ET LEURS CONSÉQUENCES SUR LA PHYSIOLOGIE

I LA PRESSION

- 1 - DEFINITION ET UNITES 5.
- 2 - PRESSION ATMOSPHERIQUE 5.
- 3 - PRESSION HYDROSTATIQUE 6.
- 4 - PRESSION ABSOLUE

II LES EFFETS MECANIQUES DE LA PRESSION 6.

- 1 - POIDS APPARENT DANS L'EAU : LA FLOTTABILITE 6.
- 2 - LA COMPRESSIBILITE DES GAZ 7.
 - a) Placage du masque et coup de ventouse 8.
 - b) Les barotraumatismes
 - de l'oreille 8
 - des sinus 9.
 - des dents 9.
 - c) Les coliques des scaphandriers 9.
 - d) La surpression pulmonaire 9.
 - e) Influence de la densité des gaz sur la respiration 9.

III	EFFETS BIOPHYSIQUES ET BIOCHIMIQUES DE LA PRESSION	
1 -	LA PRESSION PARTIELLE	10.
a)	L'oxygène	11.
-	Hypoxie	11.
-	Hyperoxie aiguë et chronique	12.
b)	Le gaz carbonique	13.
c)	Les gaz inertes : azote, hélium, hydrogène, néon, argon, xénon	13.
2 -	LA DISSOLUTION DES GAZ DANS LES LIQUIDES	15.
a)	Saturation d'un liquide	15.
b)	Tension des gaz dissous dans un liquide	15.
c)	Courbes de saturation et de désaturation	16.
d)	Sursaturation	17.
e)	La bulle : les moyens de détection	18.
f)	Physiopathologie des accidents de décompression	19.
g)	Facteurs favorisant les accidents de décompression	20.
h)	Essais pharmacologiques	20.
IV	AUTRES EFFETS DE LA PLONGEE SUR LA PHYSIOLOGIE	
1 -	ALTERATION DE LA VISION ET DE L'OUÏE	20.
2 -	LA NOYADE	21.
3 -	LES PROBLEMES THERMIQUES	21.
	CONCLUSION	23.

INTRODUCTION

Cette étude a pour objet de faire l'inventaire des différents problèmes posés par la "plongée sportive" et la "plongée industrielle" à l'air et aux mélanges synthétiques : hélium-oxygène ou hélium-azote-oxygène.

Elle rassemble les travaux auxquels j'ai participé durant sept ans au Centre Expérimental Hyperbare de la COMEX. Ces années m'ont permis d'aborder un ensemble de questions qui se posent aux chercheurs physiologistes et aux médecins à propos de la vie humaine et animale en hyperbarie.

Mon but n'est pas de traiter de manière exhaustive toutes les branches des sciences qui trouvent une application en plongée, mais de donner une idée générale des divers problèmes rencontrés, en développant plus particulièrement la partie à laquelle je me suis le plus intéressé : la DECOMPRESSION.

Comme je fais partie d'une société privée de travaux sous-marins, je me dois d'axer ma réflexion sur le côté appliqué de cette recherche, c'est-à-dire l'amélioration de la sécurité des procédures de plongée.

Pour la cohésion de cette étude, j'ai pensé qu'il était préférable d'inclure ces différents travaux spécialisés dans un texte plus général.

Après un bref historique de l'évolution de la plongée et l'exposé des étapes qui ont marqué la conquête des grandes profondeurs, j'aborderai les lois physiques de l'hyperbarie et leurs conséquences sur la physiologie des mammifères.

A la suite des problèmes posés par la COMPRESSION, seront développés ceux posés par la DECOMPRESSION, plus particulièrement ceux relatifs aux bulles de gaz inertes (azote ou hélium), à leur moyen de détection "*in vitro*" ou "*in vivo*", aux perturbations cliniques et hématologiques qu'elles peuvent entraîner. Enfin, associés à cette étude se trouvent joints des essais pharmacologiques.

HISTORIQUE DE LA PLONGÉE

LA CONQUÊTE DES GRANDES PROFONDEURS

La plongée sous-marine remonte à la plus haute antiquité. En 480 avant notre ère, lors de la bataille de SALAMINE, opposant la flotte grecque commandée par THEMISTOCLE à l'armada de XERXES, roi des Perses, l'héroïque CYANA plongea sous la flotte perse afin de couper les mouillages des vaisseaux qui iront alors se perdre sur les récifs.

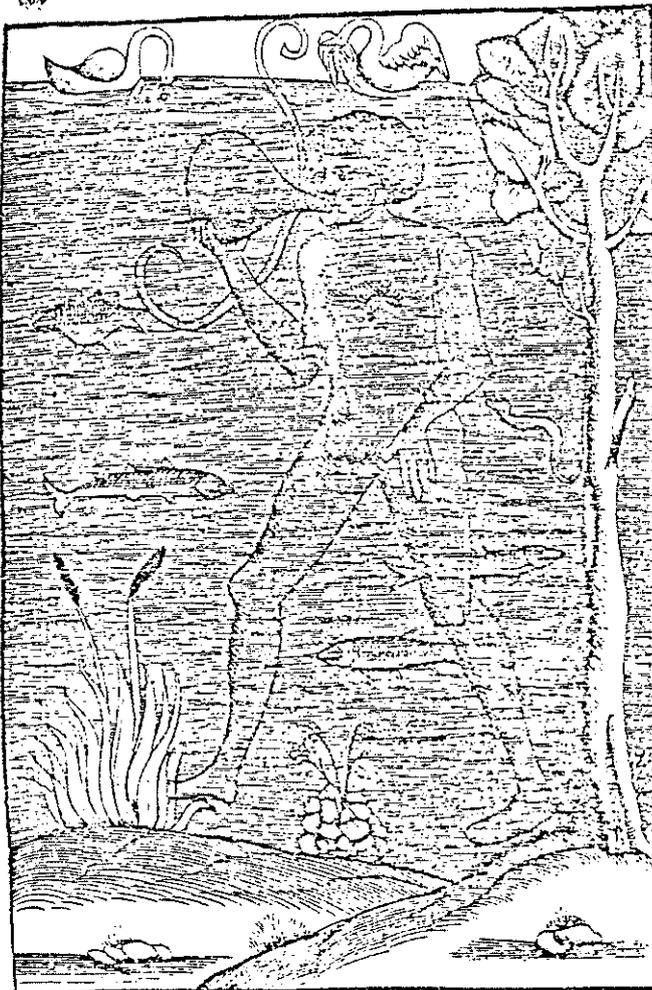
Jusqu'au XIXème siècle, les plongeurs se limitaient à une faible profondeur à cause du matériel rudimentaire utilisé ; plongeur de VECECE (fig. 1), cloche à plongeur primitive d'ALEXANDRE LE GRAND, 330 av. JC, cloche de HALLEY 1690 (Fig. 2).

C'est à SIEBE, en 1837, que l'on doit la mise au point du scaphandre lourd sous sa forme à peu près définitive. Puis ROUQUAYROL et DENAYROUZE inventèrent en 1860 le premier détendeur à la demande et fabriquèrent même le premier scaphandre autonome (1865).

Mais, parallèlement aux progrès technologiques commencèrent à apparaître les premiers accidents de plongée. PAUL BERT (1833-1886) élucida l'origine de ces accidents qui frappent les travailleurs de la mer à leur remontée. En 1878, il est le premier à énoncer correctement les problèmes posés par la décompression.

Au XXème siècle, la pénétration de l'homme sous la mer évolue en suivant trois grands axes parallèles qui font appel à des technologies différentes.

fig. 1



Plongeur de Végèce.

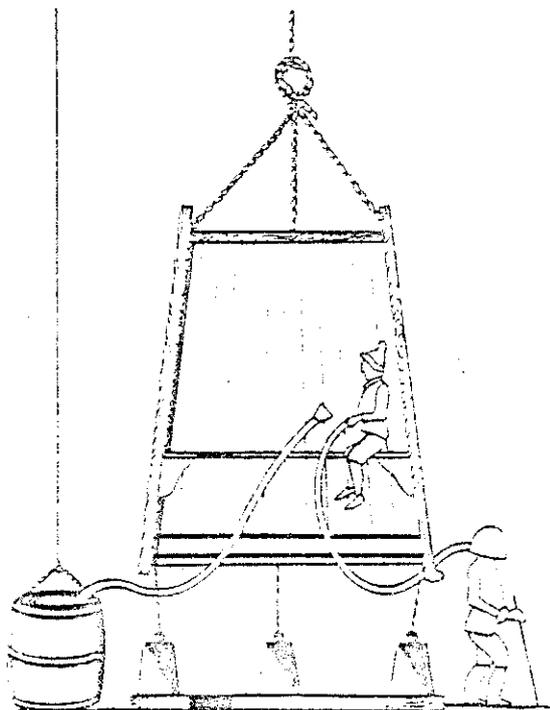


fig. 2

Cloche de HALLEY 1690

1 - PLONGEE LIBRE OU PLONGEE EN APNEE

Le plongeur s'immerge avec, pour toute réserve d'air, celle qui est contenue dans ses poumons, mais, grâce à ses ressources physiologiques et psychiques, il pourra atteindre des profondeurs importantes et rester jusqu'à 4 à 5 minutes sous l'eau (*tableau I*).

De nombreuses recherches ont été faites sur la physiologie de l'apnée. On lira avec attention les synthèses réalisées sur ce sujet par le Dr RAYMOND SCIARLI : "LA PLONGEE - SANTE - SECURITE" et PUBLICATION N° I

2 - PLONGEE EN PRESSION ATMOSPHERIQUE

Pour protéger l'homme de la pression, on l'abrite dans une enceinte étanche et résistante en assurant une régénération de son atmosphère.

Suivant la tâche sous-marine à accomplir, on choisira comme engins soit une TOURELLE D'OBSERVATION reliée à la surface par un câble : TOURELLE-COMEX-1000 mètres (*Fig. 3*) soit, pour réaliser des tâches plus fines, un SCAPHANDRE RIGIDE, type JIM (*Fig. 4*), soit un sous-marin d'observation. Enfin, actuellement, se développe un type mixte de sous-marin dit SOUS-MARIN CRACHE-PLONGEURS avec deux compartiments : un en pression atmosphérique et l'autre en pression ambiante (*fig. 5*).

3 - PLONGEE EN PRESSION

C'est ce type de plongée qui nous intéressera dans cette thèse.

On fournit au plongeur un mélange respiré à la même pression que celle qu'exerce l'eau sur ses poumons. Ce principe s'applique aux plongées en enceinte pressurisée : chambre de soudure, caisson et tourelle de plongée (*fig. 6*); scaphandre lourd; plongeur "autonome" équipé de bouteilles avec détendeurs ; plongeur industriel relié à la tourelle ou à la surface par un ombilical (narghilé).

Cette technique de plongée a connu un important développement ces

<u>NOM</u>	<u>PROFONDEUR</u>	<u>LIEU</u>	<u>DATE</u>
Raimondo BUCHER	30	NAPLES (ITALIE)	1949
Ennio FALCO et ALBERTO NOVELLI	35	NAPLES (ITALIE)	1951
Raimondo BUCHER	39	CAPRI (ITALIE)	1952
Ennio FALCO et Alberto NOVELLI	41	RAPALLO (ITALIE)	1956
Amerigo SANTARELLI	43	RIO DE JANEIRO (BRESIL)	1960
Amerigo SANTARELLI	44	CIRCEQ (BRESIL)	SEPT. 1960
Enzo MAIORCA	45	SIRACUSE (ITALIE)	SEPT. 1960
Amerigo SANTARELLI	46	S. MARGHERITA (ITALIE)	OCT. 1960
Enzo MAIORCA	49	SIRACUSE (ITALIE)	OCT. 1960
Enzo MAIORCA	50	SIRACUSE (ITALIE)	AOUT 1961
Enzo MAIORCA	51	USTICA (ITALIE)	AOUT 1962
Enzo MAIORCA	53	SIRACUSE (ITALIE)	AOUT 1964
Enzo MAIORCA	54	ACIREALE (ITALIE)	JUIL. 1965
Tetake WILLIAMS	59	RAROTONGA (POLYNESIE)	SEPT. 1965
Jacques MAYOL	60	FREEPORT (BAHAMAS)	JUIN 1966
Enzo MAIORCA	62	SIRACUSE (ITALIE)	NOV. 1966
Robert CROFT	64	FORT LAUDERDALE (U S A)	FEV. 1967
Enzo MAIORCA	64	SEPT (CUBA)	SEPT. 1967
Robert CROFT	66	FORT LAUDERDALE (U S A)	DEC. 1967
Jacques MAYOL	70	FORT LAUDERDALE (U S A)	Janv. 1968
Robert CROFT	73	FORT LAUDERDALE (U S A)	AOUT 1968
Enzo MAIORCA	72	OGNINA (ITALIE)	AOUT 1969
Enzo MAIORCA	74	OGNINA (ITALIE)	AOUT 1970
Jacques MAYOL	75	FUTO (JAPON)	SEPT. 1970
Jacques MAYOL	76	ITO (JAPON)	SEPT. 1970
Enzo MAIORCA	77	OGNINA (ITALIE)	AOUT 1971
Enzo MAIORCA	78	OGNINA (ITALIE)	AOUT 1972
Enzo MAIORCA	80	GENES (ITALIE)	AOUT 1973
Jacques MAYOL	85	ELBE (ITALIE)	NOV. 1973
Jacques MAYOL	86	ELBE (ITALIE)	NOV. 1973
Enzo MAIORCA	87	SORRENTO (ITALIE)	SEPT. 1974
Jacques MAYOL	92	ELBE (ITALIE)	OCT. 1975
Jacques MAYOL	100	ELBE (ITALIE)	NOV. 1976
Jacques MAYOL	101	ELBE (ITALIE)	NOV. 1981

