



HAL
open science

HYDRA X PROJECT

Sa Comex

► **To cite this version:**

| Sa Comex. HYDRA X PROJECT. COMEX. 1990. <hal-04676147>

HAL Id: hal-04676147

<https://hal.science/hal-04676147v1>

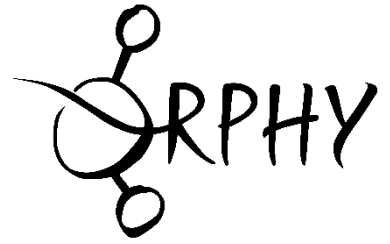
Submitted on 23 Aug 2024

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 CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - 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.

B. GAARDTTE

COMEX
SCIENTIFIC MANAGEMENT

HYDRA X PROJECT
DEVELOPMENT OF VERY DEEP DIVING

« THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF COMEX, all information contained herein may neither be reproduced, used, disclosed, transmitted nor in any way made public without the written permission of the owner. any person in possession of this document acknowledges being bound by the obligation to treat it as confidential».

BG/AB.054.90

JULY 1990

comex

« THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF COMEX, all information contained herein may neither be reproduced, used, disclosed, transmitted nor in any way made public without the written permission of the owner. any person in possession of this document acknowledges being bound by the obligation to treat it as confidential».

CONTENTS

| | |
|---|----------------|
| INTRODUCTION | Page 3 |
| 1. State of Existing Technique | Page 4 |
| 2. Description of Expected Technological Development | Page 6 |
| 3. Project Main Phases | Page 10 |
| 4. Project Organization | Page 15 |
| 5. Planning | Page 17 |

INTRODUCTION

The latest development of hydrogen diving that COMEX carried out within the HYDRA programme proved the undeniable advantages of this new diving method compared to the traditional helium method.

HYDRA VIII, which consisted of live operations with divers at sea between 520 and 534 msw showed that it was possible to use this new method for industrial purposes. The work performance carried out, in metrology and while handling rigid and flexible pipeline connections, showed that the divers' intellectual and physical faculties were not affected by high pressure at this depth.

The resources and methods developed from HYDRA V to HYDRA VIII are adapted to depths below 600 msw. However, from the results obtained, we are convinced that this limit can be extended. At this time, we can reasonably assume that human underwater interventions on future oil and gas producing wells will reach 600 to 800 msw. The HYDRA X operations will aim at proving it.

This HYDRA X project aims at achieving an experimental dive in hyperbaric chamber, in order to control the divers' physiological behaviour under very high pressure, using a "hydrogenated" breathing mixture. This operation has been preceded by a series of experimental dives in order to optimize the gas mixtures, the compression and decompression tables and the hyperbaric environmental parameters.

HYDRA X will be managed by COMEX, which has the appropriate technical means as well as highly experienced scientists in hydrogen technique. As in the past, a wide scientific cooperation will be offered to international laboratories with personnel specialized in hyperbaric, in physiology, biology and psychosociology;

This development programme will be decisive in setting the limits of very deep industrial diving. The oil companies will then be aware of the limitations of human intervention limits. This will allow them to adjust and adapt their underwater production equipment according to man's capability to install and maintain it. We believe this to be a decisive step forward.

1. STATE OF EXISTING TECHNIQUE

1.1 HELIOX Diving

Industrial deep diving is carried out according to the saturation dive method with breathing mixture based on helium. This enables general interventions on the continental shelf down to 300 msw. However, around 250 msw, the diver is faced with the High Pressure Nervous Syndrome (HPNS) connected to the gas pressure action on the central nervous system. The HPNS increases with depth and produces neurological disorders affecting considerably the diver's efficiency. The density of the breathing mixture is also a limiting factor; as it increases proportionally with depth, it provokes breathing efforts, which in turns lowers working capacity.

Consequently, we set the limit of helium operational diving at approximately 400 msw. At this depth, using HELIOX, we cannot count on a highly operational nor physical performance on the divers' part.

The physiological limits of deep diving based on helium are now well known. The following experiments have been the main stages in identifying them:

- experiments led by COMEX:

* PHYSALIE VI in 1972

During which two divers were pressurized at 6.2 MPa (absolute) or equivalent to 610 msw

* SAGITTAIRE IV in 1974

Two divers stayed 50 hours at 6.2 MPa before returning to the open air 9 days later and after spending 25 days in a chamber.

- experiments led by COMEX and the FRENCH NAVY:

* ENTEX 9 in 1983

Experimental dive to 613 msw with aquatic activities and diving industrial equipment testing.

- experimental chamber dives led by DUKE UNIVERSITY (USA)

* ATLANTIS 3 in 1981

where two divers reached the artificial depth of 686 msw with a Nitrogen TRIMIX (He, N₂, O₂).

* ATLANTIS 4 in 1982

Scheduled to 686 msw the experiment was stopped at 650 msw as one of the divers could not stand the hard conditions of hyperbaric confinement.

The use of Nitrogen TRIMIX showed a significant advantage compared to heliox (He-O₂). Nitrogen partly reduces the HPNS but symptoms such as tremor do not disappear completely.

A depth of 686 msw causes a high voluminal mass of Nitrogen TRIMIX; With 5 % nitrogen, it is equal to 16.6 gram per litre, ie. 13 times higher than atmospheric air. In such conditions, the divers strain to breathe, which brings discomfort and fatigue.

With a HYDRELIOX mix (H₂, He, O₂) at the same depth, the voluminal mass would be equal to 7.9 gram per litre that is, not even half of the Nitrogen 5 % TRIMIX.

This fact conducted COMEX to develop new breathing mixtures called HYDRELIOX and HYDROX.

1.2 HYDRELIOX / HYDROX DIVING

The hydrogen diving development since 1983 within COMEX HYDRA programme showed the advantage of using "hydrogenated" breathing mixtures.

With hydrogen, the following symptoms disappears:

- **HPNS clinical symptoms**, namely tremor, characteristic with helium, has totally vanished. The same observation can be made for myocloniae and fevers which are significant factors of fatigue during helium hyperbaric periods.
- **articular pains** which, in helium, affect the joints more frequently used (wrists, shoulders, knees,..) particularly during compression phases.
- **"stuffed nose"**; a very uncomfortable factor, which is also a characteristic of helium, is not observed with hydrogen. Digestive problems are significantly reduced due to the possibility of normal feeding with no deglutition difficulty.

All the divers who took part in HYDRA IV, V, VI, VII, operations said breathing comfort with hydrogen mixture was exceptional.

These significant improvements were confirmed in live conditions at sea during HYDRA VIII . They occurred in February and March 1988 at 520 and 534 msw. The divers worked nearly 30 hours outside the bell. The work was spread over 6 dives. During the last dive, one of the divers worked continuously for four hours and a half with no excessive fatigue. This would not have been possible with helium. The saturation lasted 30 days and when they left the chamber, the divers were in good physical and psychological health.

Thus, aside from the favourable results on the HPNS, hydrogen considerably improves breathing conditions.

2. EXPECTED TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT

During the previous phases of the hydrogen diving programme developed by COMEX since 1983, we were able to identify two constraints of this new diving method; one technical and one physiological:

Technical constraint

Due to its physico-chemical properties, hydrogen presents a wide inflammability range. This requires that material which is brittle-proof under pressure be used and that the oxygen rate limit be set at 2.5 % in breathing mixes.

However, these constraints are perfectly under control, thus enabling the establishment of proper means and methods for "hydrogenated" diving in risk-free conditions. The use of hydrogen in hyperbaric conditions is now well known. Moreover, by using the acquired knowledge of previous experiences, we just have to adapt the equipment to the nature of the new operation, thus avoiding an expensive development phase.

At this point, all technical data is available to build an operational diving system specific to hydrogen.

Physiological constraint

On a metabolic basis, hydrogen seems comparable to a neutral gas. The control of blood and urine constants made during the HYDRA IV to VIII dives showed no significant unbalance.

At shallow depth, the utilization limit is only related to the maximum oxygen ratio acceptable in the binary breathing mixes of the HYDROX type (H₂, O₂). With 2.5 % of oxygen, the normoxic value is reached as from 70 msw. HYDRA IX results showed the HYDROX use limit between 200 and 250 msw. The limiting factor is the narcotic effect of hydrogen. Beyond a certain partial pressure, narcosis becomes unacceptable.

The use of hydrogen with a HYDRELIOX ternary mix (H₂, He, O₂) presents a big advantage. The narcotic influence is used as an anti-HPNS effect beyond 250 msw. We observed in HYDRA VIII at sea that the divers' intellectual and physical faculties were not lessened by pressure at the depth of 520 and 534 msw. The absence of tremor was also a significant sign of HPNS absence.

We are now convinced that hydrogen can enable us to go much further and, given present developments in the deep sea oil fields, it is highly important to be aware of the divers' intervention limits.

2.1 HYDRA X ; The Development programme objective

The objective of the development program is to carry out an experimental dive in a hyperbaric chamber at very deep depth, with a breathing mixture based on hydrogen. From this dive it would be possible to determine man's pressure limits.

The depth to reach will range from 700 to 800 msw, unless otherwise stated. This research is presently in its advanced experimental phase, in order to ascertain the threshold of potential neuro-physiological alterations.

2.2 Innovations

The hydrogen experimental dive project at very deep depth is the final phase of the HYDRA programme. The realisation of this programme presented numerous innovations:

* Physiological field:

- new diving gas
- new anti-High Pressure Nervous Syndrome

* Technological field

- new individual diving equipment of high performance (breathing unit, thermal protection suit)
- first "chemical decompression" device for the chambers
- first hydrogen saturation dive operational unit
- first operational deep dive with hydrogen

HYDRA X represents the final phase of the hydrogen diving development programme as well as its logical conclusion.

The first experiments (HYDRA III, IV, V) set the limit of hydrogen effects on the human body.

The following (HYDRA VI, VII, VIII) proved the method's feasibility technically and operationally.

The two latest experiments HYDRA IX (1989) and HYDRA X (subject of the present project) will permit to determine the limits in time and depth of hydrogen diving.

This project will allow man to live for the first time under a pressure superior to 7 MPa

2.3 Description of the development programme

The HYDRA X development programme concentrates on hyperbaric physiology.

All technical development essential to control hydrogen use was carried out in HYDRA IV, IV, VI, VII and VIII experimental dives between 1983 and 1988.

2.3.1 Neuro-physiological investigation

We know that hydrostatic pressure has an effect on the central nervous system. This generates neuro-physiological disorders detrimental to the diver's security.

These disorders can also come from other factors; namely the compression speed and the nature of the vector gas in the breathing mixture.

The High Pressure Nervous Syndrome varies with depth but also according to the compression speed, the variation direction being the same as for the pressure gradient. A limitation of the HPNS, or at least a reduction in its intensity, is reached when slowing decompression gradually as depth increases. The compression curve will be composed of segments of a line which slope decreases as pressure increases.

However, in spite of very low speeds, the forming of the HPNS cannot be avoided without the use of a narcotic agent in the breathing mixture. Hydrogen is used in this view, independently of its advantage in reducing the mixture's density for ventilatory mechanic reasons.

At a very deep depth, the use of an anti-HPNS narcotic agent can prevent some risks. As depth increases, the HPNS development can indeed be a regulating element in the compression process and prevent a sudden epileptic seizure. However, when reducing the HPNS with hydrogen's narcotic power, the threshold of the epileptic seizure can come with no premonitory signs, resulting in serious consequences for the divers.

The divers will be pressurized in HYDRELIOX and under neuro-psychological control to the equivalent of 610 msw. At this depth, physiological measures will be compared to previous helium dives values (PHYSALIE VI, SAGITTAIRE IV and ENTEX 9). The divers will then be led to 700 msw where they will stay for three to four days, carrying out all the neuro-physiological, cardio-respiratory and psychometric tests required to determine their mental and physical condition.

In both cases, immersion activities are scheduled to determine work possibilities during underwater intervention. The water activities will consist in calibrated effort exercises on ergometer, in "mecano" assembly and in diving equipment tests.

2.3.2 Biological Study

A biological study will be made concurrently with the neuro-physiological study.

The divers will have a complete pre and post dive physiological check up to determine the evolution of pulmonary and heart capacities. This check up will be accompanied with a bone examination.

During the dive, the blood and urine constants will be regularly controlled in order to detect the slightest anatomical or functional modification of the endocrine (hepatic, digestive and renal systems).

This exhaustive study will determine, in comparison with existing data, whether a hydrogen exposure under very high pressure produces specific biological modifications and will enable us to be aware of them.

3. HYDRA X PROJECT MAIN PHASES

HYDRA X experimental dive at very deep depth

The depth that we think can be reached with no risks ranges around 700 msw. It is compatible with the test resources of COMEX's Experimental Center in Marseille.

The main phases are separate in the following manner:

1. Selection of the divers
2. Definition and preparation of trial resources
3. Definition of compression and decompression tables
4. Definition of physiological tests and medical follow up
5. Definition of general diving procedures
6. Definition of saturation means operating procedures
7. Definition of safety procedures
8. Training of the divers
9. Safety training of the surface teams
10. HYDRA X experimental dive
11. Data processing

3.1 Selection of the divers

The volunteers will be chosen among the divers who have performed hydrogenated deep experimental or operational dives. COMEX's specialized Medical Center will be responsible for this selection under the Scientific Management Board.

The four divers selected will undergo a complete medical examination.

3.2 Definition and preparation of test resources

The test resources of the Experimental Center will be formed to ensure two different pressure levels:

- Four divers will hold comfortably in a saturation unit. It will be fully equipped for the permanent physiological control of the divers to the simulated depth of 700 msw (7 MPa)
- Another unit will be fully equipped with physiological controls. There will also be an immersion chamber for calibrated exercises on an underwater ergometer, assembly works of the "mecano" type, and industrial diving equipment tests.

3.3 Establishment of the compression and the decompression tables

The compression table and the HYDRELIOX breathing mixture composition will be established from the results of the experimental dives of previous phases.

The decompression table will be worked out from the data collected through all the HYDRA programme experimental dives.

3.4 Establishment of physiological tests and medical follow up.

The tests are determined to ensure the physiological, biological and medical control of the divers:

- psychometric test for narcosis control
- neuro-psychological investigation
- cardio-respiratory functional investigation
- blood and urine biological constants control
- decompression degassing control.

3.5 Establishment of the general diving procedures

As general diving is composed of different phases, it has been decided that different scientific projects will be assigned to each of these phases:

Compression phase :

- Medical follow up
- Neuro-physiological studies
- Psychometric studies

Stop-stay Phase:

- Medical follow up
 - Neuro physiological studies
 - Psychometric studies
 - Psycho-sociological studies
 - Biological studies
 - Sleep study
- CARDIO-RESPIRATORY FUNCTIONAL INVESTIGATION
- UNDERWATER PERFORMANCE TESTS

Decompression phase:

- Medical follow up
 - Doppler study of the degassing
- CARDIO-RESPIRATORY FUNCTIONAL INVESTIGATION
- UNDERWATER PERFORMANCE TESTS.

3.6 Establishment of procedures for conducting the saturation.

The procedures will be established as per previous HYDRA operations.

- preparation of gas mixes
- preparation of saturation chambers
- inerting of hydrogen circuits
- chambers pressurization
- food and medical lock operation
- operation of waste water ballons used in the sanitary chambers
- draining of gas regeneration systems condensates
- replacement of absorbent and absorbent products in the scrubbing filters
- control of environment parameters
- instrumentation
- dehydrogenator utilization
- gas replacement in the chambers:
 - * from HYDRELIOX to HELIOX
 - * from HELIOX to HYDRELIOX
- setting up of two life levels
- dive in the immersion chamber with individual equipment tests
- chamber decompression

3.7 ESTABLISHMENT OF SAFETY PROCEDURES

- General procedures of the saturation dive

The general procedures are those of the COMEX diving manual adapted to hydrogen.

- Procedures specific to the presence of hydrogen in the test center:
 - * safety instructions
 - * action to take in case of leakage in the hydrogenated gas storage
 - * action to take in case of hydrogen leaks in the test center
 - * action to take in case of fire

3.8 Training of the divers

The divers selected will undergo various practices:

- general physical preparation
- training :
 - *psychometric tests
 - *blood sampling
 - *cardio-respiratory tests under calibrated effort in gas atmosphere and in immersion
 - *Doppler control
- testing of the individual diving equipment
- dive in the immersion chamber to assess the surface references

3.9 Safety training of the surface teams

All surface personnel will be specifically trained for hydrogen safety:

- specific training of the technical engineers in charge of the tests center installations
- specific training of the scientists in charge of the physiological studies

3.10 HYDRA X Experimental Dive

The experimental dive will be carried out according the general outline given in Figure 1.

It will include four divers.

- * 1st phase: helium compression to 70 msw
- * 2nd phase: hydrogen/helium compression to 700 msw
- * 3rd phase: decompression of the divers

3.11 Data processing

- result analysis in:
 - * physiology
 - * biology
 - * psychosociology
- post-medical follow up of the divers
- final report

« THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF COMEX, all information contained herein may neither be reproduced, used, disclosed, transmitted nor in any way made public without the written permission of the owner, any person in possession of this document acknowledges being bound by the obligation to treat it as confidential ».

Project : Development of very deep Diving

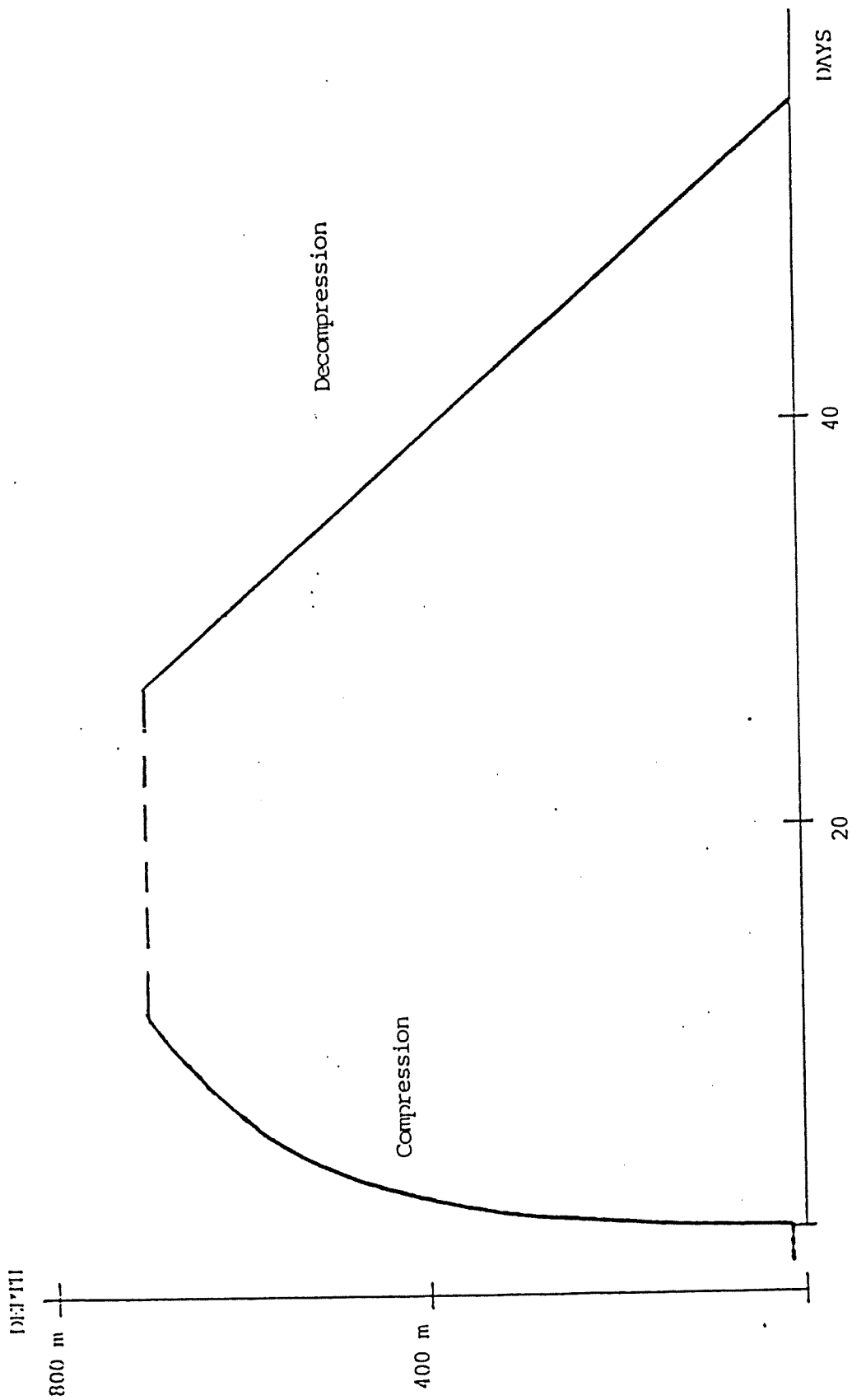


Figure 1 : HYDRA X EXPERIMENTAL DIVE PROFIL

4. PROJECT ORGANIZATION

Considering the project's specific character, COMEX will manage the whole project administration.

The project manager will coordinate the activities of a project group composed of specialists in charge of the programme development.

COMEX Resources

The project group will be composed of the following specialists:

- The manager of the Hyperbaric Experimental Center
in charge of general and technical management
- The manager of the Physiology Laboratory
in charge of the scientific teams coordination
- The manager of the company Medical Center
in charge of the divers' selection and medical follow up
- Hyperbarist Doctors
in charge of the divers' medical follow up during the experimental dive
- The Hyperbarist Physiologist
in charge of determining:
 - * compression and decompression tables
 - * physiological control tests
- A Chemical Engineer
in charge of the control of environment parameters, of the physico-chemical data acquisition and processing
- Project Engineers
in charge of equipment mobilization and technical follow up
- "Diving Methods"Engineers
in charge of establishing the saturation general procedures

- A Safety Officer

in charge of the establishing, the setting up, and the observation of the safety regulations

- Administration Manager

in charge of project administration and of accounting

The technical resources to carry out the experimental dives will be those of COMEX Hyperbaric Experimental Center in Marseilles

Outside Support

COMEX will be assisted by laboratories specialized in the fields of cardio-respiratory physiology, of hyperbaric biology and neuro-physiology

5 - PLANNING

B.G/A8.05-1.90
JULY 1990

| | WORK DESIGNATION | 1990 | 1991 |
|----|--|-------------|-------------------------|
| 1 | <p>HYDRA X experimental dive at very deep depth</p> <ul style="list-style-type: none"> • Divers selection • Definition and preparation of test resources • Establishment of compression-decompression tables • Establishment of physiological tests and medical follow-up • Establishment of general diving procedures • Establishment of saturation means operating procedures • Establishment of safety procedures • Divers training • Surface teams safety training • HYDRA X dive • Data processing | J A S O N D | J F M A M J J A S O N D |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |

AVANT PROPOS

Le rapport scientifique HYDRA 10 comporte 20 Chapitres. Les deux premiers chapitres constituent des synthèses (Version Française - Chapitre 1 et Version Anglaise - Chapitre 2). Les autres chapitres représentent les compte-rendus des travaux effectués par les différentes équipes qui ont participé à cette plongée "record".

Qu'il me soit permis ici de remercier chaleureusement les douze équipes scientifiques qui ont mis à la disposition de COMEX leur très grande compétence, chacune dans leur domaine et sans lesquelles nous n'aurions pas pu réussir cette "grande première française".

Nota :

Il a été tiré trente exemplaires de ce rapport, dix exemplaires à usage interne COMEX et vingt exemplaires destinés aux équipes extérieures.

B. GARDETTE D.Sc.
Directeur Scientifique
Comex S.A

SOMMAIRE

- I - Hydra 10* **B. GARDETTE**
- II - Hydra 10 : A 701 msw onshore record dive using "Hydreliox"*
B. GARDETTE
J.Y. MASSIMELLI
M. COMET
C. GORTAN
H.G. DELAUZE
- III - Suivi médical* **J.Y. MASSIMELLI**
M. COMET
- IV - Etudes neurophysiologiques* **J.C. ROSTAIN**
M.C. GARDETTE - CHAUFFOUR
C. TOMEI
- V - Etude des performances psychométriques et intellectuelles* **C. LEMAIRE**
- VI - Etude des sensations respiratoires et tactiles* **H. BURNET**
Y. JAMMES
N. NARAKI
S. SARRAMEGNA
- VII- Etude ergonomique et électromyographique de muscles inspiratoires (diaphragme) et squelettique (adducteur du pouce)*
Y. JAMMES
M. BADIER
C. GUILLOT
C. TOMEI
P. FONTANARI
- VIII- Surveillance cardiologique des plongeurs* **B. COMET**
V. LAFAY
- IX - Etude de l'électrocardiogramme* **V. LAFAY**
B. COMET

- X - *Réflexions et perspectives sur la préparation athlétique des plongeurs*
- H. JULLIEN
J. MEDELLI
B. GARDETTE
B. BOUFFERACHE
M. COMET
J.Y. MASSIMELLI
- XI - *Monitoring cardio-vasculaire*
- J. MEDELLI
B. BOUFFERACHE
H. JULLIEN
M. LAMBERT
P. DORMOKRAY
M. COMET
J.Y. MASSIMELLI
B. GARDETTE
- XII- *Etude Doppler*
- B. GARDETTE
A. BOUSSUGES
- XIII- *Explorations hématologiques*
- A. BOUSSUGES
C. MENART
C. FOSSAT
I. JUHAN-VAGUE
E. BERGMANN
J.M. SAINTY
- XIV- *Explorations urinaires*
- A. BOUSSUGES
C. MENART
J.C. BORDET
I. JUHAN-VAGUE
J.M. SAINTY
- XV- *Bilan neurologique*
- J.L. GASTAUT
B. CHAVE-ROVINI
- XVI- *Incidence de la plongée Hydra 10 sur la fonction respiratoire, le métabolisme erythrocytaire et la tolérance à l'exercice musculaire*
- P. VANUXEM
D. VANUXEM
M. BADIER
S. DELPIERRE
C. GUILLOT
E. FORNARIS

XVII- Imagerie par résonance magnétique du système nerveux central

O. BAYLE

XVIII- Bilan ophtalmologique

*P. METGE
A. COLLET
O. PLATON*

XIX- Evolution des seuils de perception au cours de la plongée Hydra 10 pour quatre saveurs fondamentales

*Laboratoire d'Analyse
Sensorielle NESTLE*

COMEX

HYDRA 10

Bernard GARDETTE D. Sc.

Directeur Scientifique

Responsable de la Coordination Scientifique

S O M M A I R E

1. INTRODUCTION
2. PROTOCOLE DE LA PLONGEE
3. PROGRAMME SCIENTIFIQUE
 - 3.1. LISTE DES EQUIPES SCIENTIFIQUES
 - 3.2. LISTE DES THEMES ABORDES
 - 3.3. PROGRAMME JOURNALIER
4. DEROULEMENT DE LA PLONGEE ET OBSERVATIONS
COMPORTEMENTALES
5. ANALYSE ET DISCUSSION
6. CONCLUSIONS
7. REFERENCES

1. INTRODUCTION

Le but d'HYDRA 10 est de réaliser une plongée en caisson hyperbare dans la zone des 700 mètres afin de vérifier la faisabilité opérationnelle de l'intervention humaine jusqu'à cette profondeur.

Actuellement, l'essentiel des travaux sous-marins au-delà de 50 mètres sont réalisés en saturation au mélange hélium-oxygène (Heliox).

A partir de la profondeur de 200 mètres, plusieurs facteurs limitent l'efficacité du plongeur (Syndrome des Hautes Pressions - SHP) :

- La pression et ses effets neurologiques (Syndrome Nerveux des Hautes Pressions - SNHP).
- La densité du mélange gazeux et les limitations ventilatoires qu'elle entraîne (Syndrome Respiratoire des Hautes Pressions - SRHP).
- Les douleurs et craquements articulaires (Syndrome Articulaire des Hautes Pressions - SAHP).

Pour lutter efficacement contre ces facteurs, COMEX développe un programme de recherche sur l'hydrogène utilisé comme composant des mélanges gazeux respiratoires, hydrogène-oxygène (Hydrox) ou hydrogène-hélium-oxygène (Hydreliox).

Ce programme de recherche a été baptisé " HYDRA ".

- 1968 : **HYDRA 1** : Premiers essais de respiration d'Hydrox en mer à la profondeur de 250 mètres
- 1969 : **HYDRA 2** : Essais de l'Hydrox chez le singe à 300 - 500 et 700 mètres
- 1983 : **HYDRA 3** : Etude de toxicité de l'Hydrox à 600 mètres chez la souris
Plongées en mer à 70 et 91 mètres au mélange Hydrox (2,5 % O₂)
- 1983 : **HYDRA 4** : Plongée en saturation à l'Héliox avec expositions à l'Hydrox/ Hydreliox de 1 à 6 heures à 120, 150, 180, 240 et 300 mètres.
Mise en évidence de l'effet "narcotique" de l'hydrogène.
- 1985 : **HYDRA 5** : Première saturation pour 6 plongeurs à 450 mètres à l'Hydreliox.
Mise en évidence de l'effet anti-SNHP de l'hydrogène.
- 1986 : **HYDRA 6** : Etude des effets de l'Hydreliox jusqu'à 2000 mètres chez la souris.
Plongée en saturation à l'Hydreliox à 500 mètres pour 8 plongeurs.
Sélection, entraînement et validation.

- 1987 : **HYDRA 7** : Plongée en saturation à l'Hydrox à 260 mètres pour 4 plongeurs. Etude de la narcose hydrogène.
- 1988 : **HYDRA 8** : Plongée en mer à l'Hydreliox à 520/534 mètres pour 6 plongeurs. Démonstration de travail en conditions réelles à grande profondeur.
- 1989 : **HYDRA 9** : Etude des effets de l'Hydrox jusqu'à 900 mètres chez la souris. Etude des effets d'un long séjour (49 jours) sous Hydrox à 370 mètres chez le singe.
Plongée en saturation à l'Hydrox à 300 mètres pour 4 plongeurs.
Recherche du seuil "opérationnel" de narcose à l'hydrogène.
Longue exposition continue (30 jours) à l'Hydrox à 225/200 mètres pour 3 plongeurs.

Ces plongées nous ont donnés des résultats très encourageants. En effet, l'emploi de l'hydrogène dans le mélange respiratoire (Hydréliox) présente des avantages majeurs sur le plan physiologique :

- 1) Il permet de réduire le SNHP d'une façon plus efficace que l'azote.
- 2) Il apporte aux plongeurs un confort respiratoire leur permettant de meilleures performances et une meilleure sécurité au travail en réduisant le SRHP.
- 3) Il supprime le SAHP.

De plus, dans le cadre du programme HYDRA 10, cette démonstration de faisabilité de l'intervention humaine profonde a été précédée d'une série de 8 plongées d'essais réalisées entre Novembre 90 et Décembre 91 chez le primate à des profondeurs comprises entre 700 et 1200 mètres dans le but de préciser les facteurs suivants :

- Profil de compression.
- Taux d'hydrogène.
- Méthodologie d'injection de l'hydrogène.

Les résultats de ce programme animal confirment que le rajout d'hydrogène, à une dose infra-narcotique pour le singe (8 MPa), dans le mélange HélioX, atténue considérablement les troubles dûs aux hautes pressions. En effet, il a été possible d'amener, dans de bonnes conditions, 7 animaux à 1200 mètres en HydrélioX, alors que 8 animaux n'ont pas pu dépasser les 800 mètres en HélioX.

Ceci correspond donc, pour le singe, à un gain en profondeur de 400 mètres (50%).

Chez l'homme, en tenant compte de ces derniers résultats obtenus chez l'animal et, sachant que la profondeur de 610 mètres a déjà été atteinte en HélioX par six plongeurs français (PHYSALIE 6 - 1972, SAGITTAIRE 4 - 1974, ENTEX 9 - 1983), l'emploi du mélange HydrélioX devait permettre aux plongeurs, lors d'HYDRA 10, de travailler dans la zone des 700 mètres dans des conditions de confort et d'efficacité opérationnelle considérablement améliorées par rapport aux plongées HélioX.

La plongée d'essais HYDRA 10 s'est déroulée d'Octobre à Décembre 1992 au Centre Hyperbare de la COMEX à Marseille. L'équipe est composée de trois plongeurs professionnels COMEX (plus un remplaçant) ayant tous une grande expérience de la plongée profonde. Une surveillance médico-physiologique très complète et continue était assurée tout au long de cette plongée et un comité scientifique et médical pouvait, à tout moment, décider ou non de la poursuite du programme, ceci en fonction de la demande des plongeurs ou sur les recommandations des nombreux spécialistes entourant cette plongée.

2. PROTOCOLE DE LA PLONGEE

2.1 PHASE PREPARATOIRE

- Durée 4 semaines.
- Examens médicaux pré-plongée.
- Entraînement aux tâches scientifiques et techniques.
- Préparation physique sous contrôle médical.

2.2 PHASE DE CONFINEMENT

- Profondeur 10 mètres.
- Mélange gazeux : HélioX.
- $PO_2 = 0,4$ b.
- Durée : 2 jours.
- Réalisation des références "surface".

2.3 PHASE DE COMPRESSION

- Profondeur variable de 10 à 675 mètres.
- Mélange gazeux : HélioX puis Hydreliox.
- Compression hélium : 10 - 200 mètres, hydrogène : 200 - 400 mètres et hélium : 400 - 675 mètres.
- $PO_2 = 0,4$ b.
- Durée : 13 jours.
- Suivi médical.
- Contrôles neurophysiologiques (veille et sommeil), psychophysiologiques, cardio-vasculaires et respiratoires de repos.

2.4 PHASE DE SEJOUR

- Profondeur variable : 675 - 650 - 701 - 675 mètres.
- Mélange gazeux : Hydreliox.
- $PH_2 = 20$ b (2 MPa) soit 28 % d'hydrogène à 701 mètres.
- $PO_2 = 0,4$ b.
- Durée : 3 jours.
- Suivi médical.
- Contrôles neurophysiologiques (veille et sommeil), psychophysiologiques, cardio-vasculaires et respiratoires de repos et d'effort au sec.

2.5 PHASE DE DECOMPRESSION

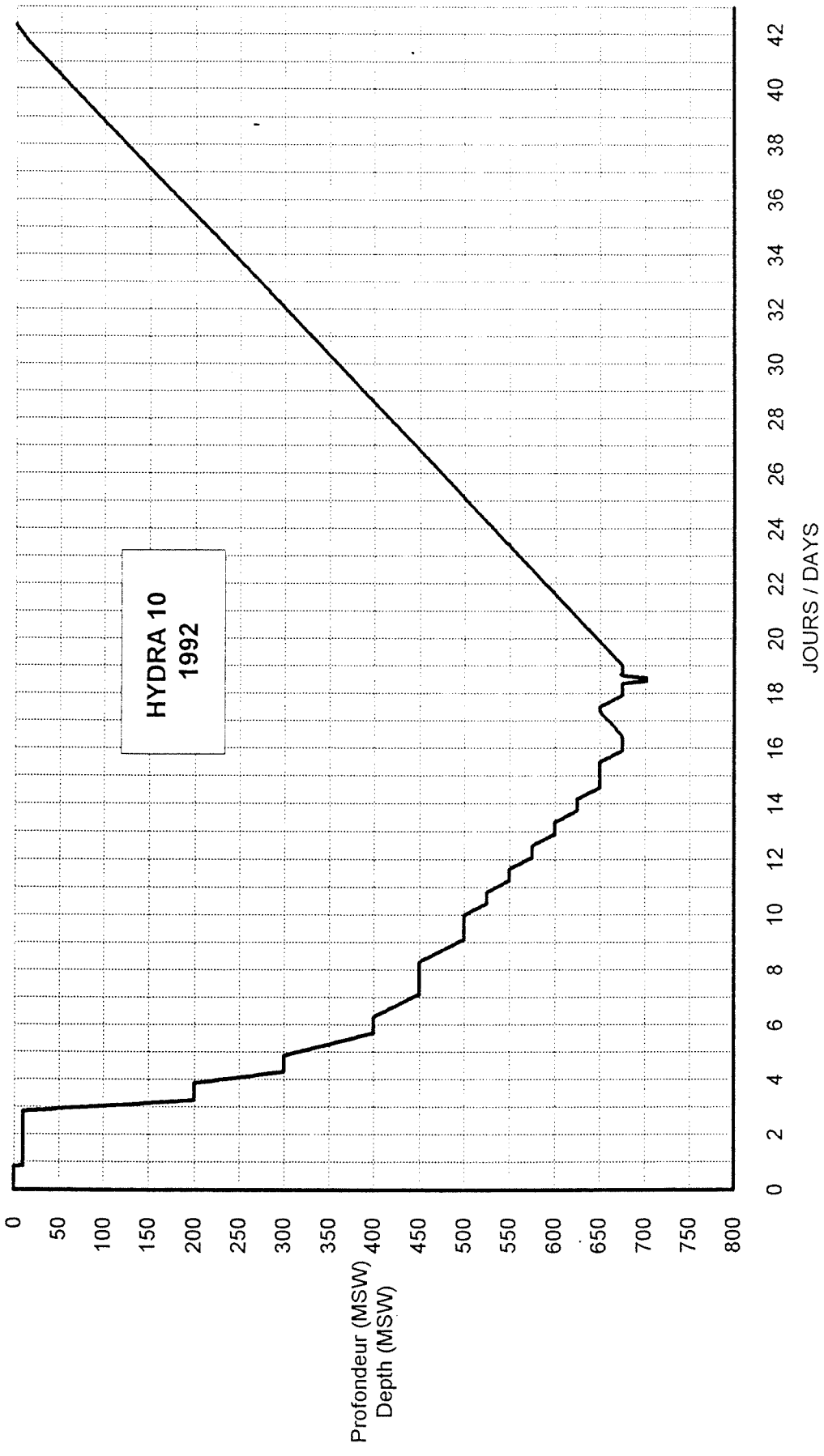
- Profondeur variable de 675 mètres à la surface.
- Mélange gazeux : Hydreliox (675 - 280 mètres), puis Hélioix (280 mètres - surface).
- $PO_2 = 0,5$ b (675 - 120 mètres), 0,6 b. (120 m - 15 mètres), 24 % (15 mètres - surface).
- Durée : 24 jours.
- Suivi médical.
- Contrôles neurophysiologiques (veille et sommeil), psychophysiologiques, cardio-vasculaires (détection des bulles circulantes).
- Plongées dans l'eau avec exercices sur ergométrie et montage du puzzle HYDRA.

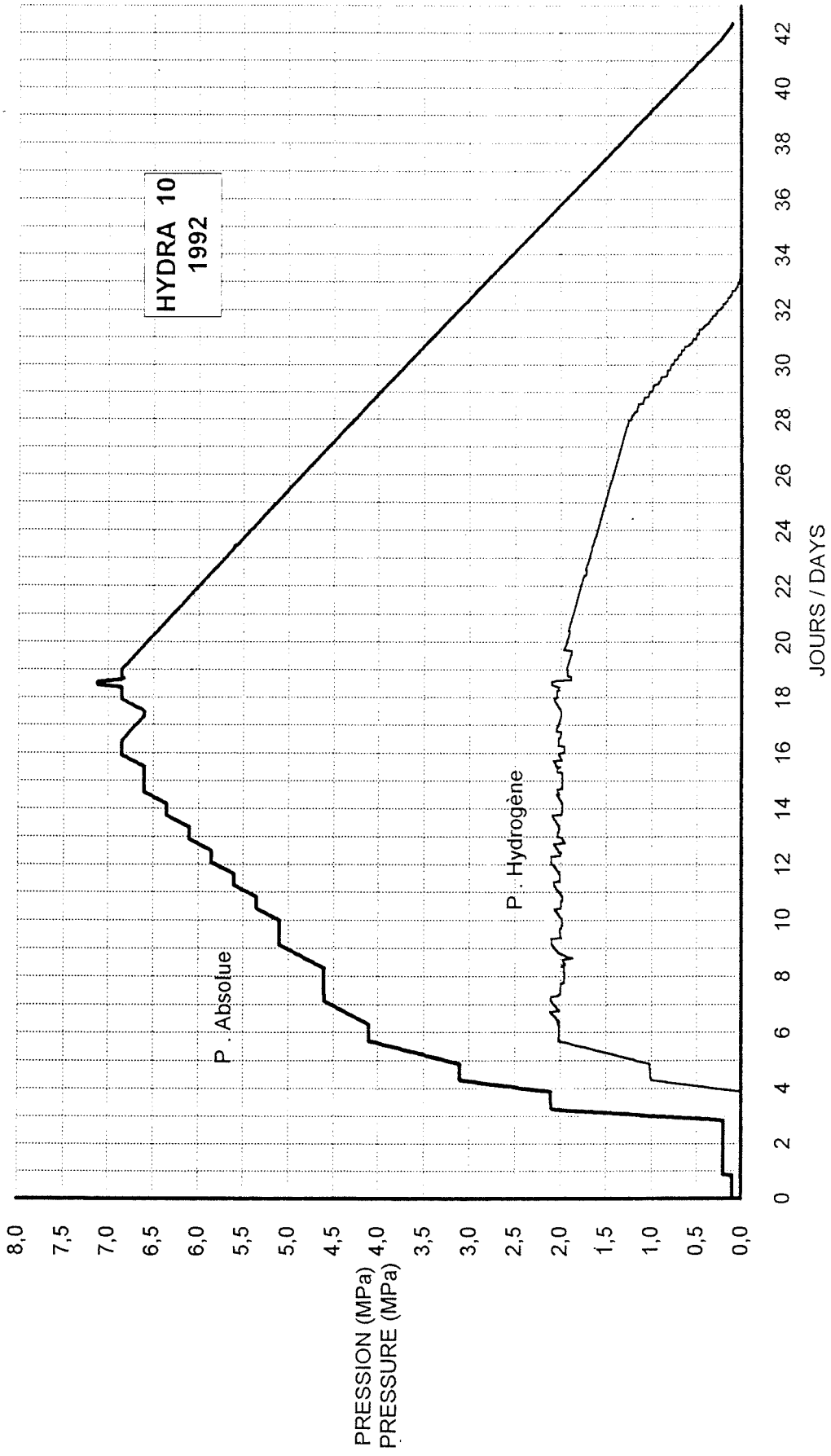
2.6 PHASE POST-PLONGEE

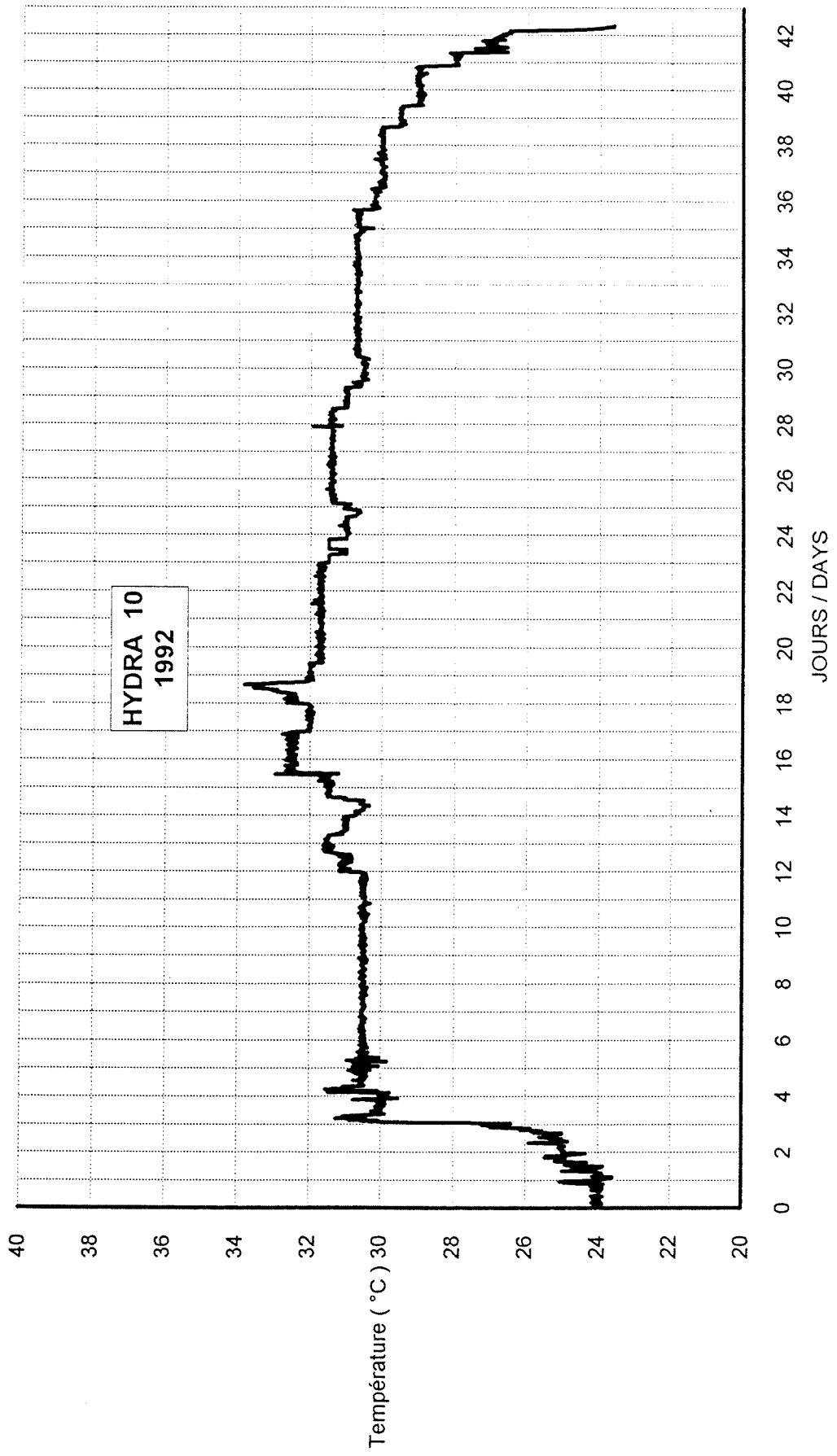
- Durée : 2,5 mois.
- Examens médicaux post-plongée.

