



HAL
open science

Hydra IV

Sa Comex

► **To cite this version:**

| Sa Comex. Hydra IV. COMEX. 1984. hal-04510158

HAL Id: hal-04510158

<https://hal.univ-brest.fr/hal-04510158>

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



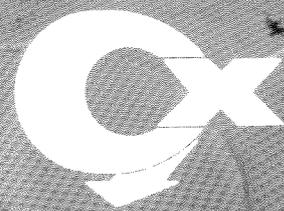
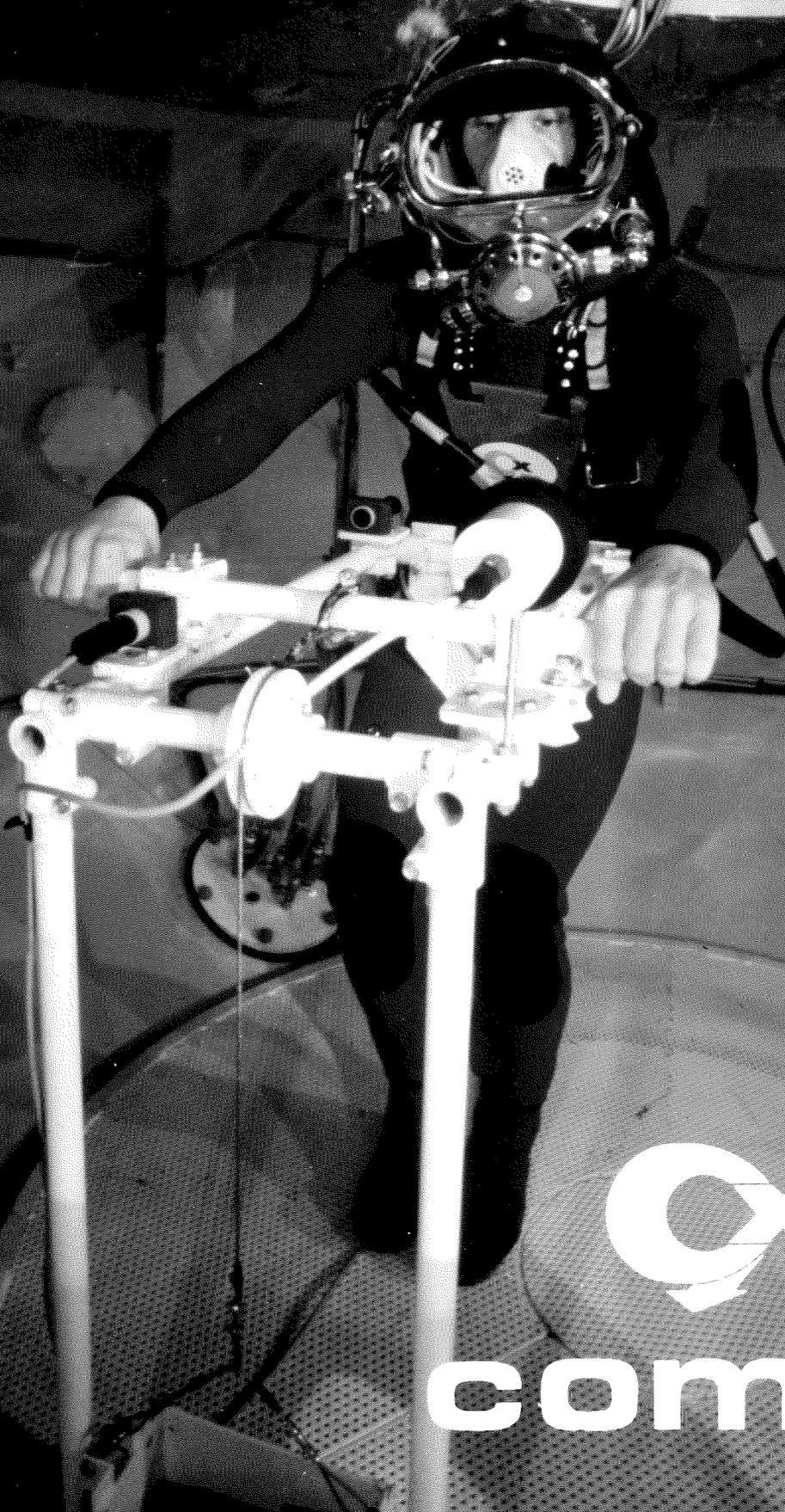
The present document is the property of COMEX SAS. It has been entrusted to the ORPHY laboratory, which scanned and uploaded it.

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.

HYDRA IV



comex

HYDRA IV

COMEX S.A.

DIRECTION SCIENTIFIQUE

MARS 1984

comex

P L A N

AVANT PROPOS

I - INTRODUCTION	P. 1
- A - HISTORIQUE	
- B - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'HYDROX	P. 5
. Hydrox : narcose ? effet anti-SNHP ?	
. Hydrox et aisance respiratoire	P. 6
. hydrogène et sécurité	
. L'hydrox : aspect économique	P. 7
- C - LES OBJECTIFS D'HYDRA IV	P. 8
- D - ORGANISATION DE L'EXPERIMENTATION HYDRA IV	P. 9
1- l'équipe COMEX	
2- les équipes scientifiques extérieures participant à HYDRA IV	
3- les plongeurs	P. 10
4- COMEX et ses partenaires	P. 12
HYDROGENE : constantes physiques	P. 15
II - MATERIEL ET METHODES	P. 17
- A - MATERIEL	
1- l'enceinte hyperbare	
2- gaz utilisés	
3- équipement individuel des plongeurs	P. 20
4- matériel scientifique COMEX	
5- données biométriques des plongeurs	P. 22

- B - METHODES	P. 23
1- la compression	
2- la décompression	P. 24
3- programme journalier	P. 26
4- protocole des tests au sec	P. 30
5- protocole des tests en immersion	
6- protocole des expositions longue durée	P. 33
7- investigations réalisées par COMEX	
a - enquête journalière	
b - tests psychométriques	P. 35
. dextérité manuelle	
. temps de réaction visuel de choix	
. test des multiplications	
. test de reconnaissance de chiffres	
c- exercice sur le cyclorameur sous contrôle de l'électrocardiogramme (ECG)	P. 36
d- puzzle JANUS IV	P. 41
8- autres investigations	
III - RESULTATS	P. 42
- A - DEROULEMENT DE L'OPERATION ET BILAN SOMMAIRE	
- B - BILAN DES SEJOURS SOUS HYDROX - PARAMETRES D'ENVIRONNEMENT	P. 44
- C - RESULTATS SUBJECTIFS	P. 45
1- enquête fatigue	
2- l'effet hydrogène	
- D - RESULTATS DES TESTS PSYCHOMETRIQUES	P. 51
1- la dextérité manuelle	
2- le temps de réaction visuel de choix	
3- test des multiplications	P. 59
4- test de reconnaissance de chiffres	P. 63
5- au cours des expositions longue durée à 150 m	

- E - ETUDE DE L'ECG PENDANT LES ACTIVITES EN IMMERSION	P. 70
1- étude des fréquences cardiaques au cours des plongées	
2- étude de l'ECG pendant les plongées	P. 76
3- ECG et FC pendant les séjours longue durée sous hydrox à 150 m	
- F - RESULTATS BIOLOGIQUES, SCINTIGRAPHIQUES ET VENTILATOIRES	P. 77
1- séjours prolongés sous hydrox à 150 m	
2- bilans en fin de plongée HYDRA IV	
3- surveillance scintigraphique	P. 83
4- spirométrie avant et après HYDRA IV	P. 84
IV - DISCUSSION	P. 85
- A - ASPECTS SUBJECTIFS DE LA NARCOSE A L'HYDROGENE	
- B - ACTION DE L'HYDROGENE SUR LES TESTS PSYCHOMETRIQUES	P. 88
- C - EXERCICE IMMERSION SOUS HYDROX	P. 91
- D - TOXICOLOGIE DE L'HYDROGENE	P. 93
- E - SPIROMETRIE ET SCINTIGRAPHIE PRE ET POST PLONGEE	P. 94
V - RESULTATS ET COMMENTAIRES DES EQUIPES COOPERANTES	P. 95
- A - ETUDE NEUROPHYSIOLOGIQUE	
1- variables physiologiques étudiées	
2- méthodes d'enregistrement	
3- résultats	P. 96
a - ECG	
b - tremblement	
4- commentaires	

- B - FONCTION RESPIRATOIRE ET EXERCICE MUSCULAIRE EN PLONGEE A L'HYDROGENE OU A L'HELIUM : UNE APPROCHE COMPAREE	P.102
Introduction	P.103
Méthodes	
Résultats	P.110
Discussion	P.128
Conclusion	P.131
- C - CONTRE DIFFUSION ISOBARE DE L'HYDROGENE CHEZ L'HOMME AU COURS D'UNE PLONGEE SIMULEE A 300 METRES	P.132
- D - RAPPORT PRELIMINAIRE SUR LES IMAGES ECHOGRAPHIQUES	P.134
Méthodes	
Résultats	P.135
Conclusions	P.137
Référence	
Appendix A	P.138
- E - ETUDE DES DEFORMATIONS DE LA PAROLE	P.143
CONCLUSIONS	P.144
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXE 1 : consignes de sécurité et procédures de plongées	
ANNEXE 2 : bilan des séjours sous hydrox	
ANNEXE 3 : courbes individuelles au test de dextérité manuelle	
ANNEXE 4 : courbes individuelles au TRVC	
ANNEXE 5 : courbes individuelles au test des multiplications	
ANNEXE 6 : courbes individuelles au test de reconnaissance de chiffres	

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.

la profondeur

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 - 1h20) 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.

I - INTRODUCTION

A - HISTORIQUE

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. Nous rappellerons très brièvement les principales expériences :

1965 - 1968 : R.W. BRAUER soumet à des mélanges ternaires, He/H₂/O₂, des souris et singes-écureuils. Les expositions sont longues (jusqu'à 24 heures) et les pressions élevées : 60 à 90 ATA. Ces saturations sont parfaitement tolérées par ces mammifères. En 1970, il peut conclure : "Data similar to those obtained on the monkeys are available for mice : pressures as high as 90 ATA are tolerated with no dramatic evidence of damage even after considerable periods of exposure".
(R.W. BRAUER et R. WAY, 1970 - R.W. BRAUER et al., 1974).

1969 : J. CHOUTEAU et col.; exposent 5 lapins à 29 ATA d'hydrox durant plusieurs heures. Les animaux développent un syndrome toxique et meurent. (MICHAUD et al., 1969).

1969 - 1970 : A la COMEX, nous exposons un babouin *Papio papio* à l'hydrox trois fois en 34 jours :

- . 1ère plongée : 3 h au-delà de 200 m et 2 h à 300 m
- . 2ème plongée : 3 h au-delà de 300 m et 2 h à 500 m
- . 3ème plongée : 5 h au-delà de 500 m et 1/2 h à 675 m

A 675 mètres, le babouin présente un SNHP critique, lequel s'atténue rapidement dès le début de la décompression, poursuivie sans incident. Le *Papio papio* survivra en parfaite santé durant des années. (J.C. ROSTAIN, 1980).

1967 - 1970 : P.O. EDEL essaie l'hydrox à 60 mètres, en caisson, près de deux heures, sur lui-même et cinq autres volontaires sans que le moindre trouble soit ressenti, ni les constantes sanguines perturbées (EDEL et al., 1972). A des pressions plus élevées (10 et 31 ATA), il soumet des chiens, durant 24 et 39 heures. La tolérance paraît satisfaisante. Par la suite, les animaux ne présenteront aucun phénomène pathologique.

Les années suivantes, Peter EDEL et William P. FIFE expérimentent sur le chien (1140 heures au total d'expositions à l'hydrox à 305 m), sur le rat et la souris (5313 heures) et sur eux-mêmes, en caisson, jusqu'à 91 m, durant (4 heures, soient 37 heures au total). En ce qui concerne les animaux, le rapport de FIFE, étayé par les contrôles biochimiques et histologiques chez le chien, conclut à l'innocuité de l'hydrox au moins jusqu'à 300 m. (W.P. FIFE, 1979).

1978 : ORNHAGEN, LUNGGREN et MUREN reproduisent, à très peu près, les expériences de CHOUTEAU : 12 lapins exposés à plusieurs reprises durant 24 à 48 heures sous 30 ATA d'hydrox ($PIO_2 = 0,2$ à $0,56$ b). Tous survivent normalement "without evidence of toxic or other ill effects". (ORNHAGEN et al., 1980).

Mars 1983 : A la COMEX, nous soumettons 40 souris I.O.P.S. à la profondeur fictive de 600 mètres, sous hydrox, durant 42 heures. La clinique, aussi bien que l'examen des principaux organes de l'animal, démontrent que dans ces conditions de saturation de longue durée (par rapport au temps biologique du petit mammifère), l'hydrogène ne provoque pas de réactions pathologiques, fonctionnelles ou organiques, décelables. Encore faut-il que cet hydrogène réponde aux normes médicales de pureté, c'est-à-dire que, quelle que soit son origine électrolytique ou catalytique, il ait été épuré par adsorption cryogénique, qu'il soit exempt de polluants tels que les cyanures ou les arsines trop souvent présents dans l'hydrogène industriel. C'est la conclusion qui paraît se dégager des résultats obtenus dans les divers laboratoires.

Juin 1983 : Une nouvelle approche - psychologique autant que technique et opérationnelle - a été entreprise, celle de la plongée à l'hydrox en mer. Du 27 juin au 4 juillet, 16 plongeurs de la COMEX ont, en 8 plongées, par groupe de deux, respiré de l'hydrox, à 70 mètres, puis deux plongeurs à 91 mètres durant 5 minutes. La différence avec l'héliox ne fut pas nettement perceptible. Seule la décompression, réalisée sans incidents, fut particulière. Elle exigea des paliers plus profonds et un allongement d'environ 30 % par rapport aux tables à l'héliox.



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

B - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'HYDROX

HYDROX : NARCOSE ? EFFET ANTI-SNHP ?

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.

HYDROX ET AISANCE RESPIRATOIRE

En effet, comme l'ont démontré de nombreux travaux expérimentaux, menés notamment en France et aux Etats-Unis, le déficit ventilatoire provoqué par l'héliox et le trimix à partir de 300 mètres de fond constitue le principal facteur ergonomiquement limitant. A 450 mètres, par exemple, la densité du mélange trimix étant de 10,9 grammes au litre, la ventilation maximale par minute et le débit de pointe sont diminués de 50 % par rapport à la surface ! (HYACINTHE et al., 1982).

Conséquence directe de cet inconvénient : pour une puissance maximale de travail musculaire estimée à 250 watt près de la surface, le plongeur ne peut plus fournir que 140 watt à 450 mètres. Le désavantage ventilatoire du trimix est donc évident.

En revanche, H_2 a un poids moléculaire de 2, le plus faible de tous ceux qui figurent dans le tableau de Mendeleiev. D'où une très faible densité du mélange respiré (4,28 g/l à 450 mètres) et une nette diminution de l'effort respiratoire dans les grandes profondeurs. Un avantage déterminant qu'aucun autre gaz n'est capable d'offrir.

HYDROGENE ET SECURITE

H_2 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 a la composition suivante :

- . 98 % d'hydrogène,
- . 2 % d'oxygène.

Ce qui le situe bien 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.

Sur le plan de sécurité, l'hydrox doit être manipulé comme de l'hydrogène pur.

Les cylindres de stockage "haute pression" sont protégés par une zone balisée, à l'intérieur de laquelle tout feu est interdit. Les conduites de transfert sont en métal inerte à l'hydrogène et les tableaux de distribution équipés de détecteurs qui déclenchent des alarmes sonores et lumineuses dès que la présence de très faibles traces de ce gaz est décelée. / *mut*

Ces précautions font l'objet de procédures spéciales et de consignes rigoureuses de sécurité, établies par les services techniques (annexe 1).

L'HYDROX : ASPECT ECONOMIQUE

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.

On trouve de l'hélium à l'état naturel dans des gisements où il entre en composition avec du méthane. Après extraction, les deux gaz sont dissociés. L'hélium est alors purifié pour être utilisé en mélange respiratoire. En dehors de cet usage, l'hélium est véritablement le gaz du futur, attaché aux industries de pointe comme la cryogénie. Or, les seuls pays dont le sous-sol en est producteur sont les Etats-Unis et la Pologne. Deux nations qui contrôlent la production de ce gaz dans le monde avec tous les inconvénients qui peuvent découler d'un tel monopole, tant au niveau des prix que des stocks. le risque de "fermeture du robinet" n'est même pas exclu, comme ce fut le cas pour le pétrole en 1973.

A l'inverse, l'hydrogène est un gaz manufacturé que l'on fabrique à volonté de différentes manières. Aucun problème d'approvisionnement, donc, et un prix résolument "démocratique."⁴¹

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. L'effet DONALD DUCK, bien connu en milieu héliox ou trimix, est-il différent sous hydrox ?

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 Doppler des bulles circulantes.
- Détection échographique des bulles stationnaires.
- Enregistrement de voix.

D - ORGANISATION DE L'EXPERIMENTATION HYDRA IV

1 - L'EQUIPE COMEX

Direction des opérations : H.G. DELAUZE
Direction scientifique : X. FRUCTUS et B. GARDETTE
Direction technique : C. GORTAN

Equipe scientifique et médicale : M. COMET
Y. GIRAN
R. SCHIAPARELLI
H. TRELLU
M. CARLIOZ

Equipe technique : Laboratoire : A. BENED
J. NOCELLA
Chef de plongée : J. COUSTAL
Chefs de poste : A. MARTIN
P. MARTIN
Techniciens : S. CLAIRET
E. JALLET
P. ROUX
X. ROULEAU

Officier de sécurité : J.P. MARY

2 - LES EQUIPES SCIENTIFIQUES EXTERIEURES PARTICIPANT A HYDRA IV

CENTRE CARDIOLOGIQUE CANTINI : G. FAUGERE

CENTRE MEDICAL MONTGRAND : F. SICARDI

Marine Nationale
CEPISMER : P. CAVENEL

CERB appliquée à la marine
Service Santé Inter Armées
CERB : B. BROUSSOLLE
J.L. MORCELLET
R. HYACINTHE
P. GIRY
A. BARET

DRAN - Bivoli
CERTSM : R. GUILLERM
G. MASUREL
N. GUTTIEREZ

Centre Etudiants en bord de Brest

- × COMEX HOULDER RESEARCH : G. DORAN
M. CROSS
N. CALDWELL
J. PIMLOTT
S. CUNLIFFE
- √ GIS (CNRS) : R. NAQUET
M. HUGON
G. IMBERT
A. FOLCO
J.C. ROSTAIN
M.C. GARDETTE-CHAUFFOUR
- √ GISMER *Marie Perle* : D. LAMY
- GRUPE PROSPECTIVE DE LA FFMK : M. BRUN
- √ INSTITUT NATIONAL DE PLONGEE
PROFESSIONNELLE : P. GAVARRY
J.P. MACCHI
- UNIVERSITE D'OXFORD : S. DANIELS
- UNIVERSITE DE RENNES : J.C. MALHERBE
J. CRESTEL
M. GUITTON

OCTOBRES :

3 - LES PLONGEURS

- * Les Plongeurs de l'Equipe "A"
(un chef plongeur, un ingénieur, un médecin)

GIRAUD Marcel :

45 ans. Nationalité française.

Début dans la plongée comme plongeur de bord de la Marine Nationale à SAINT MANDRIER. Plongeur en travaux publics (chef d'équipe) pendant 12 ans (plus de 10 000 heures de travail).

Entre à COMEX en 1975 où il exerce aujourd'hui le métier de chef de chantier.

Fonction dans HYDRA IV : chef plongeur de l'équipe A.

GUERRIER Gérard :

27 ans. nationalité française.

Ingénieur. A suivi les cours de l'E.S.I.M. (Ecole Supérieure d'Ingénieurs de MARSEILLE), puis ceux de l'Université de MIAMI.

Entre à COMEX en 1980 où il est aujourd'hui coordinateur du programme de recherche et développement, ainsi que responsable du secteur robotique.

Expérience de plongée : 400 plongées sportives à l'air.

Fonction dans HYDRA IV : plongeur.

LE MIRE Jacques :

37 ans. Nationalité française.

Médecin. A suivi l'enseignement de médecine hyperbare au Centre Hyperbare de l'Hôpital Salvator à MARSEILLE.

Médecin opérationnel au sein de COMEX en 1975.

Exerce successivement à DJIBOUTI pendant 3 ans, puis en TUNISIE à l'école des pêches de ZARZIS.

Vit actuellement à DJERBA où, parallèlement à son activité médicale, il s'occupe de la culture des éponges.

Expérience subaquatique : 1 500 plongées sportives à l'air.

Fonction dans HYDRA IV : médecin de l'équipe A.

* Les Plongeurs de l'Equipe "B"

(un chef plongeur, un plongeur, un médecin)

SCHNEIDER Louis :

32 ans. Nationalité française.

Engagé dans la Marine Nationale pendant 8 ans, dont 4 passés comme nageur de combat.

Entre à COMEX en 1973 comme plongeur en saturation, métier qu'il exerce toujours, sur tous les chantiers du monde.

Totalise 1 année de vie en saturation.

A participé à l'opération JANUS IV (6 plongeurs en intervention réelle par 460 mètres de fond et record du monde établi à moins 501 mètres, au large de CAVALAIRE, en octobre 1977).

Participe aux chantiers de pompage d'hydrocarbures contenus dans les épaves du BOEHLEN et du TANIO.

Fonction dans HYDRA IV : chef plongeur de l'équipe B.

NORMAN Gerry :

40 ans. Nationalité anglaise.

Plongeur depuis 1960. A débuté dans les commandos de Marine.

Est actuellement responsable du Centre Hyperbare de l'école de plongée de FORT BOVISAND (U.K.).

Plongeur professionnel.

Fonction dans HYDRA IV : plongeur.

CROSS Maurice :

37 ans. Nationalité anglaise.

Médecin à PLYMOUTH (U.K.). Professeur de médecine du travail à l'Université de NEWCASTLE. Médecin de l'école de plongée.

Apprend la plongée en 1976 à l'école COMEX de STAVANGER (NORVEGE).

Possède la qualification de plongeur-tourelle.

Fonction dans HYDRA IV : médecin de l'équipe B.

* Plongeur remplaçant

TRELLU Hubert :

27 ans. Nationalité française.

Médecin. Spécialisé dans la médecine du travail. A étudié la médecine de plongée dans le service du Professeur CORRIOL à MARSEILLE.

2ème échelon de la FFESSM depuis 5 ans.

350 plongées sportives à l'air.

4 - COMEX ET SES PARTENAIRES

De nombreux organismes s'intéressant à la plongée dans l'industrie pétrolière "offshore" participèrent à l'expérience HYDRA aux côtés de COMEX, ayant apporté leur support financier sous forme de "tickets" à 2 000 \$ et 10 000 \$.

B.P.

"The programme is directed towards a greater water depth than we expect to apply to our own operations for some years, but nevertheless can be of considerable value to the oil industry as a whole".



14 NOVEMBRE 1983 : LES PLONGEURS AVANT L'ENTREE EN CAISSON, ACCOMPAGNES DE C. GORTAN, DIRECTEUR TECHNIQUE DE L'OPERATION.

DE GAUCHE à DROITE : L. SCHNEIDER, G. NORMAN, M. CROSS, C. GORTAN, M. GIRAUD, J. LE MIRE, G. GUERRIER.

C.F.P.

"TOTAL se doit d'aider une des sociétés de services les plus dynamiques du secteur pétrolier".

I.F.P.

"Nous estimons qu'au stade actuel de l'évolution des techniques d'exploitation des gisements sous-marins d'hydrocarbures, il est important de discerner la part respective que prendront les moyens mis en oeuvre à partir de la surface ou du fond de la mer dans les systèmes de production qui seront utilisés dans les prochaines années".

ELF AQUITAINE NORGE

"ELF AQUITAINE a toujours soutenu la COMEX dans ses efforts pour faire reculer les limites de l'intervention de l'homme sous la mer".

NUTEC

"Hydrox diving in the future could find applications in deep diving and we are interested in every experiment which could help to evaluate this possibility. We will send a representative to get a firsthand impression on the first deep human exposure to hydrogen".

AIR LIQUIDE

"L'océanologie, les recherches minéralogiques, les expériences de plongée et de séjour au fond des mers ouvrent à l'activité humaine d'immenses perspectives d'expansion. L'effort accompli dans ce domaine est un puissant facteur de développement économique et social".

UGLAND

BRITTOIL

CONOCO LTD

HYDROGENE : CONSTANTES PHYSIQUES

Dans les conditions normales de pression et de température, l'hydrogène est un gaz incolore, inodore, sans saveur et sans toxicité propre.

Propriété physiques

Formule chimique	: H ₂
Numéro atomique	: Z = 1
Masse molaire	: 2,016 g. mole ⁻¹
Dimensions moléculaires	: 3,1 - 2,4 Å
Energie d'ionisation	: 15,427 eV
Masse volumique	: 0,08989 g.l ⁻¹ à pression et température normales
Point d'ébullition	: - 252,7 °C à pression atmosphérique
Chaleur spécifique à volume constant	: 2,44 Kcal. Kg ⁻¹ . °K ⁻¹ à 25 °C et 30 bar
Vitesse du son	: 1 341 m.s ⁻¹ à 25 °C et 30 bar
Conductivité thermique	: 44,2.10 ⁻⁵ cal. cm ⁻¹ . s ⁻¹ . °K ⁻¹ à 27 °C et 30 bar
Solubilité dans l'eau	: 0,0163 m ³ par m ³ d'eau à 30 °C et pression atmosphérique



CENTRE EXPERIMENTAL HYPERBARE COMEX - VUE D'ENSEMBLE -

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

II - MATERIEL ET METHODES

A - MATERIEL

1 - 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.

2 - 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

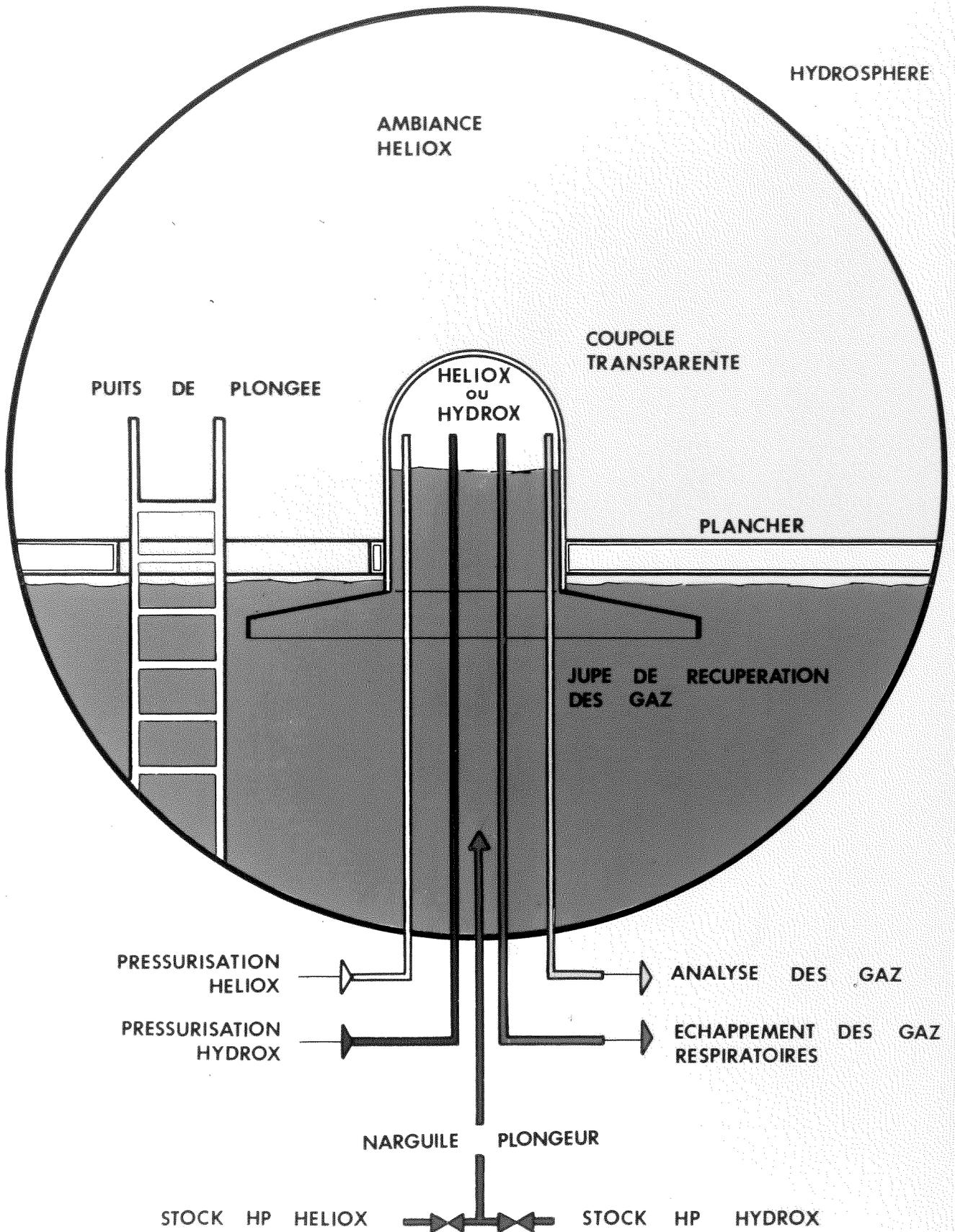


FIGURE 1

- 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.

3 - EQUIPEMENT INDIVIDUEL DES PLONGEURS

- Pour les tests au sec :
Comme, pour atteindre la coupole, le sujet devait passer dans l'eau, il était équipé d'une combinaison COMEX Pro monopièce, avec un plomb de poitrine accroché sur le harnais. Pour son passage sous la cloche, il utilisait un masque et un détendeur relié à une arrivée de gaz (héliox 2 %).

- Pour les tests en immersion, les plongeurs étaient équipés de :
 - . combinaison humide COMEX Pro monopièce sans cagoule, en néoprène 5 mm avec fermeture antérieure thoraco-abdominale,
 - . chaussons néoprène,
 - . harnais sécurité,
 - . plomb de poitrine,
 - . bi-bouteille de secours (V : 3,33 l x 2 ; P : 200 b) rempli d'héliox 98/2
 - . masque facial équipé d'un détendeur-déverseur COMEX Pro T8 et relié à la paroi sèche par un ombilical comprenant :
 - l'arrivée des gaz respiratoires,
 - le câble de l'ECG,
 - le câble des communications,
 - la ligne de vie.

De plus, le plongeur était équipé d'électrodes électrocardiographiques permettant de surveiller l'ECG et la fréquence cardiaque (FC) durant toute la plongée et principalement au cours de l'effort sur cyclorameur.

4 - MATERIEL SCIENTIFIQUE COMEX

Nous avons utilisé pour l'expérimentation HYDRA IV :

- . un électrocardiographe CARDIOLINE,
- . un boîtier HOLTTER pour enregistrer en continu l'ECG, fabriqué par REYNOLDS MEDICAL. L'ECG enregistré sur bande magnétique était ensuite dépouillé au centre cardiologique CANTINI,
- . un boîtier avec chronomètre (centième de seconde) et générateur d'impulsions lumineuses fabriqué par la société DUFOUR (PARIS) pour la mesure du temps de réaction visuel de choix (TRVC),
- . une planche de 100 trous et 50 chevilles pour la mesure de la dextérité manuelle,
- . des feuilles de test en papier synthétique non mouillables,
- . un cyclorameur fabriqué par la société CREAT (MARSEILLE),
- . un puzzle à pièces mécaniques, type "JANUS IV".



LA SALLE DE CONTRÔLE DE PLONGÉE AVEC UNE PARTIE
DU LABORATOIRE DE PHYSIOLOGIE.

5 - DONNEES BIOMETRIQUES DES PLONGEURS

Le tableau 1 suivant regroupe les caractéristiques physiques et ventilatoires des plongeurs d'HYDRA IV.

La mesure des paramètres respiratoires a été effectuée les 9 et 10 novembre 1983 au CERB (hôpital Ste Anne à TOULON).

De plus, un bilan sanguin et urinaire a été effectué par le CERB avant la plongée.

PLONGEURS	AGE ans	TAILLE cm	POIDS kg	CAPACITE VITALE l	VEMS l	VMM l/mn	DEMM l/s	TL CO ml/min.torr
A1 GIR.	45	168	63	4,31	3,08	146	2,3	17,5
A2 GUE.	27	189	76	6,77	5,86	243	10,8	21,4
A3 LEM.	37	173	75	5,57	4,73	258	5,3	26,2
B1 SCH.	32	176	72	6,30	5,03	161	5,0	31,8
B2 NOR.	40	175	82	4,74	3,74	179	3,8	26,4
B3 CRO.	37	164	72	3,93	3,32	133	4,4	19,4
moyenne	36	174	73	5,27	4,29	187	5,2	23,8
± Sd	± 6	± 8	± 6	± 1,13	± 1,09	± 52	± 2,9	± 5,3

TABLEAU 1 . DONNEES BIOMETRIQUES DES PLONGEURS D'HYDRA IV.

VEMS = volume expiratoire maximal par seconde

VMM = volume ventilatoire maximal minute

DEMM = débit expiratoire maximal moyen

TL CO = capacité pulmonaire de transfert de l'oxyde de carbone

B - METHODES

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 (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 : $O_2 = 21$ %

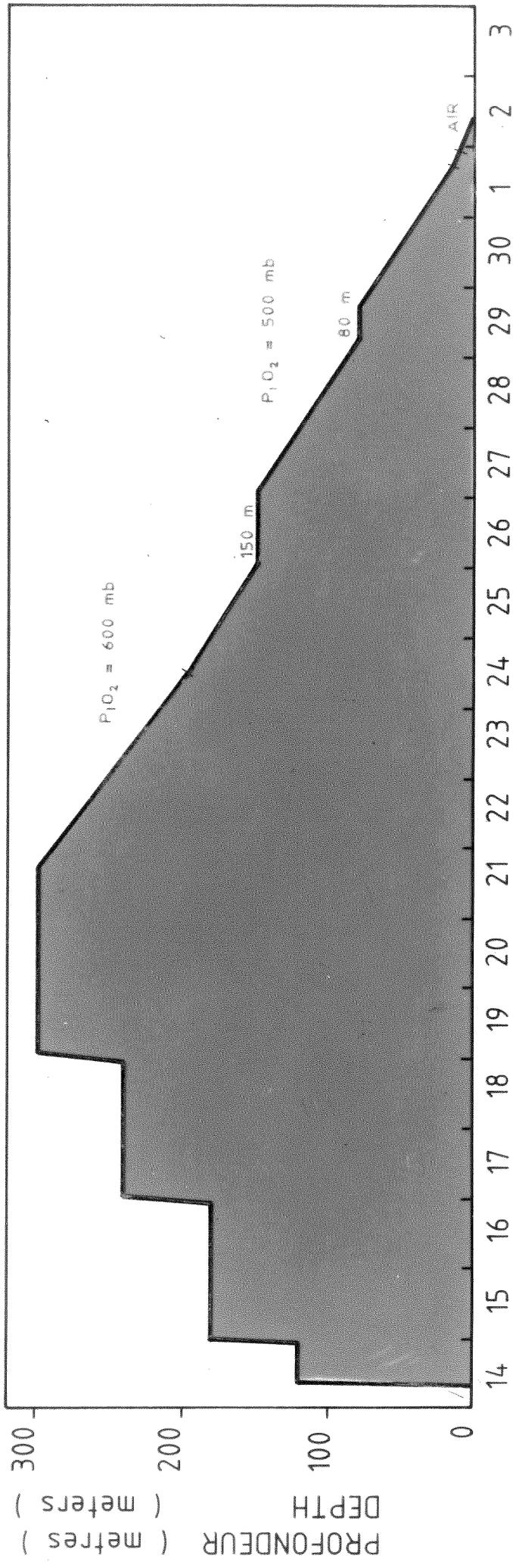
A 10 mètres, des rinçages à l'air ont été effectués.

* 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.



HYDRA IV 1983

NOV. DEC 1983

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

La figure 2 suivante représente le profil de la plongée HYDRA IV.

3 - PROGRAMME JOURNALIER

Les 6 plongeurs étaient répartis en 2 équipes (A et B) de 3 sujets :

A1 = Marcel GIRAUD (chef d'équipe)

A2 = Gérard GUERRIER

A3 = Jacques LE MIRE (médecin)

B1 = Louis SCHNEIDER (chef d'équipe)

B2 = Gerry NORMAN

B3 = Maurice CROSS (médecin)

J₁ = 14 novembre

07.30	Entrée des plongeurs en caisson. Rinçages pour éliminer l'azote
08.00	Compression 0 - 120 m
09.00 - 12.00	Tests au sec sous hydrox de l'équipe A (1 h 00 par plongeur) suivis de détections de bulles
12.00 - 14.00	Repas
14.00 - 17.00	Tests au sec sous hydrox de l'équipe B (1 h 00 par plongeur) suivis de détections de bulles
17.00 - 23.00	Détections de bulles
19.00	Début du recueil des urines de la nuit groupe B
23.00	Compression de 120 m à 180 m

J₂ = 15 novembre

06.30	Lever Prises de sang et recueil salive de l'équipe B Petit déjeuner
07.00	Fin recueil des urines de la nuit, début recueil urines du jour groupe B
07.30 - 09.00	Tests au sec sous héliox de l'équipe A (1/2 h par plongeur)
09.00 - 09.30	Changement du gaz de la cloche
09.30 - 11.00	Tests au sec sous hydrox de l'équipe A (1/2 h par plongeur) suivis de détections de bulles
10.00 - 11.00	— Equipement d'un plongeur du groupe B (B1) pour la plongée en eau, aidé par le médecin B3
11.00 - 12.30	Plongée et tests dans l'eau sous héliox (1/2 h) puis sous hydrox (1 h) du sujet B1, suivis de détections de bulles. B2 est bellman et A1 fait les relevés nécessaires à la surveillance ventilatoire

12.30 - 13.30 Repas
 13.30 - 14.30 Equipement plongeur B2 aidé par B3
 14.30 - 16.00 Plongée B2 en héliox puis hydrox suivie de détections de bulles. B1 est bellman et A2 effectue la surveillance ventilatoire
 15.00 - 16.00 Equipement plongeur B3 aidé par A3
 16.00 - 17.30 Plongée de B3 en héliox puis hydrox suivie de détections de bulles. B1 est bellman et A2 effectue la surveillance ventilatoire
 18.30 Prélèvements sanguin et salivaire sujet B1
 19.00 Fin recueil des urines du groupe B, début recueil des urines de la nuit du groupe A
 Repas
 22.00 Prélèvements sanguin et salivaire sujet B2
 23.30 Fin de la détection de bulles du sujet B3
 Prélèvements sanguin et salivaire sujet B3

J₃ = 16 novembre

Même programme que J₂ mais inversion des équipes :

Equipe A fait les plongées en eau (A1 le matin de 11 h 00 à 12 h 30 ; A2 et A3 l'après-midi)

Equipe B fait les tests au sec le matin de 7 h 30 à 11 h 00

A 23 h 30, Compression de 180 à 240 m

J₄ = 17 novembre

240 m - même programme que J₂

J₅ = 18 novembre

240 m - même programme que J₃

A 23 h 30, Compression de 240 à 300 m

J₆ = 19 novembre

300 m - même programme que J₂ - Tests sous hydrox (74/24/2)

J₇ = 20 novembre

300 m - même programme que J₃ - Tests sous hydrox (74/24/2)

J₈ = 21 novembre

300 m

06.30 Lever - Petit déjeuner

07.30 Equipement B1

08.00 - 09.30 Plongée de B1 sous héliox (1/2 h) puis sous hydrox 59/39/2 - 1 h) suivie de détections de bulles. B2 est bellman. A2 fait la surveillance ventilatoire

09.00 Equipement de A1

09.30 - 11.00 Plongée de A1 (mêmes conditions que B1)

Jusqu'à 16.00 Détections de bulles de B1 et A1

17.00 Début de la décompression

J₉ = 22 novembre

Décompression

08.00 - 14.00 - 20.00 Détections de bulles

17.00 Passage à 264 m

J₁₀ = 23 novembre

Décompression

08.00 - 14.00 - 20.00 Détections de bulles

17.00 Passage à 228 m

J₁₁ = 24 novembre

Décompression

08.00 - 14.00 - 20.00 Détections de bulles

17.00 Passage à 193 m

J₁₂ = 25 novembre

Décompression

07.00 Prélèvements sanguins à jeun de A1, B1 et B2

Début du recueil des urines de la journée des sujets
A1, B1, B2

08.00 - 14.00 - 20.00 Détections de bulles

17.00 Passage à 161 m

19.00 Fin du recueil des urines du jour.

Début du recueil des urines de la nuit des sujets A1,
B1, B2

J₁₃ = 26 novembre

00.40 Arrivée à 150 m. Arrêt décompression

05.30 Lever

06.00 Prélèvements sanguins à jeun de A1, B1 et B2

Début du recueil fractionné des urines du jour de A1,
B1 et B2

07.00 - 09.00 B2 sous la coupole en hydrox

09.00 Prélèvement sanguin et détections de bulles de B2

09.00 - 13.00 A1 sous la coupole en hydrox

12.00 Repas. A1 déjeune sous la coupole

13.00 Prélèvement sanguin et détections de bulles de A1

13.00 - 19.00 B1 sous la coupole en hydrox

15.00 Prélèvement sanguin de B2

19.00 fin du recueil fractionné des urines de la journée

Prélèvement sanguin et détections de bulles de B1

Prélèvement sanguin de A1

Début du recueil des urines de la nuit de A1, B1 et B2

24.00 Prélèvement sanguin de B1

Simultanément, détections de bulles à 08.00 - 14.00 et 20.00 de A2, A3
et B3

J₁₄ = 27 novembre

02.00 Reprise de la décompression

07.00 Lever. Fin du recueil des urines de la nuit des sujets

A1, B1 et B2

08.00 - 14.00 - 20.00 Détections de bulles

20.00 Passage à 126 m

J₁₅ = 28 novembre

Décompression

08.00 - 14.00 - 20.00 Détections de bulles

20.00 Passage à 94 m

J₁₆ = 29 novembre

06.00 Lever. Petit déjeuner
06.30 Arrivée à 80 m. Arrêt de la décompression
07.00 - 07.15 A3 tests héliox (80/20) au sec
07.15 - 07.30 A2 tests héliox (80/20) au sec
07.30 - 07.45 B2 tests héliox (80/20) au sec
07.45 - 08.00 B3 tests héliox (80/20) au sec
08.00 - 08.15 Rinçages de l'ambiance gazeuse de la coupole pour passer
à l'air
08.20 - 08.40 A3 tests au sec sous air
08.40 - 09.00 A2 tests au sec sous air
09.00 - 09.20 B2 tests au sec sous air
09.25 - 09.45 B3 tests au sec sous air
Tests suivis de détections de bulles
09.30 Equipement de A1
10.15 - 11.00 Plongée de A1 : 25 min en héliox 80/20 - 20 min à l'air
A2 est bellman. B2 fait la surveillance ventilatoire
10.30 Equipement de B1
11.00 - 11.40 Plongée de B2 : 20 min en héliox 80/20 - 15 min à l'air
Plongées suivies de détections de bulles
12.00 Repas
17.00 Reprise de la décompression
20.00 Détections de bulles

J₁₇ = 30 novembre

Décompression

08.00 - 14.00 - 20.00 Détections de bulles
20.00 Passage à 44 m

J₁₈ = 01 décembre

Décompression

08.00 - 14.00 - 20.00 Détections de bulles
22.00 Passage à 10 m. Changement de gaz des caissons => air

J₁₉ = 02 décembre

11.00 Fin décompression. Sortie des plongeurs

4 - PROTOCOLE DES TESTS AU SEC

Le plongeur passe sous la coupole (figure 3), 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 (CERTSM).

5 - 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 6 heures.

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

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

La figure 4 illustre le déroulement des tests en immersion.

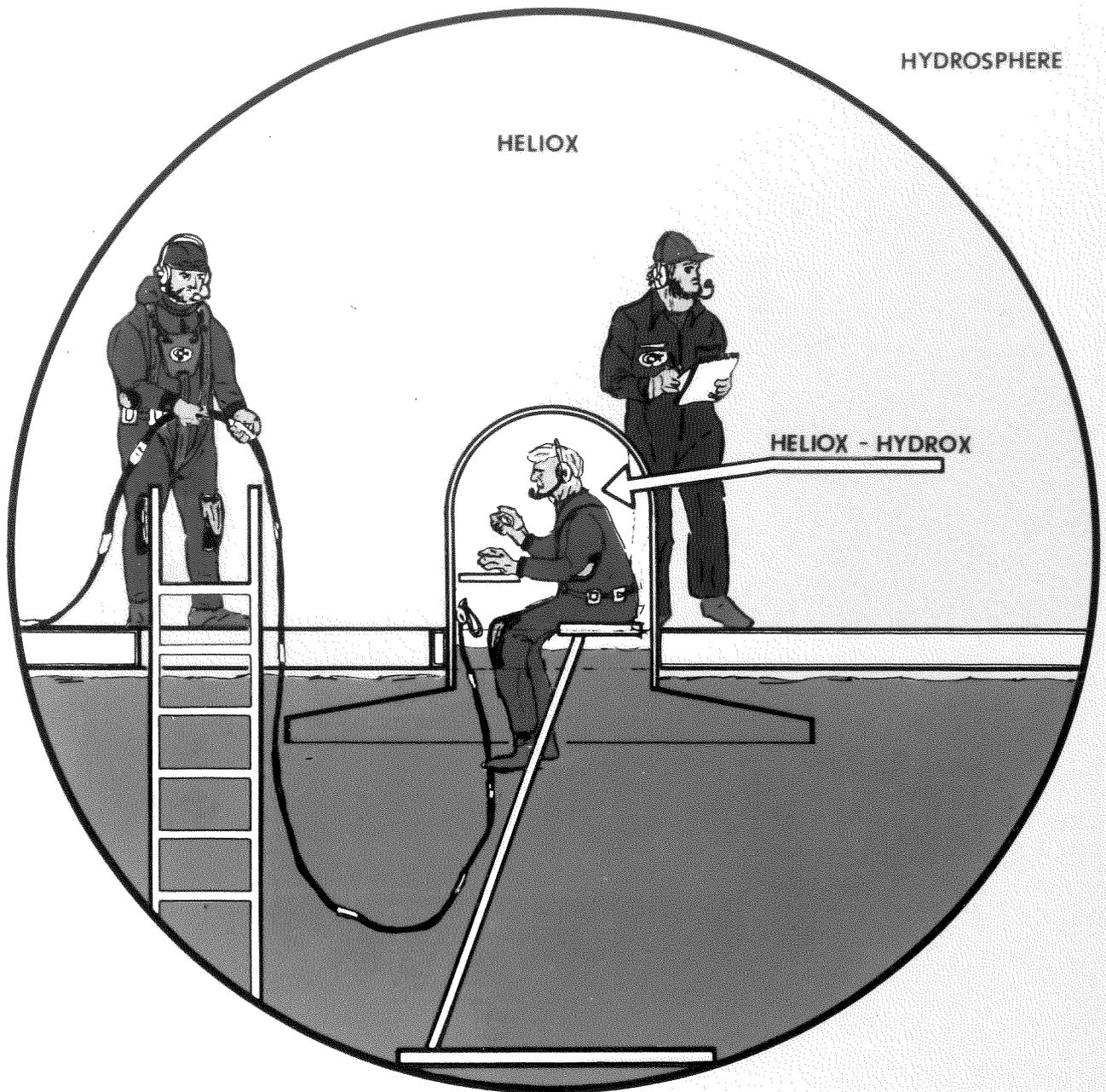
6 - PROTOCOLE DES EXPOSITIONS LONGUE DUREE

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, comme sur la figure 3. 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.