Tableau I

PLONGEES EN APNEE

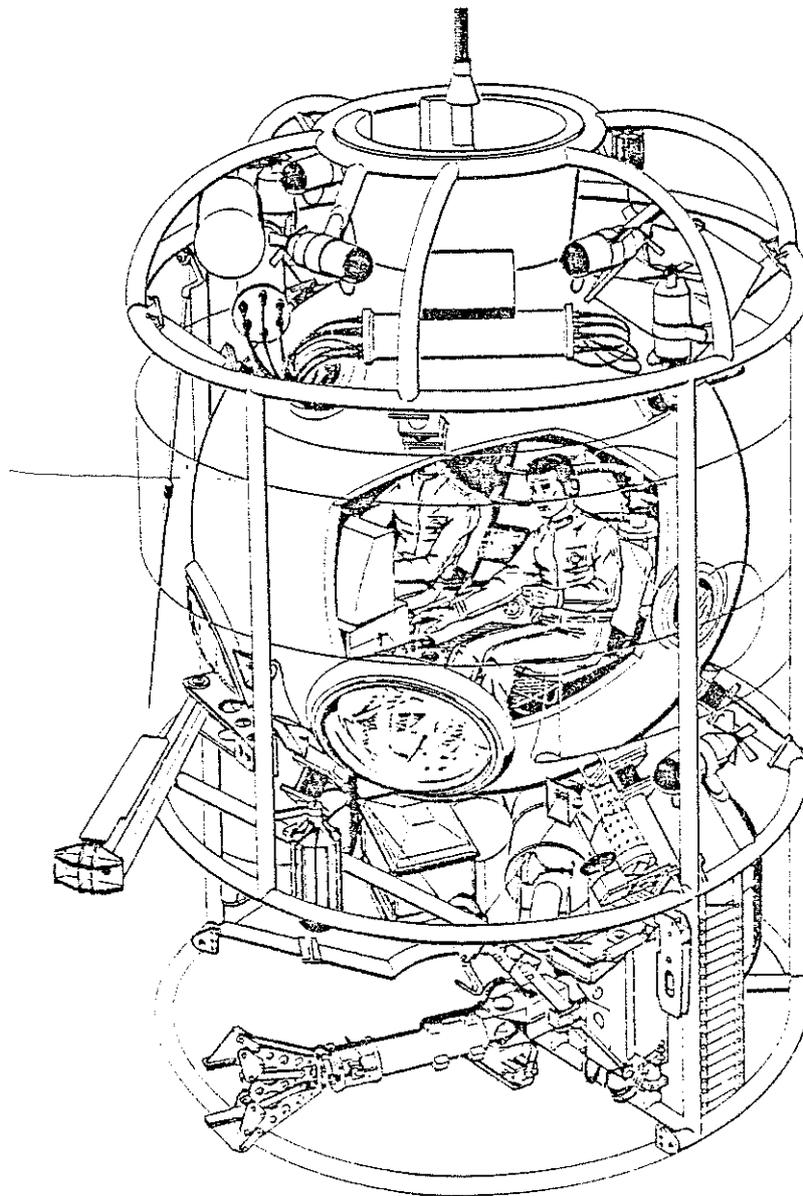


Fig. 3

TOURELLE COMEX 1000 M
EN PRESSION ATMOSPHERIQUE

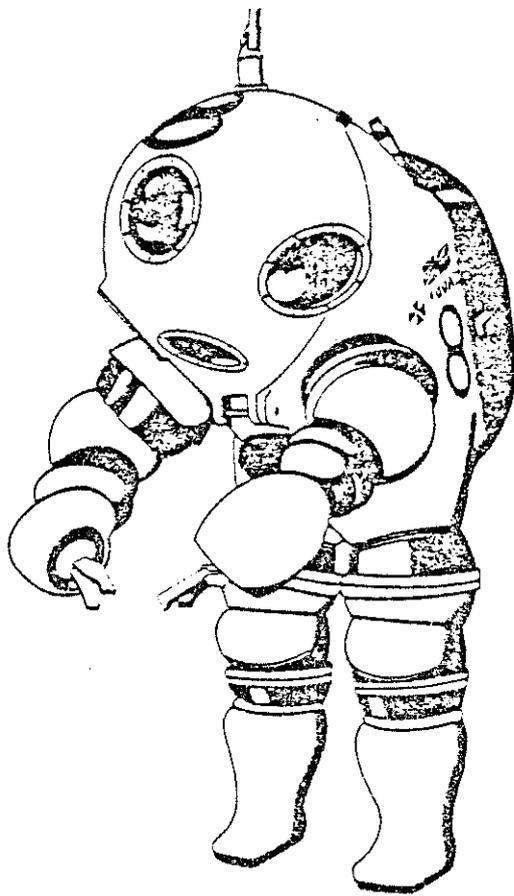


Fig. 4

SCAPHANDRE RIGIDE TYPE JIM

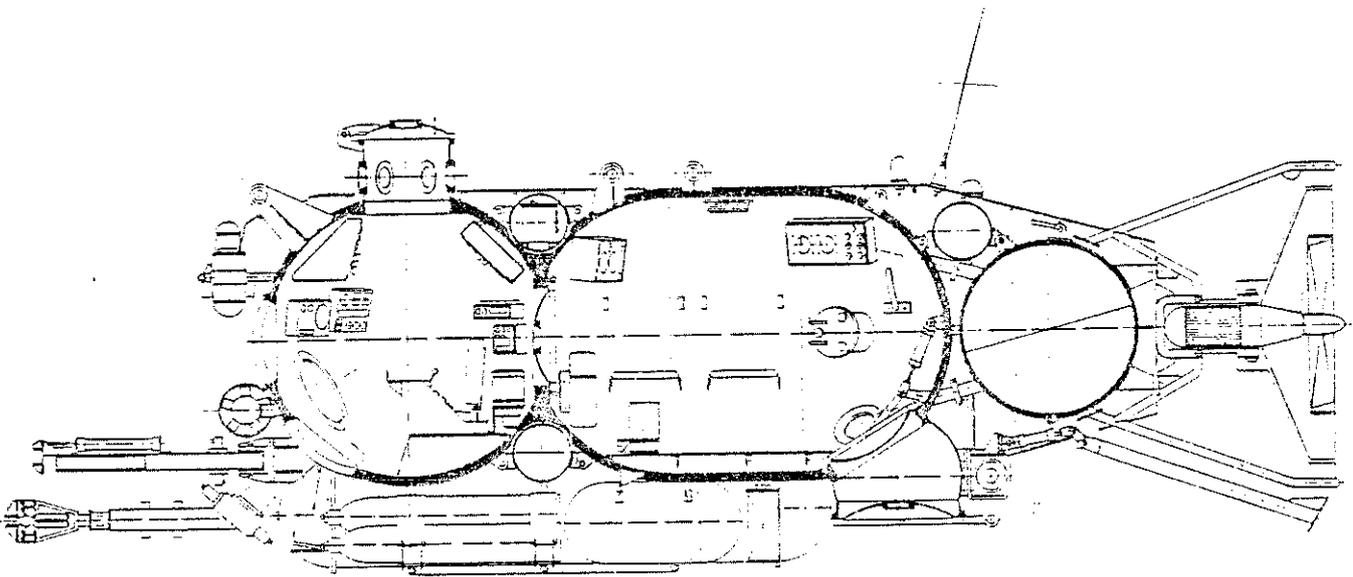


Fig. 5

SOUS-MARIN CRACHE-PLONGEURS CONEX SM 353

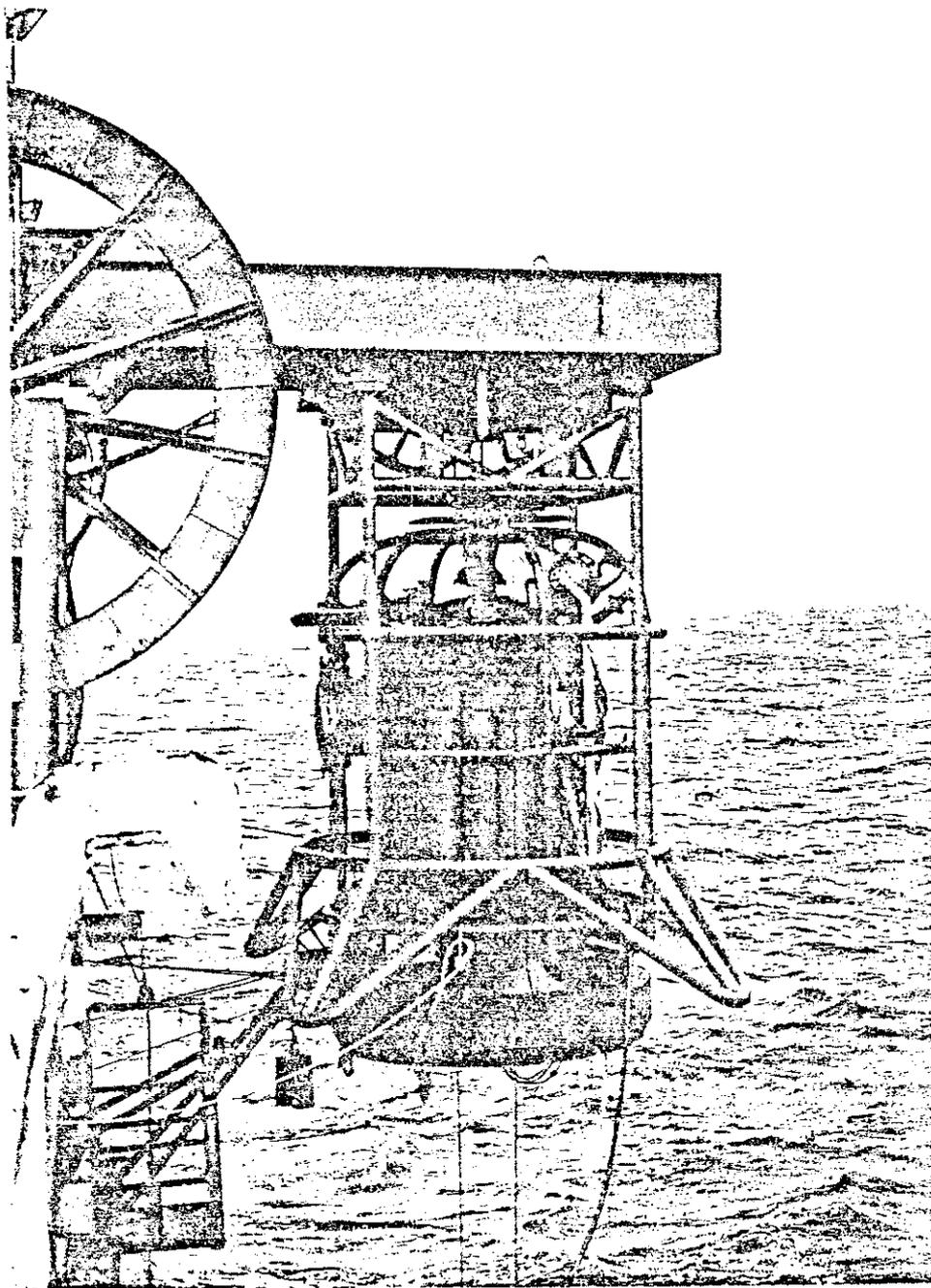


Fig. 6

TOURELLE DE PLONGEE

dernières années, aussi bien en plongée simulée en caisson expérimental (fig.7) qu'en plongée réelle à partir de maisons sous la mer ou de caissons pressurisés situés en surface.

= Maisons sous la mer pressurisées à l'air

U.S. NAVY - G. BOND :

- SEALAB I : 4 hommes, 11 jours à 56 mètres.
- SEALAB II : plusieurs équipes séjournant chacune 15 jours à 61 mètres.

J.Y. COUSTEAU :

- PRECONTINENT I : 2 hommes, 7 jours à 10 mètres
- PRECONTINENT II : une équipe à 9 mètres et 2 hommes à 25 mètres à l'héliox.

= Maisons sous la mer pressurisées au mélange héliox

R. STENUIT et J. LINDBERGH

- MAN IN SEA, 1964 : 48 heures à 130 mètres
- PRECONTINENT III, 1965 : plusieurs équipes se relaient durant un mois à 96 mètres

= Plongées profondes fictives en caisson expérimental

Après H. KELLER qui, en 1961, atteignit la profondeur de 300 mètres au mélange héliox, les plongées-record devaient se succéder à un rythme accéléré

. A la COMEX : - "Plongées au long cours" P.L.C. : R. BRAUER et H.G. DELAUZE en 1968 à 335 mètres.

- Série "PHYSALIE" : plongées de pointe. La dernière effectuée, PHYSALIE VI, 1972 = 1 heure à 610 mètres

- Série "SAGITTAIRE" : plongées à caractère scientifique, de plus longue durée. La dernière effectuée SAGITTAIRE IV, 1974 = 50 heures à 610 mètres.

. A l'étranger, la plongée la plus récente, 1981, et la plus profonde (- 686 m.) a été réalisée par l'équipe de P. BENNET (Duke University, U.S.A.) *Tableau II et III.*

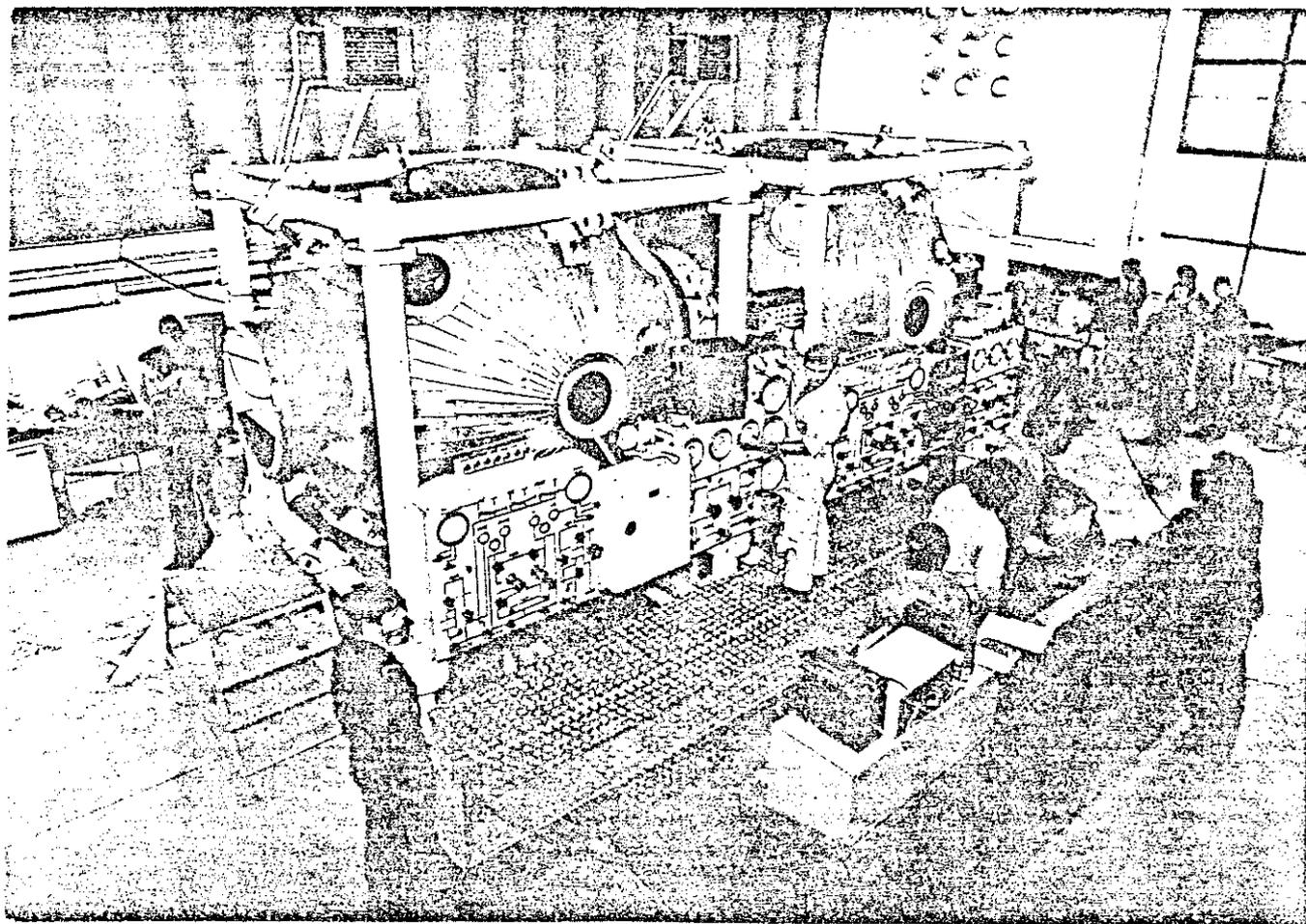


Fig. 7

CAISSONS DU CENTRE EXPERIMENTAL HYPERBARE (C.E.H.) COMEX

ENSEMBLE 700 M

EXPERIENCE	PROF.	DATE	NOMS DES PLONGEURS	COMP.	SEJOUR TOT.	ORGAN.	HYPERBATION
PHYSALIE V	520	Nov. 70	P. Chemin; B. Reuilhier	3j 2h	1h 17	COMEX	SNHP
SATURATION II	400	Déc. 70	. Bonnici; J.C. Le Péchon		25h	CEMA	Ventilation. Trav. Ml
SAGITTAIRE I	300	Nov. 71	B. Adam; B. Brousse; P. Léonard; F. Sicardi	10j 14h	6j	COMEX	Thermique. Biologie.
SATURATION III	500	Déc; 71	R. Gauret; Y. Omer		18h	CEMA	Ventil. Tr. musc. Biol
SAGITTAIRE II	500	Fév. 72	F. Huteau; J. Thollas	2j 1h	4j	COMEX	SNHP. Rythmes biol
PHYSALIE VI	610	Mai 72	P. Chemin; R. Gauret	7j 9h	1h	COMEX	SNHP
SAGITTAIRE III	300	Mar. 73	G. Dignand; F. Foucher; R. Gauret; C. Préfaut	4j 16h	15j	COMEX	Thermique. Biologie
JANUS III A	{390 415 460}	Avr. 74	R. Roul; G. Straub; P. Valéani	2j 1h	6j	COMEX	Opérationnel caisson
SAGITTAIRE IV	610	Mai 74	C. Bourdier; A. Jourde	10j 21h	2j 2h	COMEX	SNHP. Psycho. Rythm
JANUS III B	{395 415}	Déc. 74	C. Gulchard; M. Quechon; A. Samanos	2j 1h	6j	{COMEX GISMER}	Opérationnel caisson
CORAZ I	300	Jan. 75	C. Bourdier; A. Jourde; P. Rosengren	4h	3j	COMEX	SNHP. Psycho.
CORAZ II	300	Mar. 75	C. Bourdier; A. Jourde	4h	3j 9h	COMEX	SNHP. Psycho.
DORIS 300	{300 310}	Avr. 75	B. B ; H. H	7j	3j	DORIS	Opérationnel caisson
TRITON IX	{250 307}	Juin 75	Y. Bigourdan; Y. Espine; P. Marfaling; M. Roque	2h 30	7j	GISMER	Opérationnel mer
CORAZ III	300	Juin 75	M. Gangloff; R. Gauret	4h	1j 9h	COMEX	SNHP. Psycho
CORAZ IV	300	Déc. 75	J. Griselin; JP. Mary	4h	3j 9h	COMEX	SNHP. Psycho
JANUS IV. 2	{400 460 480}	Déc. 76	P. Jeantot; J. McKenna; V. Lentini; P. Raude; L. Schneider; E. Sevellec; J. Verpeaux; G. Vial	24h (400m)	9j	{COMEX GISMER}	Opérationnel caisson SNHP. Psycho. Bulle
JANUS IV. 3	{430 460 500}	Oct. 77	P. Jeantot; P. Raude; L. Schneider; E.J. Sevellec; J. Verpeaux; G. Vial	30h (430m)	6j	{COMEX GISMER}	Opérationnel mer Bulles.
S. S. S. 6	300	Juin 78	J. L. Melliet; R. Mingan	27 h	10j	GISMER	Biologie. SNHP
75/131	450	Avr. 79	A. Bulfo; M. Combes; J. Duprat; P. Guillermet; A. Marle; T. Mavrostomos; A. Moreno; G. Pannellier	38h	2j	{COMEX GISMER}	Selection. SNHP. Psycho. Ventil. Bulle
ENTEX 5	450	Jan. 81	C. OHEIL; P. DABADIE; J. G. MARCEL-AUDA Y. JANGOUET	38h	12j	COMEX GISMER	Sélection SNHP Psycho. Ventil. Bulles

PLONGEES ETRANGERES LES PLUS PROFONDES

Année	Profondeur mètres	Nombre de Plongeurs	
1970	457	2	RNPL Royal Navy. Alverstocke
1975	490	6	U.S. Navy
1978	490	4	"Predictive Study IV". Univ. of Pennsylvania
1979	460	3	"Atlantis I". Duke University. Durham
1979	550	6	"Deep Dive 79". U.S. Navy
1980	650	3	"Atlantis II". Duke University. Durham
1980	660	2	R.N.P. Royal Navy. Alverstocke
1981	686	3	"Atlantis III". Duke University. Durham

Tableau III

- Plongées réelles en mer

. En 1963, H. KELLER et P. SMALL atteignent 300 mètres à partir d'une tourelle de l'U.S. NAVY, mais cette tentative se termine tragiquement.

. A la COMEX, série "JANUS" : plongées opérationnelles - la dernière effectuée = JANUS IV

- 1976 : Phase I

Sélection des plongeurs de la MARINE NATIONALE (GISMER) et de la COMEX.

- Décembre 1976 : Phase II

Plongée à 400-480 mètres pour 8 plongeurs sélectionnés.

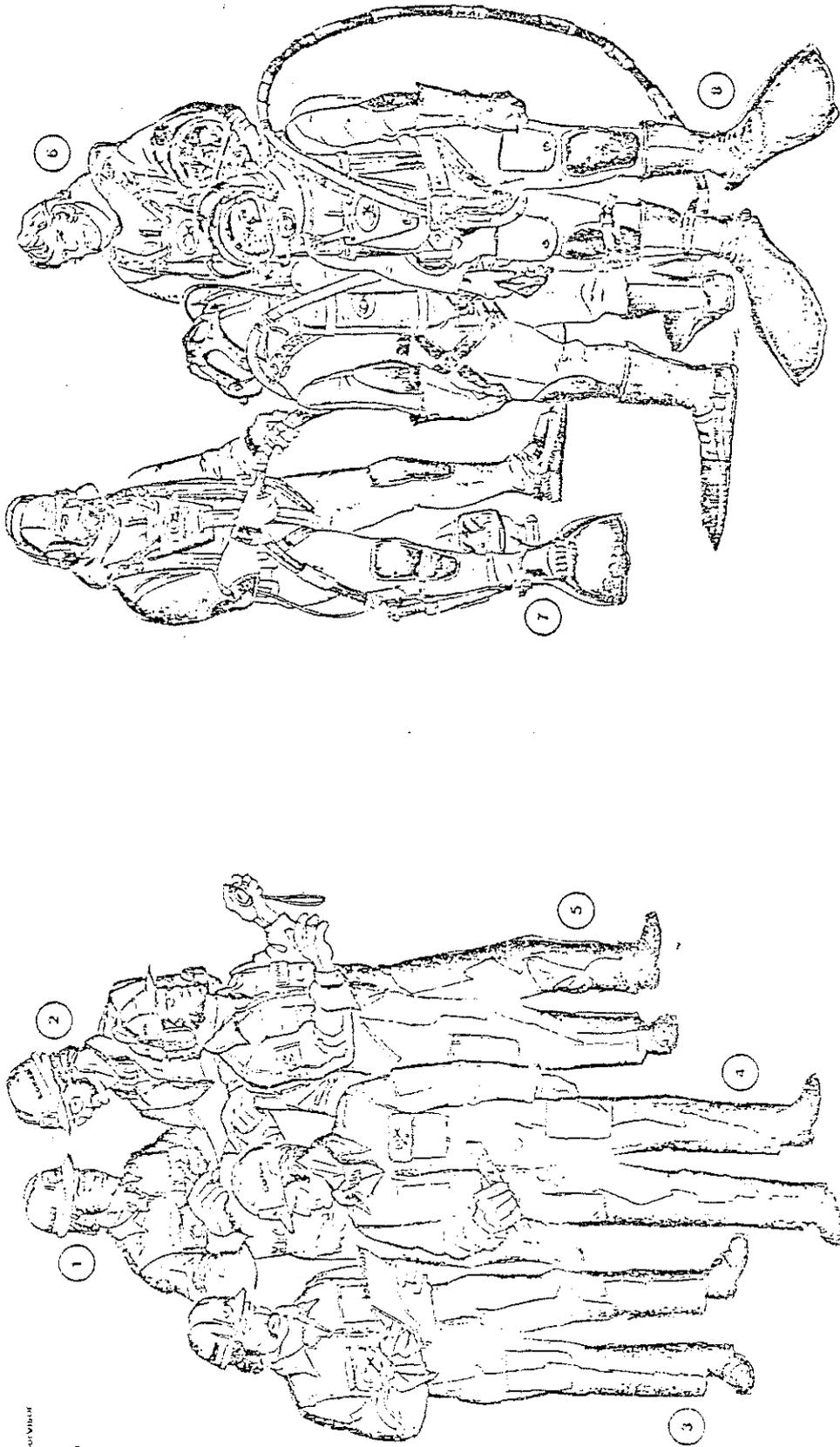
- Octobre 1977 : Phase III

Plongée en mer : 6 plongeurs choisis parmi les 8 effectuent 10 heures de travail dans l'eau à 460 mètres et une plongée à 501 mètres, nouveau record de plongée en mer (fig. 8)

- Les techniques actuelles de plongée industrielle

L'environnement du plongeur industriel, travaillant par exemple par 150 mètres de fond, dans de l'eau froide, en l'absence de lumière, nécessite la protection d'une technologie appropriée. Les différents équipements et les procédures de plongée actuellement utilisés sont exposés dans les schémas, ci-joints, extraits d'une brochure COMEX "ALERTE EN MER DU NORD !" "NORTH SEA ALERT !"