2.7 DUREE TOTALE D'HYDRA 10

- 5 mois dont 42 jours en caisson.
- Début : 5 Octobre 1992.
- Fin : 1er Mars 1993.







| |
|---------------------------------|
| 3 PROGRAMME SCIENTIFIQUE |
|---------------------------------|

3.1 LISTE DES EQUIPES SCIENTIFIQUES**- COMEX :**

| | |
|---------------|---|
| * PLONGEURS : | S. ICART (P ₁) T. MAVROSTOMOS (P ₂) R. PEILHO (P ₃) M. OUZENANE (Remplaçant) |
|---------------|---|

| | |
|----------------------------|--------------------------------|
| * DIRECTION SCIENTIFIQUE : | B. GARDETTE J.Y. MASSIMELLI |
|----------------------------|--------------------------------|

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| * CENTRE D'ESSAIS HYPERBARES : | C. GORTAN A. BENED. |
|--------------------------------|------------------------|

| | |
|---------------------|--------------------------|
| * SERVICE MEDICAL : | M. COMET R. EIGENMANN |
|---------------------|--------------------------|

| | |
|---------------|---|
| * COMEX-PRO : | J.P. BARGIARELLI M. PLUTARQUE A. MURACCIOLI |
|---------------|---|

- GROUPE DES LABORATOIRES DU CNRS :

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Physiologie nerveuse/Gyf-Sur-Yvette | R. NAQUET |
|-------------------------------------|-----------|

- LABORATOIRE DE BIOLOGIE DES HAUTES PRESSIONS :

| | |
|--------------------------------------|---|
| Faculté de Médecine - CNRS/Marseille | Y. JAMMES M. BADIER A. BOUSSUGES H. BURNET M.C. GARDETTE-CHAUFFOUR F. GUERRERO C. GUILLOT V. LAFAY J.C. ROSTAIN C. TOMEI |
|--------------------------------------|---|

- SERVICE D'EXPLORATION FONCTIONNELLE**RESPIRATOIRE :**

| | |
|---------------------------------------|--------------------------|
| CHRU-Hôpital Ste Marguerite/Marseille | P. VANUXEM D. VANUXEM |
|---------------------------------------|--------------------------|

- **SERVICE D'EXPLORATION FONCTIONNELLE
CARDIO-RESPIRATOIRE :**
CHRU-Hôpital Nord/Amiens
J.P LIBERT
B. BOUFFERACHE
H. JULLIEN
M. LAMBERT
A. LANCRY
Y. MAINGOURD
J. MEDELLI

- **SERVICE DE MEDECINE HYPERBARE :**
CHRU-Hôpital A. Calmette/Lille
F. WATTEL
D. MATHIEU

- **SERVICE DE MEDECINE HYPERBARE :**
CHRU-Hôpital Purpan/Toulouse
J.L DUCASSE

- **SERVICE MEDECINE HYPERBARE :**
CHRU-Hôpital Salvator/Marseille
J.M SAINTY
E. BERGMANN

- **SERVICE D'EXPLORATION CARDIO-VASCULAIRE :**
Clinique Les Alpilles/Marseille
B. COMET

- **SERVICE DE RADIOLOGIE :**
CHRU-Hôpital La Timone/Marseille
M. KASBARIAN
O. BAYLE

- **SERVICE DE NEUROLOGIE :**
CHRU-Hôpital Ste Marguerite/Marseille
J.L GASTAUT
B. CHAVE

- **SERVICE DE PSYCHIATRIE :**
CHRU-Hôpital La Timone/Marseille
J.M AZORIN

- **SERVICE D'OPHTALMOLOGIE :**
CHRU-Hotel-Dieu/Marseille
P. METGE
A. COLLET

- **SOCIETE AMF RECHERCHE :**
Aubagne
C. LEMAIRE

- **OSTEOPATHIE - KINESITHERAPIE (Méthode MEZIERES) :**
Marseille
H. GAILLARD
J.L. CHAUDEAUX

- LABORATOIRE D'ANALYSE SENSORIELLE :

SOPAD-NESTLE FRANCE/Paris

J. BARTHELEMY

F. ROBIN

- LYCEE HOTELIER :

Marseille

D. MARTIN

J.L. IVALDI

**- LABORATOIRE D'ANALYSE DES SYSTEMES
DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION :**

ENSSAT-LASTI/Lannion

M. CORAZZA

J. CRESTEL

M. GUITTON

- SOCIETE CYBERNETIX :

Marseille

J.P DIEPPEDALLE

S. TOLLET

3.2 LISTE DES THEMES ABORDES

3 2.1 Surveillance médicale

- Sélection des plongeurs : COMEX.
- Visites médicales avant et après plongée : COMEX.
- Suivi médical durant la plongée : COMEX.
- Hygiène : COMEX.
- Nutrition - Diététique : COMEX - Hôpital Nord/Amiens.
- Exploration fonctionnelle respiratoire : Hôpital Ste Marguerite/Marseille.
- Cardiologie : Clinique Les Alpilles/Marseille.
- IRM. : Hôpital La Timone/Marseille.
- Neurologie : Hôpital Ste Marguerite/Marseille.
- Ophtalmologie : Hôpital Hotel-Dieu/Marseille.
- Psychologie : Hôpital La Timone/Marseille.
- Ostéopathie : H. GAILLARD.
- Kinésithérapie (Méthode MEZIERES) : J.L. CHAUDEAUX.

3.2.2 Surveillance Neurophysiologique

- Mesure du Tremblement : Lab. Biologie des Hautes Pressions/Marseille.
- EEG de veille et de sommeil : Lab. Biologie des Hautes Pressions/Marseille.

3.2.3 Surveillance psychologique

- Tests psycho-sensori-moteurs et intellectuels : AMF/Aubagne.
- Suivi psychologique : Hôpital La Timone/Marseille.
- Analyse sensorielle/gustative : SOPAD-NESTLE/Paris.

3.2.4 Surveillance cardio-vasculaire et respiratoire

- ECG/TA. de repos et d'effort (Holter): Clinique Les Alpilles/Marseille et Lab. de Biologie des Hautes Pressions/Marseille.
- Débit cardiaque au repos : Hôpital Nord/Amiens.
- Mesures de la PO₂/PCO₂ (transcutanée) au repos et à l'effort : COMEX - Hôpital Nord/Amiens, Hôpital A. Calmette/Lille.
- Electromyographie diaphragmatique et squelettique : Lab. Biologie des Hautes Pressions/Marseille.
- Analyse sensorielle somesthésique et respiratoire : Lab. Biologie des Hautes Pressions/Marseille.
- Détection des bulles circulantes (doppler) : COMEX.

3.2.5 Suivi Biochimique

- Biologie sanguine et urinaire avant et après plongée et biologie urinaire pendant la plongée : COMEX, Hôpital Purpan/Toulouse, Hôpital Salvator/Marseille.

3.2.6 Etudes techniques

- Décodage de la voix en hyperbarie : ENSSAT/LASTI - CYBERNETIX.
- Matériel individuel plongeur : COMEX-PRO.
- Monitoring du plongeur dans l'eau : COMEX, Hôpital Nord/Amiens.
- Ergonomie subaquatique : COMEX, Hôpital Nord/Amiens.

3.3 PROGRAMME JOURNALIER

3.3.1 Phase préparatoire (5 Octobre - 30 Octobre 1992)

Lundi 5 Octobre 1992 :

08h30 Prise de sang
10h00 Réunion générale plongeurs
13h30 E.F.R (Exploration Fonctionnelle Respiratoire)
 Hôpital Sainte-Marguerite

Mardi 6 Octobre 1992 :

08h30 Neurologie : Hôpital Sainte-Marguerite
14h00 Ophtalmologie : Hotel-Dieu

Mercredi 7 Octobre 1992 :

08h30 Test d'effort : Hôpital Sainte-Marguerite (2 plongeurs)
11h00 Test d'effort : Clinique les Alpilles (1 plongeur)
14h00 Psychométrie : COMEX
15h00 Sport

Jeudi 8 Octobre 1992 :

08h30 Test d'effort : Hôpital Sainte-Marguerite (1 plongeur)
09h00 Sport (2 plongeurs)
14h00 Kinésithérapie
16h00 Sport

Vendredi 9 Octobre 1992 :

08h30 Psychologie
10h00 Sport
13h30 E.F.R - Cardiologie/Hôpital Nord

Lundi 12 Octobre 1992 :

08h30 Prise de sang
09h00 Ostéopathie - Sport
13h30 E.F.R - Cardiologie/Hôpital Nord

Mardi 13 Octobre 1992 :

08h30 Psychométrie : COMEX
10h00 Test d'effort : Clinique les Alpilles (3 plongeurs)
10h00 Test d'effort (1 plongeur)
14h00 Ophtalmologie : Centre Périer

Mercredi 14 Octobre 1992 :

- 10h00 Entretien psychologique : Hôpital La Timone (2 plongeurs)
Sport (2 plongeurs)
13h30 Nutrition
14h00 Cours de secourisme : COMEX
16h00 Sport

Jeudi 15 Octobre 1992 :

- 09h00 Sport
14h00 Kinésithérapie
16h00 Sport

Vendredi 16 Octobre 1992 :

- 09h00 Sport
14h00 Cours de secourisme : COMEX
16h00 Sport - Ophtalmologie : Centre Périer (2 plongeurs)

Lundi 19 Octobre 1992 :

- 08h30 Prise de sang (2 plongeurs)
09h00 Ostéopathie - Sport
14h00 Sport - Ophtalmologie : Centre Périer (2 plongeurs)

Mardi 20 Octobre 1992 :

- 08h30 Doppler bulle : COMEX
09h00 E.F.R : Test de réactivité bronchique (2 plongeurs)
11h00 Dégustation
14h00 Sport

Mercredi 21 Octobre 1992 :

- 10h00 Entretien psychologique : Hôpital La Timone (2 plongeurs)
Sport (2 plongeurs)
14h00 Neurologie - EEG : COMEX
17h00 Ophtalmologie : Hotel-Dieu (2 plongeurs)

Jeudi 22 Octobre 1992 :

- 09h00 E.F.R (Test de réactivité bronchique) (2 plongeurs)
11h00 Dégustation
14h00 Kinésithérapie

Vendredi 23 Octobre 1992 :

- 09h00 Sport (Journée Calanques)

Samedi 24 Octobre 1992 :

08h00 IRM encéphale : Hôpital La Timone - 1er plongeur
08h45 2ème plongeur
09h30 3ème plongeur
10h15 4ème plongeur

Lundi 26 Octobre 1992 :

09h00 Ostéopathie - Sport
11h00 Test d'effort : Clinique les Alpilles
14h00 E.F.R - Cardiologie : COMEX
20h00 1ère nuit de référence : COMEX
E.E.G - Températures
E.C.G (Holter : P₃)

Mardi 27 Octobre 1992 :

08h00 E.E.G : COMEX
09h00 Psychométrie : COMEX
10h00 Test d'effort au sec : COMEX
14h00 Test d'effort dans l'eau : COMEX (+ TV)
20h00 2ème nuit de référence : COMEX
E.E.G - Températures
ECG (Holter : P₂)

Mercredi 28 Octobre 1992 :

08h00 E.E.G : COMEX
09h00 Test d'effort au sec : COMEX
Test d'effort dans l'eau : COMEX
14h00 Test d'effort (suite) (+ TV)
20h00 3ème nuit de référence : COMEX
E.E.G - Températures
E.C.G (Holter : P₁)

Jeudi 29 Octobre 1992 :

08h00 E.E.G : COMEX
09h00 Psychométrie : COMEX
10h00 Test d'effort au sec : COMEX
14h00 Test d'effort dans l'eau : COMEX (+ TV)
17h30 Réunion : Bilan général

Dimanche 1er Novembre 1992 :

Prélèvement urinaire de 24h00

3.3.2 Phase confinement : 10 mètres (de J₀ à J₂)

J₀ (Lundi 2 Novembre 1992)

- 20h00 Entrée des plongeurs en caisson.
Compression à 10 mètres à l'Héliox.
22h00 Nuit avec EEG de sommeil et températures.

J₁

- 07h30 Réveil.
Toilette.
Petit-déjeuner.
08h30 Entretien clinique.
Mesure du tremblement.
09h00 EEG.
10h00 Tests psychométriques.
11h00 Analyse sensorielle respiratoire et cutanée.
12h30 Déjeuner.
Détente.
14h30 Tests cardio-vasculaires au repos : ECG/TA.
16h00 Electromyographie (EMG), diaphragmatique et squelettique.
18h00 Entretien clinique.
Mesure du tremblement.
19h00 Dîner.
Détente.
22h00 Nuit avec EEG de sommeil et températures.

J₂

- 07h30 Réveil.
Toilette.
Petit-déjeuner.
08h30 Entretien clinique.
Mesure du tremblement.
09h00 E.E.G.
10h00 PO₂ / P CO₂ transcutanée.
12h30 Déjeuner.
Détente.
14h30 Débit cardiaque (BO-MED).
16h00 Détection de bulles.
17h00 Voix.
18h00 Entretien clinique.
Mesure du tremblement.
19h00 Dîner.
Détente.
22h00 Nuit.
E.C.G (Holter pour P₃)

3.3.3 Phase de compression : 10 - 675 mètres (de J₃ à J₁₅)

- J₄ (300 mètres) : Journée type J₁
- J₇ (450 mètres) : Journée type J₁ (sans EMG)
- J₉ (500 mètres) : Journée type J₁ (sans EMG)
- J₁₁ (550 mètres) : Journée type J₁
- J₁₃ (600-625 mètres) : Journée type J₁

En dehors de ces journées type J₁, il est réalisé :

- des analyses sensorielles gustatives en J₃ (200 mètres), J₈ (450 mètres), J₁₀ (525 mètres) et J₁₄ (650 mètres) ;
- des mesures de PO₂/PCO₂ transcutanées en J₃ (200 mètres), J₅ (350-400 mètres), J₆ (400-450 mètres), J₈ (450-500 mètres), J₉ (500 mètres) et J₁₂ (575 mètres) ;
- un contrôle régulier ECG/TA de repos, plus des ECG de 24h00 (Holter) en J₃ (200 mètres) pour P₃, en J₄ (300 mètres) pour P₂ et J₅ (350-400 mètres) pour P₁ ;
- des prélèvements urinaires de 24h00 en J₆ (400-450 mètres), J₁₃ (600-625 mètres) ;
- des enregistrements de référence pour la détection de bulles ;
- des analyses de la voix hyperbare ;
- des entretiens cliniques quotidiens.

3.3.4 Phase de séjour : 675 - 650 - 701 mètres (de J₁₆ à J₁₈)

- J₁₆ (675 mètres) Entretien clinique
Tremblement - EEG - Voix
- J₁₇ (650 mètres) Entretien clinique
Tremblement - Psychométrie - ECG
- J₁₈ (675 - 701 mètres) Entretien clinique
Tremblement - EEG - ECG
Exercice au sec - Détection des bulles

3.3.5 Phase de décompression : 675 mètres - surface (de J₁₉ à J₄₂)

- J₁₉ (660 - 650 mètres)

15h00

Entretien clinique - Tremblement EEG.
Plongée dans l'eau (P₂) avec ECG et température du gaz respiratoire.
- J₂₀ (640 - 630 mètres)

09h00

Plongée dans l'eau (P₁) avec température du gaz respiratoire.

10h30

Plongée dans l'eau (P₂) avec température du gaz respiratoire.
Entretien clinique.
- J₂₁ (600 mètres)

Entretien clinique - Tremblement - EEG - Détection des bulles.
- J₂₂ (580 - 570 mètres)

09h00

Plongée dans l'eau (P₃) avec ECG et température du gaz respiratoire.
Détection de bulles - Voix
Entretien clinique.
- J₂₃ (550 mètres)

09h00

Plongée dans l'eau (P₃) avec ECG et température du gaz respiratoire.
EEG - Tremblement - Détection de bulles
Entretien clinique.
- J₂₄ (520 mètres)

Journée type J₁ (sans EMG, ni analyse sensorielle).
- J₂₅ (490 mètres)

14h30

Tremblement - EEG - Détection de bulles.
Entretien clinique.
Plongée dans l'eau (P₁) avec ECG et température du gaz respiratoire.
- J₂₆ (460 mètres)

10h00

Tremblement - Détection de bulles - Voix.
Entretien clinique.
Plongée dans l'eau (P₂) avec ECG et température du gaz respiratoire.

De **J₂₇** à **J₄₁** il est réalisé :

- des mesures de sensations tactiles et respiratoires en **J₂₈** (400 mètres), **J₃₂** (280 mètres) et **J₄₁** (20 mètres) ;
- des tests psychométriques en **J₂₉** (370 mètres) et **J₃₆** (170 mètres) ;
- de l'EMG diaphragmatique et squelettique en **J₃₉** (75 mètres) ;
- une plongée dans l'eau (P₂) avec ECG en **J₃₇** (145 mètres) ;
- des analyses sensorielles gustatives en **J₂₈** (400 mètres), **J₃₁** (310 mètres) et **J₃₆** (170 mètres) ;
- un contrôle régulier ECG/TA de repos, plus des ECG de 24h00 (Holter) en **J₂₉** (370 mètres) pour P₃, **J₃₀** (340 mètres) pour P₂, **J₃₁** (310 mètres) pour P₁ ;
- des prélèvements urinaires de 24h00 en **J₂₇** (430 mètres), **J₃₁** (310 mètres), **J₃₆** (170 mètres), **J₄₁** (20 mètres) ;
- des détections de bulles circulantes et des analyses de la voix une fois par jour ;
- des entretiens cliniques quotidiens.

J₄₂ (Lundi 14 Décembre 1992) :

07h30 : Prise de sang.

11h00 : Sortie des plongeurs - Conférence de presse.

14h00 : E.F.R - Hôpital Sainte-Marguerite.

3.3.6 Phase post-plongée (Janvier - Février 1993)

- **Mardi 5 Janvier 1993 :**
14h00 E.F.R - Hôpital Sainte-Marguerite
- **Mercredi 6 Janvier 1993 :**
08h30 Test d'effort - Hôpital Sainte-Marguerite
- **Jeudi 7 Janvier 1993 :**
14h00 Sensations respiratoires et cutanées - Hôpital Nord
- **Vendredi 8 Janvier 1993 :**
09h00 Examens neurologiques - Hôpital Sainte-Marguerite
14h00 EMG diaphragmatique et squelettique - Hôpital Nord
- **Du 11 au 15 Janvier 1993 :**
Séjour à Amiens
* Test d'effort - Hôpital Nord
* Remise en forme
- **Du 18 au 22 Janvier 1993 :**
Prise de sang et urines (24h00)
- **Du 25 au 30 Janvier 1993 :**
Séjour au ski
- **Mercredi 3 Février 1993 :**
15h30 I.R.M - Hôpital St Joseph
- **Jeudi 11 Février 1993 :**
09h30 Ophtalmologie - Hôtel Dieu
14h00 Ophtalmologie - Centre Périer
- **Jeudi 18 Février 1993 :**
09h30 E.M.G diaphragmatique - Hôpital Nord

4. DEROULEMENT DE LA PLONGEE ET OBSERVATIONS COMPORTEMENTALES

4.1 PHASE PREPARATOIRE

Cette phase pré-plongée d'une durée de quatre semaines s'est parfaitement bien déroulée pour les quatre plongeurs.

Il semble cependant qu'une durée plus importante soit nécessaire (de l'ordre de six semaines) pour approfondir la préparation physique et psychologique des plongeurs avant une plongée aussi profonde.

4.2 PHASE DE CONFINEMENT (de J₀ à J₂)

Du Lundi 2 Novembre au Mercredi 4 Novembre 1992.

- * Rien à signaler durant ces deux jours de séjour à 10 mètres sous Hélio₂ (PO₂ = 0,4 b).
- * Le soir de J₂ à 21h00, début de compression sous pression Hélio₂ entre 10 et 200 mètres.

4.3 PHASE DE COMPRESSION (de J₃ à J₁₅)

Du Jeudi 5 Novembre au mardi 17 Novembre 1992.

- * Entre 400 et 450 mètres, P₃ ressent les effets de la narcose à hydrogène. Il est inquiet pour la suite de la compression. Chez les trois plongeurs, on ne note pas de tremblement, pas de sensation de "nez bouché" (enchifrènement) mais une grande aisance respiratoire.
- * A partir de 575 mètres, les trois plongeurs perçoivent des troubles de la sensibilité profonde et proprioceptive avec difficulté dans les déplacements.
- * A 650 mètres (J₁₄), l'appétit est moins bon et s'accompagne chez P₂ d'une sensation d'écoeurement vis à vis de la nourriture. P₁ présente un bref épisode de vomissement sans autre trouble. Il est décidé de rester en palier à cette profondeur dans le grand caisson jusqu'au lendemain.

- * A **J₁₅** (Mardi 17 Novembre), isolement des trois plongeurs dans les sphères à partir de 11h00. Début de compression entre 650 et 675 mètres à 12h00.

Arrivée à 675 mètres à 22h00.

Suite au problème d'inappétence, l'alimentation des plongeurs est changée, pour passer à des aliments (boisson, soupe, gâteaux...) à haute valeur énergétique ne nécessitant l'absorption que de petites quantités pour un apport calorique normal.

4.4 PHASE DE SEJOUR (de **J₁₆** à **J₁₈**)

Du Mercredi 18 Novembre au Vendredi 20 Novembre 1992.

- * Le matin de **J₁₆**, à cause de la méforme générale des plongeurs, due essentiellement à une mauvaise qualité de sommeil, un manque d'appétit et une instabilité motrice avec faiblesse musculaire surtout visible chez P₁. Il est décidé, à 11h00, de décompresser de 675 mètres à 650 mètres et de faire regagner aux plongeurs le grand caisson (à 16h00 : 669 mètres).
- * A **J₁₇**, 8h00, arrivée au palier à 650 mètres.
Après discussion avec les plongeurs, et compte-tenu d'une amélioration sensible de leur état, surtout pour P₂, une nouvelle compression 650 - 675 mètres est programmée. Elle débute à 12h20 pour se terminer à 22h20.
- * A **J₁₈**, une excursion entre 675 et 701 mètres est réalisée par P₂ dans les sphères 1 et 2, alors que P₁ et P₃ restent à 675 mètres dans la grande chambre :

| | | |
|-----------------|------------------|----------------|
| - Compression | durée : 2 heures | (09h00/11h00) |
| - Séjour | durée : 2h30 | (11h00/13h30) |
| - Décompression | durée : 2h00 | (13h30/15h30). |

Cette excursion à la profondeur record de 701 mètres s'est parfaitement bien déroulée. Le plongeur a été capable de réaliser, sans difficulté, à cette profondeur un exercice au sec de 25 Watts sur un ergomètre à bras. Il ne présentait pas de difficulté respiratoire, pas de douleur articulaire, pas de dysmétrie, pas de déséquilibre et un très léger tremblement postural. Son ECG était normal et son EEG peu modifié.

De plus, lors de la décompression et durant les neuf heures de palier à 675 mètres, aucune bulle circulante n'a été détectée au Doppler.

4.5 PHASE DE DECOMPRESSION (de J₁₉ à J₄₂)

Du Samedi 21 Novembre au Lundi 14 Décembre 1992.

- * L'après-midi de **J₁₉** à 660 mètres, première plongée de P₂ dans l'eau dans le caisson piscine (sphère 3).
Cette plongée de mise en route fut de courte durée à cause d'une température d'eau trop basse (21 - 22°C).
- * A 640 mètres (**J₂₀**), deuxième plongée dans l'eau réalisée par P₁ d'une durée de 30 minutes.
Le même jour (635 mètres), troisième plongée réalisée par P₂, durée 1h30 avec montage (incomplet) du puzzle en 1h05. Consommation moyenne de gaz : 24 l/min.
- * A 580 mètres (**J₂₂**), quatrième plongée dans l'eau réalisée par P₃ d'une durée de 1h30 avec montage (incomplet) du puzzle en 1h10. Consommation de gaz : 20 litres/min. Fréquences respiratoires et cardiaques normales.
- * A 550 mètres (**J₂₃**), cinquième plongée dans l'eau effectuée par P₃, d'une durée de 40 minutes avec démontage du puzzle.
- * A 490 mètres (**J₂₅**), sixième plongée dans l'eau réalisée par P₁, durée 1 heure, avec deux exercices de 4 minutes de 25 watts effectués sur l'ergomètre à bras. Les trois plongeurs sont en bonne forme, comme à 600 mètres lors de la compression.
- * A 460 mètres (**J₂₆**), septième plongée dans l'eau réalisée par P₂, durée 2h00, avec montage complet du puzzle en 52 minutes avec serrage des boulons. Très bon comportement du plongeur dans l'eau.
- * A partir de 420 mètres (**J₂₈**), le "déshydrogénateur" est mis en route pour éliminer sélectivement les 1,2 MPa (12 b.) d'hydrogène restant dans le mélange Hydreliox. Cette élimination sera complète à 280 mètres (**J₃₃**).
- * A 145 mètres (**J₃₇**), huitième plongée dans l'eau réalisée par P₂, durée 2h25, avec exercice de 25 watts sur ergométrie à bras, montage et démontage du puzzle.

Tout au long de la décompression, on observe une récupération progressive des plongeurs, sans fatigue supplémentaire due au dégazage ou aux plongées dans l'eau. De plus, lors de l'élimination sélective de l'hydrogène et pour des PH_2 inférieures à 1,2 MPa (12 b.), les plongeurs retrouvent progressivement leurs sensations HélioX : gênes articulaires et respiration plus difficile (sensation de nez bouché).

A signaler toutefois quelques passages de bulles ressentis par les plongeurs dans les 300 derniers mètres et lors du rinçage à l'air entre 3 mètres et la surface, nécessitant trois prises d'oxygène au masque de 25 minutes le matin de la sortie (J42).

4.6 PHASE POST-PLONGEE

Mardi 15 Décembre 1992 à fin Février 1993.

Durant cette phase, on observe une réadaptation rapide des trois plongeurs et une récupération complète de leur forme physique évaluée par les tests d'effort réalisés le 6 Janvier 1993, soit environ trois semaines après la sortie du caisson.

5. ANALYSE ET DISCUSSIONS

5.1 LE SYNDROME DES HAUTES PRESSIONS (S.H.P)

Le S.H.P est resté peu marqué tout au long d'HYDRA 10, ce qui a permis aux trois plongeurs d'atteindre 675 mètres et 701 mètres pour l'un d'entre eux, P₂.

Lors de la compression, le S.H.P est apparu à partir de 550/600 mètres, mais a surtout été perçu à partir de 650 mètres chez P₁ et P₃.

Pour l'essentiel, ce syndrome était caractérisé par :

5.1.1 Un Syndrome Nerveux des Hautes Pressions

(S.N.H.P) peu marqué jusqu'à 650 mètres avec :

- Un tremblement distal, des myoclonies et une dysmétrie, ressentis à partir de 625 mètres pour P₃, 650 mètres pour P₁ et 700 mètres pour P₂.
- Des troubles de la proprioception apparus chez les trois plongeurs à partir de 575 mètres ; accompagnés d'incoordination motrice (dyskinésie) et de faiblesse musculaire chez P₁ à partir de 650 mètres.
- Une perte d'appétit à partir de 625 mètres chez les trois plongeurs avec sensation de réplétion hydrique et écoeuement chez P₂, nécessitant un changement d'alimentation.
- Des nausées avec vomissements apparues chez P₁ à 650 mètres.
- Des perturbations du sommeil avec réveils fréquents dus à un besoin d'uriner.
- Une fatigue générale observée à 675 mètres chez P₁ et P₃.
- Une diminution des performances psychomotrices et intellectuelles perçus par les trois plongeurs à partir de 600 mètres.

5.1.2 Un Syndrome Respiratoire des Hautes Pressions

(S.R.H.P) qui n'apparaît qu'au-delà de 650 mètres avec :

- Des modifications respiratoires dues à la densité des gaz, ressenties uniquement entre 650 et 700 mètres (la densité du mélange Hydrex à 700 mètres était de 11,4 g/litre).
- Pas de sensation de "nez bouché" (enchifrènement), alors que cette sensation a été perçue en décompression, lors du retour progressif en HélioX dans la zone des 300 mètres.

5.1.3 Un Syndrome Articulaire des Hautes Pressions

(S.A.H.P) non ressenti sous Hydreliox mais uniquement perçu sous HélioX au cours de la décompression avec :

- Une impression d'articulations sèches et des craquements articulaires entre 300 mètres et la surface.
- Des douleurs articulaires et des limitations du mouvement en phase HélioX, lors de la compression et de la décompression.

5.2 LA NARCOSE A L'HYDROGENE

Les effets de l'hydrogène au cours d'HYDRA 10 sont restés très discrets. A noter cependant sur l'ensemble du séjour sous Hydreliox pour des $PH_2 > 15$ b. :

- quelques phases d'euphorie légère ;
- une hyperesthésie cutanée modérée (tactile et thermique) ;
- une hypoesthésie profonde (articulaire)
- une sensation de goût "métallique" sans autres modifications gustatives notables;
- une augmentation de la vigilance survenant par bouffées, mais aussi des baisses observées chez P_3 ;
- une hyperémotivité avec instabilité chez P_3 ;
- une fragilité aux changements extérieurs nécessitant une adaptation permanente ;
- des modifications du champ visuel chez P_3 ;
- quelques cauchemars nocturnes chez P_3 ;
- lors de la phase la plus profonde, au-delà de 600 mètres, des troubles de la concentration, de la mémoire immédiate et de l'écriture (dysorthographe).

5.3 LA DECOMPRESSION

La décompression s'est parfaitement bien déroulée, que ce soit la phase Hydreliox avec élimination de l'hydrogène ou la phase HélioX avec élimination de l'hélium.

Nous n'avons détecté au Doppler que très peu de bulles circulantes et les plongeurs n'ont signalé que quelques "passages de bulles" épisodiques.

A noter des douleurs articulaires dans les trois derniers mètres de la décompression, après rinçage à l'air des caissons, ne nécessitant cependant que trois séances d'oxygène pur au masque, sans arrêt de la décompression.

Actuellement, la décompression de saturation, pour les grandes profondeurs est donc bien maîtrisée avec les vitesses et les PO_2 utilisées.

6. CONCLUSIONS

Le Syndrome des Hautes Pressions (SHP) et la Narcose à l'hydrogène ont donc été peu marqués lors d'HYDRA 10.

Ce succès est dû à l'optimisation des paramètres suivants :

- vitesse de compression
- pression d'hydrogène dans l'Hydreliox
- sélection et entraînement des plongeurs
- confort des caissons.

La faible pression d'hydrogène (20 b.) utilisée de façon à limiter le risque de narcose survenue lors des plongées HYDRA 6 et 9 n'a pas permis de repousser l'apparition du S.H.P au-delà de 650 mètres.

Dans ces conditions, la zone des 700 mètres est plus difficile à atteindre dans l'état actuel de nos connaissances. Les facteurs qui limitent l'intervention humaine à cette profondeur doivent être améliorés, à savoir : la nutrition, le sommeil, la sélection et la préparation des plongeurs.

Toutefois, la zone d'intervention de 300/650 mètres de profondeur peut donc être considérée comme ouverte à une large population de plongeurs professionnels bien sélectionnés et bien préparés.

En effet, comme l'ont prouvé également les plongées dans l'eau réalisées entre 660 mètres et 460 mètres au cours de la décompression, les capacités opérationnelles des plongeurs sont désormais prouvées dans les zones de profondeur qui dépassent largement les possibilités de la plongée conventionnelle à l'hélium (250/300 mètres).

De plus, HYDRA 10 a démontré l'adaptation de l'homme aux très grandes profondeurs avec des séjours de plus de 9 jours au-delà de 600 mètres et de plus de 5 jours au-delà de 650 mètres, avec une excursion à la profondeur record à 701 mètres.

L'hydrogène est donc bien la clé d'accès aux grandes profondeurs.

| |
|----------------------|
| 7. REFERENCES |
|----------------------|

- COMEX, *Direction Scientifique*, 1984
HYDRA III - Souris, 600 mètres - HélioX/Hydrox : 30 p.
- COMEX, *Direction Scientifique*, 1984
HYDRA IV : 200 p.
- COMEX, *Direction Scientifique*, 1986
HYDRA V : 400 p.
- COMEX, *Direction Scientifique*, 1986
HYDRA VI - Souris : 30 p.
- COMEX, *Direction Scientifique*, 1988
HYDRA VI-VII : 400 p.
- COMEX SERVICES, 1989
HYDRA VIII : 200 p.
- COMEX, *Direction Scientifique*, 1988
HYDRA IX - Souris : 20 p.
- COMEX, *Direction Scientifique*, 1990
HYDRA IX - Singes : 33 p.
- COMEX, *Direction Scientifique*, 1990
HYDRA IX : 200 p.
- COMEX, *Direction Scientifique*, 1992
HYDRA 10 - Singes : 86 p.

HYDRA 10 : A 701 MSW ONSHORE RECORD DIVE USING "HYDRELIOX"

B. Gardette, J.Y. Massimelli, M. Comet, C. Gortan, H.G. Delauze.
Comex S.A, Marseilles France.

SUMMARY

Following the Comex "Hydra" research program on hydrogen-helium-oxygen (HYDRELIOX), Hydra 10 was performed in the Comex hydrogen hyperbaric facilities in Marseilles by three professional divers.

The dive protocol included : 4 weeks of pre-dive period, 2 days of confinement at 10 msw, 13 days of compression to 675 msw, 3 days of bottom stage between 650 and 675 msw with an excursion dive at 701 msw, 24 days of decompression with 8 working dives in wet chamber.

The results of this record dive confirmed :

- The ability of divers to operate at depths of 300 to 650 msw with Hydreliox breathing mixture.
- The good adaptation of human being to long residence times at very great depths with 9 days below 600 msw and 5 days below 650 msw.

By limiting the effects of the high pressure syndrome and without hydrogen narcosis, the Hydreliox not only enhances the diver's effectiveness and working capabilities, but also provides for improved safety.

Hydrogen is truly the key to extreme depths and oil companies can now count on human technical assistance at depths far exceeding the limits of conventional helium diving.

Keywords : Hydrogen, gas mixture, working capabilities, safety, onshore record dive.

INTRODUCTION

HYDRA 10 experimental dive is the next phase of the ongoing Comex "HYDRA" Research Program related to the use of hydrogen in high pressure breathing gas mixture. Comex HYDRA program was launched in 1968 with HYDRA 1 and continued until HYDRA 10 in 1992. In 1990, after HYDRA 9, we concluded :

- 1) Hydrogen has narcotic effects but which are completely reversible without long-term effects on the organism.
- 2) The admissible hydrogen pressure is in the 2.4 to 2.5 MPa range. However, this threshold has to be lowered to 2 MPa for long duration dives.
- 3) Mixed with helium (Hydreliox), hydrogen reduces High Pressure Syndrome (HPS) : Decreasing the High Pressure Nervous Syndrome (HPNS), enhancing diver confort with respect to respiratory function (High Pressure Respiratory Syndrome - HPRS) and articular function (High Pressure Articular Syndrome - HPAS).

These data and the results obtained from hydrogen and helium monkeys saturation dives (HYDRA 10 monkeys - 1992) indicate the Hydreliox would enable dives to be achieved effectively and safety at depths between 600 and 700 msw. To demonstrate that divers can operate effectively at these extreme depths with Hydreliox was the purpose of HYDRA 10 onshore experimental dive. This dive was performed in Comex Marseilles by three selected professional divers of Comex and Stolt Comex Seaway Companies in November - December 1992.

METHODS

HYDRA 10 experimental facilities

The Comex facilities used for HYDRA 10 included four chambers of Experimental Hyperbaric Center in Marseilles, France :

- A set of three spheres (EMS 800) of 7 m³ each (internal diameter : 2.5 m) with one used as a dry lab, one as a diving bell and one as a diving pool.
- A 35 m³ cylindrical chamber (internal diameter : 2.3 m - length : 9.35 m) with living area and sleeping quarters and sanitariums. It can house-up to 6 divers but was designed for three during HYDRA 10.

The chambers are provided with two life support units and an audio-TV communication System.

Dive protocol

HYDRA 10 total dive time lasted five months (October 5th 1992 to March 1st 1993), with 42 days inside the chambers (November 2nd to December 14th 1992). HYDRA 10 included different phases :

Pre-dive : 4 weeks duration

Dive (Fig. 1) : 42 days duration with :

- Confinement :
 - . Pressure : 2 MPa (10 msw)
 - . Gas mixture : Heliox (He - O₂)
 - . PO₂ : 40 kPa
 - . Duration : 2 days

- Compression :
 - . Pressure : From 2 to 6.85 MPa (10 - 675 msw)
 - . Gas mixtures : Heliox then Hydreliox.
 - . Compression with He between 10 and 200 msw,
 - . H₂ : 200 - 400 msw and He : 400 - 675 msw
 - . PO₂ = 40 kPa
 - . Duration : 13 days

- Bottom stage :
 - . Pressures : 6.85 - 6.6 - 7.11 - 6.85 MPa
(675 - 650 - 701 - 675 msw)
 - . Gas mixture : Hydreliox (PH₂ = 2 MPa)
 - . PO₂ = 40 kPa
 - . Duration : 3 days

- Decompression :
 - Pressure : from 7.11 to 1 MPa (701 - 0 msw)
 - Gas mixtures : Hydreliox (675 - 280 msw)
then Heliox (280 - 0 msw)
 - PO₂ = 50 kPa (675 - 120 msw) then 60 kPa (120 - 15 msw)
then 24 % (15 - 0 msw)
 - Duration : 24 days

The gas temperature of the chambers was maintained during Hydreliox period between 30°C and 33°C depending on pressure and corresponding to thermally neutral condition. The relative humidity was about 50 %.

Post-dive : 2 months and half.

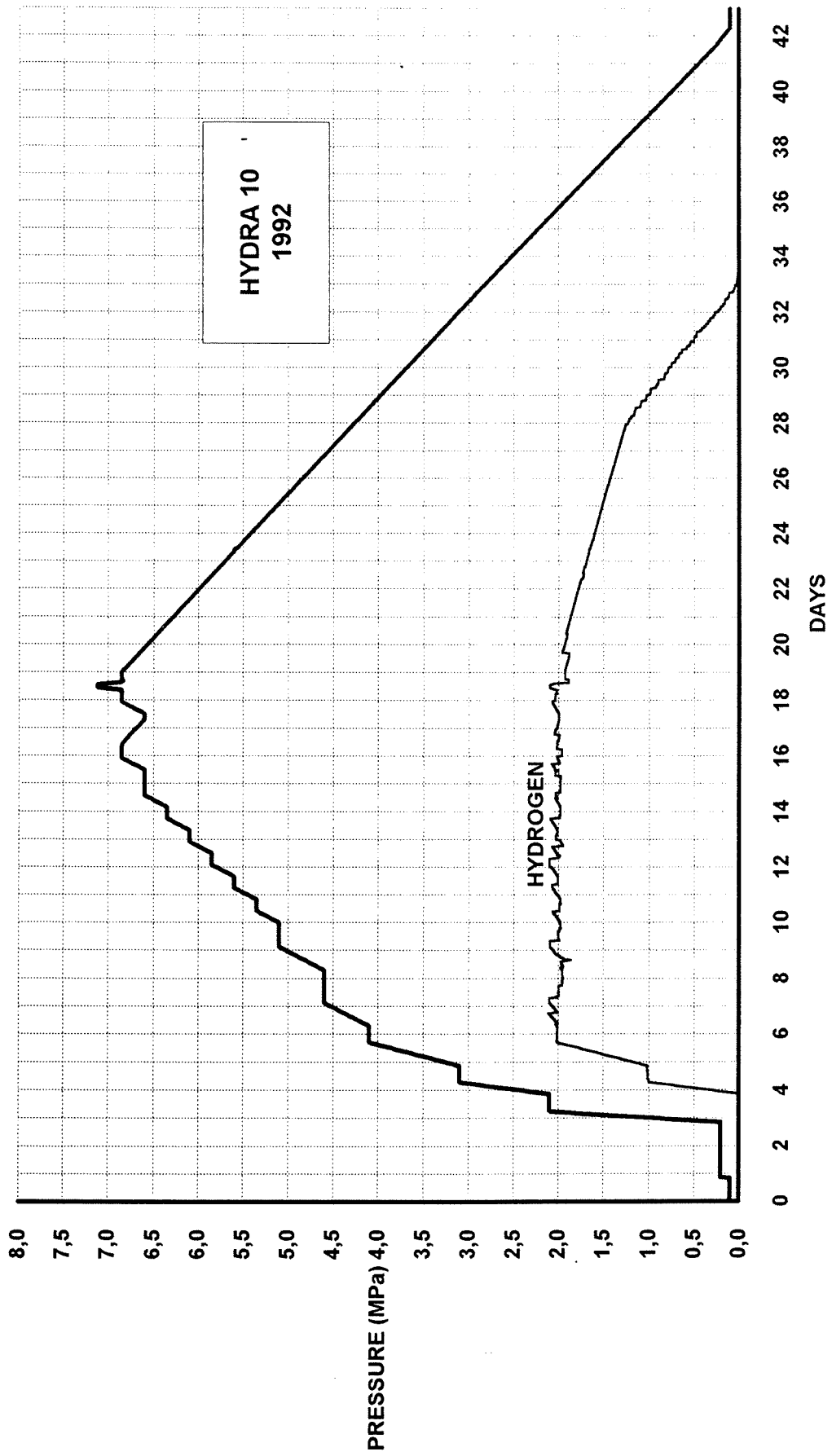


Figure 1

Scientific Program

Medical follow-up

COMEX Medical Service :

- Selection of divers.
- Hygiene.
- Nutrition and Dietetics.

Pre and post-dive health evaluation

- Clinical examination : Comex Medical Service.
- Breathing function : Ste Marguerite Hospital/Marseilles.
- Cardiology : Les Alpilles Clinic/Marseilles.
- NMR Imagery : Timone Hospital/Marseilles.
- Ophthalmology : Hotel-Dieu Hospital/Marseilles.
- Psychology : Timone Hospital/Marseilles.
- Kinesitherapy and Osteopathy : COMEX Medical Service.

Neurophysiology

- Tremor : CNRS/Marseilles.
- EEG (Electroencephalography) : CNRS/Marseilles.

Psychology

- Sensitive - motor and cognitive tests : AMF/Aubagne.
- Clinical Psychology : Timone Hospital/Marseilles.
- Taste analysis : SOPAD-NESTLE/Paris.

Cardio-vascular and breathing functions

- ECG/TA at rest and during exercise : Les Alpilles Clinic and North Hospital/Marseilles.
- Cardiac out-put at rest and during exercise : North Hospital/Amiens.
- Transcutaneous PO₂/PCO₂ at rest and during exercise : North Hospital/Amiens, Calmette Hospital/Lille.
- Electromyography (EMG) of diaphragm and skeletal muscle : North Hospital and CNRS/Marseilles.
- Somesthetic and breathing sensorial analysis : CNRS/Marseilles.
- Detection of circulating bubbles (Doppler) : COMEX Medical Service.

Biochemistry

Blood and urine biology pre and post-dive (and urine biology during dive) : COMEX Medical Service, Purpan Hospital/Toulouse, Salvator Hospital/Marseilles.

Others

- Hyperbaric voice unscrambling : ENSSAT-LASTI/Lannion, CYBERNETIX/Marseilles.
- Diving individual equipment : COMEX PRO.
- Underwater monitoring of the diver : COMEX, North Hospital/Amiens.
- Underwater ergonomics : COMEX, North Hospital/Amiens.

Divers

Three professional deep divers (and one substitute) from COMEX and STOLT COMEX SEAWAY companies performed HYDRA 10. The divers were selected among very experienced (10 - 15 years) divers who had participated before to deep COMEX experimental dives (450 msw or deeper) including hydrogen program dives.

The divers' team was trained during one month of pre-dive period with medical follow-up and health evaluation.