7 - INVESTIGATIONS REALISEES PAR COMEX

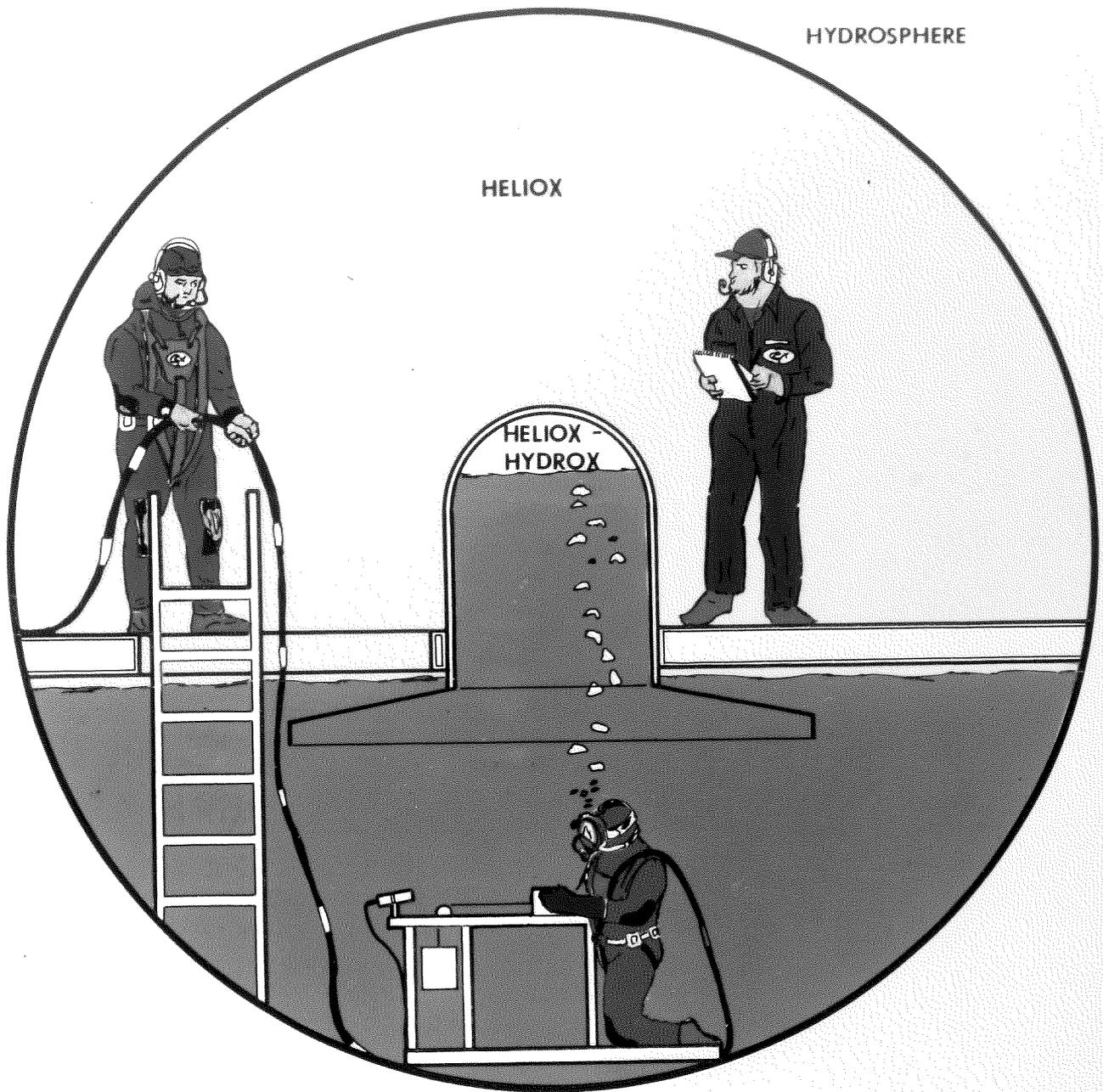
a - ENQUETE JOURNALIERE

L'enquête proposée chaque jour aux plongeurs est reproduite sur la figure 5. Il leur a été demandé en plus de bien décrire toutes les impressions ressenties pendant leurs tests au sec, et pendant les immersions sous hydrox. Chaque jour, ils rédigeaient un rapport complet sur leur état physique et psychique, et sur toutes leurs observations.



**TEST DE PERFORMANCE AU SEC
SOUS LA COUPOLE EN AMBIANCE
HELIOX OU HYDROX**

FIGURE 3



**PLONGEE AU MELANGE RESPIRATOIRE
HELIOX PUIS HYDROX
TRAVAIL AU CYCLO - RAMEUR**

FIGURE 4

ENQUETE FATIGUE : FICHE JOURNALIERE TYPE

NOM PRENOM

DATE

I. 1/ HEURE DU REVEIL

2/ QUALITE DU SOMMEIL : Très Bon Bon Assez Bon
Passable Mauvais

3/ REVES ? CAUCHEMARS ?

	MATIN (heure)	SOIR (heure)
4/ FREQUENCE CARDIAQUE (puls)		
5/ TEMPERATURE ORALE		
6/ CAPACITE VITALE		
7/ VEMS		
8/ TEMPERATURE AMBIANTE		
9/ ESTIMATION DE LA FATIGUE :		
1.en excellente forme (EF)		
2.en très bonne forme (TB)		
3.en bonne forme (B)		
4.en assez bonne forme (AB)		
5.en moyenne condition (M)		
6.un peu fatigué (PF)		
7.fatigué (F)		
8.très fatigué (TF)		
9.exténué (E)		
10/ REPAS	+ N -	+ N -
APPETIT	+ N -	+ N -

11/ Souffrez-vous de douleurs:

- articulaires? Articulations sensibles:

	G	D
épaule		
coude		
poignet		
genou		
cheville		

- musculaires?

- autres?

12/ SIESTE ? DUREE :

13/ HEURE DU COUCHER LA VEILLE :

II. ACTIVITE DE LA JOURNEE :

- plongée : OUI

profondeur:

durée:

NON

- temps passé en caisson:

- respiration Oxygène pur :

OUI durée

NON

- autres activités:

III. MESURES COMPLEMENTAIRES :

IV. IMPRESSIONS. OBSERVATIONS

FIGURE 5

b - TESTS PSYCHOMETRIQUES

Quatre tests ont été effectués :

- La Dextérité Manuelle (DM) et le Temps de Réaction Visuel de Choix (TRVC) qui sont des tests souvent utilisés dans les plongées expérimentales à l'héliox pour l'étude du SNHP, mais qui ont aussi été étudiés lors de plongées à l'air (MARTIN CHAVE, 1983 ; BENNETT et ELLIOTT, 1982).
- Le test des multiplications et le test de reconnaissance de chiffres qui sont des tests intellectuels classiquement utilisés pour l'étude de la narcose à l'air (BENNETT et ELLIOTT, 1982).

. DEXTERITE MANUELLE (DM)

C'est un test d'habileté qui étudie la coordination motrice de la main. Le sujet dispose d'une plaque de 54 x 12 cm percée de 100 trous d'un cm de diamètre alignés en 4 travées. A chaque extrémité de la plaque se trouve un réceptacle contenant 50 cylindres de laiton de 4,4 cm de hauteur et 0,9 cm de diamètre.

Au signal de l'opérateur, le sujet doit ,avec sa main dominante, prendre une par une les chevilles placées à l'extrémité opposée, et les positionner le plus rapidement dans les trous en commençant par l'extrémité proche de la main qui travaille.

Le temps mis pour placer 50 chevilles est noté et le nombre de chevilles placées par minute est calculé.

. TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (TRVC)

Le sujet dispose d'un boîtier comprenant une lumière verte à droite et une lumière rouge à gauche, correspondant chacune à un bouton. Lorsque la lumière (verte ou rouge) s'allume, le sujet doit appuyer le plus rapidement possible sur le bouton correspondant avec l'index d'une même main.

Le temps mis pour réagir et appuyer est mesuré, par un chronomètre automatique, en centièmes de seconde.

Le test comprend une série de 31 éclairages aléatoires et dure environ 2 minutes 30.

Le résultat du test est représenté par la valeur médiane et les quartiles inférieurs et supérieurs.

. TEST DES MULTIPLICATIONS

Ce test demande au sujet d'effectuer le maximum de multiplications en 2 minutes. Ces multiplications sont de la forme suivante : nombre à 2 chiffres X nombre à 1 chiffre avec obligatoirement une retenue.

Les chiffres 0, 1 et 5 et les nombres multiples de 11 sont éliminés. Les opérations disposées en 5 lignes de 8 sur du papier plastifié pouvant aller à l'eau, doivent être effectuées dans l'ordre de présentation.

Un exemple de feuille de test est présenté en figure 6.

Le résultat du test est évalué par le nombre de multiplications effectuées pendant les 2 minutes et le nombre d'erreurs commises au cours du test.

. TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES

La feuille de test (figure 7) représente 2 x 40 séries de nombres de 5 à 9 chiffres. Le sujet doit le plus rapidement possible comparer les séries 2 à 2 et cocher les cases des séries présentant une différence (chiffre différent, chiffres inversés). Le test dure une minute et l'on note le nombre de chiffres examinés en une minute et le nombre d'erreurs commises durant le test.

c - EXERCICE SUR LE CYCLORAMEUR SOUS CONTRÔLE DE L'ELECTROCARDIOGRAMME (ECG)

Le cyclorameur est un appareil qui permet d'effectuer un travail musculaire calibré avec les bras, lors des immersions. Le sujet se met en position agenouillée ou accroupie contre le cyclorameur pour avoir la barre de traction à hauteur des épaules. Au signal vert, le plongeur peut commencer les tractions des bras selon un rythme imposé par une lumière orange (cette lumière orange n'étant plus commandée automatiquement - panne de l'appareillage - le rythme était dicté au micro pour les premières secondes, puis le plongeur continuait de lui-même). La charge à tirer était variable entre 15 kg (à 240, 300 et 30 m et 21 kg (180 et 300 m) avec une longueur de déplacement de 45 cm, selon une fréquence de 12 à 15 coups par minute, ce qui correspondait à des puissances de 20 à 30 watt, selon les calibrages effectués par LEMAIRE (1975).

Nom : Date : Heure : Profondeur :

HélioX :
HydroX :

<u>83</u> x 4	<u>92</u> x 9	<u>29</u> x 3	<u>87</u> x 9	<u>93</u> x 7	<u>84</u> x 3	<u>46</u> x 7	<u>78</u> x 2
<u>24</u> x 7	<u>28</u> x 3	<u>28</u> x 9	<u>46</u> x 2	<u>73</u> x 7	<u>26</u> x 6	<u>46</u> x 3	<u>23</u> x 8
<u>73</u> x 9	<u>64</u> x 4	<u>78</u> x 9	<u>84</u> x 4	<u>74</u> x 6	<u>46</u> x 8	<u>34</u> x 8	<u>32</u> x 8
<u>68</u> x 8	<u>96</u> x 7	<u>89</u> x 6	<u>29</u> x 6	<u>37</u> x 9	<u>23</u> x 7	<u>24</u> x 6	<u>36</u> x 6
<u>87</u> x 7	<u>46</u> x 2	<u>96</u> x 9	<u>26</u> x 6	<u>63</u> x 7	<u>46</u> x 4	<u>82</u> x 9	<u>26</u> x 8

FIGURE 6

Nom : Date : Heure : Profondeur :

Héliox :
Hydrox :

4609312 <input type="checkbox"/>	4609321	5710423 <input type="checkbox"/>	5710423
89752 <input type="checkbox"/>	89752	209365 <input type="checkbox"/>	209365
625410 <input type="checkbox"/>	624510	8143641 <input type="checkbox"/>	6143641
659187 <input type="checkbox"/>	659187	82016 <input type="checkbox"/>	82016
761480358 <input type="checkbox"/>	761480538	103183 <input type="checkbox"/>	103183
938413 <input type="checkbox"/>	938413	2661907 <input type="checkbox"/>	2661907
321587 <input type="checkbox"/>	321687	31759 <input type="checkbox"/>	31769
89468501 <input type="checkbox"/>	89465801	0374879 <input type="checkbox"/>	0374879
543709 <input type="checkbox"/>	543709	326854 <input type="checkbox"/>	325845
4275196 <input type="checkbox"/>	4275169	57246038 <input type="checkbox"/>	57240638
5690851 <input type="checkbox"/>	5690815	604289 <input type="checkbox"/>	603289
13562807 <input type="checkbox"/>	13562807	451358872 <input type="checkbox"/>	451358872
38145 <input type="checkbox"/>	31845	274767 <input type="checkbox"/>	274787
548076 <input type="checkbox"/>	548076	98614138 <input type="checkbox"/>	98614138
124562807 <input type="checkbox"/>	124563807	80527 <input type="checkbox"/>	80526
31601899 <input type="checkbox"/>	31601899	526184 <input type="checkbox"/>	521684
4589730 <input type="checkbox"/>	4589730	19489677 <input type="checkbox"/>	19489677
37084375 <input type="checkbox"/>	37084375	923143892 <input type="checkbox"/>	923143982

FIGURE 7



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



LE PLONGEUR EFFECTUE L'EXERCICE SUR LE CYCLORAMEUR
EN RESPIRANT DE L'HYDROX 98/2

III - R E S U L T A T S

A - 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.

B - BILAN DES SEJOURS SOUS HYDROX - PARAMETRES D'ENVIRONNEMENT

Les tableaux regroupés en annexe 2 indiquent les durées réelles des séjours sous héliox et surtout sous hydrox à toutes les profondeurs étudiées, les masques utilisés lors des immersions, la puissance de travail demandée au cyclorameur ainsi que les remarques éventuelles sur la plongée.

Les paramètres physiques de l'ambiance ont été relevés lors de chaque journée de tests. Ils sont regroupés dans le tableau 2.

DATE	PROFONDEUR (mètres)	TEMPERATURE (°C)			HYGROMETRIE (%) caisson-vie	PO2 (mb)			% He dans		% H ₂ dans hydrosphère
		hydro- sphère	eau	coupole		héliox caisson- vie	héliox coupole	hydrox coupole	hydrox coupole	eau	
14.11.83	120	28,7 32,6	28,0	25,0 28,0	60-46	400	-	260	≤ 2,0	-	≤ 0,10
15.11.83	180	31,0 32,8	29,9	23,0 ^(*) 30-31	52-80	400	380	380	≤ 0,5	0,0	≤ 0,18
16.11.83	180	30,9 33,5	30,2	24,0 ^(*) 30-32	68-80	400	380	380	≤ 4,5	0,0	≤ 0,18
17.11.83	240	31,7 33,8	29,7		65-85	400	500	500	≤ 20,0 fuites déten- deur	0,0	≤ 0,15
18.11.83	240	31,1 33,9	30,2	24,0 ^(*) 28-31	80-87	400	500	500	≤ 3,3	0,0	≤ 0,22
19.11.83	300	30,6 34,2	30,3	21,0 ^(*) 26-32	58-78	400	620	620	23-25	24,0	≤ 0,18
20.11.83	300	31,7 33,0	30,0	21,0 ^(*) 28-32	45-70	400	620	620	24-26	23,3	≤ 0,25
21.11.83	300	31,8 32,0	30,4	-	65-73	400	620	620	-	36,3	≤ 0,24
26.11.83	150	30,9 34,4	29,5	30-31	65-80	500	-	320	≤ 3,2	-	≤ 0,32
29.11.83	80	30,7 31,1	27,7	28-30	60-74	500	1800	1800 AIR	≤ 3,2 AIR	0,0 AIR	≤ 0,28

(*) température lors des ventilations de la coupole

TABLEAU 2

C - 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.
- Deux sujets ont souffert d'otite externe, familière aux plongeurs et soignée par le traitement habituel (POLYDEXA).

2 - L'EFFET HYDROGENE

Le point fort du projet HYDRA IV étant l'étude du pouvoir narcotique de l'hydrogène, l'auto-observation de chacun des 6 plongeurs respirant ce gaz à des pressions allant jusqu'à 24,5 ATA, revêt une grande importance. C'est pourquoi sont rapportés ici le plus fidèlement possible - et avec le minimum de commentaires - leurs impressions.

JOUR :	PROFONDEURS (m) :	COUPOLE - PISCINE :	PLONGEUR A1	PROFESSIONNEL	45 ans
J ₁	120	:	:	:	Sent très bien que le chauffage est insuffisant ce jour-là.
J ₂	180	:	:	:	Plutôt chaud pendant les tests (chauffage normal). Pas de narcose.
J ₃	:	180	:	:	Pas plus de narcose que la veille "au sec". L'hydrox expiré dans le groin paraît plus chaud que l'héliox. Sous hydrox, impression de plus grande amplitude respiratoire, d'exercice plus facile et de fatigue musculaire inexistante.
J ₄	240	:	:	:	A reconnu la différence de gaz. En activité, toujours très lucide, mais au repos, yeux fermés (YF) pour l'EEG impression de déformation, de dissymétrie corporelle, disparaissant à l'ouverture des yeux. Aux périodes YF suivantes le phénomène s'amplifie : désorientation, vertige - léger - mais s'accroissant avec la répétition des YF.
J ₅	:	240	:	:	Au changement de gaz, impression de "mirage" dans le masque (physiquement explicable). En période de repos, même effet YF que sous la coupole, plutôt atténué. Au contraire, à l'exercice, aucun trouble, impression de "forme olympique". Note que les couleurs paraissent plus lumineuses et tirant sur le rouge-orange et qu'au passage à l'hydrox, il ressent un léger goût de javel, de même au passage à l'héliox. Enfin, le masque trop serré est douloureux sous héliox, non sous hydrox.
J ₆	300 (74% H_2)	:	:	:	Mêmes impressions YF pour l'EEG qu'à 240 m, sans pouvoir parler d'une narcose comparable à celle de l'azote.
J ₇	:	300 (74% H_2)	:	:	Au changement de gaz mêmes effets : "mirage" et goût de javel. L'impression générale de froid et la douleur due au masque disparaissent toujours sous hydrox. Aisance ventilatoire et musculaire. Lucidité parfaite ; mieux qu'à 240 m.
J ₈	:	300 (59% H_2)	:	:	Sensations normales mais l'aisance ventilatoire et musculaire persiste.
J ₁₃	150	:	:	:	Premier repas complet pris sous hydrox (séjour de 4 h) : RAS.
J ₁₆	:	80 (air)	:	:	A retrouvé la narcose "classique" : euphorie proche de celle de l'ivresse alcoolique, dispersion mentale, obligation de se concentrer sur une tâche, difficulté de se contrôler.

CONCLUSION : Les impressions ressenties se rapprocheraient plus du "mal des montagnes" que de la narcose à l'air. Maximum atteint à 240 m. Effets psychiques très contrôlables à 300 m au 74 % H_2 . Mais, même à 240 m ne s'est jamais senti en état d'insécurité.

JOUR : PROFONDEURS (m) : PLONGEUR A2 INGENIEUR 27 ans
 : COUPOLE - PISCINE :

J₁ : 120 : Impression de très légère narcose (?).

J₂ : 180 : Impression d'état légèrement fiévreux. La relaxation, YF sous
 : EEG, tend vers le sommeil. Comparable à ce que l'on ressent à 30-
 : 40 m à l'air.

J₃ : 180 : Gêné par une indisposition digestive et la douleur causée par le
 : masque trop serré. Respiration plus facile sous hydrox, même par
 : le nez (déjà difficile sous héliox). Fatigue musculaire moins res-
 : sentie mais impression visuelle de brouillard et parfois même di-
 : plopie. S'intériorise, dialogue en circuit fermé. Sous héliox, a
 : retrouvé sa lucidité qu'il n'avait pas l'impression d'avoir perdue
 : sous hydrox. Ouïe et goût : RAS.

J₄ : 240 : A reconnu l'hydrox à l'aisance respiratoire et aux impressions vi-
 : suelles : lumières plus vives, presque aveuglantes, vision un peu
 : floue, presque dédoublée. Sous EEG, YF tendance au vertige, un peu
 : comme en état d'ébriété. Mais pas de dérive intellectuelle.

J₅ : 240 : Au départ, se sent en état d'ébriété agréable. Durant la période
 : de repos sous hydrox, s'endort et commence à faire des pauses res-
 : piratoires... Il est repassé sous héliox. Se souvient de son hyper-
 : sensibilité visuelle (vision éblouie), de ses très légers troubles
 : de l'équilibre, de son impression d'anesthésie progressive et d'une
 : déformation du goût qui a persisté plusieurs heures après la fin de
 : la plongée.

J₆ : 300 : A peu près les impressions ressenties à 240 m. Note qu'il existe
 : (74% H₂) : toujours un temps de latence de 10 minutes pour chaque changement
 : d'état. Toujours l'effet de "tourbillon" sous EEG. YF considère
 : l'hydrogène comme une véritable drogue agréable...

J₁₆ : 30 : S'habitue vite aux effets de la narcose à l'azote. La trouve fran-
 : (air) : che, agréable, sans vertige ni nausée. Se serait senti capable de
 : travailler et de réagir à un danger. Bien sûr, respiration plus
 : difficile. Mais, au total, préfère la narcose à l'azote et, à
 : 30 m à l'air ne se sent pas plus perturbé qu'à 180 m à l'hydrox ;
 : ce qui est en contradiction avec les déclarations du 2ème jour.

Conclusion : On peut imaginer l'effet d'H₂ comme le "voyage" provoqué par certaines drogues psychotropes. Il affecte la vision, l'orientation, l'équilibre, le goût, l'ouïe (hyperacousie). La narcose à l'H₂ est plus dangereuse que celle à l'azote, plus franche, plus euphorisante et respectant plus la lucidité (! ?...)

JOUR : PROFONDEURS (m) : PLONGEUR A3 MEDECIN 37 ans
 : COUPOLE - PISCINE :

J₁ : 120 : Autocritique des tests peu significative dans ce contexte
 : : : entièrement nouveau. Mais sous EEG, YF légère déviation du
 : : : schéma corporel.

J₂ : 180 : Sous héliox, trop d'intensité d'attention aux tests, plus décon-
 : : : tracté sous hydrox. Sous EEG, YF tendance à l'assouplissement
 : : : sous hydrox, tandis que la relaxation YO semble favoriser le
 : : : dialogue intérieur.

J₃ : 180 : Respiration facilitée surtout par le nez sous hydrox. Le travail
 : : : musculaire pourrait être plus intense et durer indéfiniment,
 : : : semble-t'il. Au repos : torpeur, altération schéma corporel.
 : : : Difficulté d'assimiler les ordres reçus bien que prévus au
 : : : programme. Après la sortie durant 2 heures : fatigue, anorexie,
 : : : nausées (paraissait déjà affecté par le SNHP).

J₄ : 240 : Tremblement nettement perçu : disparaît complètement sous hydrox.
 : : : Petits troubles, comme à 180 m, mais perçus dans un état d'eui-
 : : : phorie, sans fatigue anormale après la plongée.

J₅ : 240 : Sous hydrox, l'aisance respiratoire paraît extraordinaire et il
 : : : semble que l'effort pourrait être indéfiniment poursuivi. Sensa-
 : : : tion de chaleur diffuse (et de froid au retour sous héliox).
 : : : Activité peut-être trop intense mais bien contrôlée. Pas de trou-
 : : : bles visuels mais au repos (sur le cyclorameur) impression pénible
 : : : de déformations corporelles. Après la plongée, légère fatigue et
 : : : ébriété durant 3/4 d'heure. Pas plus gêné qu'à 180 m. Même dispa-
 : : : rition du tremblement que la veille au sec sous hydrox.

J₆ : 300 : Impression de méforme depuis le réveil effacée par l'hydrox. Se
 : (74% H_2) : sent très léger, très clairvoyant, très communicatif avec l'entou-
 : : : rage (avec lequel il lui semble s'interpénétrer). Mais la situation
 : : : YF sous EEG est peu supportable : désorientation spacio-temporelle,
 : : : nausées. Retour à l'héliox, peu agréable. Psychologiquement mal
 : : : à l'aise durant 24 heures.

J₁₆ : 80 : Narcose très comparable à l'ivresse alcoolique : ébriété, euphorie,
 : (air) : exaltation, logorrhée. Sans phase transitoire, ni phénomène rési-
 : : : dual.

Conclusion : Sort de J₆ "saturé de narcoses". "J'ai une indigestion mentale de narcoses té-
 lescopées. Je n'ai pas fini d'analyser les précédentes que je m'en paie une
 nouvelle, je suis sonné".
 Il s'agit d'une auto-observation "dépassée". La réflexion prolongée sur des
 introspections successives a constitué un traumatisme psychique mal vécu.
 D'autant plus que le sujet présentait une sensibilité particulière au SNHP ;
 ce qui a paru le déconcerter aussi.

JOUR : PROFONDEURS (m) : PLONGEUR B1 PROFESSIONNEL 32 ans
 : COUPOLE - PISCINE :

J₁ : 120 : Légère hypoesthésie des mains sous hydrox. A dû s'appliquer davantage aux tests.

J₂ : : 180 : Respiration et travail musculaire plus aisés sous hydrox. Exercice un peu fatigant sous héliox. Ce ne fut pas le cas sous hydrox.

J₃ : 180 : En travaillant sur le haut de la coupole (changement du filtre à chaux sodée), légers vertiges sous hydrox. Impression floue d' "état second".

J₄ : : 240 : Sous hydrox la narcose a débuté rapidement, plus sensible lors des périodes de repos, contrôlable et alternant avec des périodes de complète lucidité. Tout a disparu à la 2ème inspiration d'héliox.

J₅ : 240 : Même effet qu'en immersion. L'ouïe, le toucher sont aiguisés, les bruits environnants et les conversations extérieures paraissent beaucoup plus proches sous hydrox. Sous l'EEG, YF tendance à s'endormir.

J₆ : : 300 : En cours de plongée, la narcose n'est perceptible, mais très contrôlable, que pendant les périodes de repos. Disparaît dans l'action.

J₇ : : 300 : Même impression de narcose légère sous hydrox. A retrouvé aussi (74% H₂) la sensation de chaleur dans l'habit en prenant l'hydrox, contrastant avec le froid ressenti au retour sous héliox. Le changement s'opérant en 2 ou 3 minutes.

J₈ : : 300 : Narcose à peine perceptible. Aisance respiratoire et chaleur au passage sous hydrox plus faibles qu'au 74 % H₂.

J₁₃ : 150 : 6 heures sous hydrox : pas de différence perceptible avec l'héliox.

J₁₆ : : 80 : Subjectivement peu gêné par la narcose à l'air. Peut la comparer (air) à celle ressentie à 300 m sous 74 % H₂. Reconnaît que les tests psychométriques contredisent cette impression.

Conclusion : Ne se sentirait pas de travailler plusieurs heures sous la narcose - contrôlable mais psychologiquement déconcertante ("on ne se sent pas soi-même") - ressentie à 240 m. A 300 m, sous 74 % H₂, il subsiste encore une certaine "dépersonnalisation". En revanche, l'aisance respiratoire et la facilité du travail font souhaiter plonger à l'hydrox.

JOUR :	PROFONDEURS (m) :	COUPOLE - PISCINE :	PLONGEUR B2	PROFESSIONNEL	40 ans
J ₁ :	120 :	:	:	RAS	:
J ₂ :	:	180 :	:	Aisance respiratoire. Travail facilité. RAS par ailleurs	:
J ₃ :	180 :	:	:	RAS durant les tests. Légère céphalée après	:
J ₄ :	:	240 :	:	Narcose légère perceptible au repos, sous hydrox, disparaît à l'effort. Non gênante.	:
J ₅ :	240 :	:	:	Même narcose, un peu plus nette. Survient vite et disparaît vite au changement de gaz	:
J ₇ :	300 :	:	:	Narcose insignifiante	:
	(74% H_2) :	:	:	:	:
J ₁₁ :	150 :	:	:	2 heures sous hydrox : RAS	:
J ₁₆ :	:	80 :	:	Narcose peu apparente et bien contrôlée	:
	:	(air) :	:	:	:

Conclusion : Sujet peu sensible aux diverses formes de narcose.

JOUR :	PROFONDEURS (m) :	COUPOLE - PISCINE :	PLONGEUR B3	MEDECIN	37 ans
J ₁ :	120 :	:	:	Peut-être très légère narcose ?	:
J ₂ :	:	180 :	:	Aisance respiratoire remarquable. Narcose légère mais certaine	:
J ₃ :	180 :	:	:	Légers troubles visuels mais la différence entre H_2 et He n'est pas évidente	:
J ₄ :	:	240 :	:	Narcose nette mais "merveilleuse". Sous hydrox, impression de bien-être avec peut-être, dissociation de la personnalité. Troubles visuels et sensations auditives proches de l'hallucination. Persistance de l'effet hydrogène 15 à 20 minutes après le retour sous héliox	:
J ₅ :	240 :	:	:	Différence avec la narcose à l'azote : latence de 3 à 4 minutes aux changements de gaz dans les 2 sens. Davantage de "détachement des contingences". Fonctions cérébrales diminuées dans les 2 cas. L'azote est plus dépressur, le H_2 plus psychoactif	:
J ₆ :	:	300 :	:	Narcose encore sensible mais parfaitement contrôlable sous hydrox	:
	:	(74% H_2) :	:	:	:
J ₇ :	300 :	:	:	Même impression que dans l'eau, la veille	:
	(74% H_2) :	:	:	:	:
J ₁₆ :	80 :	:	:	La narcose à l'azote est moyennement ressentie avec toutefois un sentiment d'insécurité	:
	(air) :	:	:	:	:

Conclusion : Sujet relativement peu sensible à la narcose. Distingue la narcose H_2 de la narcose N_2 . La première plus lente à s'installer et à se dissiper au changement de gaz, plus agréable, discrètement hallucinogène, mais plus maniable. La seconde apparaît et disparaît immédiatement, moins agréable, moins consciente, compromet davantage la sécurité.

D - RESULTATS DES TESTS PSYCHOMETRIQUES

1 - LA DEXTERITE MANUELLE : DM

Les résultats du test de DM de chaque plongeur relevés en nombre de chevilles rangées par minute sont regroupés dans le tableau 3. Les valeurs moyennes ont été calculées à chaque profondeur pour un gaz donné (héliox, hydrox, air) et sont notées sous la forme : moyenne \pm déviation standard ($\bar{x} \pm Sd$). La courbe représentant l'évolution moyenne de la performance au cours de toute l'expérience est représentée sur la figure 8 (les courbes individuelles sont en annexe 3).

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 (ou l'héliox et l'air) à une même profondeur sont notés dans le tableau 4. Ces variations sont peu importantes et irrégulières 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. Les résultats du TRVC, au sec et en eau, sont regroupés dans les tableaux 5 et 5 bis.

De nombreuses valeurs sont absentes (à partir de 300 m) à cause d'une panne de l'appareillage. L'évolution de la performance des 6 sujets au TRVC en fonction de la profondeur et du gaz utilisé est représentée sur la figure 9 (les courbes individuelles sont en annexe 4).

DATE	PROFONDEUR (mètres) GAZ	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE ± SD
7.11.83	0 air	29,4	36,1	35,7	37,0	33,3	33,7	34,2 ± 2,5
14.11.83	120 hydrox	35,3 34,1	34,9 34,9	35,7 33,0	40,0 34,9	35,3 38,0	36,6 34,1	36,3 ± 1,7 34,8 ± 1,6
15.11.83	180				38,5			
16.11.83	héliox hydrox	32,6 33,0	38,0 33,3	34,1 35,3	36,1 38,0	34,1 36,1	34,1 34,5	35,4 ± 2,1 35,0 ± 1,7
17.11.83	240							
18.11.83	héliox hydrox	34,5 33,7	36,6 33,3	34,1 34,5	39,5 36,6	34,5 34,1	34,9 31,9	35,7 ± 1,9 34,0 ± 1,4
19.11.83	300							
20.11.83	héliox hydrox 74/24/2	34,6 32,6	35,9 32,3	34,6 33,4	- -	33,1 34,3	32,4 32,4	34,1 ± 1,2 33,0 ± 0,8
29.11.83	80 héliox air	- -	35,6 31,0	34,3 29,7	- -	37,4 35,6	34,7 29,4	35,5 ± 1,2 31,4 ± 2,5

TABLEAU 3 . TEST DE DEXTERITE MANUELLE.

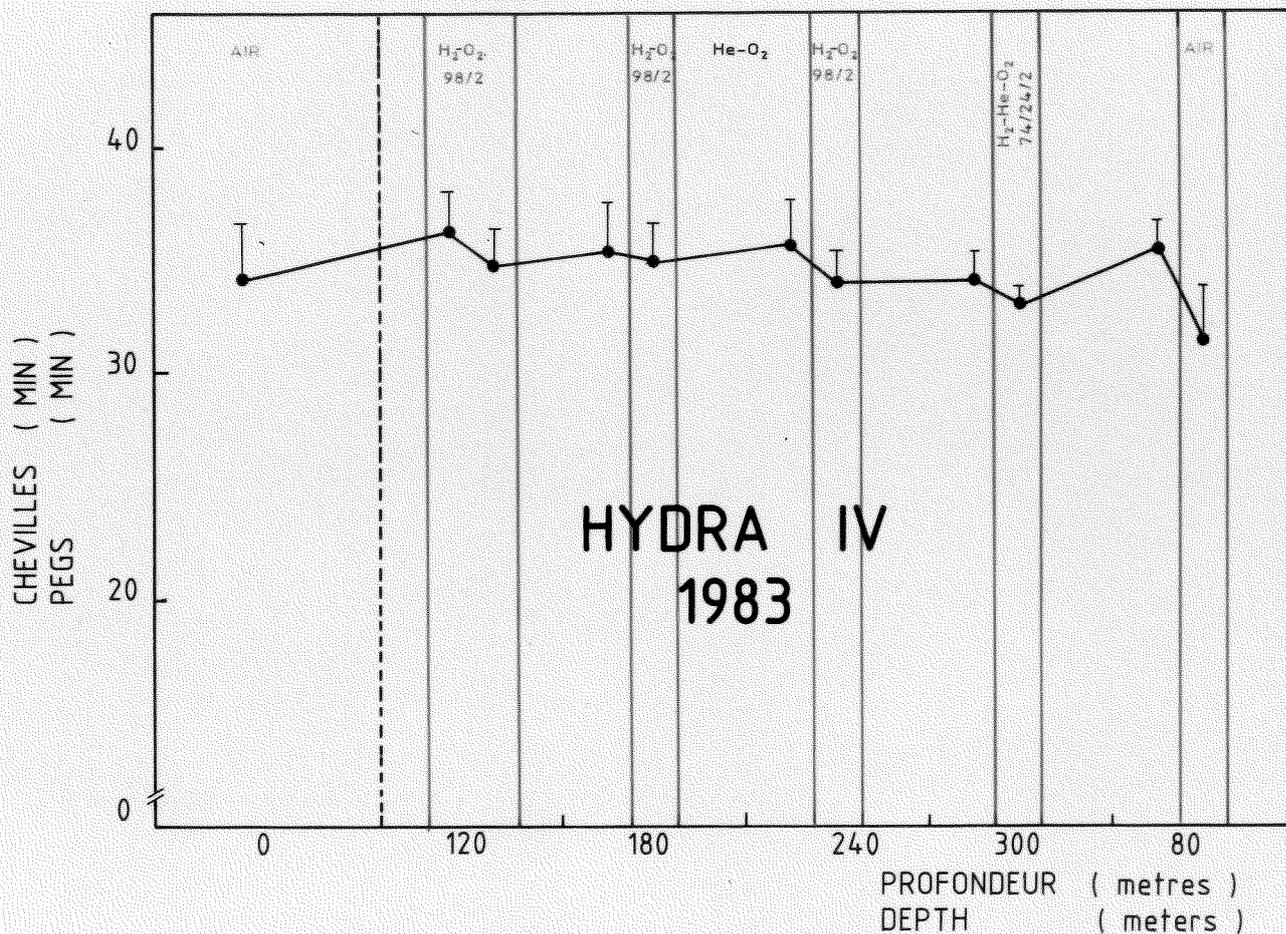
Performances des 6 sujets exprimées en nombre de chevilles rangées par minute au cours de toute la plongée HYDRA IV, aux différentes profondeurs et sous différents mélanges gazeux (héliox, hydrox 96/2, hydrox 74/24/2, air).

PROFONDEUR (mètres)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE
180 hydrox 98/2	+ 1,2%	-12,4%	+ 3,8%	- 1,3% + 5,3%	+ 5,9%	+ 1,2%	+ 0,5%
240 hydrox 98/2	- 2,3%	- 9,0%	+ 1,2%	- 7,3%	- 1,2%	- 8,6%	-4,5%
300 hydrox 74/24/2	- 5,8%	-10,0%	- 3,5%	-	+ 3,6%	0,0%	- 3,1%
80 AIR	-	-12,9%	-13,4%	-	- 4,8%	-15,3%	-11,6%

TABLEAU 4 . TEST DE DEXTERITE MANUELLE.

Pourcentages de variation des performances des 6 plongeurs en hydrox (ou air), par rapport à la référence hélio aux profondeurs de 180, 240, 300 et 80 mètres.

La performance est exprimée en nombre de chevilles rangées par minute.



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

FIGURE 8

DATE	PROFONDEUR (mètres) GAZ	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE; MEDIANE (Q1 - Qs)
8.11.83	0 AIR						46 (42-52)	
10.11.83	0 AIR	42 (37-46)		34 (32-36)			45 (38-53)	40 (36-45)
14.11.83	120 hydrox	42 (37-47) 41 (38-46)	31 (28-36) 33 (31-35)	41 (37-44) 40 (38-42)	36 (34-37) 36 (34-37) 35 (33-37)	49 (46-51) 52 (47-55)	40 (38-44) 44 (42-47)	40 (37-43) 41 (38-43)
15.11.83	180							
16.11.83	hélio hydrox	34 (31-39) 40 (36-44)	34 (31-36) 36 (33-40)	40 (36-43) 43 (42-46)	- -	58 (55-61) -	44 (41-47) -	42 (39-45) 40 (37-43)
17.11.83	240							
18.11.83	hélio hydrox	35 (32-37) 36 (35-41)	37 (34-43) 37 (36-41)	49 (45-53) 50 (47-57)	32 (31-40) 37 (34-42)	59 (55-60) 56 (53-60)	48 (42-51) 47 (45-52)	43 (40-47) 44 (42-49)
19.11.83	300							
20.11.83	hélio hydrox 74/24/2	37 (35-41) 39 (36-42)	38 (35-46) 40 (36-47)	55 (50-61) 49 (42-59)	- -	- -	- -	43 (40-49) 43 (38-49)

TABLEAU 5 . TEST DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (AU SEC).

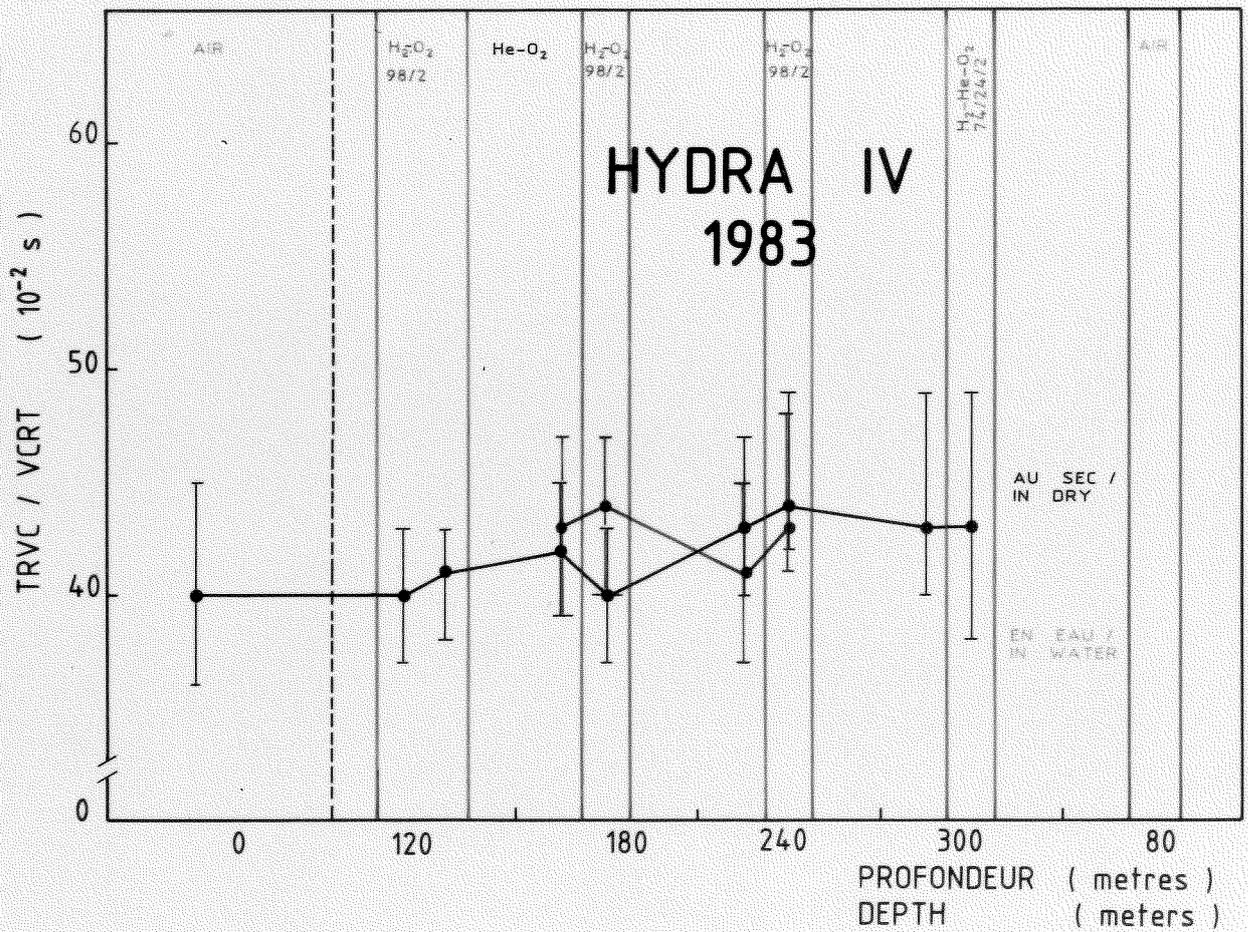
Performances des 6 plongeurs exprimées en centièmes de seconde : valeur de la médiane, (quartile inférieur Q1, quartile supérieur Qs), au cours de la plongée HYDRA IV, aux différentes profondeurs et sous différents mélanges gazeux (hélio, hydrox 98/2, hydrox 74/24/2).

DATE	PROFONDEUR (mètres) GAZ	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE MEDIANE (Q1 - Q5)
15.11.83	180							
16.11.83	héliox hydrox	44 (37-47) 40 (37-43)	38 (36-42) 46 (43-53)	47 (44-52) 54 (49-60)	32 (31-34) 33 (32-35)	57 (49-64) 52 (47-55)	41 (38-44) 41 (39-44) 39 (36-42)	43 (39-47) 44 (40-47)
17.11.83	240							
18.11.83	héliox hydrox	40 (37-46) 39 (37-44)	38 (34-42) -	51 (47-55) 57 (54-64)	31 (29-35) 34 (32-36)	- -	43 (40-47) -	41 (37-45) 43 (41-48)
19.11.83	300 héliox hydrox 74/24/2				34 (30-36) 36 (34-39)			

TABLEAU 5 bis - TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (EN EAU)

Performances des 6 plongeurs exprimées en centièmes de seconde : valeur médiane

(Q1 - Quartile inférieur, Q5 - Quartile supérieur) au cours de la plongée HMDRA IV aux différentes profondeurs et sous différents mélanges gazeux (héliox, hydrox 98/2, hydrox 74/24/2).



EVOLUTION DU TRVC AU SEC ET EN EAU
(MOYENNE DES 6 PLONGEURS ± sd) EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
ET DU MELANGE GAZEUX RESPIRE.

FIGURE 9

PROFONDEUR (mètres)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE
180	-17,6 %	-5,8 %	-7,5 %	-	-	-	-10,3 %
240	- 2,9 %	0,0 %	-2,0 %	-15,6 %	+ 5,1 %	+ 2,1 %	- 2,2 %
300 hydrox 74/24/2	- 5,4 %	-5,3 %	+10,9 %	-	-	-	+ 0,1 %

TABLEAU 6 . TEST DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (AU SEC) .

