

**DE L'HELIUM A L'HYDROGENE,
L'INTERVENTION HUMAINE A GRANDE PROFONDEUR
(EXPERIENCE COMEX)**

B. Gardette, C. Gortan, H.-G. Delauze

GARDETTE Bernard, Docteur es Sciences, Directeur Scientifique COMEX SA, Marseille, FRANCE

GORTAN Claude, Directeur du Centre d'Essais Hyperbares COMEX, Marseille, FRANCE

DELAUZE Henri Germain, Président du groupe COMEX, Marseille, FRANCE

THE DEEP HUMAN UNDERWATER INTERVENTION : COMEX EXPERIENCE

Since 40 years, 43 experimental dives (deeper than 200 msw) were performed with heliox (oxygen/helium), trimix (oxygen/nitrogen/helium), hydrox (oxygen/hydrogen) or hydreliox (oxygen/hydrogen/helium) breathing gas mixtures.

In 1988, six Comex and French Navy divers worked at a record depth of 534 msw with hydreliox and in 1992, a world record onshore dive at 701 msw was performed by Comex in Marseilles.

These dives showed the efficiency of hydrogen diving at very deep depth (150 – 650 msw).

1. L'HELIUM

La plongée à l'air comprimé comporte des limites. L'essoufflement, la toxicité de l'oxygène (2) et les effets de la narcose à l'azote, imposent au plongeur de ne pas dépasser les 50/60 mètres de profondeur (1-3-4).

Dans les années 1930, des expériences ont été entreprises par la Marine américaine pour alimenter le plongeur non plus en air comprimé, mais en mélange respiratoire synthétique dans lequel l'azote est remplacé par un autre gaz inerte, diluant de l'oxygène, l'hélium. Ce dernier, très inerte sur le plan biochimique, d'une densité sept fois inférieure à celle de l'azote, permet de meilleures performances en supprimant les effets de la narcose et de l'essoufflement.

Moyennant la mise au point de tables de décompression spécialement adaptées à ce nouveau mélange appelé héliox (hélium-oxygène), les limites de profondeur imposées par l'air ont été considérablement repoussées et les plongeurs sous-marins ont pu se retrouver aussi à l'aise à 150 mètres de profondeur qu'ils l'étaient auparavant à 30 mètres avec de l'air comprimé. Mais, à partir de 150 mètres, surgit très progressivement un nouvel obstacle. Le plongeur, fort heureusement, ne retrouve pas cette altération de la conscience propre à l'ivresse des profondeurs entraînée par l'azote, mais éprouve simplement quelques vertiges, un léger tremblement et une certaine maladresse des gestes. Tout cela correspond à la phase initiale du syndrome d'excitabilité du système nerveux central décrit en 1968 par X. Fructus, R. Naquet et R. Brauer, sous le nom de « Syndrome Nerveux des Hautes Pressions » (SNHP) (1-3-4).

Cet obstacle présente des caractéristiques spécifiques et des études ont été menées dès 1963 au Centre d'Essais Hyperbares (CEH) de la Comex en vue de repousser les limites de l'intervention humaine à grande profondeur avec une maîtrise calculée du SNHP. Jusqu'en 1982, six grandes séries de plongées d'essais au mélange héliox ou trimix (hélium, azote, oxygène) ont été ainsi réalisées dans les caissons du CEH à Marseille : Ludion, Physalie, Sagittaire, Belouga, Coraz et Janus (voir tableau en annexe). Durant cette période et grâce à plusieurs centaines de plongées d'essais, il a été démontré que l'on pouvait amener des plongeurs jusqu'à 610 mètres (Physalie 6, 1972, et Sagittaire 4, 1974). Mais il a fallu aussi prouver que ces derniers étaient capables de fournir un travail en situation réelle en mer. C'est ce qui a été fait en 1977, lors de l'opération Janus 4 au large de Cavalaire (Var). Six plongeurs professionnels, quatre de la Comex et deux de la Marine Nationale ont travaillé sur un chantier situé à 460 mètres sous la surface. Le 20 octobre, trois d'entre eux, Patrick Raude, Jacques Verpeaux et Gérard Vial, ont poussé une pointe jusqu'à 500 mètres, record qui ne fut battu que onze années plus tard en 1988, lors de l'opération Comex-Hydra 8 (5).