RESULTS AND DISCUSSION

The High Pressure Syndrome was reduced during HYDRA 10. The three divers were able to reach 675 msw (6.85 MPa) and one of them 701 msw (7.11 MPa).

Up to 650 msw, during compression phase, no symptom appeared and the three divers were in excellent shape to perform all programmed tasks.

At 650 msw (6.6 MPa) and deeper, we particularly observed :

- An increasing HPNS with : slight tremor, myoclonia, dysmetria which induced psychometric and intellectual performance decrease.
- A dyskinesia associated to proprioception troubles with muscular weakness.
- A decrease in appetite which required a change in the divers nutrition.
- Sleep disturbance with decrease of deep sleep phases.
- A slight ventilatory impairment without dyspnea or nasal respiratory difficulty.
- No articular pain or "no juice joint" syndrome.

When the divers reached 675 msw (6.85 MPa), due to these impairments and a general fatigue, the Scientific Board decided after one night at this depth to return to 650 msw (6.6 MPa).

After a short stage at 650 msw (6.6 MPa), the divers recovered good physical conditions and a new compression to 675 msw (6.85 MPa), was decided.

Friday November 20th, 1992, one diver, the least sensitive of the three to HPS, entered in the "EMS 800" for 7 hour-excursion dive to 701 msw (7.11 MPa). During the three hours spent at that record depth, he performed a variety of scientific tests including a calibrated effort test on arm-ergometer. At 701 msw (7.11 MPa), the diver presented no ventilatory impairment or dyspnea, no nasal respiratory difficulty, no articular pains and no dizziness or dysmetria but only a slight postural distal tremor. ECG as strictly normal and EEG not much modified.

During the decompression to 675 msw (6.85 MPa) and during the 9 hours stop at this depth, no circulating bubble was detected by Doppler method.

The 2 MPa hydrogen partial pressure used in HYDRA 10 limited the hydrogen narcotic effect observed in HYDRA 6 and 9. So these symptoms were slight with mainly some psychodysleptic effects and mental and emotional changes.

During decompression Hydreliox phase, we observed a progressive improvement of divers, with few bubbles detected after moving. When the hydrogen was selectively removed from Hydreliox and for PH_2 lower than 12 b (1.2 MPa), the divers recovered their Heliox feeling : ventilatory impairment with nasal respiratory difficulty and arthralgia.

Eight working dives in the wet chamber (EMS 800) were carried out during decompression at depths of 660, 640, 635, 580, 550, 490, 460 msw on Hydreliox and at 145 msw on Heliox. The three divers demonstrated their effectiveness and working capacity during each dive as they performed exercise on arm-ergometer and assembled COMEX pipe puzzle according to an isometric drawing in a remarkably short time.

We noted no difference in ventilatory rate and heart rate between work in water, on the surface and at different depths. We concluded that an appropriate and stable cardio-ventilatory adaptation was monitored on the three divers and for different amounts of work imposed.

CONCLUSIONS

All the HYDRA 10 objectives were met. The use of hydrogen breathing mixture, Hydreliox, not only enhances the divers' effectiveness and working capabilities, but also provides improved safety. The increased comfort can be used to ensure greater reliability for human intervention on undersea oil production facilities. By optimization of following parameters : compression rate, hydrogen partial pressure, selection and training of divers and chamber comfort, depths of 300 to 650 msw can be considered accessible to a large number of professional divers.

In addition to the adaptation to long residence times at very great depths with more than 9 days below 600 msw and more than 5 days below 650 msw with one excursion dive at 701 msw record depth, was now demonstrated.

Oil companies can now count on human technical assistance at depths far exceeding the limits of conventional helium dive (200 - 300 msw). Hydrogen is truly the key to extreme depths.

REFERENCES

- COMEX, Direction Scientifique (1984) HYDRA 3- Souris, 600 mètres - HélioX/Hydrox, 30 pp.
- COMEX, Direction Scientifique (1984) HYDRA 4, 200 pp.
- COMEX, Direction Scientifique (1986) HDYRA 5, 400 pp.
- COMEX, Direction Scientifique (1986) HYDRA 6 - Souris, 30 pp.
- COMEX, Direction Scientifique (1988) HYDRA 6 - 7, 400 pp
- COMEX SERVICES (1989) HYDRA 8, 200 pp.
- COMEX, Direction Scientifique (1988) HYDRA 9 - Souris, 20 pp.
- COMEX, Direction Scientifique (1990) HYDRA 9 - Singes, 33 pp.
- COMEX, Direction Scientifique (1990) HYDRA 9, 200 pp.
- COMEX, Direction Scientifique (1992) HYDRA 10 - Singes, 86 pp.

Financial support from the Commission of the European Communities (Energy Directorate) and the French Ministry of Industry and Foreign Trade (Hydrocarbon Division).

HYDRA 10

ETUDES NEUROPHYSIOLOGIQUES

J.C. ROSTAIN, M.C. GARDETTE-CHAUFFOUR, C. TOMEI

**CNRS - ERS 23
BIOLOGIE HAUTES PRESSIONS
FACULTE DE MEDECINE NORD
13916 MARSEILLE Cédex 20**

I - INTRODUCTION

La plongée en mélange hélium-oxygène induit un syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP) à partir de 150 à 200 mètres de profondeur (1,5 à 2 MPa de pression). Chez l'homme, ce syndrome est composé de symptômes comportementaux et de perturbations électrophysiologiques (Tableau n° 1) (Brauer et al. 1969; Fructus et al. 1969; Bennett et Towse 1971; Rostain et Naquet 1974; 1978; Bennett 1975, Lemaire et Rostain 1988, Bennett et Rostain 1993; Rostain 1993). L'utilisation d'un gaz narcotique comme l'azote, rajouté au mélange hélium-oxygène permet de réduire certains symptômes comportementaux du SNHP, en fonction de l'antagonisme entre les substances narcotiques ou anesthésiques et la pression (Miller et al. 1973; Bennett et al. 1974; Naquet et al. 1975; Rostain et al. 1980). L'hydrogène est un autre gaz qui peut être utilisé en plongée profonde. En effet, l'hydrogène est plus léger que l'hélium, ce qui est un avantage pour la mécanique respiratoire; il possède aussi un pouvoir narcotique qui peut réduire certains symptômes du SNHP. Dans le passé, plusieurs expériences avaient été effectuées chez l'homme (Zetterstrom 1948) et chez l'animal (Michaud et al. 1969; Brauer and Way 1970; Rostain et Naquet 1972; Halsey et al. 1975), mais leurs résultats étaient contradictoires. Avec les progrès techniques de ces dernières années qui permettent une manipulation de l'hydrogène dans de bonnes conditions de sécurité, une étude plus systématique des effets de ce gaz a été entreprise notamment en France par la COMEX depuis 1983. Cependant, les premières expériences réalisées chez l'homme à 300 mètres (opération HYDRA IV), ont montré que l'hydrogène entraînait des troubles narcotiques à partir de 240 mètres et qu'il était par conséquent trop narcotique pour être utilisé comme seul diluant de l'oxygène dans le mélange respiratoire (Carlioz et al. 1984; Fructus et al. 1984; Lemaire et Rostain 1988; Rostain et al. 1988b). Les plongées HYDRA V et VI devaient nous montrer que le mélange Hydrogène-Hélium-Oxygène avec une pression partielle d'hydrogène ne dépassant pas 25 bars permettait d'atteindre 450-500 mètres sans manifestation narcotiques et avec un SNHP réduit (Fructus 1987; Gardette, 1987; 1989; Rostain et al. 1987; 1988b). L'opération HYDRA IX devait confirmer que des pressions partielles d'hydrogène supérieures à 2,5 MPa risquaient d'entraîner des troubles narcotiques de nature psychotique chez des sujets sensibles. Par ailleurs, les études cognitives et neurophysiologiques réalisées chez le singe Macaque Fascicularis ont montré que les mélanges hydrogène-hélium-oxygène permettaient d'atteindre 1200 m de profondeur sans trouble cognitif avant 900-1000 m et sans symptômes du SNHP avant 800 mètres (Rostain et al. 1992; 1993; Alexinski et Rostain 1993). Ces résultats laissaient penser que l'homme pouvait atteindre dans de bonnes conditions, la profondeur de 700 m avec un mélange hydrogène-hélium-oxygène.

| | Hélium-Oxygène | Hélium-Azote-Oxygène 5% N2 | Hydrogène-Hélium-Oxygène 54-56% H2 |
|------------------------------------|--|--|---|
| symptômes neurologiques | Nausées, vertiges Tremblement (8-12Hz) fasciculations myoclonies dysmétrie sommolence diminution importante des performances psychométriques | sommolence diminution modérée des performances psychométriques | diminution minime des performances psychométriques |
| symptômes électrophysiologiques | modifications EEG : augmentation des activités thêta diminution des activités alpha microsommeil perturbation du sommeil augmentation des périodes d'éveil, stades 1 et 2. diminution des stades 3 et 4 instabilité du sommeil paradoxal modification des poten- tiels évoqués et des cycles d'excitabilité corticaux modification des réflexes | modifications EEG : augmentation des activités thêta diminution des activités alpha microsommeil perturbation du sommeil augmentation des périodes d'éveil, stades 1 et 2. diminution des stades 3 et 4 instabilité du sommeil paradoxal modification des poten- tiels évoqués et des cycles d'excitabilité corticaux modification des réflexes | modifications EEG : augmentation des activités thêta diminution des activités alpha perturbation du sommeil augmentation des périodes d'éveil, stades 1 et 2. diminution des stades 3 et 4 instabilité du sommeil paradoxal ? ? |

L'opération HYDRA 10 avait pour but de déterminer si la pression de 7 MPa pouvait être atteinte avec un mélange hydrogène-hélium-oxygène contenant 2 MPa d'hydrogène.

II - METHODES

Au cours de l'opération HYDRA 10, nous avons réalisé une étude du tremblement hyperbare, des modifications des activités EEG et des perturbations de l'organisation du sommeil.

Le tremblement a été mesuré avec un accéléromètre "minor tremor pickup" modèle MT3T de Nihon Kohden (1-100 Hz), placé sur le majeur de la main dominante. Il est mesuré au cours de l'épreuve du serment (20 secondes), répétée trois fois de suite, deux fois par jour à la même heure (8h30 et 18h00). Le signal est simultanément analysé en temps réel sur un ordinateur (LSI 11/23 Plessey Vixen) et enregistré sur bandes magnétiques analogiques. L'analyse a consisté à déterminer l'amplitude moyenne du tremblement, sa puissance et sa fréquence. Les données ont été stockées sur disquettes, reproduites sur imprimante et visualisées sous forme de courbes sur une console de visualisation Plessey PT100G. Les résultats ont été exprimés en pourcentage de différence par rapport à la valeur moyenne obtenue au cours des contrôles.

Tout au long de la plongée, (compression, séjour et décompression), les activités EEG ont été recueillies avec un bonnet "Electro-cap International"; les sujets se plaçaient eux-mêmes ces bonnets, le contact avec les électrodes étant assuré par un gel conducteur (Electro-gel, ECI) que les plongeurs injectaient au moyen d'une seringue à l'intérieur des électrodes. Ces électrodes se situaient en positions fronto-polaire, centrale, temporale-moyenne et occipitale. Au cours du test effectué tous les jours pendant la compression et tous les trois jours pendant la décompression, entre 8h00 et 9h00 du matin, les activités EEG étaient enregistrées en dérivation bipolaire jumelée sur l'hémisphère droit, fronto polaire-centrale (Fp-C), centrale-temporale moyenne (C-Tm), temporale moyenne-occipitale (Tm-O) sur un électroencéphalographe (ALVAR) et sur bandes magnétiques analogiques (multiplexeur-adaptateur FM SEVME informatique et REVOX A77). Les enregistrements ont été analysés en temps différé sur un ordinateur (PDP 11/73 Digital), pour obtenir des spectres de puissance. Les calculs sont effectués pour chaque bande de fréquence :

| | | | |
|--------|---|-------|----|
| Delta | : | 1-4 | hz |
| Thêta | : | 4-7 | hz |
| Alpha | : | 8-14 | hz |
| Bêta 1 | : | 14-22 | hz |
| Bêta 2 | : | 22-40 | hz |

Les résultats sont exprimés en pourcentage de différence par rapport aux valeurs de contrôle pour chaque bande de fréquence.

Les enregistrements EEG de sommeil ont été effectués pour les nuits de référence : trois nuits en surface et les deux nuits de confinement; pour la compression, toutes les 3 nuits (nuit 4 vers 300m, 7 vers 450m, 10 vers 530 et 13 vers 625); pendant la décompression toutes les 5 nuits (nuit 24, 500m; 29, 360m; 34, 210m).

Pour cette étude, les activités EEG de sommeil étaient recueillies avec les électrodes des bonnets Electro-Cap et les mouvements oculaires étaient obtenues à partir d'électrodes de contact (capsulex Alvar) que les sujets se plaçaient eux mêmes de chaque côté des yeux, et qu'ils maintenaient en place avec du sparadrap pour toute la nuit. Après lecture et interprétation des tracés EEG de sommeil, les données ont été analysées sur ordinateur (PDP 11/23 et 11/73 Digital), pour obtenir les durées, les fréquences d'apparition et la répartition en pourcentage des divers stades de sommeil, ainsi que l'hypnogramme.

III - RESULTATS

III - 1. Le tremblement hyperbare

L'analyse du tremblement hyperbare ne montre pas d'évolution particulière jusqu'à la profondeur de 455 m où on note une augmentation transitoire de l'ordre de 50 à 70 % selon les sujets (Fig 1); ce tremblement disparaît après 550 mètres. Une nouvelle augmentation est enregistrée à partir de 650 mètres; elle est légère chez P1 (I.S.) et P3 (P.R.) (maximum 50%); elle est relativement importante chez P2 (M.T.) (200 à 300%) (Fig 1). Ce tremblement reste important après la compression de ce sujet de 675 à 700 mètres et ne régresse que lentement pendant la décompression; il ne disparaît qu'après 450 mètres. Chez les deux autres sujets, le tremblement qui reste faible (< 50%) régresse aussi lentement et il ne disparaît totalement qu'après 450-400 mètres.

III - 2. Les activités électroencéphalographiques

Les enregistrements EEG montrent un certain nombre de modifications.

Pendant la compression, les activités de fréquence alpha sont diminuées assez rapidement dès les enregistrements à 200 mètres chez les sujets P1 et P3. Les spectres de puissance (Fig 2 et Fig 3) donnent une diminution de l'ordre de 70 à 90 % qui persiste pendant toute la compression et une partie de la décompression; le retour à des valeurs voisines de celles des références se situe

HYDRA 10 TREMBLEMENT

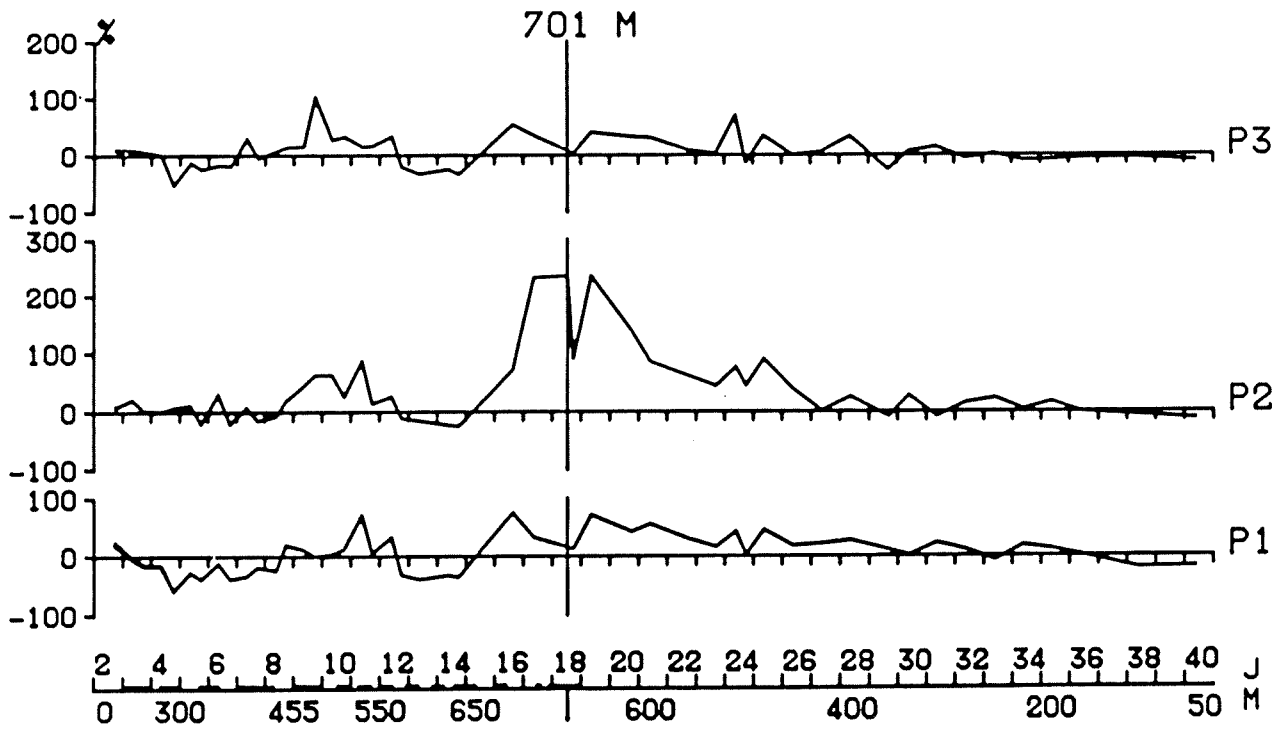


Fig. 1.

Evolution de l'amplitude au cours de la plongée HYDRA 10 exprimée en pourcentage de différence par rapport à la valeur de surface pour les trois sujets de bas en haut P1, P2, P3.

HYDRA 10 P.1

% ENERGIE YF Tm-0

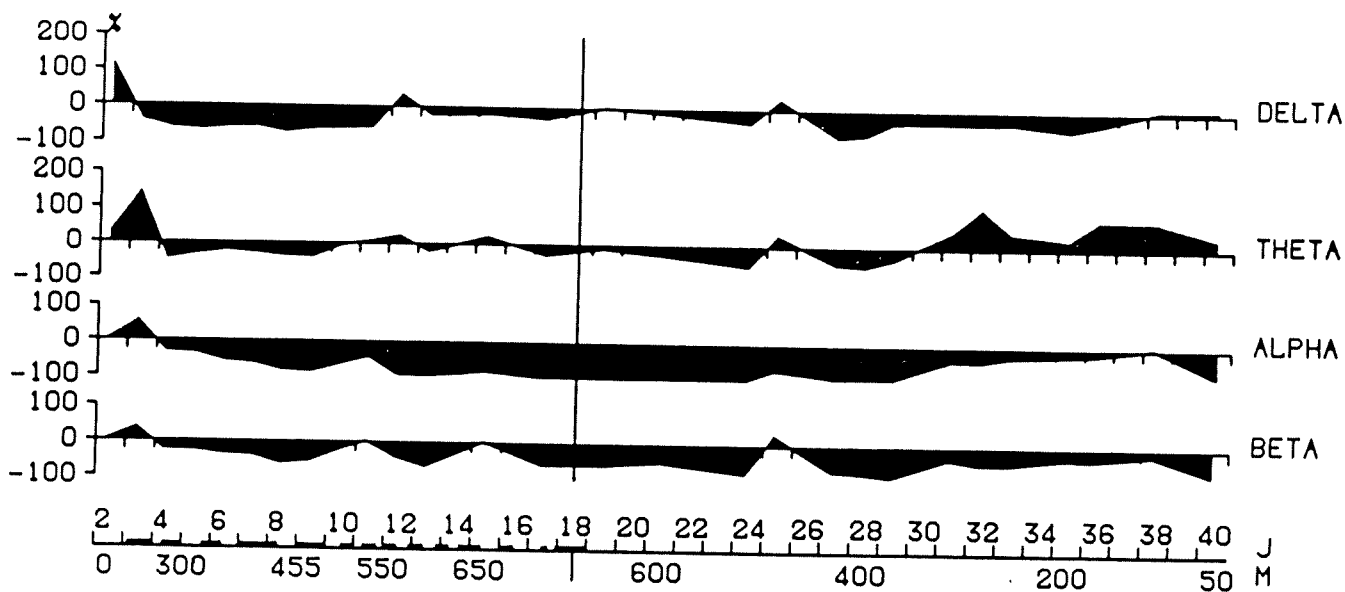


Fig. 2.

Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P1 sur la dérivation postérieure (temporale moyenne-occipitale, Tm-0), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de différence par rapport aux valeurs de référence en surface. Ces variations sont représentées de haut en bas pour la puissance des bandes de fréquences delta, thêta, alpha et bêta. En abscisses, sont portés les jours et les profondeurs.

HYDRA 10 P.2

% ENERGIE YF Tm-0

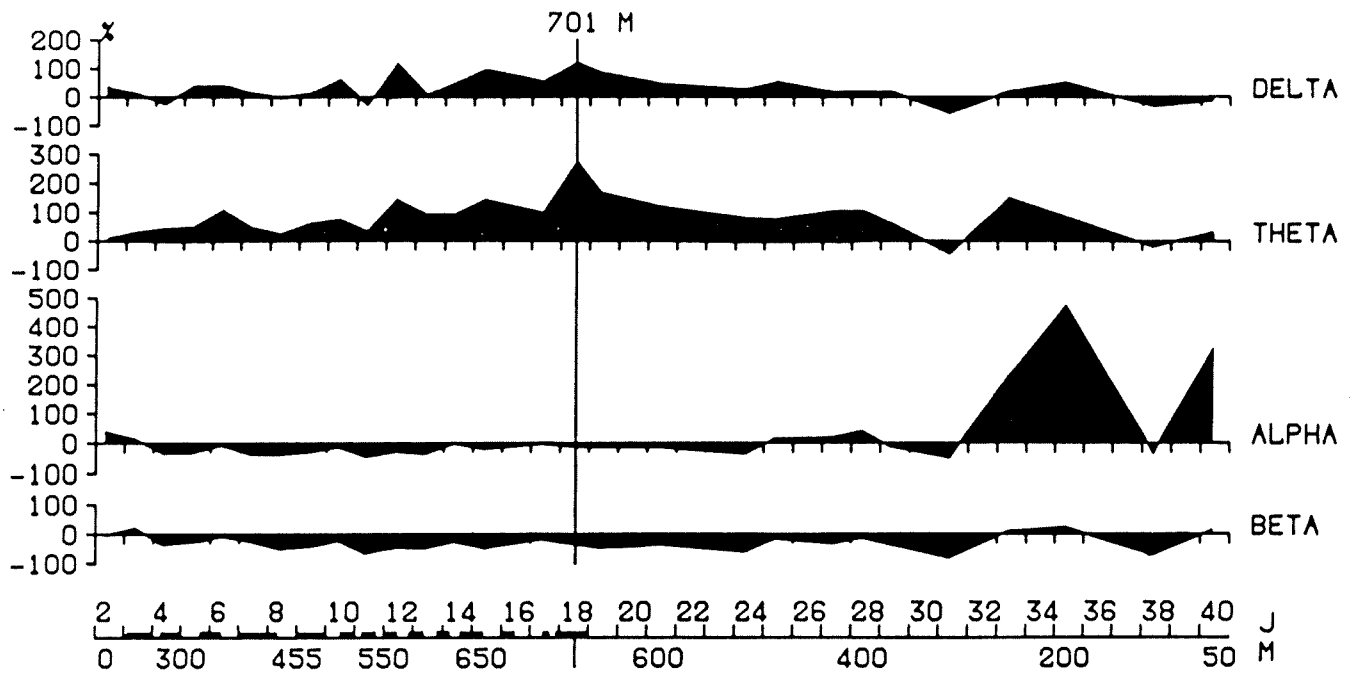


Fig. 3.

Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P2 sur la dérivation postérieure (temporale moyenne-occipitale, Tm-0), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de différence par rapport aux valeurs de référence en surface. Ces variations sont représentées de haut en bas pour la puissance des bandes de fréquences delta, thêta, alpha et bêta. En abscisses, sont portés les jours et les profondeurs.

HYDRA 10 P.3

% ENERGIE YF Tm-0

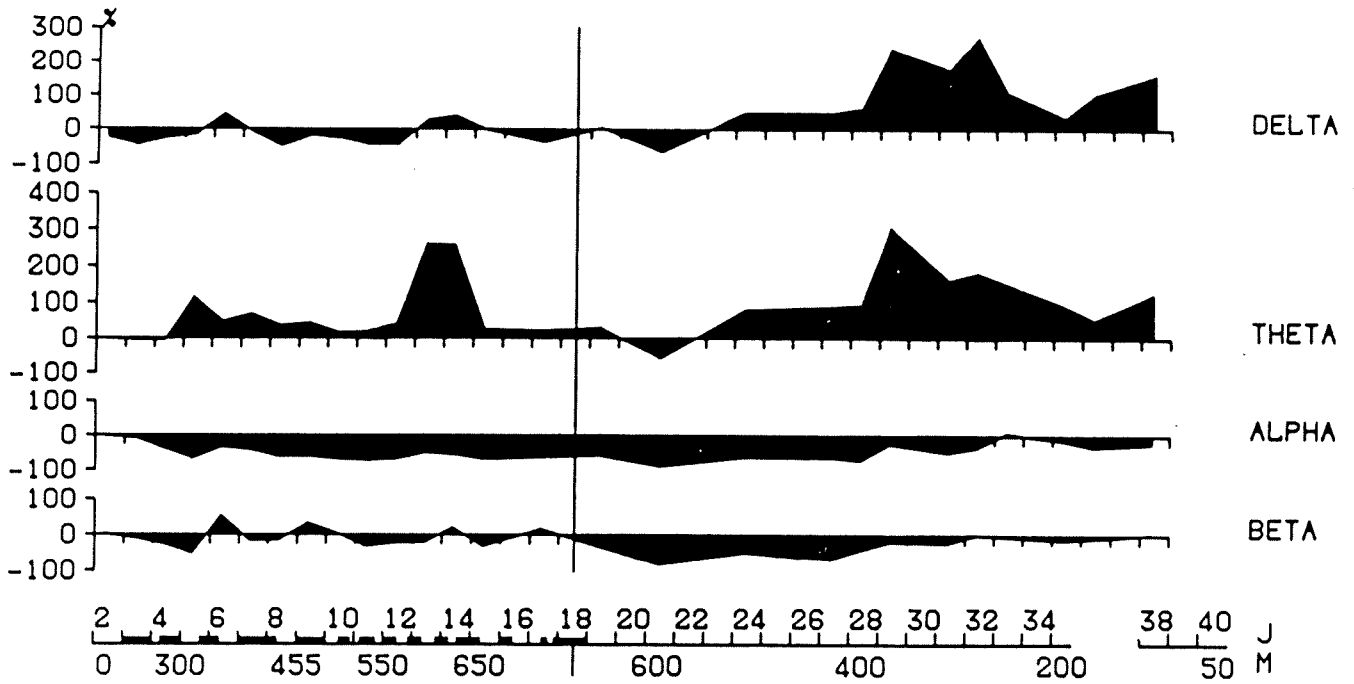


Fig. 4.

Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P3 sur la dérivation postérieure (temporale moyenne-occipitale, Tm-0), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de différence par rapport aux valeurs de référence en surface. Ces variations sont représentées de haut en bas pour la puissance des bandes de fréquences delta, thêta, alpha et bêta. En abscisses sont portés les jours et les profondeurs.

HYDRA 10 - P2

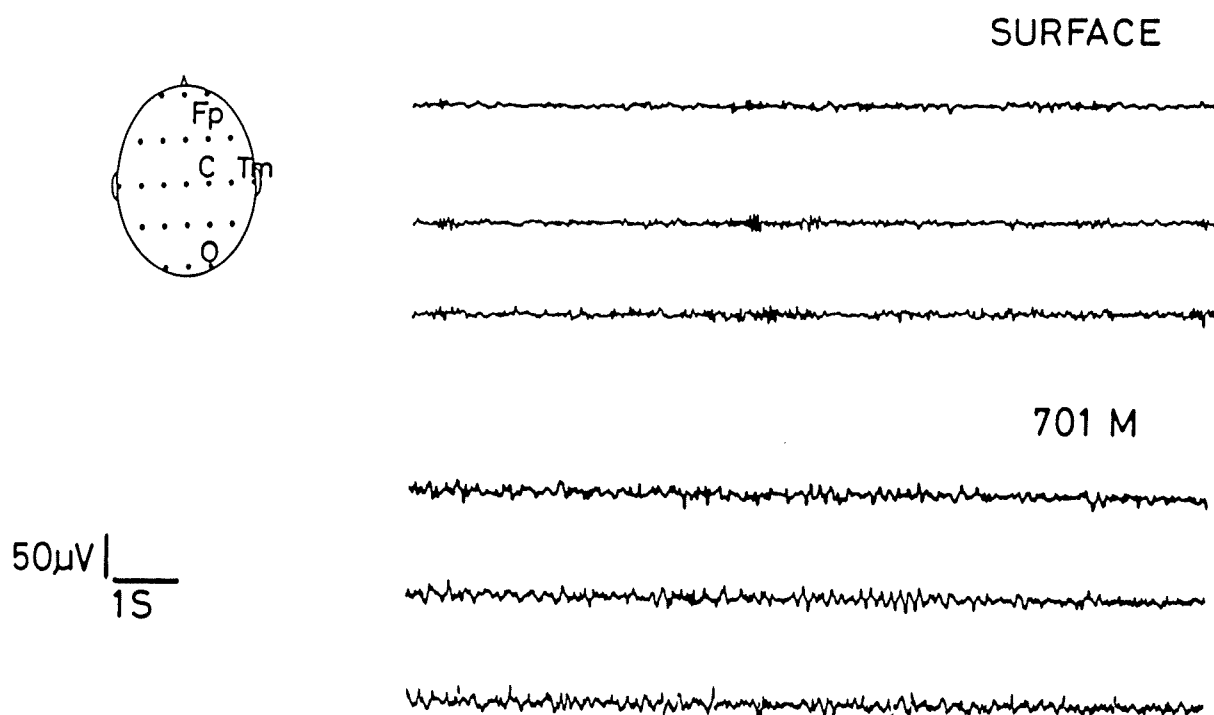


Fig. 5.
Tracés EEG du sujet P2 en surface (tracés supérieurs) et à 701 m (tracés inférieurs). Trois derivations sont représentées de haut en bas, Fp-C (frontopolaire-centrale), C-Tm (Centrale- temporale moyenne) et Tm-O (temporale moyenne-occipitale).

HYDRA 10 - P1

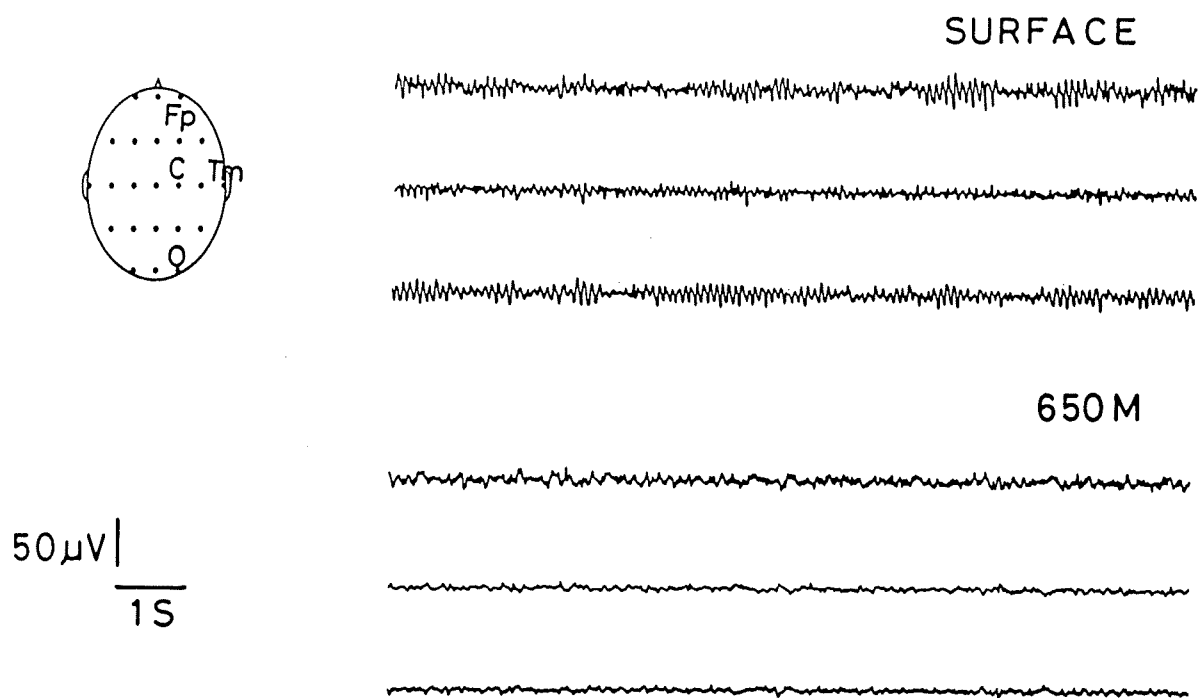


Fig. 6.
Tracés EEG du sujet P1 en surface (tracés supérieurs) et à 650 m (tracés inférieurs). Trois dérivations sont représentées de haut en bas, Fp-C (frontopolaire-centrale), C-Tm (Centrale- temporelle moyenne) et Tm-O (temporelle moyenne-occipitale).

HYDRA 10 - P3

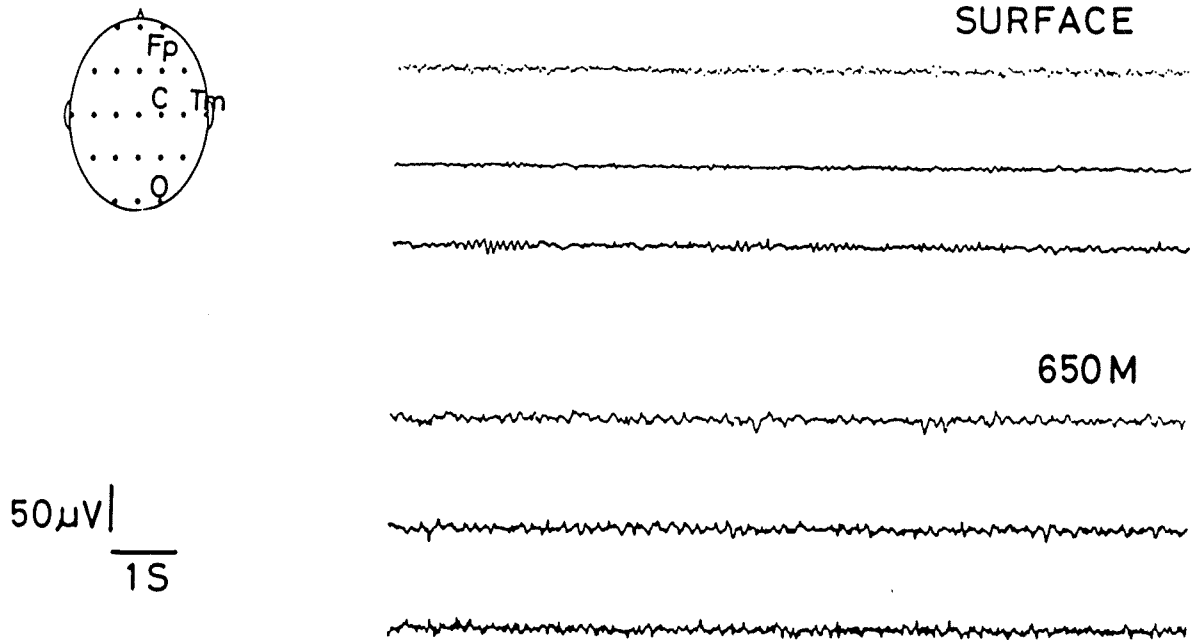


Fig. 7.
Tracés EEG du sujet P3 en surface (tracés supérieurs) et à 650 m (tracés inférieurs). Trois dérivations sont représentées de haut en bas, Fp-C (frontopolaire-centrale), C-Tm (Centrale- temporale moyenne) et Tm-O (temporale moyenne-occipitale).

HYDRA 10 P.1
 % ENERGIE YF Fp-C

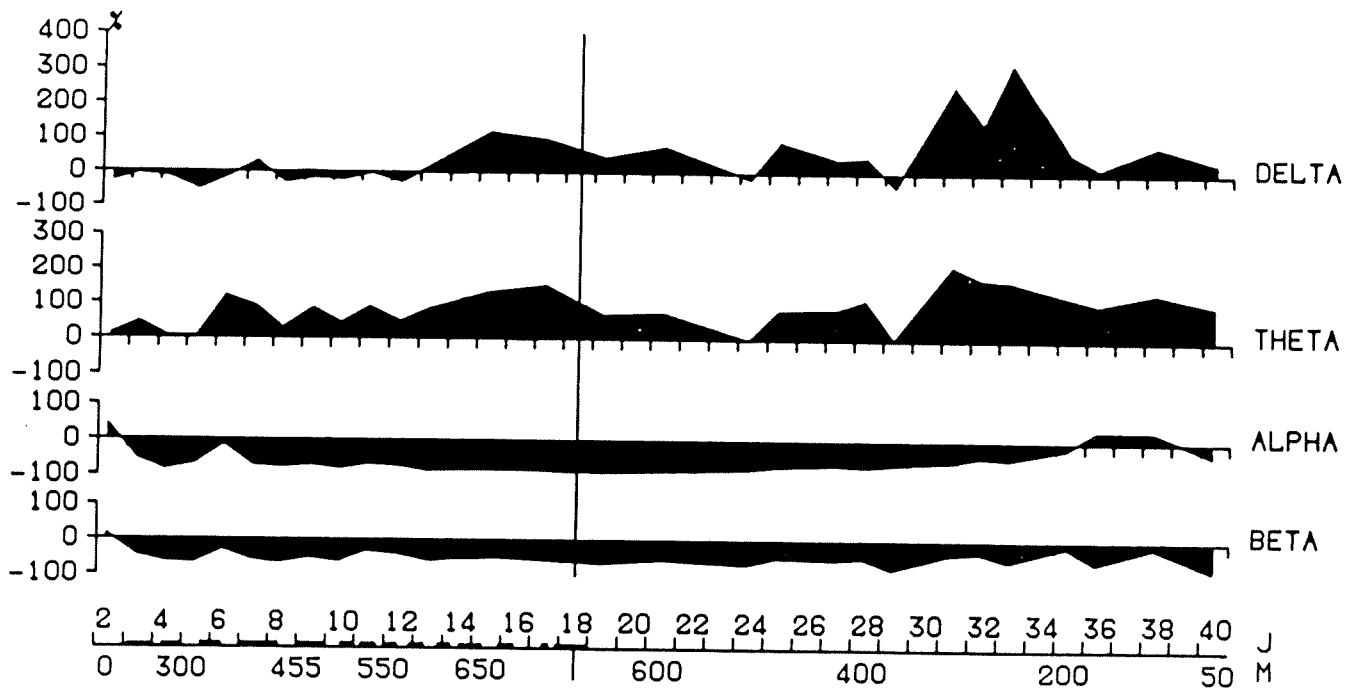


Fig. 8.

Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P1 sur la dérivation antérieure (fronto polaire-centrale, Fp-C), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de différence par rapport aux valeurs de référence en surface. Ces variations sont représentées de haut en bas pour la puissance des bandes de fréquences delta, thêta, alpha et bêta. En abscisses, sont portés les jours et les profondeurs.

HYDRA 10 P.3

% ENERGIE YF Fp-C

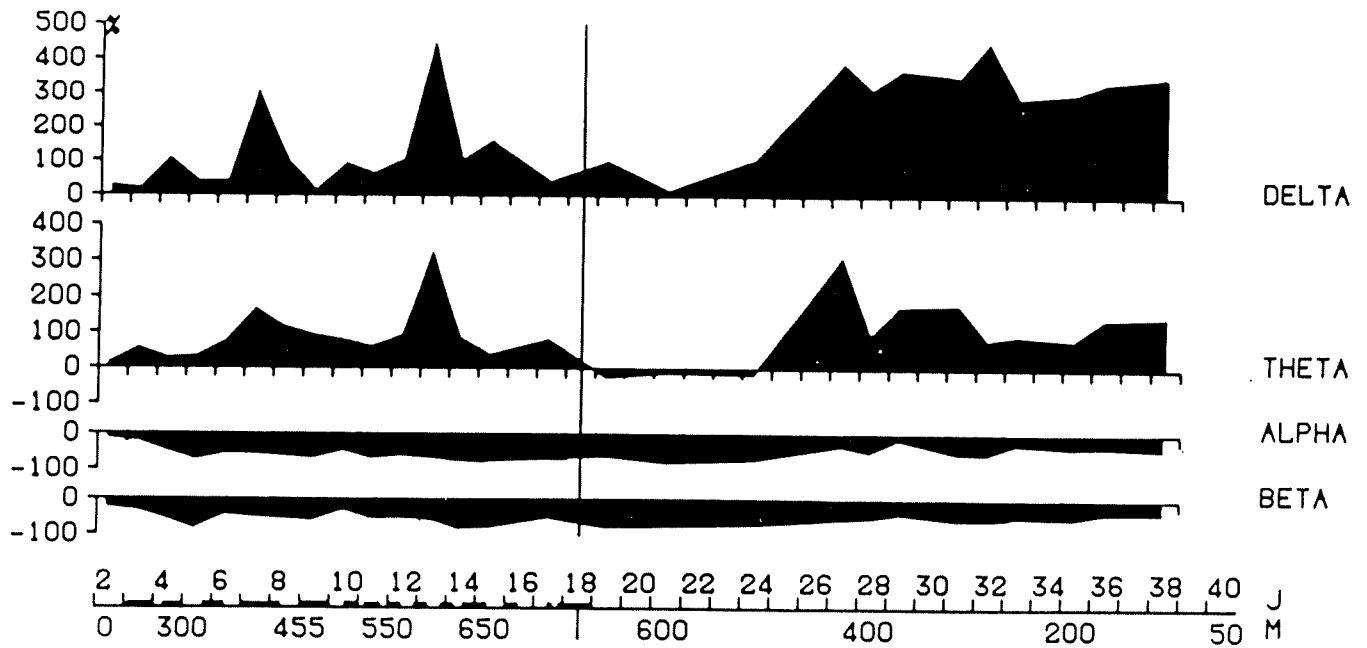


Fig. 9.

Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P3 sur la dérivation antérieure (fronto polaire-centrale, Fp-C), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de différence par rapport aux valeurs de référence en surface. Ces variations sont représentées de haut en bas pour la puissance des bandes de fréquences delta, thêta, alpha et bêta. En abscisses, sont portés les jours et les profondeurs.

HYDRA 10 P₂
% ENERGIE YF Fp-C

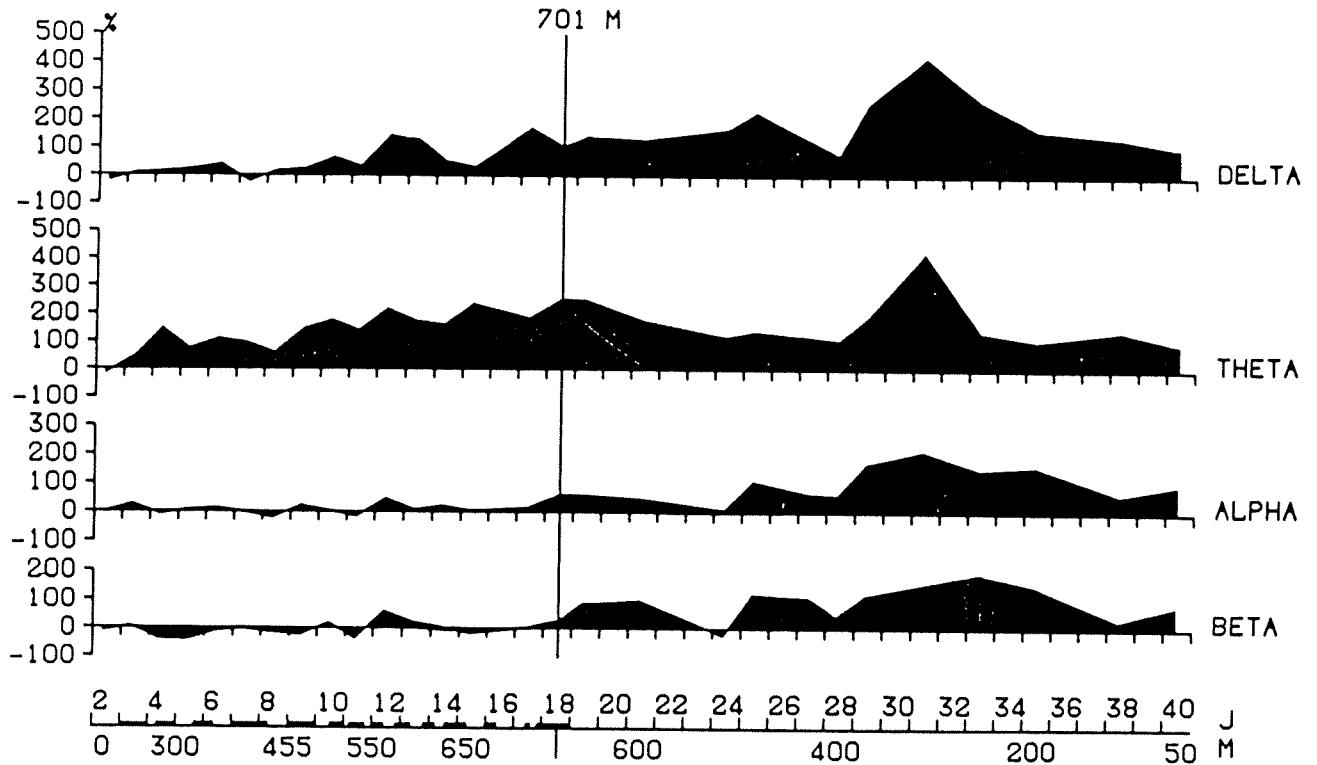


Fig. 10.

Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P2 sur la dérivation antérieure (fronto polaire-centrale, Fp-C), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de différence par rapport aux valeurs de référence en surface. Ces variations sont représentées de haut en bas pour la puissance des bandes de fréquences delta, thêta, alpha et bêta. En abscisses, sont portés les jours et les profondeurs.

après 200 mètres. Chez le sujet P2 (Fig 4), cette dépression est moins visible et ne dépasse pas 50% mais, il est vrai que ce sujet ne présentait pas en surface, une activité de fréquence alpha bien organisée sur la dérivation postérieure lorsque les yeux étaient fermés (Fig 5) alors que les deux autres sujets avaient une activité alpha bien organisée lorsque les yeux étaient fermés (Fig 6 et 7). On enregistre d'ailleurs, chez P2 une augmentation de ces activités, qui dépasse les valeurs de référence pendant la décompression.

Les activités de fréquence bêta sont également diminuées de façon plus ou moins importante selon les dérivations et selon les sujets (Fig 2, 3, 4, 8, 9, 10).

Les activités de fréquence thêta sont augmentées lors de l'enregistrement à 200 mètres chez tous les sujets; cette augmentation est plus importante sur la dérivation fronto-centrale où elle atteint 200 à 300% entre 650 et 675 mètres (Fig 8, 9, 10). Chez P2, (Fig 9). Le maximum d'augmentation des activités thêta est enregistré à 700 mètres sur l'ensemble des dérivations; il est de 250% sur la dérivation fronto-polaire centrale. Pendant la décompression, les activités de fréquence thêta persistent et présentent même une nouvelle augmentation à partir de 400 m chez P3 et à partir de 300 m chez P1 et P2. L'augmentation des activités thêta est encore élevée lors du dernier enregistrement à 50 mètres (environ 100% d'augmentation).

Les activités de fréquence delta ne sont pas augmentées chez P1 et P2 jusqu'à la profondeur de 600 m. Elles augmentent alors légèrement surtout sur la dérivation antérieure pour atteindre 100 à 200 % d'augmentation entre 650 et 675 m (Fig 8, 9); il n'y a pas d'augmentation plus importante chez P2 après sa compression à 700 mètres. Chez P3 (Fig. 3 et 10), les activités de fréquence delta sont augmentées dès le début de la compression sur la dérivation antérieure et présentent des variations importantes selon les enregistrements; on ne peut exclure un artéfact d'enregistrement, ce sujet se plaçant mal son bonnet. Ces activités sont de nouveau en augmentation pendant la décompression mais là encore, la présence d'un artéfact fausse les résultats.

III - 3. Le sommeil

L'analyse du sommeil n'a été possible que chez deux sujets P1 et P2, le troisième n'ayant pas supporté le bonnet pendant la nuit.

Durée du sommeil

La durée du sommeil est diminuée chez les deux sujets les nuits 10 et 13 soit vers 530 et 625 mètres (Fig 11 et 12).

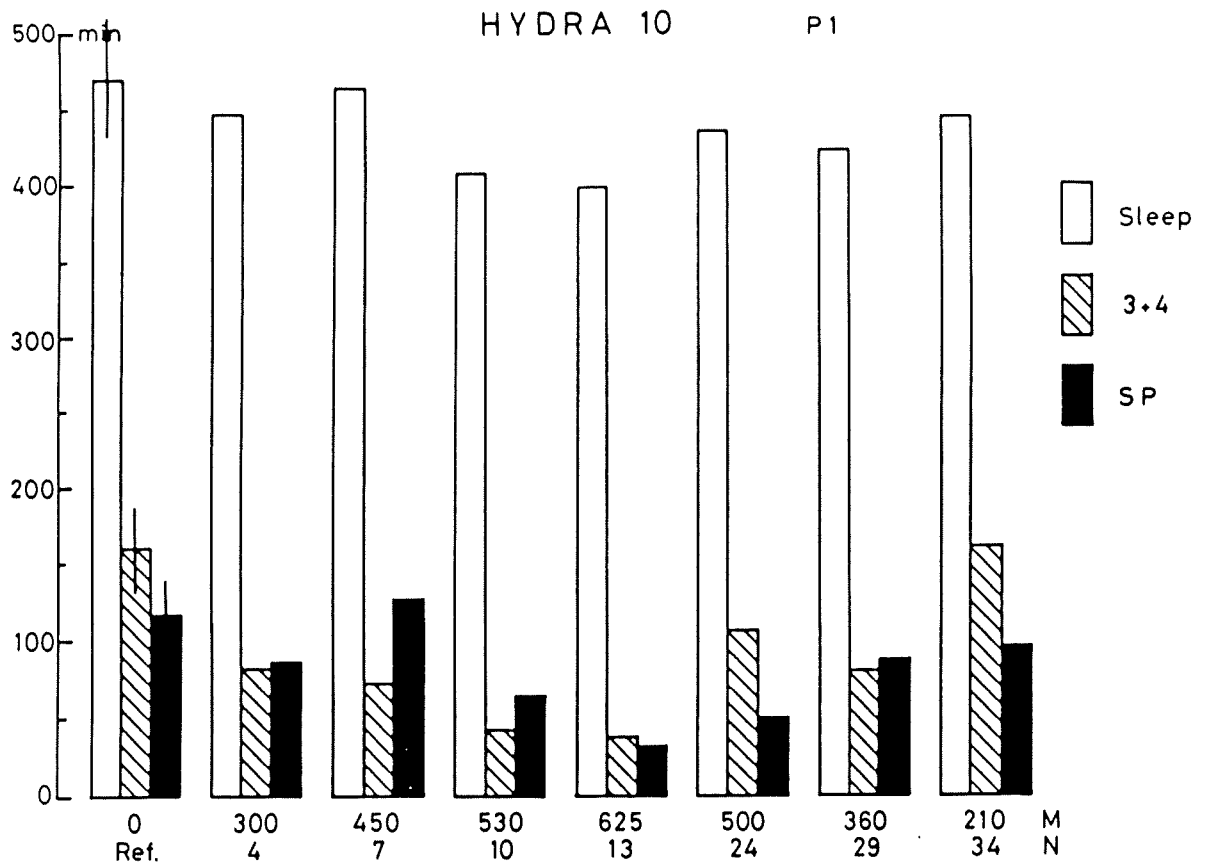


Fig. 11.
 Evolution de la durée du sommeil (sleep), des stades 3+4 et du sommeil paradoxal (SP) au cours des nuits d'enregistrement effectuées chez le sujet P1 pendant la compression et la décompression. Les références correspondent à la moyenne \pm écart type des durées calculée sur les 5 nuits effectuées en surface et en confinement.

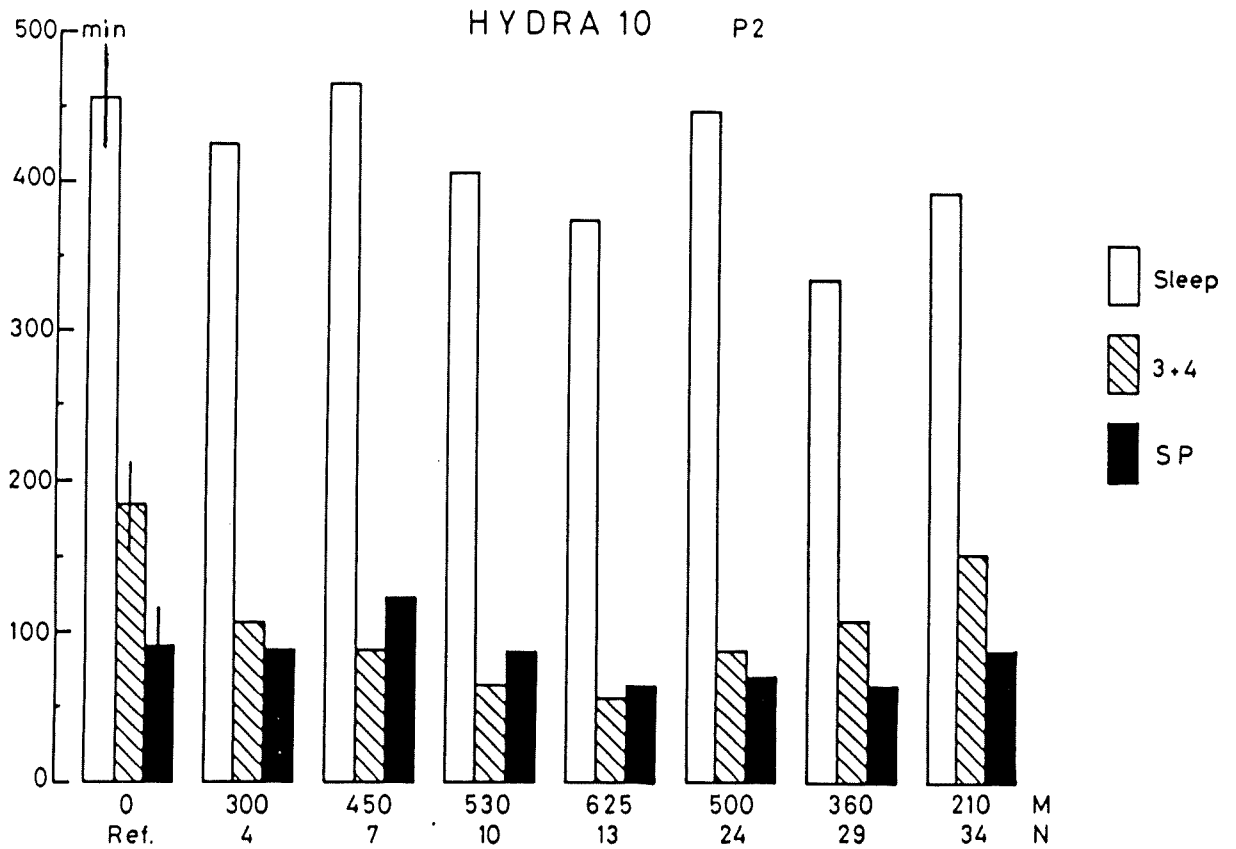


Fig. 12.

Evolution de la durée du sommeil (sleep), des stades 3+4 et du sommeil paradoxal (SP) au cours des nuits d'enregistrement effectuées chez le sujet P2 pendant la compression et la décompression. Les références correspondent à la moyenne \pm écart type des durées calculée sur les 5 nuits effectuées en surface et en confinement.

Cette diminution est de l'ordre de 1h10 chez P1 et de l'ordre de 1h20 chez P2. Pendant la décompression la durée du sommeil récupère des valeurs proches de celle des nuits de référence; chez P2 on retrouve une durée analogue à celle des nuits de référence la nuit 24 puis de nouveau une durée inférieure pour les deux autres nuits.

Cycles de sommeil

Une tendance à un plus grand nombre de cycles est enregistré pendant la plongée surtout chez P1. Alors qu'en moyenne on compte cinq cycles pendant les nuits de référence ($P1 = 5.2 \pm 1.1$; $P2 = 5.2 \pm 1.3$), on enregistre plus de 6 cycles pendant la compression chez P1 (6.25 ± 1.25) alors qu'il n'y a pratiquement pas de changement chez P2 ($5 \pm 0,8$) (Fig 13 et 14). Pendant la décompression, cette augmentation du nombre de cycles persiste chez P1 (6.66 ± 0.6) alors qu'elle est très variable chez P2 (5.66 ± 1.5).

Stades de sommeil

L'analyse des durées et des pourcentages des durées des divers stades de sommeil montre des modifications importantes.

La durée ou le pourcentage des durées des périodes d'éveil ne sont pas sensiblement modifiées excepté la nuit à 625 mètres en compression et la nuit à 500 mètres en décompression chez P2 ou elles sont augmentées (Fig. 16); elles sont en général augmentées chez P1 (Fig. 15).

La durée et les pourcentages des durées du stade 1 de sommeil est augmenté chez P1, le maximum étant enregistré la nuit à 625 mètres. Cette augmentation est beaucoup plus faible chez P2 (Fig. 15 et 16).

Le stade 2 présente une augmentation de la durée et des pourcentages des durées pendant la compression chez les deux sujets et un retour aux valeurs de référence pendant les nuits en décompression (Fig. 15 et 16).

Le stade 3 présente une diminution de la durée et des pourcentages des durées pendant la compression, la valeur minimale étant enregistrée à 625 mètres. Des valeurs équivalentes aux nuits de référence sont enregistrées en décompression à 360 et 210 mètres (Fig. 15 et 16).

Le stade 4 disparaît en compression à partir de 450 mètres chez P2 et à partir de 530 m chez P1; il réapparaît en décompression la nuit à 360 mètres chez P2 et seulement la nuit à 210 mètres chez P1 (Fig. 15 et 16).

Les périodes de sommeil paradoxal (PMO) présentent surtout une diminution des pourcentages des durées à 625 mètres et

HYDRA 10 P1

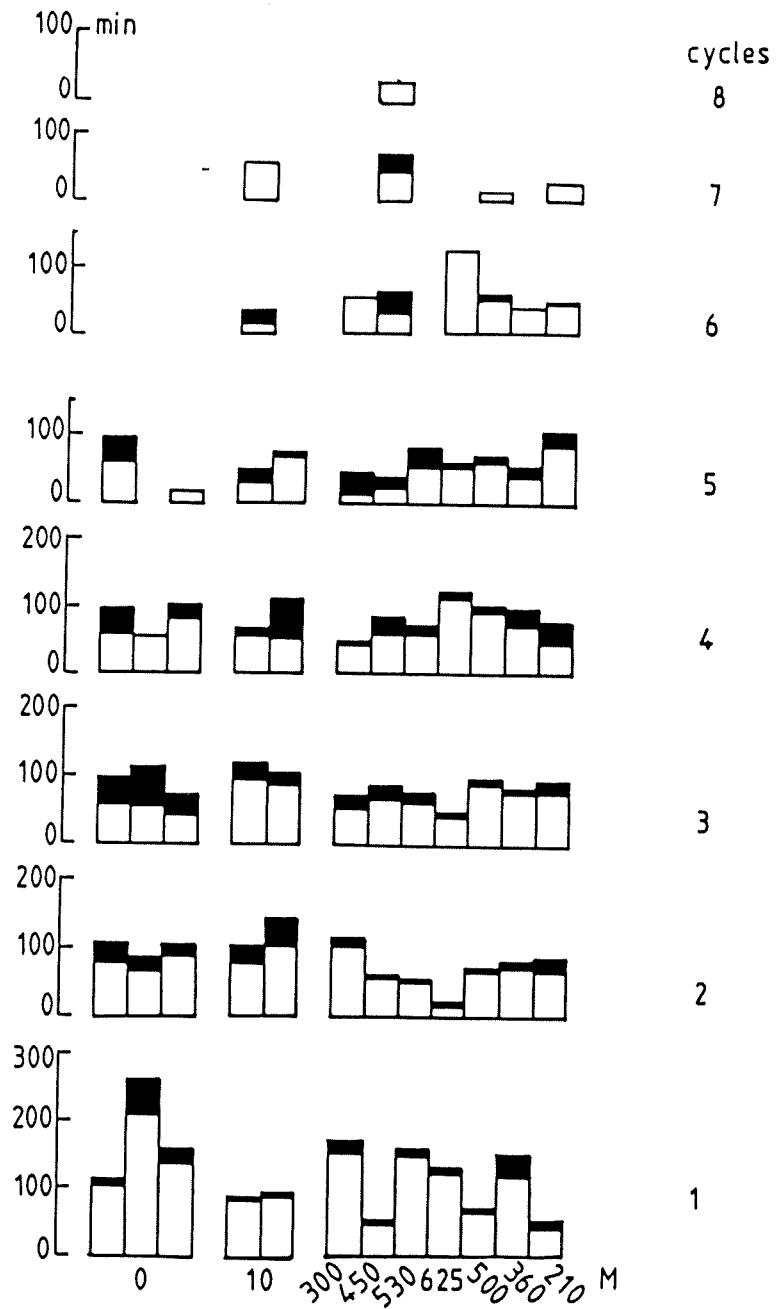


Fig. 13.

Evolution du nombre et de la durée des cycles de sommeil chez le sujet P1 au cours des nuits de référence à 0 et 10 m et pendant la plongée.

HYDRA 10 P2

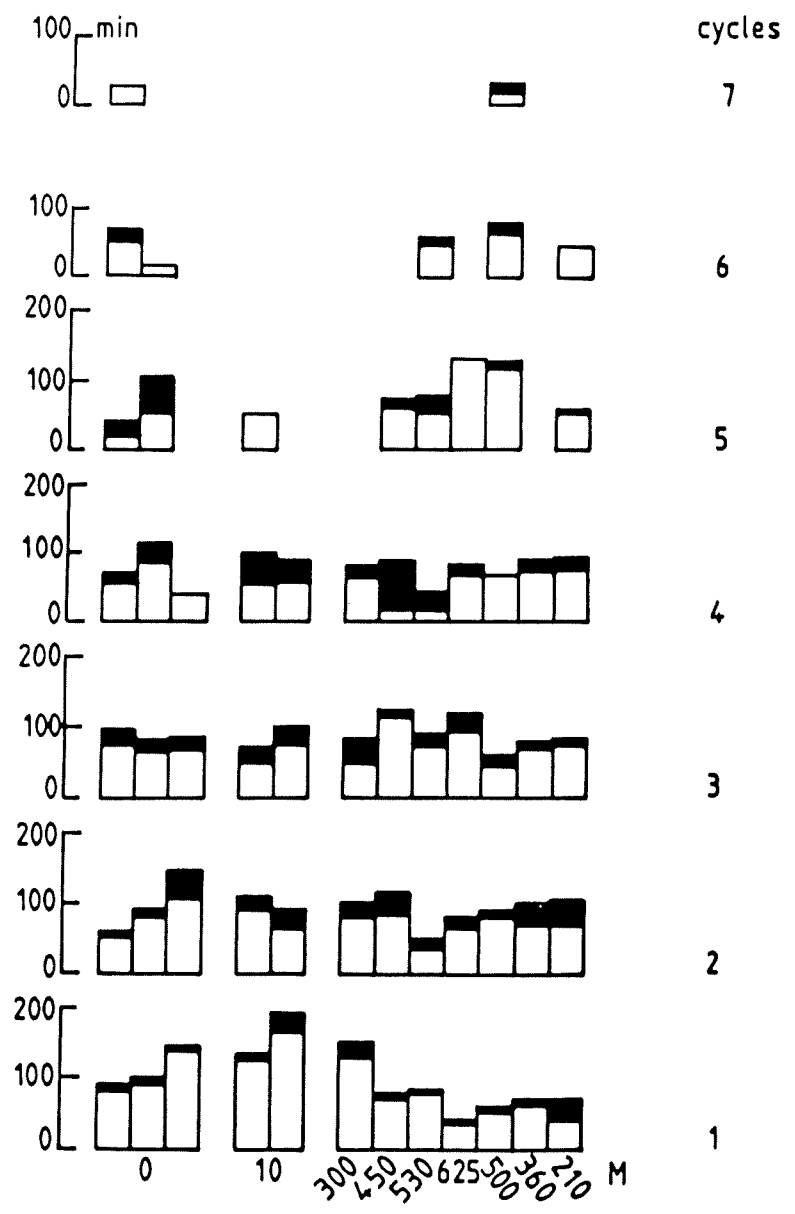


Fig. 14
 Evolution du nombre et de la durée des cycles de sommeil chez le sujet P2 au cours des nuits de référence à 0 et 10 m et pendant la plongée.

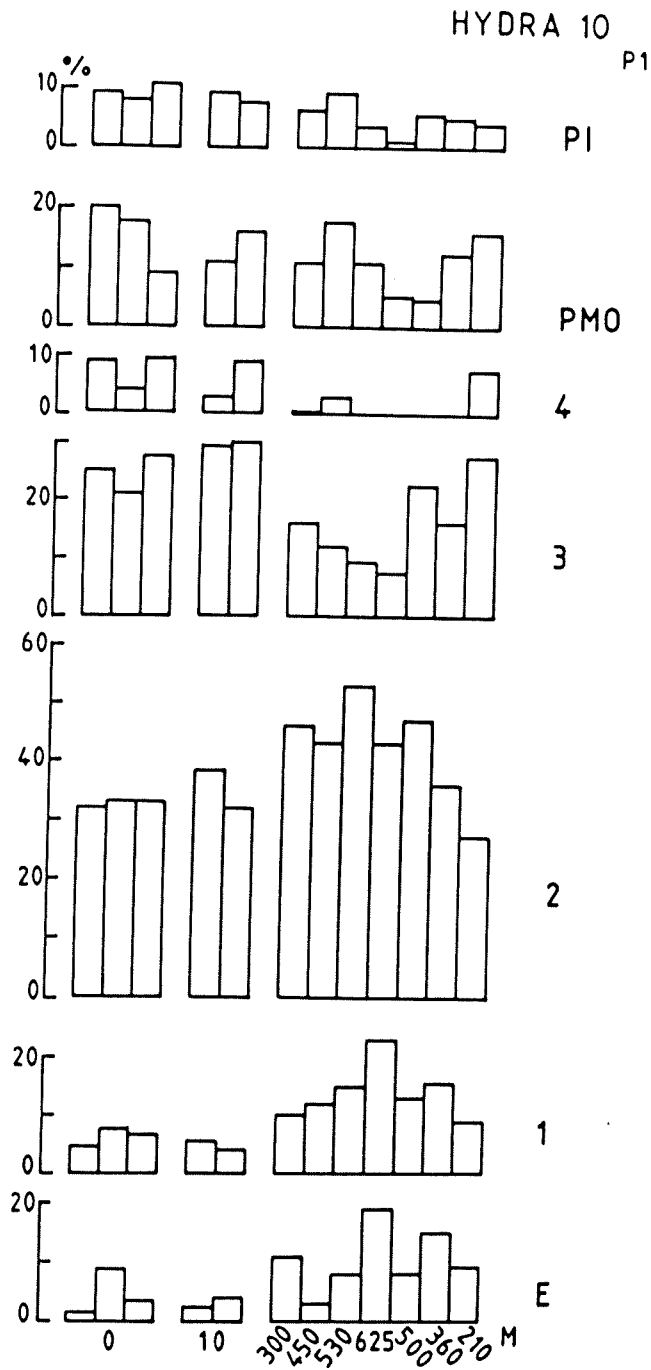


Fig. 15.

Evolution des pourcentages des durées des divers stades de sommeil au cours des enregistrements de référence à 0 et 10 m et pendant la plongée chez le sujet P1.

Les divers stades de sommeil sont représentés de bas en haut, des périodes d'éveil au sommeil paradoxal (PMO) et aux phases intermédiaires (PI). Les nuits sont portées de gauche à droite pour les nuits de références à 0 et 10 m et pour les enregistrements pendant la plongée.

HYDRA 10 P2

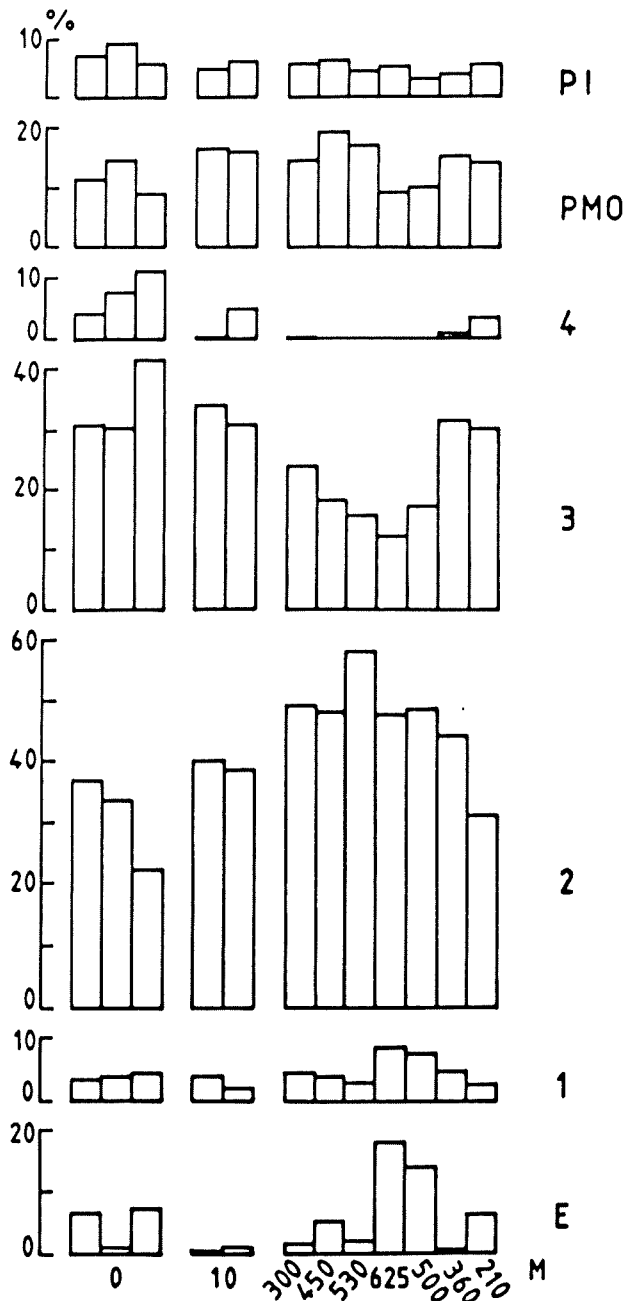


Fig 16.

Evolution des pourcentages des durées des divers stades de sommeil au cours des enregistrements de référence à 0 et 10 m et pendant la plongée chez le sujet P2.

Les divers stades de sommeil sont représentés de bas en haut, des périodes d'éveil au sommeil paradoxal (PMO) et aux phases intermédiaires (PI). Les nuits sont portées de gauche à droite pour les nuits de références à 0 et 10 m et pour les enregistrements pendant la plongée.

pendant la décompression à 500 mètres (Fig 15 et 16). Les durées sont diminuées dès 530 mètres en compression comme le montre les figures 11 et 12.

IV - COMMENTAIRES

La compression induit une augmentation transitoire du tremblement entre 450 et 550 mètres, de l'ordre de 50 à 100%. Cette augmentation apparaît après la fin du rajout d'hydrogène c'est à dire, quand la pression partielle d'hydrogène est de 2 MPa. La raison de cette augmentation transitoire du tremblement n'est pas connue; cependant dans les précédentes plongées en mélange hydrogéné, l'apparition du tremblement a précédé dans la plupart des cas, des troubles narcotiques à tendance psychotique (Rostain et al. 1990a, b; 1991a). Avons nous eu une période pré-narcotique dans cette zone de 450 m ?

Le tremblement augmente à nouveau à partir de 650 mètres; ceci peut être relié au fait que les sujets commencent à atteindre des pressions importantes alors que la pression partielle d'hydrogène est toujours la même, soit 2 MPa et que par conséquent son pourcentage diminue (30% à 650 mètres). Le pourcentage d'hydrogène deviendrait donc insuffisant pour "antagoniser" les effets de la pression et le SNHP commencerait alors à apparaître. En effet, dans les précédentes expériences, on a vu le tremblement apparaître soit à pression constante alors que le taux d'hydrogène passait de 56% à 30% puis à 0% (Rostain et al. 1987b) ou, en décompression quand le taux d'hydrogène commençait à être inférieure à 30% alors que la profondeur était encore importante (Rostain et al. 1988b; 1989b). L'augmentation importante du tremblement qui précède la compression à 700 mètres peut être du en partie à des facteurs psychologiques, mais ce tremblement demeure à 700 mètres et régresse progressivement comme ceux des autres sujets pour ne disparaître que vers 450 mètres. Il s'agit bien là d'un effet pression. Les expériences réalisées chez le rat ou le singe ont montré que le tremblement apparaissait respectivement à 900 et 800 mètres avec les mélanges hydrogène-hélium-oxygène (Rostain et al. 1989a; 1992). Il apparaît donc dans ce cas que la présence d'hydrogène tend à diminuer le tremblement en fonction de l'antagonisme entre substance narcotique et pression rapporté par divers auteurs chez l'homme et l'animal (Miller et al 1973; Bennett et al. 1974; Brauer et al. 1974; Naquet et al. 1975; Rostain et al. 1980; 1984 a, b; 1987a; 1988b) et à reculer sa profondeur d'apparition.

Les modifications EEG sont toujours présentes malgré le mélange hydrogène-hélium-oxygène. On enregistre une diminution des activités de fréquence rapide (alpha et bêta) et une augmentation des activités de fréquence thêta qui prédomine sur la dérivation antérieure, mais qui reste relativement peu élevée même aux plus grandes profondeurs

(200 à 300 %). La dépression importante de l'ensemble des activités enregistrée avec le mélange hydrogène-oxygène n'est pas retrouvée ici, le taux d'hydrogène étant certainement trop bas pour entraîner ce type de modification. Ces résultats rejoignent ceux obtenus chez les singes Macaques où la dépression des activités EEG était d'autant plus importante que le taux d'hydrogène était plus élevé et l'augmentation des activités thêta d'autant plus importante que le taux d'hydrogène était moins élevé (Rostain et al. 1992; 1993).

Les modifications EEG sont toujours enregistrées avec les divers mélanges gazeux utilisés; ces modifications semblent pression-dépendante; l'hydrogène de son côté renforcerait la dépression des activités EEG.

Les perturbations de l'organisation du sommeil sont analogues à celles enregistrées avec les autres mélanges gazeux utilisés (Rostain et al 1988a; 1991) et dans les plongées en mélange hydrogène-oxygène ou hydrogène-hélium-oxygène (Rostain et al. 1990b, c). On enregistre toujours une augmentation des stades de sommeil léger (1 et 2) au détriment des stades de sommeil plus profond (3 et 4) avec une disparition du stade 4 au delà de 300-400 mètres; le sommeil paradoxal est également perturbé aux plus grandes profondeurs.

Il semblerait que ces perturbations soient aussi pression-dépendante. Ceci semble être confirmé par la disparition du sommeil observée au delà de 1000 m d'une part dans l'expérimentation HYDRA X réalisée chez le singe Macaque fascicularis avec le mélange hydrogène-hélium-oxygène (Rostain et al. 1992) et d'autre part dans l'expérimentation CORNELIUS effectuée avec le singe Papio papio avec le mélange hélium-azote-oxygène (Rostain et al. 1984 b; Rostain 1987; Lemaire et Rostain 1988).

En conclusion, la plongée Hydra 10 n'a pas entraîné de troubles cliniques du SNHP tels que dysmétrie, fasciculations et myoclonies jusqu'à des profondeurs importantes de l'ordre de 600 m, alors que de tels troubles étaient visibles avec le mélange hélium-oxygène dès 300 mètres (Rostain et Naquet 1974; 1978; Fructus et Rostain 1978; Lemaire et Rostain 1988); le tremblement qui apparaît après 600 m, reste relativement faible excepté chez le sujet qui effectue l'excursion à 700 m. Enfin, les modifications EEG qui sont toujours présentes restent aussi relativement faibles même aux grandes profondeurs; en effet l'augmentation des activités thêta est inférieure à 300%; ce résultat est pour une grande part probablement en relation avec la courbe de compression relativement lente utilisée dans cette plongée mais peut-être aussi, du à la présence d'hydrogène qui tend à déprimer les activités EEG. Seules les perturbations du sommeil deviennent importantes aux plus grandes profondeurs malgré la présence d'hydrogène.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALEXINSKY, T. et ROSTAIN, J.C. Etude comportementale et neurophysiologique chez le singe soumis à des mélanges hydrogénés sous pression (opération HYDRA 10). Rapport CNRS DRET 1993.
- BENNETT, P.B. The high pressure nervous syndrome in Man. In : P.B. Bennett and D.H. Elliott (eds). The physiology and medicine of diving and compressed air work. Bailliere Tindall, London. 1975, p. 248-263.
- BENNETT, P.B. and TOWSE, E.J. The High Pressure Nervous Syndrome during a simulated oxygen-helium dive to 1500 FT. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* 1971, 31 : 383-393.
- BENNETT, P.B. and ROSTAIN, J.C. The high pressure nervous syndrome in man. In : P.B. Bennett and D.H. Elliott (eds). The physiology and medicine of diving. Bailliere Tindall, London. 1993, (in press).
- BENNETT, P.B., BLENKARN, G.D., ROBY, J. and YOUNGBLOOD, D. Suppression of the High Pressure Nervous Syndrome in human deep dives by He-N₂-O₂. *Undersea Biomed. Res.* 1974, 1 : 221-237.
- BRAUER, R.W. and WAY, R.O. Relative narcotic potencies of hydrogen, helium, nitrogen and their mixtures. *J. Appl. Physiol.* 1970, 29 : 23-31.
- BRAUER, R.W., DIMOV, S., FRUCTUS, X. GOSSET, A. et NAQUET, R. Syndrome neurologique et électrographique des hautes pressions. *Rev. Neurol.* 1969, 121 : 264-265.
- BRAUER, R.W., GOLDMAN, S.M., BEAVER, R.W. and SHEEHAN, M.E. N₂, H₂ and N₂O antagonism of high pressure neurological syndrome in mice. *Undersea Biomed. Res.* 1974, 1 : 59-72.
- CARLIOZ, M., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C., ROSTAIN, J.C. and GARDETTE, B. Hydrogen narcosis : psychometric and neurophysiological study. In : T. Nome, G. Susbielle, M. Comet, M. Jacquin et R. Sciarli (eds). *Proceeding of Xth congress of European Undersea Bio-medical Society, Marseille, 1984, p. 97-109.*
- FRUCTUS, X. Hydrogen, pressure and HPNS. In : R.W. Brauer (ed). *Hydrogen as a diving gas. UHMS publication 69 (WS-HYD) Bethesda, Md. 1987, p. 125-138.*
- FRUCTUS, X. and ROSTAIN, J.C. HPNS : A clinical study of 30 cases. In : C.W. Shilling and M.W. Beckett (eds). *Underwater Physiology VI. FASEB, Bethesda, Md. 1978, p. 3-8.*
- FRUCTUS, X., GARDETTE, B., CARLIOZ, M. and GIRAN, Y. Hydrogen Narcosis In : T. Nome, G. Susbielle, M. Comet, M. Jacquin and R. Sciarli. (eds). *Proceeding of Xe Congress of European Undersea Biomedical Society. Marseille 1984, p. 87-96.*

FRUCTUS, X., NAQUET, R., GOSSET, A., FRUCTUS, P. et BRAUER, R.W. Le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions. Marseille Med. 1969, 6 : 509-512.

GARDETTE, B. Hydra IV and Hydra V : human deep hydrogen dives 1983-1985. In : R.W. Brauer (ed). Hydrogen as a diving gas. UHMS publication 69 (WS-HYD) Bethesda, Md. 1987, p. 109-117.

GARDETTE, B. Compression procedures for mice and human hydrogen deep diving COMEX HYDRA program. In : J.C. Rostain, E. Martinez and C. Lemaire (eds). High Pressure Nervous Syndrome 20 years later. Octares publication, Marseille 1989, p. 217-231.

HALSEY, M.J., EGER, E.I., KENT, D.W. and WARNE, P.J. High pressure studies of anaesthesia. In : B. R. Fink (ed). Molecular Mechanisms of Anesthesia (Progress in Anesthesiology), Raven press New-York, 1975, 1 : 353-361.

LEMAIRE, C. and ROSTAIN, J.C. The High Pressure Nervous Syndrome and performance. Octares Publ. Marseille. 1988, 74p.

MICHAUD, A., PARC, J., BARTHELEMY, L., LE CHUITON, J., CORRIOL, J., CHOUTEAU, J. et LE BOUCHER, F. Premières données sur une limitation de l'utilisation du mélange oxygène-hydrogène pour la plongée profonde à saturation. C. R. Acad. Sc. (Paris). 1969, 269 : 497-499.

MILLER, K.W., PATON, W.D., SMITH, R.A. and SMITH, E.B. The pressure reversal of general anesthesia and the critical volume hypothesis. Molecular Pharmacol. 1973, 9 : 131-143.

NAQUET, R., ROSTAIN, J.C. and FRUCTUS, X. High pressure nervous syndrome : clinical and electrophysiological studies in man. In : M.J. Halsey, W. Settle and E.B. Smith (eds). The Strategy for Future Diving to depths greater than 1000 Feet. UMS report number WS : 6-15-75. 1975, p. 62-65.

ROSTAIN, J.C. The high pressure nervous syndrome at the central nervous system level. In : H.W. Jannasch, R.E. Marquis, A.M. Zimmermann (eds). Current perspectives in high pressure biology. Academic Press, London. 1987, p. 137-148.

ROSTAIN, J.C. Effects of high pressure on Nervous System of mammals. In : A.G. Macdonald (ed). Advances in comparative and environmental physiology : effects of high pressure on biological systems. Springer Verlag, Berlin. 1993, (in press).

ROSTAIN, J.C. et NAQUET, R. Résultats préliminaires d'une étude comparative de l'effet des mélanges oxygène-hélium et oxygène-hydrogène et des hautes pressions sur le babouin *Papio papio*. In : X. Fructus (ed). Proc. des troisièmes journées internationales d'hyperbarie et de physiologie subaquatique. Marseille 1970. Doin Paris. 1972, p. 44-49.

- ROSTAIN, J.C. et NAQUET, R. Le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions caractéristiques et évolution en fonction de divers modes de compression. Rev. EEG. Neurophysiol. 1974, 4 : 107-124.
- ROSTAIN, J.C. and NAQUET, R. Human neurophysiological data obtained from two simulated dives to a depth of 610 meters. In : C.W. Shilling and M.W. Beckett (eds). Underwater Physiology VI. FASEB, Bethesda Md. 1978, p. 9-19.
- ROSTAIN, J.C., ALEXINSKY, T., GARDETTE, B., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C., GILLARD, J. and HARDOUIN, J. Hydrogen breathed under pressure : Neurophysiological and cognitive effects in animals and man. Conférence au "XXXIInd International Congress of Physiological Sciences", Glasgow, 1993.
- ROSTAIN, J.C., DUMAS, J.C., GARDETTE, B., IMBERT, J.P. and LEMAIRE, C. Effects of addition of nitrogen during rapid compression of baboon. J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise Physiol. 1984a, 57 : 332-340.
- ROSTAIN, J.C., FORNI, C. and GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. Dopamine level detected by D.P.V. in the striatum of the rat under high pressure of various breathing mixtures. In : J.C. Rostain, E. Martinez and C. Lemaire (eds). HPNS, twenty years later. ARAS-SNHP publication. Marseille, 1989a, 233-238.
- ROSTAIN, J.C., GARDETTE, B. and NAQUET, R. Effects of exponential compression curves with nitrogen injections in humans. J. Appl. Physiol. 1987a, 63 : 421-425.
- ROSTAIN, J.C., GARDETTE, B., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. and FORNI, C. HPNS of the baboon during helium-nitrogen-oxygen slow exponential compressions. J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise Physiol. 1984b, 57 : 341-350.
- ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. and NAQUET, R. HPNS during rapid compression of men breathing He-O₂ and He-N₂-O₂ at 300 m and 180 m. Undersea Biomed. Res. 1980, 7 : 77-94.
- ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. and NAQUET, R. Occurrence of HPNS at constant pressure during the change of the mixture. J. Appl. Physiol. 1987b, 63 : 1019-1025.
- ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C., GOURRET, J.P. and NAQUET, R. Sleep disturbances in man during different compression profiles up to 62 bars in helium-oxygen mixture. Electroenceph. clin. Neurophysiol. 1988a, 69 : 127-135.
- ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C., LEMAIRE, C. and NAQUET, R. Effects of a H₂-He-O₂ mixture on the HPNS up to 450 msw. Undersea Biomed. Res. 1988b, 15 : 257-270.
- ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. and NAQUET, R. Comparative studies of the effects of hydrogenated breathing mixtures and helium oxygen or helium-nitrogen-oxygen mixtures up to 450 msw in Man. In :

J.C. Rostain, E. Martinez and C. Lemaire (eds). HPNS twenty years later. Octares publication. Marseille, 1989b, 195-202.

ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. and NAQUET, R. Studies of neurophysiological effects of hydrogen-oxygen mixture in man up to 30 bars. Undersea Biomed. Res. 1990a, 17 (Suppl) : 159.

ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C., and NAQUET, R. The use of hydrogen-oxygen mixture as a diving gas. In : J. Drouet, J.J. Risso and J.C. Rostain (eds). Proceeding of the second meeting on high pressure biology, CERB Toulon, 1990b, p 30.1-30.VI.

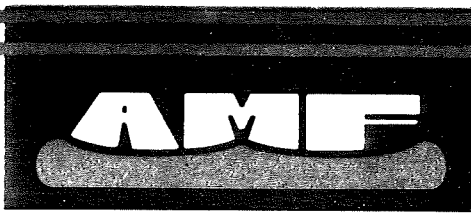
ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. and NAQUET, R. Use of hydrogen-oxygen mixture as a diving gas. Undersea Biomed. Res. 1991a, 18 : 143.

ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C., REGESTA, G. and NAQUET, R. Human sleep during deep saturation dives. Effects of high pressure with various breathing mixtures. In : J. Horne (ed). Sleep'90, Pontenagel Press-Bochum, 1990c, 394-396.

ROSTAIN, J.C., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. and GARDETTE, B. Neurophysiological studies in Macaca Fascicularis during exposures with hydrogenated mixtures up to 1200 msw. IIIrd International meeting on High Pressure Biology, Durham, NC, USA. Undersea Biomed. Res. 1992, 19 (suppl.): 147-148.

ROSTAIN, J.C., REGESTA, G., GARDETTE-CHAUFFOUR, M.C. and NAQUET, R. Sleep organization in man during long stays in helium-oxygen mixture at 30 and 40 bars. Undersea Biomed. Res. 1991b, 18 : 21-36.

ZETTERSTROM, A. Deep sea diving with synthetic gas mixtures Mil. Surg. 1948, 103 : 104-106.



**ETUDE DES PERFORMANCES
PSYCHOMETRIQUES ET INTELLECTUELLES**

HYDRA 10

Avril 1993

Ch. LEMAIRE

APPLICATIONS MEDICALES FRANCAISES NOUVELLES TECHNOLOGIE:

Z.I. des Paluds II - B.P. 004 - 13781 AUBAGNE CEDEX - S.A.R.L. Capital 200 000 F - N° SIRET 333 601 052 000 2

Tél. 42 70 03 94 - Téléx 401 532 F Fax 42 84 47 67

A la suite des expérimentations réalisées autant chez l'homme que chez l'animal, avec des mélanges respiratoires contenant de l'hydrogène, il est apparu que ce dernier pouvait réellement permettre d'améliorer les conditions de la plongée profonde, en augmentant le confort des plongeurs et leurs performances.

Il était donc raisonnable de penser que ces aspects positifs permettraient aussi de reculer les limites connues de la pénétration humaine, la plus grande profondeur atteinte en France l'ayant été 20 ans auparavant (610 m, PHYSALIE VI, 1972), puis en 1974 et 1983, alors que la profondeur maximale a été atteinte aux Etats-Unis en 1981 (686 m).

Par contre, il est aussi apparu au cours des expérimentations que l'hydrogène n'avait pas que des effets bénéfiques, et que son utilisation demandait beaucoup de discernement, tant dans son mode d'addition au mélange respiratoire que dans les pressions partielles utilisées. Une variabilité importante de la sensibilité inter-individuelle est un des éléments obligeant à une grande prudence dans la définition des méthodes de plongée.

Compte tenu de ces différents aspects, il était d'intérêt de suivre, au cours d'une plongée très profonde, le comportement des plongeurs ainsi que l'évolution de leurs performances en fonction des conditions de plongée, dans un but de surveillance et de sécurité, et pour qualifier les méthodes de plongée.

