

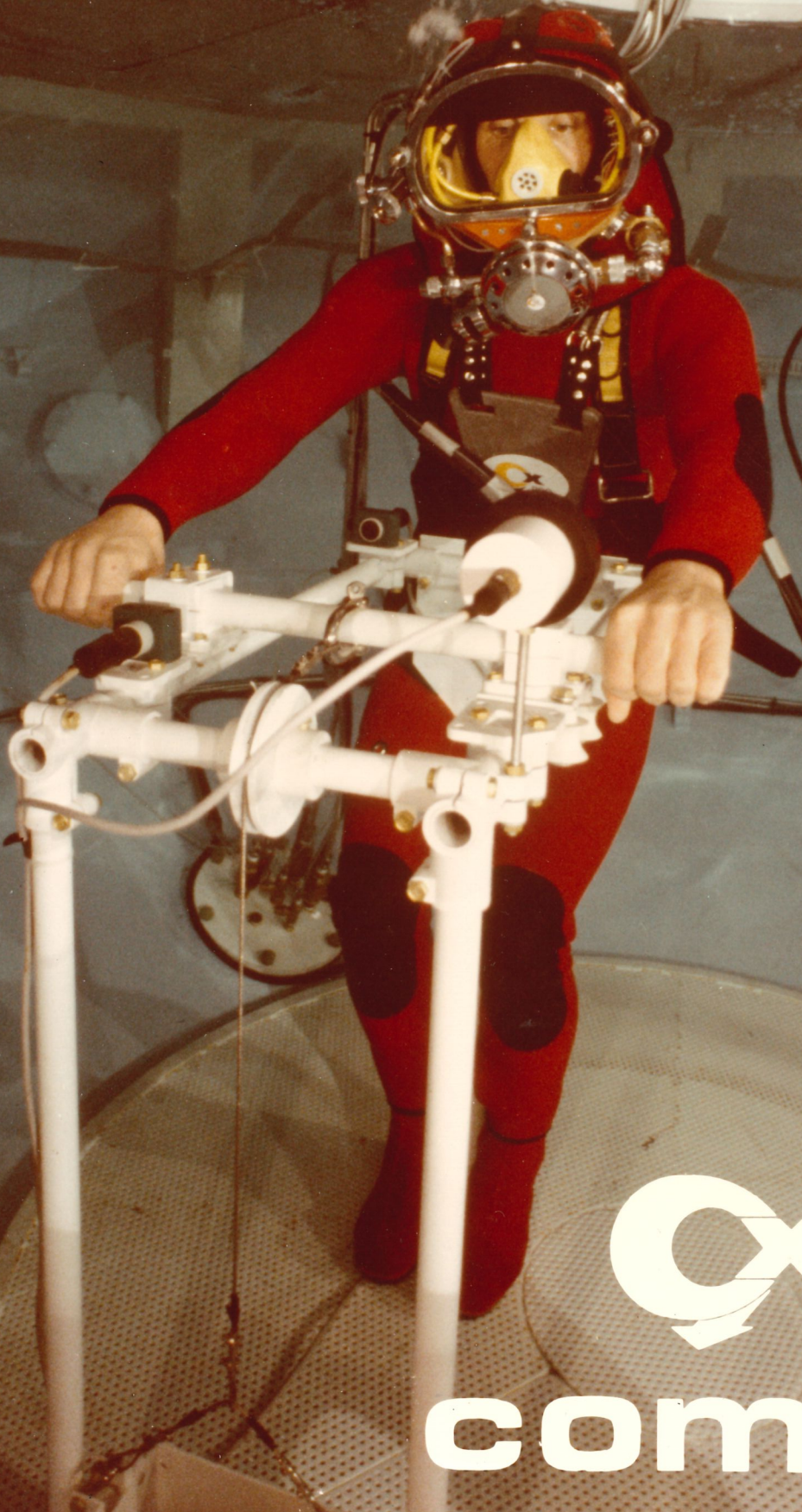
The present document is the property of COMEX SAS. It has been entrusted to the ORPHY laboratory, which scanned and uploaded it.

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.

HYDRA IV



comex

HYDRA IV

COMEX S.A.

DIRECTION SCIENTIFIQUE

MARS 1984

A V A N T P R O P O S

L'opération HYDRA IV s'est déroulée au Centre Expérimental Hyperbare (C.E.H.) de la COMEX à MARSEILLE du 14 novembre au 2 décembre 1983. Elle constitue non seulement une nouvelle avance dans la conquête des très grandes profondeurs, mais aussi une première mondiale : six plongeurs ont respiré un mélange hydrogéné sous une pression égale à l'épaisseur de 300 mètres d'eau de mer.

Dans sa course aux grands fonds et décidée à maintenir son leadership au niveau mondial dans le domaine de la plongée profonde, COMEX s'attaque à des profondeurs dépassant celles de ses propres records (PHYSALIE VI (610 m - 1 h 20) en 1972, SAGITTAIRE IV (610 m - 50 h) en 1974 et ENTEX 9 (450 m - 6 j et 610 m - 56 h) en 1983 ...).

Pour pallier les inconvénients présentés par les mélanges gazeux désormais classiques (Héliox et Trimix) à partir de la zone des quatre cents mètres, il fallait trouver un nouveau mélange respiratoire permettant aux plongeurs d'accéder à d'immenses territoires encore vierges de toute exploitation. Connu depuis longtemps, mais jamais expérimenté longuement sur l'homme, ce mélange pourrait être l'Hydrox: un composé d'hydrogène et d'oxygène sur lequel COMEX a misé pour les années à venir. Après un certain nombre d'expériences animales (souris et singes (rapport COMEX, 1983 ; J.C. ROSTAIN, 1980)), un pas décisif a été franchi avec HYDRA III : le vendredi 1 juillet 1983 au large de MARSEILLE, Henri G. DELAUZE, Président Directeur Général du groupe COMEX et Jean-Pierre BARGIARELLI, Directeur de COMEX Pro ont effectué une plongée réelle à 91 mètres. Arrivés au fond, ils ont respiré de l'Hydrox pendant un moment avant d'entamer le processus de retour à la surface.

Devant le succès total d'HYDRA III, il a été décidé de pousser plus avant le programme de recherches sur les possibilités réelles offertes par l'Hydrox dans la conquête des grands fonds. Une nouvelle étape est franchie : c'est HYDRA IV.

Cette expérience a fait l'objet d'un rapport scientifique exhaustif dont on trouvera ici de larges extraits, ainsi que les discussions les plus importantes et les conclusions.

I N T R O D U C T I O N

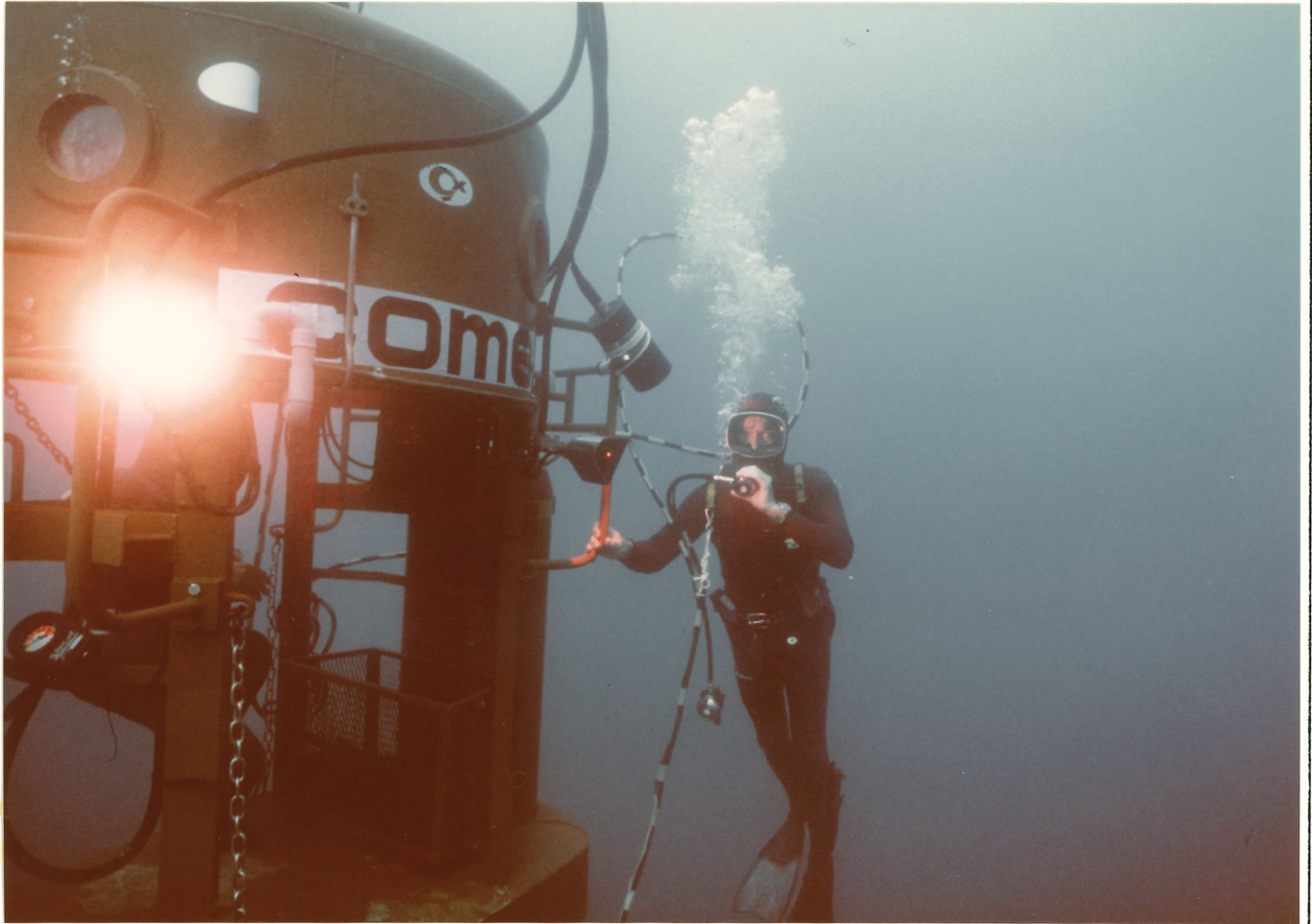
L'histoire de l'Hydrox commence avec LAVOISIER. En 1789, il fait respirer à des "cochons d'Inde" sous des cloches de verre un mélange d'"air vital" et de "gaz hydrogène pur". Les animaux "y sont demeurés longtemps sans paraître souffrir...".

Un siècle et demi plus tard, en 1941, CASE et HALDANE font les premiers essais sur l'homme et, en 1944 - 1945, ZETTERSTROM plonge à l'hydrox dans la mer à 40, 70, 110 et 160 mètres plusieurs dizaines de minutes chaque fois, sans ressentir aucun trouble. Si le malheureux pionnier suédois meurt à l'issue du 4ème essai, c'est de décompression explosive par emballement du treuil qui remontait la plateforme sur laquelle il était installé.

L'étude systématique des effets biologiques de l'hydrox a commencé aux U.S.A. et en FRANCE vers la fin des années 60 et s'est poursuivie jusqu'à maintenant dans quelques laboratoires. De nombreuses expériences menées jusqu'à 900 m de profondeur fictive sur les petits mammifères et le singe, et auxquelles la COMEX a apporté sa contribution, ont démontré que l'hydrogène moléculaire, à condition qu'il soit extrêmement pur, n'était pas toxique. Toutefois, il avait, comme l'azote (à un moindre degré), des propriétés narcotiques, peut-être gênantes mais susceptibles de réduire le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions.

A partir de 1970, l'hydrox a été respiré par des hommes de Science jusqu'à 91 mètres (en caisson par EDEL et FIFE, en mer par DELAUZE et BARGIARELLI), mais si l'on voulait établir les véritables avantages de l'hydrogène en plongée profonde, il était indispensable de le respirer à 150 mètres (à partir de l'exploit de ZETTERSTROM) et au-delà : pour le moment jusqu'à 300 mètres, dans la tranche de profondeur parfaitement explorée avec l'héliox.