- 1 - Project Manager
- 2 - Barge and Works Supervisor
- 3 - Diving Superintendent
- 4 - Diving Supervisor
- 5 - Life Support Technician
- 6 - Stand by Diver
- 7 - Bellman
- 8 - Diver



Several different jobs are sometimes performed by the same person, or conversely one job is divided up among several people. The project manager is the person responsible to the Comex client for the entire project. It is up to him to see that the terms of the contract (in which he has already played a part by drafting its broad outlines with the client) are properly executed. A project manager may be responsible for several worksites in the same region. The barge and works supervisor is the project manager's per-

manent representative on the worksite itself, and the customer's on-site liaison man. He decides upon the most suitable procedures to use on the site and sees that the work is done correctly. The diving superintendent is the person in charge of the diving part of the job and for seeing that the underwater tasks defined by the works supervisor are properly executed. It is his responsibility to make sure that the current safety regulations in diving are observed. The diving supervisor: every

single dive is performed under the responsibility of a diving supervisor who is designated for that particular dive. He may have other functions in the team, and may equally well be the diving superintendent himself or a highly qualified diver. The life-support technician, or chamber operator is responsible for controlling the environmental parameters for the divers in solution. He makes the breathing gases as required and distributes them to the chambers at the right pressure, as well as monitoring regeneration of these gases. He

also selects and applies the appropriate compression and decompression schedules, services the chambers and checks that they are functioning properly. The stand-by diver is equipped with an umbilical, ready to dive immediately if an emergency situation, such as the bell getting stuck, should arise. His job is to ensure from the surface the safety of the divers in the water. The bellman is a diver who never gets into the water, if the diver goes off as it should. He stays at his post inside the bell where his particular

THE COMEX TECHNICAL TEAM

Comex employs on its worksites teams of divers and technicians who share among them eight essential functions, six at the surface and two at the bottom. Depending on the size of the site,

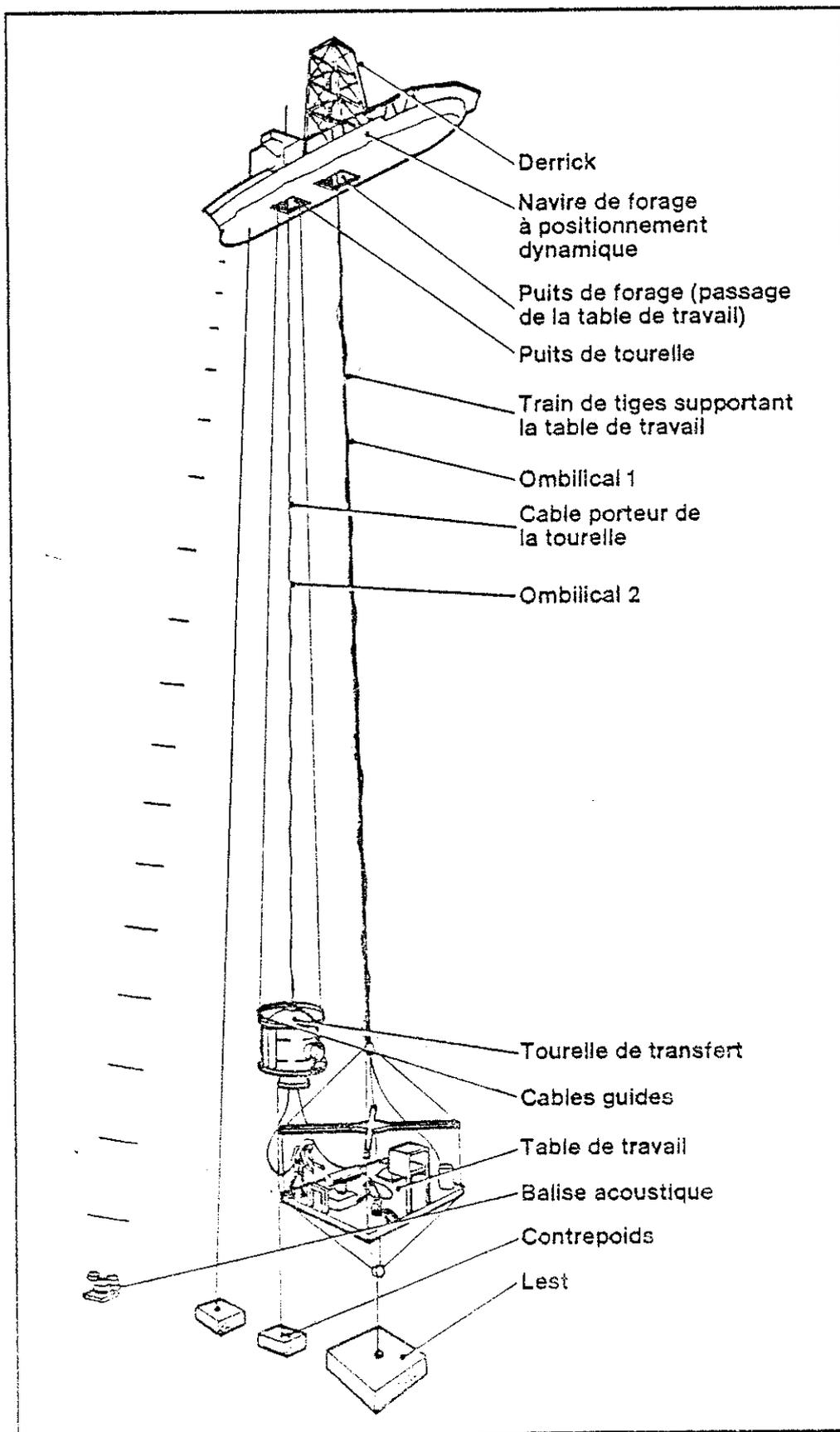


Fig. 3

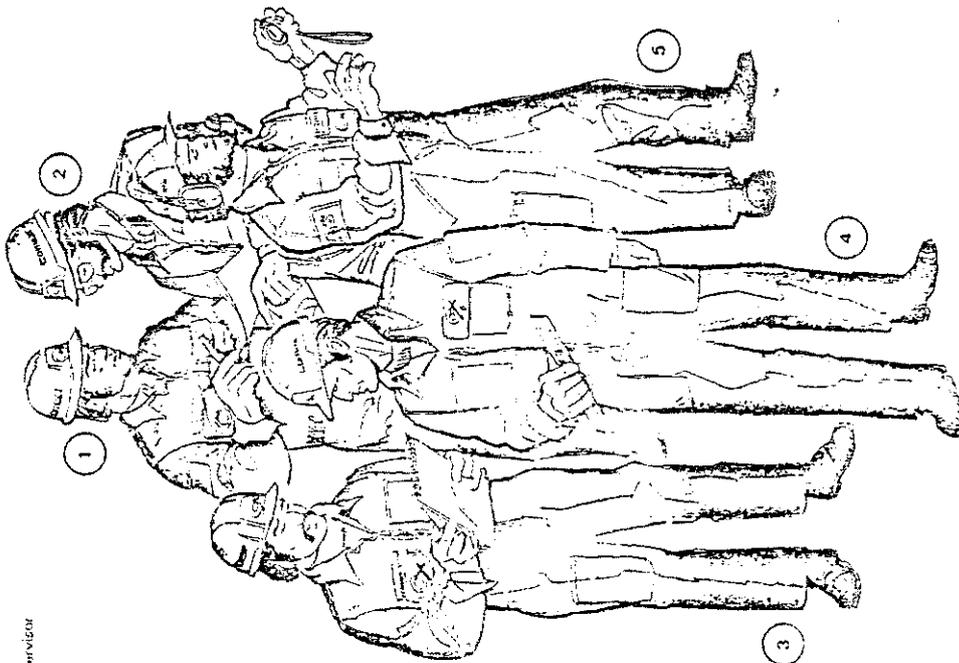
JANUS IV

PLONGEE OPERATIONNELLE EN MER A 430 M.

EXTRAIT DE : "ALERTE EN MER DU NORD !"

"NORTH SEA ALERT !"

- 1 - Project Manager
- 2 - Bargain and Works Supervisor
- 3 - Diving Superintendent
- 4 - Crewing Supervisor
- 5 - Life Support Technician
- 6 - Stand by Diver
- 7 - Bellman
- 8 - Cover

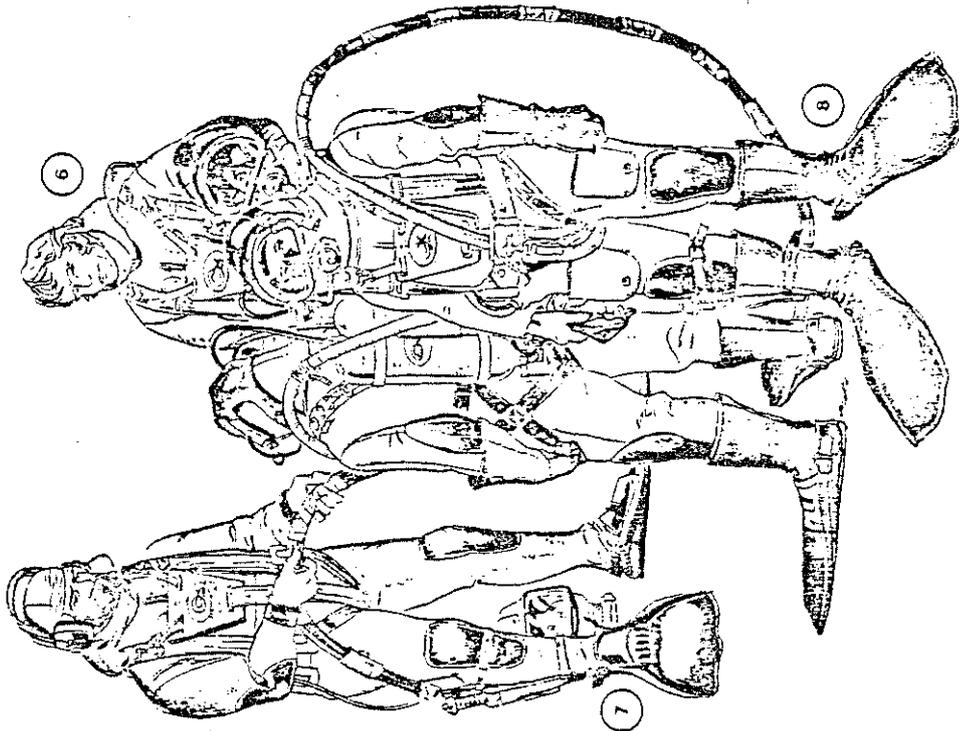


THE COMEX TECHNICAL TEAM

Comex employs on its worksites teams of divers and technicians who share among them eight essential functions, six at the surface and two at the bottom. Organized on the size of the site,

several different jobs are sometimes performed by the same person, or conversely one job is divided up among several people. The project manager is the person responsible to the Comex client for the entire project. It is up to him to see that the terms of the contract (in which he has already played a part by drafting its broad outlines with the client) are properly executed. A project manager may be responsible for several worksites in the same region. The barge and works supervisor is the project manager's par-

manent representative on the worksite itself, and the customer's on-site liaison man. He decides upon the most suitable procedures to use on the site and sees that the work is done correctly. The diving superintendent is the person in charge of the diving part of the job and for seeing that the underwater tasks defined by the works supervisor are properly executed. It is his responsibility to make sure that the current safety-in-diving regulations are observed. The diving supervisor: every



single dive is performed under the responsibility of a diving supervisor who is designated for that particular dive. He may have other functions in the team, and may equally well be the diving superintendent himself or a highly qualified diver. The life-support technician, or chamber-operator is responsible for controlling the environmental parameters for the divers in saturation. He mixes the breathing gases as required and distributes them to the chambers at the right pressure, as well as monitoring regeneration of these gases. He

also selects and applies the appropriate compression and decompression schedules, services the chambers and checks that they are functioning properly. The stand-by diver is equipped with an umbilical, ready to dive immediately if an emergency situation, such as the bell getting stuck, should arise. His job is to ensure from the surface the safety of the divers in the water. The bellman is a diver who never goes into the water, if the dive gets off as it should. He stays at his post inside the bell where he

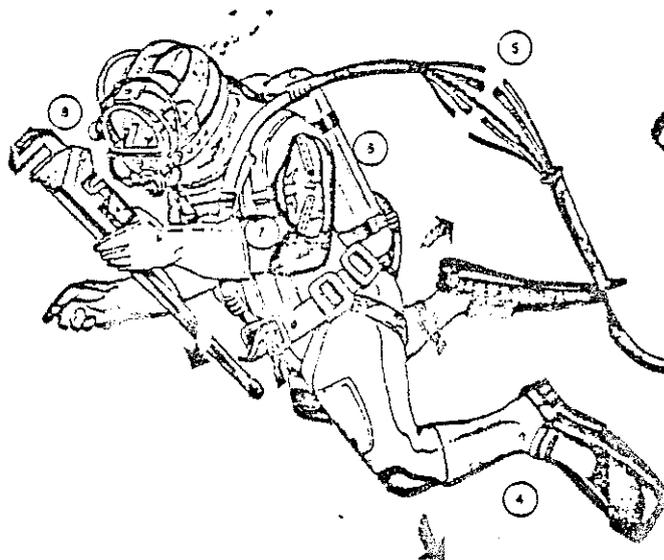
checks that the various necessities such as breathing gas supply, regeneration, and communications, etc., are functioning properly and directly oversees the safety of the divers working in the water. The diver may be a welder, a fitter, a mechanic... in any case he is the technician who performs the actual work on the site, the final link in a chain comprising many specialists and employing, in general, very costly equipment. He is chosen for his intelligence, his physical fitness and his skill in his particular speciality.

THE DIVING BELL :
A DEEP WATER LIFT

When a dive is limited to ten or twenty minutes and to a depth of less than fifty meters (165 ft.) the diver enters the water at the surface. When the dive lasts longer and the depth is greater, as is usually the case, the divers are taken from the surface to the worksite by a diving bell. The diving bell is a steel enclosure with a sealed hatch in the bottom, suspended from a carrier cable attached to the top. An umbilical cable supplies it with breathing gases, electricity and hot water from the surface and transmits interroom messages and some measurements. It has room for three fully equipped men : a bellman and two divers.

When the bell has reached the working depth, its internal pressure is brought to the same value as that of the ambient pressure. The hatch which was sealed by the effect of the external pressure then opens effortlessly and the divers, with the help of the bellman, can go out into the water. All the time they are in the water, they are connected to the bell by an umbilical which supplies them with breathing gas and hot water. The hot water first passes through a gas heater which warms the diver's breathing gas and then diffuses through his suit, therefore preventing both respiratory and cutaneous heat loss. The umbilical is also the channel by means of which the divers are in continuous contact with the bellman and with the

surface which receives at the same time the constantly changing depth values of each diver. The bellman stays in the bell and checks the gas supply going to the divers as well as maintaining their umbilicals at a length that enables them to work easily and without hindrance. He maintains direct contact with the diver at all times even if hidden in shadow or has moved outside the bellman's range of vision, by skilfully controlling the diver's umbilical. Under normal circumstances the bellman would not take part in underwater work, he only leaves the bell to help a diver in trouble.



- 1 - Carrier cable
- 2 - Bell umbilical
- 3 - Bellman
- 4 - Diver
- 5 - Diver's umbilical (cross-section)
- 6 - Emergency gas supply and gas heater
- 7 - Hot water suit (cross section)
- 8 - Full face mask (with microphones and earphones)

THE FIVE METHODS FOR PROFESSIONAL DIVING

Comex does not use the same methods on all worksites. Different size teams and different equipment are employed depending on whether the job consists of a very specific inspection at fifty meters' depth (165 ft.), or making a pipeline tie-in over a long period of time at three hundred and fifty meters (1,200 ft.). Four men and a compressor may suffice for a shallow water surface demand dive, whereas sixty technicians and equipment weighing as much as three hundred tons may be required to accomplish certain complex tasks at great depths. Comex's interventions can on the whole be classified in two broad categories: bounce dives for short jobs and saturation dives for long ones. Bounce dives can in turn be broken down into four types: surface demand, wet bell, or closed bell for dives less than one hundred and twenty meters (400 ft.) deep, and with closed diving bell for depths over a hundred and twenty meters. With these variations, Comex can satisfy all its customers' requests for diver intervention, selecting on each occasion the alternative best suited to the physiological problems to which the divers will be exposed. The chief obstacle to man's ad-

vance into the ocean depths is not technological in nature, but physiological. Man does not feel like a fish in water, which is a great pity when one thinks of the natural resources waiting to be tapped at the bottom of the ocean. His organism is made to breathe air at atmospheric pressure. Breathing enables his lungs to absorb some of the oxygen in the air, which then passes into his blood through the lung cells and is used for manufacturing energy. Once it has been consumed, the body gives off the used oxygen in the form of carbon dioxide and water vapor, by exhaling.

Nitrogen, which accounts for 79% of the composition of air, does not enter into this process. A certain amount of nitrogen is dissolved in the organism, however, so that a balance is maintained between the nitrogen content of the body and the nitrogen content of the atmosphere it breathes. This balance is what is called a state of saturation. It can be altered by a change in the ambient pressure. Under water both man and the air he breathes are subjected to a pressure which increases every ten meters by about one kilogram per square centimeter. This pressure modification upsets the balance and part of the nitrogen inhaled therefore dissolves in the body.

As the diver returns to the surface he must take the time necessary to get rid of the excess nitrogen in his system, by normal breathing. If he does not do this, but goes too quickly from the bottom pressure to the surface atmospheric pres-

sure, the nitrogen which has not had enough time to be eliminated forms little bubbles which increase in size as the ambient pressure decreases. These bubbles, particularly if they are present in certain vital organs such as the spinal cord or the brain, can create extremely serious lesions which may lead to paralysis or even death. That is why it is imperative to compel divers to only return to the surface by progressive stops conforming to decompression schedules experimentally worked out for each particular working depth and each bottom time.

The length of decompression time increases with the depth and bottom time in certain proportions until a threshold is attained, relatively shallow, where the effective diving time is short compared with the decompression time.

In addition to this phenomenon, which in itself makes air diving below seventy meters (230 ft.) impracticable, there is another which makes it dangerous below fifty meters (165 ft.).

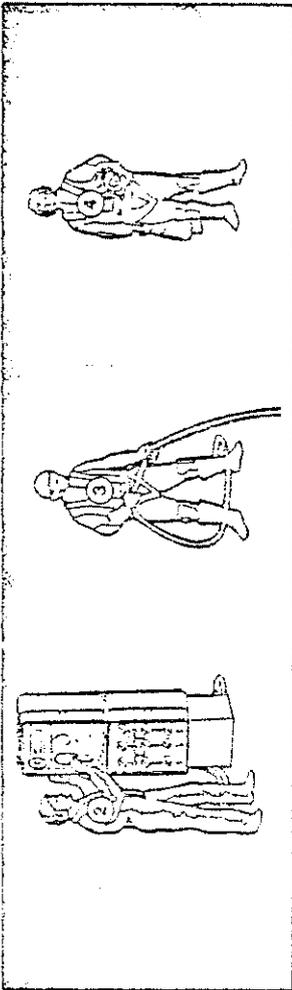
Air becomes denser under pressure and breathing it induces in most divers a narcotic effect which seriously impairs their mental faculties and coordination.