Aujourd'hui, plusieurs sociétés internationales de travaux sous-marins réalisent couramment des saturations héliox à 150-200 mètres de profondeur, mais deux facteurs limitent l'efficacité du plongeur : le SNHP et les limitations ventilatoires dues à la densité du mélange gazeux.

2. L'HYDROGENE

L'idée initiée par Lavoisier, d'utiliser l'hydrogène comme un gaz respiratoire à faible densité remonte au XVIII^e siècle. Le premier homme qui a eu le courage d'expérimenter l'hydrogène sur lui-même est l'ingénieur Arne Zetterström lors de tests réalisés entre 1943 et 1945 par la Marine Royale Suédoise. En dehors de quelques expériences sur des animaux en laboratoire, aucun programme substantiel ne sera entrepris avant 1967. En 1968, lors de la mission Hydra 1, la COMEX essaye de placer sous hydrogène l'un de ses plongeurs d'élite, René Veyrunes, en pleine eau à la profondeur de 250 mètres. L'équipement du plongeur était alors insuffisant pour le protéger du froid et à peine sorti, il dut retourner à sa tourelle. Il faudra attendre 1982 pour que le programme de recherche sur l'hydrogène soit relancé, profitant de l'évolution du matériel et des technologies de la plongée profonde mises au point sur les chantiers pétroliers.

L'objectif est alors de définir les méthodes industrielles nécessaires à l'emploi pratique des mélanges hydrogénés et d'en étudier les limites chez l'homme.

L'utilisation de l'hydrogène en plongée a été abordée en imposant la sécurité comme objectif technique principal. La définition des moyens, des méthodes et des procédures devait passer par la connaissance exacte de :

- limites d'inflammabilité des mélanges hydrogène-oxygène (HYDROX) et hydrogène-hélium-oxygène (HYDRELIOX) en conditions hyperbares
- la compatibilité de l'hydrogène avec les matériaux des équipements
- la qualité respirable de l'hydrogène (recherche de polluants)
- l'adaptation et la mise en conformité de tous les circuits gaz, du système de régénération et des rajouts automatiques d'oxygène
- la mise au point d'un système permettant l'élimination de l'hydrogène au cours de la décompression par déshydrogénation catalytique

Dans la pratique, avec une marge de sécurité importante, nous avons fixé la concentration maximale d'oxygène à 3 % dans tous les mélanges hydrogénés (comportant plus de 3 % d'hydrogène). Avec cette limite de sécurité, toute utilisation d'hydrogène en mélange gazeux normoxique devient impossible dans la tranche de profondeur 0-60 mètres. Lors de la phase de compression d'une plongée à saturation, l'hydrogène n'est injecté dans les caissons qu'à partir de 200 mètres et il est retiré progressivement au cours de la décompression pour passer au dessous de la concentration de 3 % dans la zone de 300 mètres. Cette élimination d'hydrogène à la vitesse de décompression choisie se fait grâce à une déshydrogénation catalytique dans un réacteur à température contrôlée en combinant l'hydrogène et l'oxygène avec production d'eau.

Ces avancées technologiques ont permis à la COMEX de mener à bien l'ensemble de son programme de recherche HYDRA.

En 1983 (Hydra 3), seize plongeurs avec à leur tête Henri Delauze, Président de la COMEX, effectuent une série de plongées entre 70 et 91 mètres en mer au large de Marseille. La même année, lors d'Hydra 4, six plongeurs respirent pour la première fois de l'hydrogène en caisson sous une pression de 31 bars, équivalente à une pression de 300 mètres. Deux années plus tard, en 1985, six plongeurs réalisent la première saturation au mélange hydréliox (hydrogène - hélium - oxygène) à 450 mètres de profondeur (Hydra 5).