M E T H O D E S : Dans un souci de continuité et pour pouvoir comparer les résultats avec ceux des expérimentations précédentes, nous avons reconduit la même série de tests psychomoteurs et intellectuels, à savoir une épreuve de dextérité et une épreuve de vigilance, une épreuve d'efficiace intellectuelle et une épreuve de promptitude mentale. A cette série ont été ajoutés pour certaines passations des tests plus spécifiques du fonctionnement cérébral frontal concernant le raisonnement logique, la mémorisation immédiate ou l'orientation spatiale.

Dextérité Manuelle : le matériel est celui qui a déjà été utilisé lors des précédentes plongées.

Le sujet dispose d'une plaque de 50 cm x 12,5 cm percée de 50 trous de 1,1 cm de diamètre, séparés par des intervalles de 1,5 cm, et arrangés sur 4 colonnes. A une extrémité de la plaque se trouve un réceptacle qui contient les chevilles (50 fiches

crantées, de 4 cm de hauteur et 1 cm de diamètre). Au signal de l'opérateur, le sujet saisit les fiches une par une dans le réceptacle (placé à sa droite lorsqu'il travaille avec la main gauche et vice-versa) et va les positionner aussi rapidement que possible dans les trous opposés.

Il travaille ensuite avec l'autre main. L'opérateur note le temps mis par le sujet pour placer les 50 chevilles avec chaque main, et calcule le nombre moyen de fiches placées par minute.

Temps de Réaction Visuel de Choix : Là aussi, il s'agit du matériel déjà utilisé à plusieurs reprises pour les autres plongées.

Le sujet est placé devant un boîtier comportant une diode rouge et une diode verte, et deux boutons de réponse, séparés par 6 cm. Lorsqu'une des diodes s'éclaire, le sujet doit appuyer le plus vite possible sur le bouton situé du côté où la lumière s'est allumée. La série de stimulation se compose de 31 signaux, rouge ou vert, qui se succèdent d'une manière aléatoire comme l'est l'intervalle qui sépare deux stimuli. Le sujet travaille avec un seul doigt. La performance est appréciée par la valeur médiane des 31 réponses, et les valeurs inter-quartiles donnent la dispersion. L'ensemble du test est géré par ordinateur.

Ordination de Chiffres : Pour ce test, le sujet doit écrire dans l'ordre croissant des chiffres présentés dans le désordre, par séries de 7. La performance est mesurée par le nombre moyen de chiffres ordonnés par minute sur la durée totale du test (7 min).

Promptitude Mentale et Psychométrique (Test de Pacaud) : Les sujets disposent d'une feuille comportant 4 tableaux de chacun 30 cases numérotées. Les instructions sont enregistrées sur bande magnétique pour assurer toujours la même vitesse dans l'énonciation des ordres toutes les 3 secondes. Les sujets doivent écrire soit un chiffre, soit une lettre dans la case indiquée par son numéro et localisée par haut ou bas, et droite ou gauche. Le test dure environ 6 minutes, et la performance est appréciée par le nombre de cases remplies correctement. Les approximations (par exemple, écriture de B à la place de D) ne sont pas comptabilisées comme des erreurs.

PROTOCOLE EXPERIMENTAL : Les épreuves ont été proposées plusieurs fois en surface pour familiariser les sujets avec le matériel (tous les trois avaient déjà pratiqué les tests à différentes reprises au cours de plongées précédentes).

La série de référence a été faite à 10 mètres de profondeur, puis régulièrement en cours de compression et en décompression (10 passations au total). Les tests les plus profonds ont été proposés à 650 m, après le retour de 675 m (J.17).

Pour chaque série, les sujets commencent par l'épreuve de dextérité, puis par l'épreuve de vigilance (passation individuelle) et continuent en groupe les deux épreuves "papier-crayon". L'ensemble de la série dure environ 45 minutes. Lorsque d'autres tests ont été proposés, ils ont été passés après la série habituelle.

RESULTS : Pour l'ensemble des tests, les résultats ne montrent pas de perturbations trop importantes chez 2 sujets (P_1 et P_2), et les modifications notées ne le sont pas pour la plus grande profondeur (650 m), sauf pour le test de promptitude mentale.

Dextérité Manuelle : La diminution de performance est présente chez les 3 sujets, elle est fonction de la profondeur comme nous l'avons déjà observé pour d'autres plongées. La diminution moyenne maximale est de 15 %. Elle est de 13 % chez P_1 à 605 m, de 12 % chez P_2 à 525 m (en décompression) et de 24 % chez P_3 à 650 m. A noter chez P_1 et P_3 que la diminution de dextérité est déjà respectivement de 10 et 12 % à 450 m, mais qu'il existe une récupération chez P_1 lors des 2 passations suivantes (500 et 550 m).

A 170 m en décompression, les 3 plongeurs atteignent ou dépassent les valeurs de référence d'avant-plongée, ce qui témoigne d'une récupération totale.

Temps de Réaction Visuel de Choix : Le test de vigilance est peu affecté chez P_2 tout au long de la plongée, le maximum de modifications étant noté à 605 m (- 4 %). Chez P_1 et P_3 , une diminution notable apparaît à 450 m, suivie d'une récupération, qui sera continue chez P_1 alors que chez P_3 on retrouve ensuite une diminution, jusqu'à 650 m (- 17%).

Pour les 3 plongeurs, en moyenne, la diminution maximale est de 6 % (450 et 605 m). En décompression, toutes les valeurs reviennent à la normale, la vigilance des plongeurs est identique à la phase pré-plongée.

Ordination de Chiffres : L'ordination de chiffres est un test qui permet l'apprentissage pendant plusieurs passations (8 à 12) et les plongeurs ont été entraînés partiellement avant la plongée.

En cours de compression, jusqu'à 550 m, la diminution est continue chez les 3 plongeurs. (diminution maximale de 14 % chez P₁, 21 % chez P₂ et 43 % chez P₃ à 550 m). Chez les 3 sujets, les résultats lors de la passation suivante, à 605 m, sont en amélioration.

Dès 525 m, en décompression, les valeurs montrent l'effet de l'apprentissage chez P₁ et P₃, alors que P₂ revient seulement à ses valeurs de départ à 375 et 170 m.

Promptitude Mentale et Psychomotrice : Ce test est l'un des plus contraignants de la série. La performance maximale est obtenue lorsque les 100 cases sont remplies. Au cours de cette plongée, on note de très bonnes performances chez P₁ (91, 92 et 96 cases respectivement à 500, 550 et 605 m) et chez P₂ (96 et 95 cases à 450 et 550 m). Chez les 3 plongeurs, on observe une diminution nette entre 300 et 450 m (10 % chez P₁, 2 % chez P₃ et 21 % chez P₃), avec une récupération relative dès 500 m chez P₁ et à 550 m chez P₂. Par contre la chute est continue chez P₃ à partir de 300 m pour atteindre la performance minimale à 650 m (- 55 % par rapport à 10 m). A cette profondeur et par rapport au test précédent à 605 m, les 3 plongeurs montrent une baisse de performance notable (par rapport à 605 m, - 23 % chez P₁, - 15 % chez P₂ et - 30 % chez P₃).

En décompression, dès 525 m, la performance de P₃ revient à une valeur comparable à celle de 450 m en compression, et la récupération est totale pour le test suivant à 375 m. Parallèlement, P₁ réalise le meilleur score possible à 375 et 170 m (99 et 100), alors que P₂ atteint 96 cases sur 100 à 375 m.

DISCUSSION : Il apparaît en premier lieu une différence pour tous les tests entre, d'une part les sujets P_1 et P_2 , et d'autre part le sujet P_3 . Chez ce dernier, les diminutions de performance sont plus amples et plus précoces que chez les 2 autres plongeurs. Si on a déjà noté une telle variabilité au cours de plongées, il semble que les différences inter-individuelles soient beaucoup plus marquées lorsque le mélange contient de l'hydrogène, comme si, en plus de la sensibilité aux conditions constantes de vitesse de variation de pression et de pression, il y avait une sensibilité de certains sujets à l'hydrogène.

- Lorsque l'on analyse les variations de performance au cours de cette plongée, on note que la dextérité manuelle suit la courbe de profondeur. Ceci s'observe aussi pour l'ordination de chiffres jusqu'à 550 m, et pour la promptitude mentale jusqu'à 500 m. Pour ces 2 tests, les performances sont meilleures ensuite, à 605 et 650 m pour l'ordination, à 550 et 605 m pour la promptitude. A 605 m pour les 4 tests, et à 650 m (sauf pour la promptitude), les résultats obtenus montrent des diminutions de performance relativement modérées.

Ce bon comportement d'ensemble (malgré les performances médiocres de P_3) mène à penser que les contraintes globales de l'environnement sont bien supportées, alors que la première phase de la plongée apparaît plus difficile.

- Si l'on compare pour chaque épreuve à 450 m les valeurs moyennes du groupe par rapport aux autres plongées à 450 m, on note que la dextérité manuelle est affectée comme lorsque le mélange ne contient pas d'hydrogène (- 9 % contre - 10 % pour l'ensemble des plongées avec $H_2-N_2-O_2$ et - 5 % pour HYDRA V). Pour le temps de réaction, les variations sont modestes et non significativement différentes des plongées Trimix ou HYDRA V. Pour l'ordination de chiffres, si HYDRA V avait permis une bonne conservation de l'efficacité, (- 3 %) ici la baisse est de 13 %, comparable au Trimix (- 15 %). Par contre, la promptitude mentale et psychomotrice est mieux préservée ici (- 9 %) que pour HYDRA V (- 20 %).

Il semblerait donc qu'à la vue de ces résultats, les effets bénéfiques de l'hydrogène n'apparaissent pas totalement, et qu'il aurait peut-être fallu une pression partielle plus élevée. Ceci ne peut être considéré qu'en tenant compte de la sensibilité de chaque individu.

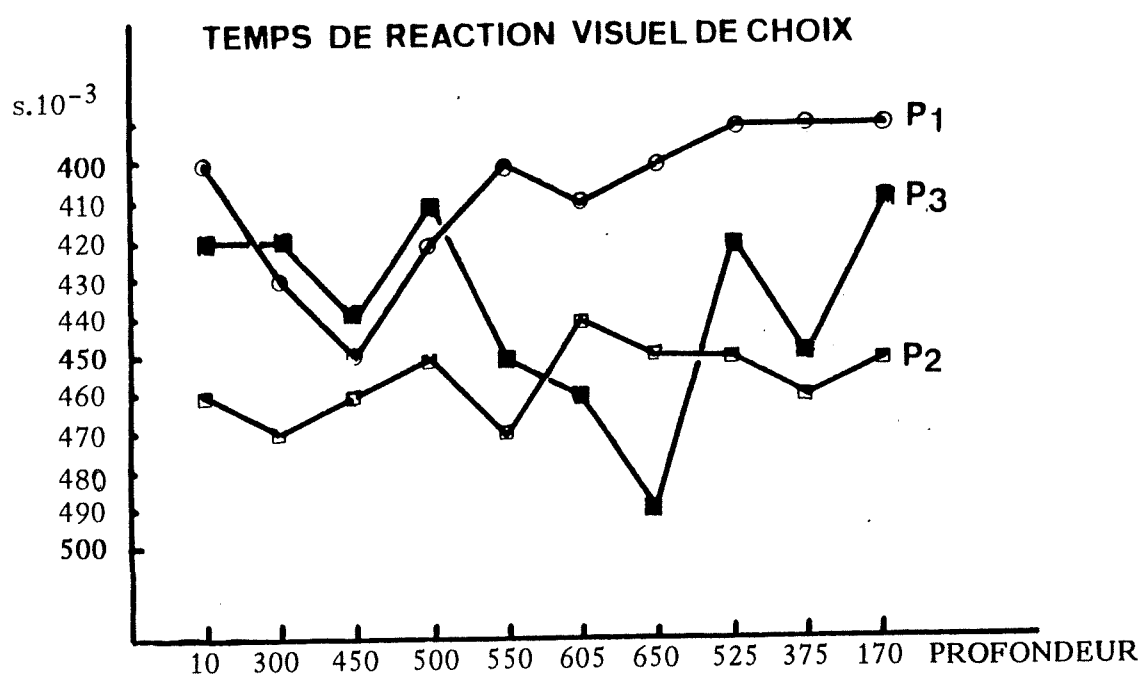
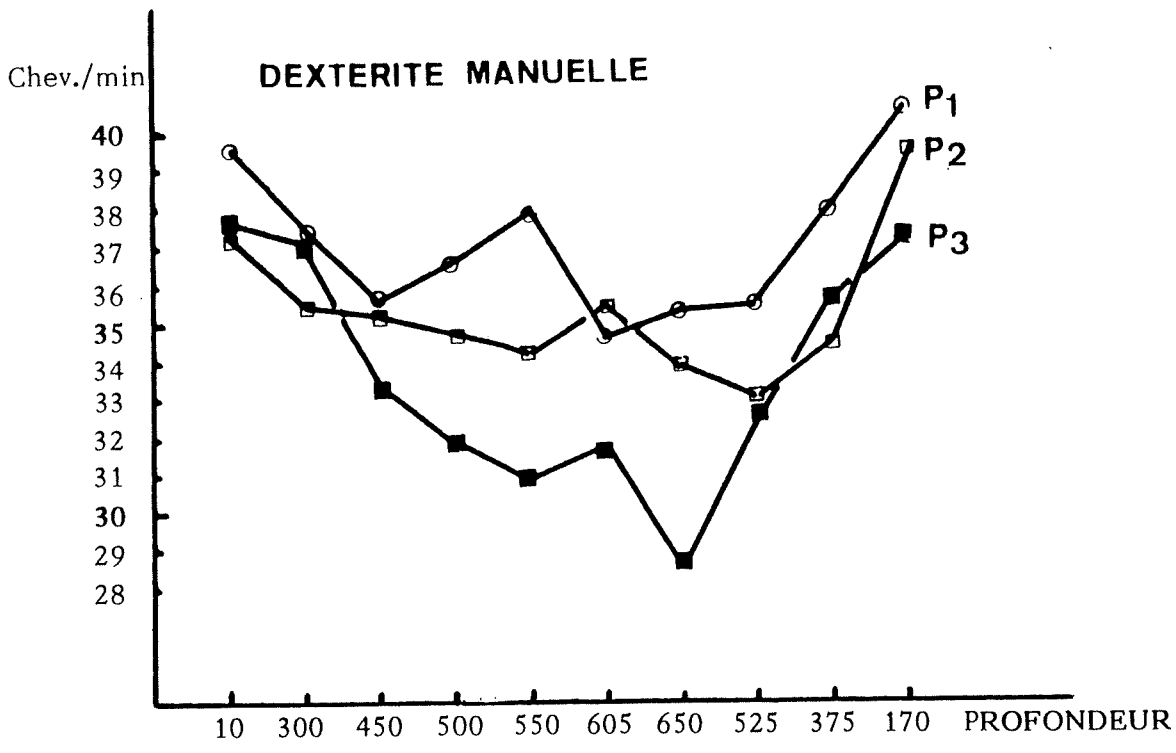
Au-delà de 450 m, nos possibilités de comparaison sont plus réduites. Mais nous avons noté pour ENTEX 9 (mélange héliox avec 0,8 bar de N₂) que les variations de performance avaient été inversées entre 450 et 610 m, c'est-à-dire que les performances au lieu de continuer à décroître, s'étaient améliorées lors de la deuxième partie de la plongée. C'est un fait similaire que nous observons ici pour HYDRA 10. Ces progressions sont-elles liées aux courbes de compression, qui seraient moins contraignantes dans les très grandes profondeurs ou sont-elles la conséquence d'une adaptation des sujets ?

- En ce qui concerne l'effet narcotique de l'hydrogène, facteur redouté, nous n'en avons eu aucune manifestation pour nos tests, sauf sans doute au passage à 450 m et à 650 m pour l'épreuve de promptitude mentale -qui en est spécifique-. Ceci est vrai chez les sujets P₁ et P₂, alors que pour le sujet P₃ il est beaucoup plus difficile de se pronocer. Ses mauvais résultats sont-ils à relier à une narcose à l'hydrogène ou à un autre effet ? Les autres tests réalisés pour rechercher un éventuel syndrome frontal (raisonnement logique, labyrinthe, etc...) sont normaux chez P₁ et P₂, alors qu'ils montrent une positivité nette chez P₃ (500 m, J.9).

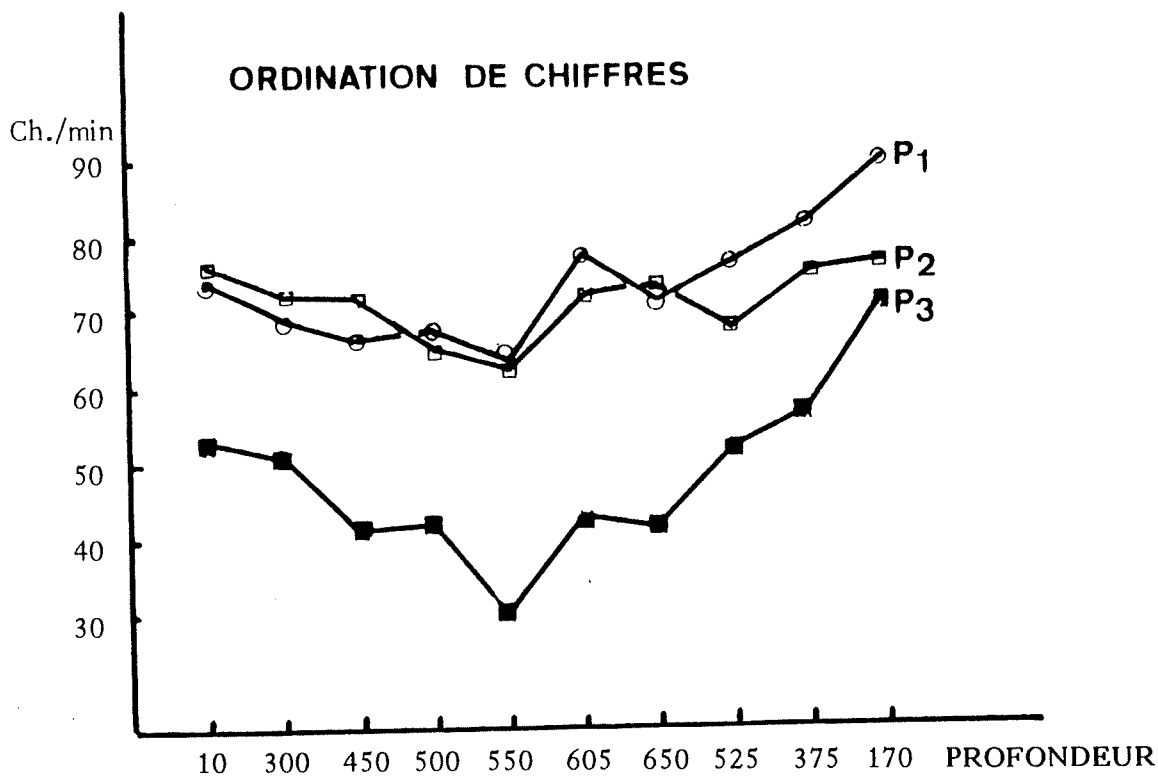
En conclusion, il faut donc retenir cette différence de sensibilité inter-individuelle, qui se pose comme un facteur majeur de la plongée très profonde, et vraisemblablement aussi comme de l'utilisation de l'hydrogène.

HYDRA 10 - PERFORMANCES PSYCHOMETRIQUES (valeurs absolues)

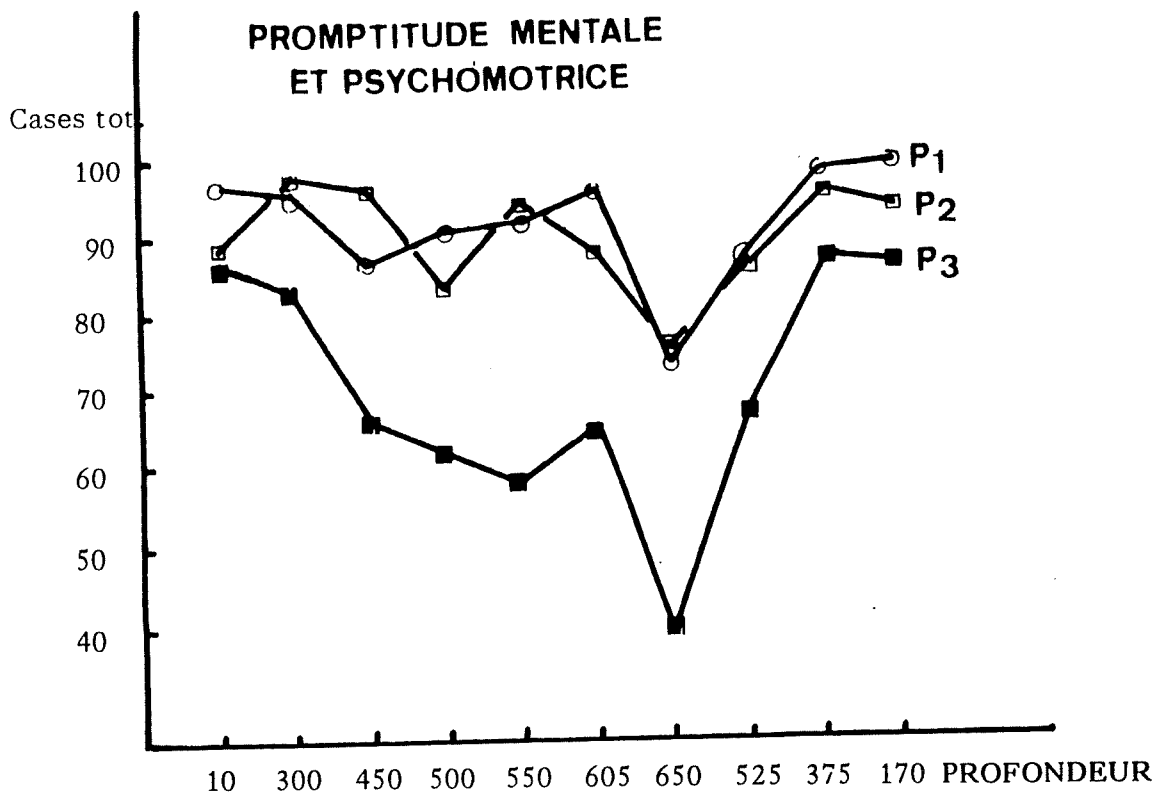
| PROFONDEUR | PLONGEUR | DEXTERITE MANUELLE | TEMPS DE REACTION | ORDINATION DE CHIFFRES | PROMPTITUDE MENTALE |
|------------|----------------|--------------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| 10 m | P ₁ | 39,7 | 400 | 74 | 97 |
| | P ₂ | 37,3 | 460 | 76 | 89 |
| | P ₃ | 37,5 | 420 | 53 | 87 |
| 300 m | P ₁ | 37,5 | 430 | 69 | 96 |
| | P ₂ | 35,5 | 470 | 72 | 98 |
| | P ₃ | 37,3 | 420 | 51 | 83 |
| 450 m | P ₁ | 35,7 | 450 | 66 | 86 |
| | P ₂ | 35,3 | 460 | 72 | 96 |
| | P ₃ | 33,2 | 440 | 41 | 66 |
| 500 m | P ₁ | 36,6 | 420 | 67 | 91 |
| | P ₂ | 34,7 | 450 | 65 | 83 |
| | P ₃ | 31,9 | 410 | 42 | 62 |
| 550 m | P ₁ | 38,0 | 400 | 64 | 92 |
| | P ₂ | 34,1 | 470 | 64 | 95 |
| | P ₃ | 30,9 | 450 | 30 | 58 |
| 605 m | P ₁ | 34,7 | 410 | 77 | 96 |
| | P ₂ | 35,5 | 440 | 72 | 88 |
| | P ₃ | 31,9 | 460 | 43 | 65 |
| 650 m | P ₁ | 35,3 | 400 | 71 | 74 |
| | P ₂ | 33,9 | 450 | 73 | 75 |
| | P ₃ | 28,6 | 490 | 41 | 39 |
| 525 m | P ₁ | 35,5 | 390 | 76 | 89 |
| | P ₂ | 33,0 | 450 | 67 | 86 |
| | P ₃ | 32,4 | 420 | 52 | 67 |
| 375 m | P ₁ | 38,0 | 390 | 81 | 99 |
| | P ₂ | 34,7 | 460 | 75 | 96 |
| | P ₃ | 35,3 | 450 | 57 | 87 |
| 170 m | P ₁ | 40,8 | 390 | 90 | 100 |
| | P ₂ | 39,7 | 450 | 76 | 94 |
| | P ₃ | 37,3 | 410 | 71 | 86 |



ORDINATION DE CHIFFRES



PROMPTITUDE MENTALE ET PSYCHOMOTRICE



Plongée expérimentale HYDRA 10

Etude des sensations respiratoire et tactile.

Responsables : H. BURNET et Y. JAMMES
URA 1630 CNRS Physiopathologie Respiratoire
Faculté de Médecine, Marseille
Chercheurs associés : N. NARAKI
S. SARRAMEGNA

A - Buts de l'étude :

Au cours d'une expérience hyperbare, l'élévation de la pression ambiante entraîne un accroissement de la masse volumique du mélange gazeux inhalé. L'hyperbarie crée ainsi une situation de ventilation dite "en charge", puisque sur le plan respiratoire, l'élévation de la masse volumique du mélange gazeux inhalé entraîne un accroissement des résistances pulmonaires du plongeur (Jammes et al., 1988 ; Burnet et al., 1990). Les patients atteints de bronchopneumopathie chronique obstructive et les asthmatiques constituent un autre exemple de sujets soumis, en raison de leur pathologie, à une situation de ventilation "en charge". Or, des travaux effectués au cours des dix dernières années ont montré que la sensation respiratoire de ces patients est modifiée si on les compare à des sujets sains (Gotfried et al., 1978, 1981 ; Burki, 1984). Le premier but de ce travail est d'étudier les conséquences de la ventilation "en charge" induite par l'environnement hyperbare sur la sensation respiratoire.

L'élévation des résistances pulmonaires pourrait également agir, mais d'une manière plus indirecte, sur la sensation tactile. Des travaux, déjà anciens, de Meyer-Lohman (1974) avaient mis en évidence une possibilité d'interaction entre système respiratoire et muscles squelettiques. Très précisément, Meyer-Lohmann avait montré que l'activité des moto-neurones de l'extenseur lombaire était synchronisé par le rythme respiratoire. On sait que la ventilation de mélanges denses, en hyperbarie, est susceptible d'entraîner une fatigue des muscles respiratoires (Lenoir et al., 1990 ; Burnet et al., 1992). Or, Balzamo et al. (1992) ont montré, chez le Chat, que l'intégration corticale des informations provenant des muscles respiratoires était modifiée par l'apparition d'une fatigue musculaire générée par stimulation directe du diaphragme. L'hypothèse d'une interaction entre les informations provenant des muscles respiratoires, lors de la fatigue musculaire, et la sensibilité tactile mérite donc d'être envisagée.

- Méthodes et Protocole :

1 - Protocole général:

Des mesures ont été effectuées, chez les trois plongeurs avant et après le début de l'expérience, à la pression atmosphérique. Au cours de l'expérience proprement dite, des mesures ont été effectuées au cours de la phase de compression à 2, 31, 46, 51, 56 et 61 ATA, puis au cours de la phase de décompression à 41, 31 et 2 ATA.

2 - Etude de la sensation respiratoire:

a - Principe de l'étude:

Les travaux de Wiley and Zechman (1966) ont montré que la sensation respiratoire suit la loi de Weber, qui peut s'énoncer de la manière suivante : l'appréciation subjective d'un stimulus (ψ) est une fonction exponentielle de la valeur physique du stimulus (Φ) :

$$\psi = k * \Phi^n$$

ou, sous forme logarithmique, le logarithme de l'appréciation d'un stimulus est une fonction linéaire du logarithme de la valeur physique du stimulus :

$$\text{Ln}(\psi) = \text{Ln}(k) + n \text{Ln}(\Phi)$$

Sur le plan pratique, le stimulus à apprécier est constitué par une série de charges additionnelles interposées, à tour de rôle, sur le circuit inspiratoire. Le sujet fournit son appréciation subjective de chacune de ces charges additionnelles en affectant à chaque charge un nombre d'autant plus élevé que la charge lui a paru plus importante.

Une étude ultérieure, (Burki, 1984) a montré que l'appréciation subjective du sujet est également une fonction exponentielle de la pression buccale. Si le sujet conserve le même régime ventilatoire, autrement dit le même volume courant et la même fréquence respiratoire, pendant toute la durée de l'étude, indépendamment de la charge additionnelle interposée sur le circuit inspiratoire, l'appréciation subjective de la charge peut être étudiée aussi bien en fonction de la valeur de la charge additionnelle que de la pression buccale. Au cours de notre étude, où le régime ventilatoire du sujet peut varier il est préférable d'étudier la relation entre appréciation subjective et pression buccale.

b - Protocole de l'étude:

Au cours de cette étude, le sujet, assis, respire à travers une valve de Rudolph, ce qui permet de séparer le flux inspiratoire du flux expiratoire. La pression buccale est mesurée dans la partie centrale de la valve de Rudolph, commune aux voies inspiratoire et expiratoire, par un capteur de pression différentiel. A chaque profondeur, le sujet doit classer 4 charges résistives, calibrées, de valeur croissante. Les 4 charges sont d'abord présentées au sujet, dans un ordre aléatoire, pour que le sujet ait une notion de l'amplitude de la gamme des résistances surajoutées. Au cours de cette première séquence, le sujet ne fournit pas son appréciation des charges présentées. Ensuite, chaque charge est présentée trois fois au sujet, soit au total douze présentations, effectuées dans un ordre aléatoire. Au cours de cette deuxième séquence, le sujet donne son appréciation, subjective, de la charge externe surajoutée **immédiatement après chaque présentation.**

c - Traitement des données:

A chaque niveau de pression, et pour chaque sujet nous disposons de 12 valeurs de la pression buccale et des 12 appréciations subjectives correspondantes. Selon la loi de Weber, le logarithme de l'appréciation (L_{Ap}) est une fonction linéaire du logarithme de la pression buccale (L_{Pb}). L'équation de cette droite est déterminée par la

méthode des moindres carrés (Draper et Smith, 1966 ; Zar, 1984).

Pour pouvoir juger de l'évolution de la sensation, autrement dit pour pouvoir comparer la sensation d'un même sujet à différentes profondeurs ou la sensation des différents sujets à la même profondeur on dispose de différents critères:

- la pente de la droite de régression
- son ordonnée à l'origine
- la dispersion des mesures par rapport à la droite de régression, appréciée par la mesure de l'erreur standard de l'estimation ($SY.X$, parfois appelé aussi erreur standard de la régression et *standard error of estimate* selon la terminologie anglaise)

3 - Etude de la sensation tactile :

Comme la sensation respiratoire, la sensation tactile suit la loi de Weber. Le sujet doit, à chaque profondeur, apprécier l'intensité de 4 stimuli, les stimuli étant, dans le cas de la sensation tactile, des pressions, calibrées, appliquées à l'extrémité du majeur, zone particulièrement riche en terminaisons nerveuses. Chaque stimulus est présenté 4 fois, soit au total 12 présentations et comme dans le cas de la sensation respiratoire, le sujet fournit, immédiatement après l'application du stimulus, son appréciation subjective par un chiffre d'autant plus élevé que la pression exercée sur l'extrémité du majeur lui aura paru plus forte.

Le traitement des données est effectué, comme dans le cas de la sensation respiratoire en étudiant, par la méthode des régressions linéaires, les relations entre le logarithme de l'appréciation ($L Ap$) et le logarithme du stimulus ($L St$). Pour chaque sujet et à chaque profondeur la droite de régression $L Ap = a + b L St$, est déterminée par la méthode des moindres carrés. Les différentes droites obtenues peuvent être comparées à partir de 3 critères, comme dans le cas de la sensation respiratoire : la pente de la droite, son ordonnée à l'origine et la dispersion des mesures ($SY.X$).

C - Résultats et commentaires :

1 - Sensation respiratoire:

La dispersion des mesures ($SY.X$) constitue le premier critère choisi pour étudier l'évolution de la sensation respiratoire au cours de cette expérience. Ce choix n'est pas arbitraire, il est justifié dans la mesure où la dispersion représente sous une forme condensée, la *précision* avec laquelle la droite de regression calculée rend compte de la relation entre l'appréciation subjective (Y) et le stimulus (X). On conçoit, au moins intuitivement, que plus la dispersion est faible, plus cette relation, supposée linéaire en accord avec la loi de Weber, est étroite. Les figures 1 et 2 montrent l'évolution de la dispersion chez les 3 sujets. Les résultats obtenus chez les sujets P1 et P2, dont l'évolution au cours de l'expérience est sensiblement parallèle ont été regroupés dans la figure 1. Le sujet P3 dont l'évolution est notablement différente est présenté à part (fig. 2).

L'examen des figures 1 et 2 montre que la dispersion peut varier du simple au double au cours d'une expérience hyperbare. Sous l'action de quel(s) facteur(s) ? Compte-tenu du protocole particulier d'HYDRA 10, une corrélation étroite existe entre les différents facteurs, caractéristiques du mélange gazeux inhalé, susceptibles d'influer sur la sensation : par exemple la pression ambiante est corrélée à la fois avec la pression partielle d'hélium ($r = 0.967$), la pression partielle d'hydrogène ($r = 0.913$), et la masse volumique du mélange gazeux inhalé ($r = 0.997$). Dans ces conditions, il est difficile d'une part de distinguer quels sont les facteurs d'ambiance qui influent le plus sur la dispersion. D'autre part, il est impossible de pousser plus loin l'analyse en étudiant l'influence conjointe de plusieurs facteurs sur la dispersion, en effet cette démarche nécessite que les différents facteurs "explicatifs" ne soient pas corrélés entre eux. Néanmoins, la figure 1, considérée dans son ensemble, ne suggère pas une évolution liée à la pression (ou à la masse volumique) et par conséquent ne

suggère pas une évolution liée à l'augmentation des résistances pulmonaires internes des sujets. Par contre, on notera que la compression peut être partagée 3 phases : une première phase d'accroissement correspondant à la compression jusqu'à 31 ATA, puis une diminution à 46 ATA, niveau de pression où le pourcentage d'hydrogène (FH2) est le plus élevé, enfin une deuxième phase d'accroissement, quand la compression est poursuivie par addition d'hélium. Ces observations suggèrent, chez P1 et P2, une relation entre la dispersion et la composition du mélange gazeux inhalé. L'hélium tendant à accroître la dispersion des mesures, l'hydrogène tendant à la diminuer. Les mesures effectuées au cours de la phase de décompression sont compatibles avec cette hypothèse : en effet entre 41 et 31 ATA, c'est-à-dire au moment de la deshydrogénation, la dispersion des mesures augmente à la fois chez P1 et P2. En ce qui concerne P3 (figure 2), ce schéma pourrait être conservé, en soulignant que la nature du mélange gazeux ne semble influencer que très faiblement sur la dispersion, on remarquera par exemple que la dispersion reste très élevée pendant toute la phase de compression puis diminue au cours de la décompression. Chez le sujet P3, la pression ambiante paraît être le principal facteur qui agit sur la dispersion. Nous manquons d'éléments de référence pour discuter ces résultats dans la mesure où la sensation respiratoire n'avait jamais été étudiée auparavant en hyperbarie. De plus, les études de la sensation respiratoire effectuées précédemment, à la pression atmosphérique, ne signalent pas, à notre connaissance, de modifications de la dispersion. Ces études (Gotfried et al., 1978 , 1981, Burki, 1984) avaient été entreprises essentiellement pour comparer la sensation respiratoire chez des sujets "normaux" et chez des sujets dont les résistances pulmonaires sont accrues (obstructifs chroniques ou asthmatiques). Très généralement, ces études ont mis en évidence une augmentation de la pente de la droite de régression et une diminution de l'ordonnée à l'origine chez les sujets dont les résistances pulmonaires sont pathologiquement élevées. La figure 3 montre un exemple des résultats obtenus par Gotfried et al. (1981). L'accroissement des résistances internes des plongeurs lors d'une expérience hyperbare devrait conduire à un résultat semblable. La figure 4, tracée à partir des résultats obtenus chez P2,

montre effectivement une augmentation de la pente et une diminution de l'ordonnée à l'origine si on compare les droites de régression tracées à partir des résultats obtenus à la pression atmosphérique et à la pression maximale. Par contre, il convient de souligner que les pentes de ces 2 droites ne sont pas *significativement différentes*, cette absence de significativité est en fait une conséquence de l'augmentation de la dispersion à la pression maximale : elle est en gros 2 fois plus importante qu'à 1 ATA. A cette restriction près, la sensation respiratoire tend à évoluer en fonction des résistances pulmonaires comme lors des expériences effectuées à la pression atmosphérique.

2 - Sensation tactile:

Comme pour l'étude de la sensation respiratoire, la dispersion des mesures est le critère qui a été étudié en premier. La figure 5 montre l'évolution de la dispersion chez les sujets P1 et P2 et la figure 6 chez le sujet P3.

Comme dans le cas de la sensation respiratoire, l'évolution de la dispersion au cours de la compression chez P1 et P2 peut être partagée en 3 phases. La dispersion augmente au cours de la première phase, puis diminue, mais dans ce cas la dispersion est minimale à 51 ATA, soit avec un décalage par rapport à la dispersion minimale observée à 46 ATA, dans l'étude de la sensation respiratoire. Enfin, la dispersion augmente de nouveau jusqu'à la pression maximale. L'évolution de la dispersion ne paraît donc pas être une fonction directe de l'élévation de la pression ambiante, mais ses variations seraient plutôt une conséquence de l'interaction entre les effets respectifs de l'hydrogène et de l'hélium. Pour les mêmes raisons que lors de l'étude de la sensation respiratoire, l'analyse des effets respectifs des pressions partielles d'hélium et d'hydrogène sur la sensation tactile n'est pas réalisable, ces deux facteurs étant corrélés entre eux. Chez le sujet P3 (fig. 6), la dispersion, très élevée à la pression atmosphérique diminue d'un tiers à 2 ATA, et de plus de 50% à 31 ATA, il pourrait s'agir d'un effet liée à l'apprentissage de la technique, dans la mesure où la

dispersion des mesures est également environ 50% plus faible, au cours du test effectué à la pression atmosphérique, après la plongée. Si on excepte ces 2 premiers points, la dispersion augmente au cours de la compression, puis diminue à 56 ATA. On remarquera qu'il existe un décalage entre la valeur minimale de la dispersion chez P3 (56 ATA) et chez P1 et P2 (51 ATA). Un décalage est également observé pour la sensation respiratoire (fig. 1 et 2) : la dispersion est minimale chez P1 et P2 à 46 ATA et chez P3 à 51 ATA. D'autre part, comme chez P1 et P2, l'évolution de la dispersion chez P3 ne suggère pas un effet direct de la pression ambiante, mais plutôt une interaction entre les effets des pressions partielles d'hélium et d'hydrogène. Enfin, indépendamment de la dispersion, l'hypothèse d'un effet de l'augmentation des résistances internes (liée à l'élévation de la masse volumique) sur la droite de régression paraît peu probable. En effet, si on compare les droites établies à 1 et 51 ATA, chez le sujet P1 (figure 7) on remarquera que ces 2 droites sont pratiquement confondues. On soulignera que ces 2 droites, correspondant à des niveaux de pression où la dispersion est minimale, ont été choisies pour pouvoir comparer les droites de régression en l'absence d'un accroissement de la dispersion.

En conclusion, la situation hyperbare paraît influencer spécifiquement sur la sensation respiratoire en modifiant la pente de la relation entre appréciation subjective et stimulus, dans ce cas il s'agit d'une conséquence de l'augmentation des résistances internes, déjà décrit à la pression atmosphérique chez des sujets obstructifs chroniques ou asthmatiques.

D'autre part, la situation hyperbare paraît influencer à la fois sur la sensation respiratoire et sur la sensation tactile en modifiant la dispersion des mesures, dans ce cas il pourrait s'agir d'une action de la nature du mélange gazeux inhalé. Ce dernier type d'influence mériterait une étude plus approfondie, mais on soulignera que les effets respectifs des différents constituants du mélange gazeux inhalé (hélium, hydrogène) ne pourront être différenciés que par un protocole particulier, par exemple en comparant des mesures effectuées à la même pression en mélange soit à base

d'hélium, soit à base d'hydrogène, comme au cours d'HYDRA IX.

Références bibliographiques:

Burki, N.K. Effects of bronchodilation on magnitude estimation of added resistive loads in asthmatic subjects. *Am. Rev. Respir. Dis.* 129 : 225-229, 1984.

Burnet, H., M. Lucciano and Y. Jammes. Respiratory effects of cold-gas breathing in humans under hyperbaric environment. *Resp. Physiol.* 81: 413-424, 1990.

Draper, N.R. and H. Smith. *Applied regression analysis*. Wiley and Sons, New-York, 1966, 407 p.

Gotfried, S.B., M.D. Altose, S.G. Kelsen, C.M. Fogarty and N.S. Cherniack. The perception of changes in airflow resistance in normal subjects and patients with chronic airways obstruction. *Chest* 73: 286-288, 1978.

Gotfried, S.B., M.D. Altose, S.G. Kelsen and N.S. Cherniack. Perception of changes in airflow resistance in obstructive pulmonary disorders. *Am. Rev. Respir. Dis.* 124: 566-570, 1981.

Jammes, Y., H. Burnet, P. Cosson and M. Lucciano. Bronchomotor response to cold air or helium-oxygen at normal and high ambient pressures. *Undersea Biomed. Res.* 15: 179-192, 1988.

Lenoir P., Y. Jammes, P. Giry, J.C. Rostain, H. Burnet, C. Tomei and C. Roussos. Electromyographic study of respiratory muscles during human diving at 46 ATA. *Undersea Biomed. Res.* 17: 121-137.

Meyer-Lohmann, J. Respiratory influences upon the lumbar extensor motor system of decerebrated cats. In : *Central rhythmic and regulation : circulation, respiration, extrapyramidal motor system*, W. Umbach and H.P. Koepchen, eds, Hippokrates Verlag, Stuttgart, 1974 pp 334-341.

Wiley, R.I and F.W. Zechman. Perception of added airflow resistance in humans. *Respir. Physiol.* 2: 73-78, 1966/67.

Zar, J.H. *Biostatistical analysis*. Prentice Hall International Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1984 , 718 p.