For this reason, when the diving depth is apt to exceed fifty meters, Comex divers are not supplied with air but with a synthetic gas mixture, heliox, in which the nitrogen is replaced by a lighter neutral gas, helium.

This mixture permits the diver to retain all of his comfort and lucidity down to much greater depths, at

least six hundred and ten meters (2,000 ft.) according to the experiments conducted by Comex in 1972. Using heliox does not do away with the necessity for decompression. As the depth increases, the length of decompression time becomes such that divers can no longer complete decompression directly in the water. They must enter diving bells in which they can commence the decompression schedule, which is terminated in the deck decompression chamber (D.D.C.).

For long term jobs in deep waters, the decompression following each dive is so long that it would cancel out the economical value of human intervention if a method had not been developed of getting around this obstacle: saturation diving. By this method, instead of the divers living at atmospheric pressure, they are confined in a hyperbaric unit in which the pressure is maintained close to the working level pressure of the site. After a few hours at the living level (storage depth) the equilibrium which prevailed at the surface between the neutral gas content in their bodies and that of the ambient atmosphere establishes itself at a new level due to the pressure increase and change in breathing mixture. The divers can then pass from storage depth to working depth and back at will without following a decompression schedule. They must undergo only one desaturation at the end of their mission when they are about to leave the hyperbaric complex and return to the free air.

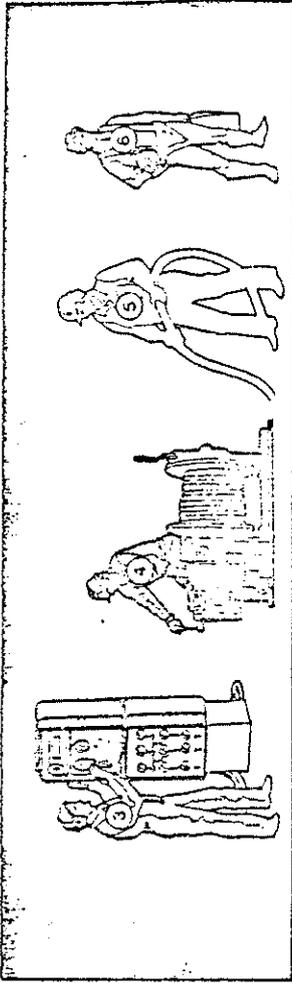


THE SURFACE DEMAND BOUNCE DIVE

The diver enters the water at the surface. He is supplied with breathing gas by an umbilical which also transmits verbal communications to and from the surface as well as transmitting the diver's depth parameter. The breathing mixture may simply be air. If so, the dive is limited to

the bottom time must not exceed thirty minutes. The surface demand dive requires only a minimum crew of four: on the bottom, the diver; on the surface, a diving supervisor, a tender who handles the umbilical and a stand-by diver.

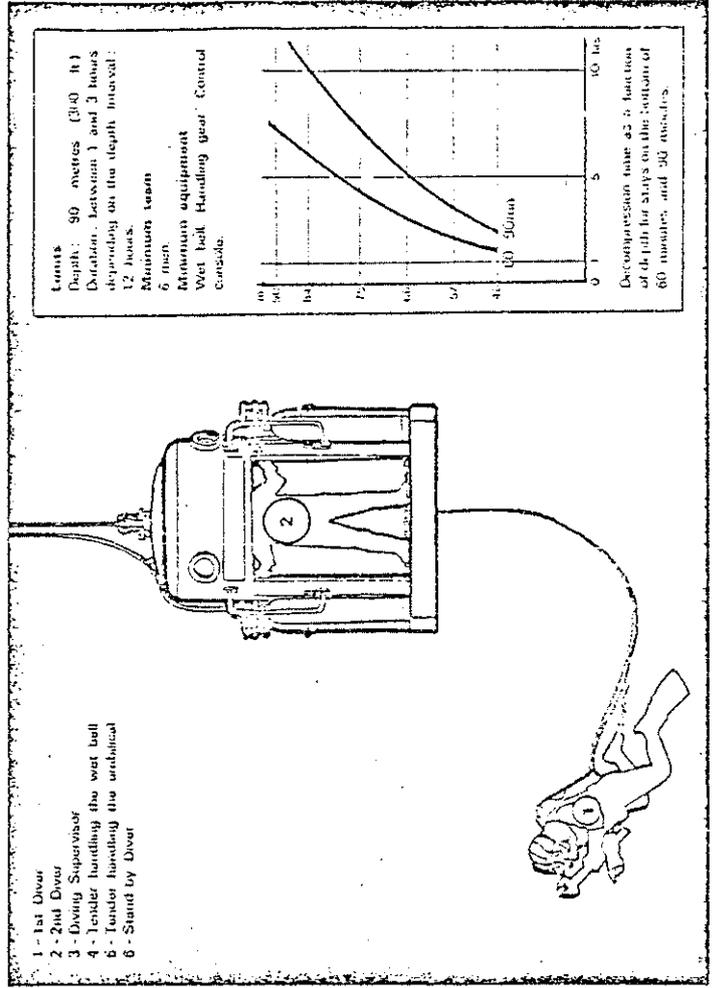
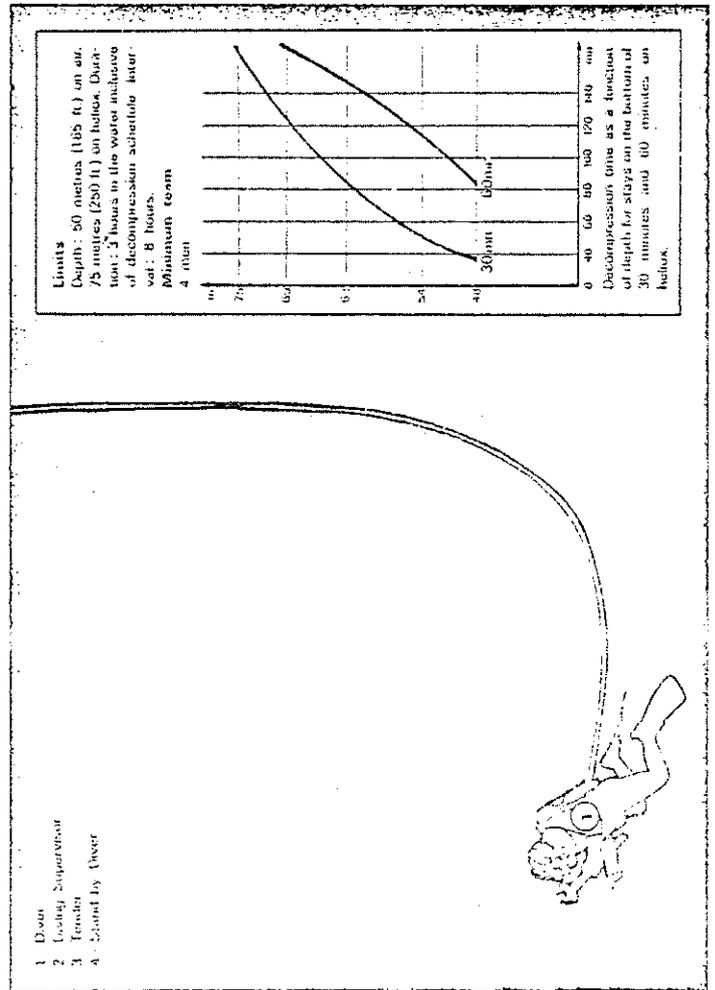
In the event of a serious accident, the umbilical tender is also able to dive in order to help the diver at the bottom.

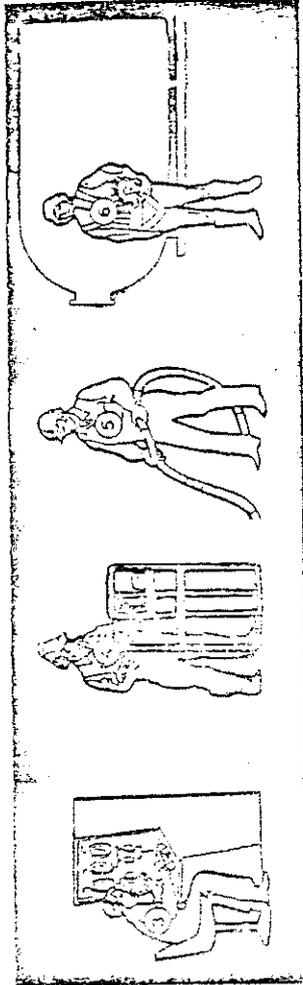


THE WET BELL BOUNCE DIVE

The wet bell is a small diving bell, open at the bottom, and of very simple design. It is suspended from a carrier cable and connected to the surface by an umbilical which supplies breathing gas, electricity and intercom transmission. It can hold two divers seated in the water but with the upper part of

their bodies out of the water, in the one hour at shallow depths and one hour at ninety meters. Use of the wet bell requires a minimum crew of six: on the bottom, a diver for performing the work and a stand-by diver in the bell; on the surface, the diving supervisor, a tender who handles the wet bell and controls the decompression process. The maximum depth to which the wet bell can accede is ninety meters (300 ft.). The bottom working time limit is not more than





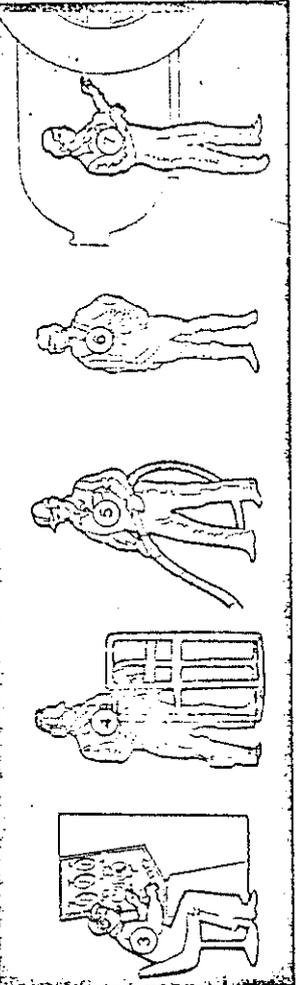
pression stops, within the D.D.C. on the surface. The diving bell is designed to be hermetically coupled to hyperbaric units at the surface in order to transfer the crew between bell and chambers in a compressed air atmosphere without returning to atmospheric pressure. Air decompression offers the advantage of appreciable economy of synthetic gas, but the dive is limited to a hundred and twenty meters depth (400 ft.) and a bot-

THE BELL BOUNCE DIVE TO 120 M (400 FT)

In this type of dive, the divers are transferred from the surface to the surface site in a closed diving bell. They are supplied with breathing gas and if necessary hot water by umbilicals which connect them to the bell on the bottom. At the bottom they breathe a helium mixture, although air is used for the decom-

pression stops, within the D.D.C. on the surface. The diving bell is designed to be hermetically coupled to hyperbaric units at the surface in order to transfer the crew between bell and chambers in a compressed air atmosphere without returning to atmospheric pressure. Air decompression offers the advantage of appreciable economy of synthetic gas, but the dive is limited to a hundred and twenty meters depth (400 ft.) and a bot-

tom time of one and a half hours. It requires a crew of at least six persons: on the bottom, one diver on the site plus a bellman inside the bell who tends the umbilical as needed and ensures the safety of the working diver; on the surface, a diving supervisor, a tender who handles the bell, an umbilical diver and a stand-by diver in the event of an emergency.



procedure is the same as for depths less than a hundred and twenty meters, but in this case helium is used for decompression rather than air, and decompression takes place in a hyperbaric chamber with a gas regeneration system. This type of dive requires a team of at least seven persons: on the bottom, one diver on the site and a bellman inside the bell to tend the umbilical and ensure the diver's safety; on the surface, a diving

THE BELL BOUNCE DIVE BELOW 120 M (400 FT)

This method permits access to depths in the two hundred meter range (700 ft.), for which decompression time can be quite long. Conversely, the working periods are relatively short. In addition, this type of dive demands extremely careful preparation. As far as the dive itself goes the

procedure is the same as for depths less than a hundred and twenty meters, but in this case helium is used for decompression rather than air, and decompression takes place in a hyperbaric chamber with a gas regeneration system. This type of dive requires a team of at least seven persons: on the bottom, one diver on the site and a bellman inside the bell to tend the umbilical and ensure the diver's safety; on the surface, a diving

Limits
Depth: 120 metres (400 ft.) Dive time: 90 minutes Interval: 12 hours

Minimum team
Six men

Minimum equipment
At least bank diameter handling gear, bell, breathable gas reserves, Com. and other

Decompression time as a function of depth for stays on the bottom of 60 minutes and 90 minutes

Limits
Depth: 200 metres (650 ft.) Dive time: 3 hours Interval: 24 hours

Minimum team
Seven men

Minimum equipment
At least bank diameter handling gear, bell, breathable gas reserves, Com. and other

Decompression time as a function of depth for stays on the bottom of 60, 120 and 180 minutes

THE SATURATION DIVE

The bounce dives described in the preceding pages employ relatively limited manpower and equipment. They can however only be used for short-term jobs. The saturation dive, on the other hand, theoretically enables the divers to stay on the bottom indefinitely, but requires considerably more surface personnel and extensive equip-

ment that constitutes a diving complex.

The key component in this system is the surface hyperbaric complex with its annexes. Depending on the size of the worksite and the number of divers working on the bottom, the hyperbaric complex has a greater or lesser number of chambers, which can be classified in three main categories according to the functions they serve: the living quarters chamber, a sort of bedroom, a living room in which the diving crew spends its time between work shifts; the wet chamber, a dressing-room where the divers put on and take off their gear (diving suits, helmets, etc.) before

and after work shifts; and a transfer chamber which serves as the intermediate unit between the hyperbaric complex and the outside world, and through which all personnel passing from one to the other must undergo compression or decompression.

Small supply locks in the chamber's wall enable food and other small articles to be passed between the inside and outside environments.

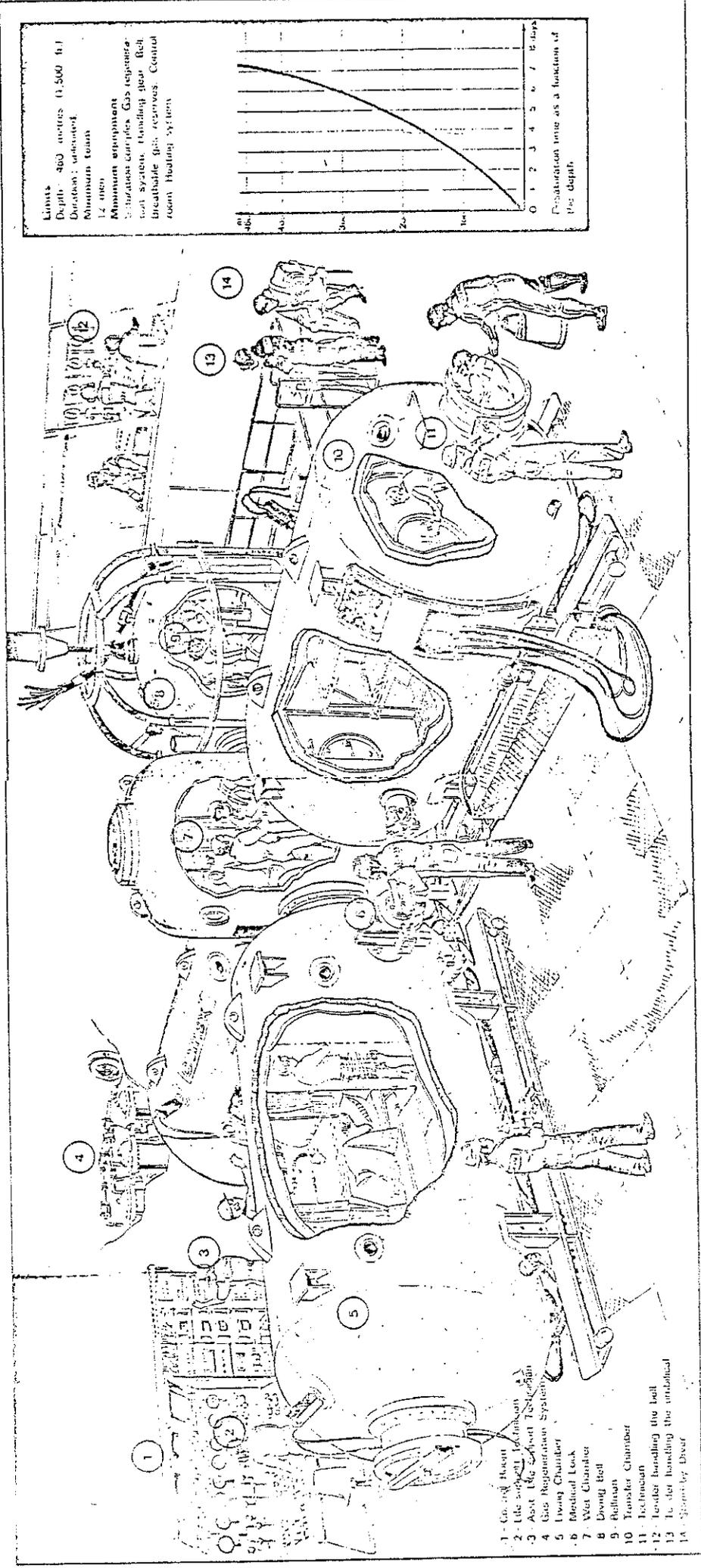
A regeneration system with a booster continuously exhausts the used compressed gas mixture from the chambers, eliminates the carbon dioxide, humidity and any traces of hydrocarbons, reheats it

and returns it to the unit. The pressure level and different environmental parameters such as temperature, humidity, oxygen partial pressure, carbon dioxide content, etc., are continuously monitored and regulated from a control room adjacent to the chambers. The life-support technicians can monitor the movements inside the chambers on television screens without moving from their control consoles. They also broadcast music (and television programs) to the hyperbaric unit and try to ensure that a good psychological ambience prevails among the divers in saturation.

Divers are transferred in saturation between the hyperbaric complex and the bottom by means of a diving bell which can be hermetically clamped to the wet chamber. The bell is controlled entirely from the diving control station. The actual dive takes place exactly like a bounce dive with bell at more than a hundred and twenty meters, with the difference that as this is a saturation system, the depth attained can be as much as four hundred and fifty meters (1,500 ft.) at the present time, and the length of time the divers remain in the water is not limited by considerations other than physical fatigue.

The saturation dive makes it possible to have divers working at the bottom eighteen hours out of twenty-four by using two or three crews in shifts, and allowing for the unavoidable time lapses for changing shifts.

The saturation system ordinarily functions with two twelve-hour shifts. Excluding the actual work, at least eight people are needed for each shift. Namely: a diving supervisor and his assistant, a life-support technician and his assistant, a tender who handles the bell, a tender who handles the umbilical, a stand-by diver and a worksite technician.