Ce fut le programme d'HYDRA IV. Six plongeurs, trois professionnels et trois scientifiques ont respiré, pendant plusieurs heures des mélanges hydrogénés à 120, 150, 180, 240 et 300 mètres, se soumettant à des tests psychométriques et à des épreuves de travail musculaire comparés, sous héliox, sous hydrox et sous hydrox ternaire, à chaque profondeur.



HYDRA III : H.G DELAUZE RESPIRE DE L'HYDROX 97,5/2,5 à 91 M.
(1er JUILLET 1983)

INTERETS DE L'HYDROX

LES INTERACTIONS HYDROGENE ET PRESSION

Depuis 15 ans environ, les plongeurs profonds qui opèrent sur tous les chantiers du monde respirent un mélange composé d'hélium et d'oxygène (héliox). L'avantage de celui-ci est de supprimer l'effet de narcose que l'on observe chez les plongeurs à l'air, à partir de 50 ou 60 mètres de profondeur, effet dû à la présence d'azote.

Mais l'héliox a, lui aussi, ses limites. Les premières plongées profondes effectuées avec ce mélange ont permis de déceler les signes précurseurs d'un désordre moteur dont les manifestations traduisent l'hyperexcitabilité du système nerveux central. Ce désordre appelé Syndrome Nerveux des Hautes Pressions a été décrit chez l'homme par FRUCTUS, NAQUET et BRAUER en 1969, après BRAUER, JORDAN et WAY en 1968 chez l'animal.

Pour pallier les inconvénients du SNHP, un autre mélange a été proposé et utilisé par P.B. BENNETT à partir de 1974. C'est le "Trimix", comprenant de l'oxygène et de l'hélium avec un faible pourcentage d'azote. Il semble, en effet, que le pouvoir narcotique de l'azote, facteur limitant de la plongée à l'air, s'oppose au développement du SNHP. Le trimix a été adopté de 1976 à 1982, pour les opérations COMEX-MARINE NATIONALE, de JANUS IV en mer à ENTEX 8 (12 jours à 450 m) au Centre Hyperbare du GISMER.

Mais la densité du trimix, à des pressions élevées, au delà de 300 mètres accroît le travail ventilatoire du plongeur, d'où une réduction de ses possibilités de travail musculaire et, par conséquent, de son efficacité. Avec l'hydrogène, bien au contraire, les résistances ventilatoires sont diminuées et si, comme on peut l'espérer, son pouvoir narcotique - inférieur à celui de l'azote mais supérieur à celui de l'hélium - est aussi anti-SNHP, l'avantage du mélange contenant de l'hydrogène sera double à 300 mètres et bien au-delà !

- 1° amélioration de la fonction respiratoire,
- 2° réduction du syndrome nerveux des hautes pressions.

HYDROGENE ET SECURITE

H₂ est un gaz combustible qui s'enflamme dans l'air quand sa concentration volumique est comprise entre 4 et 74,5 %. En mélange avec l'oxygène, cette plage d'inflammabilité s'élargit considérablement. La limite inférieure reste proche de 4 % et la limite supérieure passe à 94 %, voire à 95 %, sous une pression de plusieurs dizaines de bar. Dans ce cas, le mélange est explosif et l'énergie nécessaire à son allumage est très faible. Par exemple pour le gaz de ville, cette énergie doit être 10 fois plus forte. Dès que la concentration en oxygène est inférieure à 4 %, le mélange hydrogène/oxygène n'est plus inflammable. L'hydrox utilisé dans Hydra IV, 98 % H₂/2 % O₂, reste au-dessous de la limite d'inflammabilité.

De plus, le dispositif expérimental mis en place évite toute fuite de l'hydrox dans l'atmosphère héliox de l'hydrosphère et des caissons-vie.

ASPECT ECONOMIQUE DE L'HYDROX

Sur le plan économique, l'hydrox, dans lequel l'hydrogène entre pour une très forte proportion, offre des attraits indiscutables.

En effet, le prix de l'hélium est élevé. Au mètre cube, il revient actuellement à 60 Frs en France et à 200 Frs dans certains pays, comme le Brésil et il n'est pas rare qu'un chantier en consomme quotidiennement un millier de mètres cube.

Au contraire, l'hydrogène a un prix de revient 10 à 30 fois moins élevé que celui de l'hélium. Cette différence de coût repose sur les méthodes mises en oeuvre pour se procurer l'un et l'autre gaz.

L'hélium est un gaz fossile, avec toutes les contraintes, les limitations et monopoles que cela suppose.

A l'inverse, l'hydrogène est un gaz manufacturé que l'on fabrique à volonté de différentes manières, dans tous les pays industrialisés. Donc, aucun problème d'approvisionnement et un prix résolument démocratique.

C - LES OBJECTIFS D'HYDRA IV

Totalement exploratoire, cette opération a permis d'aborder la plupart des problèmes posés par la respiration de l'hydrox en plongée profonde.

- Toxicité de l'hydrogène hyperbare jusqu'à une pression équivalente à 240 ou 300 m pendant des séjours n'excédant pas une heure et à 150 m pendant des séjours de 2, 4 et 6 heures.
- Pouvoir narcotique de l'hydrogène comparé à celui de l'azote.
- Etude de la ventilation pulmonaire sous hydrox, tant au repos qu'au cours d'un travail musculaire en immersion.
- Effet anti-SNHP : l'hydrox, mieux que l'héliox et le trimix, permet-il d'éviter au plongeur les désordres moteurs dûs au Syndrome Nerveux des Hautes Pressions ?
- Pertes caloriques.
- Contre diffusion isobare aux changements de gaz.
- Modification de la voix.

Pour répondre aux questions les plus importantes, plusieurs types d'investigations ont été mis en oeuvre

- Analyse comportementale.
- Psychométrie.
- Evaluation fonctionnelle cardio-respiratoire.
- Electroencéphalographie comparative.
- Biologie sanguine et urinaire.
- Détection au Doppler des bulles circulantes.
- Détection échographique des bulles stationnaires.
- Enregistrement de voix.

P E R S O N N E L

LES PLONGEURS

Au nombre de six, divisés en deux équipes :

Equipe A

Marcel GIRAUD (A1) - 45 ans - Français - Plongeur professionnel
Gérard GUERRIER (A2) - 27 ans - Français - Ingénieur
Jacques LE MIRE (A3) - 37 ans - Français - Docteur en Médecine

Equipe B

Louis SCHNEIDER (B1) - 32 ans - Français - Plongeur professionnel
Gerry NORMAN (B2) - 40 ans - Anglais - Plongeur professionnel
Maurice CROSS (B3) - 37 ans - Anglais - Docteur en Médecine

Plongeur remplaçant :

Hubert TRELLU - 27 ans - Français - Docteur en Médecine

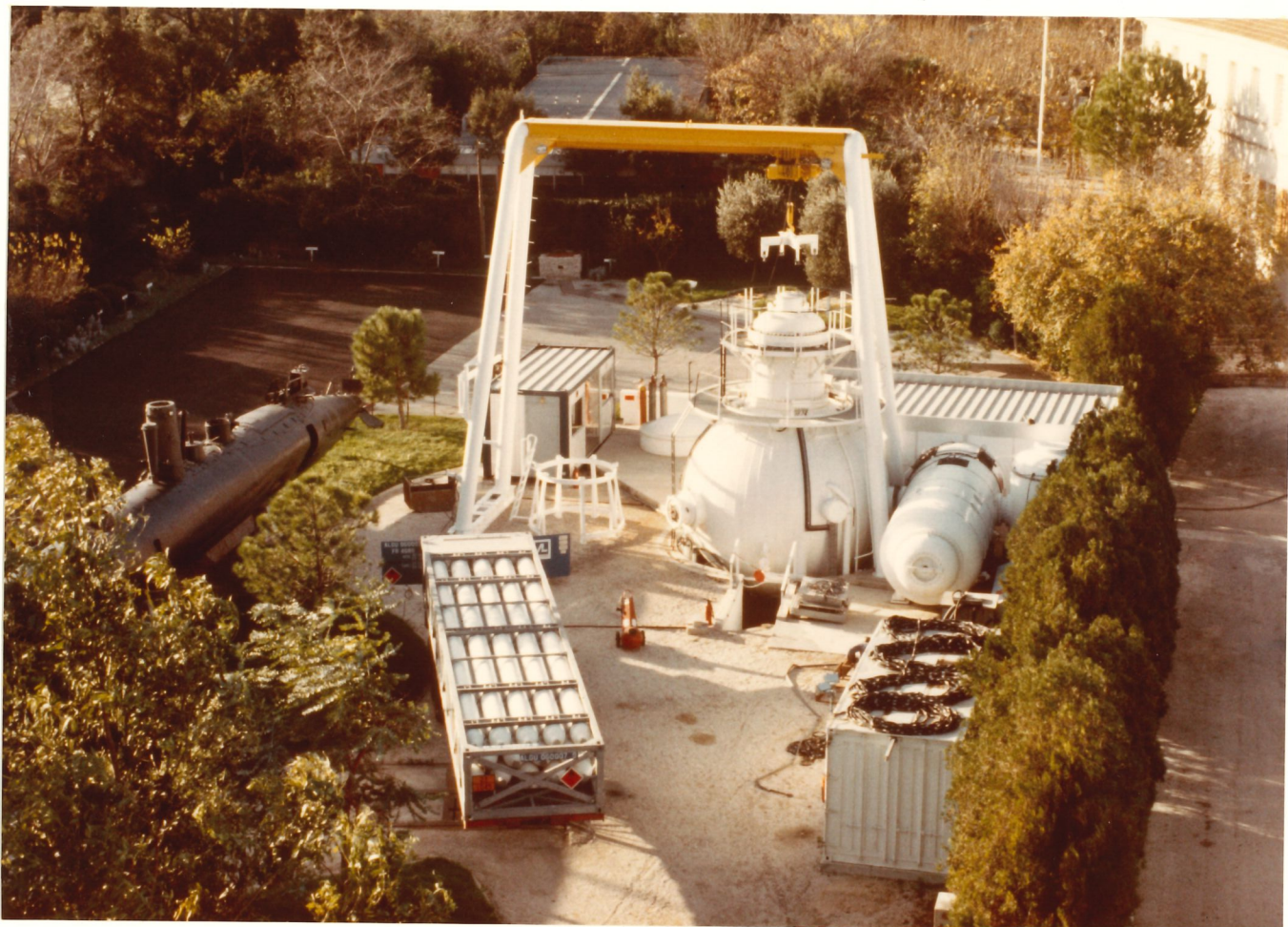
LES EQUIPES SCIENTIFIQUES

- Sous la Direction de H.G. DELAUZE :

Les services scientifiques et techniques de la COMEX, le Centre
Expérimental Hyperbare et les services de sécurité ; ainsi que COMEX
HOULDER RESEARCH.

- Les groupes extérieurs :

- . du Service de Santé des Armées et de la Marine Nationale :
CEPISMER, CERB, CERTSM, GISMER ;
- . du Ministère du Travail : INPP ;
- . du CNRS : GIS de Physiologie hyperbare ;
- . de l'Université : OXFORD, RENNES, Centre Cardiologique CANTINI ;
- . ainsi que le Centre Médical MONTGRAND et le GP de la FFMK.



CENTRE EXPERIMENTAL HYPERBARE COMEX - VUE D'ENSEMBLE -

AU MILIEU : L'HYDROSPHERE ACCOLEE AU CAISSON-VIE
AU PREMIER PLAN : TRAILLORS D'HYDROX 98/2

M A T E R I E L

L'ENCEINTE HYPERBARE

C'est une partie des installations du Centre Expérimental Hyperbare de la COMEX à MARSEILLE qui a été utilisée :

Unité n° 1 : l'hydrosphère, caisson-piscine de 5 m de diamètre, comprenant :

- . un volume gazeux (héliox),
- . un plancher circulaire recouvrant partiellement la partie "piscine",
- . la partie "piscine" remplie d'eau thermostatée (environ 30°C),
- . au centre, un dôme de plastique transparent sous lequel seront réalisés les tests comparatifs, à l'héliox ou à l'hydrox, au sec ou en immersion (voir figure 1).