Pourcentages de variation des performances des 6 sujets en hydrox par rapport à la référence héliox aux profondeurs de 180, 240, et 300 mètres.

La performance est exprimée en centièmes de seconde.

PROFONDEUR (mètres)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE
180	+ 9,1%	-21,1%	-14,9%	- 3,1%	+ 8,8%	+ 4,9%	- 2,7%
240	+ 2,5%	-	-11,1%	- 9,7%	-	-	- 6,3%
300 hydrox 74/24/2				- 5,9%			

TABLEAU 6 BIS . TEST DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (EN EAU) .

Pourcentages de variation des performances des 6 sujets en hydrox, par rapport à la référence héliox aux profondeurs de 180, 240, et 300 mètres.

La performance est exprimée en centièmes de seconde.

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. Les pourcentages de variation des performances entre l'héliox et l'hydrox à chaque profondeur explorée (tableaux 6 et 6 bis) ne montrent pas de variation significative (le pourcentage moyen de dégradation reste inférieur ou égal à - 10,3 %). Le séjour sous hydrox n'altérerait pas le TRVC, au sec comme en eau.

3 - TEST DES MULTIPLICATIONS

Les résultats des tests des multiplications effectués chez les 6 sujets sous héliox et sous hydrox sont réunis dans le tableau 7. L'évolution des performances (moyenne des 6 sujets \pm Sd) est représentée en figure 10. Les courbes individuelles représentant le nombre d'erreurs et le nombre d'opérations effectuées sont regroupées en annexe 5.

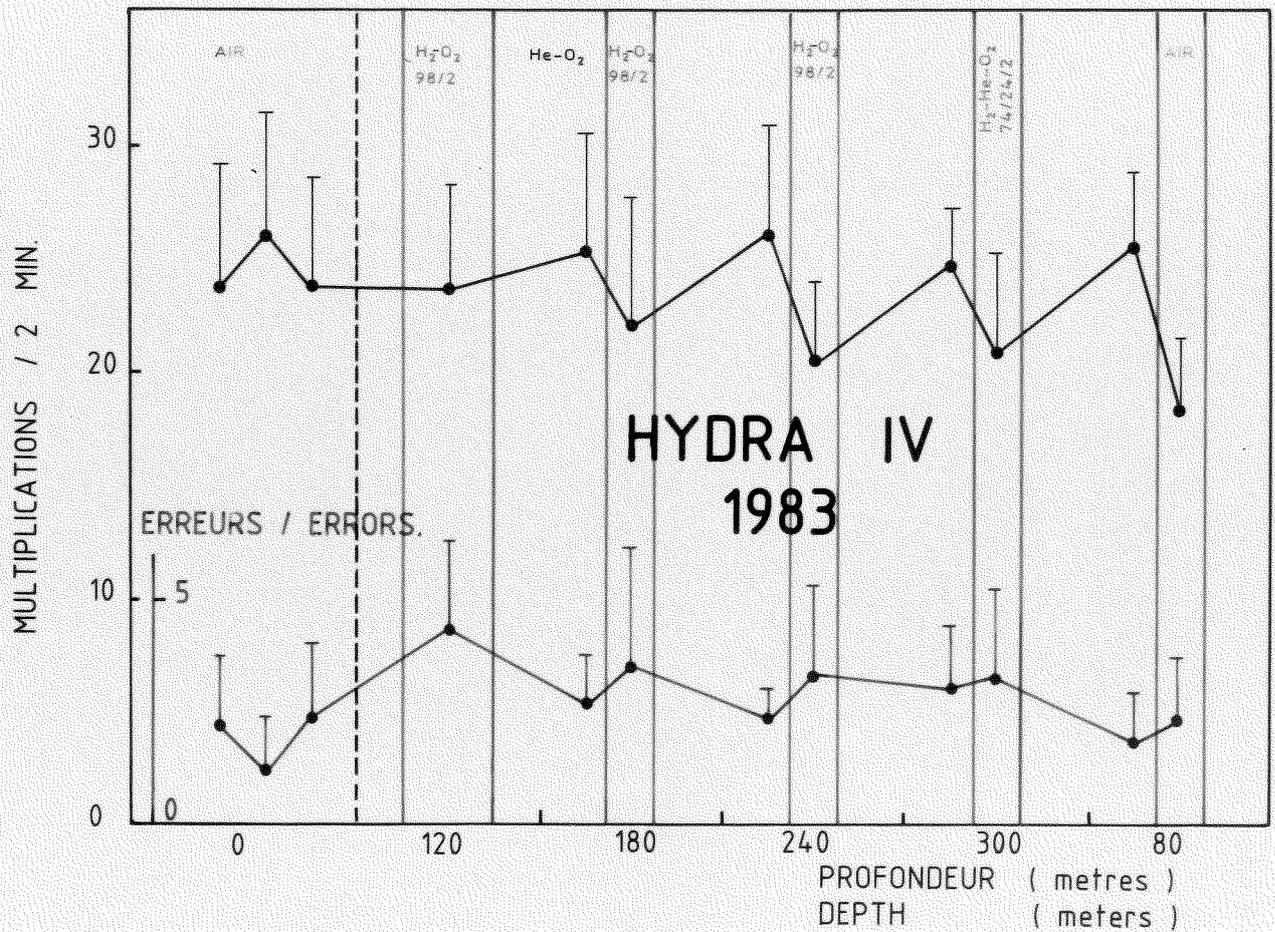
La courbe moyenne montre à 180, 240 et 300 m une diminution de la performance sous hydrox par rapport à la référence héliox à une même profondeur. On observe parallèlement une augmentation du nombre d'erreurs. Les pourcentages de variation du nombre de multiplications effectuées en 2 minutes à une même profondeur entre l'héliox et l'hydrox ou héliox et air sont notés dans le tableau 8. 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 %).

DATE	PROFONDEUR (mètres) GAZ	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE ± SD
3.11.83	0 AIR			28(2)			21(0)	
4.11.83	0 AIR		18(1)	21(1)			14(0)	
4.11.83	0 AIR			25(0)				
7.11.83	0 AIR	19(3)	22(2)	28(0)	33(2)	17(5)	24(1)	23,8 ± 5,4 (2,2 ± 1,6)
8.11.83	0 AIR	21(1)	-	28(2)	35(0)	20(0)	26(3)	26,0 ± 5,4 (1,2 ± 1,2)
10.11.83	0 AIR	20(3)	23(5)	33(0)	-	23(2)	20(2)	23,8 ± 4,8 (2,4 ± 1,6)
14.11.83	120 hydrox	18(5)	22(5)	27(5)	32(0)	22(5)	21(6)	23,7 ± 4,6 (4,3 ± 2,0)
15.11.83	180							
16.11.83	héliox	19(4)	24(2)	29(1)	35(2)	22(4)	23(3)	25,3 ± 5,2 (2,7 ± 1,1)
	hydrox	16(0)	18(7)	27(2)	32(2)	20(7)	19(3)	22,0 ± 5,6 (3,5 ± 2,6)
17.11.83	240							
18.11.83	héliox	21(2)	24(3)	30(1)	35(3)	22(3)	24(2)	26,0 ± 4,9 (2,3 ± 0,7)
	hydrox	21(6)	21(2)	27(2)	20(3)	17(6)	17(1)	20,5 ± 3,4 (3,3 ± 2,0)
19.11.83	300							
20.11.83	héliox	22(5)	23(3)	29(2)	-	23(4)	26(1)	24,6 ± 2,6 (3,0 ± 1,4)
	hydrox	20(4)	20(4)	29(0)	-	15(6)	20(0)	20,8 ± 4,5 (3,2 ± 2,0)
	74/24/2							
29.11.83	80							
	héliox	24(3)	24(1)	29(0)	31(2)	22(3)	23(2)	25,5 ± 3,3 (1,8 ± 1,1)
	air	16(2)	14(3)	18(1)	23(1)	17(5)	22(2)	18,3 ± 3,2 (2,3 ± 1,4)

TABLEAU 7 . TEST DES MULTIPLICATIONS.

Performances des 6 sujets exprimées en nombre d'opérations effectuées en 2 minutes et en nombre d'erreurs (entre parenthèses) au cours de toute la plongée HYDRA IV, aux différentes profondeurs et sous différents mélanges gazeux (héliox, hydrox 98/2, hydrox 74/24/2, air).



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

FIGURE 10

PROFONDEUR (mètres)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE
180 hydrox 98/2	-15,8%	-25,0%	- 6,9%	- 8,6%	- 9,1%	-17,4%	-13,8%
240 hydrox 98/2	0,0%	-12,5%	-10,0%	-42,9%	-22,7%	-29,2%	-19,6%
300 hydrox 74/24/2	- 9,1%	-13,0%	0,0%	-	-30,4%	-23,1%	-15,1%
80 air	-33,3%	-41,7%	-37,9%	-25,8%	-22,7%	- 8,7%	-28,4%

TABLEAU 8 . TEST DES MULTIPLICATIONS.

Pourcentages de variation des performances des 6 plongeurs en hydrox (ou air), par rapport à la référence héliox aux profondeurs de 180, 240, 300 et 80 mètres.

La performance est exprimée en nombre de multiplications effectuées en 2 minutes.

4 - TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES : RC

Les résultats obtenus au test de RC chez les 6 sujets sont notés dans le tableau 9. Les courbes réunies en annexe 6 présentent l'évolution des résultats (nombre de chiffres examinés en une minute et nombre d'erreurs commises) pour chaque sujet.

Une courbe moyenne est représentée sur la figure 11. 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. Le tableau 10 regroupe les pourcentages de variation des performances au test de RC entre héliox et hydrox (ou héliox et air) à une même profondeur. 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 PH_2 (variations trop faibles). A 80 m à l'air, la dégradation moyenne observée était de - 12,6 %.

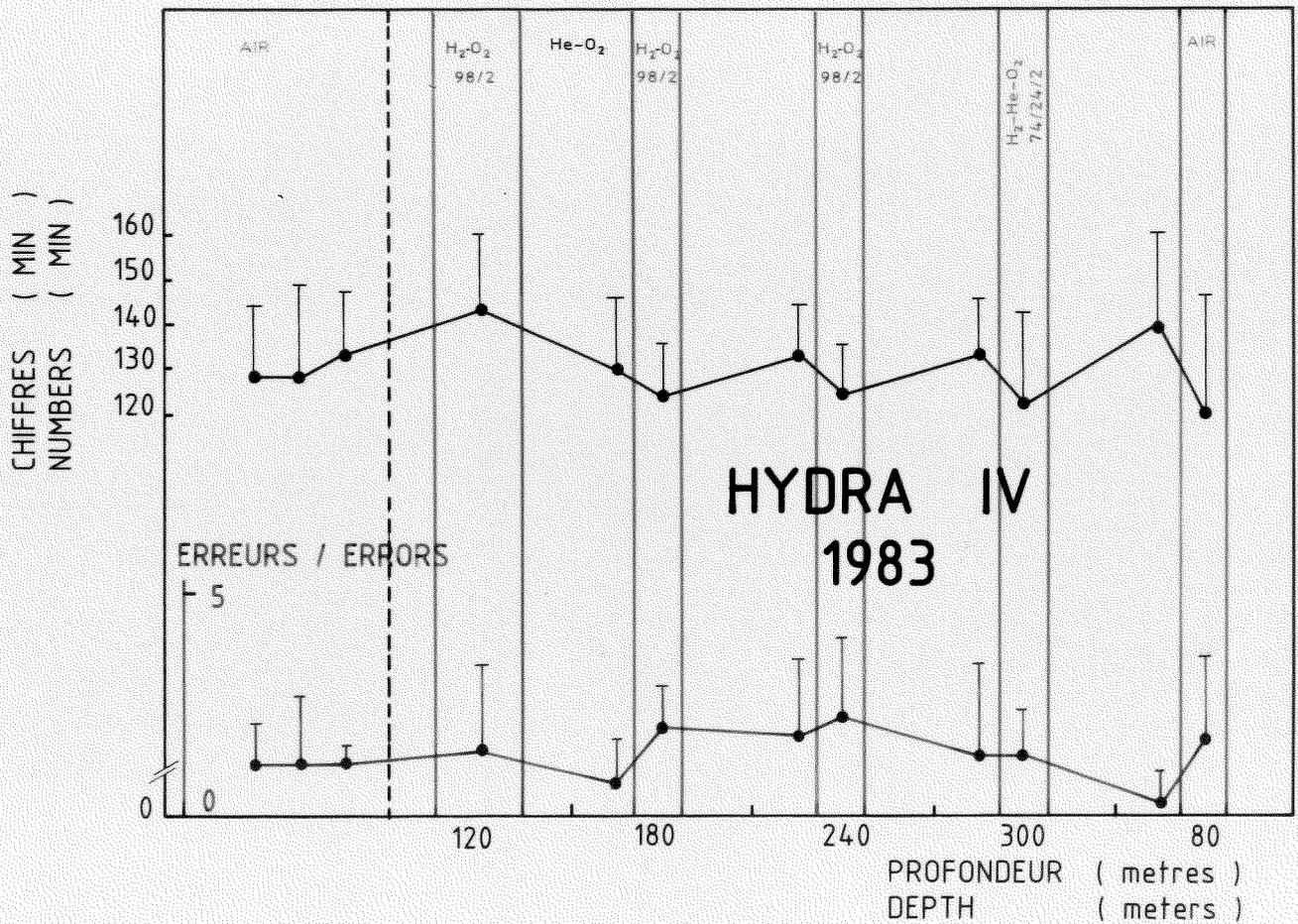
5 - AU COURS DES EXPOSITIONS LONGUE DUREE A 150 M

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. Les résultats des performances aux 3 tests pendant les expositions sont réunis dans le tableau 11, et l'évolution de ces résultats en fonction de la durée du séjour sous hydrox est représenté sur la figure 12.

DATE	PROFONDEUR (mètres) GAZ	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE ± SD
3.11.83	0 AIR			111(0)			104(1)	
4.11.83	0 AIR		154(3)	142(0)			116(2)	
4.11.83	0 AIR			114(0)				
7.11.83	0 AIR	99(1)	139(1)	139(1)	144(0)	127(3)	117(1)	128 ± 16 (1,2 ± 0,9)
8.11.83	0 AIR	98(1)	-	135(0)	162(0)	116(4)	129(1)	128 ± 21 (1,2 ± 1,5)
10.11.83	0 AIR	116(1)	148(1)	148(2)	-	116(1)	137(1)	133 ± 14 (1,2 ± 0,4)
14.11.83	120 hydrox	120(3)	161(1)	140(0)	168(0)	140(5)	129(0)	143 ± 17 (1,5 ± 1,9)
15.11.83	180							
16.11.83	héliox	109(2)	137(0)	137(0)	155(0)	135(2)	109(1)	130 ± 16 (0,8 ± 0,9)
	hydrox	111(2)	130(4)	124(0)	144(0)	124(5)	111(1)	124 ± 11 (2,0 ± 1,9)
17.11.83	240							
18.11.83	héliox	123(2)	130(4)	150(0)	144(0)	130(4)	118(1)	133 ± 11 (1,8 ± 1,7)
	hydrox	111(3)	130(2)	118(0)	142(0)	130(5)	111(3)	124 ± 11 (2,2 ± 1,8)
19.11.83	300							
20.11.83	héliox	109(2)	137(0)	137(0)	-	146(5)	135(0)	133 ± 12 (1,4 ± 2,0)
	hydrox	98(1)	140(1)	120(0)	-	149(3)	101(2)	122 ± 20 (1,4 ± 1,0)
	74/24/2							
29.11.83	80							
	héliox	107(0)	168(0)	124(0)	161(0)	137(2)	137(0)	139 ± 21 (0,3 ± 0,7)
	air	86(1)	137(3)	129(0)	92(0)	162(5)	114(1)	120 ± 26 (1,7 ± 1,8)

TABEAU 9 . TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES.

Performances des 6 sujets exprimées en nombre de chiffres examinés en 1 minute et en nombre d'erreurs (entre parenthèses) au cours de la plongée HYDRA IV, aux différentes profondeurs et sous différents mélanges gazeux (héliox, hydrox 98/2, hydrox 74/24/2, air).



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

FIGURE 11

PROFONDEUR (mètres)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	MOYENNE
180 hydrox 98/2	+ 1,8%	- 5,1%	- 9,5%	- 7,1%	- 8,1%	+ 1,8%	- 4,4%
240 hydrox 98/2	- 9,8%	0,0%	-21,3%	- 1,4%	0,0%	- 5,9%	- 6,4%
300 hydrox 74/24/2	-10,1%	+ 2,2%	-12,4%	-	+ 2,1%	-25,2%	- 8,7%
80 AIR	-19,6%	-18,5%	+ 4,0%	-42,9%	+18,2%	-16,8%	-12,6%

TABLEAU 10 . TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES .

Pourcentages de variation des performances des 6 plongeurs en hydrox (ou air), par rapport à la référence héliox aux profondeurs de 180, 240, 300 et 80 mètres.

La performance est exprimée en nombre de chiffres examinés en 1 minute.

TESTS PSYCHOMETRIQUES	A1 (4h sous H2)	B1 (6h sous H2)	B2 (2h sous H2)
<u>DEXTERITE MANUELLE</u> (nombre de chevilles rangées par minute)			
référence hélicox	-	-	-
hydrox 20-25 min.	34,7	37,9	36,5
1 heure	-	-	34,3
1 heure 40	35,1	-	36,9
2 heures 30	36,0	36,5	-
3 heures 40	35,1	-	-
4 heures 20	-	36,0	-
5 heures 40	-	40,6	-
<u>MULTIPLICATIONS</u> (nombre effectuées en 2 minutes et (nombre d'erreurs))			
référence hélicox	16(4)	36(1)	20(1)
hydrox 20-25 min.	20(2)	32(4)	21(1)
1 heure	-	-	19(3)
1 heure 40	17(1)	-	19(3)
2 heures 30	19(2)	32(1)	-
3 heures 40	19(5)	-	-
4 heures 20	-	29(5)	-
5 heures 40	-	34(4)	-
<u>RECONNAISSANCE DE CHIFFRES</u> (nombre examinés en une minute et (nombre d'erreurs))			
référence hélicox	89(0)	150(0)	130(3)
hydrox 20-25 min.	92(1)	155(0)	111(3)
1 heure	-	-	129(3)
1 heure 40	89(0)	-	144(6)
2 heures 30	107(0)	146(0)	-
3 heures 40	123(1)	-	-
4 heures 20	-	144(1)	-
5 heures 40	-	142(0)	-

TABLEAU 11 . TESTS PSYCHOMETRIQUES A 150 METRES.

Evolution des performances aux tests de DEXTERITE MANUELLE, MULTIPLICATIONS, et RECONNAISSANCE DE CHIFFRES au cours du temps, des 3 plongeurs qui ont subi des expositions prolongées sous HYDROX 98/2 à 150 mètres de 2h (B2), 4h (A1), et 6h (B1).

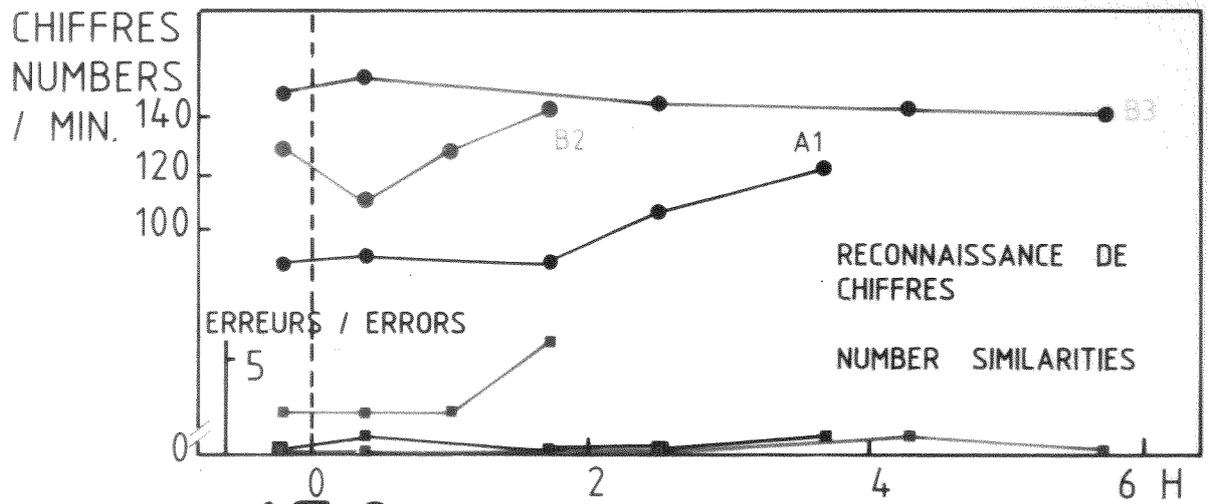
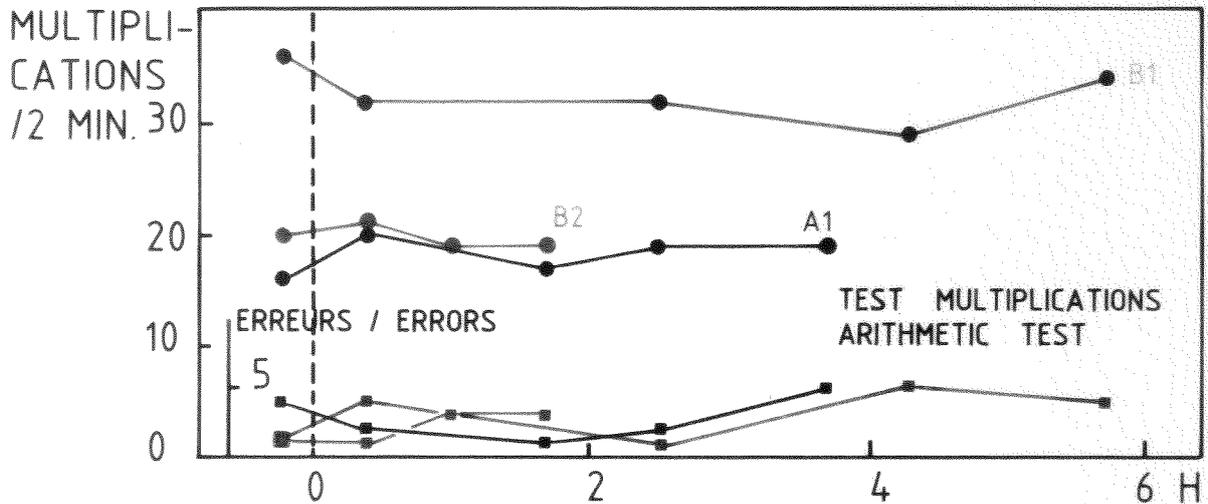
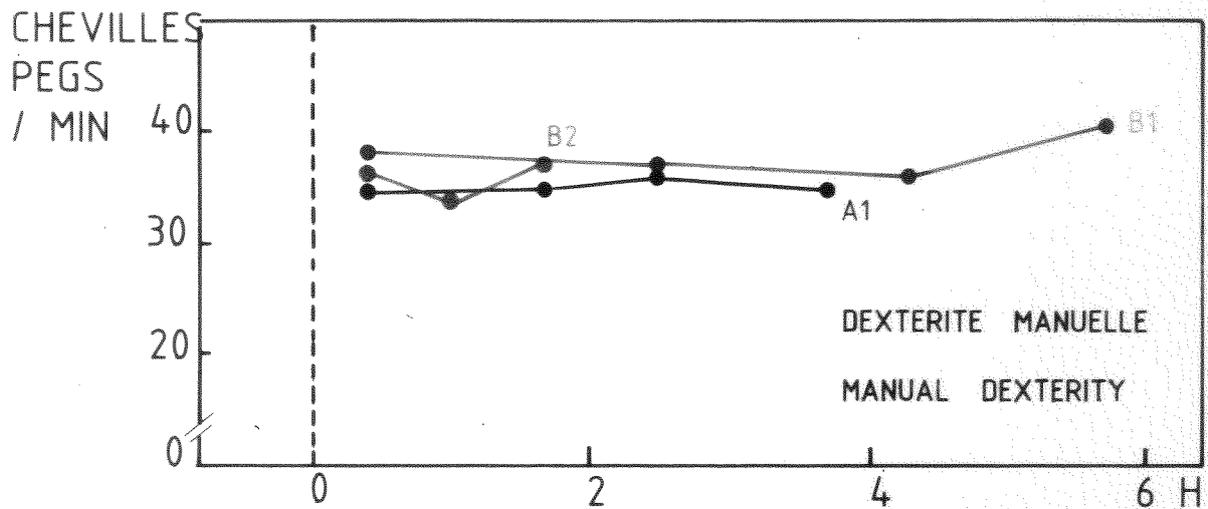
Il n'y a pas de dégradation des performances au cours du temps passé sous hydrox :

- 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 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.

FIGURE 12 : PHOTO SUIVANTE

EVOLUTION DES PERFORMANCES DES PLONGEURS A1, B1 ET B2
AUX TESTS PSYCHOMETRIQUES PENDANT UN SEJOUR SOUS HYDROX 98/2 A 150 M.

HYDRA IV 1983



150 m - H₂-O₂ 98/2

FIGURE 12

E - ETUDE DE L'ECG PENDANT LES ACTIVITES EN IMMERSION

Les plongeurs étaient suivis en permanence pendant toutes leurs activités en immersion au niveau de l'ECG. La première demi-heure de plongée se déroulait sous héliox, l'heure suivante sous hydrox.

1 - ETUDE DES FREQUENCES CARDIAQUES (FC) AU COURS DES PLONGEES

Le tableau 12 réunit les valeurs de FC observées chez les plongeurs pendant leurs immersions en fonction de leur activité et du mélange gazeux respiré. Les FC ont été mesurées sur 10 secondes à partir du tracé ECG et moyennées sur une minute. La FC minimale représente la plus faible FC observée pendant toute la durée de plongée sous héliox ou hydrox.

Une courbe moyenne pour chaque profondeur et gaz est représentée en figure 13.

- A 180 m, les FC de repos après équipement et mise à l'eau sont, en héliox, de 83 btts/min \pm 9. Au cours de l'exercice sur cyclorameur (21 kg - 7 min) la FC moyenne augmente à 111 btts/min \pm 3. Ici, bonne homogénéité de l'échantillonnage. La récupération moyenne après exercice est progressive : 88 btts/min \pm 9 à la 5ème minute de repos. Sous hydrox, pour le même exercice, la FC atteint 104 btts/min et retourne à 78 btts/min après 5 minutes de repos.

Le test du puzzle sous hydrox fait augmenter les FC (en moyenne à 95 btts/min \pm 13).

- A 240 m, l'évolution des FC est comparable : 86 btts/min au repos en héliox, 102 btts/min pendant l'exercice (moins important qu'à 180 m : 15 kg - 3 min, ce qui explique la moins grande tachycardie d'effort), 79 btts/min à la 5ème minute de repos ; en hydrox 94 btts/min pendant l'exercice (ici encore, FC à l'effort est plus faible en hydrox) et 75 btts/min 5 minutes après l'effort.

- A 300 m, l'exercice effectué était analogue à celui réalisé à 240 m (15 kg - 3 min), et les FC à l'effort étaient de 108 btts/min en héliox et 94 btts/min en mélange ternaire (H₂/He/O₂ - 74/24/2).

A1 et B1 ont effectué de même une plongée sous mélange ternaire 59/39/2 avec un travail au cyclorameur plus important (21 kg - 7 min) mais il y a de grandes différences interindividuelles.

Les FC de repos minimales enregistrées ont toujours été observées pendant les séjours en hydrox (67 - 68 btts/min en hydrox contre 78 - 82 btts/min en héliox).

TABLEAU 12 . FREQUENCES CARDIAQUES PENDANT LES IMMERSIONS.

Fréquences cardiaques (FC en battements par minute) des plongeurs d'HYDRA IV enregistrées pendant les plongées en eau, en fonction de leur activité et du mélange gazeux respiré (hélioxy, hydrox 98/2, hydrox 74/24/2, ou hydrox 59/39/2) à 180, 240, et 300 mètres.

SUIVUS FC (bats/ min.)	A1		A2		A3		B1		B2		B3		moyenne ± Sd	
	hélioxy	hydrox	hélioxy	hydrox										
180 M	80	90	70	75	90	80	75	80	95	90	90	85	83 ± 9	83 ± 6
repos	113	115	105	95	111	100	110	104	112	105	114	103	111 ± 3	104 ± 6
cyclorameur (21 kg.7 min)	100	90	75	65	90	85	90	70	100	90	95	90	92 ± 9	82 ± 10
1° min. repos	90	85	75	60	90	80	85	70	100	90	95	85	89 ± 8	78 ± 10
3° min. repos	90	85	75	60	90	80	80	70	100	90	95	85	88 ± 9	78 ± 10
5° min. repos	-	115	-	80	-	86	-	80	-	100	-	105	-	95 ± 13
puzzle	80	60	70	55	85	65	75	70	90	75	90	75	82 ± 7	67 ± 8
FC minimale	100	80	75	70	80	80	70	60	100	90	90	80	86 ± 12	77 ± 9
240 M	110	90	105	-	105	97	102	94	105	95	109	97	102 ± 7	94 ± 3
cyclorameur (15 kg.3 min)	100	80	75	-	80	80	70	80	90	80	95	80	85 ± 11	80 ± 0
1° min. repos	100	75	65	-	80	70	70	75	90	85	95	75	83 ± 13	76 ± 5
3° min. repos	90	80	70	-	75	70	70	70	90	85	80	70	79 ± 8	75 ± 6
5° min. repos	-	95	-	-	-	80	-	95	-	90	-	105	-	93 ± 8
puzzle	85	60	65	-	75	70	70	60	90	65	80	70	78 ± 9	67 ± 7
FC minimale	90	80	100/70	85/70	115/90	95/85	(*)	(*)					86 ± 11	78 ± 6
300 M	110	95	115/90	95/85									108 ± 10	94 ± 5
HYDROX 74/24/2	90	80	95/75	80/70									89 ± 8	75 ± 5
repos	110	95	90/70	85/70									88 ± 11	75 ± 6
cyclorameur (15 kg.3 min)	90	80	90/65	70/65									79 ± 11	69 ± 2
1° min. repos	100	75	-	105/90									-	89 ± 12
3° min. repos	70	70	90/65	70/65									-	68 ± 3
5° min. repos	-	70	90/65	70/65									-	
puzzle	70	65												
FC minimale	80	80	90	75										
HYDROX 59/39/2	108	92	117	100										
repos	85	70	85	75										
cyclorameur (21 kg.7 min)	90	65	80	70										
1° min. repos	70	65	80	70										
3° min. repos	70	65	80	70										
5° min. repos	-	95	-	90										
puzzle	70	60	80	65										
FC minimale														

(*) B1 a effectué deux plongées à 300 mètres en hélioxy puis en hydrox 74/24/2.

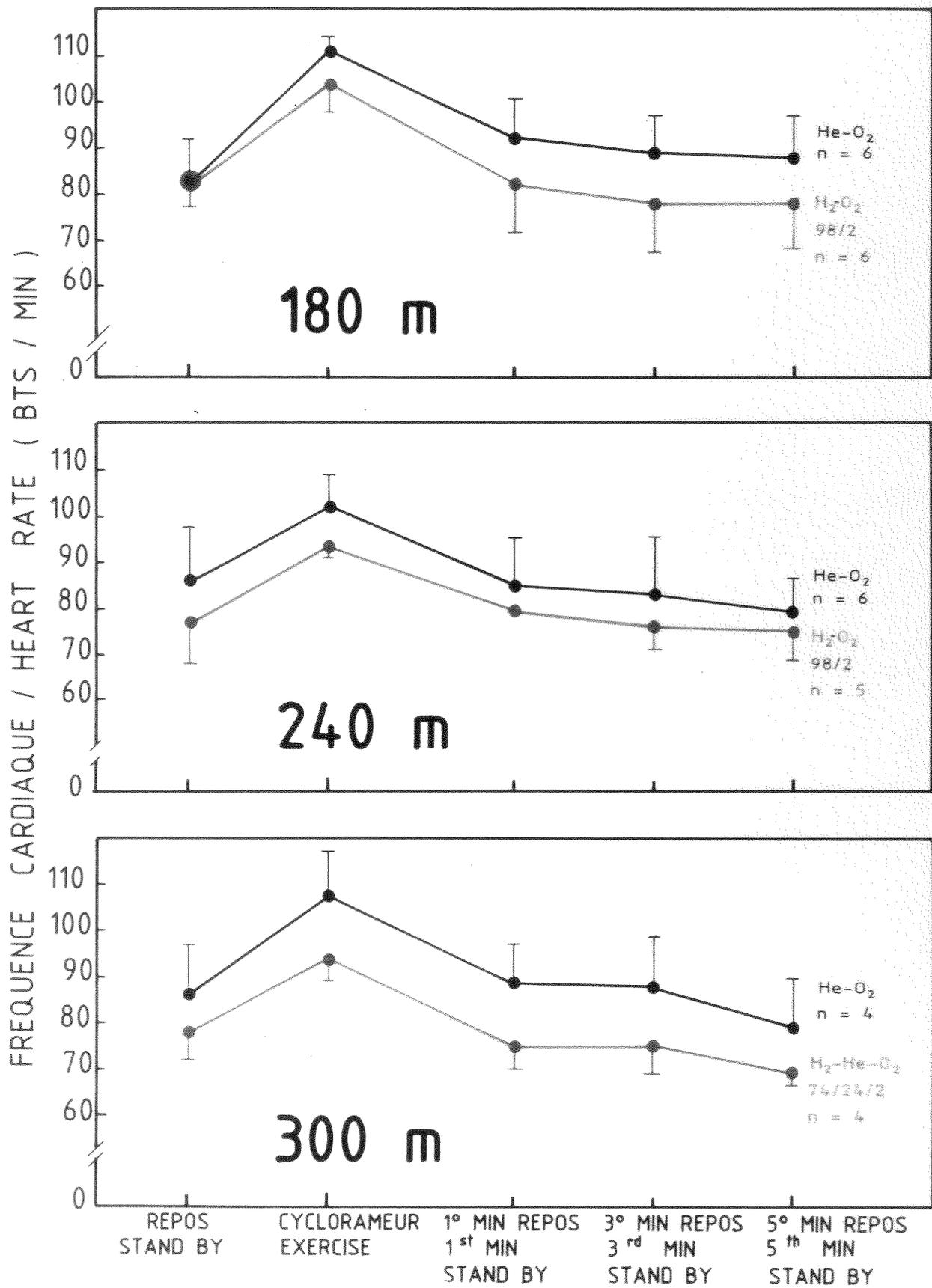


FIGURE 13

- Les FC ont été aussi mesurées durant les 2 plongées à 80 m (héliox 80/20 puis air, cf. Figure 14). Les résultats sont regroupés dans le tableau 13. Les FC de repos sont variables (102 à 84 ; 98 à 70 btts/min) car le fait de s'équiper a entraîné une tachycardie assez importante et transitoire chez le plongeur A1.

L'exercice sur cyclorameur en héliox (15 kg - 5 min) entraîne une augmentation de FC à 90 - 100 btts/min ; en air, l'exercice (15 kg - 2 min seulement, par crainte d'essoufflement) modifie peu la FC (80 - 84 btts/min). Le retour aux FC de repos est progressif : à la 5ème minute FC = 70 - 80 btts/min en héliox, 60 - 66 btts/min à l'air.

Le calcul du coût cardiaque ($CC = FC \text{ d'effort} - FC \text{ de repos}$) au cours de l'exercice sur cyclorameur permet de mieux évaluer la répercussion sur l'appareil cardiaque de la charge de travail chez chaque sujet en fonction de sa FC de repos. Le tableau 14 réunit les résultats des coûts cardiaques observés lors des plongées héliox, hydrox, ternaïre et air.

- A 180 m, le CC moyen à l'héliox est de + 28 btts/min et devient + 20 btts/min sous hydrox.
- A 240 m, les CC moyens ne sont pas différents en héliox ou hydrox (+ 17 et + 16 btts/min). La charge de travail était en effet plus faible (15 kg - 3 min au lieu de 21 kg - 7 min à 180 m).
- Cependant à 300 m pour cette même charge de 15 kg, on observe une différence entre héliox (+ 23 btts/min) et ternaïre 74/24/2 (+ 16 btts/min). Il semble que cette différence existe aussi à 300 m entre héliox et ternaïre 59/39/2 mais sur 2 sujets seulement.
- A l'air, 2 plongées ont eu lieu à 80 m et les CC sont sous héliox de + 16, + 20 btts/min pour un effort de 15 kg - 5 min et, + 2 et + 18 btts/min à l'air pour un effort de 15 kg - 2 min. Il existe une grande différence interindividuelle et ces résultats sont peu interprétables.

HYDRA IV

1983

80m

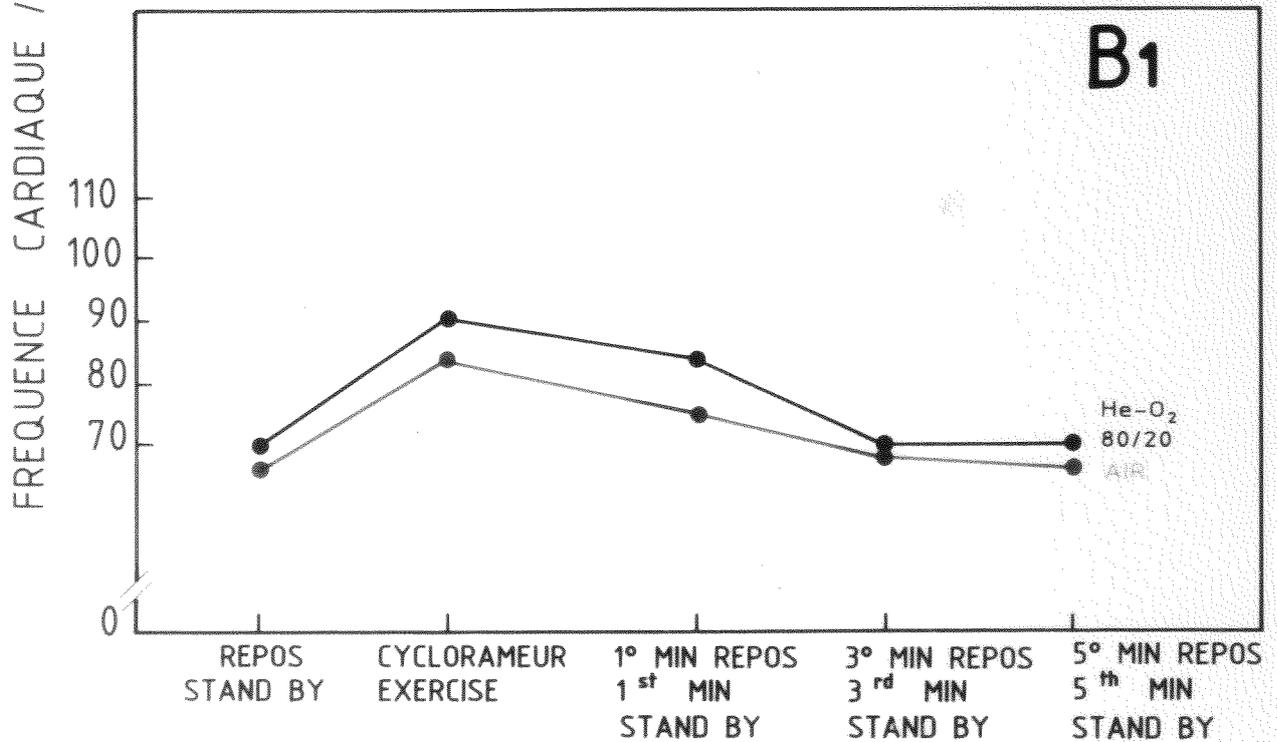
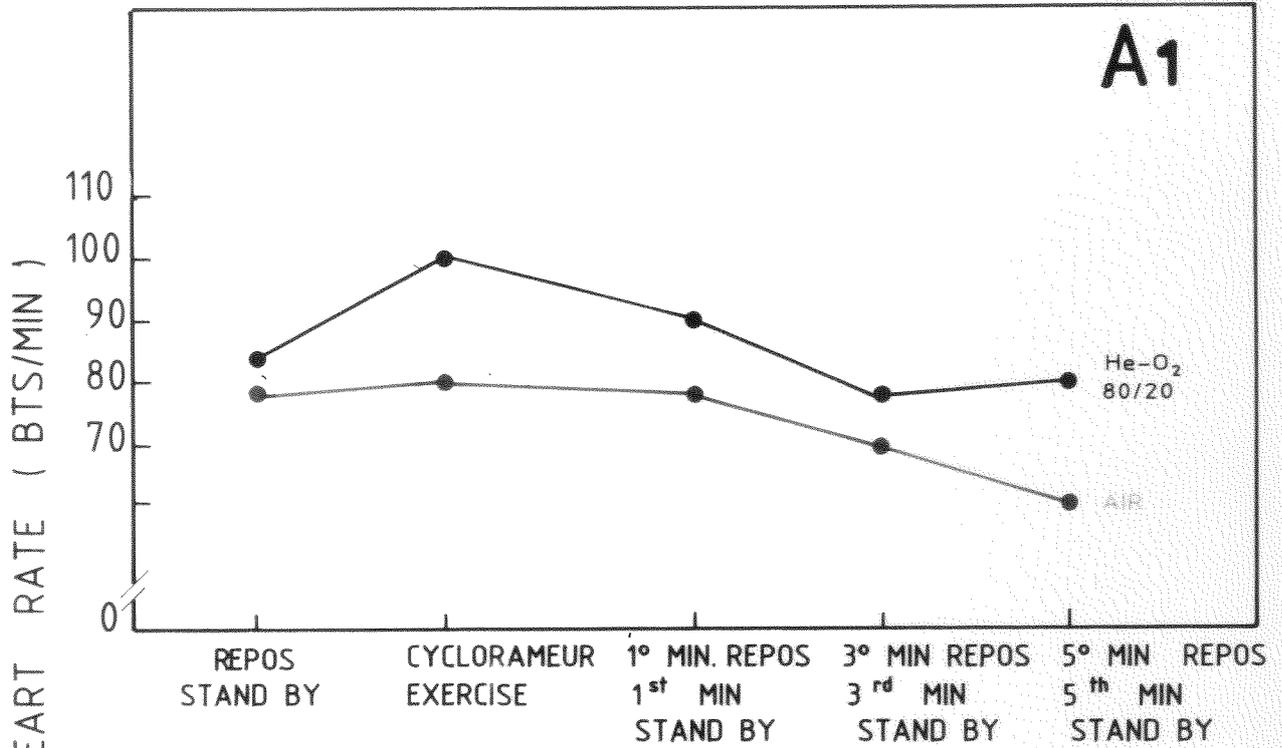


FIGURE 14

SUJETS GAZ FC (btts/min.)	A1		B1	
	héliox 80/20	air	héliox 80/20	air
<u>80 M</u>				
équipement	144	-	96	-
immersion	126	-	90	-
repos	102/84	90/78	78/70	78/66
cyclorameur (15 kg)	100 (5 min.)(*)	80 (2 min.)(*)	90 (5 min.)(*)	84 (2 min.)(*)
1° min. repos	90	78	84	75
3° min. repos	78	70	70	68
5° min. repos	80	60	70	66
puzzle	-	-	-	-
FC minimale	75	50	70	60

(*) durée de l'exercice

TABLÉAU 13 . Evolution des fréquences cardiaques (FC ,
exprimées en battements / minute) pendant
les plongées en immersion à 80 mètres, chez
2 plongeurs d'HYDRA IV , sous mélange gazeux
héliox 80/20 puis air.

COÛT CARDIAQUE (bttts/min.)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	$\bar{x} \pm Sd$
<u>180 M</u> héliox hydrox (21kg.7 min.)	+ 23 + 26	+ 35 + 20	+ 21 + 20	+ 35 + 24	+ 17 + 15	+ 24 + 17	+ 28 ± 7 + 20 ± 4
<u>240 M</u> héliox hydrox (15kg.3 min.)	+ 10 + 10	+ 15 -	+ 25 + 17	+ 25 + 30	+ 5 + 5	+ 19 + 17	+ 17 ± 7 + 16 ± 8
<u>300M</u> héliox hydrox. (74/24/2) (15kg.3 min.)	+ 20 + 15	- -	- -	+20/+15 ^(*) +15/+10 ^(*)	- -	+ 35 + 25	+ 23 ± 8 + 16 ± 5
héliox hydrox (59/39/2) (21 kg.7min.)	+ 28 + 12	- -	- -	+ 27 + 25	- -	- -	
<u>80 M</u> héliox (80/20) (15kg.5min.) air (15kg.2min.)	+ 16 + 2	- -	- -	+ 20 + 18	- -	- -	

(*) B1 a effectué 2 plongées à 300 mètres en héliox puis hydrox 74/24/2.

TABLEAU 14 . COÛT CARDIAQUE de l'exercice sur cyclorameur observé chez les 6 plongeurs d'HYDRA IV, à différentes profondeurs (180, 240, 300 et 80 mètres), sous différents mélanges gazeux.

2 - ETUDE DE L'ECG PENDANT LES PLONGEES

Le tracé électrocardiographique était normal chez tous les sujets sauf A1 qui présentait de nombreuses extrasystoles ventriculaires au repos comme à l'effort quel que soit le mélange respiré (héliox, hydrox, air). Ce sujet (le plus âgé) connaissait cette particularité dépistée dès ses débuts en plongée, à la Marine Nationale.

Des variations de FC couplées à la ventilation ont souvent été observées, particulièrement chez A1 et B1, plongeurs professionnels, qui ont un rythme ventilatoire très lent en immersion.

3 - ECG ET FC PENDANT LES SEJOURS LONGUE DUREE SOUS HYDROX A 150 M

Les 3 sujets qui ont passé 2, 4 ou 6 heures sous hydrox 98/2 à 150 m n'ont montré aucune anomalie de l'ECG durant ces expositions, même après 6 heures (B1).