Fig.1

Sensation respiratoire

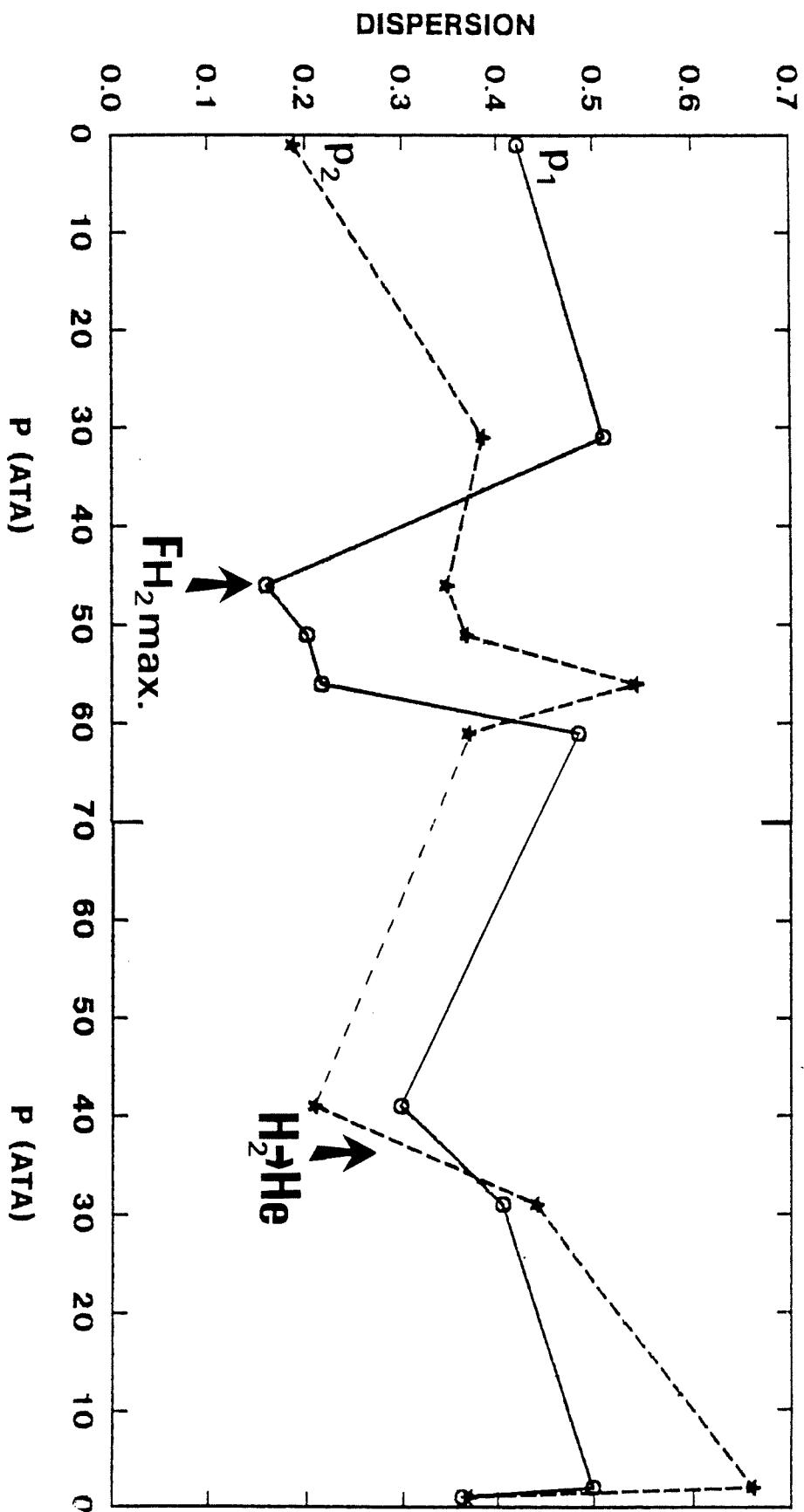
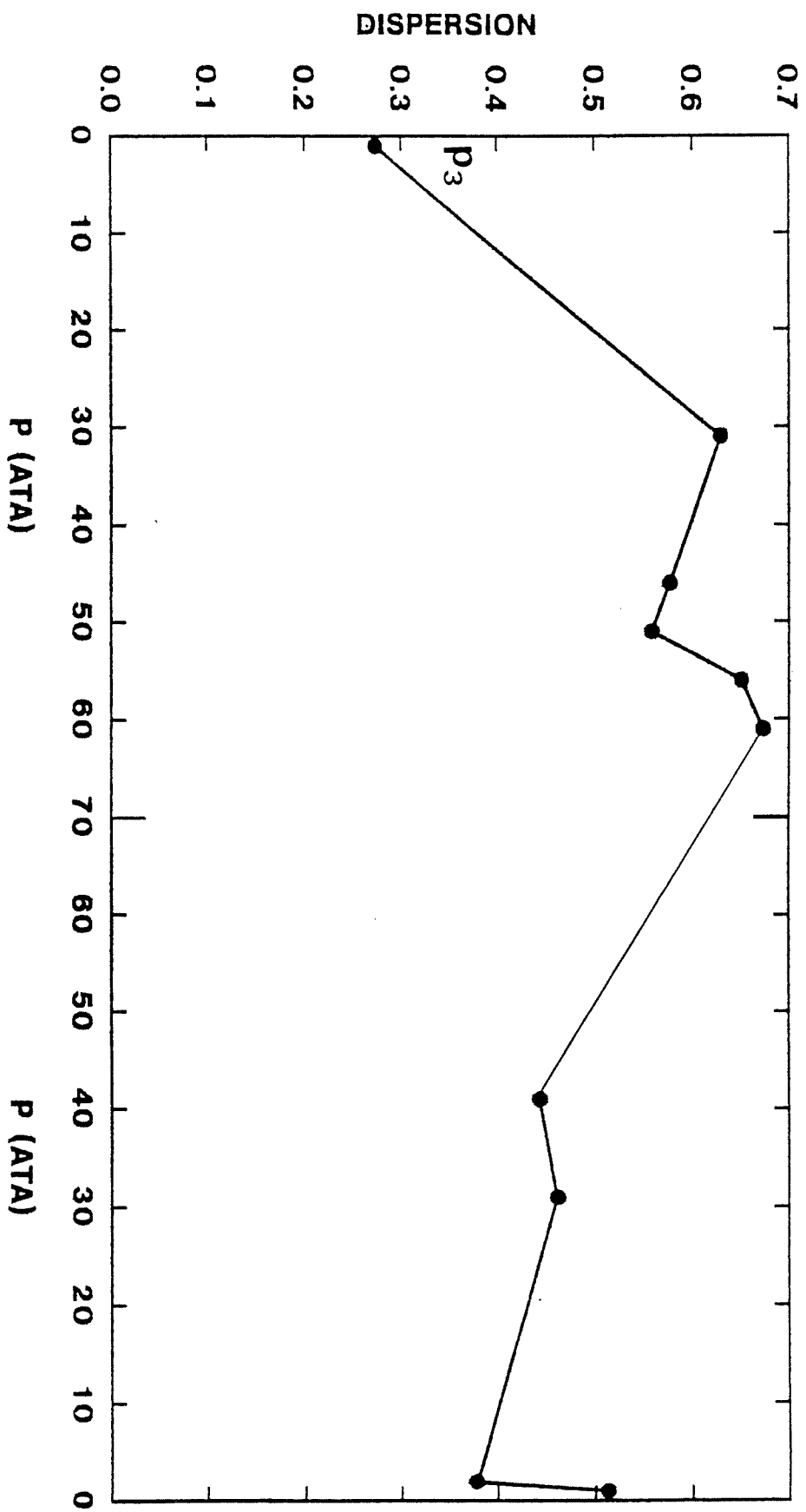
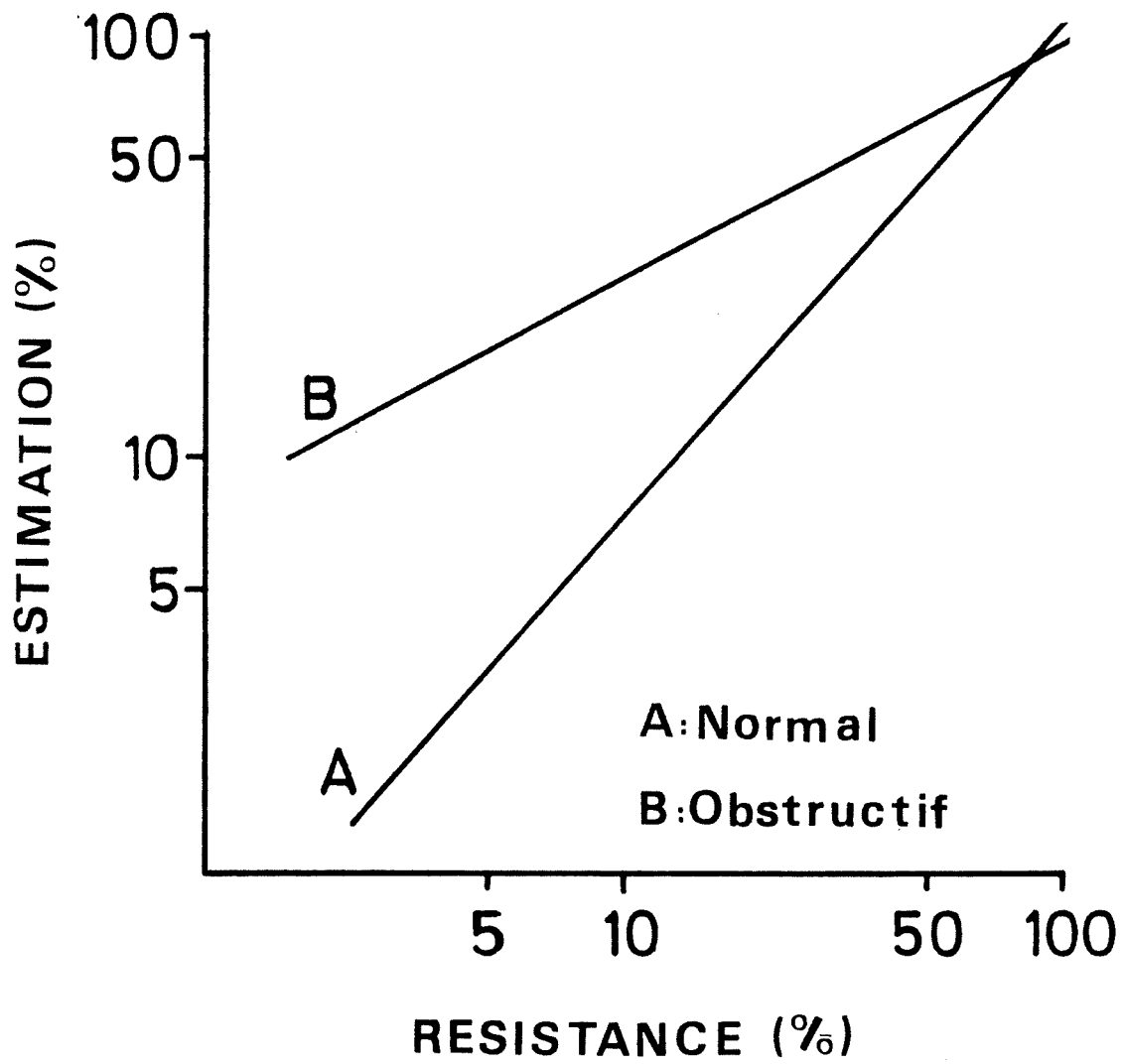


Fig. 2

Sensation respiratoire





D'après Gottfried et al., 1981.

Sensation Respiratoire P_2

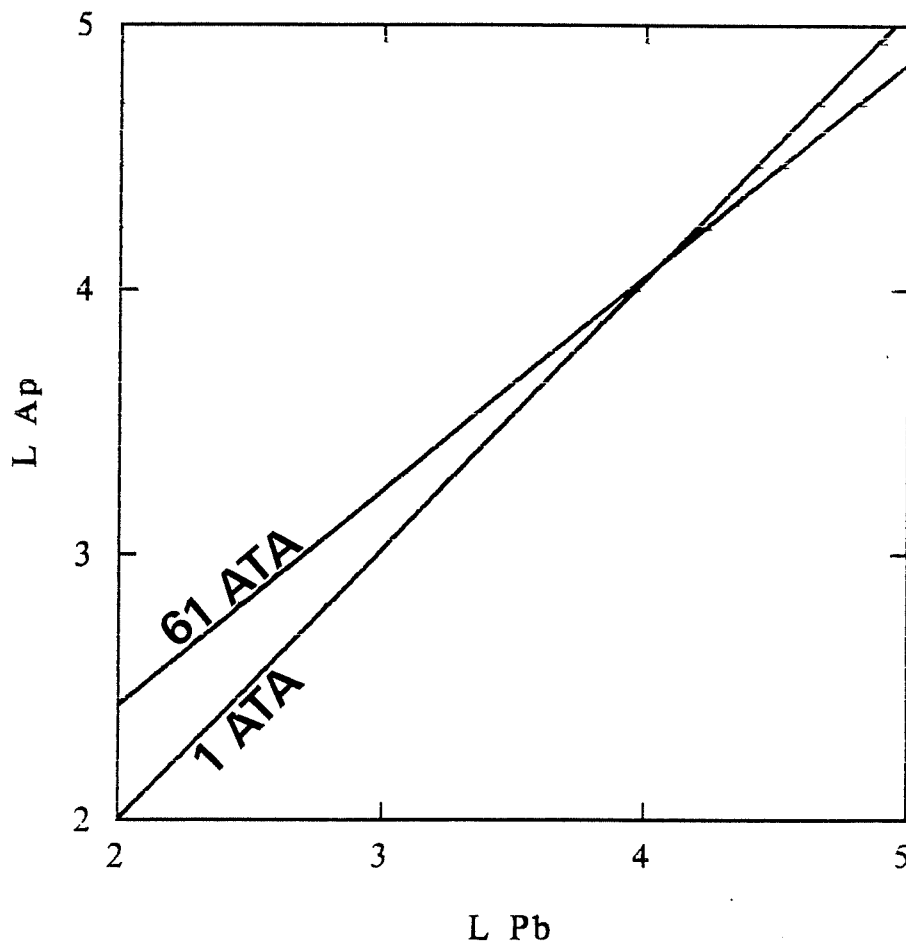


Fig. 5

Sensation tactile

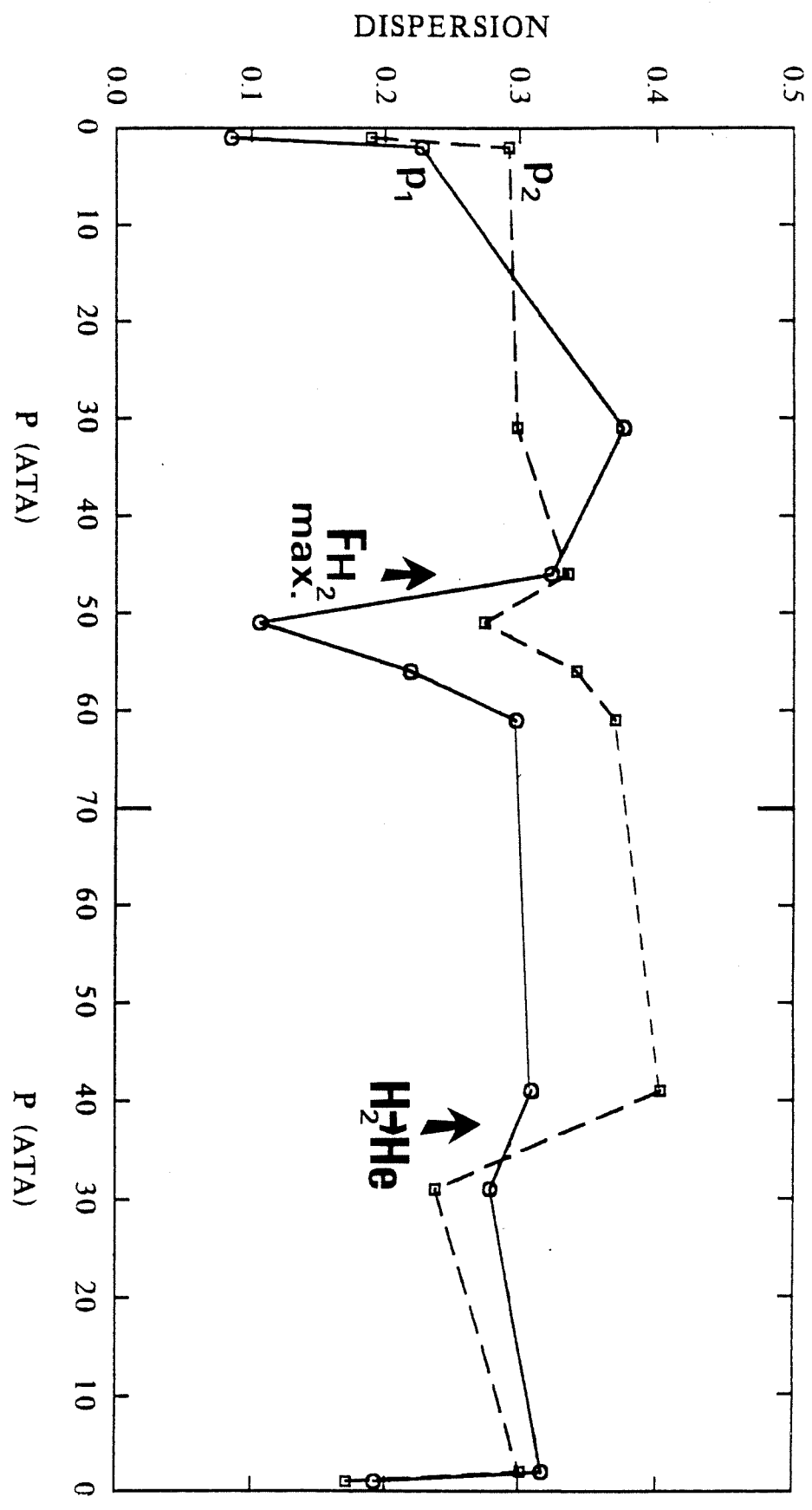
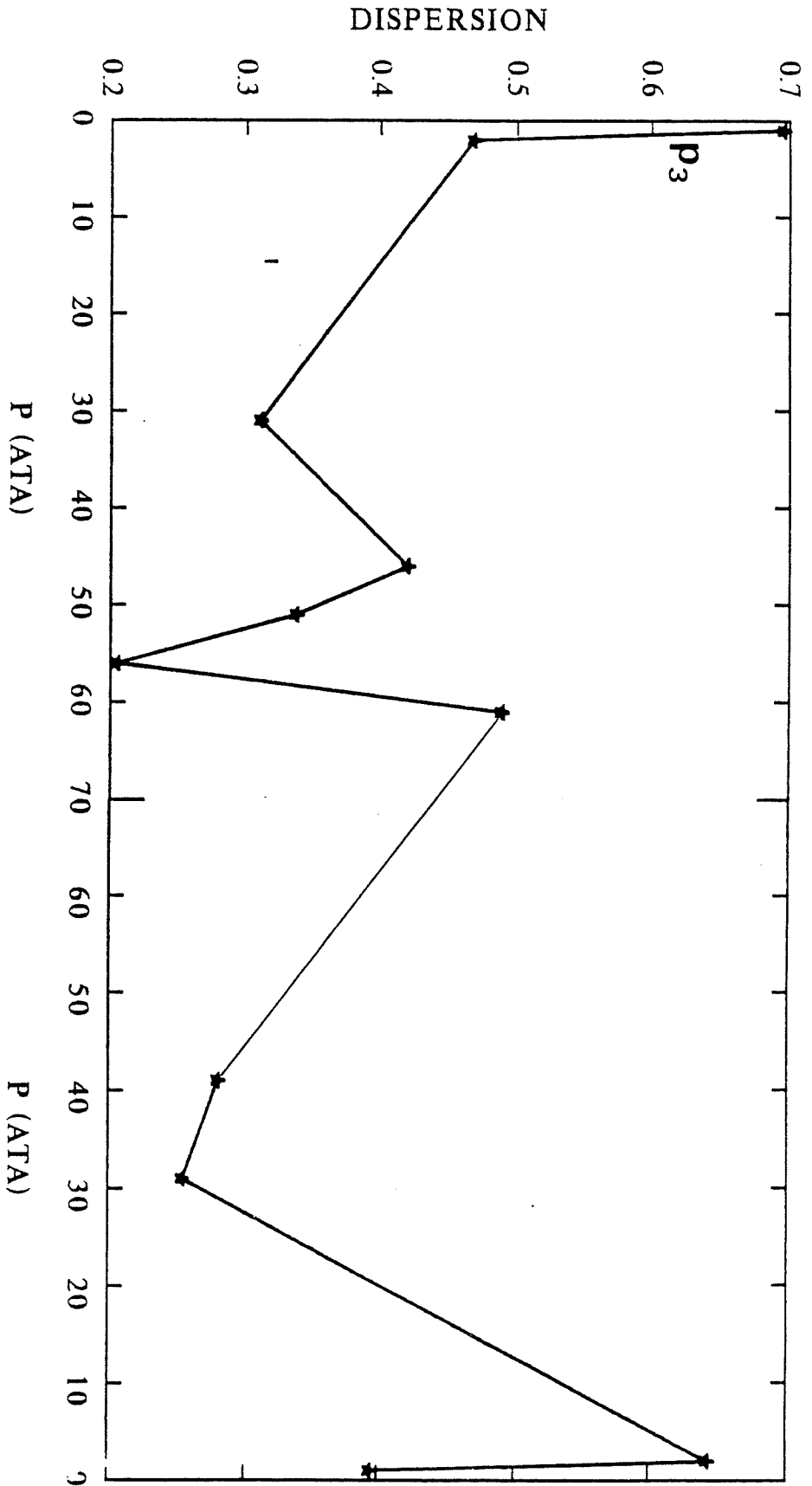
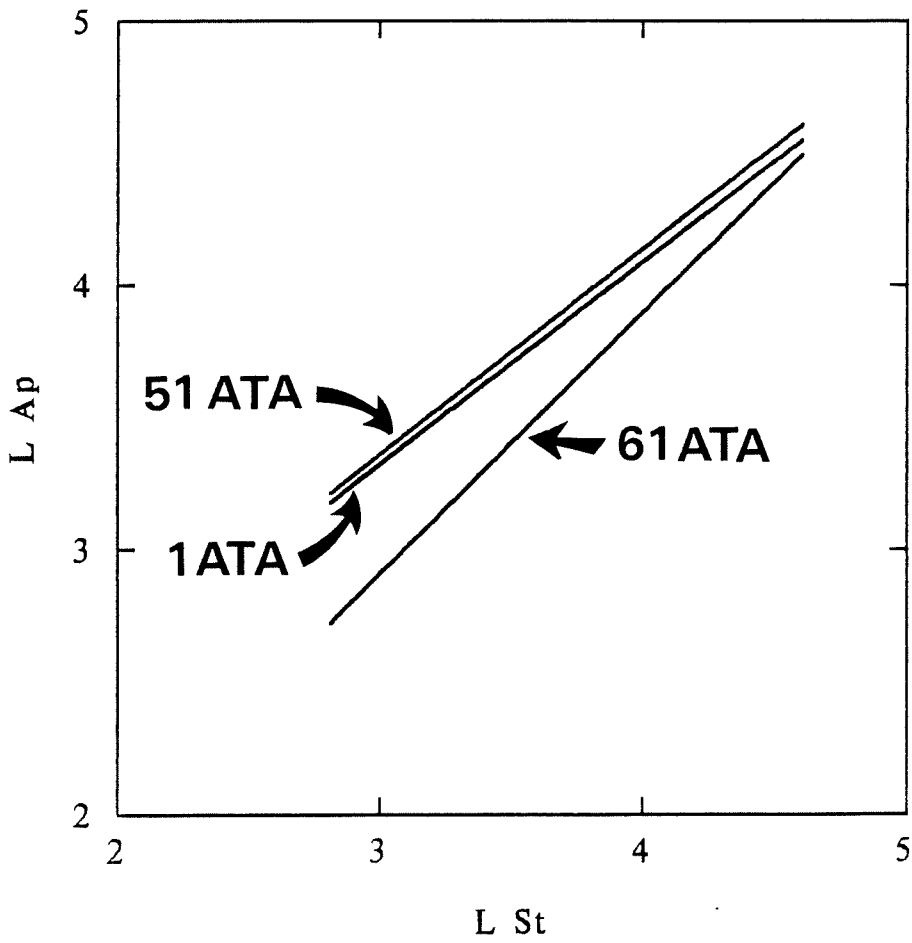


Fig. 6

Sensation tactile



Sensation Tactile : P1



Plongée expérimentale HYDRA 10

**Etude ergonomique et électromyographique
de muscles inspiratoire (Diaphragme)
et squelettique (Adducteur du pouce)**

Responsable: Pr. Y. JAMMES

URA 1630 CNRS Physiopathologie Respiratoire

Faculté de Médecine, Marseille

**Chercheurs associés: Dr. M. BADIER (MCU-PH)
Dr. C. GUILLOT (MCU-PH)
Mr. C. TOMEI (IE1 CNRS)
Mr. P. FONTANARI (Etudiant de DEA)**

A - Revue de la question - But de l'étude:

La respiration de mélanges gazeux de densité élevée, condition réalisée par l'élévation de la pression ambiante, crée une circonstance particulière de ventilation en charge, proche par bien des points de celle rencontrée chez les sujets souffrants de bronchopneumopathie obstructive chronique (bronchite chronique, emphysème) ou lors de crises d'asthme bronchique. L'élévation des résistances s'opposant à l'écoulement des gaz dans les voies aériennes augmente en proportion la différence de pression créée par les muscles inspiratoires, plus particulièrement le diaphragme, pour faire entrer l'air ambiant dans les alvéoles et échanger l'oxygène et le dioxyde de carbone. Le travail accompli par ces muscles est ainsi accru de façon importante et surtout en permanence. Nous avons montré au cours de la plongée Entex XI (46 ATA) que le travail mécanique inspiratoire est multiplié par 3,2 en mélange He-O₂ (densité: 8,7 g/L) et 3,6 en mélange He-N₂-O₂ (densité: 11,1 g/L) (Lenoir et coll., 1990).

Cet accroissement permanent et important d'activité mécanique des muscles participant à la réponse aux charges s'accompagne de modifications quantitatives de l'électromyogramme (EMG). Chez l'Homme, nous avons décrit ces phénomènes au cours de deux plongées expérimentales réalisées par la Marine Nationale: Entex XI (46 ATA: He-O₂ et He-N₂-O₂, durée du séjour sous pression maximale: 12 jours, 4 plongeurs) et Entex XVI (25 ATA: He-N₂-O₂, durée du séjour sous pression maximale: 6 jours, 4 plongeurs). Lors d'Entex XI seule l'activité spontanée du diaphragme et des muscles expiratoires abdominaux a été enregistrée et analysée: le spectre de puissance EMG du diaphragme était déplacé vers la droite (augmentation relative des basses fréquences) pendant tout le séjour à 46 ATA. Cette réponse est en tout point semblable à celle décrite lors de la respiration prolongée contre des résistances inspiratoires élevées ou chez les malades en état de détresse ventilatoire (Roussos et Moxham, 1985). Cependant aucune étude ergonomique n'avait été réalisée au cours de cette plongée et l'analyse n'avait porté sur aucun muscle squelettique. Cette lacune a

été comblée lors de la plongée Entex XVI, limitée à la pression maximale de 25 ATA (densité: 6,2 g/L). Au cours de cette opération, la force de contraction et l'EMG ont été mesurés simultanément pendant des manoeuvres de contraction statique (isométrique) submaximale (80 % de la force maximale) du diaphragme et d'un muscle squelettique distal (Adducteur du pouce). Les manoeuvres volontaires étaient poursuivies jusqu'à sensation d'épuisement du muscle intéressé. Nous n'avons observé (Derrien et coll., 1990) aucune réduction du temps d'endurance mécanique (durée de la contraction fatigante), voire une augmentation discrète mais significative de cette variable pour le muscle adducteur du pouce. En revanche, le séjour sous pression maximale s'associe du premier au sixième jour à des modifications très significatives du spectre de puissance EMG du seul muscle diaphragme, caractérisées par une réduction de recrutement des hautes fréquences et une diminution modérée du recrutement des basses fréquences. Ces résultats sont interprétés en termes de modifications du contrôle sensorimoteur au niveau de ce muscle inspiratoire qui joue le rôle essentiel dans la réponse à la charge ventilatoire. En effet les études électrophysiologiques (Bigland-Ritchie, 1981 - Bigland-Ritchie et coll., 1983 et 1986 - Jammes et Balzamo, 1992) et neuropharmacologiques (Petrozzino et coll., 1990) les plus récentes démontrent que les modifications du spectre EMG, associées à une contraction musculaire fatigante, traduisent essentiellement la réponse nerveuse motrice aux informations sensibles provenant du muscle sollicité. Les boucles réflexes initiées par l'activation de terminaisons nerveuses détectant les modifications du métabolisme musculaire au cours d'un effort important ont en effet pour but de filtrer la décharge des motoneurones spinaux innervant les muscles squelettiques et aussi le diaphragme, essayant ainsi d'épargner l'effort musculaire (*muscle wisdom*, Enoka et Stuart, 1992). L'analyse quantitative du signal EMG permet ainsi d'explorer davantage le contrôle sensorimoteur que les modifications de la conduction neuromusculaire périphérique. Cependant, cette dernière peut être altérée lors d'un effort dynamique intense et surtout prolongé:

une diminution d'amplitude du potentiel d'action de masse musculaire (onde M) est alors mesurée chez l'Homme en normobarie (Bigland-Ritchie, 1981) et chez l'animal au cours de séjours hyperbares sous très haute pression (Burnet et coll., 1992: 101 ATA, densité: 18 à 29 g/L). Les altérations de l'onde M ne semblent jamais apparaître au cours d'efforts statiques intenses mais brefs (Bigland-Ritchie et coll., 1982). Les altérations de l'onde M décrites par Burnet et collaborateurs ne peuvent traduire une modification de la jonction neuromusculaire car dans cette expérience l'onde M était obtenue par stimulation directe du diaphragme. Cependant un bloc neuromusculaire a été décrit par Kendig et Cohen (1976) à 137 ATA sur des préparations phrénique-diaphragme étudiées in vitro, c'est-à-dire non soumises au phénomène de fatigue musculaire.

Outre ces modifications du spectre EMG associées à l'augmentation de travail des muscles inspiratoires, les conditions hyperbares peuvent également affecter la fonction diaphragmatique par les manifestations périphériques du Syndrome Nerveux des Hautes Pressions (SNHP). Nous avons en effet montré chez l'animal (Burnet et coll., 1992) comme chez l'Homme (Lenoir et coll., 1990) que le tremblement hyperbare est également présent sur les muscles thoracoabdominaux, y compris le diaphragme. Ce phénomène susceptible de gêner la fonction de ces muscles n'est observé dans les deux espèces qu'en mélange He-O₂ et jamais en mélange He-N₂-O₂, condition expérimentale défavorable à l'apparition du SNHP.

L'ensemble de ces observations hyperbares a été rassemblé et détaillé dans une revue générale récente (Jammes and Roussos, 1993).

Le but des mesures effectuées lors de la plongée Hydra 10 a été essentiellement de répéter les protocoles réalisés lors de la plongée Entex XVI, à savoir **effectuer une étude comparative de la résistance à la fatigue et des modifications du spectre EMG au niveau du diaphragme et du muscle adducteur du pouce**. Les conditions expérimentales ont permis d'augmenter la pression hydrostatique, d'accroître la durée du séjour sous haute pression et

d'étudier les effets d'un mélange contenant de l'hydrogène. Le muscle squelettique étudié a constitué un témoin de non-réactivité à la ventilation en charge. Cependant les désordres neurologiques associés à l'exposition aux hautes pressions de gaz ont pu également influencer l'ordre moteur somatique et donc le recrutement des unités motrices.

B - Méthodes et Protocole:

1 - Variables physiologiques enregistrées:

Pour chacun des muscles étudiés, l'événement mécanique (force musculaire ou pression générée par les muscles inspiratoires) et l'EMG de surface ont été mesurés et enregistrés simultanément:

- force musculaire: jauge de contrainte Schenk pour mesure de contraction isométrique (0 à 30 kgf).

- pression buccale: électromanomètre Statham (± 250 cmH₂O) monté en parallèle avec un manomètre Protais (0 à - 250 cmH₂O).

Dans les deux cas un retro-contôle visuel est possible.

- EMG: électrodes de surface DISA et gel conducteur salin. Deux électrodes sont fixées en regard du muscle étudié; dans le cas du diaphragme une électrode est placée sur le 7ème espace intercostal et une autre sur le 8ème espace (ligne axillaire antérieure). L'espacement des deux électrodes est de 1 cm pour l'adducteur, de 2 cm pour le diaphragme. Un neuroamplificateur DISA a été utilisé (filtre passe-bande: 10 - 1000 Hz).

2 - Analyse quantitative de l'EMG:

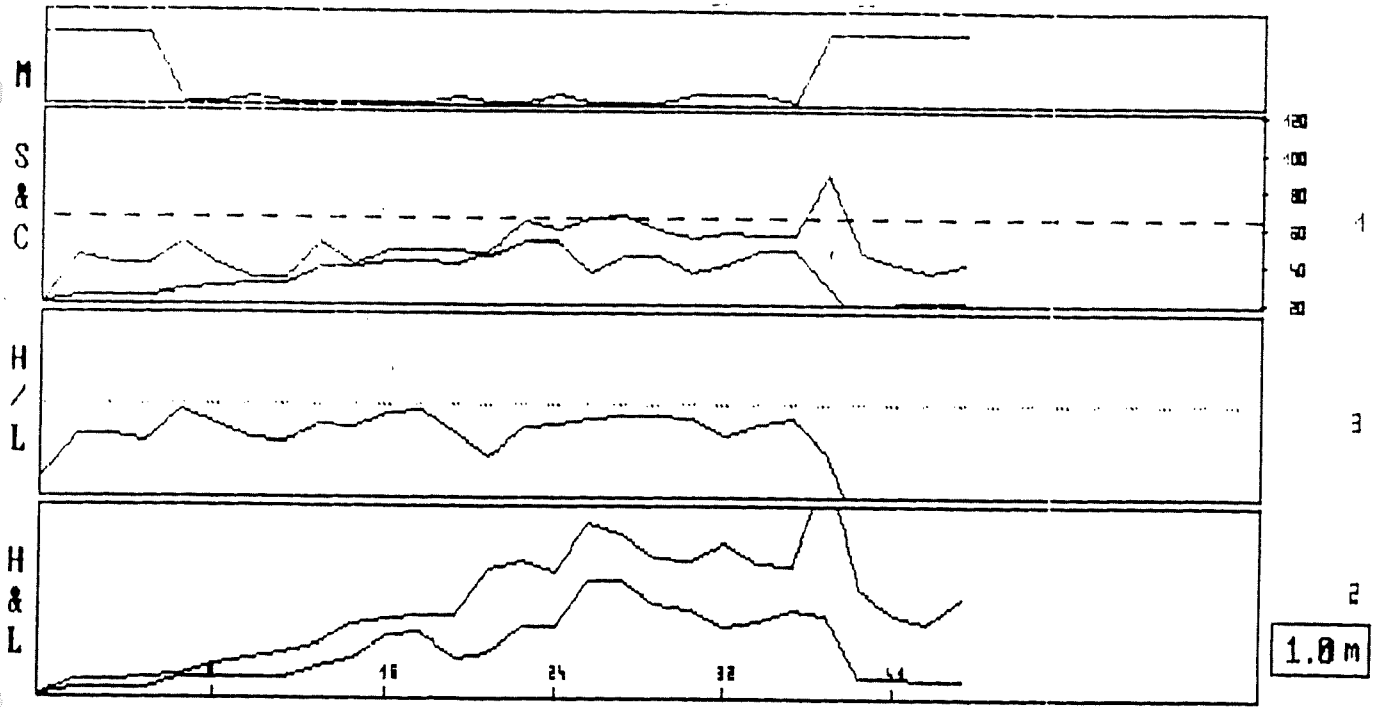
Un programme informatique spécialement conçu pour Hydra 10 par Mr. Charles TOMEI a été utilisé. Il consiste en l'analyse par transformée rapide de Fourier (FFT) permettant l'établissement de spectres de puissance toutes les 124 ms (fréquence d'échantillonnage: 2000 Hz). Les variables EMG suivantes sont déterminées:

- fréquence médiane définie par la fréquence EMG divisant le spectre en deux surfaces égales (FM)

- énergie calculée dans une bande de basses fréquences (10-80 Hz)
(EL)
- énergie calculée dans une bande de hautes fréquences (100-200 Hz)
(EH)
- rapport des énergies EH et EL , soit rapport H/L.

Pour chaque test de contraction fatigante, les valeurs moyennes respectives de FM, EH, EL et H/L sont calculées pour les trois premières secondes de contraction. Toutes les valeurs ultérieures obtenues au cours du même test sont exprimées en pourcentage des valeurs moyennes respectives initiales. Une analyse statistique simple (régression linéaire) permet d'estimer la puissance de chaque régression et la pente de variation de chaque variable au cours du même test. En fait une étude antérieure réalisée chez l'Homme normal nous a permis de montrer qu'une simple mesure des variations de EH, EL ou de H/L (ou FM) à temps constant (par exemple 10^{ème} seconde à partir du début du plateau de contraction) est un excellent estimateur de valeur de la pente de régression (Badier et coll., 1993).

Les figures 1 et 2 montrent deux exemples d'analyse des variables mécaniques et EMG au cours d'une contraction statique du diaphragme ou de l'adducteur du pouce. Pour chacune d'elles, un tableau de valeurs numériques rassemble les données de l'analyse EMG quantitative obtenues à partir du programme informatique élaboré par Mr. C. Tomei. Ces figures permettent de rappeler les modifications de recrutement des unités motrices à basses (L) et hautes (H) fréquences dans les deux muscles étudiés (Badier et coll., 1993): recrutement constant des L au cours d'une contraction statique du diaphragme ou de l'adducteur du pouce mais des variations des H en sens opposé (recrutement pour le diaphragme, dérecrutement pour le muscle du pouce). Ces effets contraires sont interprétés en terme de différences de composition en fibres lentes ou rapides et donc en motoneurones toniques ou phasiques de ces deux muscles; l'adducteur du pouce est en effet très pauvre en fibres rapides.



 MAVDIS01.FFT

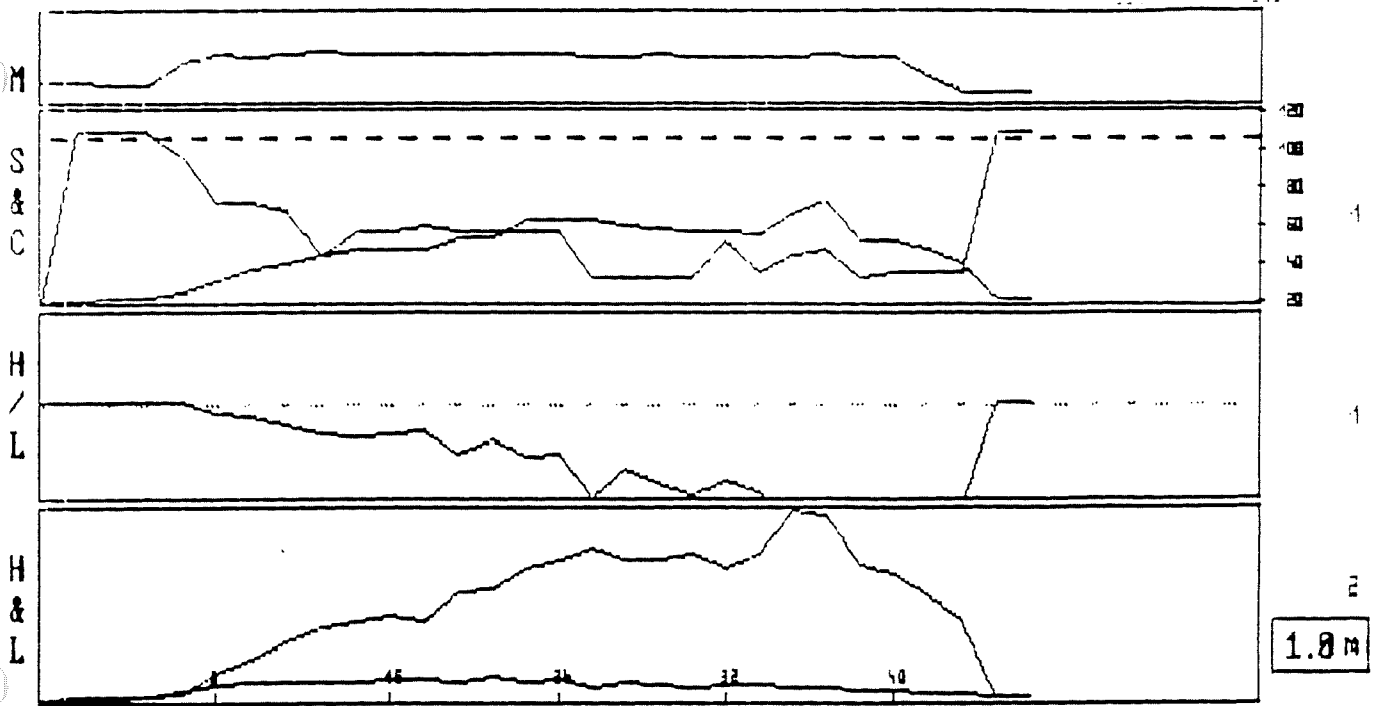
REFERENCES pour le calcul des %

| LOW | HIGH | MECA | H/L | Surf | Freq. |
|------|------|------|-----|------|-------|
| 48.7 | 59.7 | 3.7 | 0.5 | 3.0 | 25.0 |

 VALEURS en % des COURBES

| Temps | LOW | HIGH | MECA. | H/L | Surf. | Freq. |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 1 | 46.0 | 36.0 | -7.0 | -7.0 | 10.0 | -3.0 |
| 3 | 43.0 | 42.0 | -7.0 | -1.0 | 10.0 | -4.0 |
| 4 | 26.0 | 54.0 | -7.0 | 21.0 | 10.0 | 1.0 |
| 5 | 42.0 | 54.0 | -7.0 | 8.0 | 40.0 | 3.0 |
| 8 | 58.0 | 29.0 | 3.0 | -19.0 | 40.0 | -4.0 |
| 9 | 28.0 | 44.0 | -7.0 | 12.0 | 20.0 | 4.0 |
| 11 | 61.0 | 46.0 | 3.0 | -10.0 | 60.0 | -4.0 |
| 12 | 47.0 | 39.0 | 3.0 | -5.0 | 40.0 | -1.0 |
| 14 | 65.0 | 64.0 | 3.0 | -1.0 | 60.0 | 0.0 |
| 16 | 65.0 | 138.0 | 3.0 | 44.0 | 80.0 | 8.0 |
| 17 | 97.0 | 18.0 | 3.0 | -40.0 | 80.0 | -12.0 |

| | PENTE | I.conf | R2 |
|----------------|-------|--------|------|
| LOW..... | 0.27 | 0.08 | 0.51 |
| HIGH..... | 0.18 | 0.17 | 0.09 |
| MECA..... | 0.08 | 0.02 | 0.65 |
| H/L..... | -0.04 | 0.12 | 0.01 |
| Surface..... | 0.25 | 0.07 | 0.50 |
| Centroide..... | -0.00 | 0.13 | 0.00 |



 MAVAP902.FF7

REFERENCES pour le calcul des %

| LOW | HIGH | MECA. | H/L | Surf. | Fred. |
|------|------|-------|-----|-------|-------|
| 76.7 | 35.3 | 26.3 | 0.7 | 4.0 | 17.3 |

 VALEURS en % des COURSES

| Temps | LOW | HIGH | MECA. | H/L | Surf. | Fred. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 1 | 17.0 | -5.0 | -1.0 | -20.0 | 7.0 | -4.0 |
| 3 | -26.0 | -44.0 | -1.0 | -24.0 | -25.0 | -2.0 |
| 4 | -2.0 | -13.0 | 3.0 | -11.0 | 0.0 | -4.0 |
| 5 | -31.0 | -39.0 | 6.0 | -11.0 | -25.0 | -2.0 |
| 7 | -44.0 | -40.0 | 6.0 | 7.0 | -50.0 | 0.0 |
| 9 | -26.0 | -40.0 | 3.0 | -30.0 | -25.0 | -5.0 |
| 11 | -33.0 | -40.0 | 3.0 | -10.0 | -25.0 | -4.0 |
| 12 | -32.0 | -42.0 | 3.0 | -15.0 | -25.0 | -4.0 |
| 14 | -57.0 | -55.0 | 3.0 | 5.0 | -50.0 | 2.0 |
| 16 | -37.0 | -51.0 | -1.0 | -22.0 | -50.0 | -5.0 |
| 17 | -53.0 | -58.0 | 3.0 | -11.0 | -50.0 | -2.0 |
| 19 | -31.0 | -51.0 | 3.0 | -29.0 | -50.0 | -7.0 |
| 20 | -50.0 | -57.0 | 3.0 | 7.0 | -50.0 | 2.0 |
| 22 | -58.0 | -64.0 | 3.0 | -13.0 | -50.0 | -4.0 |
| 24 | -62.0 | -73.0 | 3.0 | -28.0 | -75.0 | -4.0 |
| 25 | -57.0 | -65.0 | 3.0 | 5.0 | -50.0 | 5.0 |
| 27 | -56.0 | -59.0 | -1.0 | -9.0 | -75.0 | 0.0 |
| 28 | -52.0 | -58.0 | 3.0 | -14.0 | -50.0 | -2.0 |
| 30 | -62.0 | -62.0 | 6.0 | 1.0 | -75.0 | 0.0 |
| 32 | -74.0 | -62.0 | -1.0 | 16.0 | -75.0 | 16.0 |
| 33 | -70.0 | -73.0 | -1.0 | -9.0 | -75.0 | 0.0 |
| 35 | -57.0 | -71.0 | -1.0 | -11.0 | -75.0 | -2.0 |
| 36 | -32.0 | -58.0 | 3.0 | -39.0 | -50.0 | -8.0 |
| 38 | -44.0 | -50.0 | 3.0 | -29.0 | -50.0 | -7.0 |
| 40 | -57.0 | -57.0 | -58.0 | -24.0 | -50.0 | -7.0 |

| | PENTE | 1. Surf | 32 |
|--------------|-------|---------|------|
| LOW..... | -0.26 | 0.05 | 0.49 |
| HIGH..... | -0.23 | 0.03 | 0.55 |
| MECA..... | -0.07 | 0.04 | 0.13 |
| H/L..... | 0.00 | 0.06 | 0.00 |
| Surface..... | -0.28 | 0.05 | 0.57 |
| Centroids. | 0.01 | 0.02 | 0.01 |

3 - Protocoles:

- Protocole d'étude de la contraction musculaire:

Les valeurs maximales de force musculaire (F_{max}) et de pression inspiratoire (Pi_{max}) sont déterminées chez chaque individu au début de chacune des séances de travail (Valeur maximale de trois mesures successives). Pi_{max} est mesurée au cours de la manoeuvre de Müller: le sujet respire au travers d'un embout buccal rigide, porte un pince-nez et effectue une inspiration maximale contre un obstacle infini. Après mesure de F_{max} ou de Pi_{max} le sujet doit ensuite maintenir jusqu'à épuisement du muscle correspondant une contraction statique à 80 % de la valeur de la force ou de la pression inspiratoire maximale. Trois tests sont effectués pour chaque muscle étudié; ils sont espacés de 15 à 20 minutes en ce qui concerne l'adducteur du pouce et de seulement 10 minutes pour le diaphragme. Une étude antérieure réalisée chez l'Homme normal nous a en effet permis de montrer que la récupération des tests de fatigue de ces deux muscles s'effectue dans ces délais respectifs (Badier et coll., 1993). Pour chaque test les variables quantitatives EMG, la valeur de la force ou de la pression maintenue et le temps d'endurance (instant d'interruption de l'effort) sont mesurés.