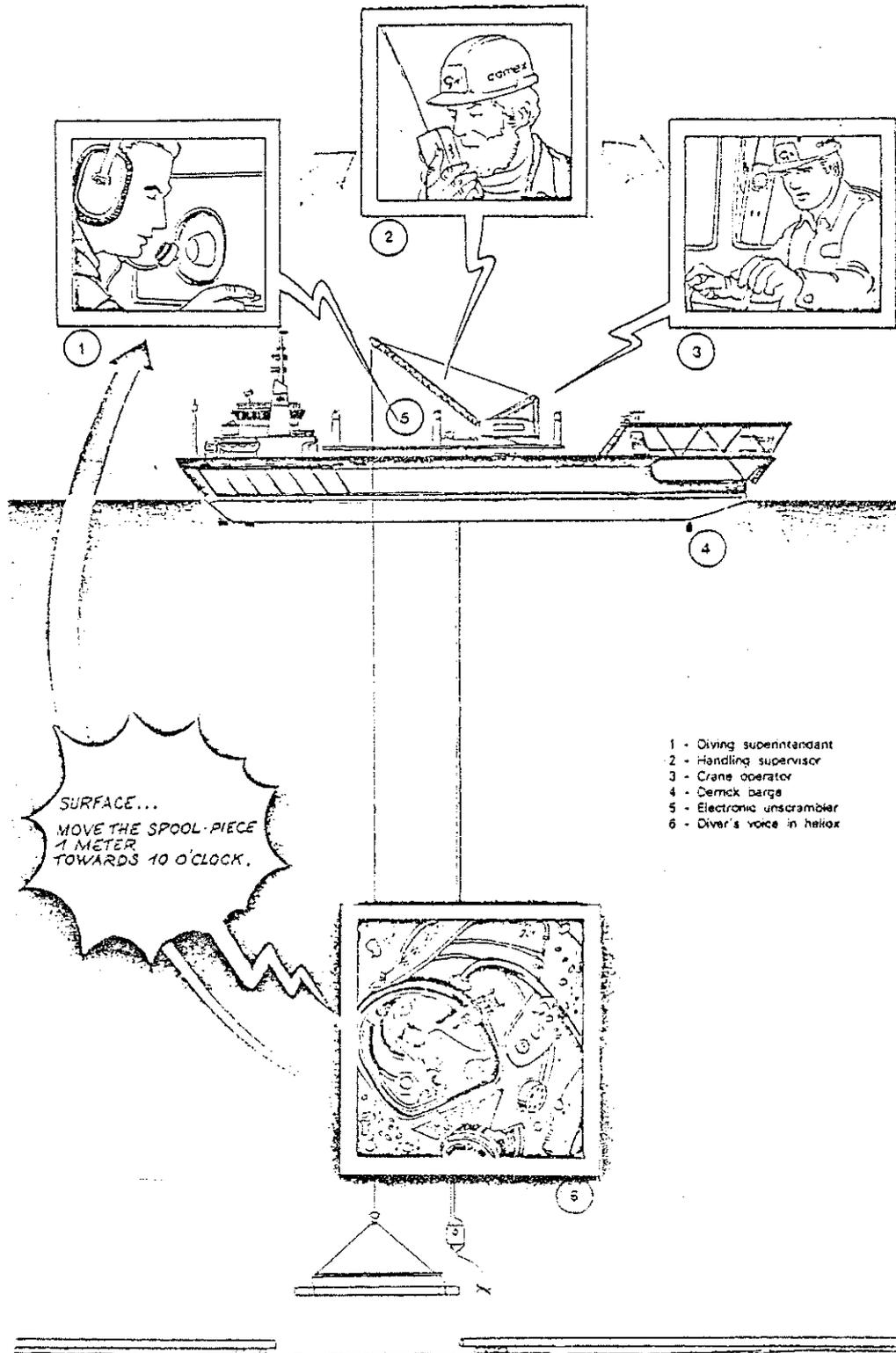
THE COMMUNICATIONS PROBLEM

The obstacles preventing man's penetration of the ocean depths are of a purely physiological nature as the great pressures encountered make it necessary to set up cumbersome and complex equipment whenever human beings are needed to work at the bottom of the sea. Smooth operation of the worksites can also run into another problem of quite a different order, that of communication between the bottom and the surface. In spite of the sometimes considerable depth of water which separates them it is essential to maintain close and continuous collaboration between the divers at the bottom and the technicians on the surface. Let us take as an example a case where divers are supposed to put a spool-piece in place, i.e. a piece of pipeline which may weigh as much as two hundred tons. The spool-piece is launched from a barge by a giant crane capable of handling, perhaps, up to two thousand tons. It must be lowered to the bottom several hundred meters below and deposited in the chosen spot with an accuracy of twenty centimeters (eight inches!).

Transmission of the instructions necessary to perform this tricky maneuver, given by the diver to the crane operator, in itself poses a problem not easy to solve. The situation is somewhat as though a giant crane atop the Eiffel Tower had to be operated at night by a blind crane driver getting orders from a foreigner, whose language he doesn't understand, standing at the foot of the Tower—with a flashlight.

As a matter of fact, the diver's voice which comes through the umbilical is completely distorted due to the heliox he breathes. It would be totally incomprehensible to the diving supervisor if it weren't first unscrambled electronically. As the diving supervisor must stay in direct contact with the bottom at all times, it is his assistant who transmits the divers' instructions by walkie-talkie to the handling supervisor on the bridge of the barge, who in turn conveys them to the crane operator under his command.

You can see that getting this spool-piece down in precisely the right spot is no less a feat for the diver than that of the control tower operator who has to bring a Boeing 747 down onto a handkerchief in a blizzard.



- 1 - Diving superintendent
- 2 - Handling supervisor
- 3 - Crane operator
- 4 - Demck barge
- 5 - Electronic unscrambler
- 6 - Diver's voice in heliox

LES LOIS PHYSIQUES ET LEURS CONSÉQUENCES SUR LA PHYSIOLOGIE

I LA PRESSION

1 - DEFINITION ET UNITES

La pression d'un liquide sur un gaz est la force exercée perpendiculairement sur une surface égale à l'unité de surface. L'unité de pression la plus parlante est le kilogramme-force par centimètre carré :

$$\text{kgf/cm}^2$$

Cependant l'unité pratique légale est le bar et sa sous-unité, le millibar (mb).

En première approximation :

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ kgf/cm}^2$$

2 - PRESSION ATMOSPHERIQUE

L'air constituant l'atmosphère terrestre est pesant : 1,2g/litre environ au niveau de la mer. Il exerce une pression appelée pression atmosphérique. Cette pression mesurée à l'altitude zéro est 1013 mb ou 760 mm de mercure (mm Hg). Elle est susceptible de varier suivant les conditions météorologiques.

Dans la pratique on utilise :

$$1 \text{ Atmosphère} = 1 \text{ bar}$$

La pression atmosphérique diminue lorsque l'on s'élève en altitude. A 5000 mètres, on a 0,5 b, soit la moitié de la pression atmosphérique normale (fig. 9).

3 - PRESSION HYDROSTATIQUE

C'est la pression subie par un corps immergé. Elle dépend de la profondeur. On admet que 10 mètres d'eau de mer (m.e.m.) = 1 bar. Cette pression mesurée avec un manomètre est une PRESSION RELATIVE.

4 - PRESSION ABSOLUE

On a :

PRESSION ABSOLUE = PRESSION RELATIVE + PRESSION ATMOSPHERIQUE

Cette pression absolue s'exprime en ATA (atmosphère absolue)

On peut utiliser :

1 ATA = 1 bar (tableau IV)

II LES EFFETS MECANIQUES DE LA PRESSION

=====

1 - POIDS APPARENT DANS L'EAU

La loi fondamentale qui régit le comportement des corps immergés ou flottant à la surface est appelée le principe d'ARCHIMEDE :

"Tout corps plongé dans un liquide est soumis à une poussée verticale, dirigée de bas en haut, et égale au poids du volume de liquide déplacé".

On appelle "poids apparent dans l'eau" la différence entre le poids d'un corps et la poussée d'Archimède qu'il reçoit. La flottabilité est l'expression inverse du poids apparent. Un corps est en équilibre dans l'eau si son poids apparent est nul. Sa flottabilité est nulle ou indifférente.

Si son poids apparent est positif, il s'enfonce dans l'eau. Sa flottabilité est négative.

Si son poids apparent est négatif, il s'élève dans l'eau. Sa flottabilité est positive.

Lorsque le corps immergé est incompressible, son volume est constant et la poussée qu'il reçoit ne varie pas quelle que soit la profondeur.

Le couple pression x volume d'un ballon de 10 litres d'air à 15°C

AIR	profondeur (m)	pressions		volume (litres)	diamètre (mm)	pourcentage d'aug- mentation de la pres- sion de 10 en 10 mè- tres, à la descente.	masse volumi- que de l'air sec (à 15°C) g/litre
		relat. (bar)	abs. (ATA)				
surface	0	0	1	10	267		1,225
MER à 15°C						100	
	10	1	2	5	212		2,450
	20	2	3	3,33	185	50	3,675
	30	3	4	2,5	168	33	4,900
	40	4	5	2	156	25	6,125
	50	5	6	1,66	147	20	7,350

Tableau IV

Mais si ce corps est compressible (enveloppe souple contenant du gaz,), la poussée qu'il reçoit quand il s'enfonce diminue proportionnellement à la diminution de son volume, ce qui entraîne une augmentation de son poids apparent et de sa vitesse d'enfoncement.

Ce phénomène doit être pris en compte par le plongeur pour évaluer son lestage (ceinture de plomb) pour compenser les variations de volume de son habit et de ses gaz intestinaux. Il apprendra à jouer sur le niveau de remplissage de ses poumons ou se servira de sa bouée pour se rapprocher de la flottabilité nulle.

2 - LA COMPRESSIBILITE DES GAZ

A l'inverse des liquides, les gaz sont compressibles. Comprimer un gaz, c'est diminuer le volume qu'il occupe en augmentant sa pression. L'opération inverse est la décompression.

La variation de pression d'un gaz en fonction de son volume est exprimée par la LOI DE BOYLE-MARIOTTE :

"A température constante le volume d'un gaz varie en raison inverse de la pression absolue tandis que sa densité est directement proportionnelle à la pression absolue".

Ce qui s'exprime encore par la relation :

Pression x Volume = Constante

$$P.V. = Cte = nRT$$

n = nombre de molécules

R = Constante des gaz parfaits

T = Température absolue (T = 273 + t°C)

La constante de la loi de MARIOTTE est proportionnelle à la température :

LOI DE GAY-LUSSAC

$$P = \frac{n}{V} RT = \frac{m}{V} Cte$$

- Variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.

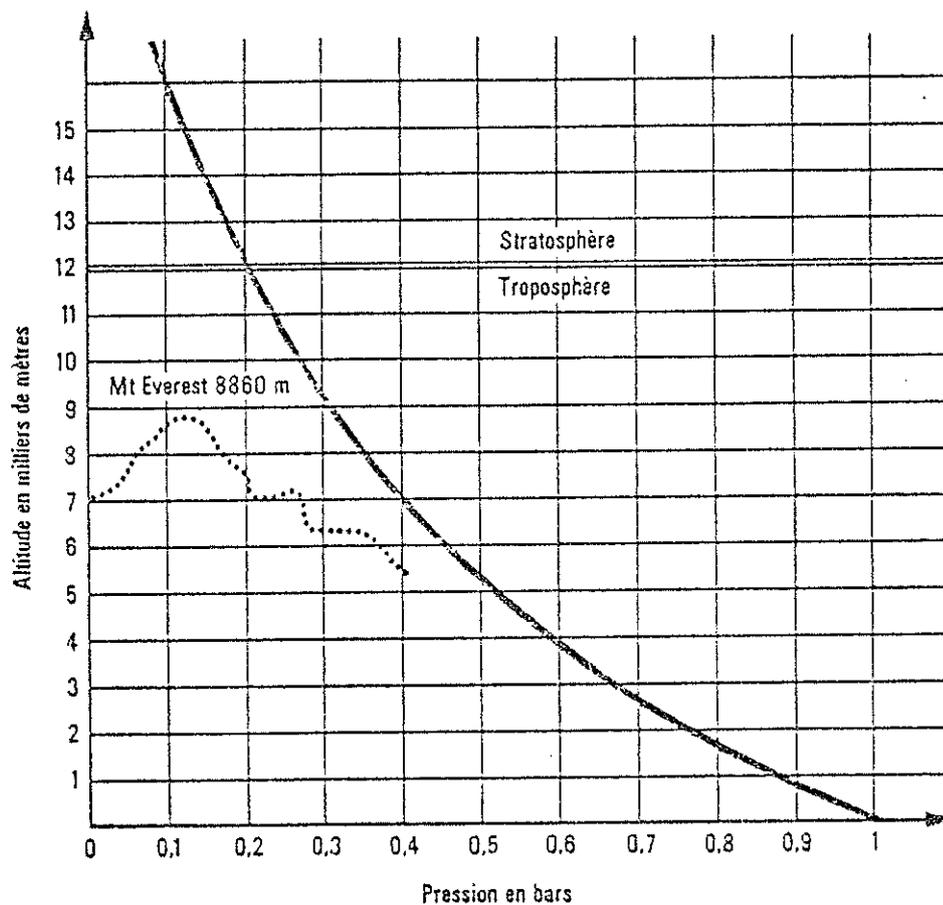


Fig. 9

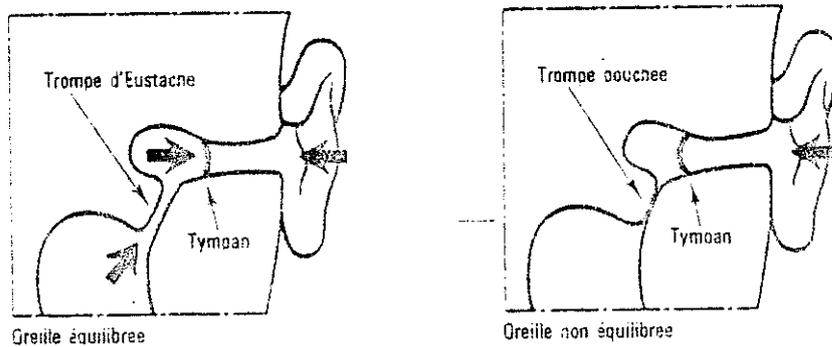


Fig. 10

puisque m , masse du volume V de gaz est proportionnelle au nombre de molécules n de ce gaz contenu dans V .

La pression P est donc proportionnelle à la densité $\frac{m}{V}$ du gaz et inversement (Tableau IV)

La loi de compressibilité des gaz entraîne plusieurs conséquences sur la physiologie et peut parfois être à l'origine d'accidents.

a) Placage du masque et coup de ventouse

Par suite d'une descente trop brutale, d'une fausse manoeuvre du plongeur ou du scaphandrier, la pression intérieure du scaphandre ou de la cuve du masque devient brusquement plus faible que la pression extérieure. Le masque ou le casque du scaphandrier lourd se comporte alors comme une ventouse et il peut se produire de petits saignements de nez et l'éclatement de vaisseaux dans l'oeil ou des symptômes plus graves : fractures osseuses et accidents de décompression. La prévention consiste à expirer de l'air dans le masque et/ou dans l'habit jusqu'à rétablissement des pressions externe et interne.

b) Les barotraumatismes

- De l'oreille :

Ils concernent l'oreille externe et l'oreille moyenne. En surface, la pression sur chaque face du tympan est normalement égale grâce aux communications avec l'extérieur par le conduit auditif et la trompe d'Eustache. Si la pression extérieure varie et dans le cas où la trompe ou le conduit externe sont spasmodés ou obstrués, il s'ensuivra une différence de pression de part et d'autre du tympan avec risques de lésions barotraumatiques pouvant entraîner une diminution de l'acuité auditive (Fig. 10). Ceci se traduit d'abord par une gêne, mais si l'équilibre n'est pas rétabli, une douleur vive apparaît.

La prévention consiste à ne jamais obstruer le conduit auditif externe lors d'une plongée et à faciliter la perméabilité de la trompe d'Eustache, à la descente, soit par béance tubaire (déglutition de salive), soit par manoeuvre de Valsalva (en soufflant dans les narines pincées, et bouche fermée).

- Des sinus :

Lors d'une plongée, ces cavités creuses doivent être en communication avec la pression extérieure sous peine d'apparition de violentes douleurs auxquelles peut succéder une hémorragie. En cas d'obstruction, il faut renoncer momentanément à toute plongée.

- Des dents :

Des barotraumatismes surviennent lorsque les soins dentaires ne sont pas parfaitement exécutés. Ils ont pour origine les variations de pression à l'intérieur d'une cavité dentaire.

c) Les coliques des scaphandriers

Elles sont dues à la distension à la remontée de certaines parties du tube digestif par l'expansion des gaz contenus dans celui-ci. Elles peuvent entraîner de très vives douleurs abdominales.

La prévention consiste à éviter de plonger en cas de troubles digestifs et à ne pas avaler de gaz sous pression.

d) La surpression pulmonaire

Elle a pour cause l'augmentation de pression liée à l'augmentation de volume du gaz contenu dans les poumons au cours d'une décompression brutale (remontée en ballon), pendant laquelle le plongeur retiendrait sa respiration volontairement ou non : spasme de la glotte.

Des lésions pulmonaires peuvent apparaître déjà à la suite d'une faible surpression de l'ordre de 0,1 à 0,3 bar (1 à 3 mètres d'eau). Les conséquences pathologiques de cet accident sont graves : emphysème, pneumothorax, aéroembolisme cérébral. Le traitement consiste en une recompression immédiate en caisson thérapeutique, avec des soins médicaux intensifs. Cet accident touche plus particulièrement les débutants en plongée par manque de contrôle de l'expiration au cours de la remontée, surtout près de la surface où les variations relatives de volume sont les plus grandes.

e) Influence de la densité du gaz sur la respiration

Le plongeur en habitat pressurisé ou dans l'eau en scaphandre autonome ou en scaphandre "souple" va respirer du gaz sous pression.

La densité de ce gaz va s'accroître proportionnellement à la profondeur (loi de BOYLE-MARIOTTE), ce qui a des conséquences sur sa ventilation. Ainsi, un plongeur respirant de l'air, respirera du gaz ayant pour densité 1,22 g/l (à 15°C) en surface, à 50 mètres, la densité sera 6 fois plus élevée : 7,3 g/l. A cette profondeur, le plongeur devra adapter sa respiration à cette forte densité. Une gêne respiratoire peut survenir, puis un essoufflement, si le détendeur qu'il utilise est mal adapté ou mal réglé et si le plongeur effectue un travail au fond. La pression partielle alvéolaire de gaz carbonique (CO₂) s'élève alors au cours de l'exercice.

De plus, la densité du gaz entraîne aussi des perturbations des échanges alvéolo-capillaires d'oxygène (O₂). Ceci est l'un des facteurs limitant la plongée à l'air. On a donc choisi pour aller plus profond des gaz neutres (non métabolisables) plus légers que l'azote : l'hydrogène et l'hélium. Avec ce dernier, on a pu atteindre des profondeurs très importantes. On lira sur ce sujet la thèse de G. IMBERT, 1981.

III LES EFFETS BIOPHYSIQUES ET BIOCHIMIQUES DE LA PRESSION

1 - LA PRESSION PARTIELLE

Les lois de BOYLE-MARIOTTE et de GAY-LUSSAC s'appliquent aux gaz purs. Les mélanges de gaz comme l'air (21 % d'oxygène + 79 % d'azote) ou les mélanges synthétiques respirés en plongée :

- Oxygène-Azote (NITROX)
- Oxygène-Azote-Hélium (TRIMIX ou TERNAIRE)
- Oxygène-Néon
- Oxygène-Hydrogène (HYDROX)

obéissent également à la loi des gaz parfaits.

Ainsi, la loi de DALTON définit la pression partielle d'un gaz dans un mélange gazeux :

"A température constante, la pression partielle exercée par un gaz dans un mélange équivaut à celle qu'il exercerait s'il occupait seul le volume total du mélange".