Unité n° 2 : communiquant avec ce caisson-laboratoire, un ensemble-vie de 8 places.

A l'extérieur, commandant les 2 unités, une salle de contrôle.

L'arrivée et l'évacuation du mélange hydrox se faisaient par un circuit séparé. Les détails de l'installation étaient conformes aux normes de sécurité imposées pour l'utilisation de l'hydrogène.

GAZ UTILISES

- La saturation est réalisée en atmosphère héliox (He - O₂) avec 400 mbar O₂ à toutes les profondeurs de séjour : 120, 180, 240, 300 mètres.

CAISSON PISCINE HYDRA IV

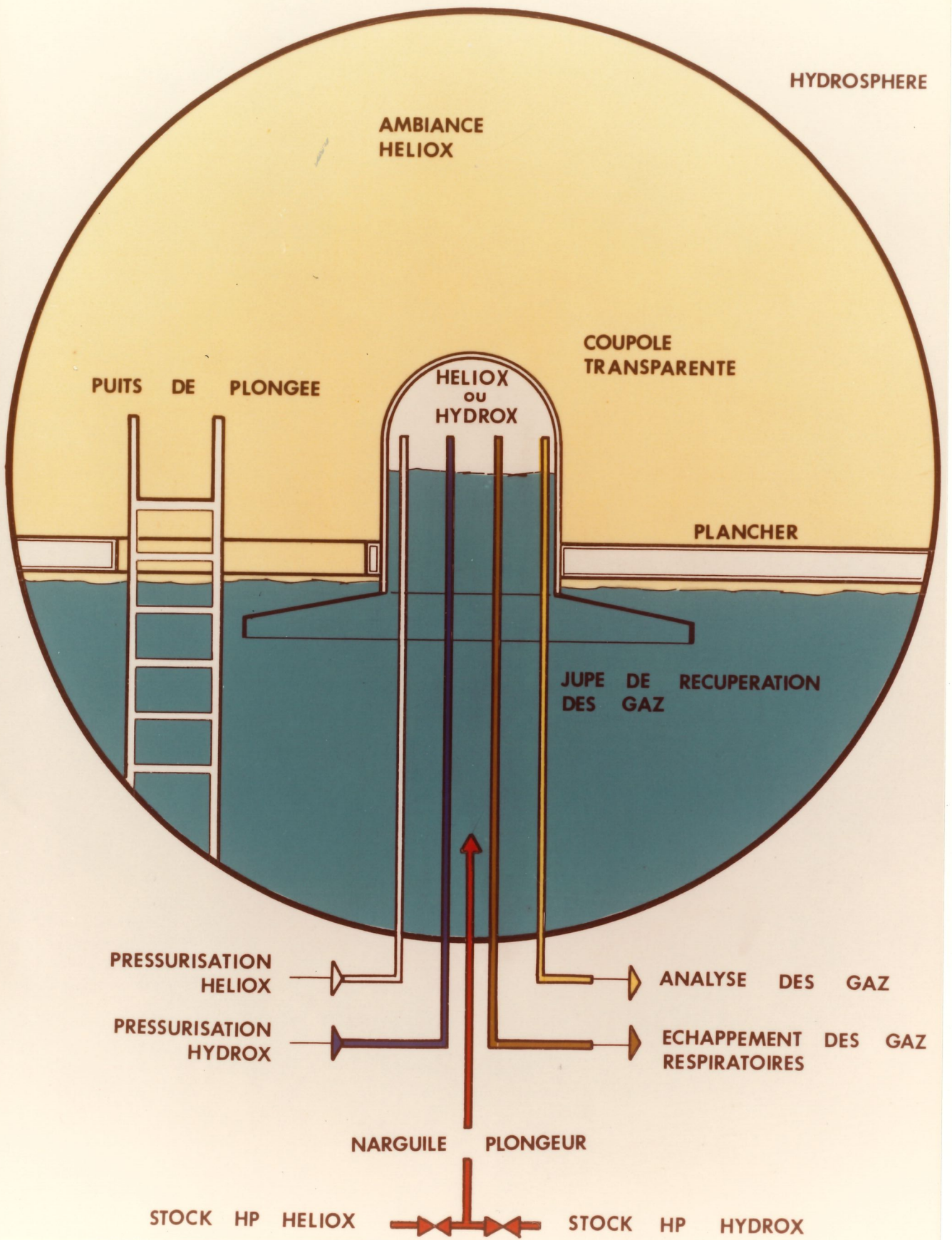


FIGURE 1

- Lors des tests comparatifs de performances héliox / hydrox au sec sous la coupole, ou en immersion, les gaz respiratoires étaient :

- . mélange hélium /oxygène à 2 % O₂ puis
- . mélange hydrogène / oxygène à 2 % O₂

Les P_{IO}₂ étaient donc variables entre 260 mbar (120 mètres) et 620 mbar (300 mètres) selon la profondeur, mais identiques dans les 2 mélanges à une même profondeur.

Le mélange gazeux hydrox a été préparé sur place à COMEX, avec l'aide de l'AIR LIQUIDE.

- A 300 mètres, à cause de l'effet narcotique du mélange gazeux hydrox 2 % O₂ assez important à 240 mètres, il a été décidé d'utiliser un mélange ternaire hydrogène - hélium - oxygène.

2 mélanges ont été préparés et testés à 300 mètres :

- . H₂ - He - O₂ (74/24/2)
- . H₂ - He - O₂ (59/39/2)

avec une approximation de 1 %.

Les P_H₂ de ces mélanges étaient équivalentes à :

- . 224 m d'hydrox 98/2 pour le 74/24/2, soit 22,94 bar et à
- . 187 m d'hydrox 98/2 pour le 59/39/2, soit 18,29 bar

- Pendant les tests sous la coupole à 120 mètres, l'élimination du CO₂ et le maintien de la P_{IO}₂ étaient assurés par une ventilation permanente de l'ambiance par l'héliox ou hydrox.

A 180 mètres et au-delà, comme la P_{IO}₂ était suffisamment importante, seule l'élimination du CO₂ était nécessaire. Ceci a été réalisé grâce à de la chaux sodée introduite dans la coupole et renouvelée chaque jour.

- A 80 mètres, en décompression, des tests comparatifs héliox / air ont été réalisés.

Les mélanges gazeux étaient:

- . air 21 % O₂
- . héliox 20 % O₂

M E T H O D E S

1 - LA COMPRESSION

La compression jusqu'à 300 mètres s'est effectuée progressivement avec des paliers à 120, 180 et 240 mètres.

Des tests sous hydrox (au sec et/ou en eau) ont été réalisés par les 6 plongeurs à chacun de ces paliers.

* Vitesse de compression

| | | |
|------------------|---|---------------------|
| 0 - 150 mètres | = | 3 mètres / minute |
| 150 - 200 mètres | = | 1 mètre / minute |
| 200 - 300 mètres | = | 0,33 mètre / minute |

* Durée des compressions

| | | |
|------------------|---|---------------------|
| 0 - 120 mètres | = | 40 minutes |
| 120 - 180 mètres | = | 40 minutes |
| 180 - 240 mètres | = | 2 heures 20 minutes |
| 240 - 300 mètres | = | 3 heures |

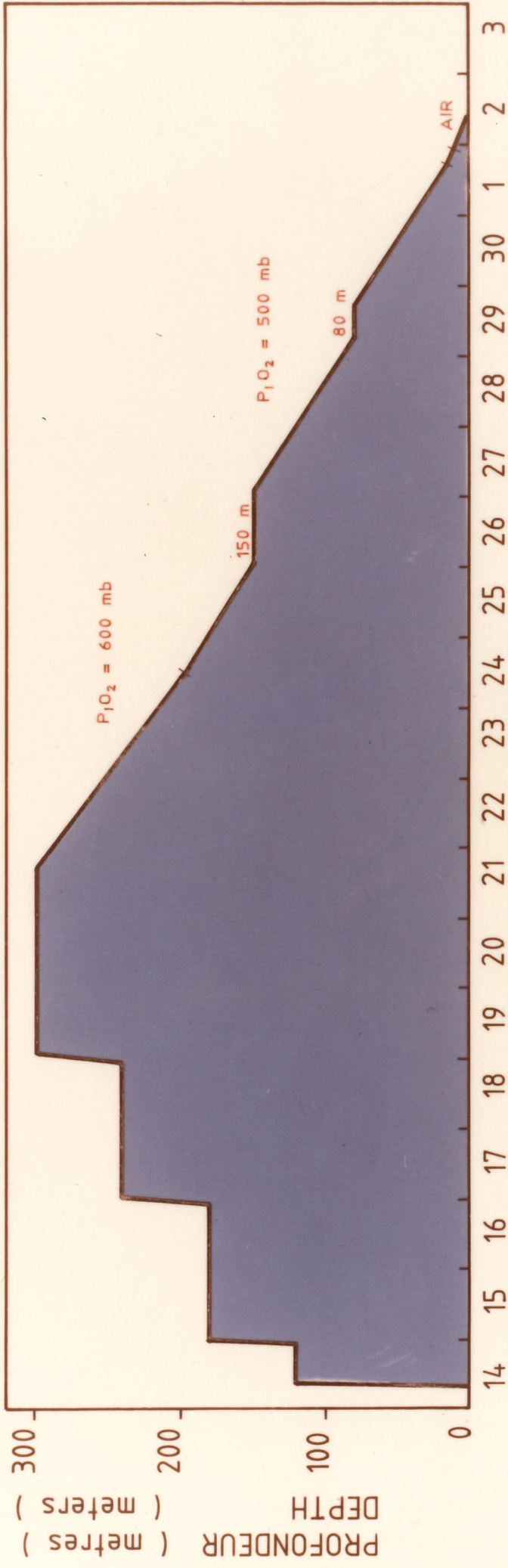
* Durée des paliers

- à 120 mètres : 14 heures 20 minutes
(le 14 novembre, de 8 h 40 à 23 h 00)
- à 180 mètres : 40 heures 20 minutes
(du 14 novembre 23 h 40 au 16 novembre 22 h 00)
- à 240 mètres : 46 heures 40 minutes
(du 17 novembre 0 h 20 au 18 novembre 22 h 00)

* Durée du séjour à 300 mètres

64 heures, du 19 novembre (1 h 00) au 21 novembre (17 h 00)

* La compression était effectuée après rinçages des caissons à l'héliox



NOV. DEC 1983

HYDRA IV 1983

(absence d'azote).

La PIO_2 était maintenue à 400 mb pendant toute la compression et le séjour au fond.

2 - LA DECOMPRESSION

La décompression à partir de 300 mètres n'était pas conventionnelle puisqu'il y a eu 2 arrêts :

- . à 150 mètres, pour effectuer des tests d'exposition longue durée sous hydrox,
- . à 80 mètres, pour mettre en oeuvre des tests de comparaison avec la narcose à l'air.

* Vitesses de décompression

300 - 200 mètres = 0,025 mètre / minute
(soit 40 minutes par mètre)

200 - 15 mètres = 0,022 mètre / minute
(soit 45 minutes par mètre)

15 - 0 mètre = 0,0167 mètre / minute
(soit 60 minutes par mètre)

* PIO_2

- entre 300 et 200 mètres : $PIO_2 = 0,6$ b

- " 200 et 10 mètres : $PIO_2 = 0,5$ b

- " 10 et 0 mètre : $O_2 = 21$ %

A 10 mètres, des rinçages à l'air ont été effectués.

* Arrêt à 150 mètres

Cet arrêt de 25 heures 20 minutes a eu lieu le 26 novembre. Il a permis à 3 plongeurs d'effectuer des séjours de 2, 4 et 6 heures sous hydrox.

* Arrêt à 80 mètres

L'arrêt n'a duré que 10 heures 30 (le 29 novembre), et a permis d'étudier comparativement la narcose à l'azote à 80 mètres chez les mêmes sujets, dans les mêmes conditions que pour l'hydrogène.