Pour démontrer la faisabilité industrielle de la plongée à l'hydrogène, la suite du programme de recherche chez l'homme devrait comprendre une démonstration, en conditions réelles de travail en mer, des capacités de travail de l'homme à une profondeur encore jamais atteinte : plus de 500 mètres. Pour réaliser ce projet ambitieux, deux plongées d'entraînement et de sélection ont été réalisées dans les caissons de la COMEX à Marseille : Hydra 6 (1986) à 520 mètres avec de l'hydréliox et Hydra 7 (1987) à 260 mètres avec de l'hydrox (hydrogène-oxygène). La confirmation « en réel » (Hydra 8) s'est déroulée en Méditerranée en février-mars 1988 à partir du navire Orelia. Elle a démontré la remarquable efficacité des plongeurs à 520 et 534 mètres de profondeur, semblable à celle qui est habituellement observée sur un chantier à 200 - 250 mètres de profondeur au mélange héliox (5).

Puis ce fut Hydra 9, en 1989, qui permit de préciser la plage d'utilisation de l'hydrox et les effets chez l'homme d'une exposition de longue durée. Dix ans après le début du programme Hydra, tous les éléments étaient enfin réunis pour dépasser les frontières de l'intervention humaine, ce qui fut réalisé lors de la plongée d'essais Hydra 10 qui s'est déroulée d'octobre à décembre 1992 dans les caissons du CEH de la COMEX à Marseille. L'équipe était composée de trois plongeurs professionnels : Serge Icart, Théo Mavrostomos et Régis Peilho. Après treize jours de compression, l'un d'entre eux, Théo Mavrostomos atteint la profondeur record de 701 mètres (71,1 bar, soit 7,11 MPa) et effectue une démonstration de travail durant trois heures (6).

Plus récemment, une nouvelle méthode d'utilisation de l'hydrogène en plongée a été développée dans le but de limiter le coût d'adaptation des systèmes. Cette méthode appelée, « *Helium IN / Hydrogen OUT* », consiste à saturer les plongeurs au mélange classique héliox, dans le caisson-vie et la tourelle de plongée et d'alimenter le plongeur dans l'eau en hydréliox par un circuit spécialement adapté (boucle surface hydrogène). Deux plongées d'essai furent réalisées avec cette technique Hydra 11 et 12 (1994 et 1996) respectivement à 350 mètres et 210 mètres. Hydra 11 permit d'établir des procédures et Hydra 12 a fait la démonstration en mer des avantages de cette méthode : une plus grande aisance respiratoire des plongeurs lors des efforts importants et une plus grande efficacité au travail.

Par la suite, en 1998 et 1999, avec le programme de recherche « Hydra Ludion » (1 et 2), COMEX a étudié la possibilité de réaliser, grâce à l'hydrogène, des variations rapides de pression entre la profondeur de saturation du plongeur (niveau-vie) et celle du chantier sous-marin (niveau travail). Par comparaison avec les ludions hélium actuellement pratiqués, il a été démontré que l'hydrogène permettrait des variations de pression deux fois plus importantes.