La pression totale du mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles de ses constituants.

Elle se calcule en multipliant la pression absolue du mélange par le pourcentage de concentration volumétrique du gaz dans le mélange

$$P_p = P_A \times C$$

Fig. 11

$$(ATA = ATA \times \%)$$

Cette loi a des conséquences importantes en physiologie de la plongée et peut parfois être à l'origine d'accidents.

a) L'oxygène

L'oxygène est indispensable à la vie animale. Mais la proportion d'oxygène dans un mélange gazeux peut être :

. soit normale : MELANGE NORMOXIQUE

pression partielle d'O₂ inspiré : PIO₂ = 0,21 ATA (air en surface)

. soit supérieure à la normale : MELANGE HYPEROXIQUE

$$PIO_2 > 0,21 \text{ ATA}$$

. soit inférieure à la normale : MELANGE HYPOXIQUE

$$PIO_2 < 0,21 \text{ ATA}$$

- L'hypoxie, bien étudiée au siècle dernier par P. BERT (*LA PRESSION BAROMETRIQUE, 1878*), touche les alpinistes ou les sujets respirant en enceinte dépressurisée.

Pour une PIO₂ = 0,15 ATA (Air à 2550 m d'altitude), il n'apparaît pas de troubles car l'organisme compense ce manque d'oxygène par une adaptation respiratoire.

Pour une PIO₂ = 0,12 ATA les premiers symptômes apparaissent.

A 0,1 ATA peut survenir une perte de conscience. L'apparition de cette syncope hypoxique peut être reculée par une adaptation progressive à des PIO₂ de plus en plus basses.

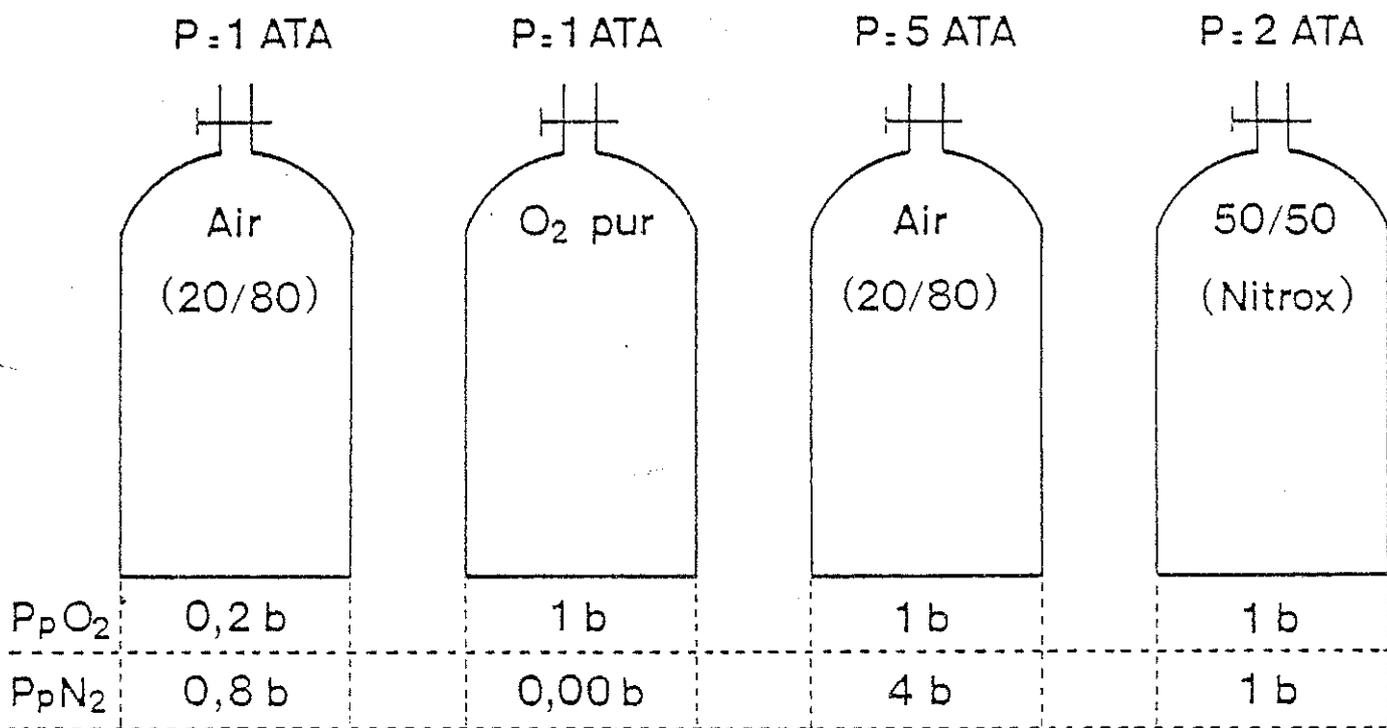


Fig. 11

EXEMPLES DE CALCUL DE PRESSIONS PARTIELLES : P_p

- L'hyperoxie. On considère classiquement,

- d'une part, les effets toxiques sur le système nerveux central (S.N.C.) : effet P. BERT pour des pressions partielles d'oxygène très élevées, $\geq 1,7$ ATA = HYPEROXIE AIGUË
- et d'autre part, les effets toxiques sur l'appareil respiratoire : effet LORRAIN-SMITH (1887) pour des pressions partielles moins élevées $\geq 0,5$ ATA) mais respirées plus longtemps (de 6 heures à plusieurs jours) = HYPEROXIE CHRONIQUE

Hyperoxie aiguë

Lorsque la PIO_2 dépasse 1,7 ATA (O_2 pur respiré au-delà de 7 mètres de profondeur) des symptômes d'intoxication apparaissent, dans un délai d'autant plus court que la PIO_2 est plus élevée (Fig.12). Les symptômes,

- réduction du champ visuel,
- tintements auditifs,
- tremblements des lèvres,
- secousses musculaires,
- accélération de la fréquence cardiaque,
- vasodilatation

peuvent précéder ou non de peu de temps la crise convulsive paroxystique de type épileptique. Cette crise se déroule en trois phases, le plus souvent sans préavis :

- . phase tonique de contractures généralisées
- . phase clonique de convulsions
- . phase de dépression post-convulsive

Après interruption de l'inhalation de l'oxygène à la pression partielle toxique, la crise cesse spontanément.

Du point de vue préventif, le règlement de la MARINE NATIONALE interdit aux scaphandriers de dépasser en oxygène pur la profondeur de 7 mètres, alors que le décret du MINISTÈRE DU TRAVAIL (1974) interdit la plongée à l'oxygène pur et limite son utilisation à la décompression : 6 mètres dans l'eau (1,6 ATA) et 15 mètres en caisson sec (2,5 ATA). La PIO_2 dans les mélanges (Nitrox et HélioX) doit être inférieure à 1,6 ATA. Les mécanismes impliqués dans cette crise sont étudiés en France par l'équipe du C.E.T.R.B. de l'Hôpital Sainte-Anne à TOULON.

Temps de latence précédant la crise convulsive
neurotoxique suivant la profondeur

- conditions de confort, au repos et au calme (en caisson)
- - - conditions d'effort physique, agitation, froid (dans l'eau)

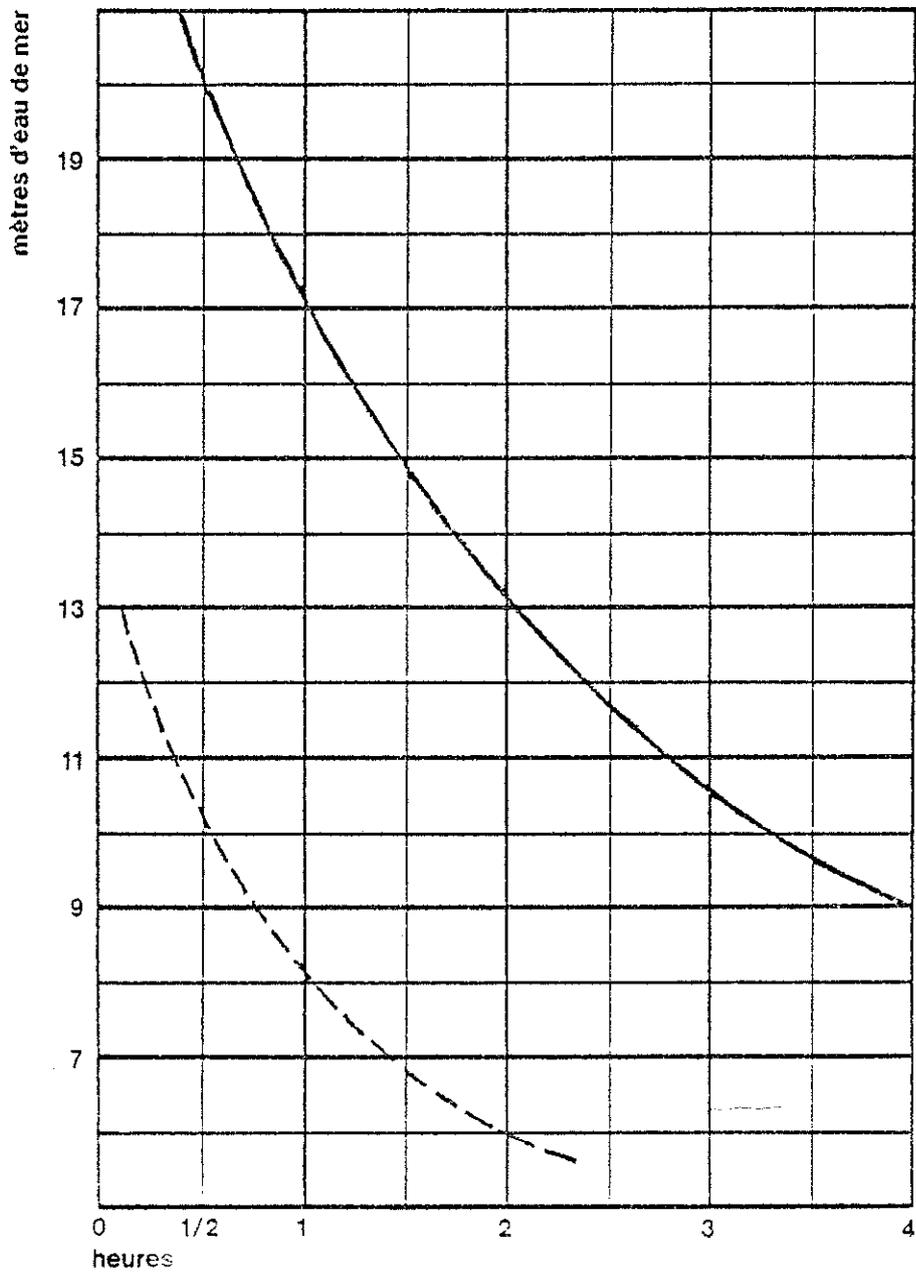


Fig. 10

HYPEROXIE AIGUË

hyperoxie chronique

Lorsque la PIO_2 dépasse 0,5 ATA (14 mètres d'air) et que la durée d'exposition est longue (plusieurs jours), l'atteinte se situe au niveau pulmonaire. Elle se traduit essentiellement par une sensation de douleurs rétrosternales, par une toux et par une diminution de la capacité vitale (C.V.). Il s'agit de réactions à évolution lente.

L'optimisation des quantités d'oxygène utilisables lors des plongées de longue durée à l'air (ou Nitrox) ou au mélange (Héliox) est un sujet important de recherche à la COMEX (PUBLICATIONS N° II et III).

Il semble exister une adaptation pulmonaire à l'hyperoxie chronique (thèse de H. BURNET, 1981).

b) Le gaz carbonique

L'anhydride carbonique ou CO_2 est un produit du métabolisme. Dans l'air respiré en surface, son taux dépasse rarement 1 %. Cependant la $PICO_2$ va augmenter avec la profondeur et peut devenir toxique. (Tableau V). Mais dans certaines conditions de travail, à cause d'une mauvaise élimination pulmonaire, le CO_2 peut être en excès dans les tissus, le sang, les poumons et provoquer l'essoufflement du plongeur.

De plus, ce CO_2 endogène semble jouer un rôle dans l'apparition et le grossissement des bulles de gaz inerte produites en décompression (Thèse de M.C. BIAGGI, 1975).

c) Les gaz inertes

Ce sont des gaz diluants, non métabolisables par les cellules de l'organisme. Pour les plongées actuelles, les diluants utilisés sont l'azote et l'hélium, seuls, ou en association (mélanges ternaires). Cependant, l'hydrogène, le néon, l'argon et le xénon peuvent également être employés.

= L'azote

C'est le gaz neutre de l'air. Au-delà de 30 mètres de profondeur, le plongeur à l'air commence à ressentir les premiers symptômes de la NARCOSE A L' AZOTE : sentiment de bien-être, euphorie légère comparable au début d'une ivresse alcoolique - c'est l'IVRESSE DES PROFONDEURS. Cet état cesse instantanément en quelques mètres de remontée. Mais si le plongeur continue

TOXICITÉ DU CO₂ EN FONCTION DE SA PRESSION PARTIELLE

	Profondeur et pression		% CO ₂	P _i CO ₂		Effets Physiopathologiques
	m.e.m	ATA		ATA	mb	
Air à l'entrée du compresseur	0	1	1	0,01	10	Insensibles
AIR RESPIRÉ PAR LE PLONGEUR	10	2	1	0,02	20	Légère hyperventilation
	30	4	1	0,04	40	Essoufflement Maux de tête
	50	6	1	0,06	60	Essoufflement Narcose
	60	7	1	0,07	70	Essoufflement, Vertiges, vomissements Narcose grave
	70	8	1	0,08	80	Vertiges, stupeur Perte de connaissance

Tableau V

de descendre à 50-60 mètres, le bien-être peut céder la place à une impression de malaise ou d'angoisse selon les sujets. Plus profondément, à 70 mètres environ, ces symptômes s'accompagnent de perturbations mentales pouvant être à l'origine d'actes dangereux, parfois mortels. Les profondeurs d'apparition de ces symptômes sont variables suivant l'entraînement et la forme physique des sujets, mais également suivant le travail effectué au fond (effet potentialisateur du CO_2 endogène). Le "niveau" de narcose d'un sujet peut être évalué par différents tests électroencéphalographiques (EEG) : potentiels évoqués visuels et auditifs; par des tests psychomoteurs : dextérité manuelle et barrages de signes (Thèse de VIGREUX, 1970).

La réglementation française (Décret 1974) limite l'utilisation de l'air à 60 mètres et à 5 ATA dans les mélanges synthétiques (Nitrox).

▪ L'hélium

C'est le gaz diluant qui a permis à l'homme de plonger le plus profond en caisson (686 m, U.S.A.) et en mer (501 mètres, COMEX, France). Ses effets à très grande profondeur sur le système nerveux sont difficiles à dissocier de l'effet de pression "per se" (pression hydrostatique). En effet, des perturbations d'origine nerveuse apparaissent chez le poisson à la profondeur de 1000 mètres en l'absence de gaz inerte. L'hélium et l'azote pourraient compenser ces symptômes (Thèse de BELAUD, 1975).

Ces troubles nerveux sont désignés sous le terme de Syndrome Nerveux des Hautes Pressions (S.N.H.P.) décrit chez l'homme par R. BRAUER, S. DIMOV, X. et P. FRUCTUS, P. GOSSET et R. NAQUET, en 1969. Des travaux de recherche entrepris à COMEX depuis cette date ont permis de réduire le S.N.H.P. chez l'homme et chez l'animal et d'atteindre des grandes profondeurs. On lira sur ce sujet la thèse de J.C. ROSTAIN, 1980 et les PUBLICATIONS N° IV et V.

▪ L'hydrogène

Ce gaz diluant, compte tenu des risques d'explosion qu'entraîne sa manipulation, et malgré sa densité plus faible, ne semble pas présenter beaucoup d'avantages par rapport à l'hélium (Thèse de J.C. ROSTAIN, 1980).

▪ Le néon

Il a peu été utilisé en plongée; il présente cependant des avantages : pas d'effet narcotique, moindre distorsion de la voix et conductibilité thermique plus faible que l'hélium.

LAMBERTSEN (1976) n'a pas mis en évidence de limitation du travail musculaire chez l'homme respirant un mélange oxygène-néon à 360 mètres, bien que le néon soit plus dense que l'hélium.

▪ L'argon et le xénon

Ce sont des gaz plus narcotiques que l'azote; on pourrait envisager de les utiliser pour compenser le S.N.H.P.

2- LA DISSOLUTION DES GAZ DANS LES LIQUIDES

a) Saturation d'un liquide

Les gaz se dissolvent dans les liquides. La quantité maximale de gaz qu'un liquide peut dissoudre à une pression et à une température donnée, s'appelle la SATURATION du liquide. La quantité de gaz dissous varie en fonction de la pression suivant la LOI DE HENRY :

"A température donnée, la quantité de gaz dissous dans un liquide jusqu'à saturation est proportionnelle à la pression de ce gaz au contact du liquide".

Dans le cas d'un mélange de gaz, la quantité dissoute sera, pour chacun d'eux, proportionnelle à sa pression partielle. Cette quantité de gaz dissous à saturation diminue si la température augmente.

De plus, elle est fonction de la nature du gaz et du liquide : coefficient de solubilité du gaz par rapport à un liquide donné (Tableau VI).

b) Pression d'un gaz dissous dans un liquide

La pression de saturation du gaz dissous est proportionnelle à la pression du gaz libre.

$$P_S = S \times P_A \times C$$

P_S = pression de saturation du gaz dissous (ATA)

S = coefficient de solubilité du gaz pour le liquide à température donnée

P_A = pression absolue (ATA)

C = concentration du gaz dans le mélange (%)

c) Courbes de saturation et de désaturation

La dissolution d'un gaz dans un liquide n'est pas instantanée. C'est un phénomène progressif qui met un certain temps à atteindre l'état de saturation (Fig. 13).

Les courbes de saturation et de désaturation représentant la variation de la pression P par rapport au temps t , sont de forme exponentielle avec asymptote (Fig. 14).

$$p = P_S (1 - e^{-kt})$$

k = coefficient dépendant de la période de la courbe.