La décompression avait commencé le 21 novembre à 17 heures et s'est terminée le 2 décembre à 11 heures.

3 - PROTOCOLE DES TESTS AU SEC

Le plongeur passe sous la coupole, s'assied sur le strapontin et se trouve donc à demi-immergé. Une première série de tests est effectuée sous ambiance héliox, puis sous hydrox. La série est identique dans les 2 cas et se déroule comme suit :

| | |
|---|-------------|
| - "Imprégnation" ou adaptation à l'ambiance | 10 min. |
| - Dextérité manuelle (DM) 1 main | 2 min. |
| - Temps de réaction visuel de choix (TRVC) | 2 min. 30 |
| - Multiplications | 2 min. |
| - Reconnaissance de chiffres | 2 min. |
| - Electroencéphalogramme | 8 - 10 min. |
| | <hr/> |
| Temps alloué | 30 min. |

Les plongeurs sont ensuite soumis, après le retour en ambiance héliox, à la détection ultrasonore de bulles circulantes pendant 4 à 6 heures (CERTISM).

4 - PROTOCOLE DES TESTS EN IMMERSION

Le plongeur, complètement équipé pour l'intervention subaquatique s'immerge et passe sous la cloche remplie d'eau. Le mélange gazeux qu'il respire est de l'héliox pendant la 1ère demi-heure de tests puis de l'hydrox pendant l'heure suivante.

Les tests se déroulent de la façon suivante :

| | | |
|---------------|----------------|--------------|
| <u>HELIOX</u> | - Repos | 10 min. |
| | - TRVC | 2 min. 30 |
| | - Cyclorameur | 7 min. |
| | - Repos | 5 min. |
| | | <hr/> |
| | Temps alloué | 25 min. |
| | | |
| <u>HYDROX</u> | - Imprégnation | 10 min. |
| | - TRVC | 2 min. 30 |
| | - Cyclorameur | 7 min. |
| | - Repos | 5 min. |
| | - Puzzle | 0 à 30 min. |
| | - TRVC | 2 min. |
| | | <hr/> |
| | Temps alloué | 30 à 60 min. |

- HELIOX - Sortie du plongeur
- Détection DOPPLER de bulles pendant 4 à 5 heures.

Au cours de cette plongée en eau, les sujets sont sous contrôle :

- de l'ECG
- de la ventilation
- des P respiratoires

5 - PROTOCOLE DES EXPOSITIONS LONGUE DUREE

A 150 mètres, 3 sujets ont subi des expositions prolongées sous hydrox de 2, 4 et 6 heures. Ils étaient au sec sous la coupole. Pendant leur séjour en hydrox, les tests de DM, de multiplications, de reconnaissance de chiffres et d'EEG ont été répétés à intervalles réguliers. Seul le TRVC n'a pu être convenablement réalisé. De plus, des bilans sanguins complets ont été effectués avant l'exposition, juste à la sortie de la coupole et 6 heures après la fin du séjour sous hydrox.



M. GIRAUD EFFECTUE LE TEST DES MULTIPLICATIONS SOUS LA COUPOLE
EN ATMOSPHERE HYDROX 98/2

R E S U L T A T S

DEROULEMENT DE L'OPERATION ET BILAN SOMMAIRE

Lundi 14 novembre : A 8 heures, compression des 6 plongeurs à 120 m. A ce niveau, toute la journée, série de tests sous hydrox dans la coupole aménagée au centre de l'hydrosphère : première approche rassurante de l'atmosphère hydrogénée (98/2). Compression de 60 m durant la nuit.

Mardi 15 et mercredi 16 novembre : 180 m. Les équipes A et B passent alternativement dans la coupole et en piscine pour les tests comparés sous héliox. Trois plongeurs sur six ont ressenti une légère impression de narcose mais tous ont observé une plus grande aisance respiratoire sous hydrox. Compression de 60 m durant la nuit du 16 au 17.

Jeudi 17 et vendredi 18 novembre : 240 m. Même alternance des tests comparés pour les équipes A et B. Narcose à l'hydrogène évidente pour tous et considérée comme acceptable. Unanimité dans l'appréciation de la ventilation pulmonaire très améliorée et de la fatigabilité musculaire très réduite sous hydrox. Compression de 60 m durant la nuit du 18 au 19.

Samedi 19 et dimanche 20 novembre : 300 m. La composition du mélange respiratoire a été modifiée par rajout de 24 % d'hélium (74/24/2). Les épreuves subies en atmosphère gazeuse et en immersion mettent en évidence un degré moyen de narcose, très contrôlable pour quatre plongeurs sur six, et toujours l'incomparable confort ergonomique.

Lundi 21 novembre : Prolongation du séjour à 300 m. Les deux plongeurs professionnels chefs d'équipe subissent les tests dans l'eau avec un mélange ternaire à 59 % d'H₂. Même aisance ventilatoire et narcose à peine perceptible. Dans la soirée, la décompression commence.

Samedi 26 novembre : A 150 m, trois plongeurs sont exposés sous la coupole à l'hydrox 98/2, successivement 2 heures, 4 heures et 6 heures. Absence de narcose. Le deuxième, Marcel GIRAUD, sera le premier homme à avoir savouré un déjeuner complet sous hydrogène.

Au retour sous héliox, il présentera un degré important de bulles de contre-diffusion isobare, sans conséquence pathologique. Les contrôles sanguins opérés chez les 3 sujets n'ont pas montré d'altérations biologiques. Reprise de la décompression le 27 à 1 heure du matin.

Mardi 29 novembre : 80 m. Quatre plongeurs sont exposés à l'héliox 80/20 puis à l'air, sous la coupole. Les deux autres subissent la même épreuve dans l'eau. La narcose à l'azote est spectaculaire et incontrôlable chez trois plongeurs sur six. A 19-h 50, reprise de la décompression.

Vendredi 2 décembre : A 11 heures, sortie des plongeurs.

L'opération HYDRA IV s'est bien déroulée, du point de vue de la sécurité, de l'organisation et de l'emploi du temps des plongeurs. Le seul problème a été celui des communications. En effet, celles-ci étaient souvent mauvaises à cause de l'appareillage ou du décodeur mal adapté à l'hydrox.

Les phénomènes de narcose à l'hydrogène qui sont apparus progressivement ont été pour la première fois évalués et la PH_2 a été réduite à 300 m grâce à l'emploi d'un mélange ternaire. Enfin, HYDRA IV a permis d'éclaircir de nombreuses questions restées sans réponse depuis de longues années, concernant l'utilisation pratique de l'hydrogène en plongée profonde.

RESULTATS SUBJECTIFS

1 - ENQUETE FATIGUE

Les 6 plongeurs ont estimé leur état de fatigue durant leur séjour en caisson d'**assez bonne condition à excellente forme**.

- Le sommeil était **bon** ou **assez bon** avec quelques exceptions : les nuits de compression ont gêné le sommeil de A2 et quelques sujets revivaient en rêves ou en cauchemars l'activité de la journée.
- L'appétit et la prise des repas étaient **bons**.
- Quelques douleurs articulaires ont été rapportées pendant les compressions (poignets, épaules et genoux), caractérisées surtout par un craquement lors de la mise en activité des articulations.

2 - L'EFFET HYDROGENE

Dans le mélange respiré, la PH_2 était de 18 bar à 180 m, 24,5 bar à 240 m et 23 bar à 300 m (mélange ternaire).

Le point fort du projet HYDRA IV étant l'étude du pouvoir narcotique de l'hydrogène, l'auto-observation de chacun des 6 plongeurs ayant respiré ce gaz à des pressions allant jusqu'à 24,5 ATA, revêt une grande importance. Elle fait l'objet d'un rapport détaillé : voici comment peuvent se résumer leurs réactions :

Plongeur A1 : effet hydrogène étrange mais à peine perceptible à 180 m.
Sensible mais peu gênant à 240 m et 300 m.

Plongeur A2 : effet hydrogène marqué à 180 m ; plus sérieux à 240 m où la narcose évolue vers l'endormissement.

Plongeur A3 : narcose désagréable et mal supportée à 240 m.

Plongeur B1 : narcose légère à 180 et 300 m ; gênante à 240 m.

Plongeur B2 : effet hydrogène à peine ressenti même à 240 m.

Plongeur B3 : narcose faible à 180 et 300 m ; nette mais agréable à 240 m.

RESULTATS DES TESTS PSYCHOMETRIQUES

Les résultats individuels complets aux tests psychométriques sont décrits dans le rapport HYDRA IV.

1 - LA DEXTERITE MANUELLE : DM

La courbe représentant l'évolution moyenne de la performance est en photo 1.

On observe peu de variation, les valeurs de DM restant entre 33 et 36 chevilles rangées par minute. Il existe cependant des dégradations mineures, non significatives, de l'héliox à l'hydrox à 240 et 300 m (- 4,5 et - 3,1 % en moyenne).

Les pourcentages de variation entre héliox et hydrox à une même profondeur sont peu importants et irréguliers selon les sujets : chez un seul sujet (A2), on observe une dégradation systématique de la DM sous hydrox à toutes les profondeurs.

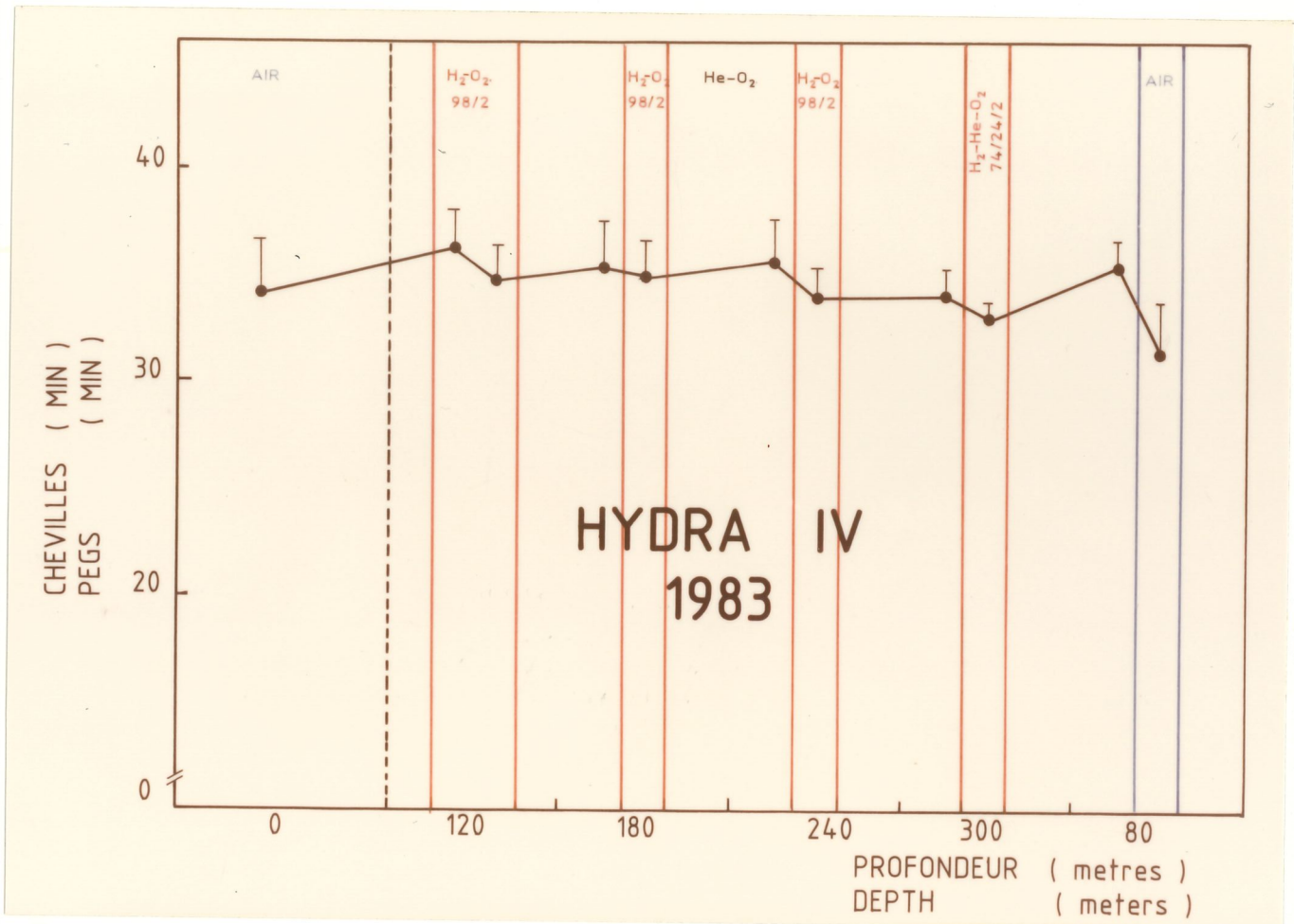
On note par contre que la chute de performance entre les tests réalisés en héliox 80/20 et à l'air à 80 m est plus importante (- 11,6 % en moyenne). Il existe aussi une chute modeste de la performance à 300 m en héliox par rapport aux profondeurs précédentes (180 et 240 m sous héliox).