Les FC des 3 sujets sont restées stables pendant toute la durée des séjours. Elles augmentent momentanément lors des tests psychométriques et ralentissent pendant l'enregistrement de l'EEG.

F - RESULTATS BIOLOGIQUES, SCINTIGRAPHIQUES ET VENTILATOIRES

1 - SEJOURS PROLONGES SOUS HYDROX A 150 M

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 réunis dans les tableaux 15, 16, 17 et 18 suivants. Au niveau des éléments figurés du sang (tableau 15), 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 (tableau 16) (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 (tableaux 17 et 18).

2 - BILANS EN FIN DE PLONGEE HYDRA IV

Un bilan pré-plongée a été réalisé par le CERB. Les résultats feront l'objet d'une publication ultérieure. Les bilans post-plongée ont été effectués par le laboratoire d'analyses MONTGRAND. Les résultats sont regroupés dans le tableau 19.

Tous les paramètres ont des valeurs normales sauf deux exceptions :

- polynucléaires éosinophiles de B1, ce qui avait précédemment été constaté à 150 m - hyperéosinophilie due peut-être à une parasitose,
- nombre de plaquettes de A2 assez faible, or A2 est un sujet qui a présenté des bulles circulantes détectables au Doppler durant la décompression.

PARAMETRE SANGUIN		A1	B1	B2
		4h sous H2	6h sous H2	2h sous H2
HEMATIES (/mm ³)	ref.	5,09.10 ⁶	5,11.10 ⁶	5,23.10 ⁶
	ref.	5,07	4,96	4,96
	après	4,70	4,65	4,85
	6h après	4,82	4,62	4,86
LEUCOCYTES (/mm ³)	ref.	6430	6820	6440
	ref.	7330	8000	8800
	après	7100	7500	7500
	6h après	8400	8000	8000
HEMOGLOBINE (g/100g)	ref.	15,5	15,5	16,3
	ref.	15,7	14,8	15,2
	après	13,7	13,8	14,5
	6h après	14,0	13,7	14,6
HEMATOCRITE (%)	ref.	48,0	47,9	49,2
	ref.	46,8	45,2	45,4
	après	43,3	42,5	44,6
	6h après	44,3	42,2	44,7
VGM (µ ³)	ref.	94,3	93,7	94,0
	ref.	92,2	91,0	91,0
	après	92,0	91,0	92,0
	6h après	92,0	91,0	92,0
CONC. GLOB. Hb. (µµ ³)	ref.	30,5	30,3	31,2
	ref.	31,0	29,9	30,8
	après	29,3	29,7	29,9
	6h après	29,1	29,7	30,0
TENEUR Hb (%)	ref.	32,3	32,3	33,2
	ref.	33,6	32,8	33,5
	après	31,8	32,5	32,6
	6h après	31,6	32,5	32,6

PARAMETRE SANGUIN		A1	B1	B2
		4h sous H2	6h sous H2	2h sous H2
PNN (%)	ref.	53,2	47,2	58,9
	ref.	53,9	50,1	53,0
	après	54,1	48,9	63,0
	6h après	53,1	53,0	52,0
PNe (%)	ref.	3,3	10,3	3,1
	ref.	4,1	9,8	3,4
	après	3,8	9,7	2,7
	6h après	3,7	8,9	3,0
PNB (%)	ref.	0,3	0,3	0,0
	ref.	0,4	0,3	1,1
	après	0,4	0,6	0,3
	6h après	0,5	0,3	0,3
LYMPHOCYTES (%)	ref.	37,1	38,0	30,4
	ref.	35,4	35,3	36,6
	après	36,5	36,3	27,2
	6h après	36,9	32,4	36,0
MONOCYTES (%)	ref.	6,1	4,2	7,8
	ref.	6,2	4,5	5,9
	après	5,2	4,5	6,8
	6h après	5,8	5,4	8,7
PLAQUETTES (/mm ³)	ref.	243.10 ³	206.10 ³	265.10 ³
	ref.	228	190	269
	après	216	212	238
	6h après	248	216	246
VMP (µ ³)	ref.	8,9	7,8	8,9
	ref.	8,5	7,3	8,4
	après	7,6	7,4	7,1
	6h après	8,4	7,5	7,7

VGM = volume globulaire moyen

CONC. GLOB. Hb. = concentration globulaire en Hémoglobine

VMP = volume moyen plaquettaire

PNN = polynucléaires neutrophiles

PNe = polynucléaires éosinophiles

PNB = polynucléaires basophiles

TABLEAU 15 . BIOLOGIE SANGUINE AVANT ET APRES EXPOSITIONS SOUS HYDROX A 150 M.

Evolution des éléments figurés du sang chez 3 plongeurs ayant séjourné 2, 4, ou 6 heures sous hydrox 98/2 à 150 mètres le 26 novembre 83. Deux mesures de référence (ref.) ont été effectuées les 25 et 26 novembre, puis une mesure juste après la fin du séjour sous hydrox (après), et une mesure 6 heures après la sortie (6 h après).

PARAMETRE	A1		B1		B2	
	4h sous H2		6h sous H2		2h sous H2	
TCK (témoin/patient) (sec./sec.)	ref.	35/38,0	35/38,2	35/40,6	35/35,7	35/40,2
	ref.	35/38,0	35/40,6	35/44,5	35/43,2	35/39,2
	après	35/41,5	35/44,5	35/44,2	35/43,2	35/39,2
	6h après	35/45,1	35/44,2			
Taux Prothrom- BINE (%)	ref.	100	80	80	100	100
	ref.	100	80	80	100	100
	après	100	80	80	100	100
	6h après	95	78			
Fibrinémie (g/l)	ref.	5,0	3,2	4,5	5,5	5,7
	ref.	4,3	4,5	2,7	5,1	5,1
	après	3,5	2,7	2,4	4,8	4,8
	6h après	4,0	2,4			

TCK = temps de céphaline kaolin

TABLEAU 16 . BIOLOGIE SANGUINE AVANT ET APRES EXPOSITIONS SOUS HYDROX A 150 M .
Evolution des facteurs de la coagulation de 3 plongeurs ayant séjourné 2, 4, ou 6 heures sous hydrox 98/2 à 150 mètres le 26 novembre 83.
Deux mesures de référence (ref.) ont été effectuées les 25 et 26 novembre, puis une mesure juste après la fin du séjour sous hydrox (après), et une mesure 6 heures après la sortie (6h après).

PARAMETRE		A1	B1	B2
		4h sous H2	6h sous H2	2h sous H2
GLYCEMIE (g/l)	ref.	0,92	0,82	0,95
	ref.	1,02	0,92	1,02
	après	0,80	1,07	0,96
	6h après	0,77	0,99	1,06
AZOTEMIE (g/l)	ref.	0,42	0,44	0,49
	ref.	0,47	0,47	0,45
	après	0,40	0,41	0,45
	6h après	0,54	0,45	0,41
URICEMIE (mg/l)	ref.	53	55	46
	ref.	49	53	46
	après	48	45	39
	6h après	49	49	42
CREATININE (mg/l)	ref.	9	11	10
	ref.	12	13	11
	après	10	11	9
	6h après	10	11	9
TRIGLYCERIDES (g/l)	ref.	0,47	0,55	1,16
	ref.	0,96	0,74	2,10
	après	0,74	0,74	1,62
	6h après	0,92	1,24	1,23
CHOLESTEROL (g/l)	ref.	2,12	2,23	2,24
	ref.	2,26	2,26	2,26
	après	1,85	2,05	1,92
	6h après	1,85	1,90	1,89
SODIUM (meq/l)	ref.	141	141	141
	ref.	140	142	141
	après	144	145	151
	6h après	144	144	151

PARAMETRE		A1	B1	B2
		4h sous H2	6h sous H2	2h sous H2
POTASSIUM (meq/l)	ref.	4,0	3,9	4,2
	ref.	4,0	4,0	4,1
	après	3,9	4,9	4,9
	6h après	4,9	4,4	4,5
CHLORE (meq/l)	ref.	102	103	103
	ref.	105	106	106
	après	108	108	113
	6h après	109	108	112
RES. ALC. (meq/l)	ref.	26,5	27,0	26,0
	ref.	26,5	28,0	26,5
	après	23,0	22,5	21,5
	6h après	21,5	22,5	23,5
PROTIDES (g/l)	ref.	73	69	73
	ref.	72	73	74
	après	69	70	74
	6h après	72	65	69
CALCIUM (mg/l)	ref.	83	85	87
	ref.	90	88	92
	après	82	87	91
	6h après	88	91	91
PHOSPHORE (mg/l)	ref.	20	24	21
	ref.	26	22	25
	après	18	30	27
	6h après	23	33	28

RES. ALC. = réserve alcaline

TABLEAU 17 . BIOLOGIE SANGUINE AVANT ET APRES EXPOSITIONS SOUS HYDROX A 150 M .
Evolution de la biochimie sanguine de 3 plongeurs ayant séjourné
2, 4, ou 6 heures sous hydrox 98/2 à 150 mètres le 26 novembre 83.
Deux mesures de référence (ref.) ont été effectuées les 25 et 26
novembre, puis une mesure juste après la fin du séjour sous hydrox
(après), et une mesure 6 heures après la sortie (6h après).

PARAMETRE	A1			B1			B2		
	4h sous H2			6h sous H2			2h sous H2		
PHOSPHATASES	ref.	110		123		117			
ALCALINES	ref.	89		109		100			
(UI/l)	après	80		102		97			
	6h après	89		93		95			
S GOT	ref.	12		15		16			
(UI/l)	ref.	14		5		14			
	après	15		11		17			
	6h après	15		16		14			
S GPT	ref.	16		17		17			
(UI/l)	ref.	14		4		17			
	après	16		11		15			
	6h après	13		10		11			
LDH	ref.	183		169		200			
(UI/l)	ref.	208		147		220			
	après	222		174		218			
	6h après	196		174		165			
CPK	ref.	33		23		42			
(UI/l)	ref.	25		31		19			
	après	27		37		28			
	6h après	25		30		35			
γ GT	ref.	20		25		26			
(UI/l)	ref.	10		24		18			
	après	12		25		19			
	6h après	12		22		19			
AMYLASEMIE	ref.	71		85		60			
(UI/l)	ref.	59		83		81			
	après	51		65		75			
	6h après	55		80		75			
PHOSPHATASES	ref.	4,3		4,3		4,9			
ACIDES	ref.	3,7		4,6		4,1			
(UI/l)	après	3,2		3,7		3,2			
	6h après	3,5		3,7		4,2			

TABEAU 18 . BIOLOGIE SANGUINE AVANT ET APRES EXPOSITIONS SOUS HYDROX A 150 M.
 Evolution des enzymes sériques chez 3 plongeurs ayant séjourné 2, 4 ou 6 heures sous hydrox 98/2 à 150 mètres le 26 novembre 83. Deux mesures de référence (ref.) ont été effectuées les 25 et 26 novembre, puis une mesure juste après la fin du séjour sous hydrox (après), et une mesure 6 heures après la sortie (6h après).

PARAMETRE	A1	A2	A3	B1	B2	B3
<u>NUMERATION SANGUINE ET FORMULE LEUCOCYTAIRE</u>						
HEMATIES ($\cdot 10^6/\text{mm}^3$)	4,58	5,10	5,17	4,94	4,99	4,59
LEUCOCYTES (/mm ³)	6030	6060	8510	10500	6600	7790
HEMOGLOBINE (g/100g)	14,7	15,2	15,6	15,4	16,0	14,7
HEMATOCRITE (%)	40,6	43,7	43,9	43,6	44,1	40,9
VGM (μm^3)	88,6	85,6	85,0	88,2	88,4	89,1
CONC. GLOB. Hb ($\mu\mu\text{m}^3$)	32,0	29,8	30,1	31,2	32,0	31,9
TENEUR Hb (%)	36,1	34,8	35,4	35,4	36,2	35,8
PNa (%)	50,7	61,8	53,0	57,6	54,6	66,9
PNe (%)	3,7	4,8	1,9	9,2	3,5	1,5
PNb (%)	0,8	0,9	1,0	0,8	0,7	0,7
LYMPHOCYTES (%)	36,6	26,8	38,2	27,9	34,0	23,7
MONOCYTES (%)	8,2	5,7	5,9	4,5	7,2	7,2
PLAQUETTES ($\cdot 10^3/\text{mm}^3$)	290	150	235	200	250	302
VMP (μm^3)	8,5	7,7	7,6	7,6	8,7	8,6
<u>FACTEURS DE LA COAGULATION</u>						
TCK (témoin/patient; sec/sec)	35/36	35/33	35/36	35/35	35/35	35/33
TAUX PROTHROMBINE (%)	100	100	100	90	100	100
FIBRINEMIE (g/l)	3,6	3,9	4,0	3,8	4,9	4,7
<u>BIOCHIMIE SANGUINE</u>						
GLYCEMIE (g/l)	1,02	0,86	1,10	0,85	1,02	1,17
AZOTEMIE (g/l)	0,34	0,41	0,37	0,36	0,39	0,39
URICEMIE (mg/l)	49	48	39	54	51	60
CREATININE (mg/l)	10	9	10	11	11	12
TRIGLYCERIDES (g/l)	0,85	1,04	1,32	1,27	1,30	1,47
CHOLESTEROL (g/l)	1,92	1,67	1,81	2,13	2,06	2,17
SODIUM (meq/l)	139	143	140	141	140	141
POTASSIUM (meq/l)	4,2	3,8	3,9	4,0	4,3	4,1
CHLORE (meq/l)	102	102	101	102	103	103
RESERVE ALCALINE (meq/l)	26,5	29,0	28,0	29,0	27,5	28,0
PROTIDES (g/l)	68	71	71	71	68	73
CALCIUM (mg/l)	87	96	82	97	96	98
PHOSPHORE (mg/l)	18	22	26	26	22	21
<u>ENZYMES SERIQUES (UI/l à 30°C)</u>						
PHOSPHATASES ALCALINES	110	213	211	140	113	133
S GOT	17	12	13	14	12	15
S GPT	13	19	12	13	19	18
LDH	168	208	189	177	162	215
CPK	24	49	56	39	33	57
̳ GT	15	18	16	24	17	25
AMYLASEMIE	54	64	135	89	82	116
PHOSPHATASES ACIDES	4,2	4,6	4,1	6,2	4,5	5,3

TABLEAU 19 . BIOLOGIE SANGUINE APRES HYDRA IV.

Valeurs des paramètres sanguins observées chez les 6 plongeurs le jour de la sortie d'HYDRA IV, le 2 décembre 1983.

3 - SURVEILLANCE SCINTIGRAPHIQUE

Celle-ci a été effectuée par le CERB qui nous a aimablement fourni le compte-rendu. Les scintigraphies osseuses pré et post-plongée ont donné les résultats suivants :

	A V A N T	A P R E S
Plongeur remplaçant	R.A.S.	R.A.S.
A1	hyperfixation acromio-claviculaire gauche	hyperfixation acromio-claviculaire de même intensité qu'avant la plongée.
A2	hyperfixation pubienne	hyperfixation pubienne de même intensité
A3	R.A.S.	R.A.S.
B1	R.A.S.	R.A.S.
B2	hyperfixation du tarse gauche	augmentation de l'hyperfixation du tarse gauche (quantification en cours)
B3	hyperfixation du condyle externe droit de la hanche. Discrète hyperfixation du tarse gauche	hyperfixation du condyle externe droit. Hyperfixation du tarse droit (quantification en cours)

4 - SPIROMETRE AVANT ET APRES HYDRA IV

Les mesures de spirométrie ont aussi été réalisées par le CERB. Les résultats réunis dans le tableau 20 montrent :

- une diminution légère, de 3,3 % en moyenne, de la capacité vitale (CV) des 6 sujets
- aucune variation moyenne du volume expiratoire maximal seconde (VEMS)
- une augmentation de 8,3 % de la ventilation maximale minute (VMM) probablement due à l'apprentissage de la technique
- une diminution du débit expiratoire maximal moyen (DEMM) mais avec de larges variations interindividuelles
- aucune variation de la capacité pulmonaire de transfert de l'oxyde de carbone (TL CO).

PLONGEURS	CAPACITE VITALE (l)		VEMS (l)		VMM (l/min)		DEMM (l/s)		TL CO (ml/min.torr)	
	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après
A1	4,31	4,17 -3,3%	3,08	3,07 0,0%	146	137 -6,2%	2,27	1,38 -39,2%	17,5	26,5 +51,4%
A2	6,77	6,26 -7,5%	5,86	5,79 -1,3%	243	253 +4,1%	10,75	6,10 -43,3%	21,4	21,1 -1,4%
A3	5,57	5,65 +1,4%	4,73	4,90 +3,6%	258	275 +6,6%	5,26	5,65 +6,7%	26,2	28,0 +6,9%
B1	6,30	6,24 -1,0%	5,03	4,93 -2,0%	161	201 +24,7%	5,00	4,16 -16,9%	31,8	25,2 -20,8%
B2	4,74	4,21 -11,2%	3,74	3,52 -6,0%	179	192 +7,3%	3,78	3,30 -12,7%	26,4	22,2 -15,9%
B3	3,93	4,05 +3,0%	3,32	3,65 +9,9%	133	155 +16,5%	4,37	4,10 -6,2%	19,4	22,3 +15,0%
moyenne ± Sd	5,27 ±1,13	5,10 ±1,07	4,29 ±1,09	4,31 ±1,05	187 ± 52	202 ± 54	5,24 ±2,90	4,12 ±1,70	23,8 ± 5,3	24,2 ± 2,8
% variation		-3,3%		+0,3%		+8,3%		-21,5%		+1,8%

TABLEAU 20

IV - DISCUSSION

A - 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 senti 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 ?

B - 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 PH₂ 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 21 :

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 21 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 : PH_2 , 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 apparaît 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 psychodysléptiques, 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 psychodysléptiques 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.

C - 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 22 donne les valeurs des masses volumiques des mélanges gazeux respirés en immersion aux profondeurs de 120, 180, 240, 300 et 80 mètres.

Tableau 22 - (gaz humide - 37° C)

Prof. / GAZ	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 (cf figure 13). 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.

D - 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 psychodysléptique, tout comme l'azote, l'argon, le néon... et bien d'autres gaz dits inertes.

E - SPIROMETRIE ET SCINTIGRAPHIE PRE ET POST PLONGEE

Les bilans spirométriques et scintigraphiques n'ont montré aucune variation importante :

- Les paramètres ventilatoires n'ont pas été significativement modifiés par la plongée (CV, VEMS, VMM, TICO, DEMM).
- A la scintigraphie, deux sujets présentaient une hyperfixation localisée supérieure à celle relevée avant la plongée. Les sites étaient la cheville gauche pour B2, sans douleur, et le tarse gauche de B3, avec douleur au pied gauche pendant presque tout le séjour entre 120 et 300 mètres.

V - RESULTATS ET COMMENTAIRES

DES EQUIPES COOPERANTES

Les résultats rapportés ci-dessous par les différentes équipes ayant participé à HYDRA IV feront l'objet ultérieurement de publications détaillées.

A - ETUDE NEUROPHYSIOLOGIQUE

1 - VARIABLES PHYSIOLOGIQUES ETUDIEES

Pour cette plongée seul l'EEG de veille a été étudié. Des tests ont été réalisés pendant la compression au cours des différents paliers pendant lesquels les plongeurs respiraient le mélange hydrox. Ces tests ont donc été effectués à 120, 180 et 240 mètres avec un mélange composé de 2 % d'oxygène et de 98 % d'hydrogène ; à 300 mètres le mélange était différent : 24 % d'hélium, 74 % d'hydrogène et 2 % d'oxygène. Au cours de la plongée à 300 mètres, nous avons également enregistré le tremblement des plongeurs.

Pendant la décompression, il y a eu un arrêt à 150 mètres pendant lequel trois plongeurs ont effectué des séjours de longue durée sous la coupole pour respirer le mélange hydrox pendant 2, 4 et 6 heures ; l'EEG des sujets a été enregistré pendant ces séjours.

2 - METHODES D'ENREGISTREMENT

Pour cette expérience, nous avons utilisé un nouveau type d'électrodes ; il s'agit de clips qui permettaient aux plongeurs de se poser facilement entre eux les électrodes lorsqu'ils effectuaient une plongée. L'avantage de cette méthode était de permettre aux plongeurs de ne pas garder les électrodes sur la tête nuit et jour ; en fait, le système n'a pas permis une étude complète de l'EEG en cours de plongée.

Des tests de référence EEG ont été effectués en mélange He - O₂ avant l'exposition à l'hydrox (sauf à 150 mètres), puis nous avons refait un test en fin de séjour en H₂ - O₂, c'est-à-dire après 20 minutes d'exposition.

3 - RESULTATS

a - 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 H₂ - O₂ par rapport au mélange He - O₂ (fig. 1 et 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 (fig. 3).

Au cours de la respiration du mélange H₂ - O₂ à 150 mètres, nous n'avons pas eu de variation des activités EEG, que le séjour soit de 2, 4 ou 6 heures (fig. 3). Cependant à 150 mètres, nous n'avons pas de dérivation postérieure pour deux sujets, ce qui pourrait expliquer l'absence de modification.

b - 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 H₂ - O₂. Chez les autres sujets, nous n'avons pas de modification significative (fig. 4).

4 - 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.

HYDRA IV - 240M ALPHA - Tm.O

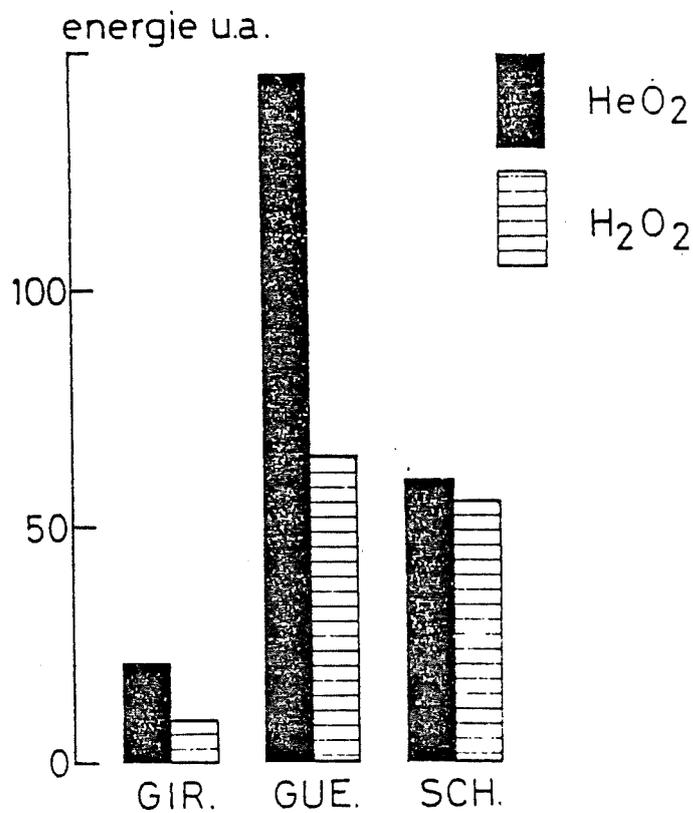


FIGURE 1 : Evolution de la puissance de l'alpha sur la dérivation temporelle moyenne-occipitale de 3 sujets à 240 mètres. En bargraphe noir, la puissance en mélange He-O₂ ; en bargraphe hachuré, la puissance en mélange H₂-O₂. En ordonnée, l'énergie de la bande de fréquence exprimée en unités arbitraires.

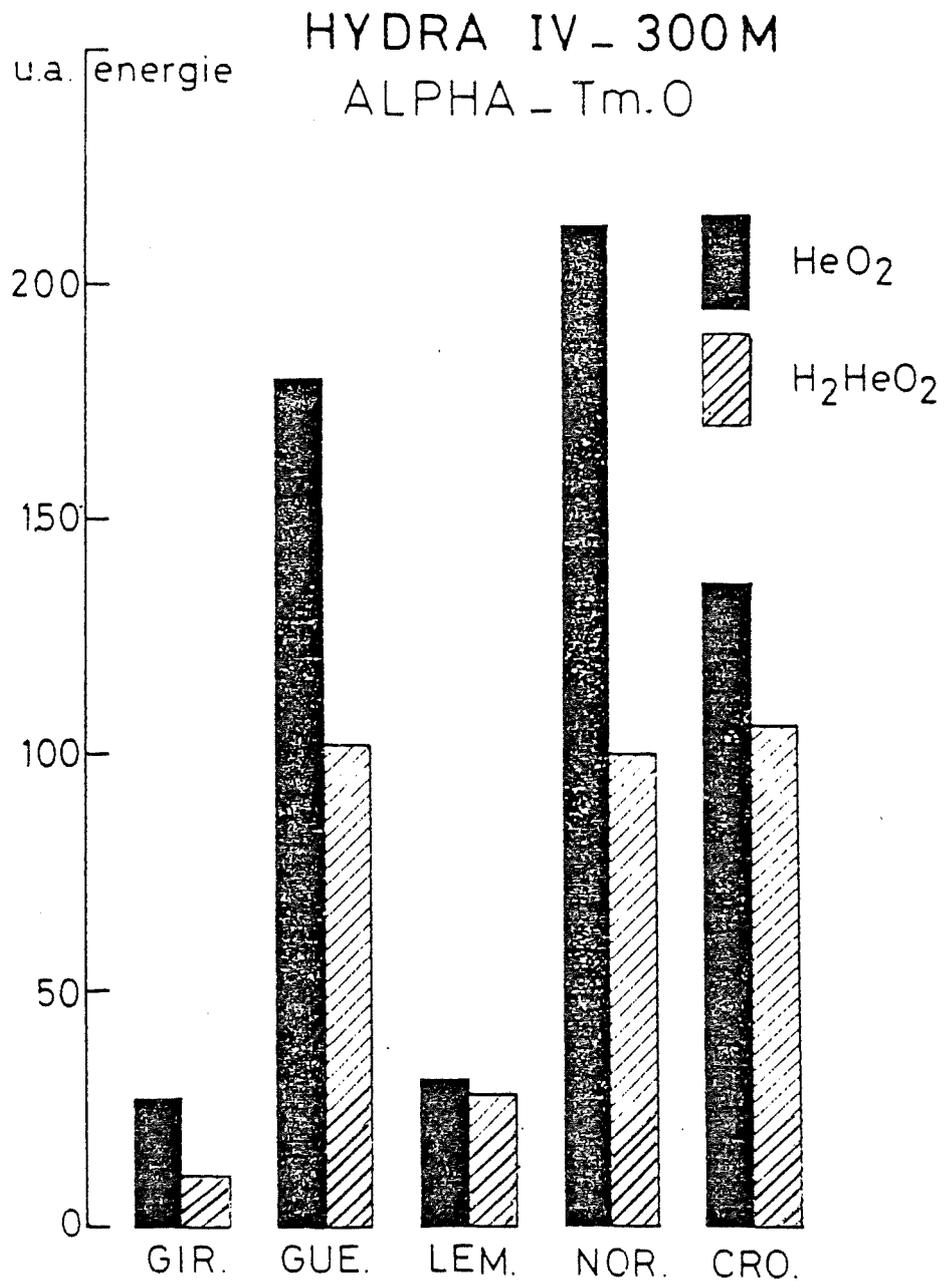


FIGURE 2 : Evolution de la puissance de l'alpha sur la dérivation temporelle moyenne-occipitale de 5 sujets à 300 mètres. Même légende que la figure 1.

HYDRA IV

YF. Fp_C.

SU: GIR.

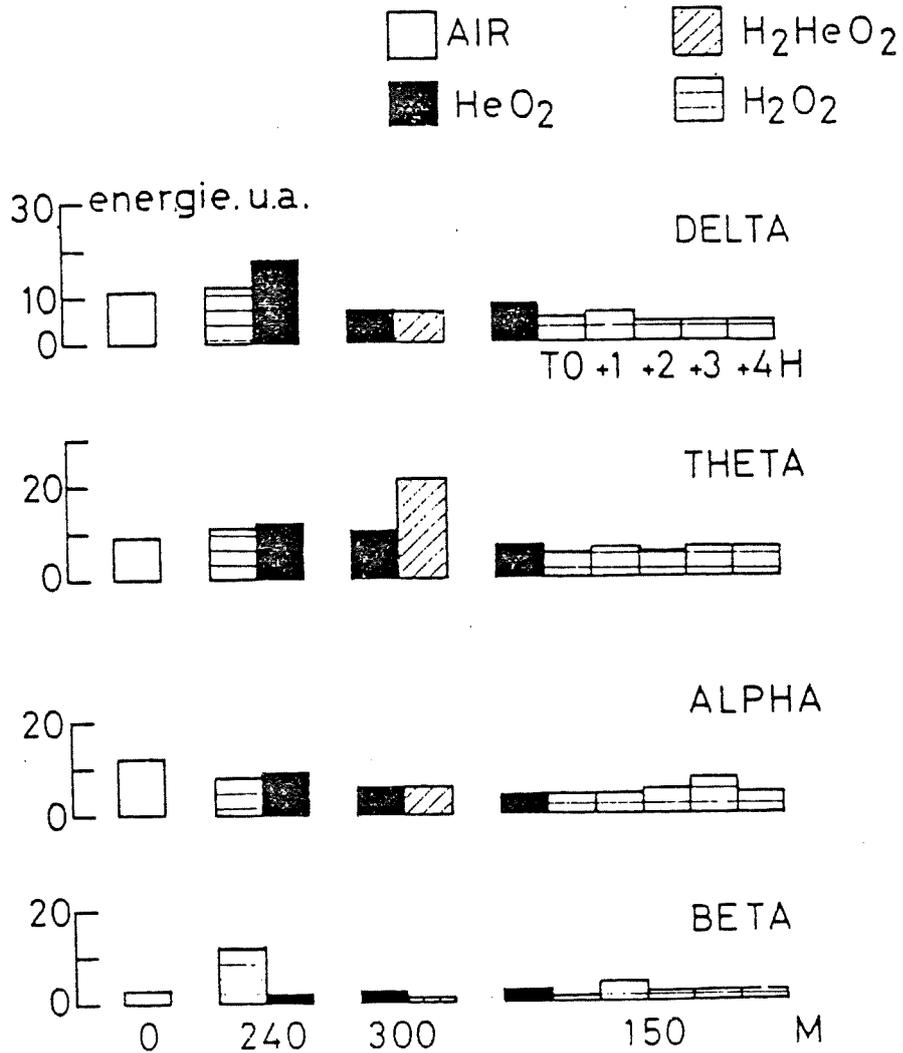


FIGURE 3 : Evolution de la puissance des activités EEG dans les différentes bandes de fréquences considérées à diverses profondeurs sur la dérivation fronto polaire-centrale d'un sujet.

HYDRA IV - TREMBLEMENT - 300M

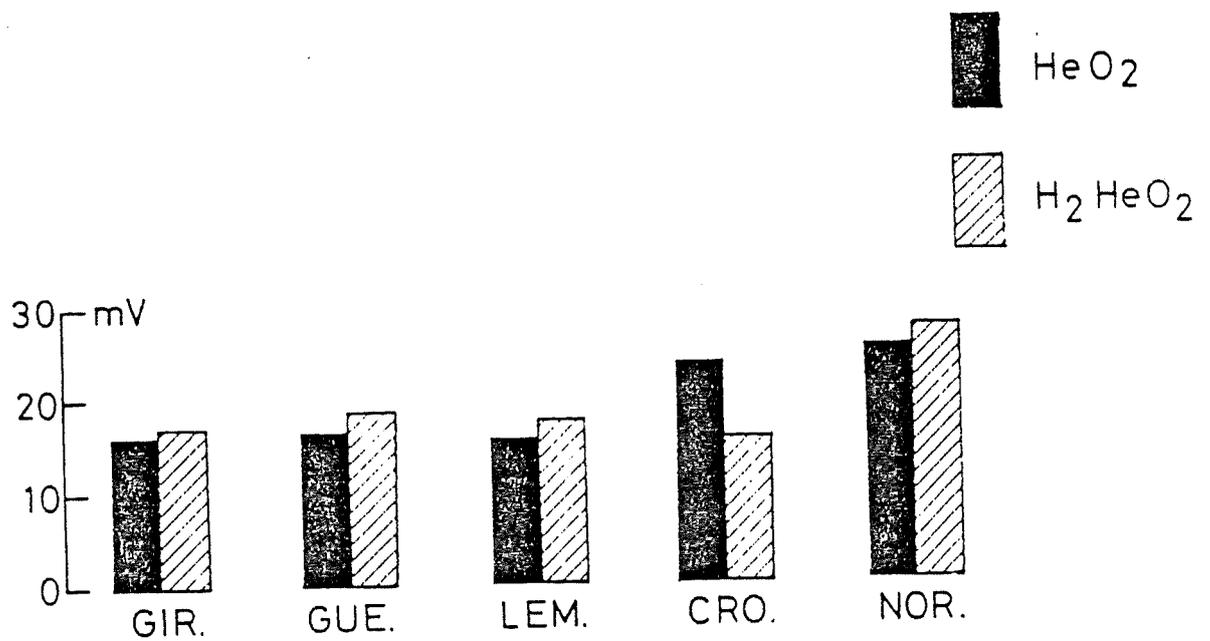


FIGURE 4 : Comparaison de l'amplitude du tremblement avec le mélange He-O₂ ET H₂-He-O₂ à 300 mètres chez 5 sujets.

B - FONCTION RESPIRATOIRE ET EXERCICE MUSCULAIRE EN PLONGEE A L'HYDROGENE

OU A L'HELIUM : UNE APPROCHE COMPAREE

INTRODUCTION

METHODES

- Sujets
- Mélanges respiratoires
- Techniques
 - . mesure du volume minute
 - . mesure de la consommation d'oxygène
 - . mesure de la pression buccale
- Protocoles
- Plan d'expérience

RESULTATS

- Données subjectives
- Performances au cours de l'expérience
 - . exercice à 180 m
 - . exercice à 240 m
 - . exercice à 300 m
- Effet dépresseur respiratoire de l'hydrogène
- Analyse du barogramme buccal

DISCUSSION

- Amélioration ventilatoire
- Pouvoir narcotique
- Effet thermique
- Hypoventilation relative
- La question de l'appareil de plongée

CONCLUSION

INTRODUCTION

Il est bien connu que la masse volumique élevée des mélanges inspirés est un facteur qui limite les échanges respiratoires en plongée, de façon particulièrement sensible au cours de l'exercice musculaire. Ceci conduit à rechercher le mélange respiratoire le plus léger possible pour les plongées profondes ; le but des mesures effectuées dans HYDRA IV est de tester le mélange le plus léger que l'on puisse proposer : l'hydrogène-oxygène.

METHODES

Le principe de l'expérience consiste à comparer les performances au cours d'exercices musculaires effectués dans l'eau, suivant que les plongeurs respirent un mélange classique à base d'hélium ou un mélange léger à base d'hydrogène. On notera que les mesures sont conduites dans des conditions réalistes, les sujets portant un équipement standard de plongée professionnelle.

Sujets

Les sujets, six hommes de 27 à 45 ans, sont tous excellents plongeurs, mais ils ont des expériences inégales de la plongée professionnelle. Le tableau 1 donne quelques unes de leurs caractéristiques, d'après des mesures effectuées 72 h avant la plongée, communiquées par le CERB (R. Hyacinthe).

Mélanges respiratoires

Quatre mélanges, de même composition en oxygène (2 %), mais de compositions en gaz neutre différentes, sont utilisés :

- A 180, 240 et 300 m : un mélange binaire hélium-oxygène (héliox)
- A 180 et 240 m : un mélange binaire hydrogène-oxygène (hydrox)
- A 300 m : deux ternaires légers différents (hydrogène-hélium-oxygène) :
 - l'un de fraction nominale en hélium 24 %
 - l'autre de fraction nominale en hélium 39 %

Le tableau 2 donne les caractéristiques détaillées de ces mélanges.

Tableau 1 : CARACTERISTIQUES DES SUJETS

Age, taille et masse corporelle (H et B), capacité vitale (CV), volume expiré maximal par seconde (VEMS), ventilation volontaire maximale (VVM).

	AGE	H	B	CV	VEMS	VVM
	an	cm	kg	l BTPS	$\frac{l \text{ BTPS}}{s}$	$\frac{l \text{ BTPS}}{\text{min}}$
<u>GROUPE A</u>						
MG	45	168	63	4.3	3.1	146
JLM	37	173	75	5.6	4.7	258
GG	27	189	76	6.8	5.9	243
<u>GROUPE B</u>						
LS	32	176	72	6.3	5.0	161
MC	37	164	72	3.9	3.3	133
GN	40	175	82	4.7	3.7	179

Résultats communiqués par le CERB (Hôpital Sainte-Anne, Toulon)

Tableau 2 : MELANGES RESPIRATOIRES "FOND"

A) Pour plongées à 180 m :

	HELIOX	HYDROX
Fraction d'oxygène ()	0.0210	0.0200
Fraction d'hélium ()	0.9790	0.0000
Fraction d'hydrogène ()	0.0000	0.9800
Masse moléculaire moyenne gaz sec (g/mol)	4.588	2.600
Facteur de compressibilité à 37 °C ()	1.008	1.011
Coefficient de capacitance (mol/l.bar)	0.0385	0.0384
Concentration molaire à 37°C (mol/l)	0.732	0.730
Masse volumique du gaz à 37°C (g/l)	3.358	1.897
Masse volumique du gaz humide à 37 °C (g/l)	3.40	1.96
Pression d'oxygène inspiré (mbar)	400	380
Pression d'hydrogène inspiré (bar)	0.0	18.6

(Voir notes page suivante)

Tableau 2 (suite)

B) Pour plongées à 240 m :

		HELIOX	HYDROX
Fraction d'oxygène	()	0.0205	0.0200
Fraction d'hélium	()	0.9795	0.0000
Fraction d'hydrogène	()	0.0000	0.9800
Masse moléculaire moyenne gaz sec	(g/mol)	4.574	2.600
Facteur de compressibilité à 37 °C	()	1.011	1.015
Coefficient de capacitance	(mol/l.bar)	0.0384	0.0382
Concentration molaire à 37°C	(mol/l)	0.960	0.955
Masse volumique du gaz à 37°C	(g/l)	4.391	2.483
Masse volumique du gaz humide à 37 °C	(g/l)	4.43	2.52
Pression d'oxygène inspiré	(mbar)	510	500
Pression d'hydrogène inspiré	(bar)	0.0	23.5

C) Pour plongées à 300 m :

		HELIOX	MELANGES TERNAIRES	
			<u>a</u>	<u>b</u>
Fraction d'oxygène	()	0.0195	0.0195	0.2000
Fraction d'hélium	()	0.9805	0.2355	0.3620
Fraction d'hydrogène	()	0.0000	0.7450	0.6180
Masse moléculaire moyenne gaz sec	(g/mol)	4.546	3.058	3.324
Facteur de compressibilité à 37 °C	()	1.014	1.017	1.016
Coefficient de capacitance	(mol/l.bar)	0.0383	0.0381	0.0382
Concentration molaire à 37°C	(mol/l)	1.187	1.183	1.184
Masse volumique du gaz à 37°C	(g/l)	5.396	3.618	3.936
Masse volumique du gaz humide à 37 °C	(g/l)	5.43	3.66	3.97
Pression d'oxygène inspiré	(mbar)	605	605	620
Pression d'hydrogène inspiré	(bar)	0.0	23.1	19.2

Notes :

- Les mélanges "fond" sont analysés par chromatographie en phase gazeuse,
- La masse moléculaire moyenne est calculée à partir des masses moléculaires des constituants (en g/mol, O₂ = 31.999, He = 4.003 et H = 2.016),

- Les facteurs de compressibilité sont interpolés des tables de l'Encyclopédie des Gaz de l'Air Liquide ; pour les mélanges ternaires, il s'agit d'approximations,
- La masse volumique du gaz humide à 37°C, correspond aux conditions BTPS (voir ci-dessous) ; c'est elle qui doit être prise en considération,
- La pression d'hydrogène dans le mélange ternaire a est voisine de celle de l'hydrox à 240 m ; dans le mélange b elle est voisine de celle de l'hydrox à 180 m.

Techniques

Les plongeurs utilisent un équipement professionnel et pour des raisons de sécurité et de réalisme, seules des modifications mineures de cet équipement sont possibles. Cette situation complique singulièrement la saisie des données. Le choix des techniques est guidé par le souci de gêner le moins possible les plongeurs en tirant profit des dispositifs mis en place, en particulier du système de récupération des gaz expirés qui est utilisé comme respiromètre. Trois variables peuvent être mesurées à l'aide de techniques non-invasives, simples et fiables :

- le volume de gaz expiré ;
- la consommation d'oxygène ;
- la pression à l'entrée des voies respiratoires.

Volume de gaz expiré par minute (volume minute) : \dot{V}_E

Le dôme transparent qui communique librement avec l'eau sert à récupérer les gaz expirés sans fuite mesurable. Le niveau d'eau dans le dôme descend au fur et à mesure que le plongeur rejette le gaz. La variation de niveau est lue sur un réglèt vertical ; elle est également enregistrée par un capteur qui mesure la différence de pression hydrostatique entre l'intérieur et l'extérieur du dôme. Le volume minute est à exprimer à la pression et à la température des poumons (conditions BTPS)¹. Une correction est faite pour la différence de pression hydrostatique (100 à 150 mbar) et de température (6 à 8°C) entre les poumons du plongeur et le dôme. Pour fixer les idées, la section du dôme étant de 0.787 m² dans sa partie cylindrique, un volume minute de 16 l/min engendre une variation de niveau de l'ordre de 20 mm/min. La précision de la lecture étant de 1 mm, l'incertitude relative est de l'ordre de 5 %.

Mesure de la consommation d'oxygène : \dot{V}_{O_2}

Une petite partie des gaz expirés s'échappe par le bord du masque facial, mais est récupérée dans le dôme. La plus grande partie est collectée par un tube branché sur l'orifice expirateur de l'appareil respiratoire et est déversée dans le dôme à travers un boîtier fixé dans sa partie supérieure. Ce boîtier contient une cellule galvanométrique de mesure de l'oxygène (Sedam). De plus, un orifice voisin permet de prélever le gaz pour le passer dans un circuit d'analyse en détendu qui comporte une autre cellule galvanométrique et un analyseur magnéto-dynamique d'oxygène (Servomex). La cellule du dôme est calibrée en fonction de l'analyse en détendu et sert ensuite à la mesure parce qu'elle répond rapidement aux variations du contenu en oxygène des gaz expirés. Soit ΔP_{O_2} la différence de pression calculée entre le gaz inspiré (connu) et le gaz expiré. La consommation d'oxygène est :

$$\dot{M}_{O_2} = \dot{V} \frac{1}{ZRT} \Delta P_{O_2} \quad (\text{en millimole/minute})$$

Où $1/ZRT$ représente le coefficient de capacitance du gaz (Z est le facteur de compressibilité, R la constante des gaz parfaits, 0.0083 Joule/mmol. $^{\circ}K$, et T la température absolue, 310 $^{\circ}K$ si \dot{V} est exprimé dans les conditions BTPS : 37 $^{\circ}C$).

On a l'habitude d'exprimer la consommation d'oxygène en volume gazeux à $0^{\circ}C$ et sous une pression d'une atmosphère (conditions STPD)². La conversion est facile : 1 millimole d'oxygène occupe à $0^{\circ}C$ et sous une pression 760 Torr, un volume de 22.39 ml (STPD). Son symbole est alors \dot{V}_{O_2} .

Si on admet que l'incertitude relative sur l'évaluation de ΔP_{O_2} est de l'ordre de 5 %, la consommation d'oxygène est calculée avec une incertitude de 10 %.

Notes : 1 BTPS pour "at body temperature and pressure, saturated"

2 STPD pour "at standart temperature and pressure, deshydrated"

Mesure de la pression à l'entrée des voies respiratoires

Un capteur de pression fixé à l'intérieur du masque facial, au niveau du front, est relié par un tube rigide à un orifice de prise de pression dans le groin de l'appareil respiratoire. Le barogramme enregistré présente pour chaque cycle ventilatoire deux ondes de pression : une onde négative qui accompagne l'inspiration, une onde positive qui accompagne l'expiration. Cette mesure présente un double intérêt :

- elle permet de connaître la fréquence ventilatoire,
- elle donne des indications directes sur les efforts ventilatoires qui accompagnent l'inspiration et l'expiration.

Protocoles

Les mesures sont toujours conduites dans le même ordre : héliox, suivi du mélange léger. L'exercice est effectué sur un ergomètre à bras, fixé à la verticale du dôme, 1,20 m sous la surface de l'eau (voir fig. 1).

La charge suspendue à l'ergomètre est de 15 ou 21 kg, mais le rythme des mouvements demandé (15 tractions par minute) et leur amplitude (0,45 m) sont toujours les mêmes.

Dès le début de la plongée, le sujet s'installe en position de travail et les différents temps expérimentaux se succèdent ainsi :

- 7 minutes de relaxation et de repos,
- 3 ou 7 minutes de travail musculaire,
- 5 minutes de repos (récupération),
- le plongeur quitte l'ergomètre et effectue d'autres tests sous héliox (puzzle "Janus"),
- retour à l'ergomètre et passage au mélange léger (hydrox ou ternaire),
- 10 minutes d'imprégnation à l'hydrogène et de repos,
- 3 ou 7 minutes de travail musculaire,
- 5 minutes de repos et fin des mesures respiratoires.