- Protocole expérimental général choisi au cours d'Hydra 10:

Les mesures sont effectuées avant la plongée (Air: J-31), pendant la période de confinement à 2 ATA en mélange He-O₂ (J 1), puis en mélange He-H₂-O₂ à 31 ATA (J 4), 56 ATA (J 11) et 61 ATA (J 13). Aucune mesure n'a pu être réalisée au cours de la décompression jusqu'à 9 ATA (He-O₂) en raison des risques d'interférence des manoeuvres de contraction maximale et de Müller avec le phénomène de dégazage. Elles sont répétées au sol à J 68. Les valeurs de Pi_{max} sont à nouveau contrôlées à J 108.

C - Résultats et commentaires:

1 - Etude ergonomique des deux groupes musculaires:

* Valeurs de $P_{i\max}$ et de F_{\max} :

La figure 3 rassemble les valeurs individuelles de $P_{i\max}$ et de F_{\max} mesurées chez les trois plongeurs avant la plongée (J-31), pendant Hydra 10 (2, 31, 56, 61 et 9 ATA) puis un mois (J68) et deux mois (J108) après le retour au sol. Elle révèle une réduction marquée de $P_{i\max}$ dès 31 ATA qui s'accroît tout au long de l'expérience hyperbare et persiste à la fin de la décompression. $P_{i\max}$ reste significativement diminué chez les trois plongeurs à J 68; les valeurs de contrôle sont retrouvées à J 108, soit plus de deux mois après la fin d'Hydra 10.

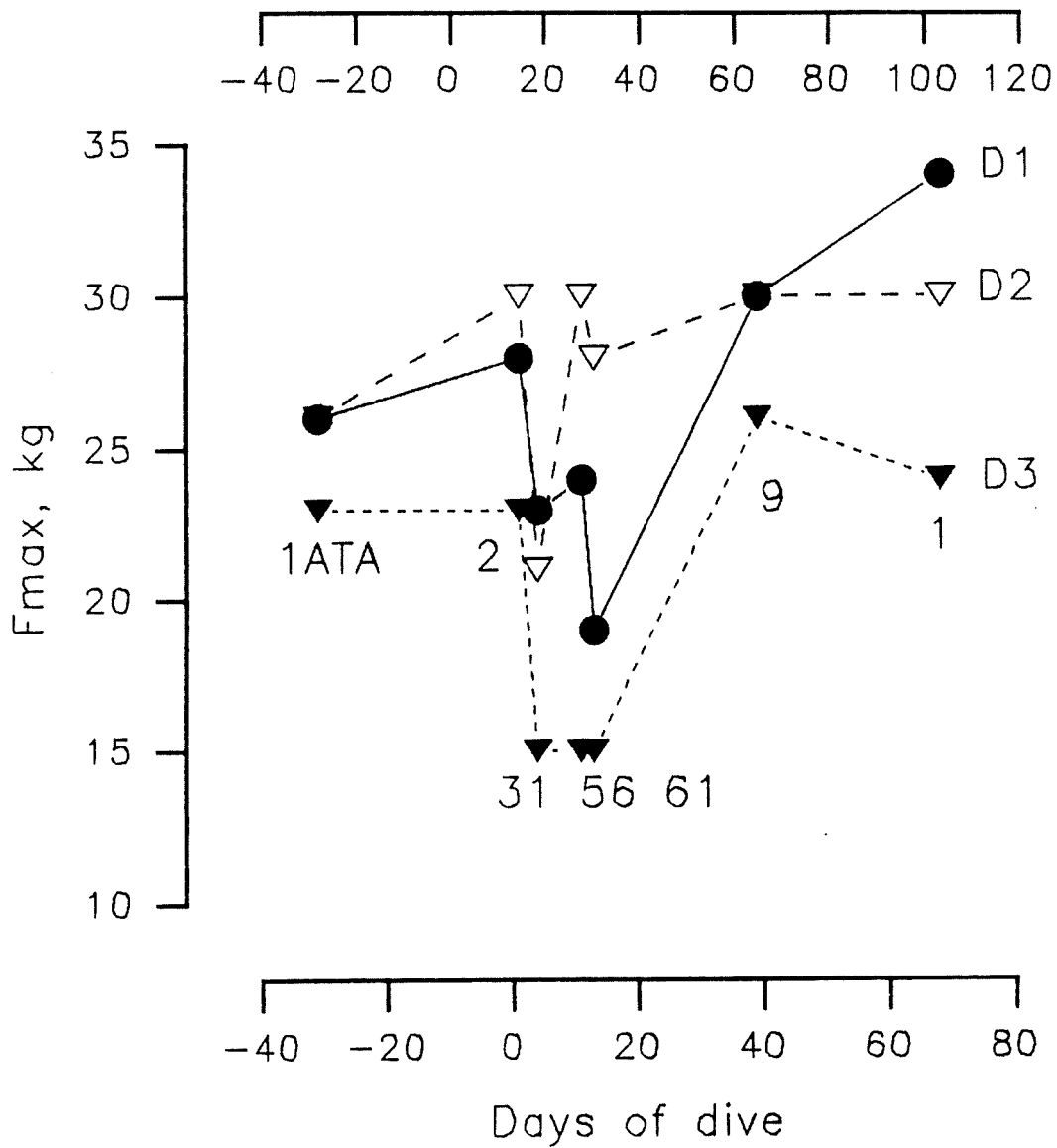
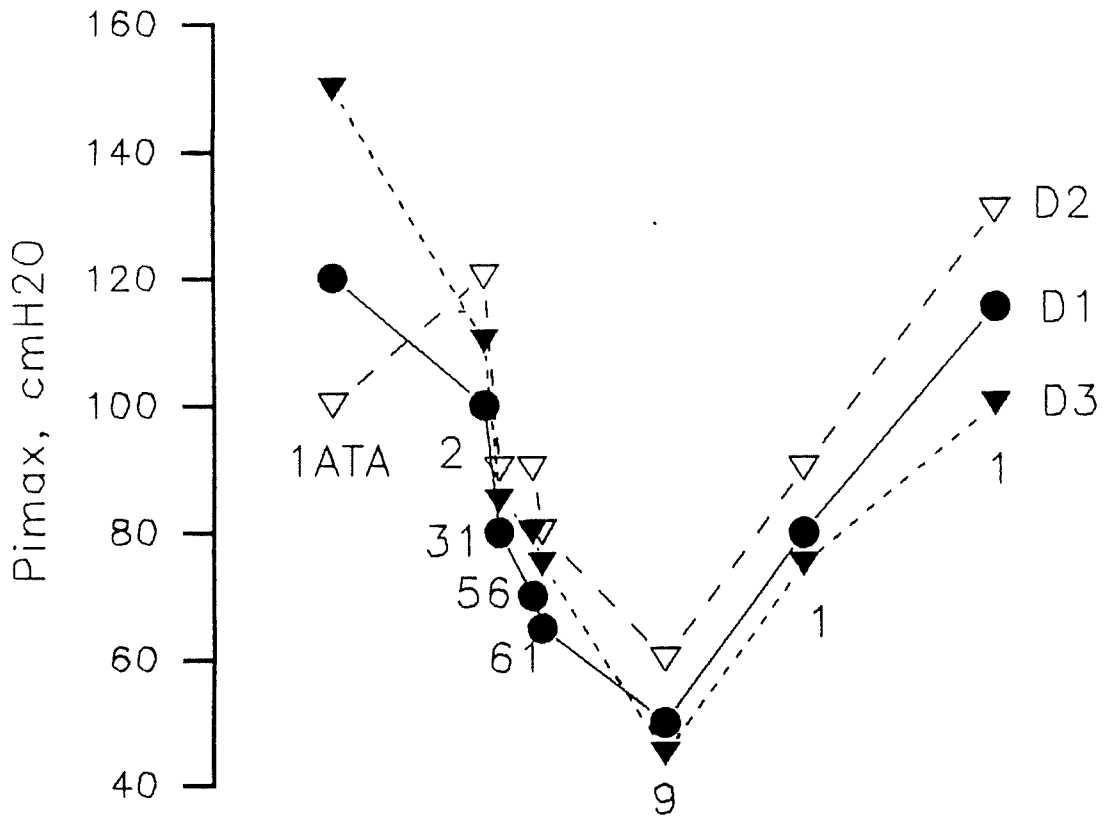
Chez les plongeurs P1 et P3, F_{\max} est fortement diminuée à 31, 56 et 61 ATA; les variations de cette variable sont transitoires chez P2. A la fin de la décompression (J40) et à 1 ATA (J 68), F_{\max} n'est pas diminuée mais au contraire accrue par rapport aux valeurs de contrôle respectives mesurées avant Hydra 10.

Le séjour hyperbare est donc responsable d'une diminution précoce et durable des performances maximales de la musculature inspiratoire. De façon surprenante ces anomalies persistent un mois après le retour à la pression atmosphérique. Elles peuvent s'interpréter comme des modifications structurales de ces muscles et en particulier du diaphragme, fortement et surtout longtemps sollicité au cours de la ventilation en charge associée aux conditions hyperbares. En revanche, la réduction de F_{\max} mesurée sur le muscle squelettique étudié n'apparaît qu'à partir de 31 ATA et ne persiste que chez deux plongeurs jusqu'à la fin du séjour sous très haute pression. La récupération et même le dépassement des valeurs de contrôle sont rapides.

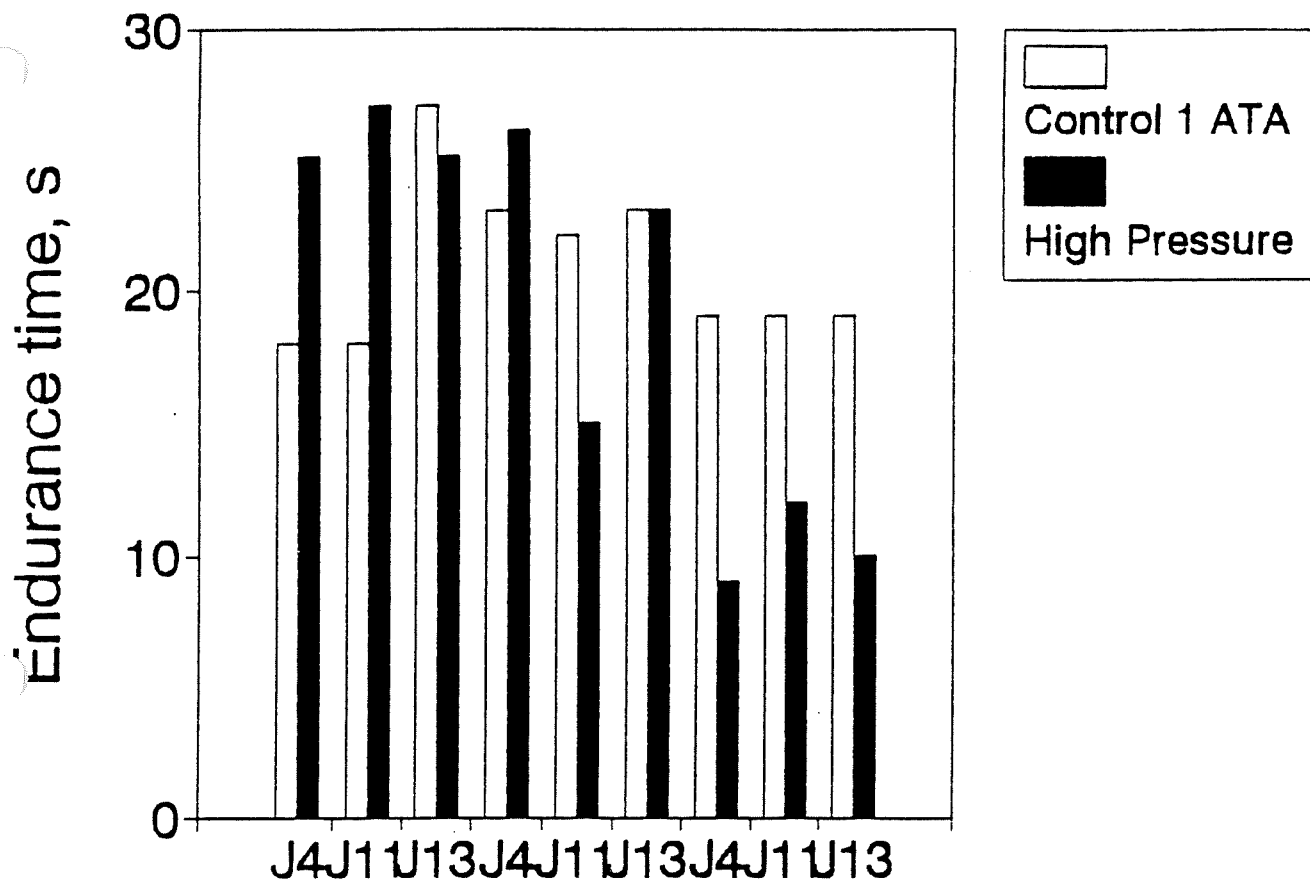
* Temps d'endurance des contractions fatigantes:

La figure 4 rassemble les valeurs moyennes individuelles des temps d'endurance des contractions statiques mesurés à J4, J11 et J13 (barres pleines).

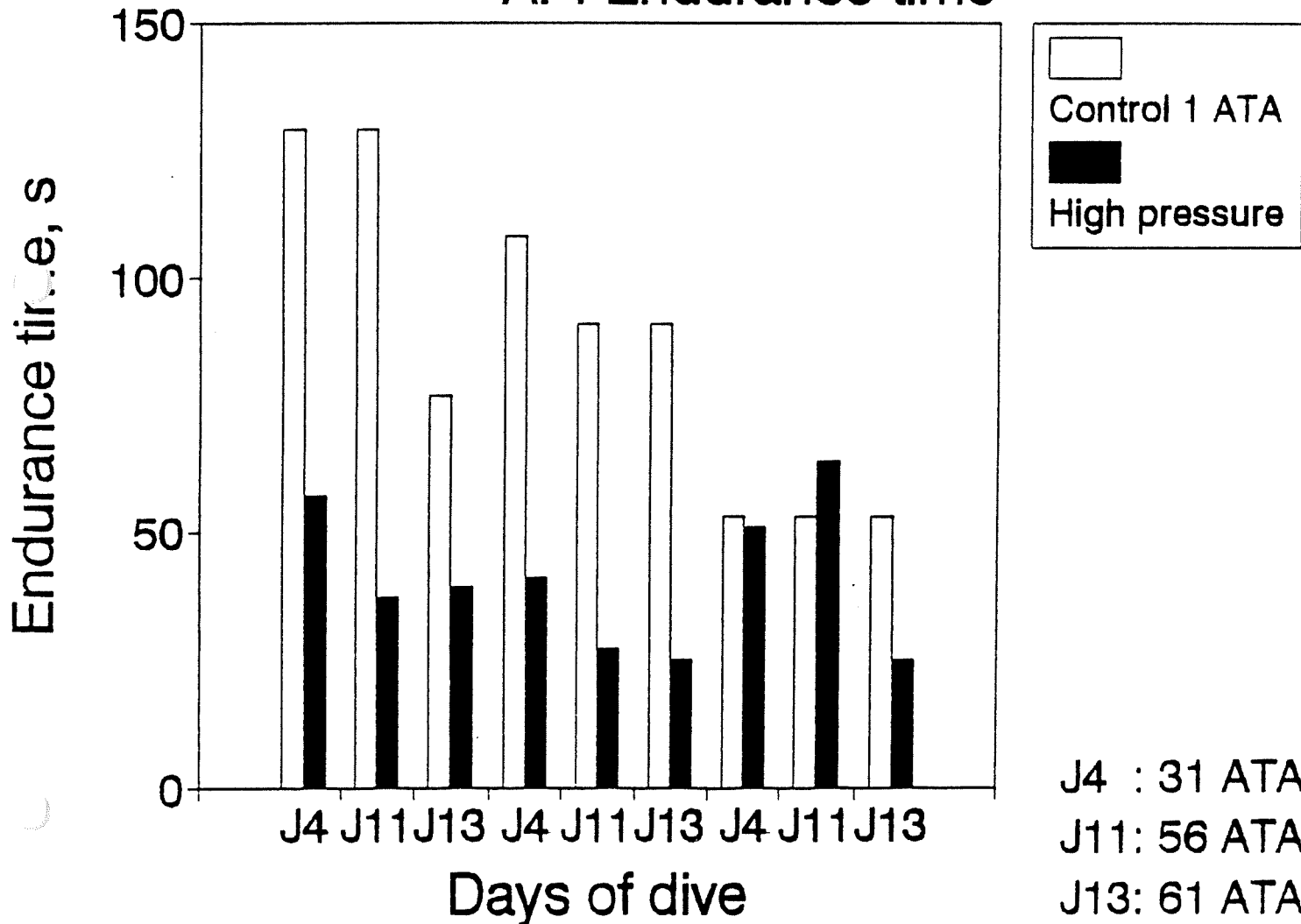
Figure n°3



DI: Endurance time



AP: Endurance time



J4 : 31 ATA
 J11: 56 ATA
 J13: 61 ATA

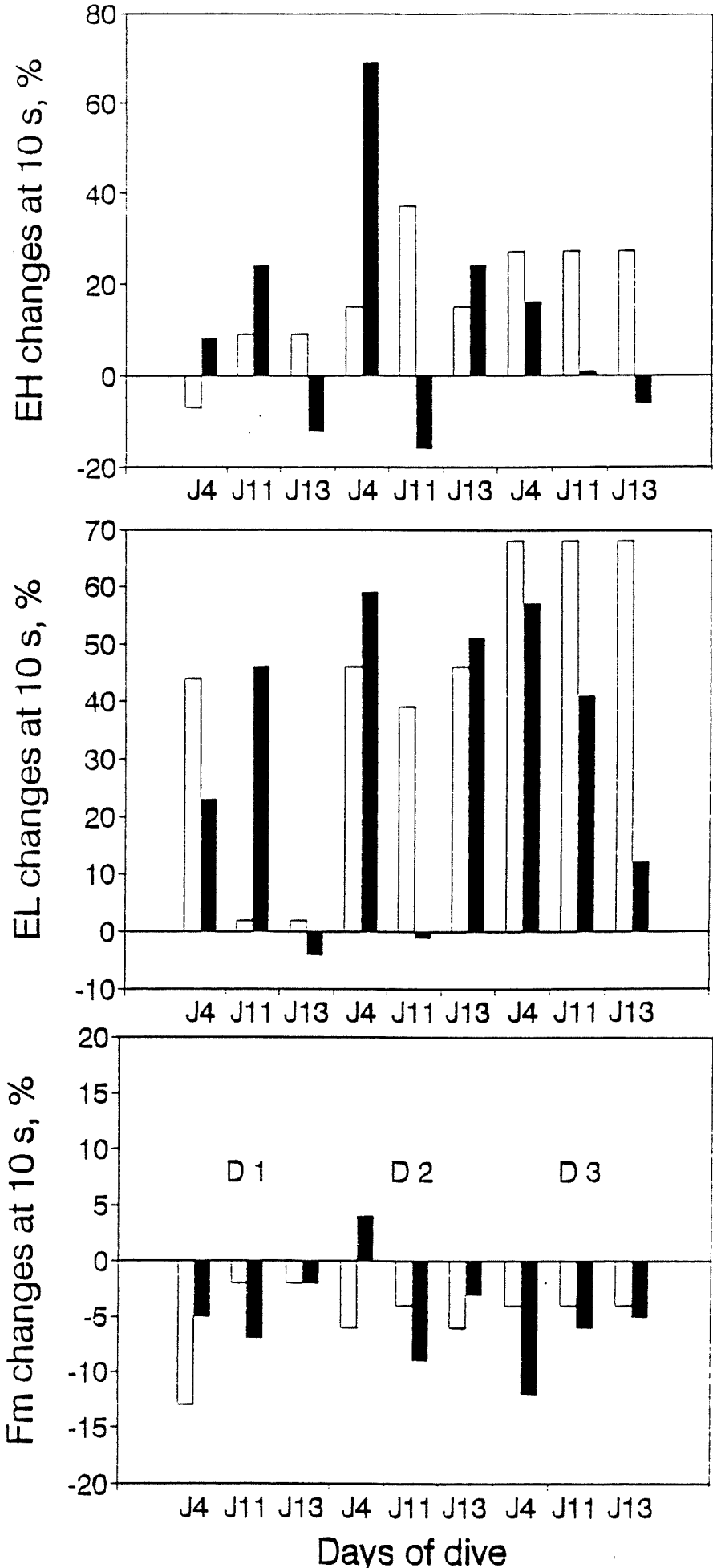
En raison des diminutions des valeurs de pression buccale ou de force maintenue au cours des tests réalisés en condition hyperbare, des valeurs de P_i et F correspondantes ont été reproduites au cours des tests effectués à J68 (retour à 1 ATA). Ainsi les barres vides indiquent en regard de chaque valeur de temps d'endurance mesuré en hyperbarie la valeur correspondante de cette variable à 1 ATA. Nous constatons que les modifications du temps d'endurance de la contraction diaphragmatique sont variables chez les plongeurs P1 et P2, alors que chez P3 la durée des tests est constamment réduite sous haute pression. Le résultat inverse est obtenu pour l'adducteur du pouce: le temps d'endurance est toujours diminué chez P1 et P2 mais inchangé chez P3.

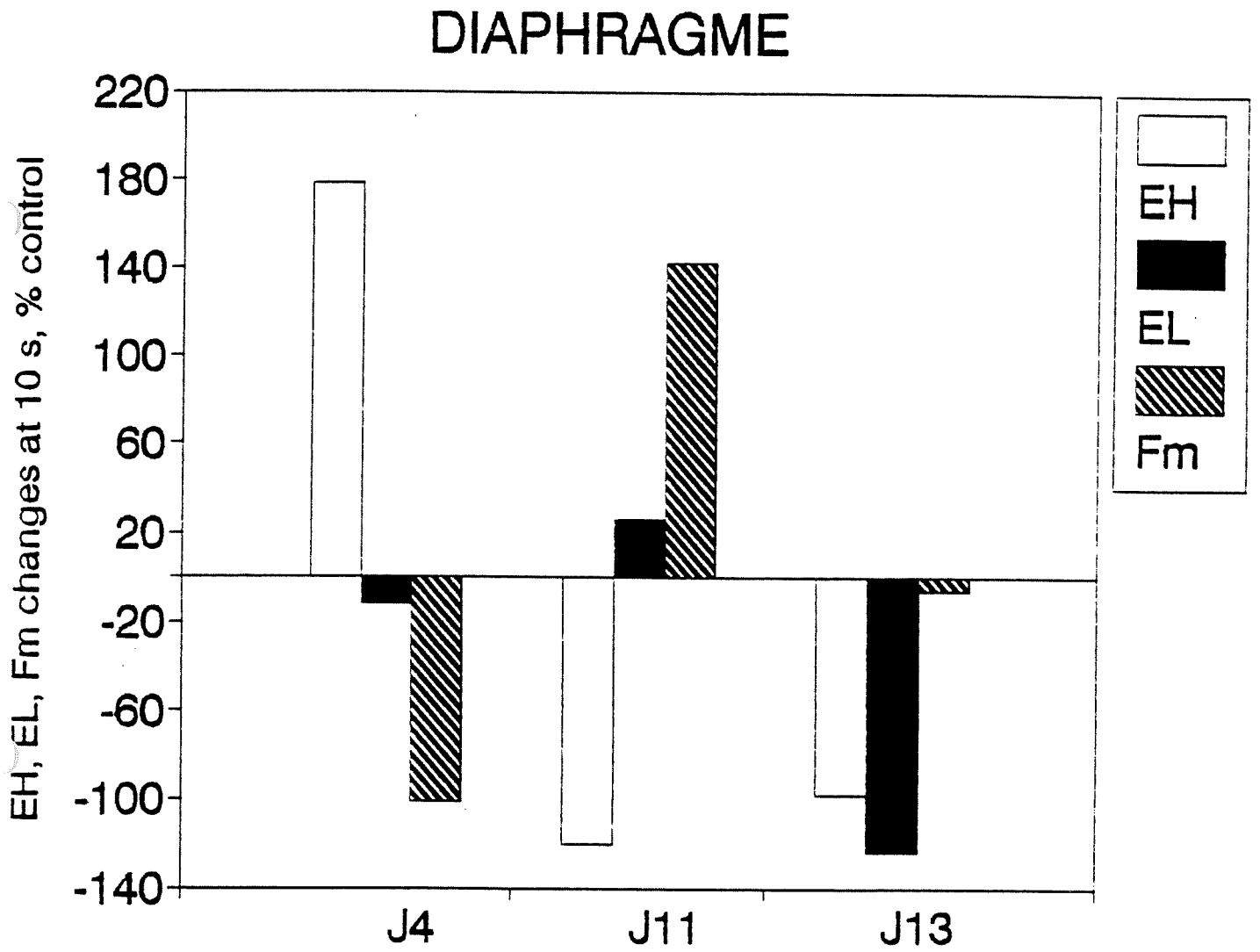
2 - Etude électromyographique:

*** Diaphragme:**

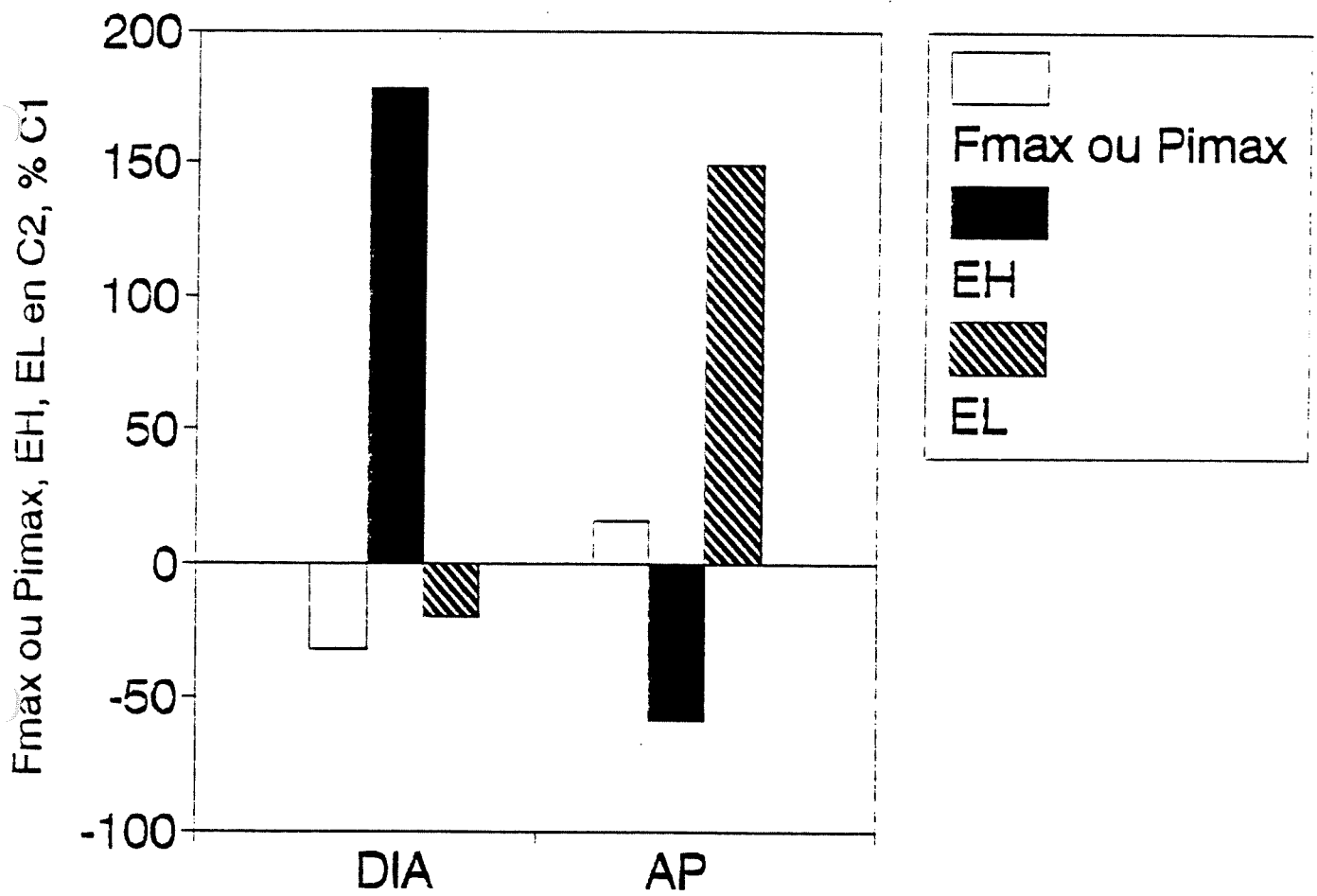
La figure 5 montre les valeurs moyennes individuelles des variations de EH, EL et de fréquence médiane du spectre EMG mesurées au cours de la période de compression (J4, J11 et J13). Comme pour la figure 4 les valeurs de contrôle correspondantes mesurées à 1 ATA sont rapportées (barres vides). En raison des variations interindividuelles observées une étude de tendance est donnée sur la figure 6. Cette analyse révèle que le recrutement des hautes fréquences (EH) est accru à J4 puis réduit à J11 et J13. Celui des basses fréquences est inchangé à J4 et J11 mais très réduit à J13. Les modifications des variations de fréquence médiane traduisent simplement la combinaison de ces effets. Les modifications de recrutement des unités motrices diaphragmatiques rapportées à J11 et surtout J13 sont en tout point semblables à celles que nous observons en normobarie chez les sujets placés en hypoxémie aiguë ($PaO_2 = 54$ mmHg). Le filtrage des unités motrices à hautes et basses fréquences est interprété comme une augmentation du gain des boucles de rétroaction réflexes initiées à partir de la décharge des métaborécepteurs musculaires, phénomène accru en condition d'hypoxie musculaire (observations effectuées chez l'animal par notre groupe: Lagier-Tessonier et coll., 1993). Il semble donc apparaître un état de fatigue

DIAPHRAGME





Effets sur Fmax. ou Pimax. et sur le recrutement de H et de L

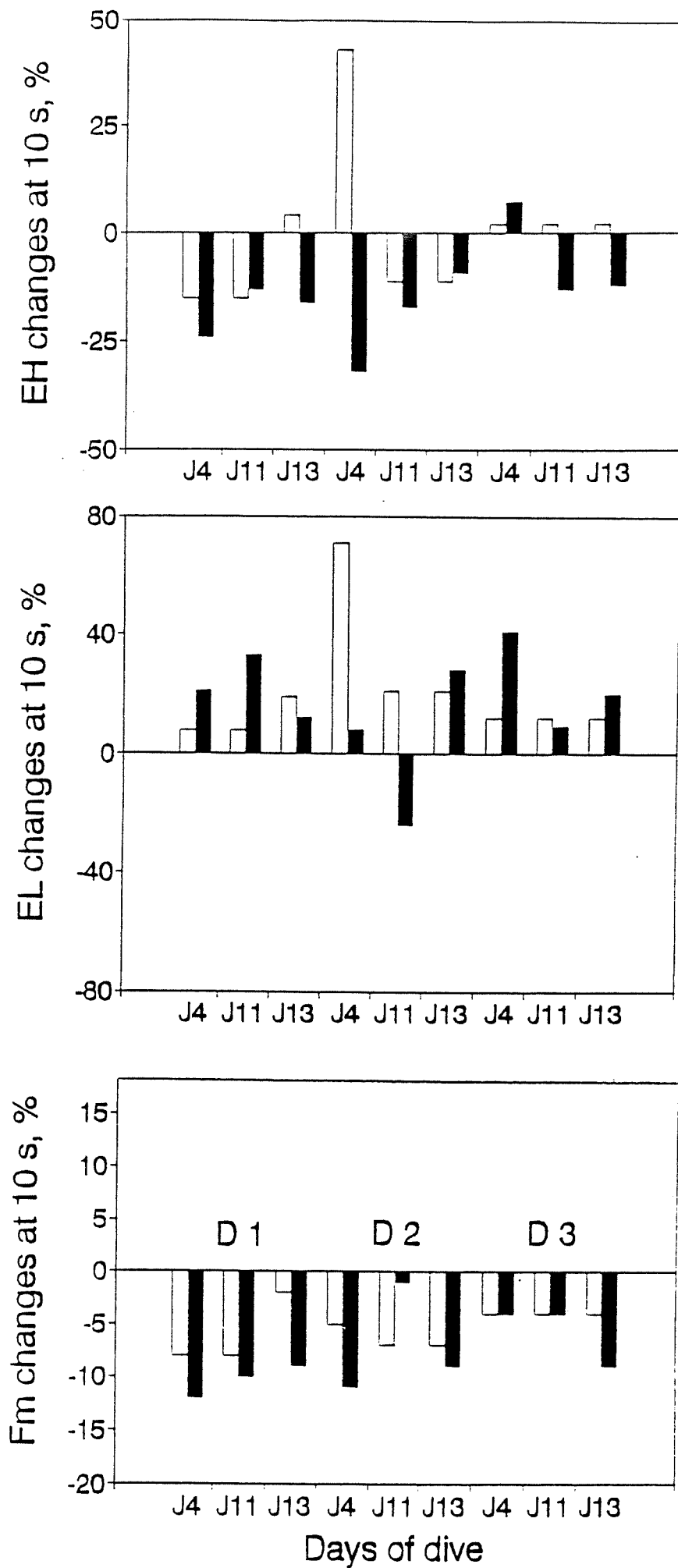


inspiratoires au cours du séjour hyperbare. En témoignent les modifications EMG et aussi la réduction des valeurs de $P_{i_{max}}$. Les altérations du recrutement des unités motrices diaphragmatiques sont maximales à J13 (61 ATA); les enregistrements EMG n'ont pu être explorés à J40 (9 ATA, fin de décompression) en raison d'une faible coopération des plongeurs. A J68, lors du deuxième contrôle surface, l'analyse quantitative de l'EMG diaphragmatique révèle en moyenne chez les trois plongeurs une augmentation du recrutement des hautes fréquences associée à une légère réduction du recrutement des basses fréquences (figure 7: C2 = J68, C1 = J-31). Un recrutement augmenté des unités motrices à hautes fréquences (fibres musculaires FT, fatigables) nous autorise à émettre l'hypothèse que le phénomène d'épargne musculaire (*muscle wisdom*) soit alors atténué par un mécanisme encore inconnu, résultant de l'exposition aux hautes pressions et peut-être plus encore de la ventilation en charge prolongée due à l'inhalation de mélanges de densité élevée. La réduction de $P_{i_{max}}$ s'accroît tout au long de la plongée pour être maximale à J40. Cet effet persiste un mois environ après retour à 1 ATA et n'est plus retrouvé à J108, date à laquelle les enregistrements EMG n'ont pas été effectués. L'absence de retour à la normale de $P_{i_{max}}$ un mois après la fin d'Hydra 10 peut être attribuée à l'atténuation du phénomène de *muscle wisdom* constaté sur l'EMG.

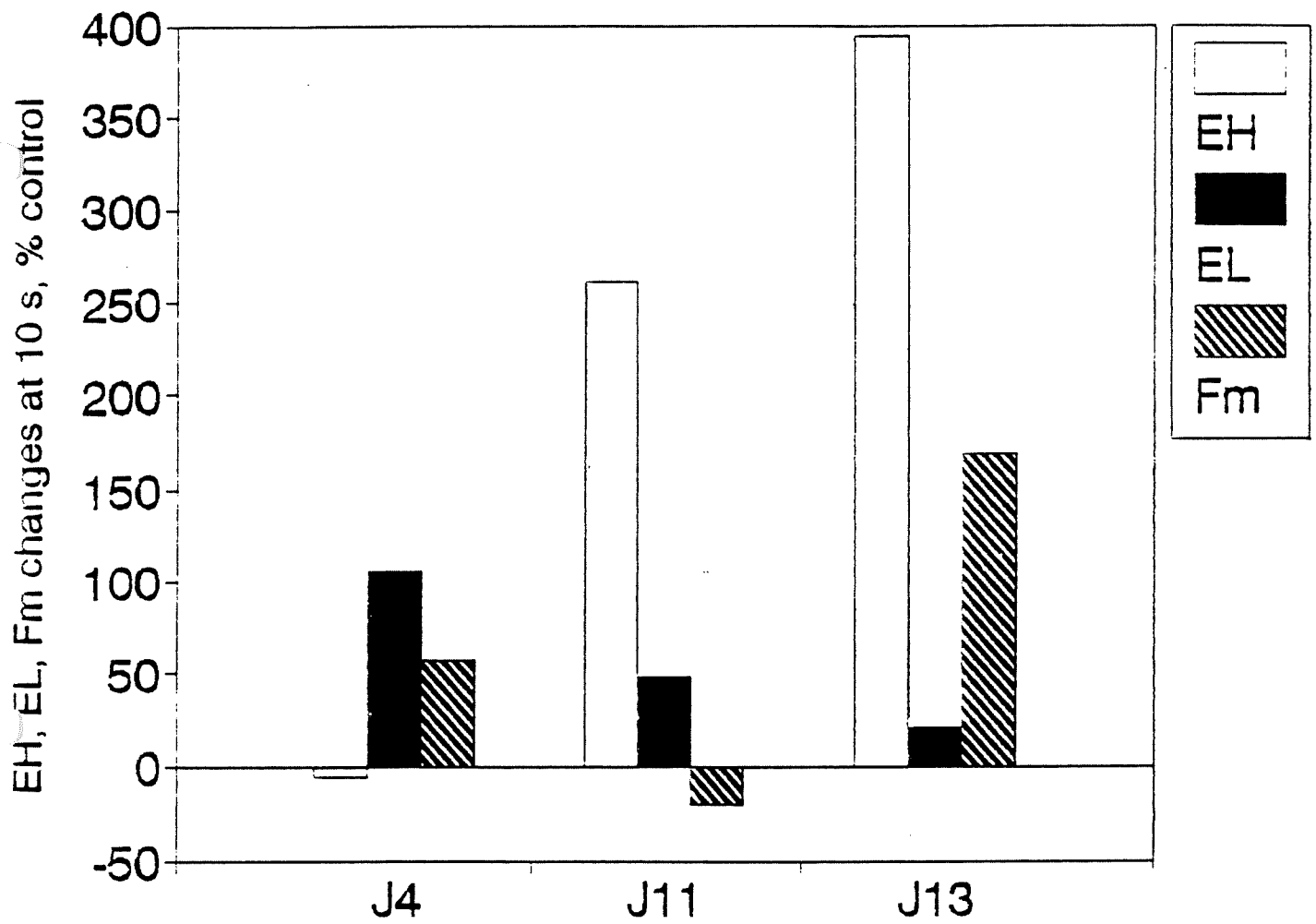
***Adducteur du pouce:**

La figure 8 rassemble les résultats individuels et la figure 9 les modifications globales de la réponse EMG à la contraction statique fatigante de l'adducteur du pouce. Cette figure révèle essentiellement qu'à partir de J11 (56 ATA) et plus encore à J13 (61 ATA) le dérecrutement des hautes fréquences, phénomène caractéristique de ce muscle, est fortement accentué. Comme ce muscle squelettique n'a aucune raison d'être soumis à un surcroît de travail, circonstance imposée aux seuls muscles inspiratoires, on peut supposer qu'une telle réduction du recrutement des unités motrices à haute fréquence trouve sa cause non pas dans une exacerbation du rétrocontrôle exercé par les afférences des

ADDUCTEUR DU POUCE



ADDUCTEUR DU POUCE



métaborécepteurs musculaires mais dans une manifestation du SNHP ou/et des effets périphériques des hautes pressions. A ce titre, Kendig et Cohen (1976) ont démontré in vitro l'existence d'un blocage neuromusculaire sous hautes pressions. De telles altérations de la transmission synaptique au niveau de la plaque motrice pourraient déjà à elles seules rendre compte de l'accentuation de l'effet de filtre des hautes fréquences EMG observé au niveau du muscle squelettique étudié. A J68 (deuxième contrôle) cet effet n'est plus retrouvé (figure 7). A l'opposé existe alors une accentuation du recrutement des basses fréquences EMG au cours des tests de contraction statique de l'adducteur du pouce. La résistance à la fatigue de ce muscle est donc augmentée après Hydra 10, comme du reste la valeur de F_{max} . Nous nous garderons de déduire l'existence d'une action bénéfique des hautes pressions sur les muscles squelettiques. En effet le même muscle adducteur du pouce ayant été sollicité à 6 reprises au cours d'Hydra 10 (J-31, J1, J4, J11, J13 et J40) l'amélioration de ses performances observée à J68 peut seulement traduire un effet de l'entraînement.

En résumé, les études ergonomiques et EMG effectuées au cours de la plongée expérimentale humaine Hydra 10 ont mis en évidence une altération de la pression maximale développée par la contraction diaphragmatique associée à des signes EMG de plus grande fatigabilité de ce muscle. Ces effets persistent un mois après le retour à 1 ATA. Ils ne sont plus retrouvés après deux mois. Le muscle squelettique étudié est le siège d'altérations transitoires de la force maximale combinées à des modifications de la réponse EMG qui évoquent l'existence d'effets des hautes pressions sur la jonction neuromusculaire. En ce qui concerne le diaphragme, les présents résultats confirment les observations effectuées chez l'Homme et le Chat. En revanche une étude antérieure réalisée avec le même protocole de travail mais à une profondeur moindre (25 ATA) n'avait pu montrer aucune modification de la réponse EMG de l'adducteur du pouce.

Références bibliographiques:

- Badier M., C. Guillot, F. Lagier-Tessonier, H. Burnet and Y. Jammes. EMG power spectrum of respiratory and skeletal muscles during static contractions in healthy man. *Muscle and Nerve*, 1993, 16: in press.
- Bigland-Ritchie B. EMG and fatigue of human voluntary and stimulated contractions. In *Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms*, Ciba Foundation vol. 82, Pitman, London, 1981, pp. 130-148.
- Bigland-Ritchie B., N. J. Dawson, R. S. Johansson and O. C. J. Lippold. Reflex origin for the slowing of motoneurone firing rates in fatigue of human voluntary contractions. *J. Physiol. (London)*, 1986, 379: 451-459.
- Bigland-Ritchie B., R. S. Johansson, O. C. J. Lippold and J. J. Woods. Changes in motoneurone firing rates during sustained maximal voluntary contractions. *J. Physiol. (London)*, 1983, 340: 335-346.
- Bigland-Ritchie B., C. G. Kukulka, O. C. J. Lippold and J. J. Woods. The absence of neuromuscular transmission failure in sustained maximal voluntary contractions. *J. Physiol. (London)*, 1982, 330: 265-278.
- Burnet H., P. Lenoir and Y. Jammes. Changes in respiratory muscle activity in conscious cats during experimental dives at 101 ATA. *J. Appl. Physiol.*, 1992, 73: 465-472.
- Derrien I., P. Lenoir et Y. Jammes. Etude comparative des muscles diaphragme et adducteur du pouce lors de contractions statiques fatigantes à 25 ATA. *Arch. Intern. Physiol. Bioch.*, 1990, 98: A424.
- Enoka R. M. and D. G. Stuart. Neurobiology of muscle fatigue (Brief review). *J. Appl. Physiol.*, 1992, 72: 1631-1648.
- Jammes Y. and E. Balzamo. Changes in afferent and efferent phrenic activities with electrically-induced diaphragmatic fatigue. *J. Appl. Physiol.*, 1992, 73: 894-902.

- Jammes Y. and Ch. Roussos. Diving. In: *The Thorax Second ed.* , Roussos Ch. ed., Marcel Dekker, New York, 1992, in press.
- Kendig J.J. and E.N. Cohen. Neuromuscular function at hyperbaric pressures: pressure-anesthetic interactions. *Amer. J. Physiol.*, 1976, 230: 1244-1249.
- Lagier-Tessonier F, Balzamo E, Jammes Y: Comparative effects of ischemia and acute hypoxemia on muscle afferents from tibialis anterior in cats. *Muscle Nerve*, 1993; 16: 135-142.
- Lenoir P., Y. Jammes, P. Giry, J. C. Rostain, H. Burnet, Ch. Tomei and Ch. Roussos. Electromyographic study of respiratory muscles during human diving at 46 ATA. *Undersea Biomed. Res.*, 1990, 17: 121-137.
- Petrozzino J.J., A. T. Scardella, J. K. J. Li, N. Krawciw, N. H. Edelman and T. V. Santiago. Effect of naloxone on spectral shifts of the diaphragm EMG during inspiratory loading. *J. Appl. Physiol.*, 1990, 68: 1376-1385.
- Roussos Ch. and J. Moxham. Respiratory muscle fatigue. In: *The Thorax part II* , Roussos Ch. And P.T. Macklem eds., Marcel Dekker, New York, 1985, pp. 829-870.