2 - LE TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX : TRVC

Ce test a été effectué lors des essais au sec sous la coupole et lors des immersions.

De nombreuses valeurs sont absentes (à partir de 300 m) à cause d'une panne de l'appareillage.

On note de grandes variations interindividuelles (Sd important), qui rendent les modifications de TRVC très mineures et non significatives. L'augmentation du TRVC à 240 m est due essentiellement à un sujet A3 qui a eu ses performances de TRVC dégradées avec l'augmentation de la profondeur. Le séjour sous hydrox ne semblait pas altérer significativement le TRVC, au sec comme en eau.



EVOLUTION DE LA DEXTERITE MANUELLE
(MOYENNE DES 6 SUJETS \pm Sd) EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
ET DU MELANGE GAZEUX RESPIRE

PHOTO 1

3 - TEST DES MULTIPLICATIONS

L'évolution des performances (moyenne des 6 sujets \pm Sd) est représentée en photo 2. La courbe moyenne montre à 180, 240 et 300 m une diminution de la performance sous hydrox par rapport à la référence héliox à une même profondeur. On observe parallèlement une augmentation du nombre d'erreurs. Le pourcentage moyen de dégradation à 180 m de l'héliox à l'hydrox est de - 13,8 %, devient - 19,6 % à 240 m et - 15,1 % à 300 m en mélange ternaire avec 74 % H₂ (qui correspond à un hydrox 98/2 à 224m).

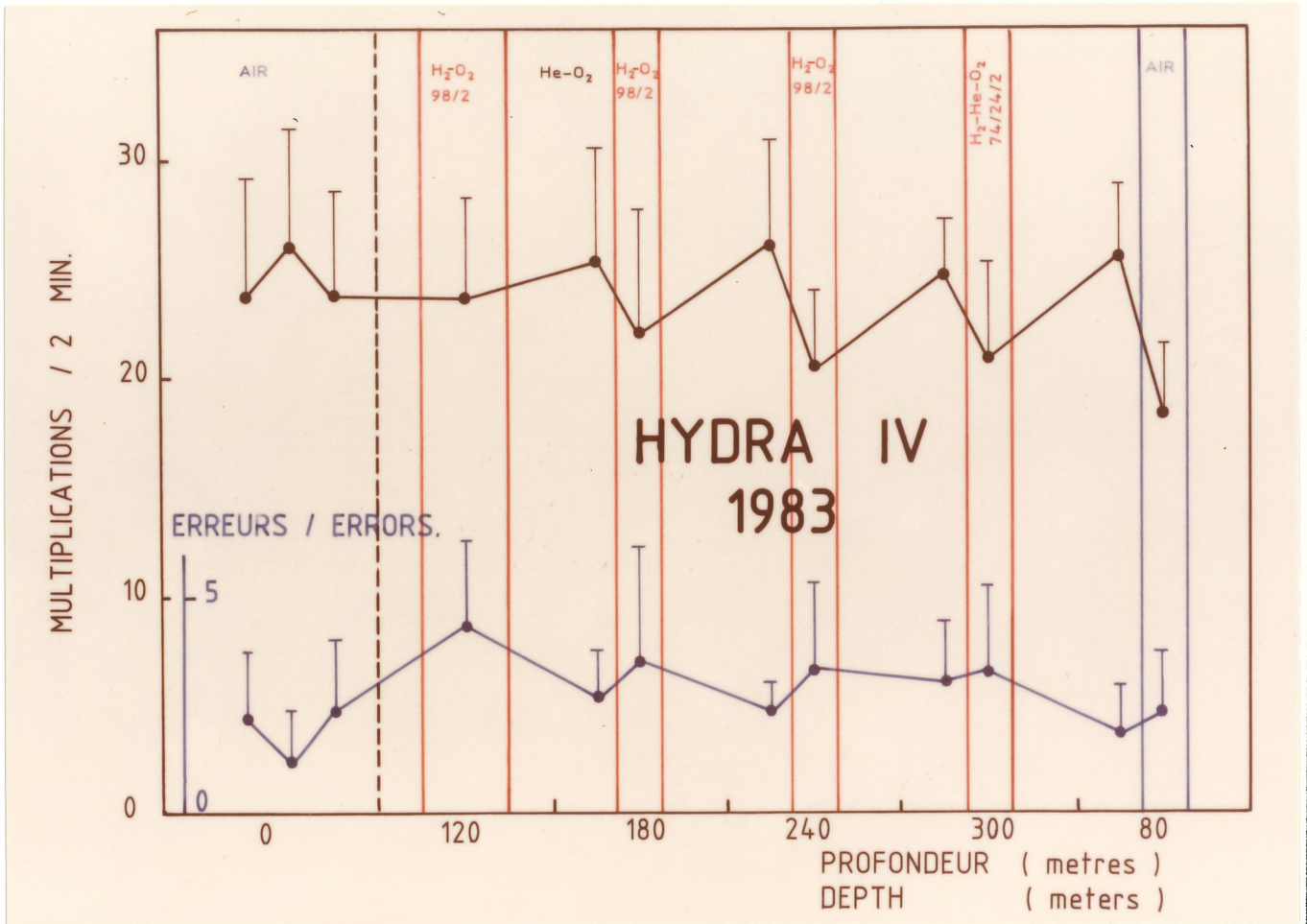
La dégradation de ce test semble proportionnelle à la pression partielle de H₂. Mais ces chutes de performances restent inférieures à celles observées à 80 m entre l'héliox 80/20 et l'air (- 28,4 %).

4 - TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES : RC

Une courbe moyenne est représentée sur la photo 3. Celle-ci montre des variations interindividuelles assez importantes qui rendent les chutes de RC observées entre l'héliox et l'hydrox à 180, 240 et 300 m non significatives. Cependant, la tendance est nette : les performances sont moins bonnes sous hydrox. Les variations moyennes sont nettes mais modérées : - 4,4 % à 180 m ; - 6,4 % à 240 m et - 8,7 % à 300 m en ternaire 74/24/2. Pour ce test, la performance n'est pas proportionnelle à la PIH₂ (variations trop faibles). A 180 m à l'air, la dégradation moyenne observée était de - 12,6%.

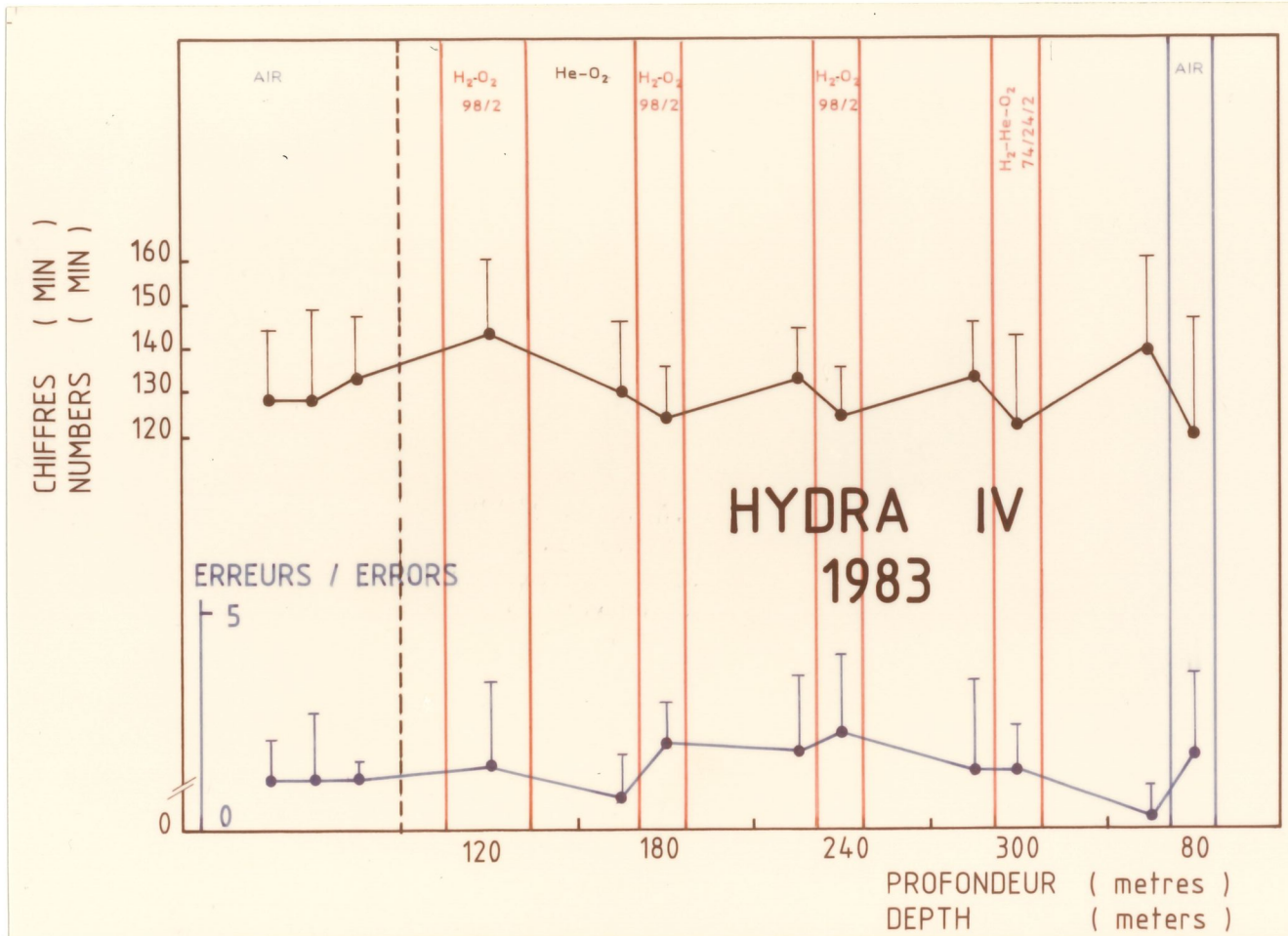
5 - AU COURS DES EXPOSITIONS LONGUE DUREE A 150 M

Les tests psychométriques (DM, multiplications et RC) ont été proposés aux plongeurs qui ont effectué des séjours de 2 h (B2), 4 h (A1) et 6 h (B1) sous hydrox à 150 m. Ils ont été réalisés plusieurs fois chez un même sujet durant son séjour.



EVOLUTION DE LA PERFORMANCE MOYENNE DES 6 PLONGEURS AU TEST
DES MULTIPLICATIONS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ET DU GAZ RESPIRE

PHOTO 2



EVOLUTION DE LA PERFORMANCE MOYENNE DES 6 PLONGEURS
 AU TEST DE RECONNAISSANCE DES CHIFFRES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
 ET DU GAZ RESPIRE.