3. CONCLUSION

Au-delà de ces exploits, les travaux en immersion effectués par les plongeurs ouvrent de nouvelles perspectives dans l'avancée des technologies offshore sous-marines. Avec l'emploi des mélanges respiratoires hydrogénés, la zone des 150 à 650 mètres peut être considérée comme ouverte à une large population de plongeurs professionnels. Sur l'ensemble du programme Hydra, en 17 ans d'étude intensive sur l'hydrogène, nous avons pu montrer que les manifestations psycho-sensorielles et comportementales, à savoir la « narcose à l'hydrogène » (voir chapitre « les effets biologiques de l'hydrogène ») n'apparaît qu'au-delà d'une pression partielle d'hydrogène de 2 MPa. En deçà de cette limite le mélange respiratoire hydréliox, en limitant les effets du SNHP et en augmentant le confort respiratoire, améliore considérablement l'efficacité et la capacité de travail des plongeurs sur les installations immergées de production d'hydrocarbures. Les compagnies pétrolières sont maintenant assurées d'une capacité d'assistance technique humaine dans les zones de profondeur qui dépassent largement les possibilités de la plongée conventionnelle à l'hélium (200 mètres).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Bennett PB,Elliott DH.The physiology and medicine of diving.Londres:W.B. Sanders Co.,4ème éd.,1993.
- 2 Bert P.La pression barométrique.Paris,1878,réédit.CNRS,Paris,1979.
- 3 Broussolle B.Physiologie et Médecine de la plongée.Paris:Ellipses,1992.
- 4 Fructus X,Sciarli R.Plongée,Santé,Sécurité.Rennes:Ouest-France-E.M.O.M,1992.
- 5 Gardette B,Lemaire C,Rostain JC,Fructus X.The French deep diving scientific program on oxygen-helium,Trimix and oxygen-hydrogen gas mixture.Man in the sea,Volume I-Best Publishing,1990.
- 6 Gardette B,Massimelli JY,Comet M,Gortan C,Delauze HG.Hydra 10:A 701 msw onshore record dive on Hydreliox. Proceedings of EUBS Congress,Trondheim,Norway,17-20 Aug.1993.

ANNEXE

PLONGEES EXPERIMENTALES COMEX
Profondeur supérieure à 200 mètres

EXPERIENCE	ANNEE	PROFONDEUR (mètre)	NBRE DE PLONGEURS	GAZ RESPIRATOIRE	COMPRES.	TEMPS AU FOND	DECOMPRES	TEMPS TOTAL	TRAVAIL
PLC1 COMEX	1968	335	2	TRIMIX	2h00	17 min	94h37	96h57	Eau
PLC2 COMEX	1968	266	2	TRIMIX	1h20	30 min	97h45	99h35	Eau
PLC3 COMEX	1968	300	2	TRIMIX	1h05	20 min	90h50	92h15	Non
PHYSALIE I COMEX	1968	335	2	TRIMIX	1h53	10 min	97h33	99h35	Eau
PHYSALIE II COMEX	1968	360	2	HELIOX	1h55	5 min	144h31	146h31	Non
PHYSALIE III COMEX	1968	365	2	TRIMIX	2h03	4 min	138h34	140h41	Non
PHYSALIE IV COMEX	1968	300	2	TRIMIX	3h00	10 min	103h40	106h50	Non
PHYSALIE V COMEX	1970	520	2	HELIOX	74h28	1h37	208h00	284h05	Non
PHYSALIE VI COMEX	1972	610	2	HELIOX	176h58	1h20	233h10	411h28	Sec
SAGITTAIRE I COMEX	1971	300	4	HELIOX	163h54	144h00	128h00	435h54	Sec
SAGITTAIRE II COMEX	1972	500	2	HELIOX	49h00	100h00	189h30	338h30	Sec
SWECOM	1972	300	4	HELIOX	77h00	44h20	124h00	245h20	Eau
SAGITTAIRE III COMEX	1973	300	4	HELIOX	112h28	360h00	165h00	637h28	Sec
SAGITTAIRE IV COMEX	1974	610	2	HELIOX	260h00	50h00	231h00	541h00	Sec