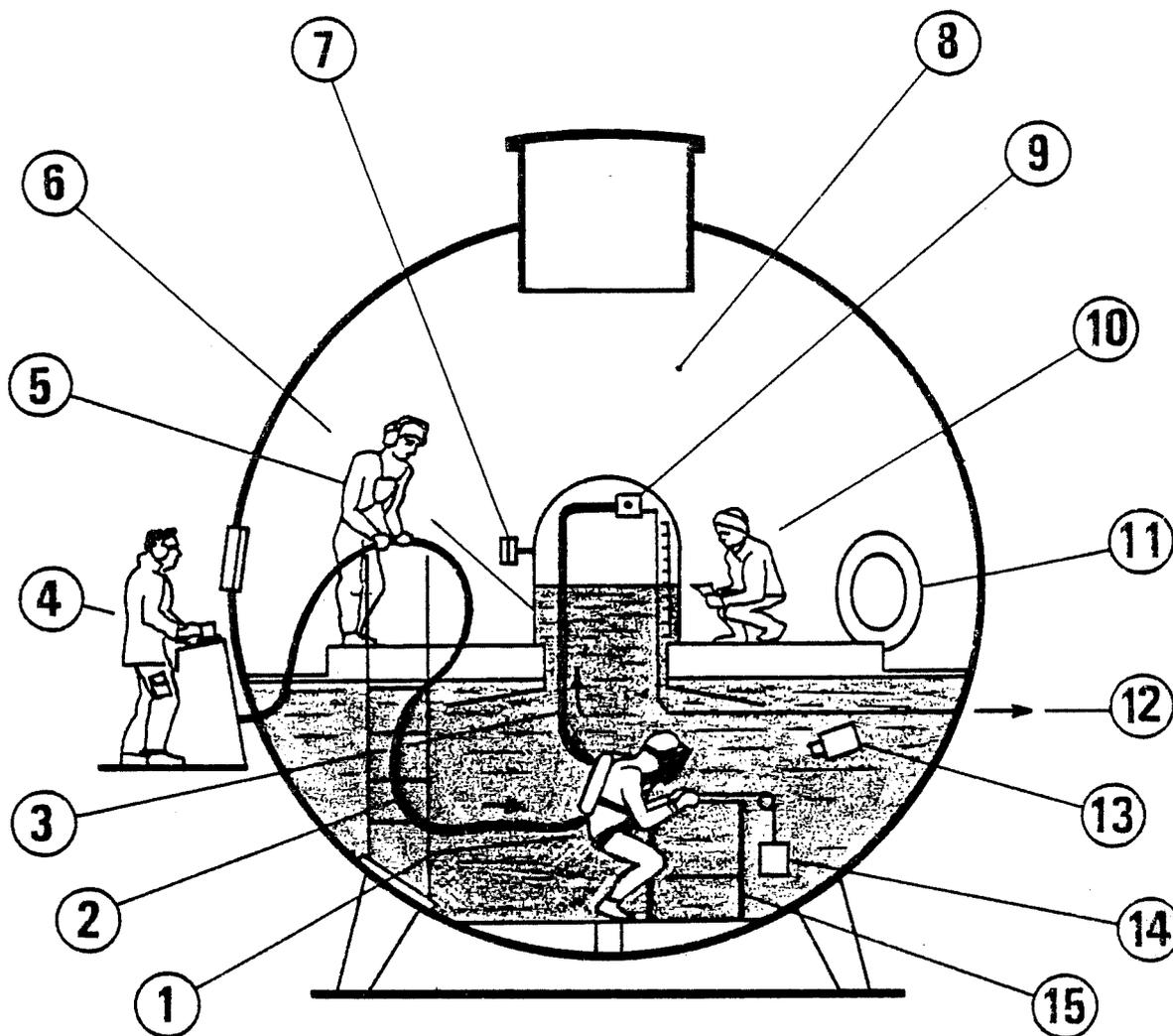


Fig.1 : Dispositif utilisé pour les mesures respiratoires.

Les mesures sont effectuées dans une chambre hyperbare sphérique de 5 m de diamètre (hydrosphère), dont la partie inférieure est remplie d'eau douce à 30°C. Le dôme fixé au plancher sert de respiromètre.

1. Sujet, revêtu d'un équipement professionnel de plongée ; 2. Ligne d'alimentation en gaz, communication en phonie, signaux physiologiques ; 3. Ligne collectant le gaz expiré ; 4. Chef de plongée ; 5. Plongeur de sécurité ; 6. Dôme transparent ; 7. Capteur de pression différentielle ; 8. Atmosphère comprimée oxygène-hélium (pression d'oxygène 380 mbar) ; 9. Boîtier contenant un capteur de température, une cellule de mesure d'oxygène et le départ de la ligne d'analyse en gaz détendu ; 10. Plongeur assistant (il contrôle la hauteur d'eau dans le dôme pour la calibration du capteur 7) ; 11. Porte de communication vers les caissons "vie" où se trouvent 3 autres plongeurs en "stand-by" ; 12. Ligne de sortie de gaz vers le circuit analyse ou la purge à l'atmosphère libre ; 13. Caméra de surveillance ; 14. Charge variable de l'ergomètre ; 15. Ergomètre à bras fixé dans la partie basse.

Plan d'expérience

Tableau 3

Date	Profondeur	Mélanges	Exercice	Groupe A	Groupe B
J1 ¹	180 m	héliox, hydrox	7 min, 21 kg ²		LS, MC, GN
J2	180 m	héliox, hydrox	7 min, 21 kg	MG, JLM, GG	
J3	240 m	héliox, hydrox	3 min, 15 kg		LS, MC, GN
J4	240 m	héliox, hydrox	3 min, 15 kg	MG, JLM, GG ³	
J5	300 m	héliox, tern a	3 min, 15 kg		LS, MC
J6	300 m	héliox, tern a	3 min, 15 kg	MG	LS
J7	300 m	héliox, tern b	7 min, 21 kg	MG	LS

Notes : 1 J1 = mardi 15 novembre 1983
2 25 kg pour LS
3 pas d'exercice sous hydrox pour GG.

RESULTATS

Données subjectives :

Les phénomènes subjectifs ressentis par les plongeurs au cours des exercices en immersion, sont principalement les trois suivants :

- a) Une respiration sensiblement plus facile avec le mélange léger (hydrox ou ternaire) qu'avec l'héliox, ce qui facilite l'exercice musculaire,
- b) Une narcose sous hydrox, à peine ressentie à 180 m, mais accentuée voire sévère à 240 m ; elle tend à se dissiper avec l'exercice musculaire,
- c) Un plus grand confort thermique sous hydrox que sous héliox (dissipation de la sensation de froid dans l'eau ressentie sous héliox, impression agréable d'inhaler un gaz chaud).

Performances respiratoires au cours de l'exercice musculaire

Les résultats obtenus à chaque profondeur doivent être analysés séparément, parce que l'intensité et la durée de l'exercice et l'importance des phénomènes de narcose varient avec elle. Pour éviter toute confusion, il faut souligner que, suivant les circonstances, les plongeurs ont ou n'ont pas suivi le rythme demandé pour l'exercice (15 tractions / minute). Le lecteur doit garder présent à l'esprit que les variations observées de la consommation d'oxygène ne correspondent pas à des variations du coût d'un exercice musculaire imposé, mais à des variations de la dépense d'énergie fournie par les plongeurs en réponse à un exercice demandé.

- EXERCICE A 180 METRES -

D'une manière générale, le rythme demandé est respecté.

Les valeurs mesurées de minute en minute avant, pendant et après l'exercice (21 kg, 7 min) sont présentées graphiquement, en valeurs moyennes pour les 6 sujets ; la figure 2 donne \dot{V}_E moyen, la figure 3, \dot{V}_{O_2} moyen. Ce traitement permet d'indiquer grossièrement les tendances générales :

- au repos, \dot{V}_E et \dot{V}_{O_2} ne sont pas différents sous héliox et sous hydrox,
- au cours des premières minutes d'exercice, \dot{V}_E et \dot{V}_{O_2} augmentent progressivement et de façon sensiblement identique sous héliox et sous hydrox,
- au cours des dernières minutes de l'exercice, \dot{V}_E et \dot{V}_{O_2} atteignent une sorte de plateau dans le cas de l'héliox, alors qu'on observe des valeurs supérieures dans le cas de l'hydrox,
- après l'exercice \dot{V}_E et \dot{V}_{O_2} diminuent lentement et tendent à retrouver leurs valeurs initiales après 5 minutes de repos.

En résumé, la différence essentielle porte sur les dernières minutes de l'exercice. Si on compare les 3 dernières minutes de repos avant l'exercice aux 3 dernières minutes d'exercice, en termes d'accroissement de la ventilation pulmonaire et de la consommation d'oxygène, on obtient les résultats rassemblés dans le tableau 4.

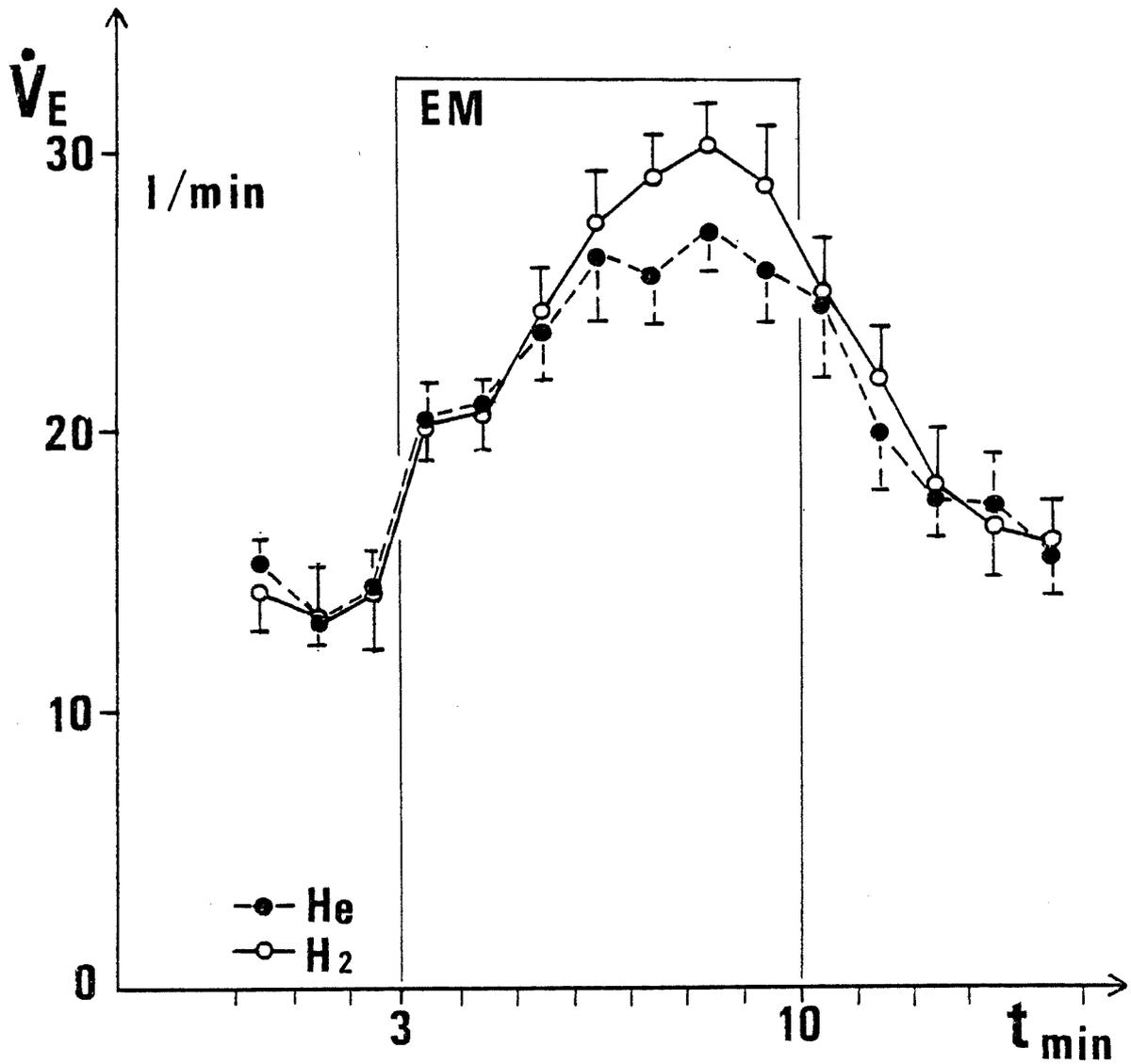


Fig. 2 : Ventilation minute au cours des exercices à 180 m

Valeurs moyennes et erreurs standards calculées de minute en minute pour les 6 sujets. On observe des valeurs significativement plus grandes en fin d'exercice sous hydrox ($p < 0.05$).

EM : période d'exercice musculaire (7 minutes, charge : 21 kg)
 \dot{V} : volume minute en unités BTPS ; t : temps.

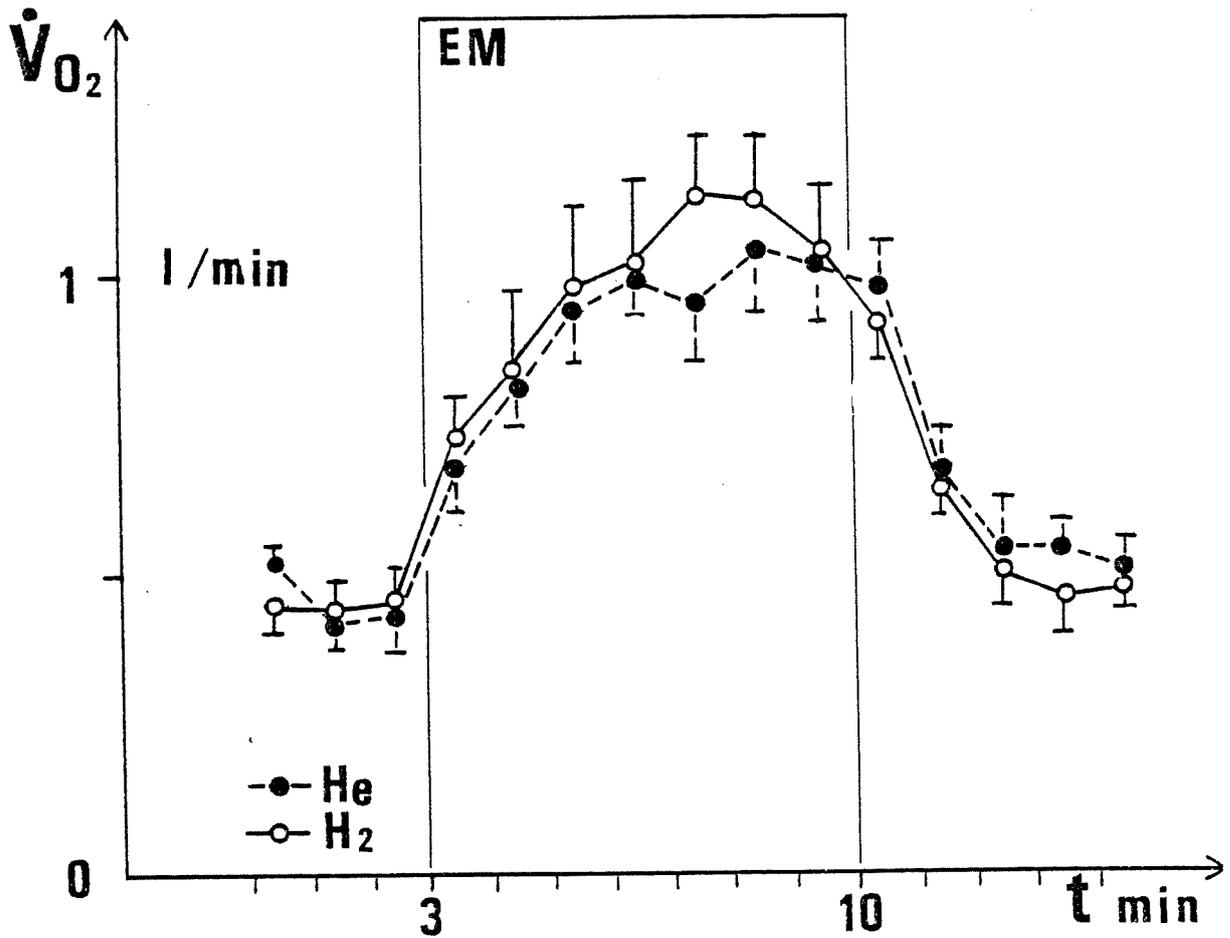


Fig. 3 : Consommation d'oxygène au cours des exercices à 180 m

Valeurs moyennes et erreurs standards calculées de minute en minute pour les 6 sujets. Les valeurs moyennes sont légèrement plus élevées en fin d'exercice sous hydrox mais la différence n'est pas significative.

EM : période d'exercice musculaire (7 minutes, charge 21 kg)
 $\dot{V}O_2$: consommation d'oxygène en unités STPD ; t : temps.

Tableau 4 : REPONSES RESPIRATOIRES A L'EXERCICE A 180 M

Valeurs moyennes et écarts types des valeurs mesurées pendant les 3 dernières minutes de repos et les 3 dernières minutes d'exercice (21 kg, 7 minutes), pour l'ensemble des sujets (n = 6).

	\dot{V}_E (l BTPS/min)			\dot{V}_{O_2} (l STPD/min)		
	repos	EM	$\Delta\dot{V}_E$	repos	EM	$\Delta\dot{V}_{O_2}$
a) héliox	14.3 ±1.6	26.3 ±2.9	12.8 ±2.3	0.46 ±0.07	1.00 ±0.16	0.54 ±0.21
b) hydrox	14.0 ±3.2	29.6 ±2.4	15.6 ±2.0	0.44 ±0.09	1.09 ±0.21	0.65 ±0.25
ratio b/a	0.98	1.13	1.22	0.96	1.09	1.20
p (1)	ns	<.05	<.05	ns	ns	ns

(1) test t apparié de Wilcoxon.

Un autre point mérite l'attention : les variations de la différence de pression d'oxygène entre le gaz inspiré et le gaz expiré (ΔP_{O_2}). Ces variations reflètent celles de l'équivalent ventilatoire de l'oxygène (ER_{O_2}), ou "ventilation spécifique", c'est à dire le volume de gaz ventilé pour extraire dans les poumons une quantité d'oxygène donnée : V_E/V_{O_2} .

On observe, sous hydrox comme sous héliox, une augmentation de ΔP_{O_2} , ce qui signifie une diminution de ER_{O_2} . A 180 m, ces variations ne sont pas significatives, mais elles indiquent une tendance confirmée par les mesures à plus grande profondeur.

- EXERCICE A 240 METRES -

Le rythme demandé (15 tractions/minute) est sensiblement respecté sous héliox. Par contre, il ne l'est que de façon très imparfaite sous hydrox, les plongeurs ayant en général un rythme trop lent, surtout en début d'exercice. Les sujets sont gênés par la narcose, et l'exercice est supprimé pour l'un d'eux (voir § 3.), les comparaisons portent sur 5 sujets.

Comme à 180 m, les valeurs mesurées avant, pendant et après l'exercice (15 kg, 3 min) sont présentées graphiquement, en valeurs moyennes de minute en minute pour l'ensemble des sujets ; la figure 4 donne \dot{V}_E moyen, la figure 5 donne \dot{V}_{O_2} moyen. Ce mode de représentation indique globalement les tendances :

- au repos, \dot{V}_E et \dot{V}_{O_2} ne sont pas significativement différents sous héliox et hydrox,
- au cours de l'exercice, l'accroissement de \dot{V}_E est faible, sous hydrox comme sous héliox ; celui de \dot{V}_{O_2} est plus net, mais est moins rapide au début dans le cas de l'hydrox,
- après l'exercice, la diminution de \dot{V}_{O_2} suit le même décours pour les deux mélanges, mais celle de \dot{V}_E est plus lente sous hydrox.

L'absence de "phase stationnaire", semblable aux dernières minutes de l'exercice de longue durée à 180 m, rend délicate la comparaison des performances. On peut cependant calculer la quantité supplémentaire d'oxygène consommé (ΔV_{O_2} global) au cours des 3 minutes d'exercice et des 5 minutes qui suivent, pendant lesquelles le plongeur paie sa "dette d'oxygène". Cette grandeur correspond à la surface du pic de la courbe $\dot{V}_{O_2} = f(t)$ de la figure précédente.

Chez tous les plongeurs, ΔV_{O_2} global à 240 m est plus faible en hydrox qu'en héliox. Les valeurs moyennes et écarts types sont les suivants :

ΔV_{O_2} global	a) Hydrox	b) Héliox	Ratio a/b	p	n
1 STPD O_2	1.55 \pm 0.58	2.43 \pm 0.67	0.64 \pm 0.20	<0.05	5

Les modifications respiratoires doivent être examinées aussi en terme de ventilation spécifique (ER_{O_2}). La figure 6 représente la différence de pression entre le gaz inspiré et le gaz expiré (ΔP_{O_2}) et ER_{O_2} , en valeurs moyennes pour les 5 sujets, de minute en minute.

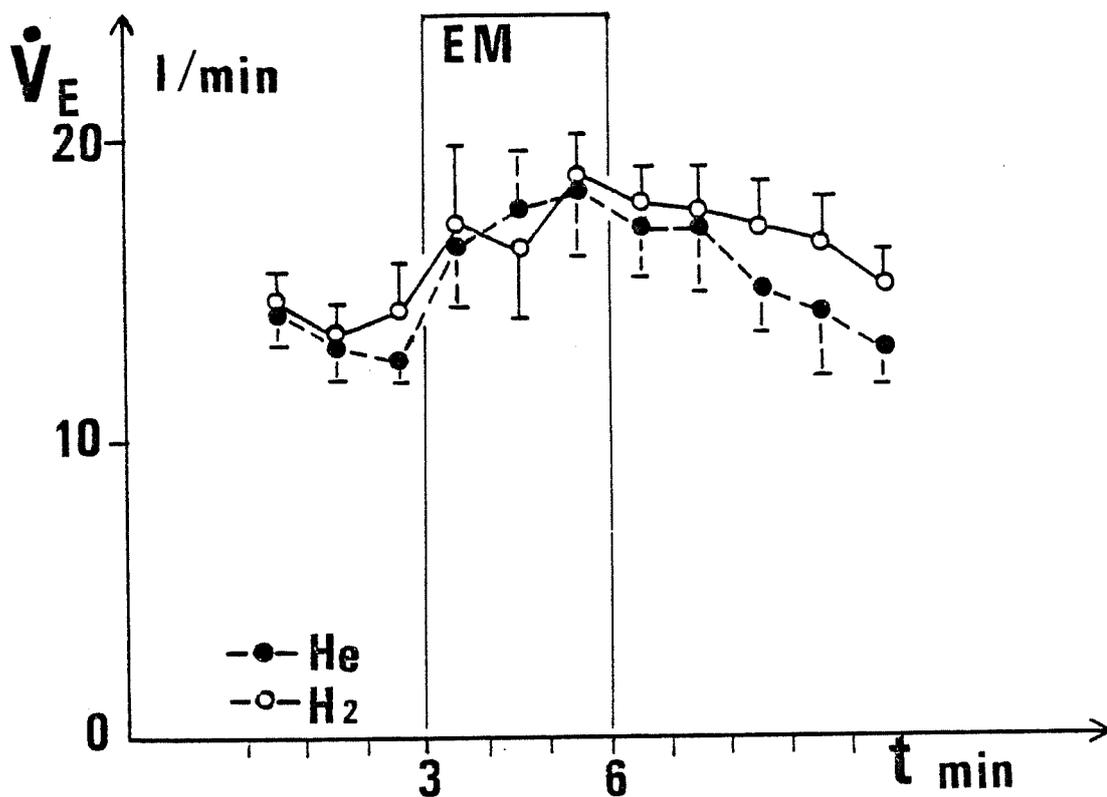


Fig. 4 : Ventilation pulmonaire au cours des exercices à 240 m

Valeurs moyennes et erreurs standards calculées de minute en minute pour 5 sujets (MG, JLM, LS, MC, GN). L'accroissement de la ventilation est modéré, les différences entre héliox et hydrox ne sont pas significatives.

EM : période d'exercice musculaire (3 minutes, charge 15 kg)
 \dot{V}_E : volume minute en unités BTPS ; t : temps.

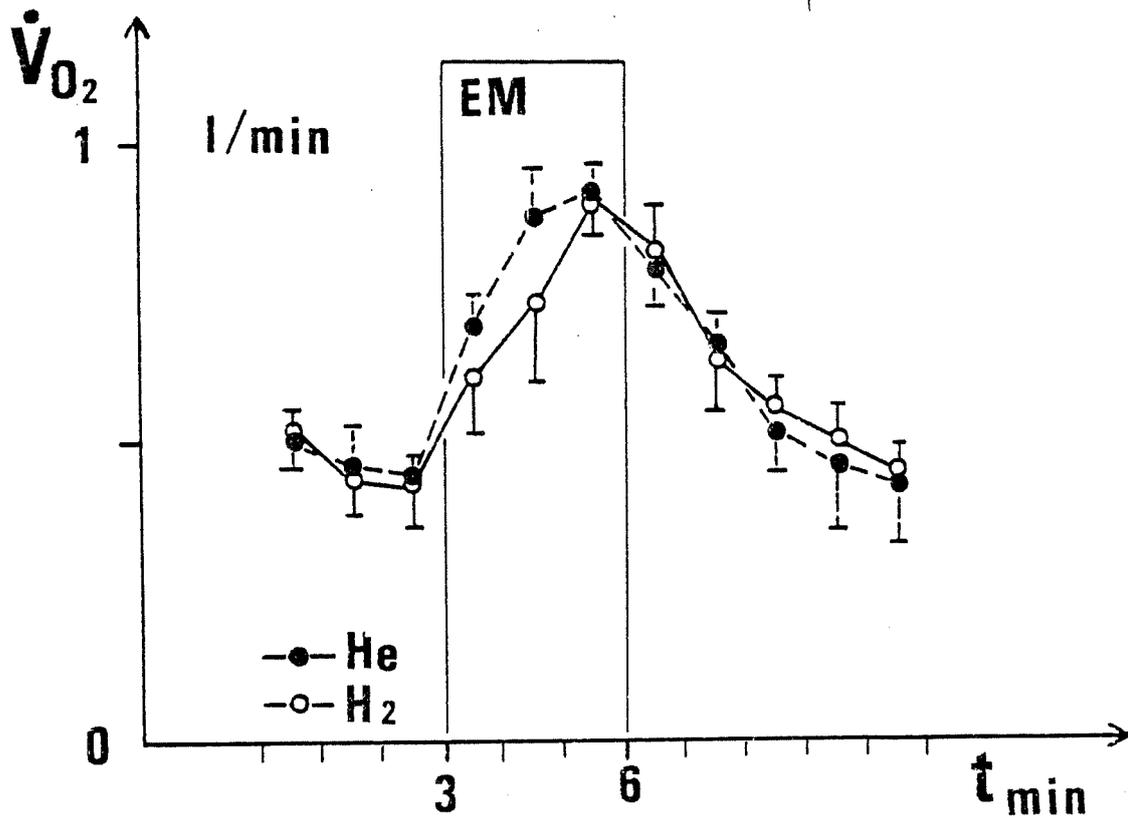


Fig. 5 : Consommation d'oxygène au cours des exercices à 240 m

Valeurs moyennes et erreurs standards calculées de minute en minute pour 5 sujets (MG, JLM, LS, MC, GN). La consommation supplémentaire d'oxygène provoquée par l'exercice musculaire demandé est significativement plus faible en hydrox qu'en héliox ($p < 0.05$).

EM : période d'exercice musculaire (3 minutes, charge 15 kg)
 $\dot{V}O_2$: consommation d'oxygène en unités STPD; t : temps.

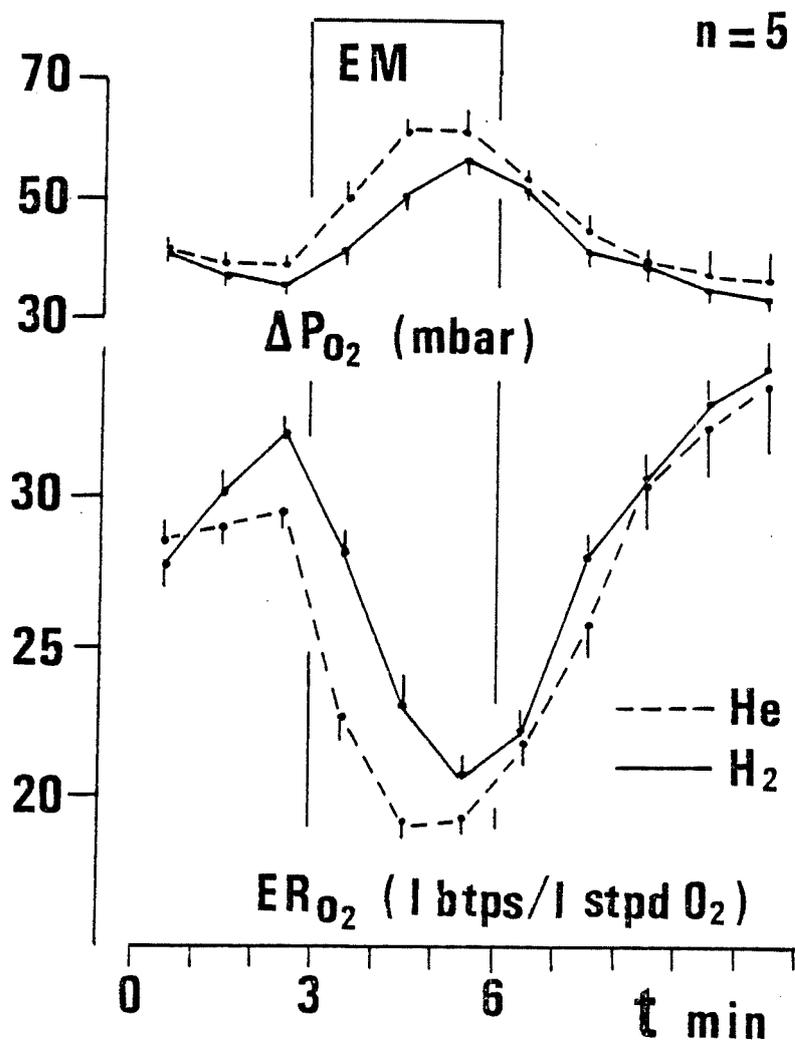


Fig. 6 Variation de la différence de pression d'oxygène entre le gaz inspiré et le gaz expiré (ΔP_{O_2} , en haut) et de la ventilation spécifique (ER_{O_2} , en bas) au cours des exercices musculaires à 240 m

Valeurs moyennes et erreurs standards calculées de minute en minute pour 5 sujets (MG, JLM, LS, MC, GN). Ces variations indiquent une hypoventilation relative au cours de l'exercice. Elles sont plus marquées en héliox qu'en hydrox.

EM : période d'exercice (3 minutes, charge 15 kg); t : temps.

On observe une augmentation rapide de ΔP_{O_2} dès le début de l'exercice sous hydrox comme sous héliox. Elle correspond à une diminution très marquée de ER_{O_2} , qui passe d'une valeur de l'ordre de 30 l BTPS/1 STPD O_2 à 20 l BTPS/1 STPD O_2 à la fin de l'exercice. ER_{O_2} revient progressivement à sa valeur normale ou à une valeur supérieure après le retour au repos.

Les variations de ΔP_{O_2} et de ER_{O_2} sont plus marquées en héliox qu'en hydrox.

- EXERCICE à 300 METRES -

Les mesures portent sur 3 sujets pour le mélange ternaire a et 2 sujets pour le mélange ternaire b.

. Mélange ternaire a (pression d'hydrogène = 23.1 bar) :

L'exercice est le même qu'à 240 m (15 kg, 3 min) et donne des résultats assez voisins (performance meilleure sous héliox et diminution de ER_{O_2} sous héliox et sous mélange léger).

Pour deux plongeurs (MG et MC) les performances sont meilleures sous mélange léger à 300 m que sous hydrox à 240 m, pour le troisième (LS), elles sont inférieures.

A titre d'exemple, la figure 7 compare les réponses respiratoires à l'exercice chez le même plongeur dans 3 situations différentes : héliox à 300 m, mélange ternaire a à 300 m et hydrox à 240 m. L'intensité des réponses respiratoires à l'exercice demandé décroît dans le même ordre.

. Mélange ternaire b (pression d'hydrogène = 19.1 bar) :

L'exercice est le même qu'à 180 m (21 kg, 7 min) pour une pression d'hydrogène assez voisine (18.6 bar à 180 m). Sous héliox, comme sous mélange léger les performances sont inférieures à celles observées à 180 m.

S'agissant de comparer les performances à 300 m sous héliox et sous ternaire léger, les mesures donnent des résultats contradictoires : pour l'un des plongeurs (MG), les performances sont meilleures sous ternaire léger, pour l'autre (LS), elles sont meilleures sous héliox.

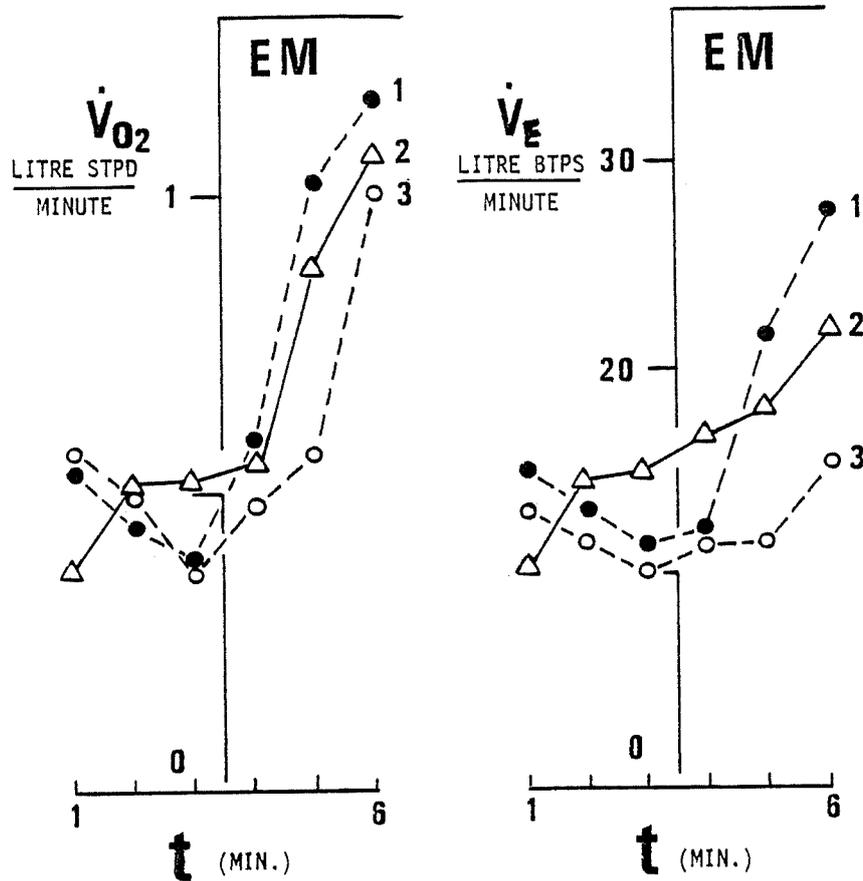


Fig. 7 Comparaison des réponses à un exercice musculaire sollicité (EM) chez le même plongeur (MC), dans 3 situations différentes.

1. HélioX à 300 m ; 2. Ternaire léger a à 300 m ; 3. HydroX à 240 m

A gauche, consommation d'oxygène (\dot{V}_{O_2}) en litres STPD/minute.

A droite, volume minute (\dot{V}_E) en litres BTSP/minute

Ces réponses varient en fonction inverse du degré de narcose. La performance en hélioX à 300 m est meilleure qu'en ternaire a (pression d'hydrogène : 23.1 bar), phénomène retrouvé chez les autres sujets (MG, LS) La performance en ternaire a est meilleure que sous hydroX à 240 m (pression d'hydrogène 23.5 bar) chez ce sujet et chez MG. ; on trouve un résultat inverse chez LS.

EM : exercice musculaire : 15 kg, 3 minutes ; rythme demandé : 15 tractions par minute ; t : temps.

Tableau 5 : COMPARAISON DE PERFORMANCES A 180 ET A 300 METRES
(Valeurs moyennes observées dans les 3 dernières minutes d'exercice)¹

	\dot{V}_E 1 BTSP/min	\dot{V}_{O_2} 1 STPD/min	ER_{O_2} 1 BTSP/1 STPD
MG			
180 m, héliox	31.3	1.02	30.7
180 m, hydrox	33.5	1.09	30.7
300 m, héliox	25.0	0.94	26.6
300 m, ternaire b	28.9	0.94	30.7
LS			
180 m, héliox	27.3	1.24	22.0
180 m, hydrox	26.9	1.44	18.7
300 m, héliox	22.6	1.22	18.5
300 m, ternaire b	18.1	0.96	18.9

(1) 7 minutes, charge : 21 kg (25 kg pour LS à 180 m), 15 tractions/min

Effet déresseur respiratoire de l'hydrogène

L'inhalation d'hydrogène à 240 m provoque une narcose surtout si le plongeur est inactif, comme dans la phase de repos précédant l'exercice musculaire par exemple. Cette narcose à l'hydrogène présente diverses caractéristiques décrites par ailleurs et provoque aussi une tendance à l'assoupissement.

Du point de vue respiratoire, elle s'accompagne d'une certaine désorganisation du pattern ventilatoire qui peut aller jusqu'à une véritable dépression respiratoire. Ces phénomènes peuvent rendre délicate l'utilisation d'hydrox à 240 m et nécessiter l'interruption de son inhalation, comme dans l'exemple donné dans la figure 8.

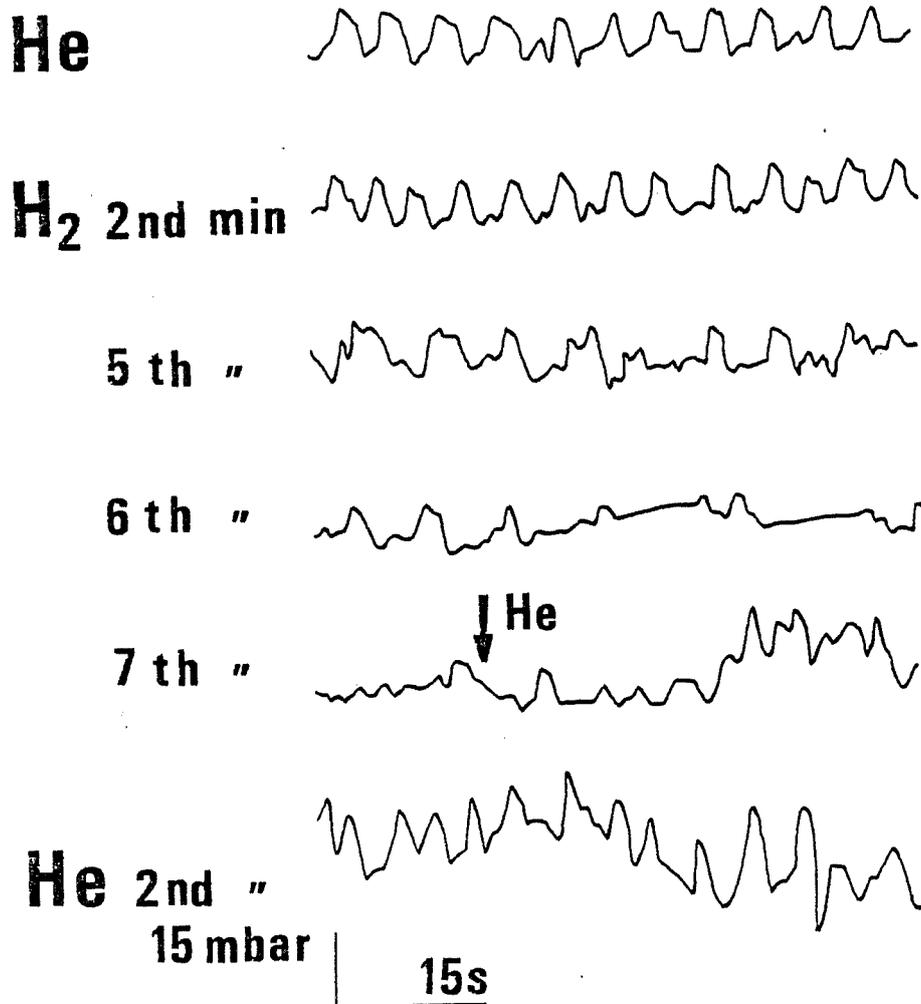


Fig. 8 : Effet dépresseur respiratoire de l'hydrogène à 240 m

Barogramme buccal, les ondes positives représentent l'expiration, les ondes négatives représentent l'inspiration. Chaque segment correspond à une minute. Le premier tracé donne le pattern ventilatoire au cours de la respiration d'héliox quelques minutes avant le passage à l'hydrox. Au bout de 5 minutes, on observe un pattern caractérisé par une certaine désorganisation du rythme ventilatoire qui est retrouvé chez la plupart des sujets. La respiration est très ralentie à la fin de la 6ème minute, avec de longues pauses expiratoires. A la 7ème minute, l'inhalation d'hydrogène est arrêtée. La respiration se normalise rapidement sous héliox et on observe une hyperpnée dans les minutes suivantes. Voir texte et tableau 6. Sujet : GG.

Cette figure présente le barogramme buccal au cours de l'inhalation d'hydrox à 240 m chez un plongeur se préparant à l'exercice musculaire. Au bout de 2 minutes d'inhalation le tracé est encore analogue au tracé enregistré sous héliox quelques minutes avant le passage à l'hydrox. La désorganisation du pattern ventilatoire produit le tracé modifié de la 5 ème minute. Ce type de tracé est présenté par la plupart des sujets pendant la phase de repos précédant l'exercice. On observe chez ce plongeur à partir de la minute suivante un ralentissement ventilatoire qui nécessite le retour à l'héliox à la 7ème minute. La ventilation reprend rapidement une allure normale, avec la disparition de la narcose.

Tableau 6 : DEPRESSION RESPIRATOIRE SOUS HYDROX A 240 M

Volume minute (\dot{V}_E), fréquence respiratoire (f), volume courant (V_t), différence de pression d'oxygène entre le gaz inspiré et le gaz expiré (ΔP_{O_2}), consommation d'oxygène (\dot{V}_{O_2}), et ventilation spécifique (ER_{O_2}) au cours de l'inhalation d'hydrox à 240 m interrompue à la 7ème minute.

Temps	\dot{V}_E	f	V_t	ΔP_{O_2}	\dot{V}_{O_2}	ER_{O_2}
min	$\frac{1 \text{ BTPS}}{\text{min}}$	$\frac{c}{\text{min}}$	1 BTPS	mbar	$\frac{1 \text{ STPD}}{\text{min}}$	$\frac{1 \text{ BTPS}}{1 \text{ STPD}}$
1	23.2	14	1.7			
2	21.6	13	1.7			
3	18.6	11	1.7	32	0.51	36.4
4	15.5	9	1.7	35	0.47	33.0
5	15.5	9	1.7	46	0.61	25.4
6	9.8	6	1.6	41	0.35	28.0
7	6.2	5	1.2	48	0.26	23.8
PASSAGE A L'HELIOX						
9	12.4	9	1.4			
10	32.5	14	2.3			
11	30.9	12	2.6	53	1.41	21.39

Analyse du barogramme buccal

La morphologie du barogramme buccal est variable d'un sujet à l'autre et semble caractéristique de la "personnalité ventilatoire" et de la façon dont le plongeur utilise le détendeur.

La figure 9 donne des exemples de tracés, pour un sujet qui présente un pattern ventilatoire simple et régulier (JLM), ce qui facilite l'analyse. Ces échantillons correspondent à la 4ème minute des exercices sous héliox et sous hydrox à 180 mètres.

A partir des mesures dont on dispose, on peut reconstituer le cycle ventilatoire moyen qui, dans les deux conditions, présente les caractéristiques rassemblées dans le tableau 7.

Tableau 7 : CYCLES VENTILATOIRES MOYENS PENDANT LES EXERCICES A 180 M

Cycles ventilatoires moyens sous héliox et sous hydrox pendant la 4ème minute d'exercice à 180 m (sujet JLM). Période ventilatoire (T_{tot}), durée de l'inspiration (T_i), durée de l'expiration (T_e), volume courant (V_t), débit inspiratoire moyen (V_t/T_i), débit expiratoire moyen (V_t/T_e). Le volume courant et les débits moyens sont exprimés en conditions BTPS.

	T_{tot}	T_i	T_e	V_t	V_t/T_i	V_t/T_e
	(s)	(s)	(s)	(l)	(l/s)	(l/s)
Héliox	4.8	1.9	2.9	1.65	0.87	0.57
Hydrox	3.9	1.5	2.4	1.60	1.07	0.67

Sur le barogramme buccal l'onde négative correspond à l'inspiration, l'onde positive à l'expiration. On trouve des amplitudes sensiblement égales sous héliox et sous hydrox :

- à l'inspiration : 2.2 ± 0.2 mbar sous héliox, 2.4 ± 0.4 sous hydrox
- à l'expiration : 6.1 ± 0.4 mbar sous héliox, 6.3 ± 0.5 sous hydrox

Ces pressions permettent d'entretenir des débits d'hydrox environ 20 % supérieurs aux débits d'héliox.

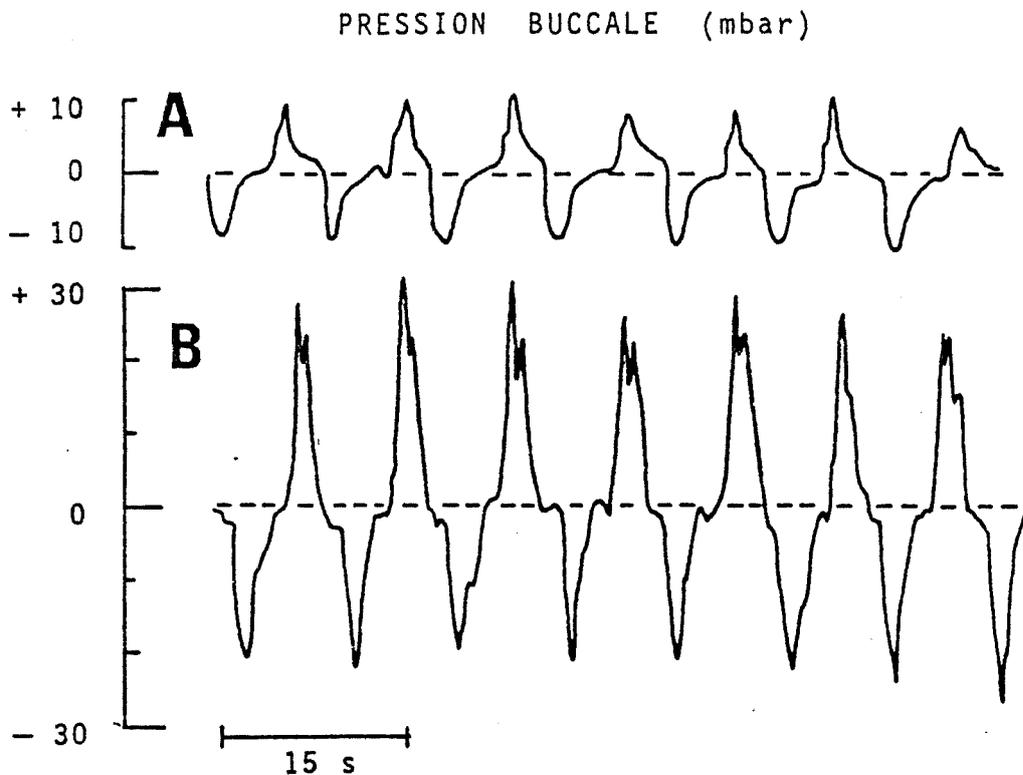


Fig. 10 Aspects du barogramme caractéristiques d'un réglage particulier du détendeur (héliox, 300 m). sujet: LS.