PHOTO 3

Il n'y a pas de dégradation des performances au cours du temps passé sous hydrox :

- Pour la DM : les performances restent proches d'une valeur moyenne sans que l'on observe de tendance à la dégradation ou à l'amélioration (sauf le dernier test du plongeur B1 qui était heureux d'en finir avec ces épreuves).
- Le test des multiplications n'enregistre pas de baisse de performance sauf pour B1 qui est resté 6 heures sous la coupole. Mais cette baisse était due à une éclipse de la motivation puisque le dernier test atteint à nouveau un résultat proche de celui de référence.
- Le test de RC reste stable pour B1, mais A1 et B2 améliorent beaucoup leurs performances (parallèlement à une hausse du nombre d'erreurs de B2). On observera que ce sujet B2 s'adapte différemment aux conditions expérimentales : augmentation de la vitesse de réalisation du test mais associée à un accroissement du nombre d'erreurs.

RESULTATS BIOLOGIQUES

Les bilans sanguins et urinaires réalisés avant et après exposition prolongée sous hydrox à 150 m chez 3 sujets ont été analysés par le laboratoire d'analyses médicales MONTGRAND.

Deux bilans précédant ces expositions ont eu lieu le 25 novembre en cours de décompression à environ 170 m, et le 26 novembre (arrêt de la décompression à 150 m). Puis, après les séjours sous hydrox, des analyses sanguines et urinaires ont été effectuées juste à la sortie et 6 heures après.

Les résultats des analyses urinaires (Na^+ , K^+ , Cl^- , urée, créatinine, Ca^{++} , phosphore, acide urique, pH) étaient tout à fait normaux mais non directement comparables car les diurèses fractionnées ont été mal réalisées par les plongeurs.

Les résultats des examens sanguins sont normaux. Au niveau des éléments figurés du sang, les petites variations existantes sont tout à fait négligeables, analogues ou inférieures aux variations observées entre les 2 témoins. L'étude de certains facteurs de coagulation (temps de céphaline kaolin, taux de prothrombine, thromboélastogramme et fibrinémie) n'a pas mis en évidence de variation des paramètres après le séjour sous hydrox. Les petites variations observées ne sont pas significatives. Il en est de même pour la biochimie sanguine et les enzymes sériques .

Les bilans réalisés avant et après la plongée HYDRA IV feront l'objet d'une publication ultérieure.

DISCUSSION

ASPECTS SUBJECTIFS DE LA NARCOSE A L'HYDROGENE

Comme on a pu le constater, en lisant les résumés des auto-observations des plongeurs, il existe bien un "effet hydrogène" que l'on peut rattacher à la narcose, autrement dit à l'action psychotrope des gaz à des pressions supérieures à la pression atmosphérique. Cette narcose, tout au moins jusqu'à 240 m (avec une P_{H_2} de 24,5 bar sous une P absolue de 25 bar) ne paraît pas affecter le comportement (sauf exception comme l'endormissement du plongeur A2, soit 1 cas sur 6 sujets et 12 expositions). En revanche, elle est objectivable par la dégradation généralement observée des tests psychométriques. Sur ces aspects subjectifs, nous ferons les remarques suivantes :

1 - IMPORTANTES DIFFERENCES INTERINDIVIDUELLES

Deux sujets très sensibles, A2 et A3, par rapport aux quatre autres comprenant deux sujets, A1 et B2, vraiment peu sensibles. D'où dispersion des résultats.

2 - NOUVEAUTE DE L'EXPERIENCE

Jamais, aucun homme n'avait respiré de l'hydrox au-delà de 160 mètres (ZETTERSTROM, 1945), donc les sujets se trouvaient dans une situation nouvelle, susceptible de comporter des aspects inconnus et pouvaient légitimement ressentir ce que nous appellerons l'angoisse du pionnier. Cette composante affective, déjà perçue mais peu sensible dans le SNHP l'est forcément beaucoup plus dans les états psychiques perturbés par une drogue psychotrope.

En outre, plus les plongeurs savaient que l'expérience était polarisée sur la narcose, plus ils se sentaient chargés de la dépister, ensuite de la décrire, plus ils "s'écoutaient" pour surprendre la moindre sensation anormale. D'où les petits signes ressentis à 120 mètres alors que, plus tard, à 150 mètres, lors du palier en cours de décompression, l'expérience étant pratiquement terminée, les trois plongeurs remis en atmosphère d'hydrox n'ont absolument rien ressenti d'anormal. Tout cela doit être pris en compte dans l'interprétation des données introspectives.

3 - SPECIFICITE DE LA NARCOSE A L'HYDROGENE OU DE L'EFFET HYDROX OU DU POUVOIR PSYCHODYSLEPTIQUE DE L'HYDROGENE

On a le choix. Mais nous serions plutôt d'accord sur le terme de narcose, adopté par les Anglo-Saxons avec Nitrogen-narcosis. In fine, c'est bien le pouvoir narcotique du gaz qui se manifeste (nous l'avons observé) comme avec l'azote, le protoxyde d'azote et la plupart des anesthésiques gazeux, et c'est surtout dans cette évolution que se situe le risque.

Mais avant ce stade de narcose, c'est un syndrome hallucinatoire qui se développe, plus ou moins évident, variable suivant les sujets, la profondeur et la pression d'hydrogène. Schématiquement, il présente deux aspects :

1°/ Chez le sujet vigile, actif, on note des altérations aussi bien sensibles que sensorielles :

- hypoesthésie tactile et même hypoalgésie (le visage supporte un masque trop serré, intolérable sous héliox)
- bouffée de chaleur agréable, diffuse dans tout le corps, persistant sous hydrox, disparaissant sous héliox
- déformation du goût (et peut-être de l'odorat)
- vision plus nette. Couleurs plus lumineuses tirant sur l'orange
- hyperacousie : comme si les sons extérieurs étaient plus proches et plus distincts

Ces aberrations légères au demeurant jusqu'à 240 mètres, sont plus ou moins bien acceptées par le plongeur mais ne paraissent pas diminuer sa lucidité.

2°/ Si le sujet se met au repos sensori-moteur, yeux fermés, ce sont alors les hallucinations interoceptives qui dominent : déformation du schéma corporel, désorientation spatiale, impression de perte d'équilibre et d'isolement, angoissante. L'activité mentale prend la forme d'un "dialogue en circuit fermé". Si l'isolement se prolonge et au bout d'un temps variable suivant les sujets, cette situation évolue vers l'endormissement. Cela fut perçu par deux plongeurs et objectivé chez l'un des deux.

4 - DIFFERENCES ENTRE LES NARCOSES A L'AZOTE ET A L'HYDROGENE

Toutes les comparaisons ne concordent pas, toutes les préférences ne vont pas à l'une plutôt qu'à l'autre. Les remarques majoritaires sont les suivantes :

- a) au changement de gaz, la narcose à l'hydrogène est plus lente à s'installer et plus lente à disparaître que la narcose à l'azote
- b) la narcose à l'hydrogène est plus hallucinatoire et moins ébrieuse que la narcose à l'azote
- c) aux pressions critiques, l'altération des processus mentaux est plus marquée sous azote que sous hydrogène. Cela paraît confirmé par les tests psychométriques auxquels ont été soumis les plongeurs d'HYDRA IV (cf résultats des tests).
A degré de narcose égal - égalité qui reste encore à définir ! - l'hydrogène serait, pour les plongeurs professionnels, moins incapacitant que l'azote.
- d) il semblerait enfin que le sujet soumis à l'"effet hydrogène" est davantage conscient de son état que celui qui subit l'"effet azote". Ainsi les six plongeurs sont d'accord pour reconnaître qu'ils éprouvent :

- un sentiment d'insécurité sous hydrox
- un faux sentiment de sécurité sous azote

Mais la routine n'est-elle pas exagérément rassurante alors que la nouveauté présente toujours un aspect inquiétant ?

ACTION DE L'HYDROGENE SUR LES TESTS PSYCHOMETRIQUES

Les tests psychométriques ont été mis en oeuvre dans le but d'étudier qualitativement et quantitativement la narcose provoquée par l'hydrogène.

- le test de dextérité manuelle mesure la rapidité et la précision d'un mouvement simple de la main et des doigts
- le temps de réaction visuel de choix évalue la rapidité de la décision et de l'action commandée par un signal lumineux
- le test des multiplications mesure la capacité de mettre en oeuvre un mécanisme intellectuel simple, acquis et la mémoire immédiate
- le test de reconnaissance de chiffres mesure la vigilance et la capacité d'observation instantanée.

Les tests intellectuels ont été réalisés plusieurs fois par les plongeurs avant leur entrée en saturation afin de minimiser les interférences entre l'entraînement au test et les dégradations recherchées. Ainsi les sujets avaient à peu près atteint leur niveau moyen de performance avant de subir les épreuves sous héliox / hydrox.

- A 120 m sous hydrox, les réponses aux 4 tests ne sont guère modifiées par rapport à la surface.
- A 180 m, on observe une chute des performances aux multiplications, aux reconnaissances de chiffres, aux TRVC, mais il n'y a pas de différence statistiquement significative entre l'héliox et l'hydrox (test t de student).

Le test le plus affecté est celui des multiplications bien que la différence héliox / hydrox ne soit pas significative par le t de Student ($p < 0,30$) mais significative ($p < 0,01$) par le test de comparaison des différences à 0, utilisé pour les séries appariées.

- A 240 m, profondeur à laquelle tous les sujets ont ressenti la narcose à différents degrés, le test des multiplications accuse une chute de presque 20 % alors que les autres tests sont moins modifiés : - 6 % pour la reconnaissance de chiffres, - 4,5 % pour la dextérité manuelle et - 2 % pour le TRVC. La différence héliox / hydrox au test des multiplications n'est cependant que probablement significative ($p < 0,05$ par le t de Student) et non significative par le test des séries appariées.
 - A 300 m, la PH_2 dans le mélange respiré était inférieure à celle de l'hydrox utilisé à 240 m, et l'on observe une chute moins importante des performances aux multiplications : - 15 %.
- Cependant le test de reconnaissance de chiffres est plus affecté qu'à 240 m : - 9 % (différence non significative). Le TRVC et la DM ne varient pratiquement pas.

Par comparaison, les tests ont été réalisés à l'air à 80 m et les résultats montrent que la narcose à l'azote à cette profondeur est beaucoup plus importante que la narcose à H₂ à 240 m :

- - 11,6 % pour la DM , différence probablement significative (p < 0,05 au t de Student)
- - 28,4 % pour les multiplications , différence significative (p < 0,01 au t de Student)
- - 12,6 % pour la reconnaissance de chiffres, différence non significative (p < 0,20 test t de student)

De plus, à l'air tous les tests sont perturbés alors qu'il semble bien que l'hydrogène n'influence que les 2 tests intellectuels.

Tableau 1:

| Variation moyenne de la performance | à 240 m hydrox 98/2 | à 300 m hydrox ternaire 74/24/2 | à 80 m air |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------|
| Dextérité manuelle | - 4,5 % | - 3,1 % | - 11,6 % |
| TRVC au sec | - 2,2 % | - 0,1 % | - |
| Multiplications | - 19,6 % | - 15,1 % | - 28,4 % |
| Reconnaissance de chiffres | - 6,4 % | - 8,7 % | - 12,6 % |

Le tableau 1 fait la comparaison des résultats des tests à 240 m et 300 m en hydrox et à 80 m à l'air par rapport à l'héliox. Les tests réalisés à l'air à 80 m dans les mêmes conditions (sous la coupole, référence héliox à la même profondeur) ont permis d'obtenir un bon niveau de comparaison pour les tests utilisés. Ceci était nécessaire car les résultats retrouvés dans la littérature pour l'évaluation quantitative de la narcose à l'air sont rarement comparables entre eux (tests un peu différents, conditions de plongée variables : PH₂, profondeur, vitesse de compression, durée de séjour...). BENNETT et BLENKARN (1974) ont étudié la narcose à l'air à 87 m en comparant les tests sous héliox 80/20 et sous air à cette profondeur. Ils enregistrèrent une dégradation de - 29,8 % au test arithmétique (résultat proche de ce que nous avons observé). Mais d'autres auteurs n'observent qu'une chute de : - 13 % à 91 m (SCHREINER et al., 1972) ou de - 18 % à 80 m (ADOLFSON, 1967) sous air par rapport à la surface. Dans nos

conditions, la dégradation du test arithmétique entre la surface et 80 m à l'air est d'environ 25 %.