Si au temps $t = 0$, la pression de gaz dissous = P_0 , on a :

$$p - P_0 = (P_S - P_0) (1 - e^{-kt})$$

Pour les calculs on prendra :

$$e^{-kt} = 0,5^{t/H}$$

H = période de l'exponentielle

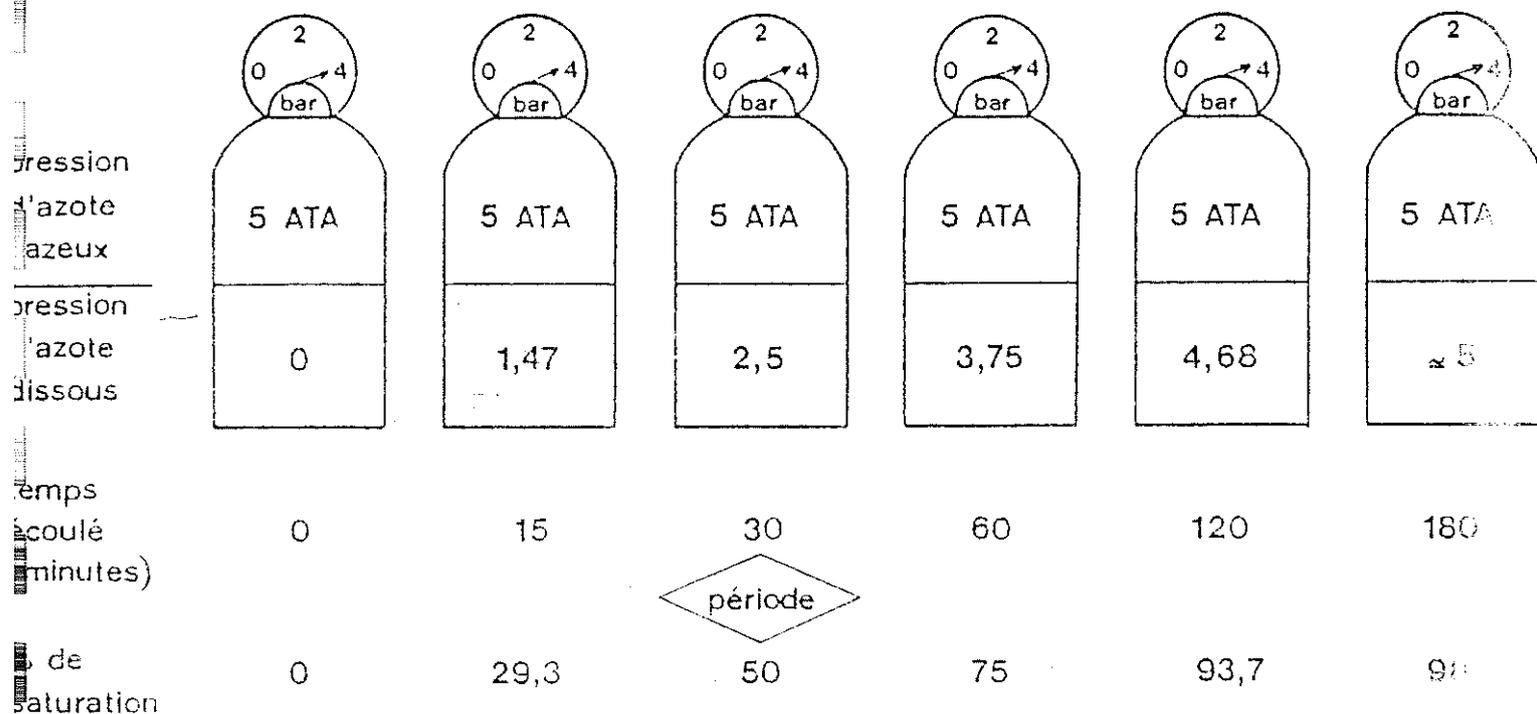
car

$$k = \frac{0,693}{H} \quad \text{et} \quad e^{-0,693} = 0,5$$

Gaz	Masse		Solubilité à 38° C =====	
	moléculaire	volumique	ml/L dans l'eau	ml/L dans l'huile
Azote (N ₂)	28	1,25	13	61
Oxygène (O ₂)	32	1,43	29(25°C)	120 (40°C)
Argon (Ar)	40	1,78	26	140
Hélium (He)	4	0,18	8,6	15

0'après le "Underwater Handbook" 1976

Tableau VI



La dissolution du gaz dans le liquide s'opère dans le temps suivant une courbe exponentielle, caractérisée par sa période -ici 30 minutes.

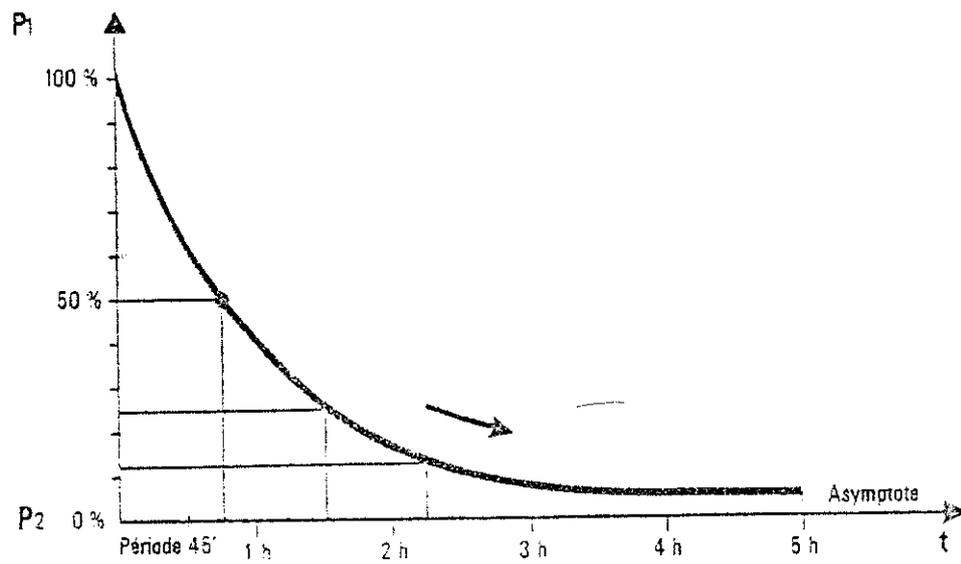
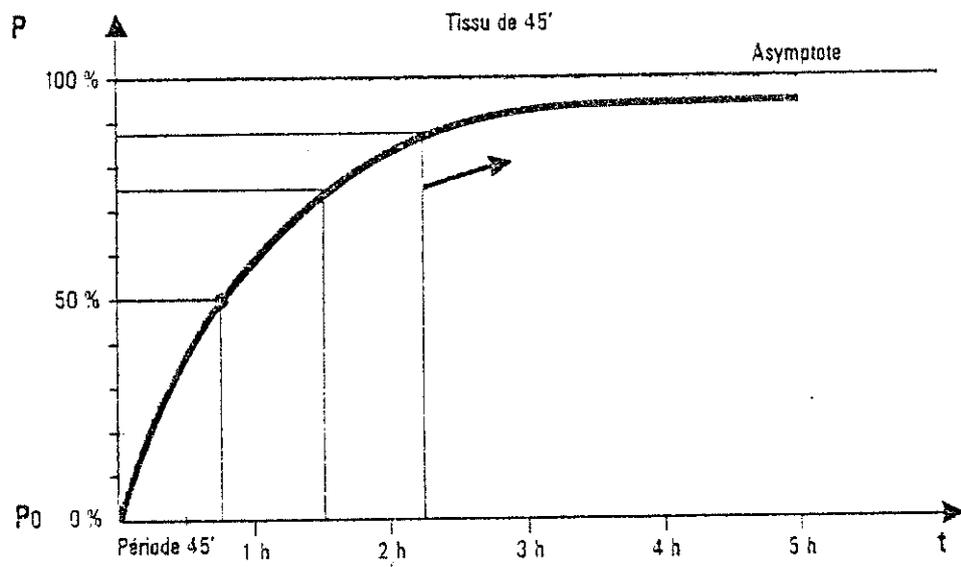


Fig. 14

COURBES DE SATURATION ET DE DESATURATION D'UN GAZ
DANS UN LIQUIDE EN FONCTION DU TEMPS

Ces exponentielles de saturation et désaturation sont définies par leur période H (temps nécessaire à la demi-saturation). BOYCOTT, DAMANT et HALDANE en 1908, BEHNKE en 1930 puis WORKMAN en 1965 ont montré que le corps humain pouvait grossièrement être assimilé à un ensemble de compartiments appelés "TISSUS" caractérisés par leur période H, et que tout se passait comme si ces tissus se saturaient et se désaturaient indépendamment les uns des autres. Cette schématisation du corps humain avait pour avantage de jeter les premières bases de calcul des tables de décompression.

Ces tissus sont représentatifs d'un ensemble de fonctions de transfert du gaz, mais non d'un organe ni d'un territoire anatomique. Leur période est dépendante essentiellement de deux facteurs : la PERFUSION, c'est-à-dire le transport du gaz et la DIFFUSION, passage du gaz à travers les membranes biologiques.

Les gaz pris en compte pour le calcul des décompressions sont les gaz inertes non métabolisables : azote, ou hélium pour l'essentiel, et on devra tenir compte des propriétés physiques qui leur sont propres : coefficient de solubilité et de diffusion.

En première approche, on considère que le sang est le tissu le plus rapide (période de 2 à 3 minutes), le muscle un tissu moyen (20 à 40 minutes) et la moëlle osseuse l'un des tissus les plus lents (période de 120 à 240 minutes et peut-être plus).

Mais la période réelle des compartiments physiologiques n'est pas connue.

Les courbes exponentielles permettent donc de calculer la pression de gaz inerte dans tous les tissus de l'organisme après un temps "t" passé à une profondeur donnée.

d) Sursaturation

C'est l'état d'un liquide dans lequel la tension du gaz dissous est supérieure à la pression du gaz libre en contact avec lui. A la remontée la tension p du gaz inerte dans chacun des tissus considérés va être supérieure à la pression ambiante. Il y aura donc sursaturation des tissus. Pour éviter une sursaturation gazeuse tissulaire trop importante à l'origine des bulles, il est nécessaire d'établir des "critères" de remontée

ou coefficient de SURSATURATION CRITIQUE, C_S . Pour HALDANE il s'agit d'un rapport de la pression de gaz tissulaire sur la pression ambiante. Pour WORKMAN il s'agit d'une différence entre la tension tissulaire p du gaz inerte et la pression absolue : $\Delta P = p - P_A$

Cette différence est exprimée par une pression limite : M ("M value") variable en fonction de la nature du gaz, de la profondeur et du tissu considéré.

Ces coefficients de sursaturation critique ont été corrigés au fur et à mesure lors d'expériences sur le terrain et d'essais de table. Actuellement, ils ne sont pas connus avec précision.

En fonction des tissus et des valeurs M choisis, on pourra déterminer le temps nécessaire à la décompression pour ne pas dépasser les limites de sursaturation que l'on s'est fixées. On peut ainsi calculer de proche en proche la durée des paliers de décompression qui constituent une table de décompression (Fig. 15). Un exemple de calcul est présenté dans le livre de X. FRUCTUS et R. SCIARLI "LA PLONGEE - SANTE, SECURITE", 1980.

Mais ce principe de calcul, s'il a permis dans le passé de faire de gros progrès pour la sécurité des décompressions, est cependant par trop théorique. La réalité semble, hélas, beaucoup plus complexe. En effet, même lorsque ces critères, aussi affinés soient-ils, sont respectés, on sait qu'il se produit tout de même des bulles dans l'organisme à la remontée -Par diverses méthodes de détection explicitées dans les travaux qui suivent, nous avons pu voir, entendre et mesurer ces bulles. Ceci nous a permis de modifier et de sécuriser nos critères de remontée, mais également de mettre en évidence notre manque de connaissance des phénomènes physiologiques réels et des conséquences physiopathologiques qu'ils peuvent entraîner.

e) La bulle : les moyens de détection

Nous avons utilisé trois méthodes de détection directe :

- * La visualisation "*in vitro*" à l'aide d'un modèle physique et "*in vivo*" chez l'animal après plongée à l'air : PUBLICATIONS N° VI et VII.
- * La détection des bulles tissulaires par mesure d'impédance bio-électrique chez l'animal après plongée à l'air : PUBLICATION N° VIII

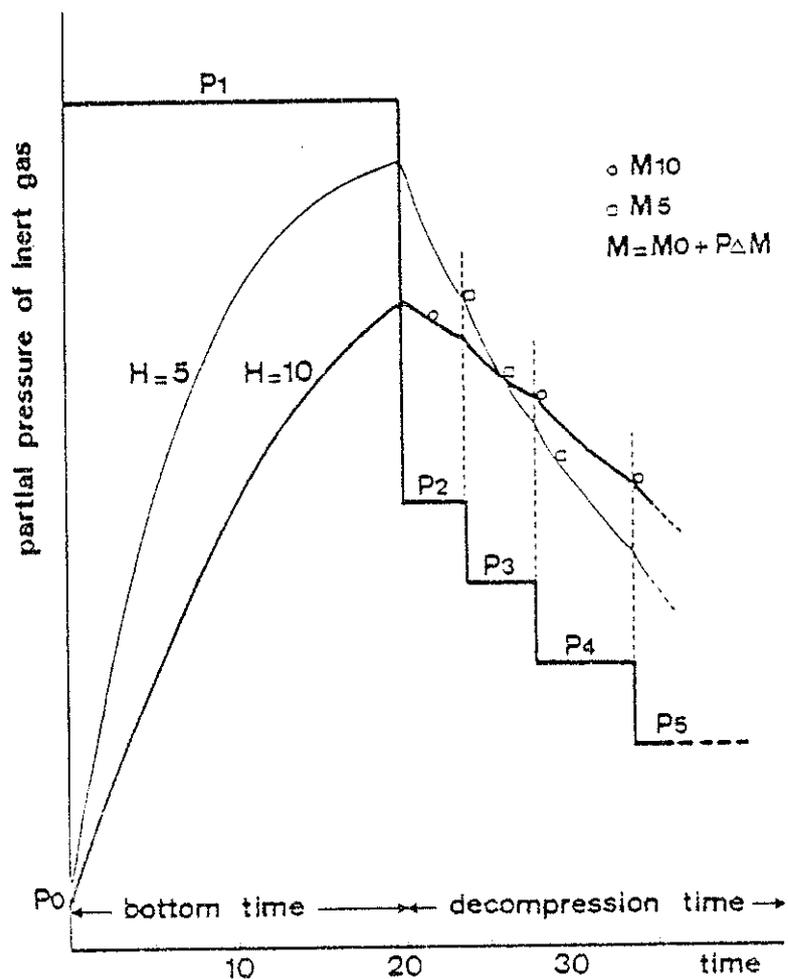


Fig. 15

EVOLUTION DES CHARGES DES TISSUS $H = 5$ MIN ET $H = 10$ MIN. AU COURS DU SEJOUR (BOTTOM TIME) A UNE PRESSION P_1 ET AU COURS DE LA DECOMPRESSION PAR PALIERS : P_2 ; P_3 ; P_4 ; P_5 ... LES VALEURS M CHOISIES POUR CHAQUE TISSU, VARIABLES EN FONCTION DE LA PRESSION P ($M = M_0 + P \Delta M$), PERMETTENT DE DETERMINER LA DUREE DES PALIERS.

* La détection des bulles veineuses circulantes par méthode ultrasonore à effet "DOPPLER" chez l'homme après plongée à l'air : PUBLICATIONS N° IX, X, XI et XII et lors des plongées aux mélanges HélioX : PUBLICATIONS N° XIII, XIV, XV, XVI et XIX.

et une méthode de détection indirecte par évaluation de la chute plaquettaire après plongée à l'air et à l'HélioX chez l'animal : PUBLICATIONS N° XVII et XVIII.

De tous les moyens de détection des embolus gazeux, c'est la technique DOPPLER qui est actuellement la plus utilisée chez l'animal, par capteur implanté, et chez l'homme, par capteur transcutané. Cependant, cette méthode est limitée aux bulles circulantes dans les gros troncs veineux ou au niveau du cœur droit, et elle ne permet pas de détecter les bulles stationnaires formées *in situ* ou bloquées dans la circulation capillaire ou veineuse : PUBLICATION N° XIX. Ces investigations, qui permettent de juger du dégazage, sont faites parallèlement à une étude clinique chez l'homme et chez l'animal : PUBLICATIONS N° XIII, XIV, XVI.

f) Physiopathologie des accidents de décompression

Malgré les importants progrès faits dans le domaine de la sécurité des tables de décompression, des accidents subsistent. Ils peuvent avoir pour origine une défaillance technique (remontée en ballon de la tourelle par exemple) ou bien apparaître chez un sujet plus "susceptible". Cependant, dans la majorité des cas en plongée industrielle courante (profondeur < 300 mètres), les accidents graves de décompression : accidents neurologiques centraux ou médullaires, accidents vestibulaires, sont rares. Il subsiste toutefois des accidents plus bénins de type douleurs articulaires ou musculaires, "Bends" (du mot anglais "courbé") : PUBLICATION N° XIX.

Les mécanismes pathogéniques de ces accidents de décompression ne sont pas encore bien connus, nous nous contenterons d'en donner un schéma résumé (fig. 16)

Les bulles endogènes peuvent également produire des réactions bio-humorales (fig. 17) à l'origine de la MALADIE DE DECOMPRESSION (MDD) et de l'OSTEONECROSE ASEPTIQUE (Thèse de CH. BLACHERE, 1980).