Par rapport à ceux de la figure précédente, ces tracés (enregistrés à vitesse de défilement plus lente) sont caractérisés par la grande amplitude de l'onde négative qui correspond à l'inspiration. Elle est pratiquement aussi grande que celle de l'expiration. Le tracé du haut correspond à la ventilation de repos, celui du bas à l'hyperventilation provoquée par un exercice. Les variations de pression sont plus amples avec l'augmentation du volume courant, mais la forme générale du barogramme est conservée (on remarque cependant que l'expiration devient biphasique).

Ce réglage du détendeur (plus dur à l'inspiration) est choisi par le sujet, plongeur professionnel, pour améliorer son confort respiratoire.

A : $V_T = 2.0$ l BTPS B : $V_T = 3.4$ l BTPS

La morphologie des tracés dépend encore du réglage du détendeur. La figure 10 donne un exemple de tracé modifié par un réglage volontaire du détendeur pour le rendre plus dur à l'inspiration (sujet LS à 300 m, sous héliox). Les résultats obtenus pendant la ventilation de repos et au cours de la dernière minute d'exercice montrent que ce plongeur recherche des pressions sensiblement égales à l'inspiration et à l'expiration pour assurer son confort respiratoire.

Ce confort est alors obtenu au prix d'un accroissement de l'amplitude des variations crête à crête de la pression buccale, pendant qu'on observe simultanément chez ce plongeur une forte diminution de la ventilation spécifique (tableau 5). On trouve des tracés comparables chez le sujet MG.

Tableau 8 : PRESSION BUCCALE SOUS HELIOX A 300 M (SUJET LS)

	Inspiration	Expiration	crête à crête	Vol. courant
	mbar	mbar	mbar	l BTPS
repos	9 ± 0	9 ± 1	18 ± 1	2.0
exercice	21 ± 3	28 ± 3	49 ± 3	3.4

(moyennes et écarts types)

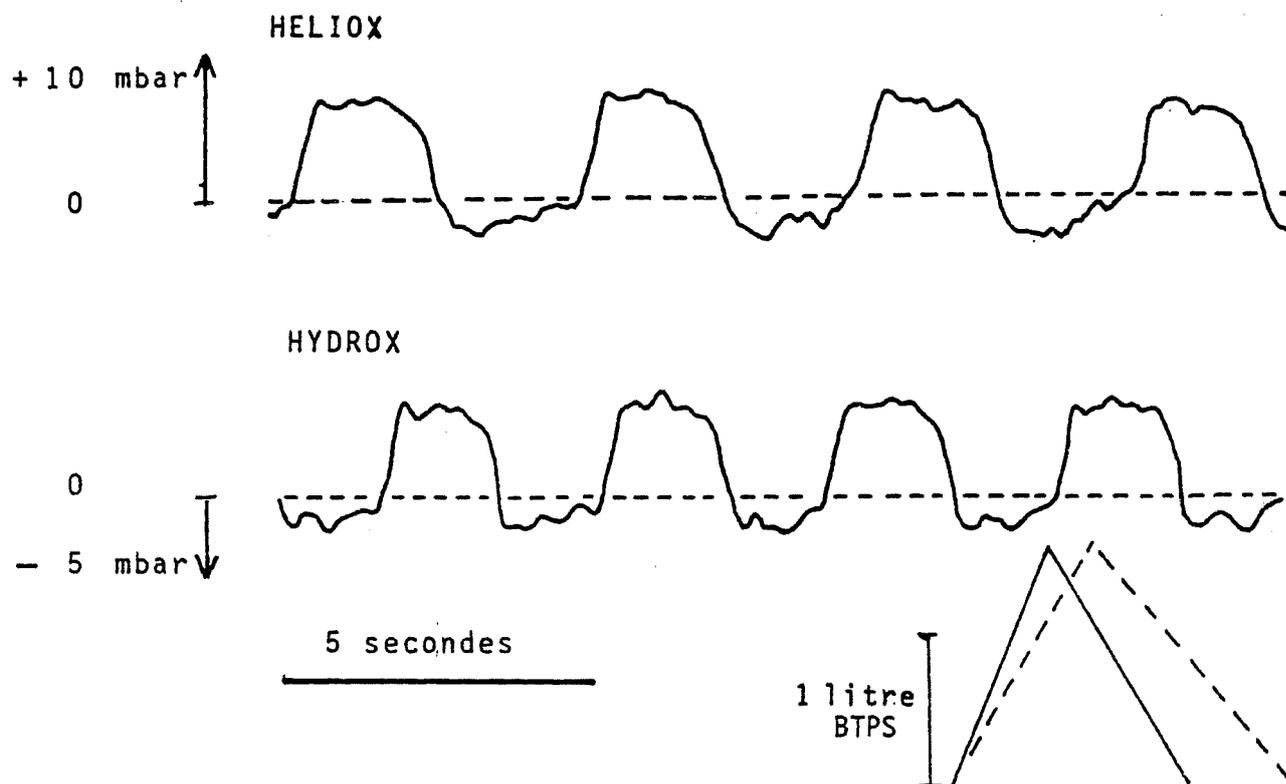


Fig. 9 Enregistrement de la pression buccale au cours de l'exercice musculaire à 180 m sous héliox et sous hydrox.

L'onde négative correspond à l'inspiration, l'onde positive à l'expiration. L'amplitude plus grande de la seconde signifie que l'effort ventilatoire est plus grand à l'expiration. Les amplitudes sont sensiblement les mêmes sous héliox et sous hydrox, mais elles correspondent à des débits inspiratoires et expiratoires moyens environ 20 pour cent plus élevés en hydrox. Cet exemple montre qu'avec le même effort à la bouche, on peut obtenir un débit plus élevé si l'on respire un mélange léger.

Sujet : JLM.

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 (figure 2). Le gain est de plus de 20 % en terme de $\Delta \dot{V}_E$ (tableau 4). Cette observation est complétée et explicitée par l'analyse du barogramme buccal (figure 9). 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 (figure 8, tableau 6). 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 (cf. figure 7), 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 (figure 6). 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 détenteur ? 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 (figure 10). 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 dominant à 180 mètres, mais que les inconvénients dominant 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.

C - CONTRE-DIFFUSION ISOBARE DE L'HYDROGENE CHEZ L'HOMME AU COURS D'UNE

PLONGEE SIMULEE A 300 METRES

(Abstract)

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.

Les conditions de ces expositions sont résumées dans le tableau ci-dessous.

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 vetrasonic decompression data.
Undersea biomed. Res., 1 (suppl.), 28, 1978

PALIER PROFONDEUR EN METRES	MELANGE RESPIRATOIRE H ₂ - He - O ₂ %	DUREE DE L'EXPOSITION SOUS MELANGE HYDROGENE / DEGRE DE BULLES AU REPOS / AU MOUVEMENT			SOUS LA COUPOLE			EN IMMERSION		
		!	!	!	!	!	!	!	!	!
120	98/ 0/2	45 min	A2 B1	0/0						
			A3 B2	0/0						
		60 min	A1 B3	0/0						
180	98/ 0/2	30 min	A1	0/0	30 min	B1	0/0			0/0
			A2	0/0		B2	0/0	60 min	B2	0/0
			A3	0/0		A3	0/0		B3	0/0
240	98/ 0/2	30 min	B1	0/0	60 min	A1	0/0			0/0
			B2	0/0		A2	0/0		B2	0/0
			B3	0/0		A3	0/0		A3	0/0
240	98/ 0/2	30 min	A1	0/0	45 min	B1	0/0			0/0
			A2	0/0		B2	0/0	30 min	B2	0/0
			A3	0/0		B3	0/0		B3	0/0
300	98/ 0/2	30 min	B1	0/0	8 min	A2	1/2			1/2
			B2	0/0	45 min	A1	1/2			1/2
			B3	0/0	30 min	A3	0/0			0/0
300	74/24/2	30 min	A1	1/0	40 min	B1	0/0			0/0
			A2	1/2	30 min	B3	0/0			0/0
			A3	0/1						
300	74/24/2	30 min	B2	0/0	40 min	A1	2/2			2/2
			B3	0/0	40 min	B1	0/0			0/0
150	98/ 0/2	120 min	B2	0/0	60 min	A1	0/1			0/1
		240 min	A1	3/3	60 min	B1	0/0			0/0
		360 min	B1	0/0						

D - RAPPORT PRELIMINAIRE SUR LES IMAGES ECHOGRAPHIQUES

The aim of this experimental dive was to investigate the possible use of hydrogen/oxygen as a breathing gas for divers instead of the conventional helium/oxygen mixture for deep dives. In the course of the experiment gas switches were therefore made from the helium/oxygen chamber atmosphere to hydrogen/oxygen and back again. The hydrogen mixture was breathed both in dry conditions, with the subject surrounded by the mixture in the wet, using commercial breathing apparatus. Two problems were envisaged ; first the possibility of bubble formation at pressure via a counter-diffusion mechanism, and second, if bubbles were present before the final decompression to the surface what, if any, effect would their presence have on bubble formation during that decompression. Bubble formation was to be studied using the Doppler technique under the direction of Dr. G. MASUREL and by the Integrating Pulse-Echo Imaging method developed in OXFORD (Daniels, 1978 ; 1984 ; Daniels et al., 1981 ; 1983).

METHODS

Two of the group of six divers were chosen as subjects for the ultrasound scanning, one from each team. During compression to 300 m 1 day was spent at 120 m, 2 days at 180 m and 2 days at 240 m ; 2 days were scheduled at 300 m. During these periods at pressure one team breathed Hydrox in dry conditions and the other in wet conditions. On the second day the teams swapped over. At 120 m only a dry test was carried out. After each exposure to Hydrox the divers were monitored at 30 min intervals using the Pre-Cordial Doppler technique. The diver selected for ultrasound imaging completed one Doppler monitoring session and then began his 20 - 30 min scanning session. For ultrasound scanning the diver lay on a bed and placed his left leg in a holder in which the ultrasound transducer was mounted. This holder assisted in keeping the divers leg still and in achieving a reproducible positioning of the transducer on successive days. This arrangement, the transducer in contact with the lateral surface of the thigh, produced an image of a longitudinal section through the thigh. Acoustic coupling was achieved using a proprietary gel. The divers were in communication with the operator so that instructions for exact transducer placement could be given to the diver by comparison of the image with those recorded in previous sessions.

When the operator was satisfied that the image was of the same section of thigh as on previous occasions recording of the integrated output from the ultrasound scanner was begun. Normally, 1 - 3 min would be required for the output to stabilise, as the diver fully relaxed. After this period at least 20 min of recording was attempted. Shorter recording periods were sometimes unavoidable ; for example if the diver became cold then he would not be able to keep still. On the basis of previous experiments a 20 min recording period was deemed sufficient to obtain a representative measure on which to assess the presence and extent of bubble formation.

Owing to the siting of the transducer in the Hydrosphère ultrasound imaging could not be performed throughout the decompression. However, additional experiments with Hydrox were performed at 150 m, when 3 divers breathed hydrox for 2, 4 and 6 hours. It was arranged that the Hydrosphère would be available for use from this pressure down to 50 m and ultrasound scanning sessions were conducted throughout this portion of the decompression. As more time was available during this portion of the experiment, a third diver was added to the scanning schedule.

RESULTS

The results from the scanning sessions are summarised in Appendix A. They are expressed as the echo count from the integrating unit divided into the number subtracted and the range of the counts taken from the chart record. The count subtracted gives a measure of the success of the subject in reproducibly positioning the transducer. A variation of c. 10 % would be considered normal, based on previous experiments. It has been indicated when the count was essentially stable or when the underlying trend was upwards or downwards. In addition, an indication has been given as to whether the count was steady or variable. One reason for considerable variation can be the passage of intravascular bubbles through the plane of scan, alternatively subject movement produces this variation. The possibility that the variation was due to bubbles is estimated from the images, which show movement as an alteration in the pattern of tissue reflections.

Qualitatively, the extent of bubble formation detected after the gas switches was slight and in the main transient. It was not particularly associated with subcutaneous tissues, but rather was randomly distributed in the same fashion as bubbles observed after a conventional decompression.

The time after the gas switch when bubbles were detected varied from 40 - 100 min after re-entry into the heliox atmosphere, with the two longest latent periods ((70 & 100 min) being for the definite detection of bubbles. A short latent period for definite bubbles was obtained after a wet exposure to Hydrox. No significant accumulation of stationary bubbles was observed during the part of the final decompression monitored.

Analysis of the results of the 14 gas switches monitored gave the pattern of bubble formation shown in table 1. The numbers in brackets exclude the two long dry exposures to hydrox (2 & 4 hours) monitored at 150 m during the decompression.

Table 1 : Pattern of Bubble Formation After Heliox/Hydrox Gas Switches

	Wet	Dry
No bubbles	1	7 (6)
Possible bubbles	1	2
Definite bubbles	2	1 (0)

Pooling the possible and definite bubble scores and excluding the long exposure results, to leave a set in which the length of exposure to hydrox and the monitoring time afterwards were broadly comparable, suggest that the wet exposures tended to enhance the possibility of bubble formation (CHI SQUARE = 2.74 with 1 degree of freedom; p = 10%).

An analysis of the effect of depth is shown in table 2. This analysis does not support the view that gas switches are more likely to result in bubbles when conducted at depth. Indeed in these experiments the time spent breathing the Hydrox appeared the more important parameter.

Table 2 : Pattern of Bubble Formation after Heliox/Hydrox Gas Switches

at various Depths

	Bubbles	Possible Bubbles	No Bubbles
120 m			2
150 m	1		1
180 m	1	1	2
240 m	1	2	1
300 m			2

The extent of bubble formation detected during the decompression was slight, as seen in the tables in Appendix A. However, as only the midpart of the decompression was monitored this is perhaps not surprising. The main point to be made is that the gas switches, including the air excursion at 80 m did not appear to result in any increase in the extent of bubble formation compared to that observed on routine decompressions from saturation Heliox dives.

CONCLUSIONS

The gas switches conducted in this experiment did not give rise to any appreciable degree of bubble formation, nor did the small number of bubbles that were formed enhance the formation of bubbles during the final decompression. The tendency for the wet exposures to Hydrox to give rise to more bubbles than did the dry exposures may have been related to increased gas exchange as a result of the exercise routines conducted by the divers in the water. It does appear that if longer exposures to Hydrox were given then the likelihood of bubbles would be greater. Despite the low level of bubble formation detected in these experiments it is inadvisable to adopt operationally any procedure which leads to bubble formation, especially in view of the well known variation in susceptibility between individuals and in their response to a given level of bubble formation.

REFERENCE

- S. Daniels. (1978) An integrating pulse-echo ultrasound bubble detector for use during decompression procedures. UK Patent GB 2034037B.
- S. Daniels. (1984) Ultrasonic monitoring of decompression procedures. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 304, 153-175.
- S. Daniels, J.M. Davies, K.C. Eastaugh, W.D.M. Paton & E.B. Smith (1981) Monitoring bubble formation with an integrating pulse-echo ultrasonic method. In : Proceedings of VIIth Symposium on Underwater Physiology. pp. 729-740.
- S. Daniels, J.M. Davies, W.D.M. Paton & E.B. Smith. (1983) Recent experiments using ultrasonic imaging to monitor bubble formation in divers. In "Proceeding of the VIII Symposium on Underwater Physiology" Bethesda : Undersea Medical Society Inc. (In press).

APPENDIX A

DIVER A 1

Date	Dive Day	Depth (m)	Integrator Substraction	Integrator Reading (range)	Bubbles	Comments
26/11	13	150	37000	5000		Stable reading: Stable
		150	38000	3500-9500	yes	Increasing reading : Variable 60 min after 4 hours Hydrox
27/11	14	137	37000	8500-9000		Stable reading: Stable
		127	35000	4000-4500		Stable reading: Stable
28/11	15	107	36000	8500-9000	yes	Stable reading: Stable
		96	75000	6500-4500		Decreasing reading : Stable
29/11	16	75	40000	4500-7000		Increasing reading : Variable

DIVER A 3

Date	Dive Day	Depth (m)	Integrator		Bubbles	Comments
			Substraction	Reading (range)		
14/11	1	120	40100	7500-8500		Stable reading : Variable 30 min after Hydrox DRY
15/11	2	180	45100	3000-7500 ?	yes	Inceasing reading : variable 30 min after Hydrox DRY
16/11	3	180	50000	4500-5500		Stable reading : Variable 60 min after Hydrox WET
17/11	4	240	42000	6000-8000		Stable reading : Variable
			54000	6000-8000		Stable reading : Variable 30 min after Hydrox DRY (subject moved)
18/11	5	240	41000	4000-11000	yes	Increasing reading : Stable 30 min after Hydrox WET
19/11	6	300	42000	5000-7500		Stable reading : Variable 30 min after H ₂ /He

DIVER A 3 (suite)

27/11	14	138	40000	4000-8000	Increasing reading : Stable
		128	33000	5000-9000	Increasing reading : Stable
28/11	15	107	35000	4000-9000 ? yes	Increasing reading : Variable
		97	35000	5000-11500	Increasing reading : Variable
29/11	16	80	33000	7500-8000	Stable reading : Stable 30 min after 20 min AIR
		76	65000	1500-3500	Stable reading : Variable
30/11	17	57	40000	3500-5000	Increasing reading : Variable

DIVER B 2

Date	Dive Day	Depth (m)	Integrator Substraction	Reading (range)	Bubbles	Comments
14/1	1	120	60100	5000-2000		Decreasing reading : Stable after Hydrox DRY
15/1	2	180	54000	5000-8000	yes	Stable reading : Variable 90 min after Hydrox WET
16/1	3	180	51000	4500-7000		Increasing reading : Stable 30 min after Hydrox WET
17/1	4	240	52000	4000-8000	? yes	Increasing reading : Stable after 60 min Hydrox WET
18/11	5	240	49000 58000	4500-6000 ? 4500-5500	yes	Stable reading: Stable Stable reading: Stable 60 min after Hydrox DRY
19/11	6		SUBJECT NOT DIVING			
20/11	7	300	53000	6000-8000		Variable reading : Stable 60 min after H ₂ /He

DIVER B 2 (suite)

26/11	13	150	53000	4500-2000		Decreasing reading : Stable 60 min after 2 hrs Hydrox
		150	60000	7000-2500		Decreasing reading : Stable
27/11	14	138	44000	3500-5500		Stable reading: Stable
		128	48000	3000-1500	yes	Increasing reading : Stable
28/11	15	107	59000	2500-6500	yes	Increasing reading : Variable
		97	53000	4500-2000		Decreasing reading : Stable
29/11	16	80	56000	5000-7500	? yes	Increasing reading : Stable 60 min after 20 min AIR
		76	58000	5000-5500		Stable reading: Stable
30/11	17	58	75000	7500-2500		Decreasing reading : Stable

E - ETUDE DES DEFORMATIONS DE LA PAROLE

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 psychodysleptique 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.

BIBLIOGRAPHIE

ADOLFSON J. (1965)

Deterioration of mental and motor functions in hyperbaric air.
Scand. J. psychol., 6, 26-31.

BENNETT PB., COGGIN R., MC LEOD M. (1982)

Effect of compression rate on use of trimix to ameliorate HPNS in man to 686 m (2250 ft).
Undersea Biomed. Res., 9 (4), 335-351.

BENNETT PB., BLENKARN G.D. (1974)

Arterial blood gases in man during inert gas narcosis.
J. Appl. Physiol., 36, 45-48.

BENNETT PB., ELLIOTT DH. (1982)

The physiology and medicine of diving.
IIIth edition. Baillière - Tindall (London).

BRAUER RW., WAY RD., JORDAN MR., PARRISH DE. (1971)

Experimental Studies on the High Pressure Nervous Syndrome in various mammalian species.
IVth Symposium on Underwater Physiology, 487-500, Ed C.J. LAMBERTSEN.
NEW YORK Academic Press.

BRAUER RW., WAY R. (1970)

Relative narcosis potencies of hydrogen, helium, nitrogen and their mixtures.
J. Appl. Physiol., 29 (1), 23-31.

BRAUER RW., GOLDMAN SM., BEAVER RW., SHEERAN ME. (1974)

N₂, H₂ and N₂O antagonism to high pressure neurological syndrome in mice.
Undersea Biomed. Res., 1 (1), 59-72.

CASE EM., HALDANE JBS. (1941)

Human physiology under high pressure.
J. Hyg., 41, 225-249.

COMEX (1984)

ENTEX 9.

Rapport interne, (Marseille)

COMEX (1984)
HYDRA III - Souris
Rapport interne, (Marseille)

D'AOUST BG, YOUNG CA, GERTH WA (1983)
Hazards and advantages of isobaric inert gas sequencing : Experimental
Verification
Medsubhyp, 2 (1), 31-42.

EDEL PO, HOLLAND JM, FISHIER CL, FIFE WP (1972)
Preliminary studies of hydrogen oxygen breathing mixtures for deep sea
diving.
Proceedings "the working diver symposium", Marine Technology society, 257-
270.

FIFE WP (1979)
The use of non-explosive mixtures of hydrogen and oxygen for diving.
TEXAS A. & M. University Research Foundation, contract n° N00014-75-C-1020.

FRUCTUS X., NAQUET R., GOSSET A., FRUCTUS P., BRAUER RW. (1969)
"Le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions."
Marseille Med., 6, 509 - 512.

FRUCTUS X. (1983)
HYDRA III : 16 dives in open sea with hydrogen /oxygen mixtures.
Pressure, 12 (4), 14-15.

HOULDER JM, CROSS M. (1983)
The use of hydrogen / oxygen mixtures as breathing gas for deep operational
diving.
Rapport interne COMEX HDL. (Aberdeen).

HYACINTHE R, GIRY P, BATTISTI A. (1982)
Evolution des paramètres ventilatoires de la VMM en hyperbarie.
Medsubhyp, 1 (3), 111-118.

LAMBERTSEN CJ, BORNMANN RC (1982)
Isobaric inert gas counter diffusion.
The twenty second Undersea Medical Society Workshop, Philadelphia,
Pennsylvania (13-14 Nov 1979), Ed. M. BECKETT KENT, Und. Med. soc.,
Inc., BETHESDA Md.

LEMAIRE C. (1975)

Recherches ergonomiques en hyperbarie.
Rapport Contrat CNEXO - COMEX 75/1358.

LAVOISIER AL. (1789)

Premier mémoire sur la respiration des animaux. Mémoire de l'Académie des Sciences ; Paris.

MARTIN-CHAVE F. (1983)

Contribution à l'étude des paramètres physiologiques de la plongée à saturation à l'air.
Thèse de médecine, Marseille.

MICHAUD A, BARTHELEMY L, PARC J, CORRIOL J, CHOUTEAU J, LEMBOUCHER F (1969)
Premières données sur la limitation de l'utilisation du mélange O₂-H₂ pour la plongée profonde à saturation.
C.R. Acad. Scien. Paris, 269, 497-499.

OHRNAGEN HE, LUNDGREN CEG, MUREN A (1980)

Hydrogen oxygen exposure of rabbits at 30 ATA with multiday survival.
7th symposium of underwater physiology, Athens.

ROSTAIN JC (1980)

Le syndrome nerveux des hautes pressions chez l'homme et le singe Papio papio.
Thèse de doctorat es Sciences Naturelles, Marseille.

SCHREINER HR, HAMILTON RW, LANGLEY TD (1972)

Neon : an attractive new commercial diving gas.
In proc. Offshore Technology Conference, Houston, May 1-3.

ZETTERSTROM A (1948)

Deep sea diving with synthetic gas mixtures.
Milit. Surg. 103, 104-106

ANNEXE 1

- C O N S I G N E S D E S E C U R I T E -

- I - AVANT LA PREMIERE MISE EN SERVICE DES CIRCUITS HYDROX

- Vérification de l'étanchéité de tous les raccords sous pression d'hélium à 200 bar avec un liquide moussant.
- Vérification de l'étanchéité de tous les raccordements du Tableau de Respiration de Surface (T.R.S.) au moyen du détecteur catharométrique de fuite.

- II - AVANT CHAQUE MISE SOUS PRESSION DE LA LIGNE D'HYDROX

- Réglage du zéro des explosimètres et vérification de leur bon fonctionnement en balayant les capteurs avec un peu de méthane.
- Isolement des commandes électriques des palans et éclairages extérieurs.
- Branchement de la manche à incendie.
- Extincteurs à poudre de 50 kg et 9 kg en place près du trailer, de la Salle de contrôle et du Laboratoire, ainsi que les barrières et chaînes de Sécurité autour des installations de l'hydrosphère.
- Alimentation du circuit d'azote pour le balayage de l'échappement des gaz respiratoires.

- III - PENDANT LES PLONGEES A L'HYDROX

- Le circuit d'échappement des gaz respiratoires est balayé en permanence par de l'azote.
- La température à la sortie de la tubulure d'échappement est contrôlée en continu.

- En cas d'élévation rapide de la température, l'échappement des gaz respiratoires est immédiatement stoppé. Il n'est remis en service qu'après retour de la température à une valeur proche de celle ambiante.
- En cas d'indication d'un danger d'explosion, fermeture immédiate de la vanne d'arrivée d'hydrox sur le Tableau. L'alimentation en gaz du plongeur est basculée sur héliox.
Si le risque ne disparaît pas aussitôt, isolement du traylor d'hydrox et recherche de la fuite sur le T.R.S.
- Dans le cas où le danger d'explosion persiste, évacuation du personnel scientifique par la porte côté CEH et du personnel du laboratoire d'analyse des gaz par le parking.

N.B. : Le traylor étant isolé, la vidange totale de la conduite d'alimentation d'hydrox à 150 bar ne représente qu'un volume de 0,4 Nm³ qui doit se diluer très rapidement dans l'air ambiant. En cas d'inflammation, cela ne présente aucun risque important d'explosion, mais uniquement un petit flash local.

- Les opérations de plongée ne sont reprises qu'après localisation et élimination de la fuite.
- Durant les plongées de 120 à 300 mètres, la concentration d'hydrogène dans l'ambiance gazeuse de l'hydrosphère est régulièrement contrôlée par chromatographie gazeuse.
- la coupole en plexiglass est toujours maintenue en légère dépression pour éviter tout passage d'hydrogène dans l'ambiance de l'hydrosphère.

- IV - A LA FIN DES PLONGEES JOURNALIERES

Le traylor d'hydrox est isolé. La conduite de liaison traylor/tableau de respiration est laissée sous pression.

- P R O C E D U R E S D E P L O N G E E -

- 1 - MISE EN EAU DE L'HYDROSPHERE

La mise en eau se fait en plusieurs phases :

1ère phase :

Remplissage initial pour effectuer les entraînements et tests de référence surface.

Le niveau d'eau est à 3 ou 4 centimètres sous le plancher.

2ème phase :

Préparation de l'hydrosphère pour la mise sous vide. Le niveau d'eau est maintenu sous le dôme plastique. Cette manoeuvre a pour but de mettre l'intérieur de la coupole en communication avec l'ambiance de l'hydrosphère et donc en équipression lors de la mise sous vide et le début de la pressurisation.

3ème phase :

Remplissage définitif en eau jusqu'à 3 ou 4 centimètres sous le plancher.

- 2 - PRESSURISATION DE L'HYDROSPHERE

1. Pressurisation initiale à 120 mètres

Le mélange de pressurisation doit permettre d'atteindre une pression partielle d'oxygène de 400 mbar avec un minimum d'azote. La concentration volumique en oxygène à 120 mètres est donc de 3 %.

Lors de la pressurisation, l'équipression avec l'intérieur de la coupole est assurée par pressurisation simultanée de cette dernière au moyen d'un mélange héliox 98/2.

2. Pressurisation intermédiaire à 180, 240 et 300 mètres

La pressurisation s'effectuera à l'hélium pur. On procède d'une manière identique à la pressurisation initiale : la coupole est maintenue en équipression par introduction de mélange héliox 98/2.

- 3 - MISE EN PRESSION DES CIRCUITS HYDROGENE

Toutes les vannes du traylor d'hydrox sont fermées.

On procède à l'élimination de l'air dans le circuit d'alimentation hydrogène en pressurant et dépressurant 3 fois la ligne à l'héliox 98/2 (200 bar).

Après chaque journée de plongée, tous les cylindres du traylor sont isolés et la vanne d'entrée sur le TRS fermée.

Le matin, avant chaque plongée et avant d'ouvrir le traylor, on vérifie que la conduite est encore sous pression. Dans le cas contraire, la conduite est à nouveau rincée à l'héliox 98/2 comme lors de la première mise en service.

- 4 - TESTS AU SEC A 120 METRES

Les alimentations de gaz sont disposées de la manière suivante :

- sur la clarinette ambiance hydrosphère : HELIOX 97/3
- sur le T.R.S. : HELIOX 98/2
HYDROX 98/2
AZOTE TECHNIQUE

L'héliox 97/3 alimente le narguilé de transfert dans la coupole et celui du plongeur de secours.

L'hydrox 98/2 permet la ventilation permanente de la coupole durant les tests au sec.

L'héliox 98/2 assure le rinçage de la coupole à la fin des tests.

L'azote est en balayage permanent sur la ligne d'échappement des gaz respiratoires de la coupole.

4-1. Préparation de la coupole sous hydrox

On effectue 3 rinçages successifs pour éliminer l'héliox.

- Réglage du débit d'azote à $20\text{N m}^3/\text{heure}$ environ sur le circuit d'échappement.
- On échappe lentement le gaz de la coupole en laissant monter l'eau jusqu'au repère supérieur de la partie sphérique;
- On ferme l'échappement puis on pressurise lentement la coupole avec l'hydrox en baissant le niveau d'eau jusqu'au repère le plus bas.
- On procède ainsi à deux autres rinçages.

A la fin du 3ème rinçage, le gaz ambiant de la coupole est analysé par chromatographie pour s'assurer qu'il reste moins de 2 % d'hélium.

4-2. Ventilation pendant les tests au sec

Durant les tests au sec à 120 m, le filtre de chaux sodée n'est pas utilisé.

On assure une ventilation permanente avec de l'hydrox à un débit compris entre 2 et $3\text{m}^3/\text{heure}$ pour maintenir :

- la pression partielle d'oxygène proche de 260 mbar,
- la pression partielle de dioxyde de carbone inférieure ou égale à 10 mbar.

On utilise un seul cylindre d'hydrox à la fois.

L'efficacité de la ventilation est contrôlée par mesure permanente de la PO_2 et de la PCO_2 . Le débit est ajusté en fonction des valeurs des PO_2 et PCO_2 . On le contrôle en suivant la baisse de pression du cylindre d'hydrox :

- débit à $2\text{ m}^3/\text{heure}$: environ 0,5 bar/minute,
- débit à $3\text{ m}^3/\text{heure}$: environ 1 bar/1,5 minute.

4-3. Mise sous héliox de la coupole à la fin des tests au sec

On procède comme en 1., en remplaçant l'hydrox par l'héliox 98/2.

IMPORTANT :

Pendant les tests au sec, le plongeur-secours se tient prêt avec narguilé et masque pour intervenir dans la coupole.

- 5 - TESTS AU SEC A 180 METRES

Durant tous les tests au sec à 180 mètres dans la coupole, on utilise le filtre de chaux sodée pour éliminer le CO_2 sans ventilation. Le panier sera rempli de chaux sodée neuve, puis enfermé dans un double sac plastique scellé avec du scotch gris.

Le plongeur qui effectue le premier test met en place le filtre dans la coupole. A la fin du dernier test, le panier est enlevé et transféré sous sac plastique étanche dans l'ambiance de l'hydrosphère.

5-1. Tests sous héliox 98/2

Durée totale : 90 minutes, soit 30 minutes par plongeur.

La chute de la pression partielle de l'oxygène dans le même temps est de 40 à 50 mbar pour une consommation d'oxygène comprise entre 20 et 25 Nl/heure. Elle est contrôlée par mesure IN SITU de la PO_2 et de la concentration volumique en oxygène sur le gaz détendu à pression atmosphérique. La PCO_2 est contrôlée sur le gaz détendu à pression atmosphérique au moyen d'un analyseur à absorption IR.

Le niveau d'eau est maintenu au niveau de la jupe métallique (flotteurs entre les 2 repères inférieurs).

5-2. Mise sous hydrox de la coupole

On effectue 3 rinçages successifs à l'hydrox, en utilisant la même procédure qu'à 120 mètres.

Dès le début des rinçages, la ligne d'échappement est balayée en continu par un débit d'azote de 20 N m³/heure environ.

5-3. Tests sous hydrox 98/2

Durée totale : 90 minutes, soit 30 minutes par plongeur.

La procédure est identique à celle des tests sous héliox.

N.B. : Le plongeur qui effectue le dernier test transfère le panier de chaux sodée usée. La ligne d'échappement reste sous balayage permanent d'azote.

- 6 - PLONGE A 180 METRES

Chaque plongeur effectue en immersion :

- 30 minutes sous héliox pour les tests de référence,
- 30 à 60 minutes sous hydrox en répétant les mêmes tests que sous hélium, plus le montage éventuel du puzzle,
- 5 minutes environ sous héliox avant le retour dans l'ambiance de l'hydrosphère.

Le niveau d'eau dans le dôme est maintenu dans la partie cylindrique de la coupole.

Le plongeur s'équipe sur le plancher de l'hydrosphère. Le narguilé est alimenté avec l'héliox 98/2.

Le plongeur secours s'équipe lui aussi. Son narguilé est alimenté à l'héliox 97/3 sur la clarinette de respiration de l'hydrosphère.

Dès que le plongeur est immergé il enlève l'échelle de la coupole pour dégager le cyclorameur.

Le gaz expiré dans la coupole est évacué en continu par le circuit d'échappement qui est en balayage continu à l'azote.

Pendant les mesures de physiologie ventilatoire l'échappement est fermé. Au préalable, le niveau d'eau aura été amené dans la partie haute du cylindre, c'est-à-dire en haut du tube gradué.

La hauteur de la partie cylindrique de la coupole permet de quantifier le volume d'eau déplacé pendant environ 15 minutes pour un débit moyen de 30 l/mn. Une baisse du niveau de 1 mm correspond à un volume déplacé de 0,782 litre. Le contrôle des niveaux est effectué par un plongeur qui note les valeurs en fonction du temps. Ces mesures de niveau sont doublées en surface par l'enregistrement $f(t)$ de la pression différentielle de la coupole par rapport à la pression ambiante. La résolution est de 1 mm d'eau pour la mesure directe IN SITU et 0,5 mm d'eau pour la mesure au moyen du capteur de pression différentielle soit 0,785 l et 0,3925 l.

Quand tous les tests de référence sous héliox sont terminés, soit environ après 30 minutes de plongée, l'alimentation du narguilé est basculée sur hydrox.

Le retour du plongeur dans l'ambiance de l'hydrosphère ne se fait que 5 minutes après être repassé sous héliox.

Durant toutes les plongées, le plongeur-secours se tient prêt à intervenir.

N.B. : Le chimiste chargé de l'analyse des gaz, contrôle la concentration volumique en oxygène des cylindres d'hydrox avant chaque utilisation.

- 7 - TESTS AU SEC ET PLONGEE A 240 METRES

Les plongées à cette profondeur ainsi que les tests sont réalisés suivant le protocole utilisé à 180 mètres.

- 8 - TESTS AU SEC ET PLONGEE A 300 METRES

Le protocole des tests et plongées reste le même.

L'hydrox 98/2 est remplacé par des mélanges ternaires H_2-He-O_2 (59-39-2) et (74-24-2).

- 9 - DECOMPRESSION INTERMEDIAIRE DE 300 A 150 METRES

La décompression commence minimum 6 heures après la fin de la dernière plongée à 300 mètres.

- 10 - TESTS AU SEC A 150 METRES

Trois plongeurs subissent à cette profondeur, une exposition de longue durée au sec sous hydrox 98/2.

- 11 - DECOMPRESSION INTERMEDIAIRE DE 150 A 80 METRES

La décompression commence au minimum 6 heures après la fin du dernier test à 150 mètres et après contrôle des bulles circulantes.

- 12 - TESTS AU SEC SOUS AIR A 80 METRES

Tous les plongeurs effectuent au sec à cette profondeur la batterie de tests habituels d'abord sous héliox 80/20 puis sous air.

- 13 - DECOMPRESSION FINALE

Elle commence au minimum 4 heures après le dernier test en fonction des résultats de la détection des bulles.

ANNEXE 2

A 120, 180, 240, 300, 150 ET 180 MÈTRES :

- DURÉE DES TESTS AU SEC EN HÉLIOX
EN HYDROX OU AIR
- DURÉE DES TESTS EN EAU SOUS HÉLIOX
SOUS HYDROX OU AIR
- MASQUE UTILISÉ EN PLONGÉE
- CARACTÉRISTIQUES DE L'EFFORT FOURNI
AU CYCLORAMEUR
- REMARQUES GÉNÉRALES SUR LES TESTS

120 M	tests au sec		masque utilisé	tests en eau		effort sur cyclorameur	SYMPTOMES - REMARQUES
	durée héllox	sous hydrox		durée héllox	sous hydrox		
M. GIR	0	58 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ressent une odeur de brûlé au changement de gaz chauffage insuffisant
G. GUE	0	44 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> impression très légère de narcose (?)
J. LEM	0	45 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> très légère narcose pendant EEG (petite déviation du schéma corporel)
J. SCH	0	49 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> légère hypoesthésie des mains
G. NOR	0	44 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> R.A.S.
M. CHO	0	60 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> peut-être très légère narcose

180 M	tests au sec		masque utilisé	tests en eau		effort sur cyclorameur	SYMPTOMES - REMARQUES
	durée héliox	durée sous hydrox		durée héliox	durée sous hydrox		
M. GIR	28 min	27 min	n° 2	25 min	60 min	21 kg - 7 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> - Plus de goût de brûlé mais odeur de javel - Pas de narcose mais déviation schéma corporel pendant EEG, YF - Respiration plus ample sous hydrox en eau - Pas de fatigue musculaire
G. GUE	22 min	31 min	n° 2	25 min	60 min	21 kg - 7 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> - "Perte du réflexe des multiplications" - YF (EEG) tend vers sommeil - En eau : respiration aisée sous hydrox - Troubles visuels
J. LEM	23 min	26 min	n° 2	24 min	60 min	21 kg - 7 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> - Il se dit narcosé au sec comme à 75 m à l'air en caisson - Il n'a pas de référence pour sa narcose en eau
J. SCH	30 min	26 min	n° 2	24 min	29 min	25 kg - 7 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> - Effort plus facile sous hydrox - Léger tournoi sous hydrox au sec (sans connaître le gaz)
G. HOR	30 min	27 min	n° 2	28 min	57 min	21 kg - 7 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de narcose - Légère cephalée après test - Aisance respiratoire
M. CRO	30 min	22 min	n° 1	24 min	61 min	21 kg - 7 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de narcose au sec - Légers troubles visuels - Se sent narcosé à 40 m à l'air pendant tests en immersion

240 M	tests au sec		masque utilisé	tests en eau		effort sur cyclorameur	SYMPTOMES - REMARQUES
	durée hélio	durée hydrox		durée hélio	durée hydrox		
M. GIR	30 min	34 min	n° 2	22 min	45 min	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> Apprécie beaucoup le confort respiratoire en immersion Luminosité des couleurs Déviations du schéma corporel au sec pendant EEG
G. GUE	30 min	29 min	n° 2	21 min	8 min	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec Pas d'effort sous hydrox	<ul style="list-style-type: none"> En eau : retour rapide sous hélio car s'endormait sous hydrox (YF et apnée ni inspiratoire, ni expiratoire) Au sec : troubles visuels - vertiges
J. LEM	37 min	30 min	n° 2	22 min	30 min	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> Sensations psychodysléptiques très importantes Disparition tremblement Confort respiratoire en immersion Confort thermique sous hydrox
J. SCH	30 min	29 min	n° 1	19 min	45 min	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> Confort respiratoire +++ Légère narcose sous la coupole Narcose en eau > 80 m à l'air
G. NOR	30 min	29 min	n° 1	23 min	30 min	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> En eau : légère euphorie - sensation d'anesthésie se propageant peu à peu
M. CRO	30 min	35 min	n° 1	19 min	30 min	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	<ul style="list-style-type: none"> Narcosé au sec et en eau Dissociation de la personnalité Troubles visuels et auditifs Latence et persistance des effets H₂

300 M	tests au sec		masque utilisé	tests en eau		effort sur cyclorameur	SYMPTOMES - REMARQUES
	durée héllox	durée sous hydrox 23% He		durée héllox	durée sous hydrox		
M. GIR	34 min	32 min	n° 2 Hydrox 23 & He	21 min puis 10 min	42 min	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	. Plongée très agréable . Au sec, narcose comme 240 m ≠ de celle N ₂
			n° 2 Hydrox 39 & He	21 min	60 min	21 kg - 7 min 1 traction / 4 sec	. Effort bien supporté . Pas de narcose
G. GUE	31 min	35 min	-	-	-	-	. Sensations psychodysleptiques . Impressions comme à 240 m
J. LEM	31 min	35 min	-	-	-	-	. Sensations psychodysleptiques puis psychologiquement mal à l'aise pendant 24 h
J. SCH	-	-	n° 1	21 puis 10	40 min (23% He)	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	. Narcose légère bien contrôlée disparaissant durant l'exercice . Effort bien supporté . Pas de narcose
			n° 2	17 puis 12	42 min (23% He)	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	
			n° 2	20 min	60 min (39% He)	21 kg - 7 min 1 traction / 4 sec	
G. NOR	31 min	34 min	-	-	-	-	. Narcose insignifiante
M. CRO	31 min	30 min	n° 1	18 min puis 16 min	30 min	15 kg - 3 min 1 traction / 4 sec	. Narcose contrôlable

150 M	tests au sec		masque utilisé	tests en eau		effort sur cyclorameur	SYMPTOMES - REMARQUES
	durée héliox	durée sous hydrox		durée héliox	durée sous hydrox		
M. GIR	0	242 min	-	-	-	-	. Pas de changement de goût en hydrox (déjeuner) . Pas de narcose
G. GUE	-	-	-	-	-	-	-
J. LEM	-	-	-	-	-	-	-
J. SCH	0	360 min	-	-	-	-	. Pas de narcose
G. MOR	0	120 min	-	-	-	-	. Pas de narcose
M. CHO	-	-	-	-	-	-	-

80 M	tests au sec		masque utilisé	tests en eau		SYMPTOMES - REMARQUES	
	durée hélio	sous hydrox		durée hélio	sous hydrox		effort sur cyclorameur
M. GIR	-	-	n° 1	25 min	15 min	15 kg - 5 min 1 traction / 5 sec (hélio) 15 kg - 2 min 1 traction / 6 sec (air)	<ul style="list-style-type: none"> . Narcose air qu'il ne maîtrise pas . Proche ivresse alcoolique . Difficulté à respirer air en immersion . Travail difficile
G. GUE	13 min	19 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> . Narcose air : bien-être + ni vertige, ni nausée . Affirmation de soi . Se serait senti capable de réagir à un danger
J. IEM	12 min	20 min puis 6 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> . Narcose air : euphorie, ébriété, exaltation, logorrhée . Sans phase transitoire . Ni phénomène résiduel
J. SCII	-	-	n° 1	20 min	16 min	15 kg - 5 min 1 traction / 4 sec (hélio) 15 kg - 2 min 1 traction / 5 sec (air)	<ul style="list-style-type: none"> . En air : travail plus difficile . Narcose air notable (tests) sans être réellement perçue
G. NOR	13 min	17 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> . Narcose peu apparente et bien contrôlable
M. CRO	11 min	20 min	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> . Narcose moyennement ressentie avec sentiment d'insécurité

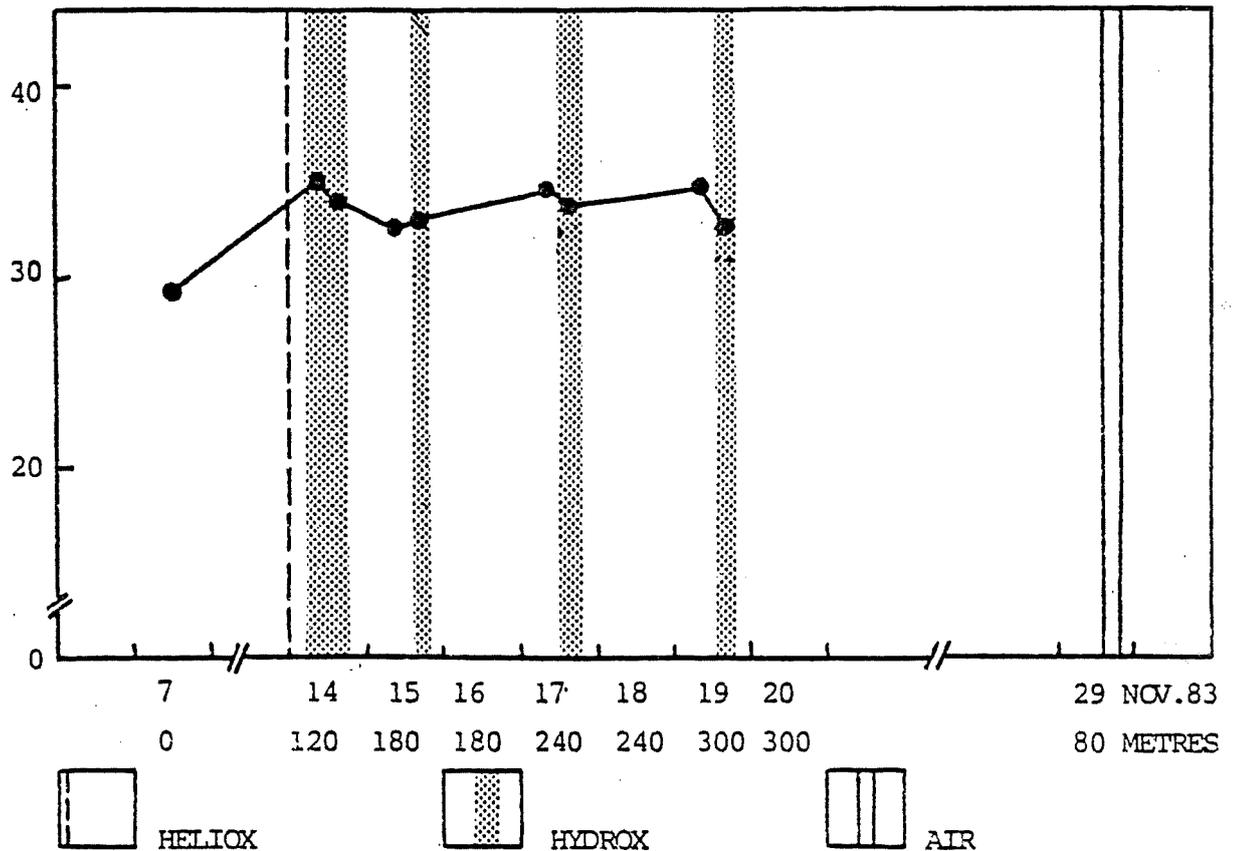
A N N E X E 3

COURBES INDIVIDUELLES DES RÉSULTATS OBTENUS
AU TEST DE DEXTÉRITÉ MANUELLE DES 6 PLONGEURS
D'HYDRA IV DURANT TOUTE L'EXPÉRIENCE

LA PERFORMANCE EST QUANTIFIÉE PAR LE NOMBRE DE
CHEVILLES RANGEES PAR MINUTE

NOMBRE DE CHEVILLES
RANGÉES PAR MINUTE

A 1

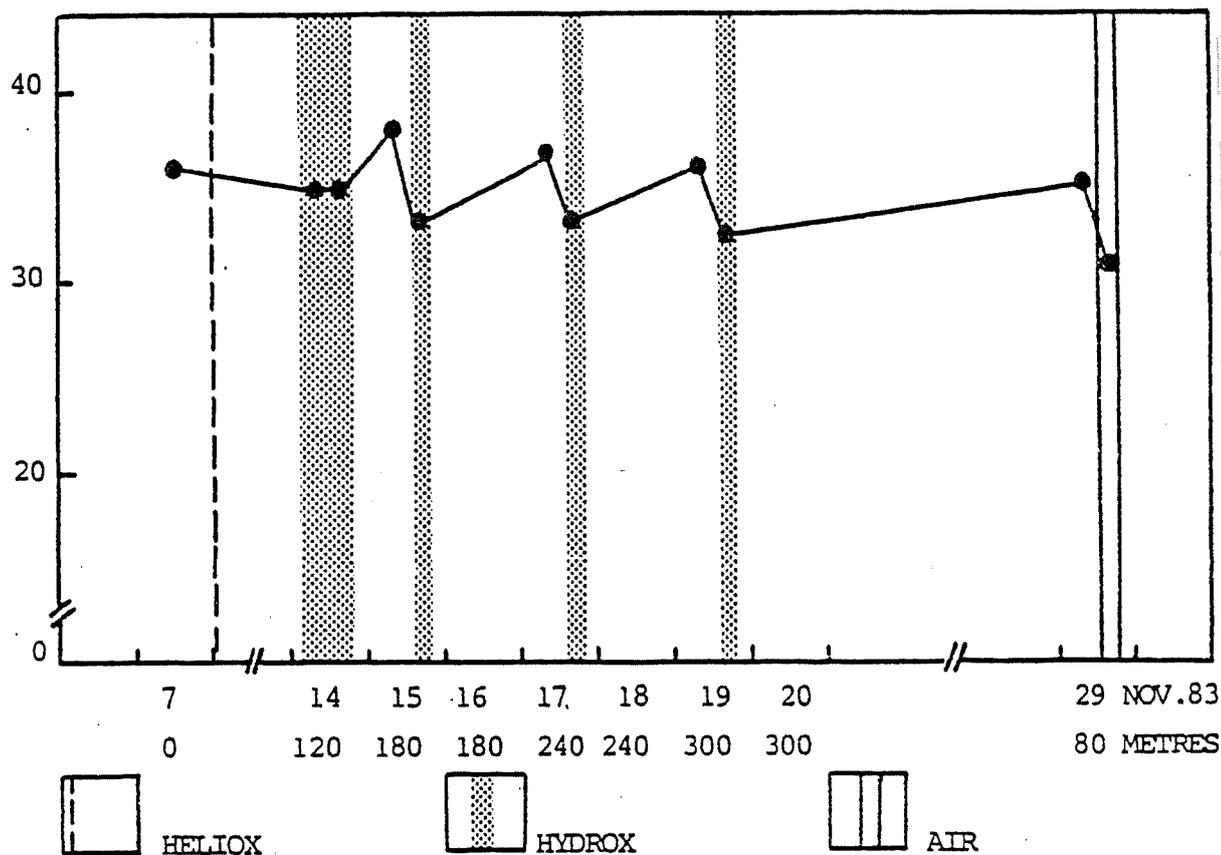


EVOLUTION DE LA DEXTERITE MANUELLE (nombre de chevilles rangées par minute) DU PLONGEUR A1 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX OU AIR.