La mesure de la dextérité manuelle sert surtout à l'étude du SNHP, mais certains auteurs (BENNETT et ELLIOTT, 1982 ; MARTIN-CHAVE, 1983) l'ont utilisée dans l'étude de la narcose à l'air. Ce test a permis de mettre en évidence une différence entre l'effet azote et l'effet hydrogène.

Il apparait donc, d'après les résultats des épreuves et les observations des plongeurs, que la narcose à l'air et la narcose à l'hydrogène se manifestent différemment. L'hydrogène affecte les facultés intellectuelles, notamment la mise en oeuvre de mécanismes acquis simples, sans modifier ni la rapidité, ni la précision d'un mouvement élémentaire, ni le TRVC. L'effet de l'hydrogène ressemble beaucoup à celui des drogues psychodysleptiques, avec hallucinations, dysesthésies, impression de dialogue intérieur, déviation du schéma corporel...

Les deux narcoses ne sont donc pas directement comparables mais on peut cependant évaluer le pouvoir narcotique de H_2 par rapport à l'air pour un test donné.

Au niveau du test des multiplications, le pouvoir narcotique de l'hydrogène est d'environ 21 % de celui de l'azote. Pour le test de reconnaissance de chiffres, ce pouvoir narcotique n'est plus que de 15 % de celui de l'azote. Ces valeurs très théoriques peuvent servir de base pour essayer de définir une profondeur limite d'utilisation du mélange hydrox 98/2. Celle-ci se situerait autour des 200 mètres si l'on considère à l'air la profondeur 50 mètres comme limite de sécurité (normes anglaises). Cette limite ne tient compte que des performances des seuls tests étudiés. Or, d'après les témoignages des plongeurs, il semble que certains effets psychodysleptiques n'ont pas été mis en évidence par les tests utilisés. Il faudra donc utiliser de nouveaux tests lors des prochaines études pour mieux cerner quantitativement tous les effets de l'hydrogène.

EXERCICE EN IMMERSION SOUS HYDROX

Le principal intérêt de l'utilisation du mélange gazeux hydrogéné par rapport à l'héliox est le gain obtenu au niveau des densités du mélange à ventiler et par voie de conséquence l'amélioration de la ventilation et la diminution de la fatigue pendant le travail. C'est cette deuxième conséquence qui a été étudiée par la surveillance des FC au cours des plongées, au repos et pendant l'exercice sur cyclorameur. Le tableau 2 donne les valeurs des masses volumiques des mélanges gazeux respirés en immersion aux profondeurs de 120, 180, 240, 300 et 80 mètres.

Tableau 2 - (gaz humide - 37° C)

| GAZ | Prof. | 120 m | 180 m | 240 m | 300 m | 80 m |
|----------------|-------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Héliox 98/2 | | 2,32 g/l | 3,40 g/l | 4,43 g/l | 5,43 g/l | - |
| Hydrox 98/2 | | 1,33 g/l | 1,96 g/l | 2,52 g/l | - | - |
| Hydrox 74/24/2 | | - | - | - | 3,66 g/l | - |
| Hydrox 59/39/2 | | - | - | - | 3,97 g/l | - |
| Héliox 80/20 | | - | - | - | - | 3,39 g/l |
| Air | | - | - | - | - | 10,27 g/l |

Les résultats de FC ont montré :

- Aucune tachycardie excessive lors de l'équipement.
- FC stables pendant la plongée héliox mais légèrement élevées. L'exercice sur cyclorameur n'a jamais entraîné de tachycardie d'effort importante (FC < 120 btts/min) mais celui-ci ne dépassait pas 35 watt.
- Il semblerait que les FC relevées durant la plongée sous hydrox étaient toujours moins importantes que sous héliox. Cela suggérerait une diminution du travail ventilatoire sous hydrox qui faciliterait l'exercice et la récupération avec une répercussion bénéfique sur le rythme cardiaque.

Mais notre étude n'est pas suffisamment rigoureuse pour argumenter cette hypothèse puisque les plongées commençaient toujours par l'héliox.

Il aurait été intéressant d'inverser les gaz (manipulation non prévue) car il semblerait que la FC s'abaisse lentement en plongée même sans changement de gaz.

Cela est apparu lors de l'expérimentation ENTEX 9 (rapport COMEX, 1984) où un enregistrement continu des FC par la méthode de Holter d'un plongeur à 570 m a montré cette baisse lente (1 heure) de sa FC pendant la plongée.

Nos résultats sont donc peut-être faussés par la notion de durée du séjour dans l'eau, d'autant plus que lors des 2 plongées à 80 m (héliox 80/20 puis air), il semble que cette diminution de la FC avec le temps, se soit reproduite malgré l'augmentation importante de la masse volumique du gaz respiré (air).

- Aucune modification du tracé ECG sous hydrox, même pendant l'exposition au sec longue durée.

Dans les conditions de l'expérience, l'hydrox ne témoigne donc pas d'un pouvoir pathogène sur l'appareil cardiaque. Il a peut-être un effet bradycardisant mais cela demande à être confirmé.

TOXICOLOGIE DE L'HYDROGENE

Une étude précédente chez la souris (rapport HYDRA III souris, 1984) avait démontré qu'aucune modification histologique (foie, coeur, rein et poumon) n'était induite par des séjours prolongés sous hydrox (600 m - 40 h - 40 souris).

Dans HYDRA IV, les bilans sanguins et urinaires effectués avant et après plongée n'ont pas montré de modifications. Tous les paramètres sanguins et urinaires étudiés ont été trouvés normaux juste après la sortie des plongeurs qui a eu lieu environ 6 jours après les dernières expositions sous hydrox. L'hydrogène n'entraîne donc pas de modification irréversible, tout au moins dans les conditions d'exposition ci-dessus décrites.

Lors des expositions de longue durée à 150 m, les prélèvements effectués avant, et juste après le séjour sous hydrox, puis 6 h plus tard, n'ont montré aucune modification significative des paramètres sanguins et urinaires étudiés.

Il semble donc que l'hydrox n'a pas d'influence, même transitoire, sur ces paramètres.

L'hydrogène se comporte, semble-t-il, comme un gaz inerte vis-à-vis du métabolisme cellulaire mais induit cependant un effet psychodysleptique, tout comme l'azote, l'argon, le néon... et bien d'autres gaz dits inertes.

ETUDE NEUROPHYSIOLOGIQUE (J.C. ROSTAIN)

RESULTATS

* EEG

Des modifications EEG sont visibles au niveau des activités rapides postérieures. En effet, on note pour chaque plongeur et pour chaque profondeur étudiés une diminution de la puissance des activités de la bande de fréquence alpha en mélange $H_2 - O_2$ par rapport au mélange He - O_2 . Il existe aussi chez certains sujets des tracés de micro-sommeil qui traduisent une somnolence pendant les tests.

Pour les activités lentes dominantes dans la région antérieure, nous n'avons pas obtenu de modification significative avec l'hydrogène par rapport à l'hélium .

Au cours de la respiration du mélange $H_2 - O_2$ à 150 mètres, nous n'avons pas eu de variation des activités EEG, que le séjour soit de 2, 4 ou 6 heures. Cependant à 150 mètres, nous n'avons pas de dérivation postérieure pour deux sujets, ce qui pourrait expliquer l'absence de modification.

* TREMBLEMENT

Durant cette expérience qui s'arrêtait à 300 mètres et de ce fait ne comprenait pas l'étude du SNHP, le nombre de tests effectués ne permet pas de fournir des conclusions quant à l'influence de l'hydrogène par rapport à l'hélium sur le tremblement. Le seul test effectué à 300 mètres montre chez un seul sujet une diminution du tremblement en $H_2 - O_2$. Chez les autres sujets, nous n'avons pas de modification significative.

COMMENTAIRES

L'étude EEG n'étant pas l'objectif principal de cette plongée expérimentale, les tracés obtenus ne sont pas assez complets pour nous permettre une étude exhaustive et rigoureuse.

Néanmoins, la diminution de l'alpha nous semble être une constante au cours de cette expérience et ceci dès la profondeur de 120 mètres. Cette diminution peut s'expliquer soit par une moins grande concentration des sujets et par une plus grande difficulté à fixer l'attention avec l'hydrogène, soit par une action du mélange lui-même au niveau cortical, cela pouvant traduire indirectement ou directement

un état de narcose.

La durée d'exposition à l'hydrogène : 30 minutes seulement, a été peut-être trop courte pour permettre d'observer d'autres modifications éventuelles au niveau des différentes bandes de fréquences étudiées et notamment l'activité thêta.

Pendant les séjours de longue durée à 150 mètres, l'absence de modification EEG peut s'expliquer par la faible profondeur du palier et par l'absence de dérivation postérieure. Il faut noter cependant que l'absence de référence EEG en mélange He - O₂ avant la respiration du mélange H₂ - O₂ ne nous permet pas de conclure avec certitude.

FONCTION RESPIRATOIRE SOUS HYDROGENE ET SOUS HELIUM : APPROCHE COMPAREE

(G. MBERT)

DISCUSSION

Quatre données retiennent essentiellement l'attention :

- l'amélioration du confort ventilatoire par l'hydrogène,
- son pouvoir narcotique,
- la sensation de confort thermique sous hydrox,
- l'hypoventilation relative pendant l'exercice musculaire.

* Amélioration ventilatoire

Elle était prévisible ; c'était même une donnée connue puisque les plongeurs qui avaient essayé l'hydrox en mer quelques mois auparavant (HYDRA III) l'avaient déjà décrite. Il manquait de la confirmer et surtout de l'objectiver par des mesures.

L'argument le plus convaincant nous paraît fourni par la comparaison des ventilations dans la phase pseudo-stationnaire des exercices musculaires sous héliox et sous hydrox à 180 m. Le gain est de plus de 20 % en terme de $\Delta \dot{V}_E$. Cette observation est complétée et explicitée par l'analyse du barogramme buccal. Celle-ci montre que pour le même effort ventilatoire, les débits moyens sont plus élevés de 20 % sous hydrox que sous héliox.

* Pouvoir narcotique

Son seuil semble voisin de 20 bar. Le pouvoir narcotique de l'hydrogène fait l'objet dans HYDRA IV, d'études psychométriques et neurophysiologiques exposées par ailleurs. Mais les mesures respiratoires apportent deux éléments supplémentaires :

- 1) Ce pouvoir s'exerce aussi sur la commande respiratoire, de façon tout à fait sensible à 240 m : désorganisation du pattern ventilatoire et effet dépresseur nécessitant l'arrêt de l'inhalation chez l'un des sujets. Le phénomène est rapidement réversible. Cette particularité tend à faire écarter l'hypothèse d'un effet toxique (inhibition de la respiration cellulaire par exemple), au profit d'un effet narcotique proprement dit.

2) La narcose est probablement à l'origine de la consommation d'oxygène plus faible sous hydrox que sous héliox, au cours des exercices à 240 m. Les plongeurs narcosés ne respectaient pas le rythme demandé et fournissaient une dépense d'énergie finalement moindre en réponse à une sollicitation extérieure. Ce déficit est mesurable et peut même prendre la valeur d'un indice de narcose. Il peut éventuellement permettre de classer les pouvoirs narcotiques de mélanges gazeux, et sa signification ergonomique est claire.

* Effet thermique

Les plongées s'effectuant dans une eau à 30 °C, l'équipement ne comportait pas de réchauffeur de gaz. Le mélange gazeux était donc inspiré sensiblement à la température qu'il avait à la sortie du dernier étage de détente.

Comme l'hydrogène a un effet Joule-Thomson inversé, cette température était plus élevée pour l'hydrox que pour l'héliox, le détendeur jouant aussi le rôle de réchauffeur de gaz. Les plongeurs n'ont pas manqué d'apprécier cette exception à une règle générale de la physique des gaz.

Il reste qu'à cause de sa chaleur spécifique molaire 40 % plus élevée, l'hydrogène peut poser des problèmes thermiques plus graves que l'hélium, s'il n'entre pas à température correcte dans les voies respiratoires. Des mesures précises sont à faire dans diverses conditions d'environnement thermique.