SCHEMA PATHOGENIQUE DE L'ACCIDENT DE DECOMPRESSION

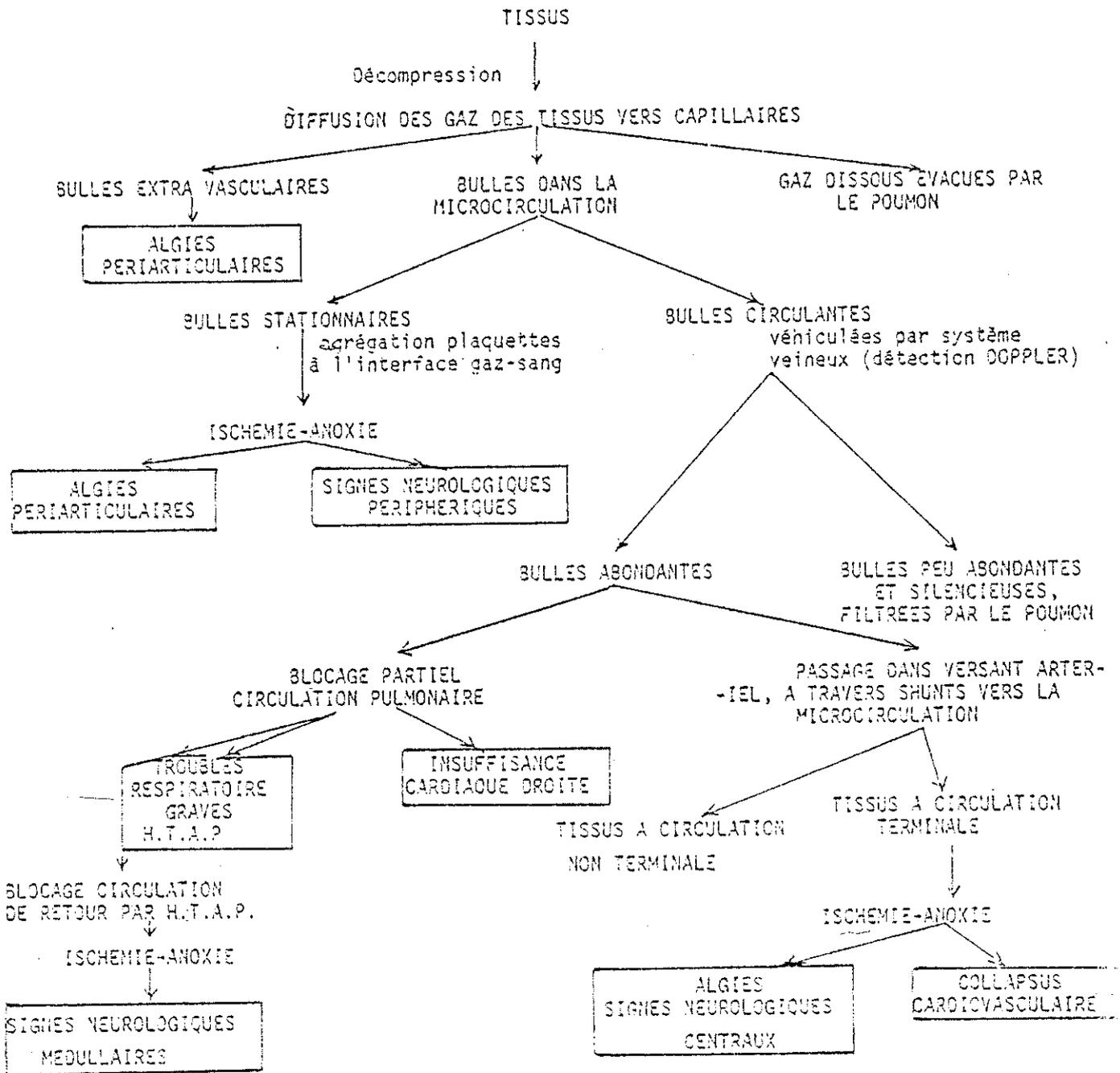


Fig. 13

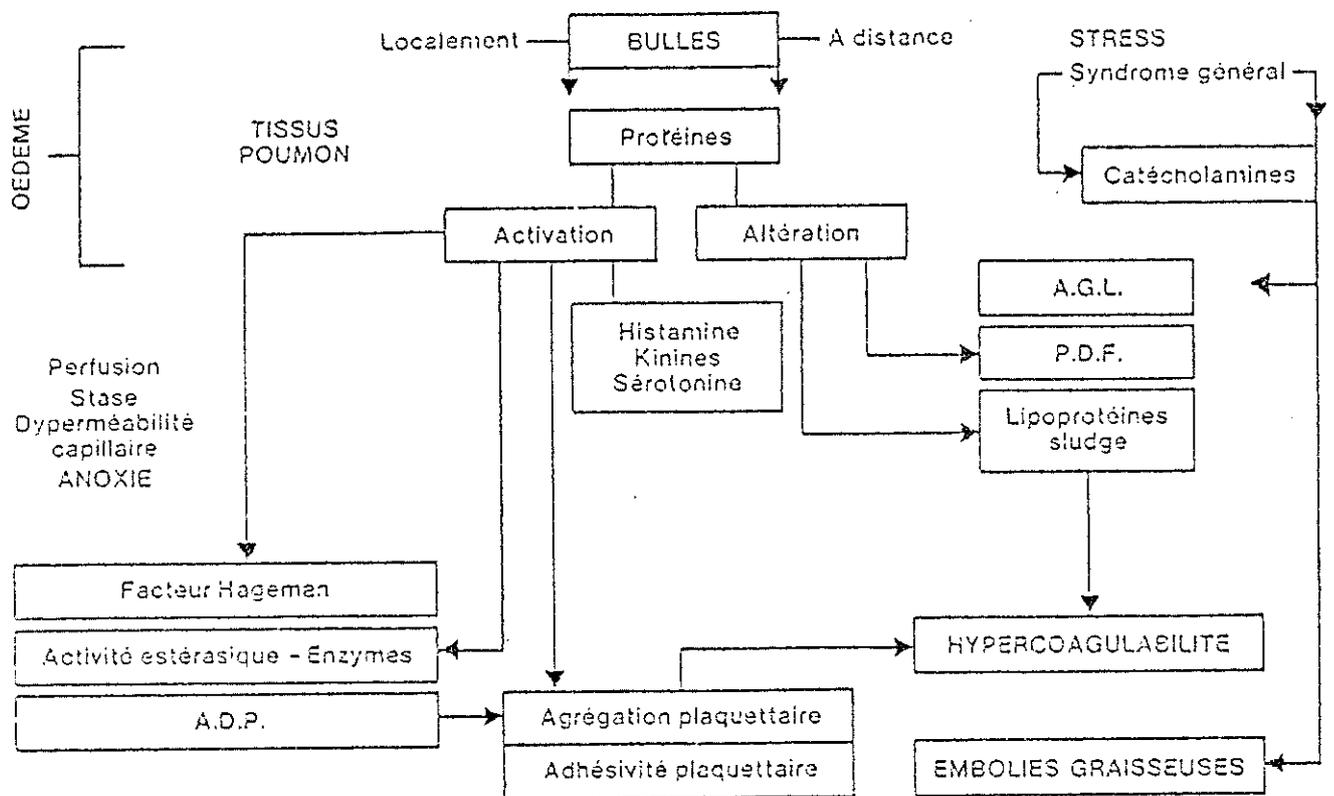


Fig. 17

REACTIONS BIO-HUMORALES PRODUITES PAR LES BULLES

g) Facteurs favorisant les accidents de décompression

Parmi les facteurs que nous avons plus spécialement étudiés, nous citerons :

- . La profondeur de la plongée : PUBLICATION N° XIX
- . Les conditions de plongée : au sec ou dans l'eau : PUBLICATIONS N° IX, XI et XII
- . L'exercice musculaire effectué après plongée : PUBLICATIONS N° IX et XX
- . La "forme" physique des sujets : PUBLICATIONS N° IX
- . Et le pourcentage de tissus gras.

h) Essais pharmacologiques

Les médicaments ont depuis longtemps été utilisés comme thérapeutique préventive des accidents de plongée. Nous avons pratiqué chez l'animal des essais pharmacologiques qui ont également permis une meilleure compréhension des mécanismes : PUBLICATIONS XX, XXI et XXII

IV AUTRES EFFETS DE LA PLONGEE SUR LA PHYSIOLOGIE1 - ALTERATION DE LA VISION ET DE L'OUÏE

Dans l'eau, la vision est déformée et diminuée. Les objets apparaissent plus gros et plus rapprochés, et le champ visuel du plongeur est rétréci (fig. 12). Dans certains cas, des objets sont vus par réflexion sous la surface de l'eau, dans une direction différente de leur position réelle. Les couleurs sont absorbées sélectivement avec la profondeur. Enfin, la visibilité est diminuée par la perte d'intensité de la lumière.

L'ouïe est également modifiée. Les ondes sonores se propagent dans l'air à une vitesse d'environ 330 m/seconde, dans l'eau à 1550 m/s. Les plongeurs perçoivent très bien et sur de grandes distances les sons émis dans l'eau. Les explosions sont très fortement ressenties dans l'eau. On considère que la surpression transmise par l'onde de choc est dangereuse jusqu'à 300 mètres

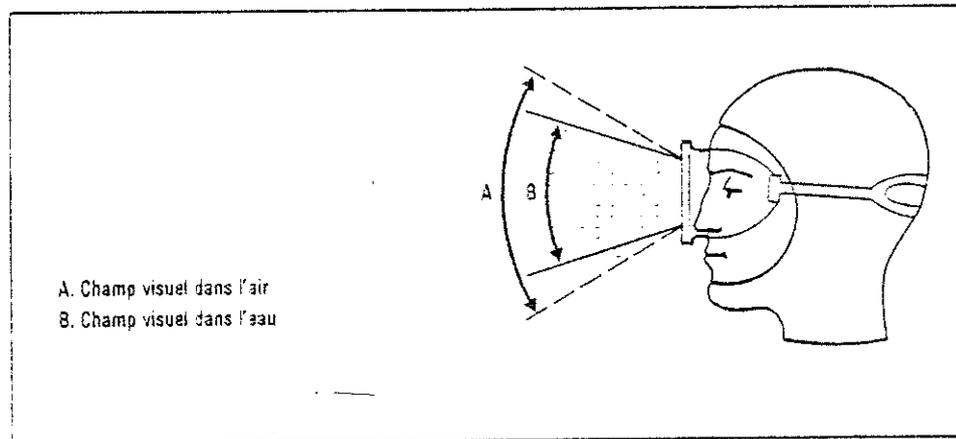
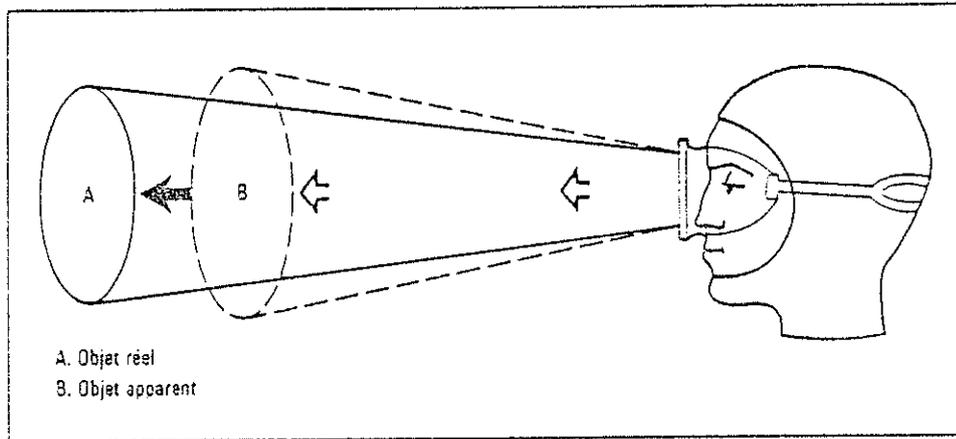


Fig. 18

LA VISION DANS L'EAU

environ pour une charge de 1 kg et jusqu'à 3000 mètres pour une charge de 1 tonne.

2 - LA NOYADE

Il s'agit d'un accident qui n'est pas propre à la plongée. On distingue deux types de noyade :

- La noyade par asphyxie, lorsque la victime a respiré de l'eau
- La noyade syncopale, par arrêt du coeur et de la respiration, après immersion brutale dans l'eau froide, par exemple.

Lorsqu'il y a inondation des voies respiratoires, le mécanisme est différent selon que la noyade a lieu en eau douce ou en eau de mer. En eau douce, l'eau pénètre dans le sang par osmose à travers les parois alvéolaires avec pour effet une hémodilution sanguine et une hémolyse des hématies. En eau de mer, au contraire le plasma sanguin passe dans les poumons d'où une hémococoncentration.

Dans les deux cas il se produira des lésions alvéolaires, avec oedème aigu du poumon. Lorsque la noyade survient en plongée, cela peut se doubler à la remontée, d'un accident de décompression.

Le traitement de la noyade est exposé par le Dr R. SCIARLI dans "LA PLONGEE - SANTE, SECURITE", 1980.

3 - LES PROBLEMES THERMIQUES

Les échanges thermiques se font toujours au détriment de l'homme immergé. Il existe 4 modalités d'échange :

- La conduction : par contact avec un solide ou un fluide.
Elle intervient peu en conditions de plongée.
- Le rayonnement ou radiation : par échange direct de chaleur, à distance, entre deux corps, indépendamment de la température ambiante.
- La convection : par circulation du fluide environnant
- L'évaporation : par changement d'état liquide à vapeur.
Ce processus est constant au niveau du poumon qui sature en vapeur d'eau les gaz respirés.

Ces deux dernières modalités sont les plus importantes en plongée. Elles dépendent du milieu ambiant : eau, mélanges respirés -air ou Hélio-, et de la pression.

Le confort thermique correspond à une température centrale proche de 37°C et à une température cutanée de 33-34°C. Ces conditions sont réalisées lorsque la température de l'air est de 25°C et de 33-34°C en eau calme. Pour des températures de l'eau plus faibles une protection thermique est nécessaire : vêtement néoprène, humides ou étanches (Fig. 19).

Pour les plongées au mélange Hélio à partir de 60 mètres et pour des travaux de longue durée (jusqu'à 8 heures) dans l'eau, souvent froide, (3-4°C en Mer du Nord), l'habit à eau chaude est nécessaire, et même le réchauffeur de gaz (C. LEMAIRE, 1975).

°F °C

SANS PROTECTION THERMIQUE

AVEC PROTECTION THERMIQUE

77 - 25

Au repos, frissons au bout de 1 à 2 heures

Indispensable au-dessous de 21°C

68 - 20

Si travail musculaire, durée approximative de la tolérance au refroidissement :

21°

Veste (épaisseur 2 à 3 mm)

Bermuda

1 H 1/2

18°

Vêtement néoprène complet

(épaisseur 4 à 5 mm) avec

cagoule, gants, chaussons

1/2 H

59 - 15

1/4 H

14°

Même ensemble, mais avec

sous-vêtement. Ou vêtement

semi-humide type Sporasub,

sans sous-vêtement

50 - 10

10°

Vêtement sec étanche,

type Comex-Pro

ou

semi-humide type Sporasub

avec sous-vêtement

avec moufles sur gants

et double chausson

41 - 5

32 - 0

0°

TOLERANCE AUX PERTES CALORIQUES EN IMMERSION
MOYENS DE PROTECTION SUIVANT LA TEMPERATURE AU FOND

CONCLUSION

Ce tour d'horizon des divers problèmes qui s'opposent à une intégration totale de l'homme au milieu sous-marin, montre que plus la profondeur augmente plus la technologie utilisée est lourde, et plus la marge d'adaptation de l'homme est étroite.

L'homme se heurte en effet à un certain nombre d'obstacles : pression, température, lumière, éloignement...

Même si physiologiquement il peut descendre à de grandes profondeurs, encore faut-il qu'il soit capable d'y effectuer des travaux; or, les réalisations pratiques sont souvent en retard sur les découvertes scientifiques : ainsi l'opération JANUS IV a montré en 1977 qu'il était possible d'accomplir des tâches sous-marines à 460 mètres, alors qu'actuellement les chantiers ne dépassent pas 300 mètres.

Jusqu'à quelle profondeur l'homme pourra-t'il descendre ? 700 mètres sûrement; plus profond peut-être. Des mammifères supérieurs ont dépassé 1000 mètres. Cependant il semble exister vers 800 mètres une limitation nerveuse et respiratoire comme nous l'avons montré chez le singe *Papio papio*. Mais déjà dans la zone des 500-600 mètres de profondeur, y-a-t'il une véritable adaptation de l'organisme? Seuls des séjours de longue durée pourraient nous apporter la réponse. Actuellement, après 12 jours passés à 450 mètres (plongée "ENTEX V", 1981), nous n'avons pas observé chez les quatre sujets qui ont participé à la plongée de perturbations importantes.

De plus, pour atteindre ces profondeurs (600-700 mètres), l'homme met 6 à 8 jours et 15 à 20 jours pour en revenir ! Ce qui augmente beaucoup

le coût de telles interventions. A partir de ce stade, il est probable que les engins à pression atmosphérique devront prendre le relais. "Ainsi, le véritable facteur limitant de notre pénétration profonde sous la mer, très au-delà du plateau continental, pourrait bien être économique", X. FRUCTUS.

Pourtant, la plongée à l'air et aux mélanges sera encore utilisée pendant de nombreuses années. Il reste donc au chercheur beaucoup de travail à faire dans la compréhension des phénomènes, surtout si l'on en croit H.V. HEMPLEMAN : "Toutes les théories classiques sont basées sur des suppositions incorrectes ou grossièrement simplifiées, et il faudra beaucoup d'expérimentations pour réduire l'étendue de notre ignorance".

Actuellement, de nombreuses questions restent sans réponse.

Pour ce qui est de la COMPRESSION, quels sont les mécanismes impliqués dans le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions et quels sont les rôles respectifs joués par :

- la pression,
- la vitesse de compression,
- les mélanges gazeux,
- la susceptibilité individuelle,
- l'entraînement.

Pour la DECOMPRESSION, qui est la phase où le risque d'accident est le plus élevé, comment les bulles prennent-elles naissance et pourquoi certaines deviennent-elles pathogènes ?

En plus de la réponse à ces questions fondamentales, il est nécessaire de développer l'aspect recherche ERGONOMIQUE en plongée :

- l'étude du travail dans l'eau et sa répercussion sur la fonction cardio-respiratoire;
- la répétitivité des tâches et l'étude de la fatigue du plongeur.

Ces recherches pluri-disciplinaires doivent être menées de front pour améliorer la sécurité et les conditions de travail du plongeur.

Dans l'avenir, d'autres voies parallèles de pénétration de l'espace sous-marin sont susceptibles de se développer : l'apnée, la respiration liquide, la circulation sanguine extracorporelle....

"Bientôt l'homme pourra passer d'un élément à l'autre, de la terre à la mer, de la mer à l'espace, sans aucun traumatisme. L'insertion sous-marine ne doit pas aboutir à une adaptation irréversible. Nous pouvons aborder sans crainte et même avec enthousiasme cette nouvelle phase de notre évolution".

HABITER LA MER

J. Rougerie et E. Vignes

B I B L I O G R A P H I E

- 1 - A. BELAUD,
Contribution à l'étude de quelques réactions physiologiques de l'anguille soumise à diverses conditions hyperbares.
Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences Naturelles, Brest 1975
- 2 - Y. BERRY, P. GAVARRY, J.P. HUBERT, J. LE CHUITON, J. PARC,
La plongée et l'intervention sous la mer.
Arthaud, 1977
- 3 - M.C. BIAGGI,
Acquisitions récentes sur la Maladie de Décompression; perspective thérapeutique.
Thèse de Médecine, Paris 1975
- 4 - C. BLACHERE,
Influence des désordres lipidiques sur le système osseux du rat en condition hyperbare. Expérimentation par plongées brèves et répétées en hélium-oxygène.
Thèse de Médecine, Marseille 1980
- 5 - H. BURNET
L'hyperoxie chronique chez le rat, effets pulmonaires et tentative d'adaptation.
Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences Naturelles, Lyon 1981
- 6 - X. FRUCTUS, R. SCIARLI,
La Plongée, Santé-Sécurité
Editions Maritimes et d'Outre-Mer, 1980
- 7 - Y. GIRAN
Maladie de Décompression expérimentale en plongée à l'air chez le lapin
Essais thérapeutiques préventifs.
Thèse de Médecine, Bordeaux 1980

- 8 - G. IMBERT,
Des effets sur les animaux de la respiration d'Oxygène-Hélium à des pressions élevées.
Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences Naturelles, Marseille 1981
- 9 - P. JEANDET,
Observations réalisées à l'aide d'un dispositif expérimental pour l'étude du dégazage en décompression; le robot-plongeur.
Rapport COMEX, 1979
- 10 - C.J. LAMBERTSEN,
Collaborative investigation of limits of human tolerance to pressurisation of density equivalent to helium-oxygen respiration at depths to 2000, 3000, and 5000 feet sea water.
Underwater Physiology V. Undersea Medical Society. Bethesda, Maryland, U.S.A., 1976
- 11 - P. LAMY,
Décompression pathologique chez le lapin. Essai thérapeutique préventif par le Buflomédil.
Thèse de Médecine, Rennes 1981
- 12 - J. LE CHUITON,
Contribution à l'étude des phénomènes bullaires intravasculaires survenant en cours de décompression après plongée.
Thèse de Doctorat de Spécialité (physiologie), Lyon 1979
- 13 - M. LE FUR
La détection ultrasonore par effet Doppler des bulles circulantes intravasculaires. Contrôle chez l'amateur des tables de plongée sans palier de décompression.
Thèse de Médecine, Marseille 1980
- 14 - C. LEMAIRE
Les échanges thermiques en plongée. Notions ergonomiques.
Rapport COMEX, 1975

- 15 - C. LEMAIRE, R. NAQUET
Le point sur la recherche en physiologie hyperbare en France en 1981.
Rapport publié par le CNEXO, 1981
- 16 - J. MAYOL
Apnea a meno cento, 1976
- 17 - J.C. ROSTAIN
Le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions chez l'homme et le singe
Papio papio.
Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences Naturelles, Marseille 1980
- 18 - J. ROUGERIE, E. VIGNES
Habiter la Mer.
Editions Maritimes et d'Outre-Mer, 1978
- 19 - J.P. VALLON
Enregistrement continu de l'électrocardiogramme (selon la méthode de Holter)
au cours de plongées à l'air. Corrélation avec la détection ultrasonore
Doppler des bulles circulantes.
Thèse de Médecine, Marseille 1981
- 20 - J. VIGREUX,
Contribution à l'étude des réactions neurologiques et psychiques de
l'organisme du mammifère supérieur aux mélanges gazeux sous pression.
Thèse de Médecine, Toulouse 1970
- 21 - R.D. WORKMAN
Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen
dives.
Report. U.S. NAVY EXPERIMENTAL DIVING UNIT, 1965