(A 300m, l'hydrox contenait 24% He)

NOMBRE DE CHEVILLES
RANGÉES PAR MINUTE

A 2

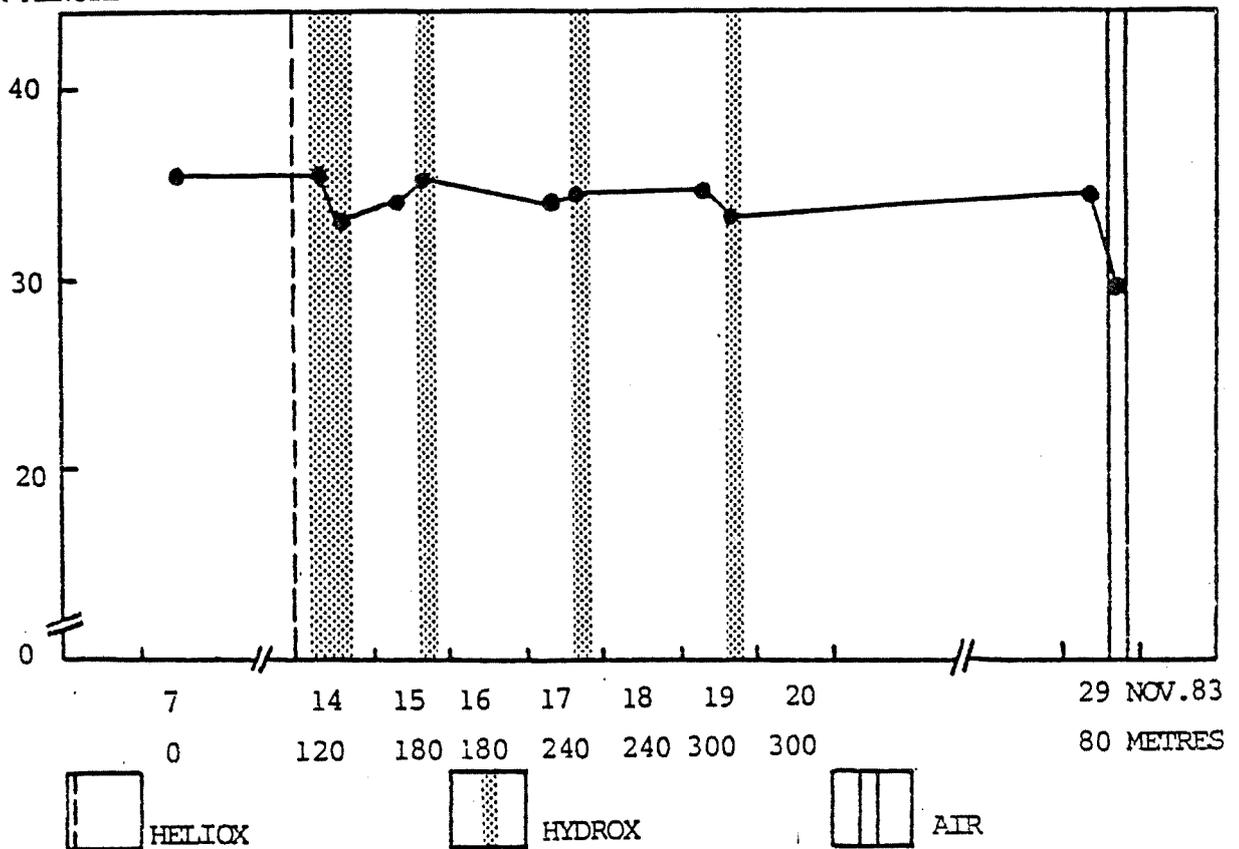


EVOLUTION DE LA DEXTERITE MANUELLE (nombre de chevilles rangées par minute) DU PLONGEUR A2 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.

(A 300m, l'hydrox contenait 24% He)

NOMBRE DE CHEVILLES
RANGÉES PAR MINUTE

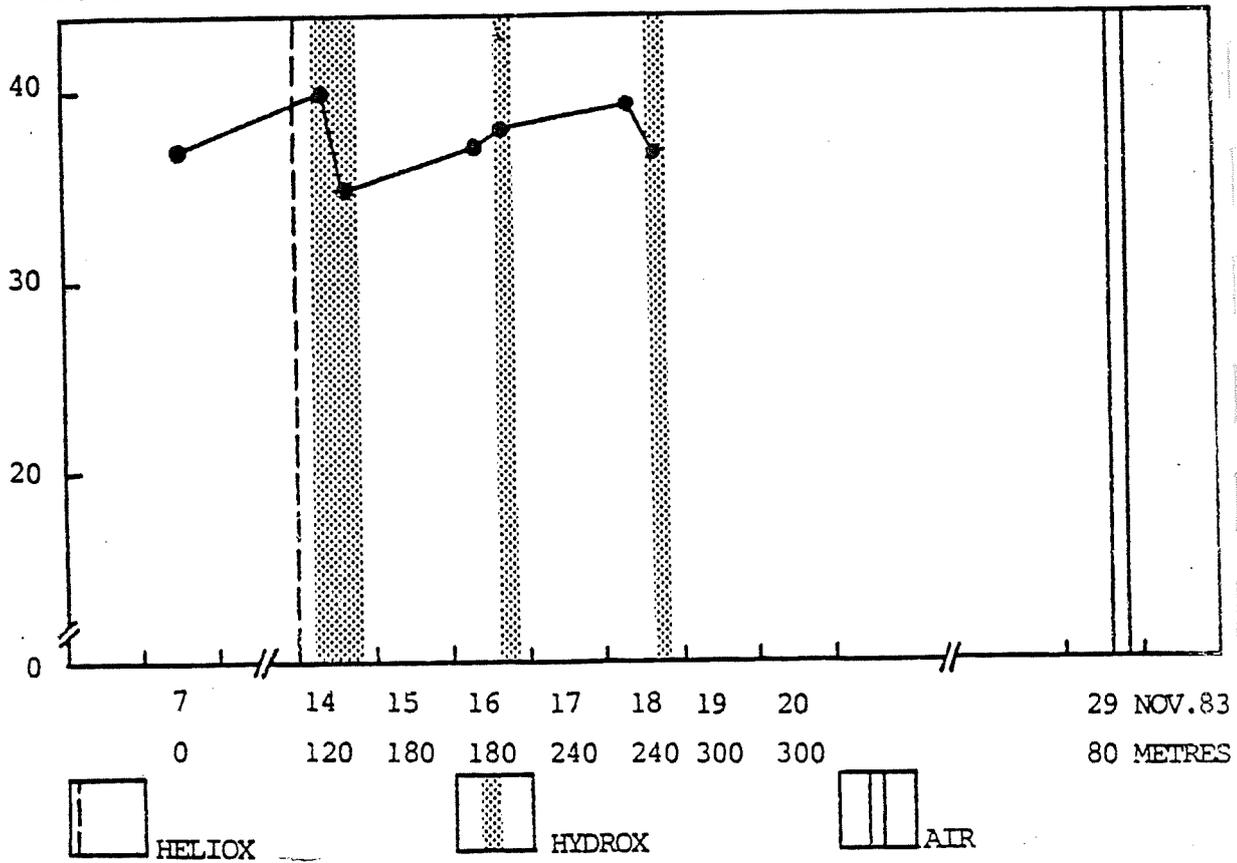
A 3



EVOLUTION DE LA DEXTERITE MANUELLE (nombre de chevilles rangées par minute) DU PLONGEUR A3 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX OU AIR.
(A 300M, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE CHEVILLES
RANGÉES PAR MINUTE

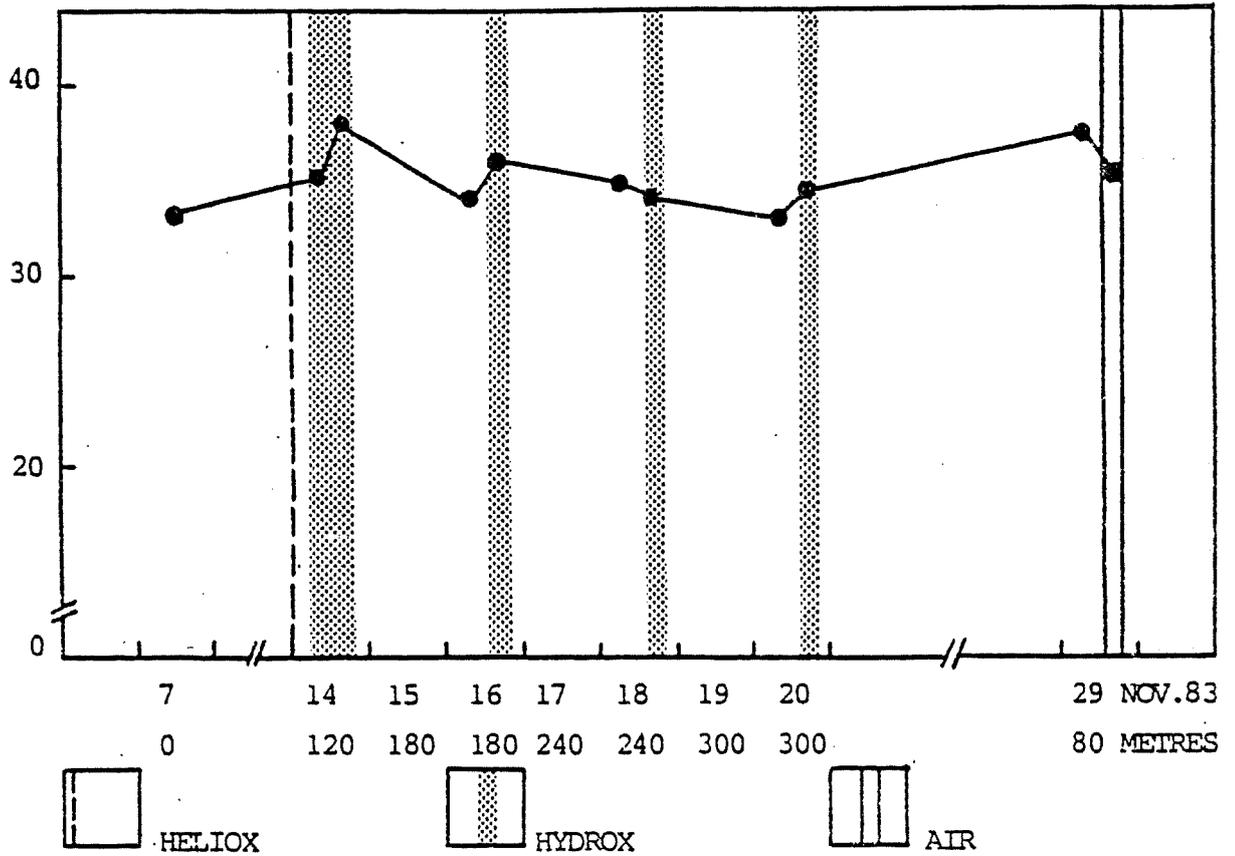
B 1



EVOLUTION DE LA DEXTERITE MANUELLE (nombre de chevilles rangées par minute) DU PLONGEUR B1 AU COURS L'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.
(A 300m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE CHEVILLES
RANGÉES PAR MINUTE

B 2

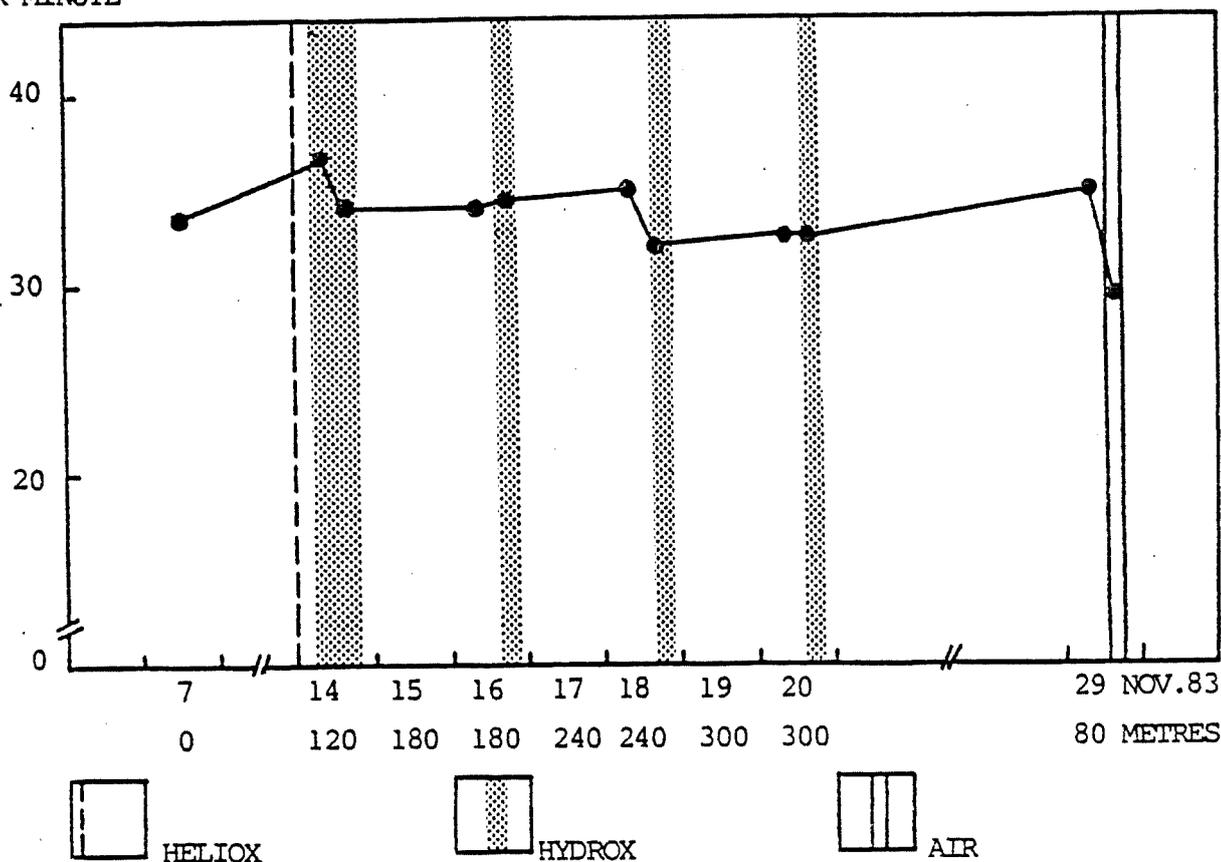


EVOLUTION DE LA DEXTERITE MANUELLE (nombre de chevilles rangées par minute) DU PLONGEUR B2 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE CHEVILLES
RANGÉES PAR MINUTE

B 3



EVOLUTION DE LA DEXTERITE MANUELLE (nombre de chevilles rangées par minute) DU PLONGEUR B3 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

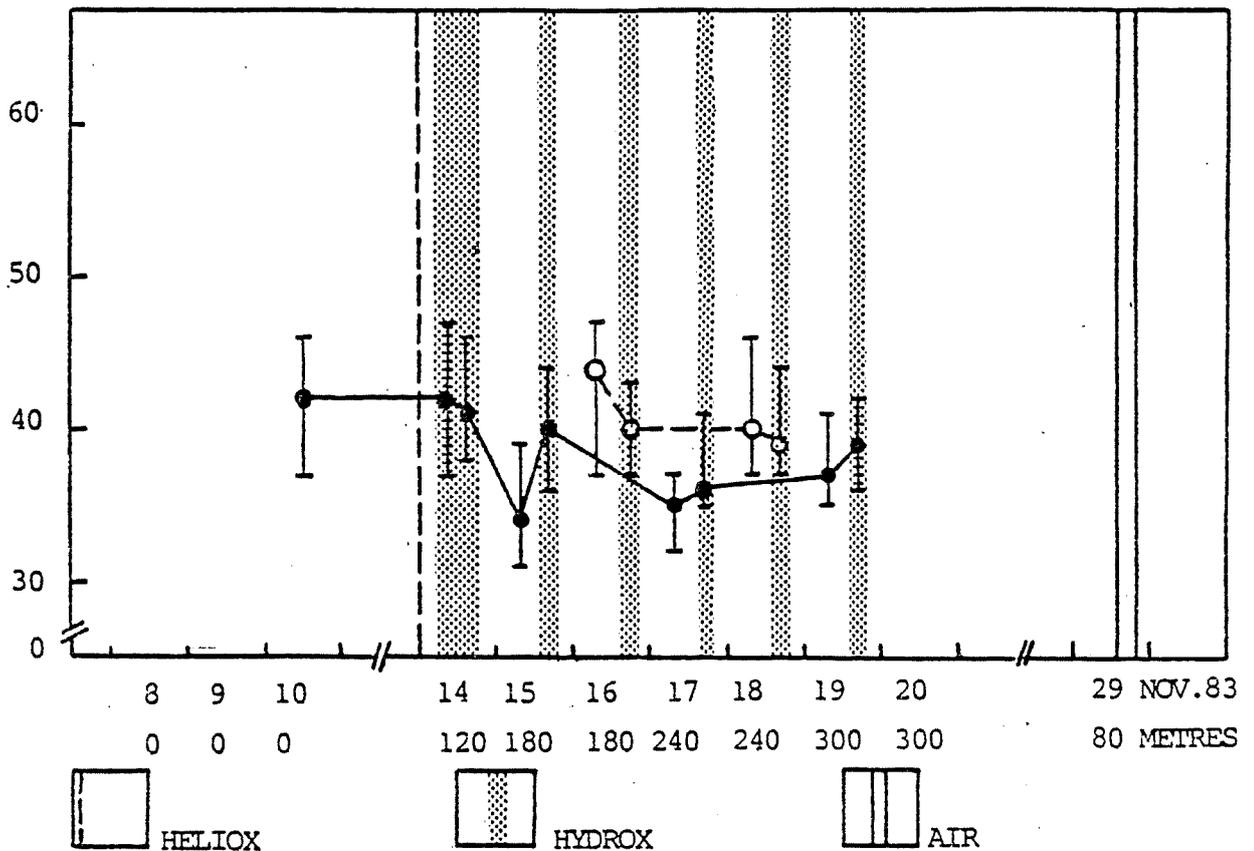
ANNEXE 4

COURBES INDIVIDUELLES DES RÉSULTATS OBTENUS
AU TEST DU TEMPS DE RÉACTION VISUEL DE CHOIX DES 6 PLONGEURS
D'HYDRA IV DURANT TOUTE L'EXPÉRIENCE

LA PERFORMANCE EST EVALUEE PAR LE TEMPS (EN CENTIEMES DE SECONDE)
MIS POUR REAGIR A L'IMPULSION LUMINEUSE

TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX
(centièmes de seconde)

A 1

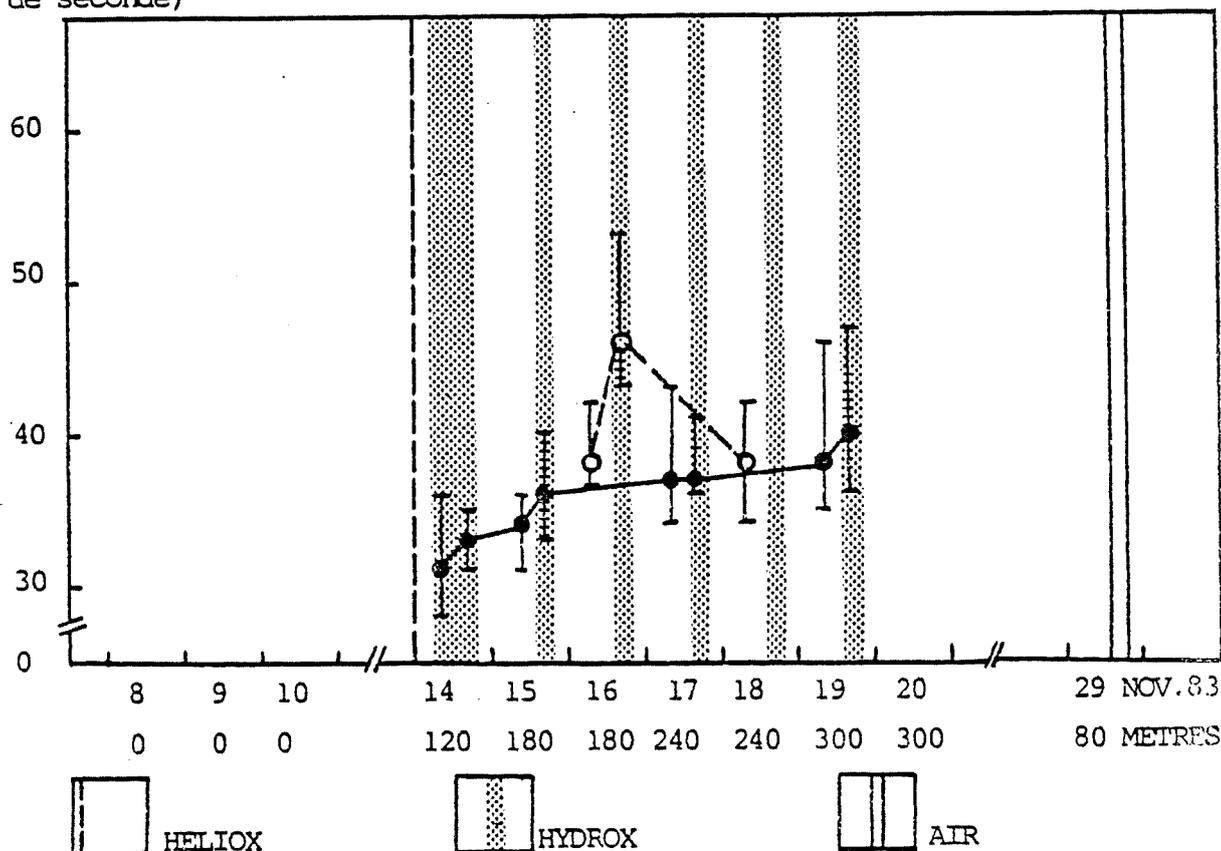


EVOLUTION DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (centièmes de seconde) AU SEC ●—● ET EN EAU ○—○ (médiane, quartile inférieur, quartile supérieur) DU PLONGEUR A1 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, ET 300 METRES SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX
(centièmes de seconde)

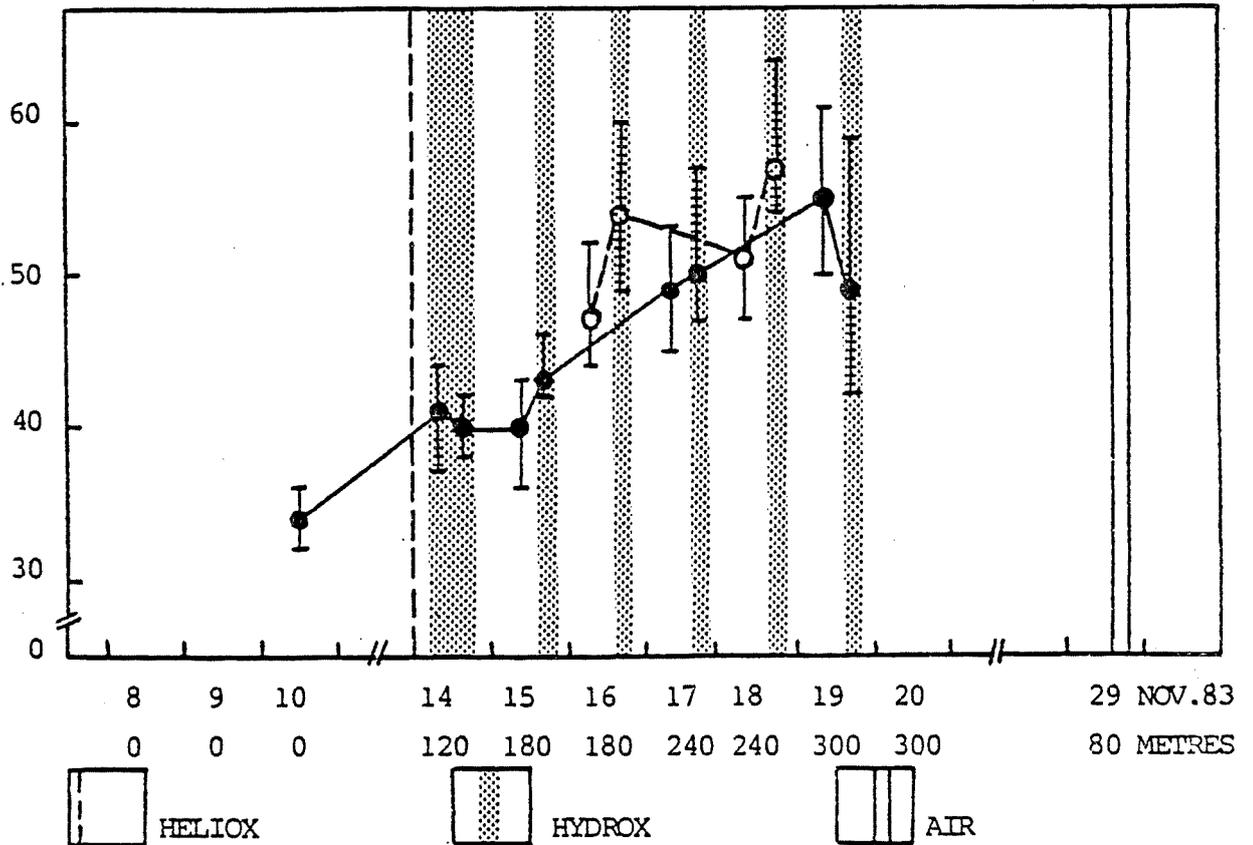
A 2



EVOLUTION DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (centièmes de seconde) AU SEC ●—● ET EN EAU ○—○ (médiane, quartile inférieur, quartile supérieur) DU PLONGEUR A2 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, ET 300 METRES SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX.
(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX
(centièmes de seconde)

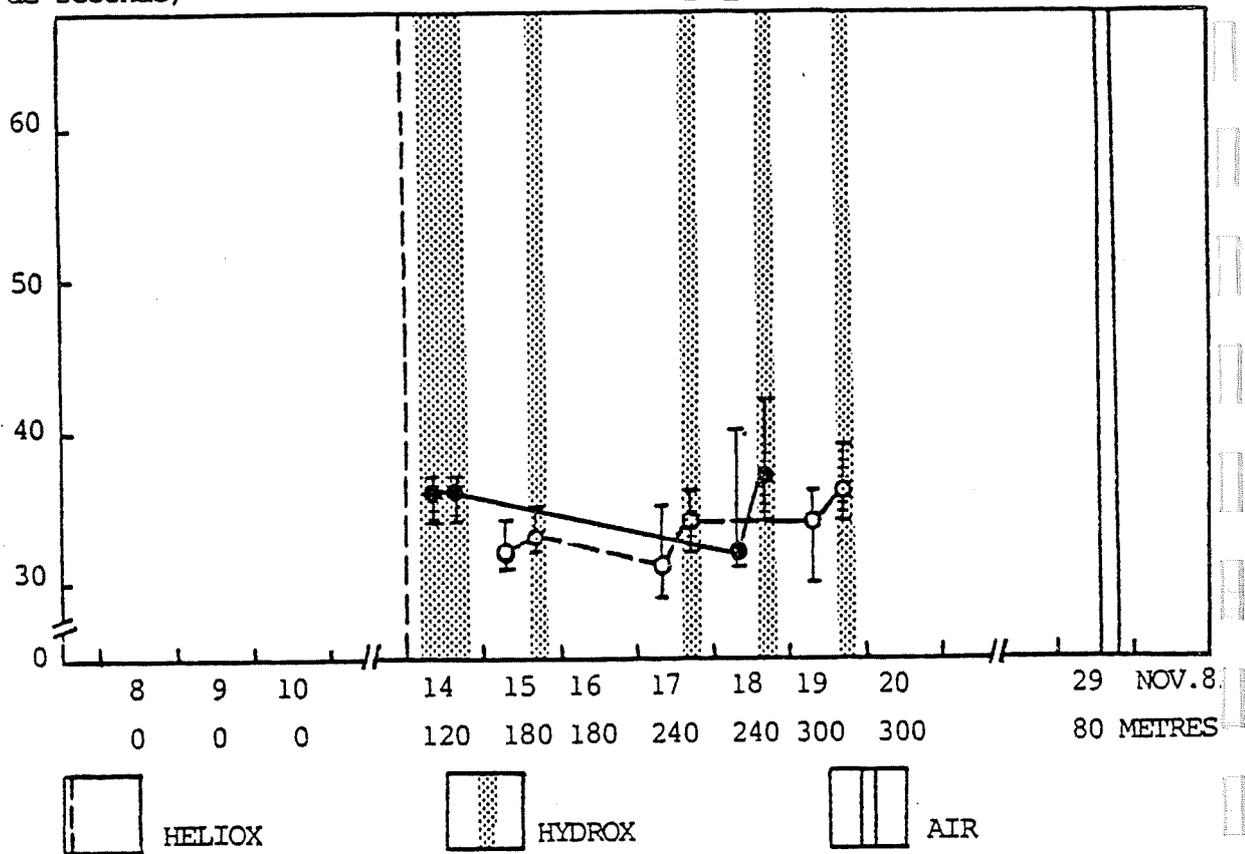
A 3



EVOLUTION DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (centièmes de seconde) AU SEC ●—● ET EN EAU ○—○ (médiane, quartile inférieur, quartile supérieur) DU PLONGEUR A3 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, ET 300 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX.
(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX
(centièmes de seconde)

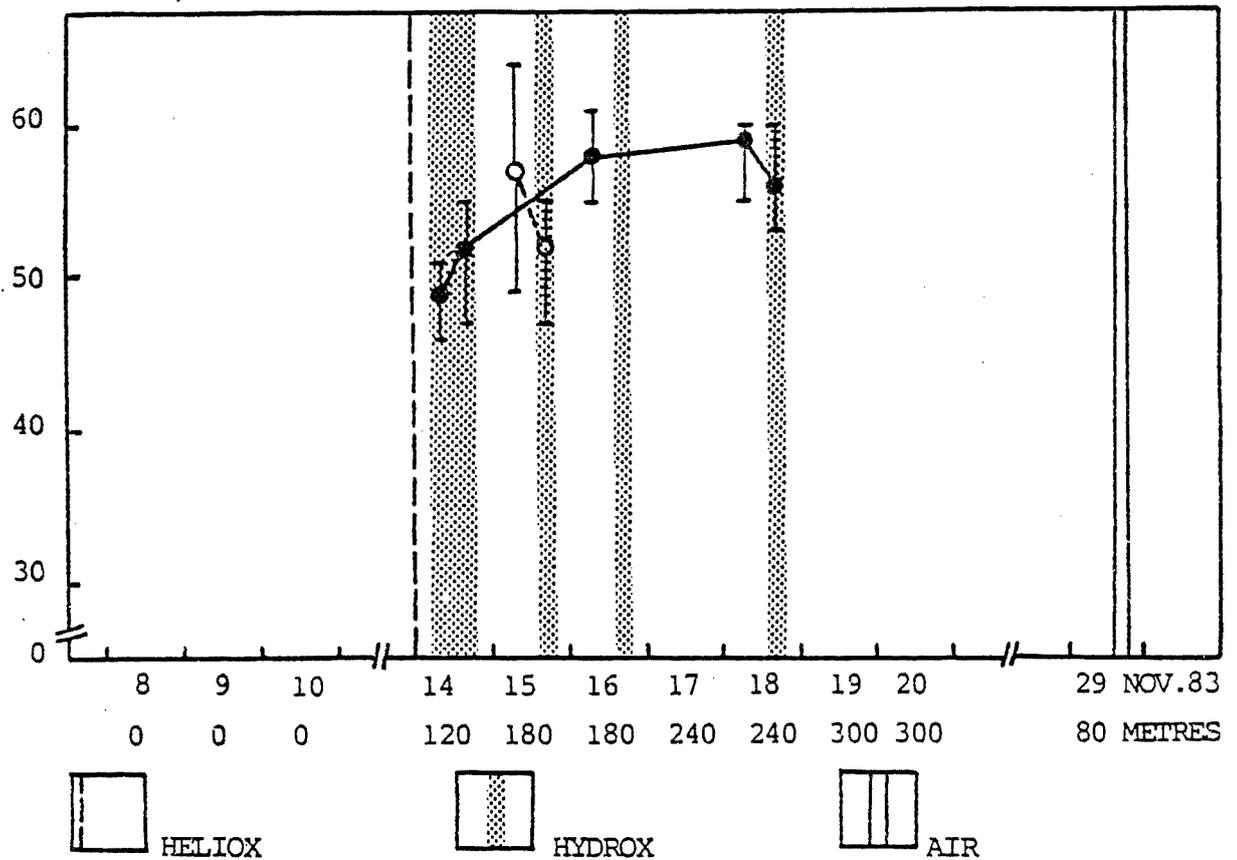
B 1



EVOLUTION DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (centièmes de seconde) AU SEC ●—● ET EN EAU ○—○ (médiane, quartile inférieur, quartile supérieur) DU PLONGEUR B1 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, ET 300 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX.
(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX
(centièmes de seconde)

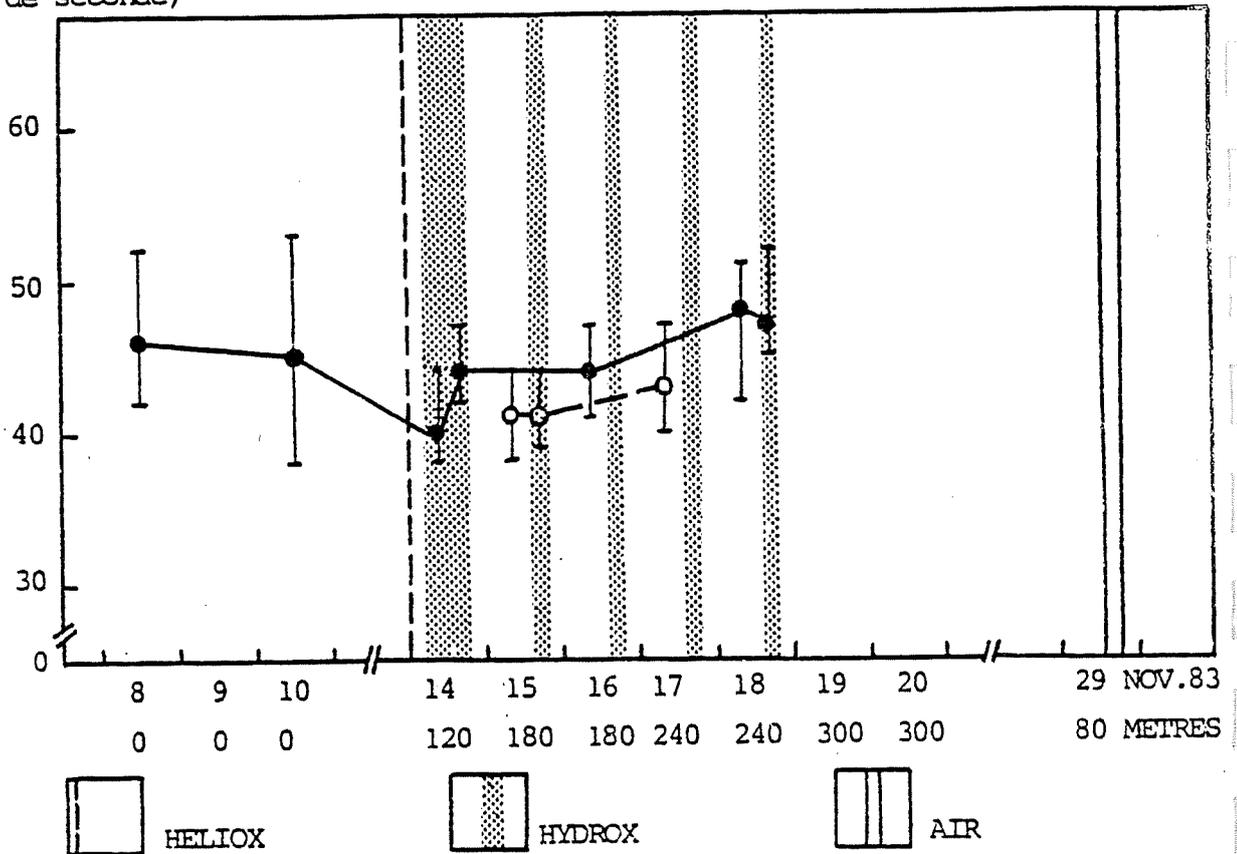
B 2



EVOLUTION DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (centièmes de seconde) AU SEC ●—● ET EN EAU ○—○ (médiane, quartile inférieur, quartile supérieur) DU PLONGEUR B2 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, ET 300 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX.
(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX
(centièmes de seconde)

B 3



EVOLUTION DU TEMPS DE REACTION VISUEL DE CHOIX (centièmes de seconde) AU SEC ●—● ET EN EAU ○—○ (médiane, quartile inférieur, quartile supérieur) DU PLONGEUR B3 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, ET 300 METRES SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

A N N E X E 5

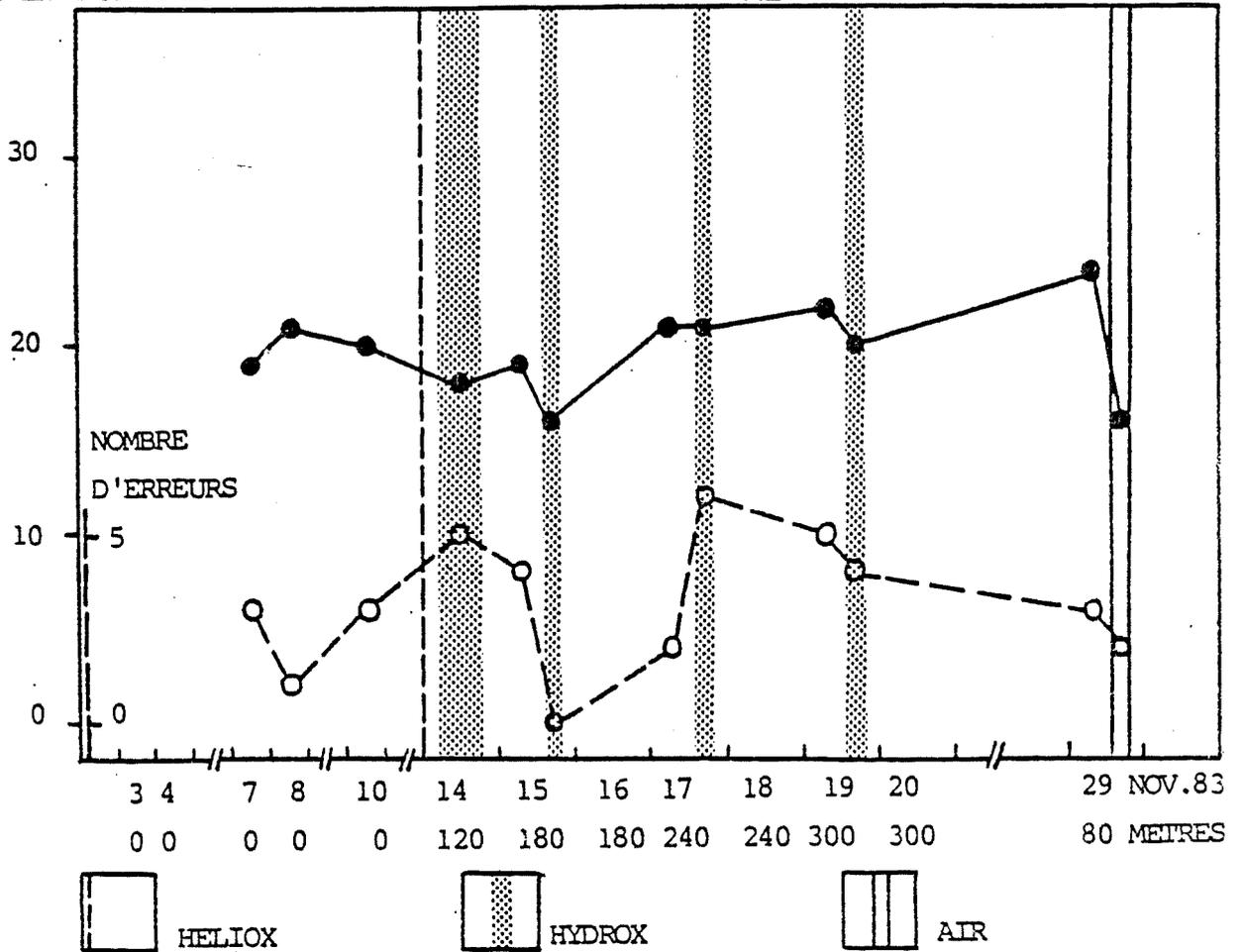
COURBES INDIVIDUELLES DES RÉSULTATS
OBTENUS AU TEST DES MULTIPLICATIONS
DES 6 SUJETS D'HYDRA IV DURANT TOUTE L'EXPÉRIENCE