* Hypoventilation relative

A partir de 240 m, bien qu'il s'agisse d'exercices musculaires très modérés, on observe une diminution de la pression d'oxygène expiré dès que le plongeur entre en activité; La ventilation n'augmente que lentement, l'accroissement de la consommation d'oxygène est surtout assuré par l'augmentation de son coefficient d'extraction pulmonaire. Ceci a probablement pour corollaire une élimination ralentie et donc une rétention de gaz carbonique.

Les variations de ΔP_{O_2} (et donc de ER_{O_2}) sont significativement plus grandes sous héliox que sous hydrox. Il serait imprudent d'en déduire que le facteur déterminant soit la densité du mélange inspiré. Une autre explication possible (mais non exclusive) serait que l'intensité des exercices est plus forte en héliox qu'en hydrox.

De telles variations, constantes chez tous les sujets, pour des exercices d'intensité modérée, et à des profondeurs relativement modestes, sont peut être à mettre en relation avec la situation d'immersion et avec l'utilisation d'un appareil de plongée.

* La question de l'appareil de plongée

Bien que cette question déborde apparamment le cadre strict de la comparaison des propriétés de l'hydrogène et de l'hélium, il n'est pas inutile de formuler ici quelques remarques. Elles touchent aux conditions dans lesquelles ont été effectuées les mesures et, par conséquent, à leur signification. Dans HYDRA IV, les mesures n'ont pas été faites sur des sujets en caisson sec, mais sur des préparations complexes représentées par le sujet immergé et l'appareil de plongée à travers lequel il respire.

Ce dernier ne représente probablement pas qu'une simple résistance externe surajoutée. Il y a, entre l'appareil thoraco-pulmonaire du plongeur et le système pneumatique sur lequel il est branché, des interactions fort complexes.

Par exemple, comment expliquer que la recherche d'un meilleur confort respiratoire à 300 m conduise les plongeurs à augmenter la résistance à l'inspiration du détendeur ? la conséquence en est des variations de crête à crête de la pression buccale qui avoisinent 50 mbar, mais peut-être aussi des ondes de pression à peu près égales en amplitude à l'inspiration et à l'expiration. Est-ce cet équilibre qui est recherché pour la pompe oscillante que représente l'appareil thoraco-pulmonaire ?

CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif d'évaluer comparativement les facteurs limitant la fonction respiratoire et l'exercice musculaire, chez des plongeurs respirant soit un mélange hydrogène-oxygène, soit un mélange hélium-oxygène.

Les mesures ont été effectuées sous pression, dans l'eau, et dans des conditions assez voisines de celles de la plongée profonde, quoique très confortables du point de vue thermique. Des techniques simples et fiables ont permis de mesurer la consommation d'oxygène, la ventilation pulmonaire et les variations de pression dans le masque du plongeur, c'est à dire au point de connection des voies respiratoires et de l'appareil de plongée.

Des différences significatives sont apparues à 180 m et à 240 m, profondeurs auxquelles les mesures ont porté sur 6 sujets.

- les avantages de l'hydrogène sont surtout objectivés par la mesure de la ventilation pulmonaire : sans effort supplémentaire, les plongeurs obtiennent des débits ventilatoires plus élevés,
- ses inconvénients sont surtout objectivés par la mesure de la consommation d'oxygène, en tant qu'indice de la dépense d'énergie : la narcose provoquée par ce gaz diminue la capacité du plongeur à effectuer un exercice s'il lui est demandé.

Schématiquement, on peut considérer que les avantages dominent à 180 mètres, mais que les inconvénients dominent à 240 mètres.

La pression maximale d'utilisation de l'hydrogène semble donc voisine de 20 bar.

Des essais à 300 m, effectués sur un nombre de sujets restreint, témoignent de la possibilité d'utiliser l'hydrogène en mélange ternaire (hélium-hydrogène-oxygène). Les essais ne permettent pas de dire si ces mélanges présentaient un avantage par rapport à l'hélium-oxygène, mais l'association d'hydrogène et d'hélium présente un certain intérêt pour les développements futurs de la plongée profonde.

Par ailleurs, certaines observations (comme l'hypoventilation relative au cours d'exercices même de faible intensité à partir de 240 m), montrent la nécessité d'étudier l'influence des appareils de plongée sur la mécanique thoraco-pulmonaire et sur le contrôle respiratoire.

CONTRE-DIFFUSION ISOBARE DE L'HYDROGENE CHEZ L'HOMME AU COURS DE
L'EXPERIENCE HYDRA IV (G. MASUREL)

Deux groupes de trois plongeurs ont été soumis chacun à des expositions séquentielles de mélange hydrogéné plusieurs fois pendant une plongée à saturation à 300 mètres en héliox.

Les plongeurs devaient respirer le mélange hydrogéné pendant un palier, soit au sec sous la coupole, soit en eau au moyen d'un équipement de plongée standard.

A leur retour en ambiance héliox, les plongeurs étaient soumis à la surveillance des bulles circulantes au niveau du coeur droit grâce à la méthode de détection ultrasonique par effet Doppler.

Après les expositions à l'hydrox à 240 et 300 mètres, seuls deux plongeurs présentèrent une très faible quantité de bulles, en relation avec la contre-diffusion isobarique.

A 150 mètres, après une exposition de 4 heures, un plongeur présenta un niveau 3 de bulles (code KM (1)) 4 heures après son retour en héliox. Les bulles circulantes détectables persistèrent tout en décroissant graduellement, pendant plus de 8 heures.

En conclusion, la contre-diffusion isobarique paraît être relativement modeste dans nos conditions expérimentales, mais elle semble augmenter avec la durée de l'exposition.

(1) KISMAN K., MASUREL G., GUILLERM R.

Bubble evaluation code for Doppler ultrasonic decompression data.
Undersea biomed. Res., 1 (suppl.), 28, 1978

ETUDE DES DEFORMATIONS DE LA PAROLE (J.C. MALHERBE)

En atmosphère synthétique hyperbare, la parole humaine est fortement déformée, ce qui rend les communications directes entre plongeurs ou avec "la surface" impossibles. Ce phénomène est dû aux propriétés physiques des gaz dans le conduit vocal. Il se traduit dans le cas simple des sons voisés par un étalement du spectre fréquentiel représentatif, vers les fréquences élevées, sans que la valeur de la plus basse fréquence ne soit modifiée de manière notable. la variation du spectre est fonction du gaz employé et de sa pression.

L'équipe "parole déformée" du Laboratoire LASTI de LANNION (Université de RENNES I) a effectué une série d'enregistrements lors de l'expérience HYDRA IV. Ces enregistrements correspondent à un corpus rigoureux lu par les plongeurs, à l'air, à la pression atmosphérique puis en héliox, trimix et hydrox à différentes pressions.

L'étude menée s'oriente dans trois axes :

- a) A partir des données expérimentales, vérification et affinage des connaissances du phénomène de déformation et traitement du cas particulier de l'hydrox.
- b) Elaboration d'un modèle théorique (sur ordinateur) du conduit vocal, tenant compte du mélange gazeux respiré et de sa pression. Cette étude partant d'un modèle établi par l'équipe parole du CNET, valable seulement pour l'air à la pression atmosphérique.
- c) Conception d'un appareil correcteur performant, peu volumineux et de faible coût utilisant de nouveaux composants électroniques encore actuellement au stade de prototypes.

C O N C L U S I O N S

- 1 - On peut d'autant plus se féliciter du déroulement de la plongée fictive expérimentale HYDRA IV que cette opération comportait l'emploi d'un gaz particulièrement délicat à manipuler de par ses propriétés physiques de diffusion et d'explosivité. Ainsi les conditions d'utilisation de l'hydrogène posent, dans chaque cas de figure, de nouveaux problèmes. Ici, les plus importants ont été résolus.

- 2 - Au plan physiologique, l'obligation de passer au mélange ternaire ($H_2/He/O_2$), à 300 mètres était envisagée.
A la suite des travaux de BRAUER sur le petit mammifère l'effet psychotrope de l'hydrogène était prévisible et nous étions prêts à le prendre en compte. Nous y reviendrons. Quoiqu'il en soit, l'échelonnement des profondeurs et des durées a été strictement respecté.

- 3 - La toxicité de l'hydrox légèrement hyperoxique, et pour des expositions de 2 à 6 heures, n'a pas été mise en évidence par les examens biochimiques sanguins et urinaires. Cela confirme les résultats d'expériences animales beaucoup plus sévères. L'hydrogène paraît donc se comporter comme un gaz inerte vis à vis des structures cellulaires, tout en agissant sur les fonctions psychiques, comme le fait d'ailleurs notre azote coutumier, à des pressions plus faibles.

- 4 - Les conditions de cette première approche physiologique ne permettaient pas d'effectuer des explorations fonctionnelles respiratoires exhaustives. Et si les plongeurs (surtout professionnels) ont pu apprécier le confort respiratoire "extraordinaire" sous hydrox, ainsi que la disparition de la sensation de fatigue à l'exercice sur cyclorameur, les résultats des mesures réalisées dans des conditions difficiles en immersion, (\dot{V}_E et \dot{V}_{O_2}) sont plus délicats à interpréter.
Quoi qu'il en soit, l'étude des fréquences cardiaques relevées pendant l'exercice tend à montrer une diminution du coût cardiaque de l'effort sous mélange hydrogéné.

5 - Le passage des plongeurs de l'hydrox expérimental à l'héliox d'ambiance devait entraîner, d'après les travaux de LAMBERTSEN et ceux de D'AOUST, des phénomènes de contre-diffusion isobare (C.D.I.) du gaz inerte avec formation de bulles circulantes ou stationnaires.

Au cours d'HYDRA IV, le procédé Doppler et l'échographie ont confirmé l'existence de ce mécanisme générateur de bulles (fonction de la durée d'exposition et de la PH_2). Dans les conditions de l'expérience, le phénomène n'a pas entraîné de conséquences pathologiques mais il sera bon de la surveiller à l'avenir. Avec optimisme car, justement dans l'avenir, les saturations aux mélanges hydrogénés binaires ou ternaires, sans passage à l'héliox pur, tendront à réduire l'importance des problèmes de C.D.I.

6 - Comme nous l'avons vu certains aspects de la narcose à l'hydrox sont différents de ceux de la narcose à l'air, au moins dans leur phase initiale. Toutefois il est possible d'évaluer la différence d'intensité des phénomènes, le pouvoir psychodysléptique de l'hydrogène se situant environ au quart de celui de l'azote.

Mais cet "effet hydrogène" n'est ni absolu ni inutile car :

- D'une part, il dépend de la pression ambiante ; celle-ci se comportant comme un antagoniste de l'action narcotique du gaz. (Ainsi, chez trois de nos sujets une étude comparative de la PH_2 narcotique en fonction de la profondeur montre que la première croît avec la seconde. D'autres constatations nous permettent d'en déduire qu'un plongeur professionnel tolérerait dans le mélange, 63 % d' H_2 à 300 m et 50 % à 450 m, pour un degré de narcose à peine perceptible).

- D'autre part, il serait par lui même antagoniste du syndrome nerveux des hautes pressions comme l'azote - ce qui constituerait un avantage certain pour les plongées à partir de 300 mètres.

Tout cela sera précisé lors de la prochaine saturation expérimentale à 450 m, HYDRA V, car le bilan positif d'HYDRA IV est particulièrement encourageant.

7 - Jusqu'à ce jour il n'existait que deux types de gaz pratiquement utilisables comme diluants de l'oxygène en hyperbarie, l'azote et l'hélium. Maintenant il est permis d'espérer qu'un gaz du 3ème type, l'hydrogène, permettra de repousser encore les limites imposées par le SNHP et par les restrictions respiratoires en plongée très profonde.

*Nous ne saurions trop remercier
les aimables participants au financement d'HYDRA IV*

AIR LIQUIDE

B.P.

BRITOil

C.F.P.

CONOCO

ELF

I.F.P.

NUTEC

UGLAND