EXPERIENCE	ANNEE	PROFONDEUR (mètre)	NBRE DE PLONGEURS	GAZ RESPIRATOIRE	COMPRES.	TEMPS AU FOND	DECOMPRES	TEMPS TOTAL	TRAVAIL
CORAZ I COMEX	1975	300	3	TRIMIX	4h00	72h00	151h00	227h00	Eau
CORAZ II COMEX	1975	300	2	TRIMIX	4h00	81h00	136h35	221h35	Eau
CORAZ III COMEX	1975	300	2	TRIMIX	4h00	35h00	136h35	175h35	Eau
CORAZ IV COMEX	1975	300	2	HELIOX	4h00	81h00	136h35	221h35	Eau
JANUS II-PHASE I COMEX	1970	200/250	3	HELIOX	1h10	192h00	112h00	305h10	Eau
JANUS II-PHASE IIA COMEX	1970	200/250	3	HELIOX	5h40	144h00	92h50	242h30	Eau
JANUS II-PHASE IIB COMEX	1970	200/250	3	HELIOX	11h38	144h00	95h50	251h28	Eau
JANUS II-PHASE III COMEX	1970	200/250	3	HELIOX	7h50	184h00	102h00	293h50	Mer
JANUS III A COMEX	1974	390	3	HELIOX	49h00	144h00	170h00	363h00	Eau
JANUS III B COMEX	1974	395	3	HELIOX	49h00	144h00	205h00	398h00	Eau
JANUS IV-PHASE II COMEX/GISMER	1976	400 445/460/480	8	TRIMIX	24h00	216h00	202h00	442h00	Eau
JANUS IV-PHASE III COMEX/GISMER	1977	430 460/501	6	TRIMIX	30h00	144h00	185h00	359h00	Mer
79/131 COMEX/GISMER	1979	450	4	TRIMIX	38h00	48h00	245h00	331h00	Sec
CEH CONSTANZA/COMEX	1981	300	4	HELIOX	21h40	8h00	198h20	228h00	Eau
ENTEX 5 GISMER/COMEX	1981	450	4	TRIMIX	38h00	288h00	315h00	641h00	Sec
ENTEX 8 GISMER/COMEX	1982	450	4	TRIMIX	38h00	288h00	315h00	641h00	Eau

EXPERIENCE	ANNEE	PROFONDEUR (mètre)	NBRE DE PLONGEURS	GAZ RESPIRATOIRE	COMPRES.	TEMPS AU FOND	DECOMPRES	TEMPS TOTAL	TRAVAIL
ENTEX 9 GISMER/COMEX	1983	450/610	2	HELIOX	38h00 95h00	144h00 57h00	550h00	984h00	Sec & Eau
ENTEX 11 GISMER/COMEX	1986	450	4	HELIOX/TRIMIX	38h00	288h00	315h00	641h00	Eau
HYDRA 4/COMEX	1983	240/300	6	HELIOX HYDROX HYDRELIOX	108h00	64h00	256h00	428h00	Eau
HYDRA 5/COMEX/GISMER	1985	450	3 + 3 = 6	HYDRELIOX	38h00	120h(3) 192h(3)	465h(3) 348h(3)	660h(3) 681h(3)	Sec & Eau
HYDRA 6/COMEX/GISMER	1986	500/520	8	HYDRELIOX	86h00	95h00	429h00	640h00	Sec & Eau
HYDRA 7/COMEX	1987	260	4	HYDROX	88h00	63h00	183h00	342h00	Non
HYDRA 8/COMEX/GISMER	1988	500/520/534	6	HYDRELIOX	94h00	185h00	419h00	698h00	Mer
HYDRA 9/COMEX/GISMER	1989	300/225/200	4	HYDROX	264h00	1344h00	144h00	1752h00	Sec & Eau
HYDRA 10/COMEX	1992	675/701	3	HYDRELIOX	313h00	74h00	559h00	995h00	Sec & Eau
HYDRA 11/COMEX	1994	350/335/365	4	HELIOX HYDRELIOX	47h00	240h00	299h00	586h00	Sec
HYDRA 12/COMEX	1996	200/210	4	HELIOX HYDRELIOX	3h20	120h00	157h00	280h00	Mer
HYDRA-LUDION 1 / COMEX	1998	200/260/300	2	HELIOX HYDRELIOX	8h00	204h00	216h00	428h00	Non
HYDRA-LUDION 2 / COMEX	1999	200/290 100/160	5	HELIOX HYDRELIOX	8h00	442h00	78h00	528h00	Non

- 43 EXPERIENCES
- 26 PLONGEES AVEC TRAVAIL DANS L'EAU OU EN MER
- 143 PLONGEURS
- 2 668 HOMMES-JOUR SOUS PRESSION