LA PERFORMANCE EST EVALUEE PAR 2 PARAMETRES :

- LE NOMBRE DE MULTIPLICATIONS EFFECTUEES EN 2 MINUTES
- LE NOMBRE D'ERREURS COMMISES PENDANT LES 2 MINUTES
DU TEST

NOMBRE DE MULTIPLICATIONS
EFFECTUEES EN 2 MINUTES

A1

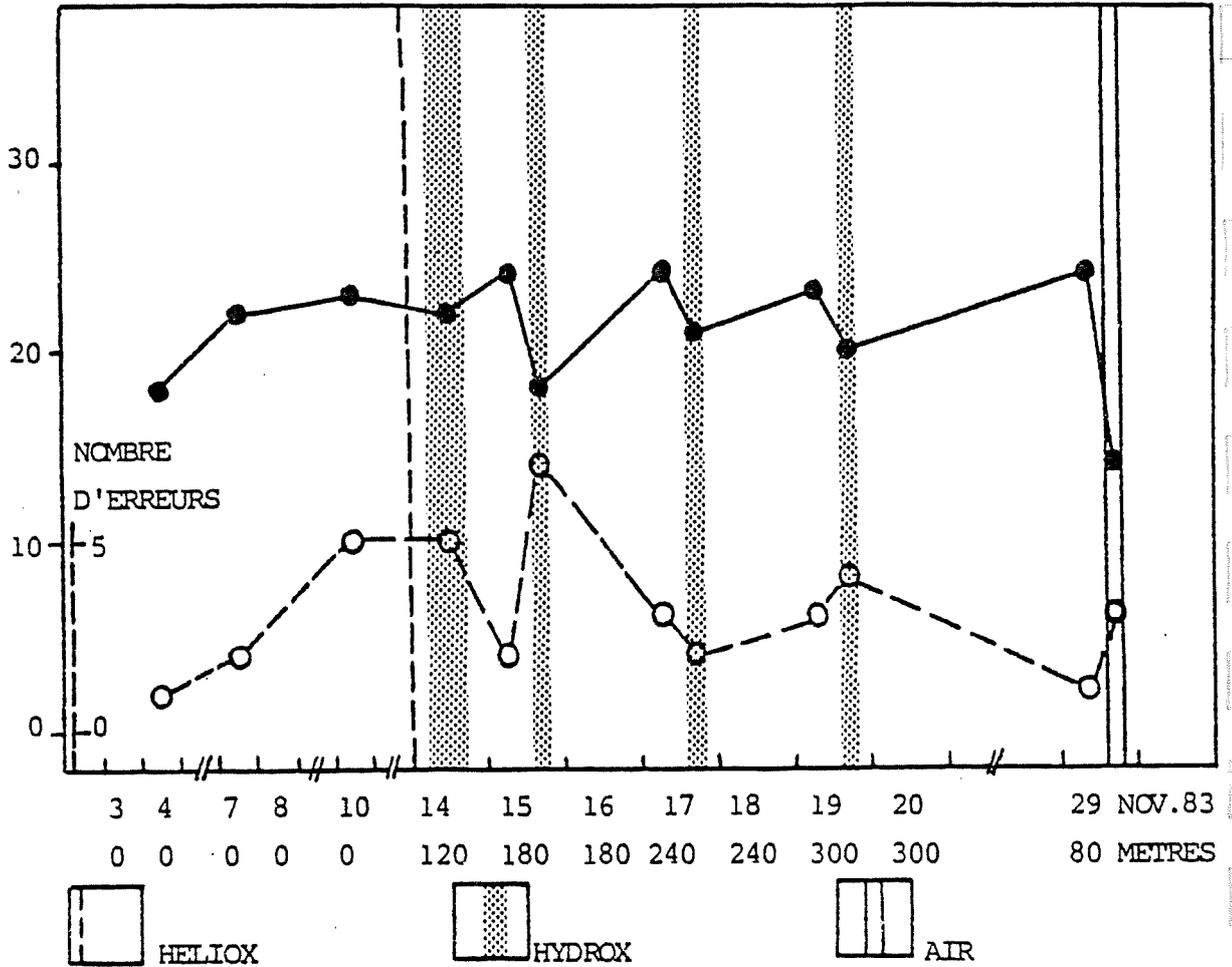


EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DES MULTIPLICATIONS
(nombre de multiplications effectuées ●—● et nombre
d'erreurs ○- -○) DU PLONGEUR A1 AU COURS D'HYDRA IV,
A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS
HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE MULTIPLICATIONS
EFFECTUEES EN 2 MINUTES

A 2

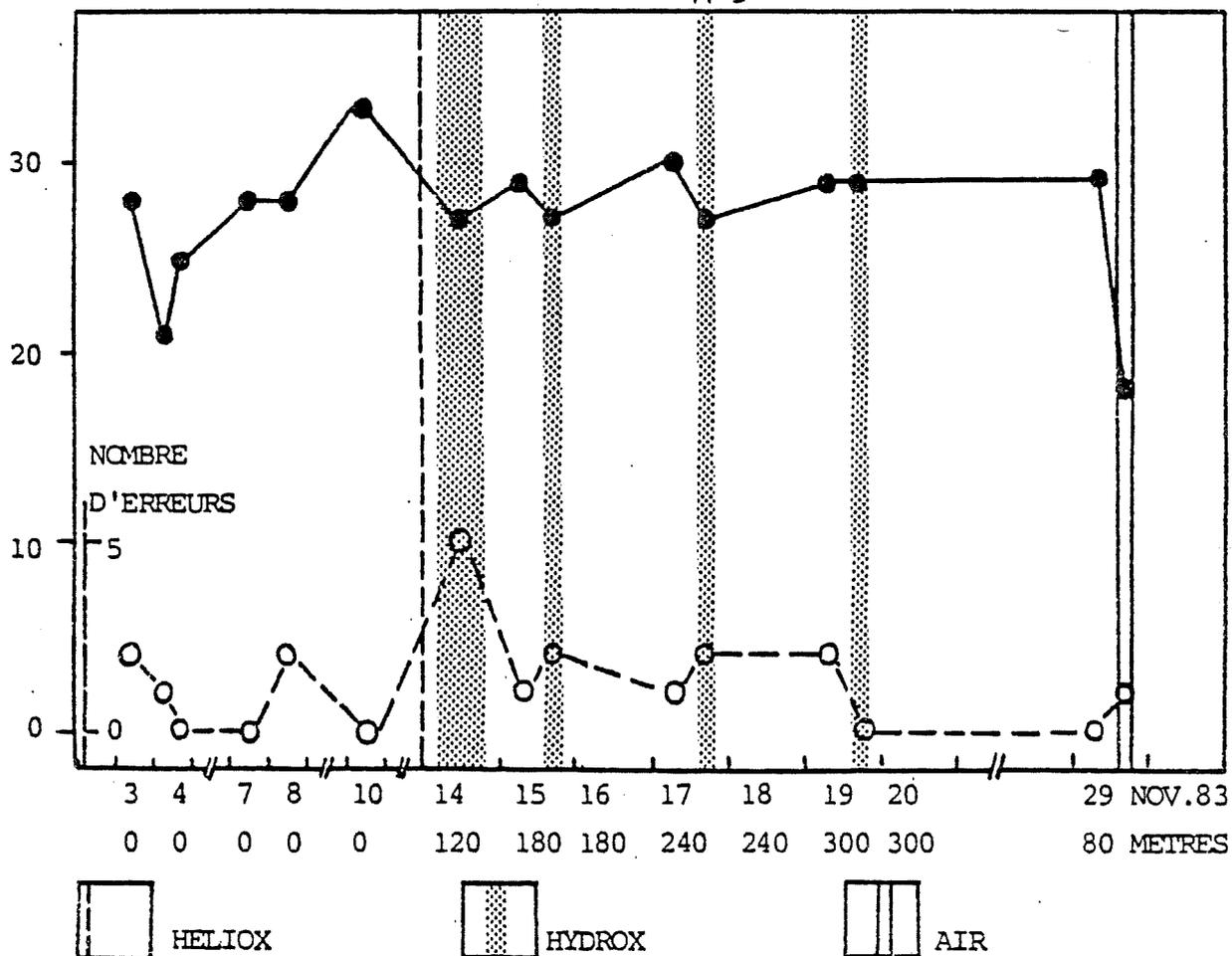


EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DES MULTIPLICATIONS
(nombre de multiplications effectuées ●—● et nombre
d'erreurs ○—○) DU PLONGEUR A2 AU COURS D'HYDRA IV,
A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS
HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE MULTIPLICATIONS
EFFECTUEES EN 2 MINUTES

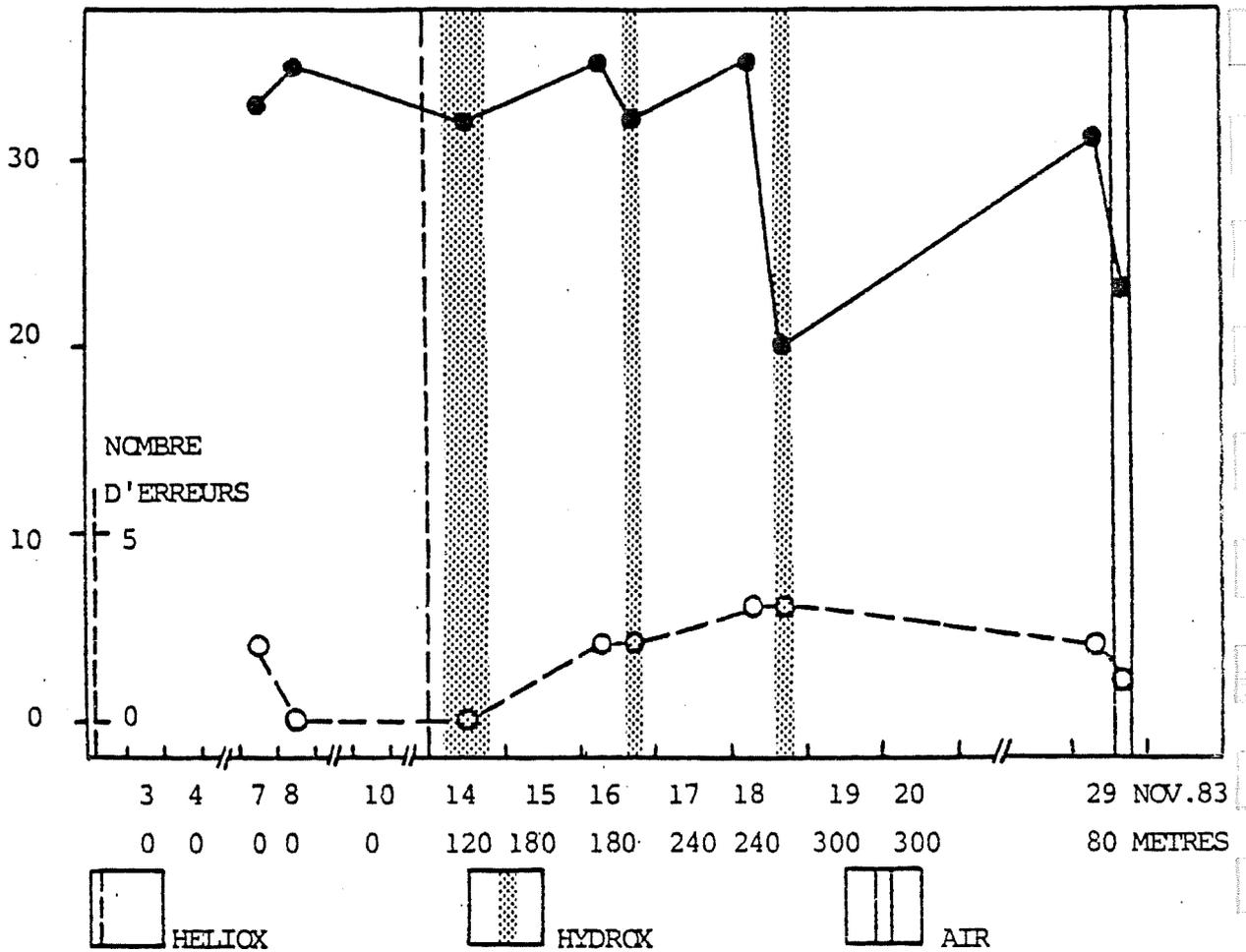
A 3



EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DES MULTIPLICATIONS
(nombre de multiplications effectuées ●—● et nombre
d'erreurs ○---○) DU PLONGEUR A3 AU COURS D'HYDRA IV,
A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS
HYDROX, OU AIR.
(A 300m, l'hydrox contenait 24% He)

NOMBRE DE MULTIPLICATIONS
EFFECTUEES EN 2 MINUTES

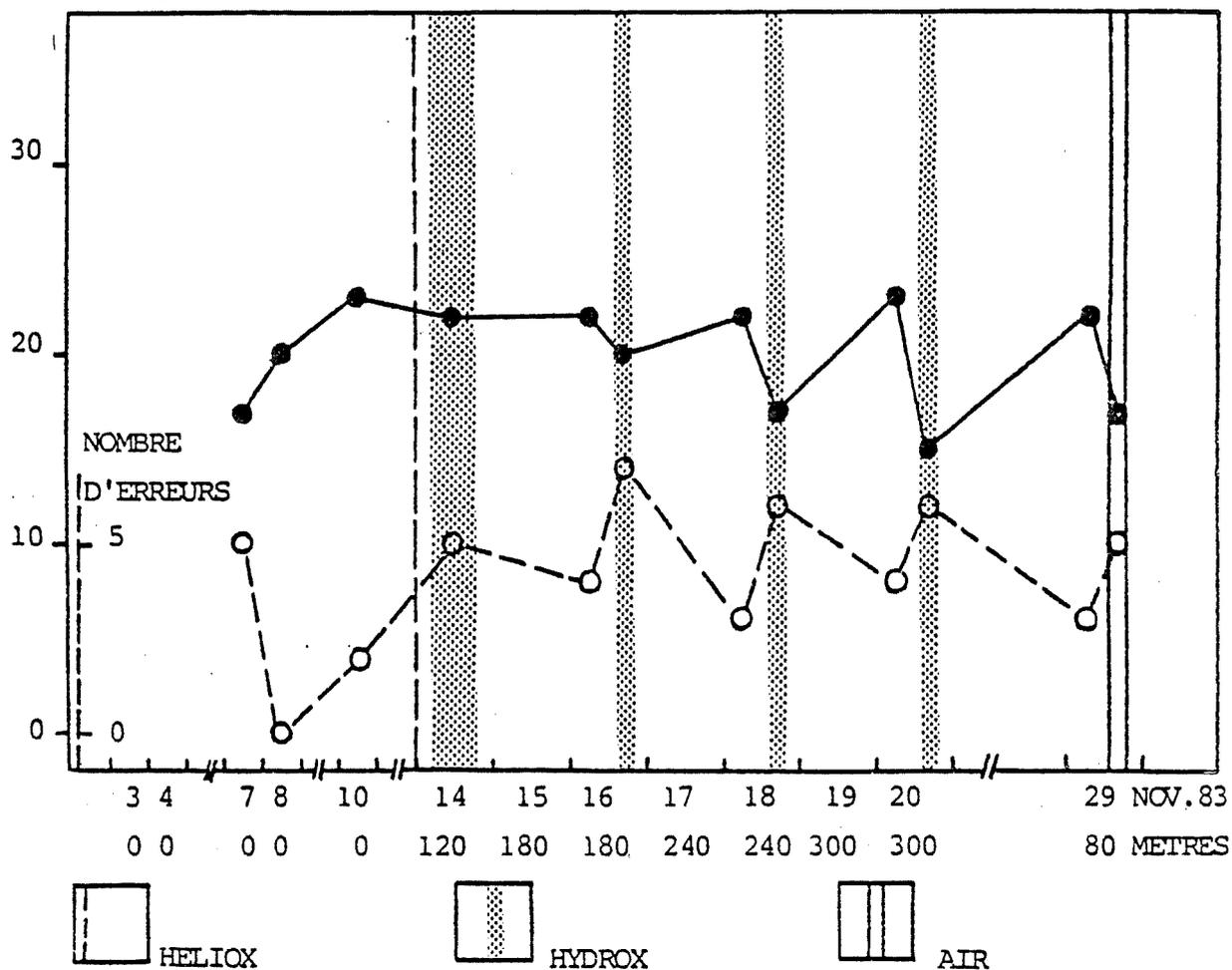
B 1



EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DES MULTIPLICATIONS
(nombre de multiplications effectuées ●—● et nombre
d'erreurs ○---○) DU PLONGEUR B1 AU COURS D'HYDRA IV,
A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS
HYDROX, OU AIR.
(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE MULTIPLICATIONS
EFFECTUEES EN 2 MINUTES

B 2

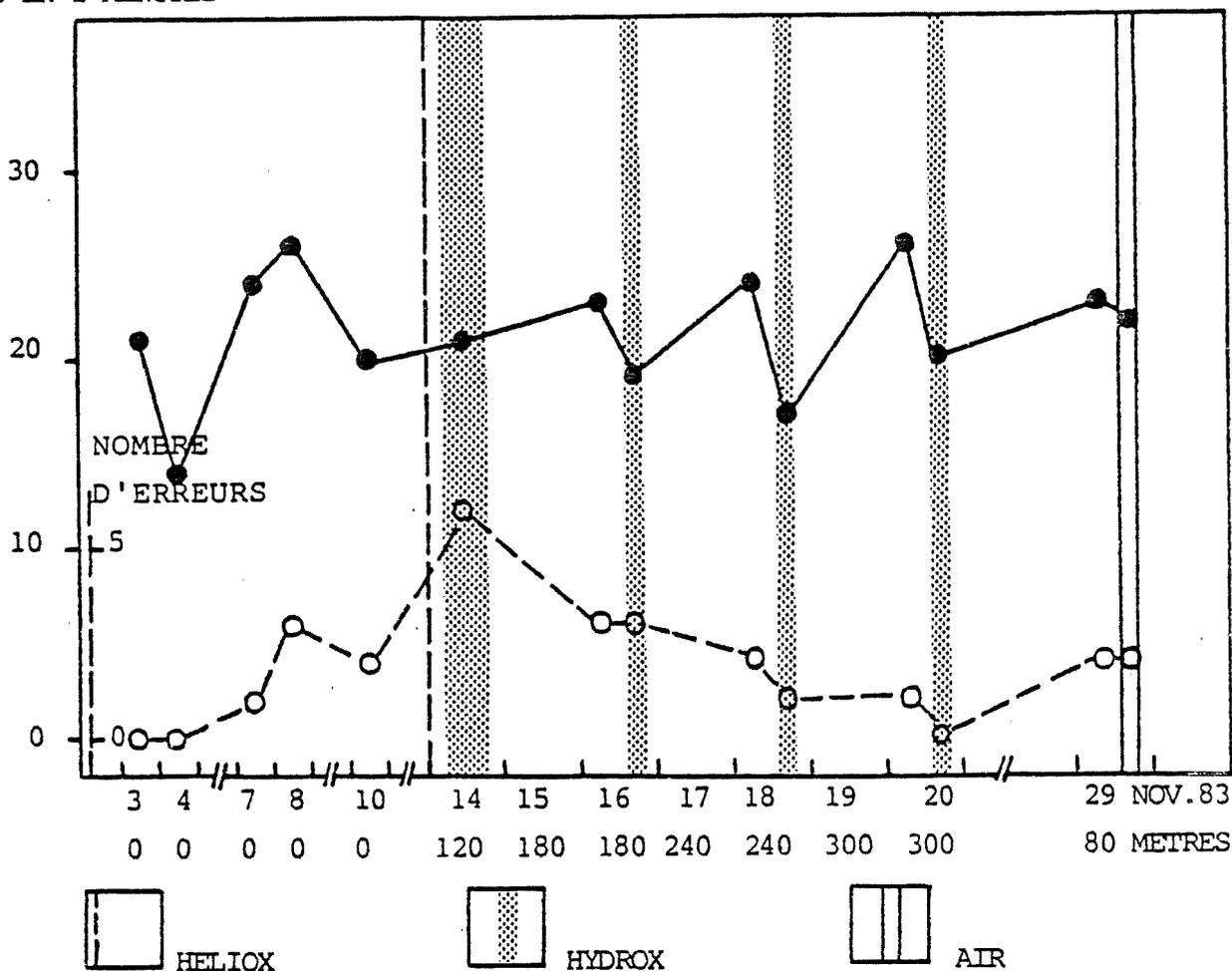


EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DES MULTIPLICATIONS
(nombre de multiplications effectuées ●—● et nombre
d'erreurs ○—○) DU PLONGEUR B2 AU COURS D'HYDRA IV,
A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS
HYDROX, OU AIR.

(A 300m, l'hydrox contenait 24% He)

NOMBRE DE MULTIPLICATIONS
EFFECTUEES EN 2 MINUTES

B 3



EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DES MULTIPLICATIONS
(nombre de multiplications effectuées ●—● et nombre
d'erreurs ○—○) DU PLONGEUR B3 AU COURS D'HYDRA IV,
A 120, 180, 240, 300', ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS
HYDROX, OU AIR.
(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

A N N E X E 6

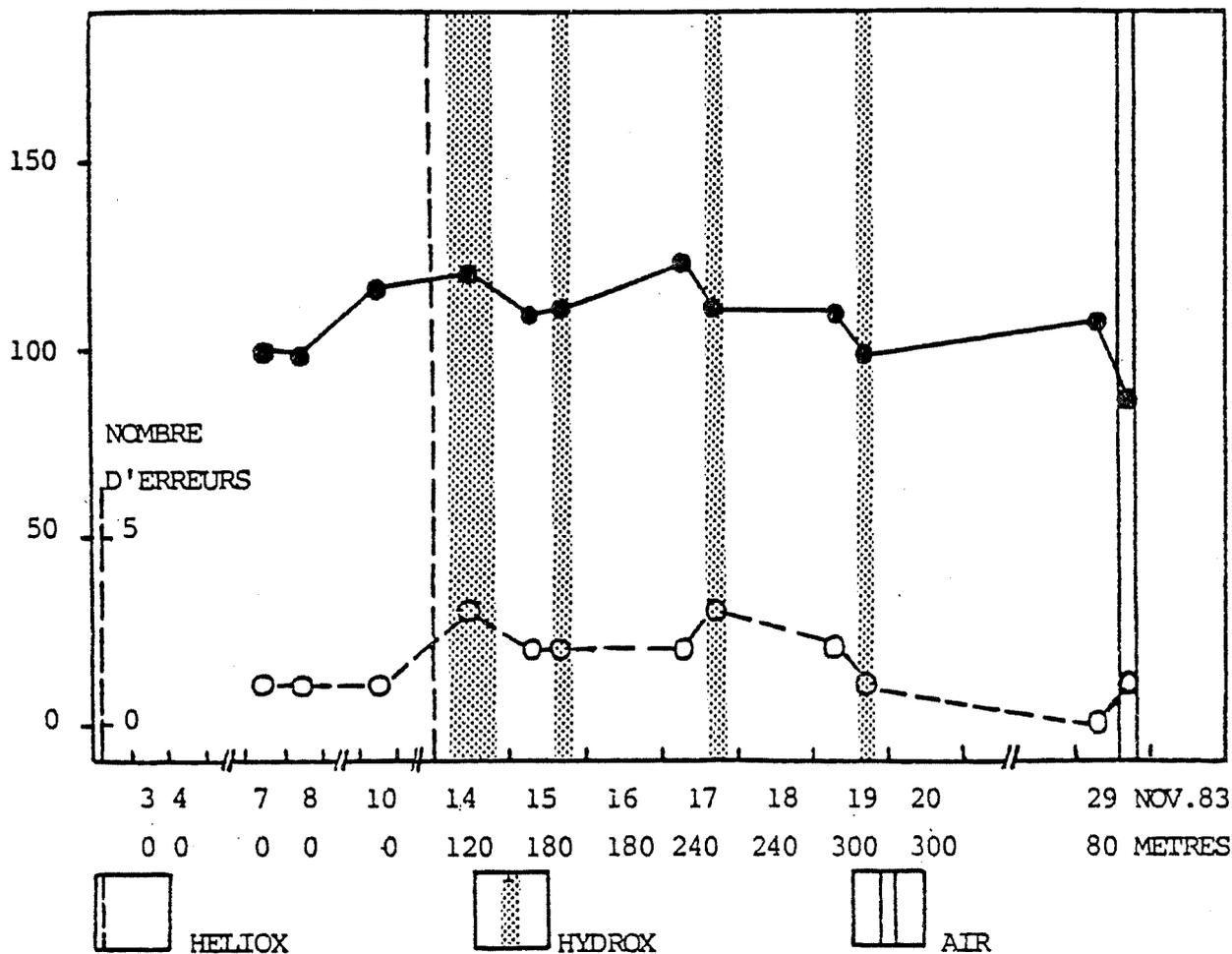
COURBES INDIVIDUELLES DES RÉSULTATS
OBTENUS AU TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES
DES 6 PLONGEURS D'HYDRA IV DURANT TOUTE L'EXPÉRIENCE

LA PERFORMANCE EST EVALUEE PAR 2 PARAMETRES :

- LE NOMBRE DE CHIFFRES EXAMINES EN 1 MINUTE
- LE NOMBRE D'ERREURS COMMISES (NOMBRES DIFFERENTS
NON RECONNUS) PENDANT LE TEST

NOMBRE DE CHIFFRES
EXAMINES EN 1 MINUTE

A 1

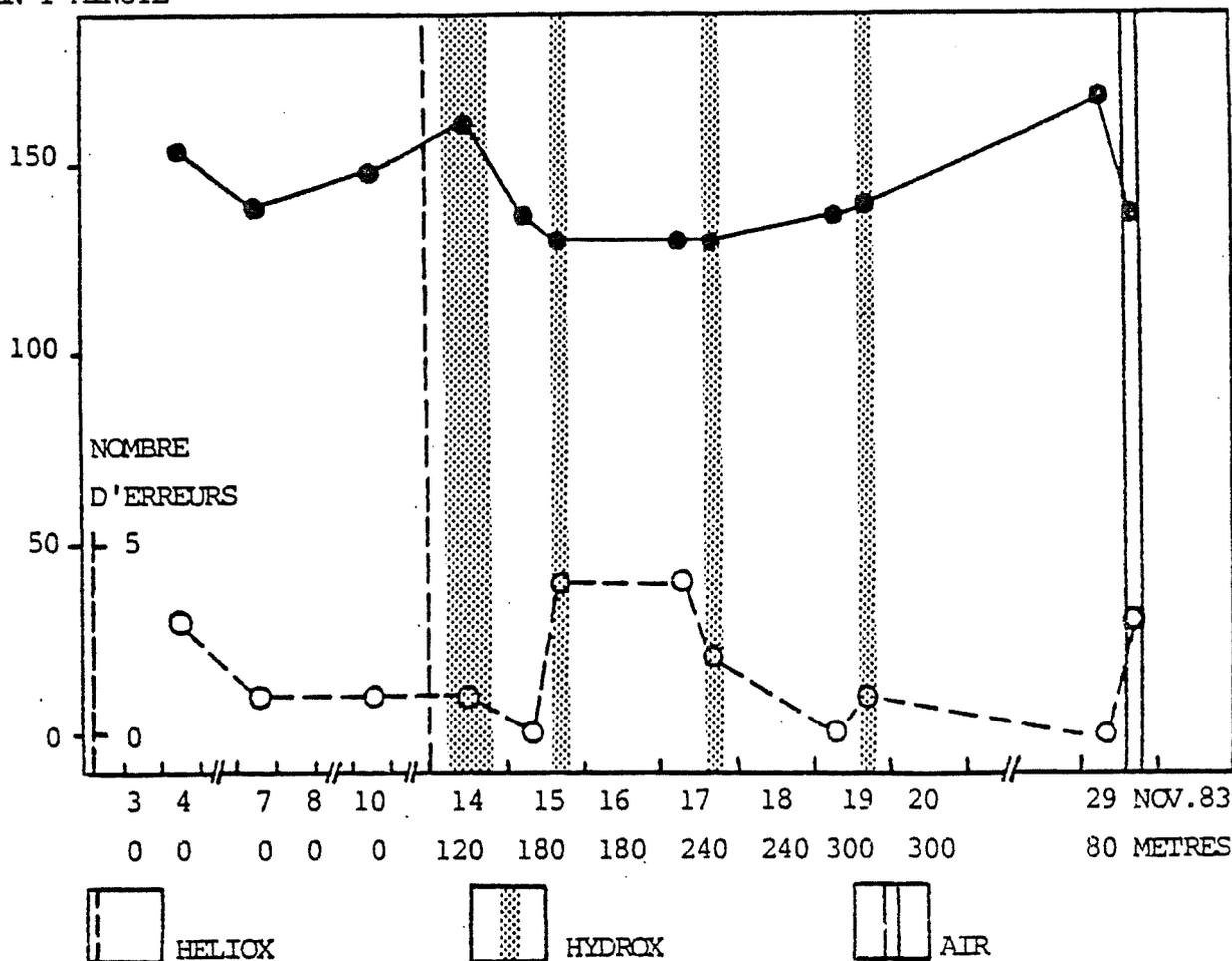


EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES (nombre de chiffres examinés ●—● et nombre d'erreurs ○—○) DU PLONGEUR A1 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SCUS HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE CHIFFRES
EXAMINES EN 1 MINUTE

A 2

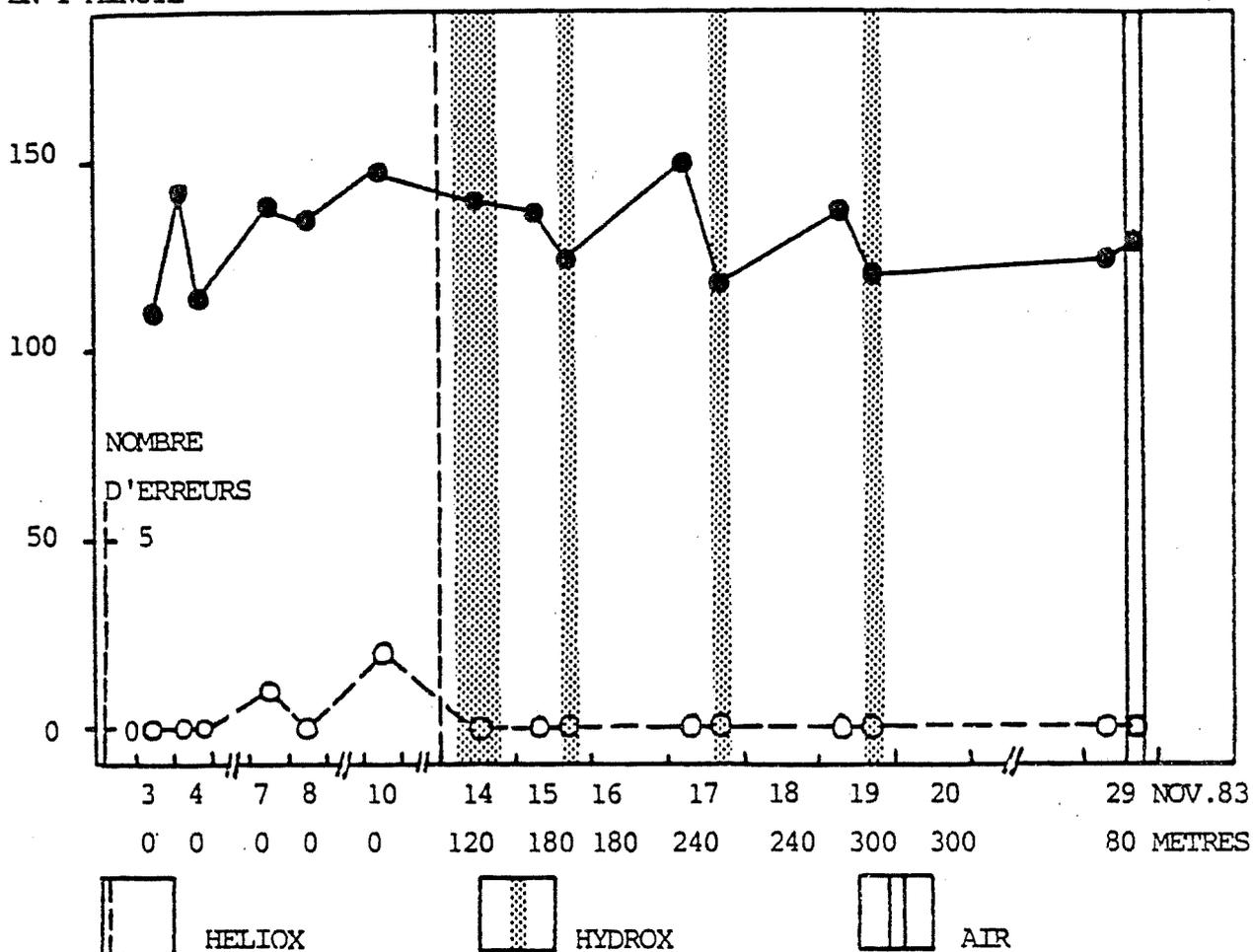


EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES (nombre de chiffres examinés ●—● et nombre d'erreurs ○---○) DU PLONGEUR A2 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE CHIFFRES
EXAMINES EN 1 MINUTE

A 3

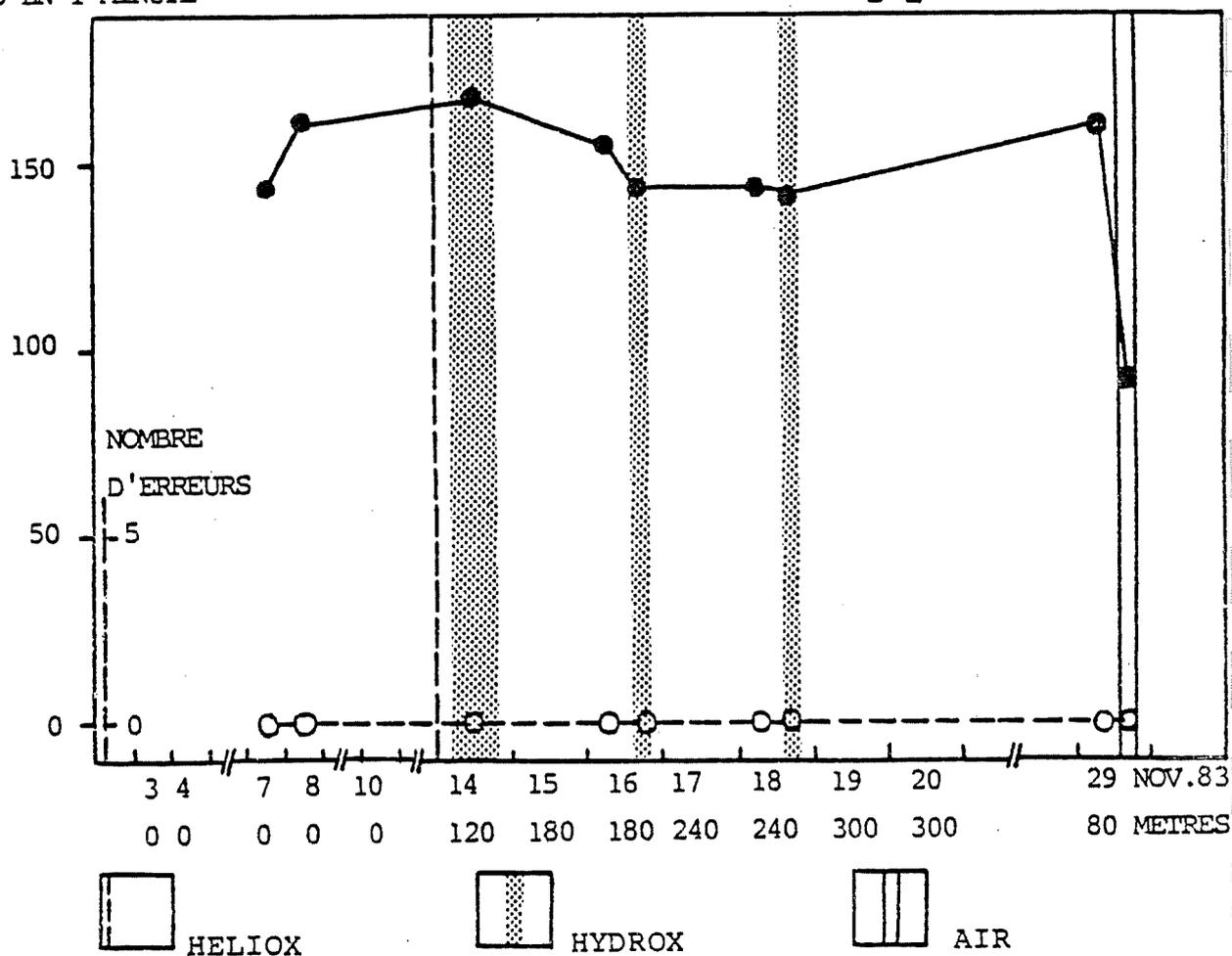


EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES (nombre de chiffres examinés ●—● et nombre d'erreurs ○—○) DU PLONGEUR A3 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE CHIFFRES
EXAMINES EN 1 MINUTE

B 1

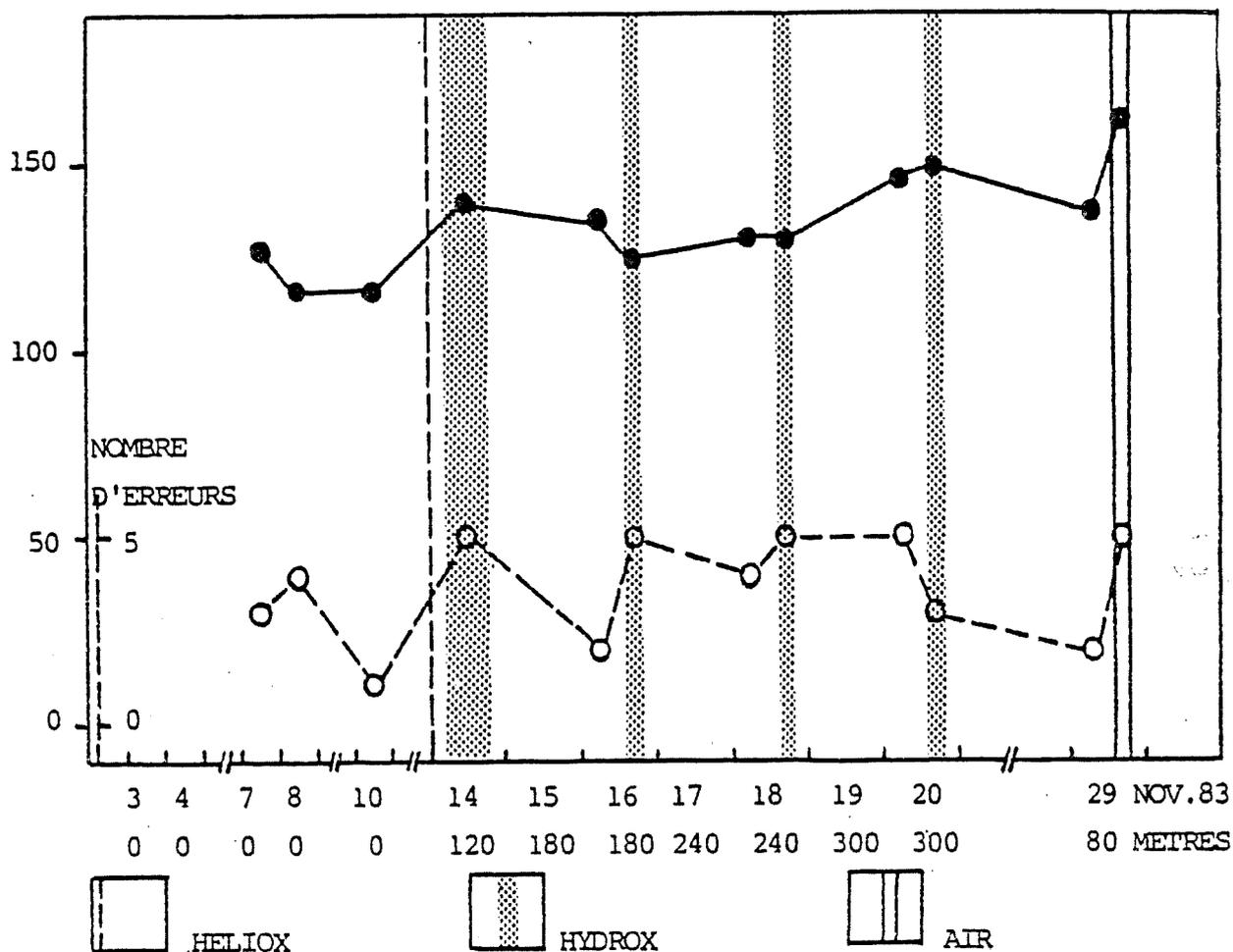


EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES (nombre de chiffres examinés ●—● et nombre d'erreurs ○—○) DU PLONGEUR B1 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE CHIFFRES
EXAMINES EN 1 MINUTE

B 2

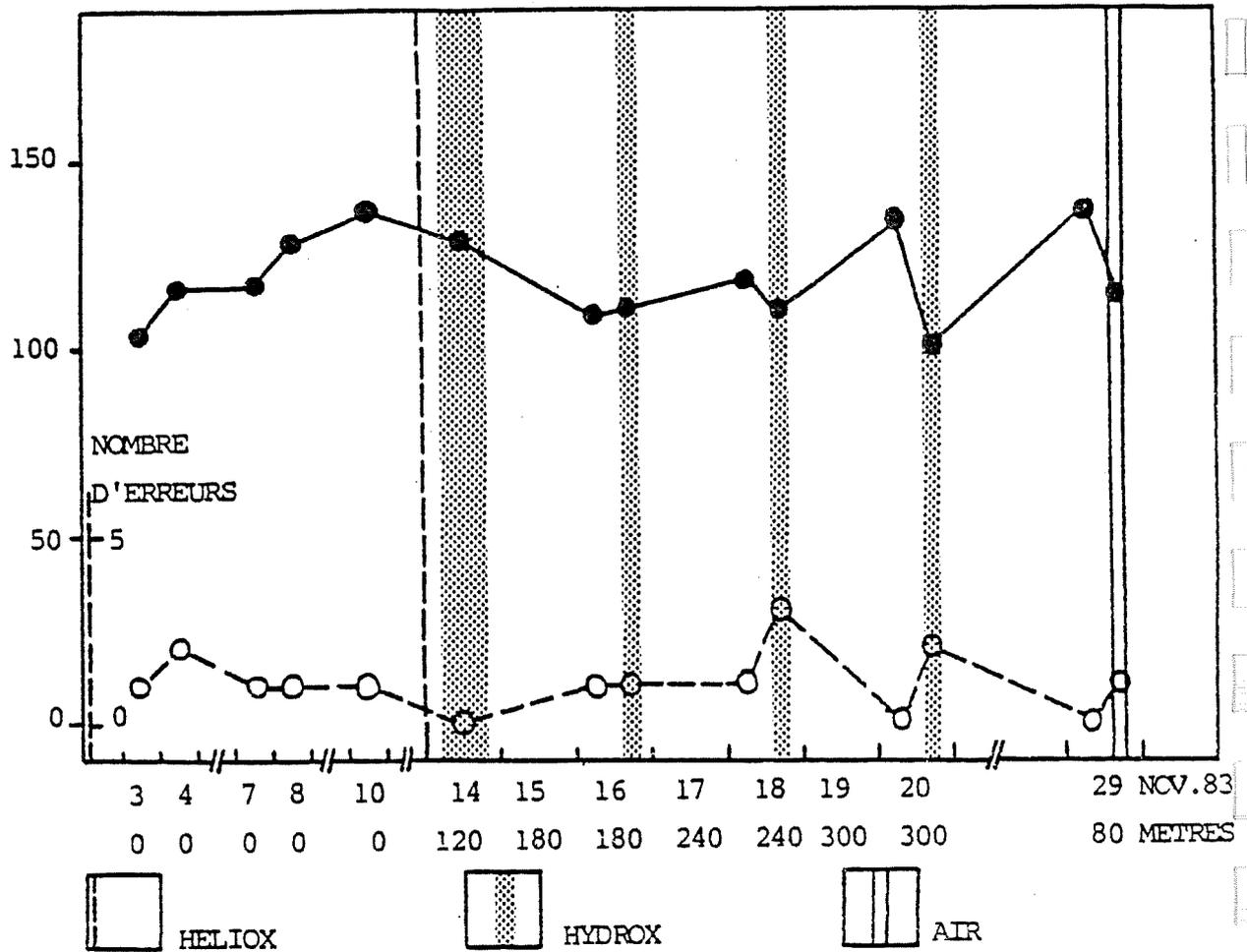


EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES (nombre de chiffres examinés ●—● et nombre d'erreurs ○—○) DU PLONGEUR B2 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

NOMBRE DE CHIFFRES
EXAMINES EN 1 MINUTE

B 3



EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU TEST DE RECONNAISSANCE DE CHIFFRES (nombre de chiffres examinés ●—● et nombre d'erreurs ○—○) DU PLONGEUR B3 AU COURS D'HYDRA IV, A 120, 180, 240, 300, ET 80 METRES, SOUS HELIOX ET SOUS HYDROX, OU AIR.

(A 300 m, l'hydrox contenait 24% He).

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

AIR LIQUIDE

B. P.

BRITTOIL

C.F.P.

CONOCO

ELF

I.F.P.

NUTEC

UGLAND