HYDRA X

SURVEILLANCE CARDIOLOGIQUES DES PLONGEURS

* B. COMET

Service de cardiologie
Polyclinique les Alpilles
21, rue louis Astruc
13005 Marseille

* V.LAFAY

Service des Urgences Hôpital Nord
13326 Marseille Cédex 15

Laboratoire CNRS Professeur JAMMES
Faculté de Médecine
13326 Marseille Cédex 15

SURVEILLANCE CARDIOLOGIQUE DES PLONGEURS D'HYDRA X

INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est triple :

- 1° - Assurer une surveillance cardiologique et électrocardiographique des plongeurs.
- 2° - Réaliser une évaluation cardiologique avant et après la plongée.
- 3° - Analyser les modifications électrocardiographiques éventuelles.

En effet, à la suite des travaux effectués par F.JOULIA et P.BARTHELEMY lors de la plongée précédente d'HYDRA IX, il était important pour l'organisation scientifique d'avoir une approche cardiologique des plongeurs pour cette nouvelle plongée HYDRA X.

Nous avons donc proposé :

- D'une part, une évaluation avant la plongée comprenant une épreuve d'effort et un enregistrement holter ECG de 24 heures de référence et après la plongée une nouvelle épreuve d'effort.

- D'autre part, une surveillance clinique et électrocardiographique pendant toute la plongée comprenant un ECG de base et un holter de 24 heures.

Nous verrons donc successivement :

1° - La méthodologie et les résultats de l'évaluation et de la surveillance cardiologique.

2° - L'analyse des tracés électrocardiographiques.

I - Evaluation et surveillance cardiologique :

* A. Méthodologie :

1° - Evaluation pré Hydra X.

Les trois plongeurs sélectionnés ont dû subir outre l'électrocardiogramme de base pratiqué annuellement au service médical de COMEX :

- Une épreuve d'effort sur bicyclette ergométrique avec enregistrement et analyse ECG par un appareillage type MARQUETTE MAX 1. Le protocole utilisé démarre à 30 watts et toutes les 3 minutes s'ajoute un palier de 30 watts. Il s'agit du protocole habituellement utilisé en cardiologie.

- Un enregistrement holter des 24 heures sur cassette à bande par un enregistreur ELA médical (1mn/s) et l'analyse a été faite sur un lecteur ELA médical.

2° - Surveillance pendant la plongée :
Elle a été triple :

- Clinique avec prise tensionnelle par les plongeurs eux mêmes.

- Electrocardiographique : appareil ECG Marquette 3 pistes dont le fonctionnement était très satisfaisant autorisant des tracés de très bonne qualité.

- Et holter des 24 heures placé par les plongeurs eux mêmes. Ces tracés sont de qualité médiocre et au-delà de 400m le système de blocage de l'enregistreur se mettant en fonction, aucun enregistrement à très grande profondeur n'a pu être réalisé.

3° - Evaluation post HYDRA X :

Elle a comporté uniquement une épreuve d'effort selon le même protocole.

* B. Résultats :

1° - Les épreuves d'effort sont résumées sur le tableau ci-joint (Cf. tableau 1).

Les résultats sont comparés avant et après la plongée.

La fréquence de repos n'est pas modifiée de façon significative.

La puissance maximale atteinte est similaire pour deux plongeurs, le troisième plongeur n'atteint pas la puissance de la première épreuve d'effort.

Alors que les épreuves d'effort pré HYDRA X sont interrompues pour obtention d'une FC MAX, celles effectuées après HYDRA X sont stoppées pour épuisement musculaire sans atteindre pour les trois plongeurs la FC maximale.

Cela traduit l'apparition d'une discordance entre la bonne adaptation cardio vasculaire des plongeurs et la dégradation de leur entraînement musculaire liée très certainement à la faible activité physique et au confinement imposé par la plongée.

2° - Les enregistrements holter des 24 heures (Cf. tableau 2).

Pour chacun des plongeurs 3 enregistrements ont pu être effectués. Un enregistrement de surface de référence, un en phase de compression et un en phase de décompression.

Les enregistrements en grande profondeur n'ont pu être effectués pour des raisons techniques précédemment énoncées.

Il apparaît qu'en phase de compression une bradycardie significative apparaît pour les trois plongeurs. Ce phénomène déjà connu est lié à l'hyperoxie, le confinement et la compression, les phénomènes de régulation physiologique permettaient de contrôler ensuite cette bradycardie dans les grandes profondeurs ainsi qu'à la décompression.

II - L'analyse des tracés électrocardiographiques :

14 enregistrements ECG ont été pratiqués pendant la plongée chez les trois plongeurs : Serge ICART (P1), Théo MAVROSTOMOS (P2) et Régis PEILHO (P3). Deux enregistrements de référence (48 heures avant l'entrée en caisson et 1 mois après la sortie) ont été obtenus dans les mêmes conditions (Tableau 3).

Il existe un tracé pour chacun des trois plongeurs à toutes ces profondeurs, sauf celle de 701 mètres qui n'a été atteinte que par Théo MAVROSTOMOS (J 18). L'enregistrement réalisé à cette profondeur maximale est en tous points comparable à ceux réalisés à 675 et 650 mètres chez le même plongeur.

Tous les ECG en caisson ont été enregistrés et analysés grâce à un appareil MARQUETTE de type MAC PC 12 SL. La conception de cet appareil a permis d'une part, l'obtention d'un tracé de qualité parfaite, du à la digitalisation et au filtrage du signal, et d'autre part une analyse fine de la durée et de l'amplitude de toutes les activités électriques, ainsi qu'un calcul automatique des différents angles des axes électriques.

Les dérivations utilisées ont été les douze dérivations classiques de l'ECG : 3 dérivations bipolaires (DI, DII, DIII) et 9 unipolaires (aVR, aVL, aVF, et V1 à V6).

Trois résultats ont particulièrement marqué cette étude :

1° - La fréquence cardiaque (fig. 1)

Il existe une bradycardie initiale retrouvée dès J2, à 2 ATA. Cette bradycardie s'adapte durant le séjour en pression, pour revenir, vers J 40, aux valeurs de référence.

La corrélation avec le temps est alors statistiquement significative (p), avec une pente ascendante (a), chez les trois plongeurs : (P1 : a=0,359 ; p=0,359 / P2 : a=0,779 ; p=0,0001 / P3 : a=0,561 ; p=0,0025).

A aucun moment il ne semble exister un lien entre la densité ou la qualité du mélange respiratoire et la fréquence cardiaque. L'introduction et le retrait progressif de l'Hydrogène restent sans influence.

La bradycardie très significative retrouvée dès J2 semble être la conséquence de l'hyperoxie du mélange respiratoire (0,4 ATA), dès le début de la compression.

La disparition progressive de cette bradycardie est corrélée avec le temps. Elle peut évoquer deux hypothèses : une altération progressive de l'hématose sanguine, ou une altération progressive du transport ou de l'utilisation de l'oxygène en périphérie.

2° - L'étude des axes électriques

Ceux-ci ont été mesurés uniquement dans le plan frontal.

* S'il n'existe pas de variation significative de l'angle de l'axe du QRS chez les trois plongeurs pendant cette plongée, on enregistre une augmentation (verticalisation) de l'angle de l'axe de T en fonction de la densité du mélange respiratoire. Cette corrélation est hautement significative chez chacun des trois plongeurs (fig. 2) : (P1 : a=2,30 ; p=0,013 / P2 : a=2,99 ; p=0,0011 / P3 : a=3,22 ; p=0,0054).

L'axe QRS restant stable, il y a donc un élargissement de l'angle entre l'axe T et l'axe QRS en fonction de la densité du mélange respiratoire.

L'éloignement de l'axe de T par rapport à l'axe QRS peut être interprété comme une modification de la repolarisation dont les étiologies peuvent être multiples : ischémie, surcharge..., mais aussi une diminution du gradient électrophysiologique de repolarisation entre l'endocarde et l'épicarde.

Cette modification de la repolarisation est significativement corrélée à la densité du mélange respiratoire et plaide donc pour un mécanisme en rapport avec des modifications de la pression intra-thoracique.

* Il existe une augmentation (verticalisation) de l'angle de l'axe de P pendant toute la durée de la plongée. La corrélation avec le temps est hautement significative chez chacun des trois plongeurs (p=0,0001). (fig. 3).

L'hypothèse la plus vraisemblable pour expliquer cette verticalisation de l'axe de P est une surcharge auriculaire droite.

Cette surcharge peut être due à une hyperpression, comme l'ont supposé plusieurs auteurs qui retrouvent une augmentation d'excrétion urinaire de Facteur Atrial Natriurétique (FAN). Un autre élément en faveur de cette hypothèse met en jeu une éventuelle toxicité infra-clinique des mélanges hyperoxygénés susceptible d'engendrer une augmentation minime de pression télédiastolique ventriculaire droite, expliquant un retentissement auriculaire. L'argument en faveur de cette étiologie est la régularité de la déviation axiale droite se poursuivant de manière identique pendant la phase de décompression.

Cette surcharge peut être aussi due à l'hypovolémie en rapport avec une augmentation non compensée de la diurèse déjà décrite par plusieurs auteurs en hyperbarie.

3° - Le microvoltage du tracé pendant la décompression :

Les amplitudes ont été mesurées uniquement dans le plan frontal pour éviter les variations dues aux changements de position des électrodes précordiales. Elles ont par ailleurs été corrigées en fonction des modifications des axes : l'amplitude réelle de l'onde est égale à la longueur de l'hypothénuse du triangle formé par l'axe mesuré, et sa projection orthogonale sur les dérivations de référence les plus proches.

La mesure précise des différentes ondes du tracé (fig. 4 à 6) a mis en évidence deux hypothèses :

* un trouble de l'électrogénèse : peu probable, car un tel trouble, en pratique courante, devrait s'accompagner nécessairement de manifestations cliniques majeures à type d'insuffisance cardiaque ;

* un trouble de la transmission de signal? Cette hypothèse est vraisemblablement à retenir. Mais par quel mécanisme?

Un épanchement péricardique? Vraisemblablement pas, car pour obtenir une telle diminution d'amplitude des complexes, il faudrait envisager un épanchement important, et accompagné là aussi de manifestations cliniques.

Une augmentation du volume thoracique? Cela serait le plus logique, mais nous n'avons pas actuellement d'autres éléments en faveur d'une augmentation du volume de réserve expiratoire, ou du volume résiduel.

Par ailleurs, cette augmentation de volume thoracique devrait être très dépendante des efforts ventilatoires, et donc de la densité du gaz ; or comment expliquer son apparition uniquement pendant la décompression?

La réponse à ces questions ne pourrait être obtenue qu'en pratiquant des épreuves spirométriques répétées lors d'une nouvelle plongée expérimentale, car il n'existe pas, à notre connaissance, de données à ce sujet dans la littérature, surtout pendant la phase de décompression.

Les autres observations concernant l'étude de l'ECG durant la plongée HYDRA X ne mettent pas en évidence de modifications fondamentales du tracé. Elles ont été détaillées, ainsi que les références évoquées ci-dessus, dans un rapport entièrement consacré à ce travail.

Il convient enfin de rappeler l'absence de symptomatologie cardiovasculaire chez les trois plongeurs pendant cette plongée expérimentale.

S'il existe des modifications des ECG pendant le séjour sous pression, celles-ci sont parfaitement réversibles pour les trois plongeurs d'HYDRA X avec des tracés, un mois après la sortie, comparables à ceux de référence.

CONCLUSION

Durant cette plongée expérimentale HYDRA X la surveillance cardiologique a pu être effectuée dans de bonnes conditions.

Aucun plongeur n'a présenté une symptomatologie cardio vasculaire fonctionnelle durant toute la plongée. L'adaptation cardio vasculaire est restée très satisfaisante pendant et après la plongée.

L'étude de la fréquence cardiaque note l'apparition d'une bradycardie durant la phase de compression avec un retour progressif à une fréquence cardiaque normale évoquant la mise en fonction de phénomènes régulateurs encore non définis avec précision.

L'analyse clinique de L'ECG est toujours normale. L'analyse informatique des mesures réalisées automatiquement par l'électrocardiographe fait apparaître quelques modifications :

1 - Une verticalisation de l'axe T corrélée avec la densité du mélange respiratoire évoquant donc un mécanisme en rapport avec des modifications de la pression intra-thoracique.

2 - Une verticalisation de l'onde P comme on l'observe dans les surcharges auriculaires droites.

Deux mécanismes sont évoqués mais non démontrés :

- L'augmentation de l'excrétion urinaire du facteur atrial natriurétique déjà connue.

- L'hypovolémie liée à une augmentation de la diurèse non compensée.

3 - Une diminution du voltage pendant la décompression sans explication réellement évoquée ou retenue dans l'état actuel de nos connaissances.

EPREUVES D'EFFORT EFFECTUEES AVANT
ET APRES HYDRA X

- Tableau 1 -

| | | REGIS P | SERGE I | THEO M |
|---------|----|---------|---------|---------|
| | | | | |
| FC base | Av | 73 | 59 | 72 |
| | Ap | 79 | 64 | 75 |
| | | | | |
| P. MAX | Av | 210W 3' | 270W 1' | 210W 1' |
| | Ap | 210W 2' | 240W 1' | 210W 1' |
| | | | | |
| FC MAX | Av | 176 | 179 | 189 |
| | Ap | 168 | 167 | 179 |
| | | | | |

ENREGISTREMENTS HOLTER DES 24
HEURES EFFECTUES PENDANT LA
PLONGEE

- Tableau 2 -

| | | <u>FC DIURNE</u> | <u>FC NOCTURNE</u> | <u>FC MINI</u> |
|--------------|------|------------------|--------------------|----------------|
| <u>REGIS</u> | base | 65 | 50 | 36 8H |
| | -200 | 45 | 41 | 33 5H |
| | -300 | 58 | 51 | 38 20H |
| <u>SERGE</u> | base | 70 | 58 | 39 7H |
| | -400 | 56 | 47 | 36 3H |
| | -300 | 68 | 58 | / |
| <u>THEO</u> | base | 74 | 60 | 39 21H |
| | -300 | 60 | 50 | 38 1H |
| | -300 | 65 | 53 | / |

| Temps | Pres. (ATA) | Dens. (g/l) | Mélange |
|-------|-------------|-------------|------------------------|
| J -2 | 1 | 1,18 | Air |
| J 2 | 2 | 1,54 | Heliox |
| J 4 | 31 | 5,39 | Hydreliox (PpH2: 10) |
| J 6 | 43,5 | 6,60 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 7 | 46 | 7,00 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 9 | 51 | 7,80 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 11 | 56 | 8,60 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 13 | 62,8 | 9,70 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 15 | 68,5 | 10,61 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 17 | 66 | 10,21 | Hydreliox (PpH2: 19,3) |
| J 20 | 65 | 10,10 | Hydreliox (PpH2: 19) |
| J 23 | 55 | 8,62 | Hydreliox (PpH2: 16) |
| J 26 | 46,4 | 7,35 | Hydreliox (PpH2: 13,5) |
| J 35 | 21 | 4,40 | Heliox |
| J 40 | 6 | 2,21 | Heliox |
| J 67 | 1 | 1,18 | Air |

TABLEAU 3: Dates et conditions de mesures des ECG pendant HYDRA X

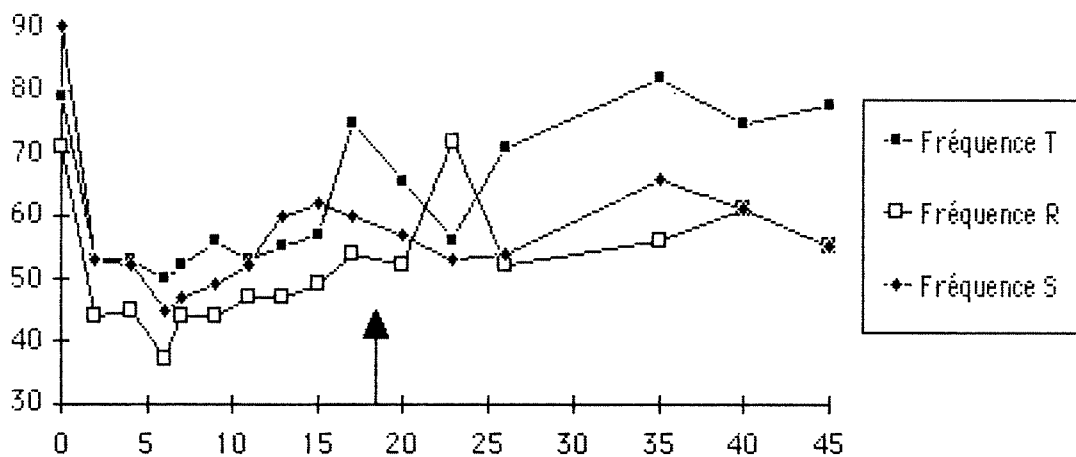


FIG 1: Valeurs de la fréquence cardiaque (en systoles/min), mesurée chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.

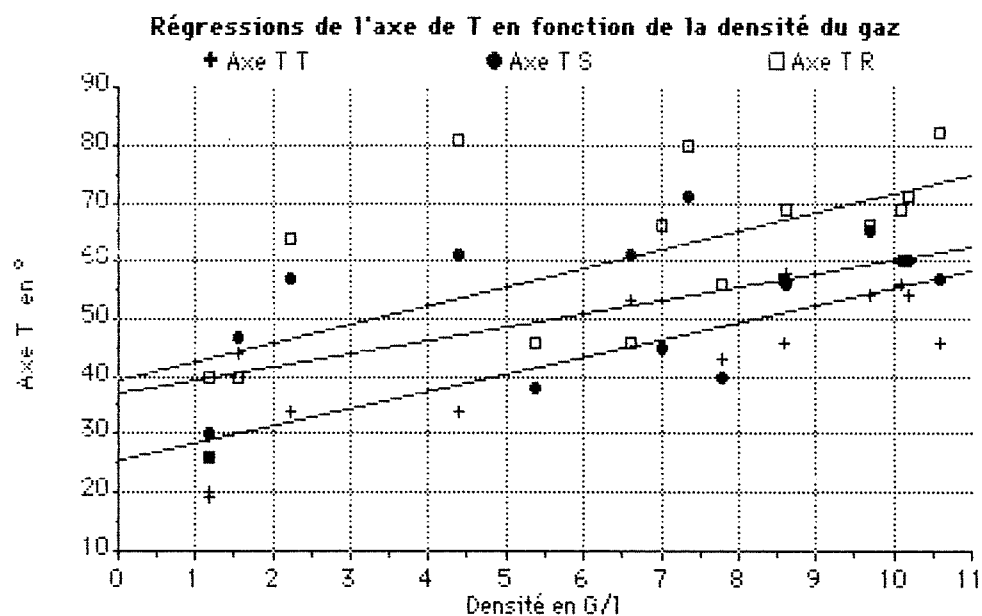


FIG 2: Valeurs de l'angle de l'axe de T (en Degré), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).

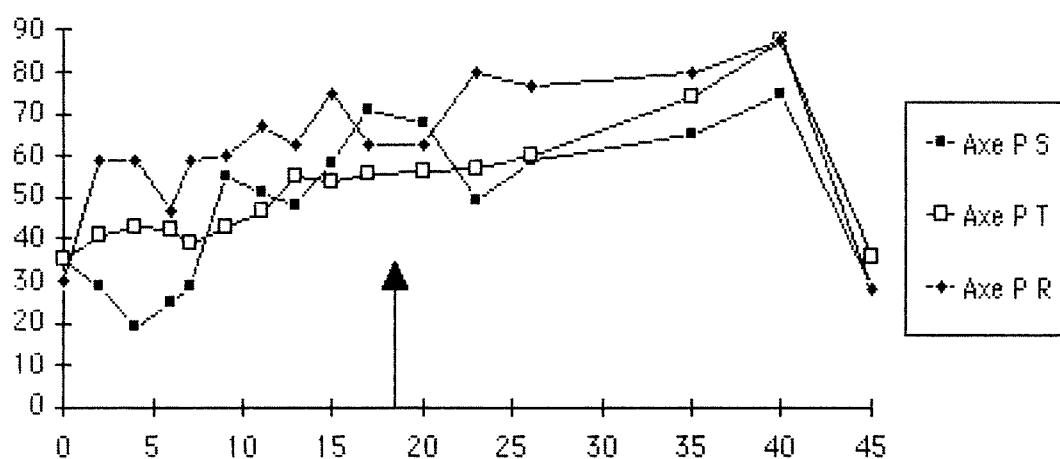


FIG 3: Valeurs de l'angle de l'axe de P (en Degré), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.

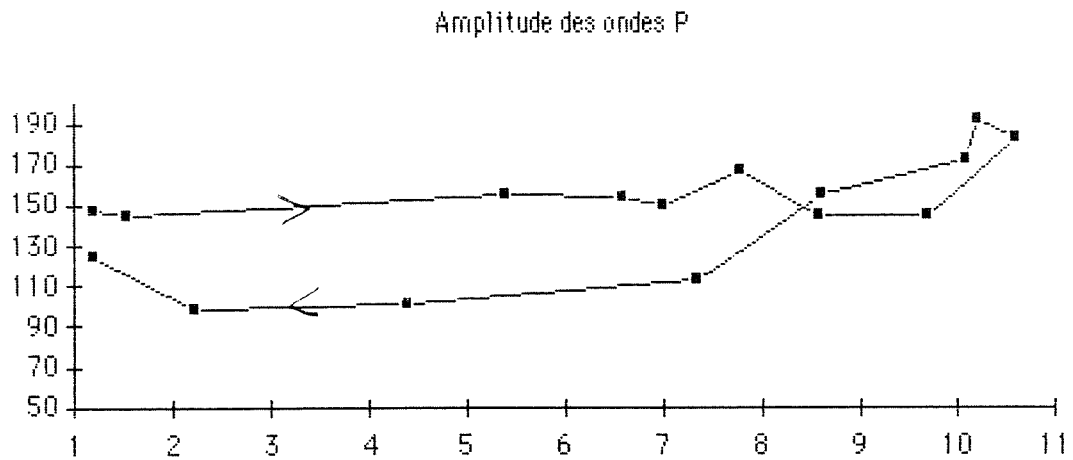


FIG 4: Valeurs de la moyenne des amplitudes des ondes P (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).

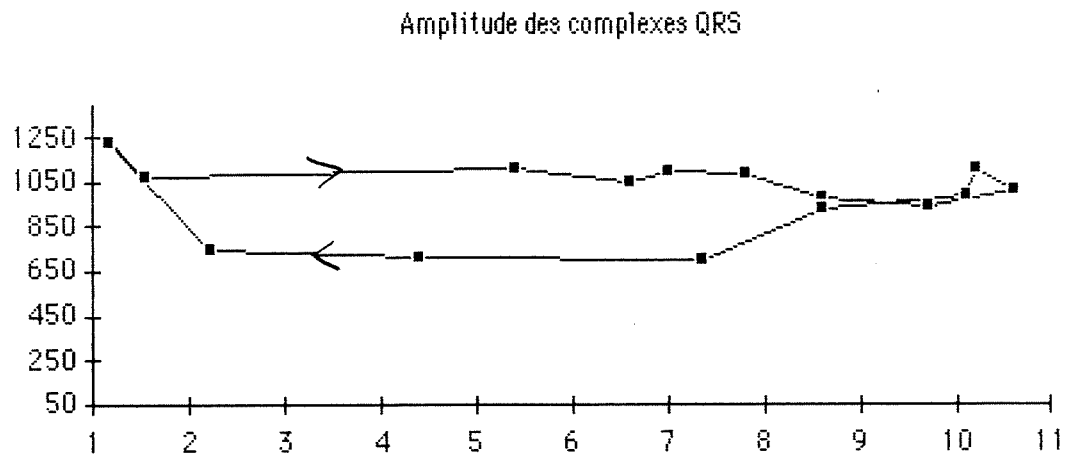


FIG 5: Valeurs de la moyenne des amplitudes des complexes QRS (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).

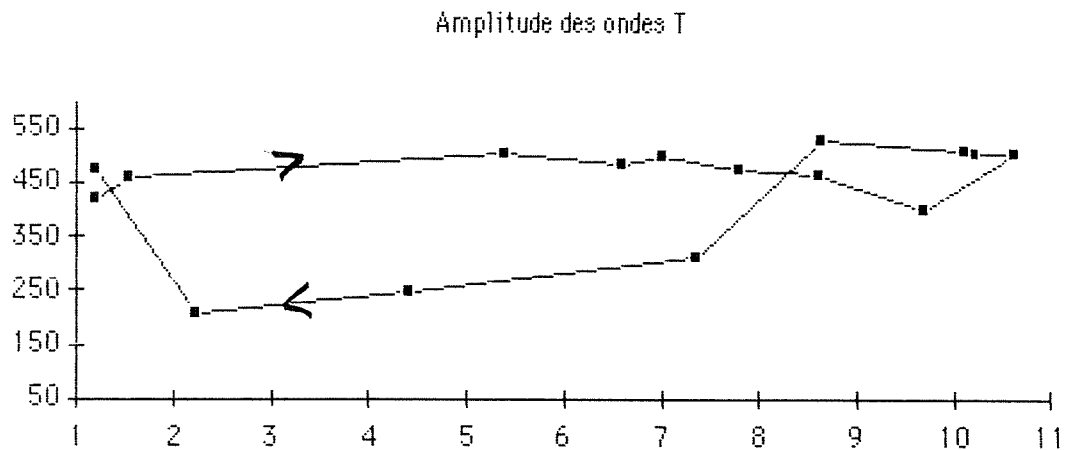


FIG 6: Valeurs de la moyenne des amplitudes des ondes T (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).

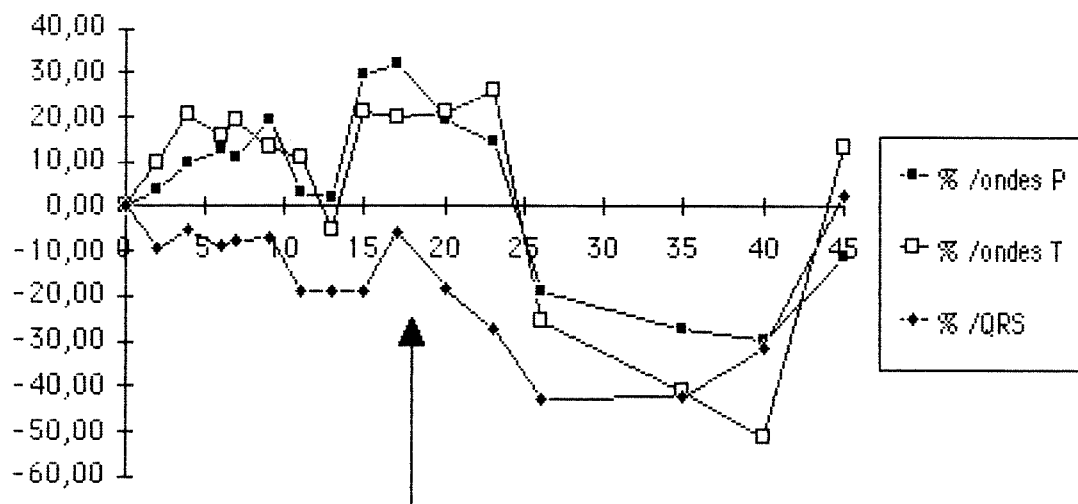


FIG 7: Moyennes des pourcentages de variation des différents complexes, mesurées chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.

ETUDE DE L'ELECTROCARDIOGRAMME LORS DE LA PLONGÉE HYDRA X

V. LAFAY*, B. COMET**

* Service des Urgences, Hôpital Nord, 13326 Marseille Cedex 15

** Polyclinique Les Alpilles, 21 rue Louis Astruc 13005 Marseille

* Direction scientifique: P. BARTHELEMY

(Laboratoire CNRS, Pr. JAMMES Faculté de Médecine, 13326
Marseille cedex 15)

1. INTRODUCTION

L'étude de l'électrocardiogramme (ECG) réalisé lors d'HYDRA X est la continuation de celle réalisée lors de la plongée précédente (HYDRA IX) par F. JOULIA et P. BARTHELEMY (8).

Les résultats de cette précédente étude ont montré:

- 1/ Une absence de modification de la fréquence cardiaque, quel que soit le mélange respiratoire utilisé.
- 2/ Une augmentation de l'amplitude des ondes T et du temps de conduction auriculo-ventriculaire, lors de la compression. Ces augmentations sont corrélées à la densité du mélange respiré, mais sont indépendantes de la nature des gaz utilisés.
- 3/ Aucune modification du temps de conduction intra-ventriculaire (durée du QRS) et du temps de repolarisation ventriculaire (durée du Q-Tc) quelles que soient la densité ou la nature des mélanges respiratoires.
- 4/ L'adjonction d'Argon (Ar) au mélange respiratoire a entraîné une bradycardie proportionnelle à la PpAr.

Le but de notre travail a donc été de vérifier ces résultats, et de les compléter par une étude plus globale et plus approfondie du tracé ECG réalisée grâce à une mesure automatique des activités électriques par méthode de moyennage. Ce progrès a permis, par ailleurs, une étude des modifications de l'axe électrique cardiaque et une approche plus systématique de la durée et de l'amplitude de chaque onde du tracé. Enfin, nous avons effectué des enregistrements répétés lors de la phase de décompression, ce qui n'avait pas été pratiqué précédemment.

2. MATERIEL ET METHODES

Les trois plongeurs: Serge ICART (P1), Théo MAVROSTOMOS (P2) et Régis PEILHO (P3) sont âgés de 39 ans. Ils sont tous les trois plongeurs professionnels et aguerris aux plongées en saturation de longue durée ainsi qu'aux plongées expérimentales.

Ils ne présentent pas d'antécédents cardio-vasculaire particuliers, et leur examen clinique et électrocardiographique est strictement normal.

Ils ont pratiqué avant et après la plongée une épreuve d'effort sur cycloergomètre dont les résultats sont décrits par ailleurs.

14 enregistrements ECG ont été pratiqués pendant la plongée. Deux enregistrements de référence (48 heures avant l'entrée en caisson et 1 mois après la sortie) ont été obtenus dans les mêmes conditions.

| Temps | Pres. (ATA) | Dens. (g/l) | Mélange |
|-------|-------------|-------------|------------------------|
| J -2 | 1 | 1,18 | Air |
| J 2 | 2 | 1,54 | Heliox |
| J 4 | 31 | 5,39 | Hydreliox (PpH2: 10) |
| J 6 | 43,5 | 6,60 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 7 | 46 | 7,00 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 9 | 51 | 7,80 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 11 | 56 | 8,60 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 13 | 62,8 | 9,70 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 15 | 68,5 | 10,61 | Hydreliox (PpH2: 20) |
| J 17 | 66 | 10,21 | Hydreliox (PpH2: 19,3) |
| J 20 | 65 | 10,10 | Hydreliox (PpH2: 19) |
| J 23 | 55 | 8,62 | Hydreliox (PpH2: 16) |
| J 26 | 46,4 | 7,35 | Hydreliox (PpH2: 13,5) |
| J 35 | 21 | 4,40 | Heliox |
| J 40 | 6 | 2,21 | Heliox |
| J 67 | 1 | 1,18 | Air |

Ces tracées ont été obtenus pour chacun des trois plongeurs à toutes ces profondeurs, sauf à celle de 701 mètres qui n'a été atteinte que par Théo NAVROSTOMOS (J 18). L'enregistrement réalisé à cette profondeur maximale, est en tous points comparable à ceux réalisés à 675 et 650 mètres chez le même plongeur.

Tous les ECG en caisson ont été enregistrés et analysés grâce à un appareil MARQUETTE de type MAC PC 12 SL. La conception de cet appareil a permis d'une part, l'obtention d'un tracé de qualité parfaite, du à la digitalisation et au filtrage du signal, et d'autre part une analyse fine de la durée et de l'amplitude de toutes les activités électriques, ainsi qu'un calcul automatique des différents angles des axes électriques.

Les dérivations utilisés ont été les douze dérivations classiques de l'ECG: 3 dérivations bipolaires (DI, DII, DIII) et 9 unipolaires (aVR, aVL, aVF et V1 à V6)

3. RESULTATS

Le premier résultat notable, et ce, chez les trois plongeurs, est l'absence de différences entre le premier tracé de référence réalisé 48 heures avant la compression, et celui réalisé 25 jours après la sortie.

Durant la plongée, nous avons observé:

3.1. La fréquence cardiaque

Il existe une bradycardie initiale retrouvée dès J2, à 2 ATA.

Cette bradycardie adapte durant le séjour en pression, pour revenir, vers J 40, aux valeurs de référence.

La corrélation avec le temps est alors statistiquement significative (p), avec une pente ascendante (a), chez les trois plongeurs:

(P3: a=0,561; p=0,0025 / P2: a=0,779; p=0,0001 / P1 a=0,359; p=0,0085).

Enfin, si l'on observe un certain parallélisme des courbes de de fréquence chez les trois plongeurs pendant toute la période de compression, ce n'est plus le cas pendant la phase de décompression:

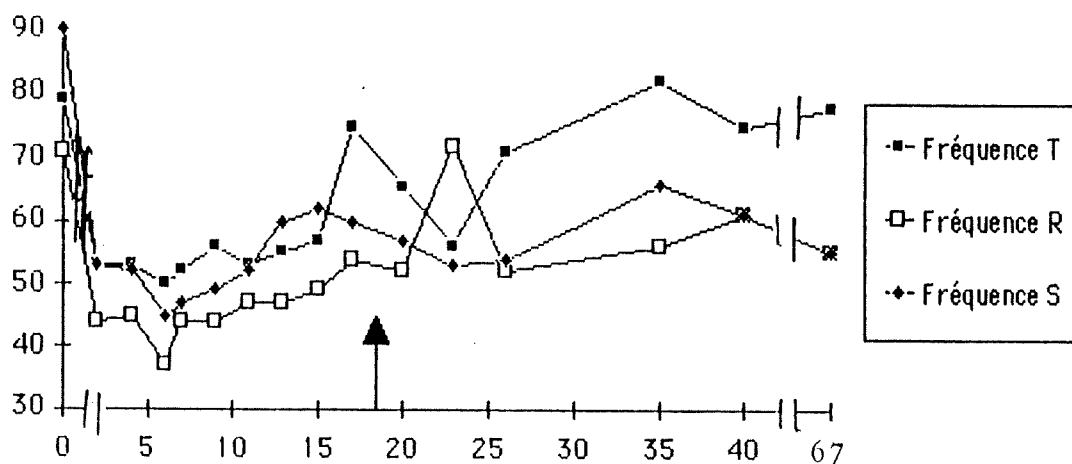


FIG 1: Valeurs de la fréquence cardiaque (en systoles/min), mesurée chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.

A aucun moment, il ne semble exister un lien entre la densité, ou la qualité du mélange respiratoire, et la fréquence cardiaque. L'introduction, et le retrait progressif de l'Hydrogène restent sans influence.

3.2. Les temps de conduction et de repolarisation

1/ Le temps de conduction auriculo-ventriculaire (espace P-R) n'est pas modifié par la densité ou la composition du mélange respiratoire.

Il existe une augmentation de cet espace avec le temps chez le plongeur P1: $a=0,899$; $p=0,0001$.

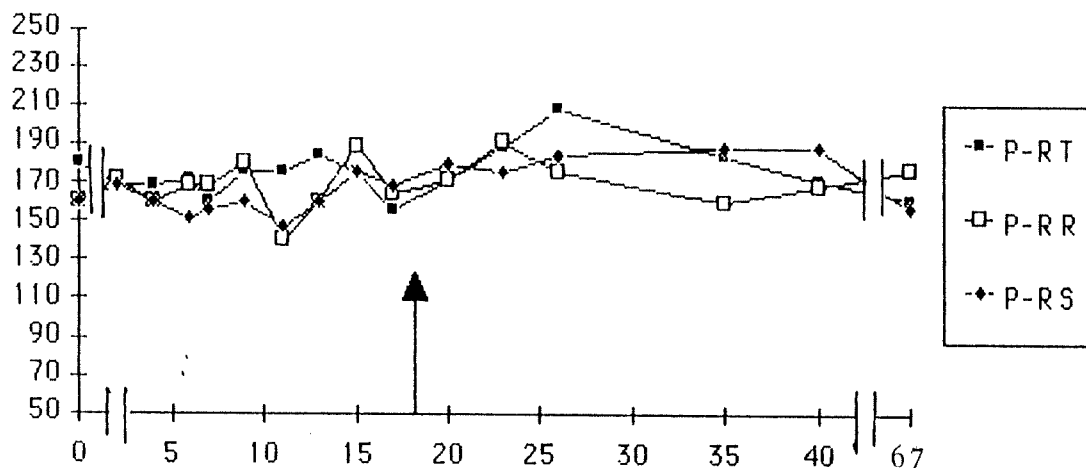


FIG 2: Valeurs de l'espace P-R (en ms), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.

2/ Le temps de conduction intra-ventriculaire (durée du QRS), et l'espace Q-T corrigé en fonction de la fréquence cardiaque (Q-Tc), ne sont pas modifiés, ni au cours du temps, ni en fonction de la densité du mélange respiratoire, ni en fonction de la composition de celui-ci.

3.3. Les axes électriques

Ceux-ci ont été mesurés uniquement dans le plan frontal.

1/ Il n'existe pas de variation significative de l'angle de l'axe du QRS chez les trois plongeurs pendant cette plongée.

2/ Il existe une augmentation (verticalisation) de l'angle de l'axe de T en fonction de la densité du mélange respiratoire. Cette corrélation est hautement significative chez chacun des trois plongeurs :

(P1:a=2,30;p=0,013 /P2:a=2,99;p=0,0011 /P3:a=3,22;p=0,0054).

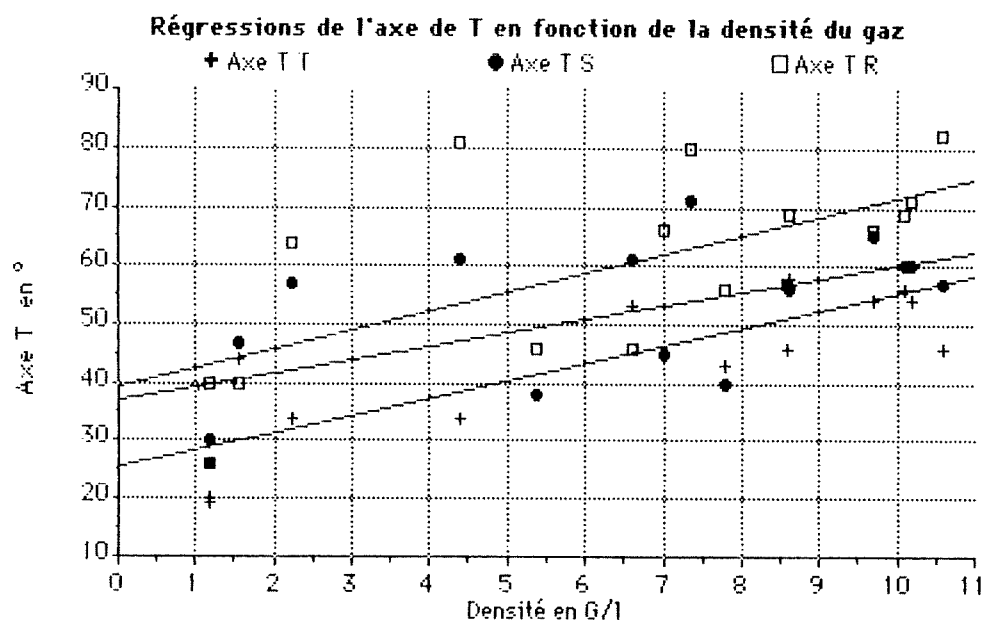


FIG 3: Valeurs de l'angle de l'axe de T (en Degré), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).

L'axe QRS restant stable, il y a donc un élargissement de l'angle entre l'axe T et l'axe QRS en fonction de la densité du mélange respiratoire.

3/ Il existe une augmentation (verticalisation) de l'angle de l'axe de P pendant toute la durée de la plongée. La corrélation avec le temps est hautement significative chez chacun des trois plongeurs ($p = 0,0001$).

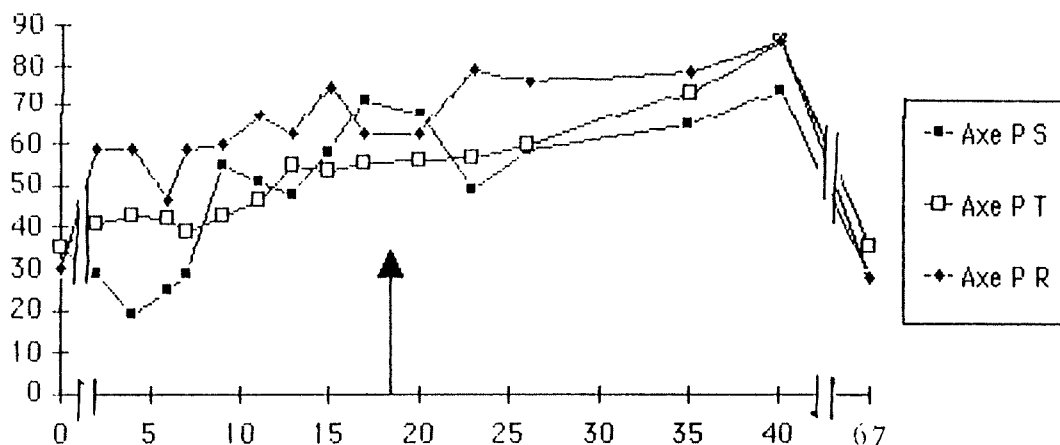


FIG 4: Valeurs de l'angle de l'axe de P (en Degré). mesuré chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.

Les pentes de variation ($P1:a=1,17$ $P2:a=1,15$ $P3:a=1,22$) sont sensiblement les mêmes pendant la compression et la décompression. Cette verticalisation de l'axe de P est donc indépendante de la densité et de la nature du mélange respiratoire.

3.4. Les amplitudes ondes P et T et du complexe QRS

Ces amplitudes ont été mesurées uniquement dans le plan frontal pour éviter les variations dues aux changements de position des électrodes précordiales.

Les mesures ont par ailleurs été corrigées en fonction des modifications des axes: l'amplitude réelle de l'onde est égale à la longueur de l'hypothénuse du triangle formé par l'axe mesuré, et sa projection orthogonale sur les dérivation de référence les plus proches.

Les résultats présentés sont donc les amplitudes maximales des ondes, puisque constamment mesurées sur leur axe électrique propre.

1/ L'amplitude des ondes P varie en fonction de la densité du mélange respiratoire:

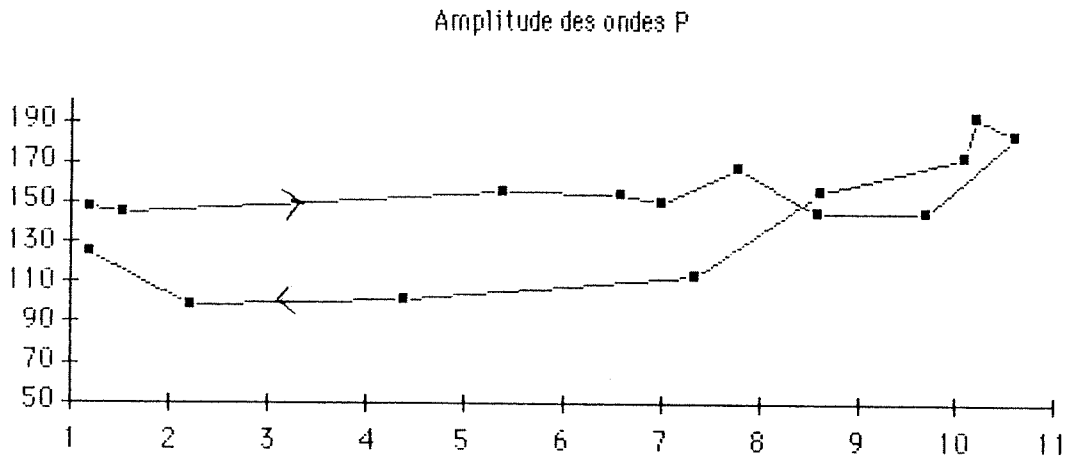


FIG 5: Valeurs de la moyenne des amplitudes des ondes P (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).

Cette amplitude est peu modifiée pendant la phase de compression, du moins jusqu'à des densités de gaz inférieures à 10g/l. Cette amplitude n'est pas modifiée par l'introduction de l'Hydrogène.

Pendant la décompression, il existe une diminution régulière de l'amplitude des ondes P, pour arriver à un microvoltage stable à partir de la zone de densité des 7g/l. Ce microvoltage a quasiment disparu lors du contrôle à un mois.

2/ L'évolution des amplitudes du complexe QRS suit un profil sensiblement identique:

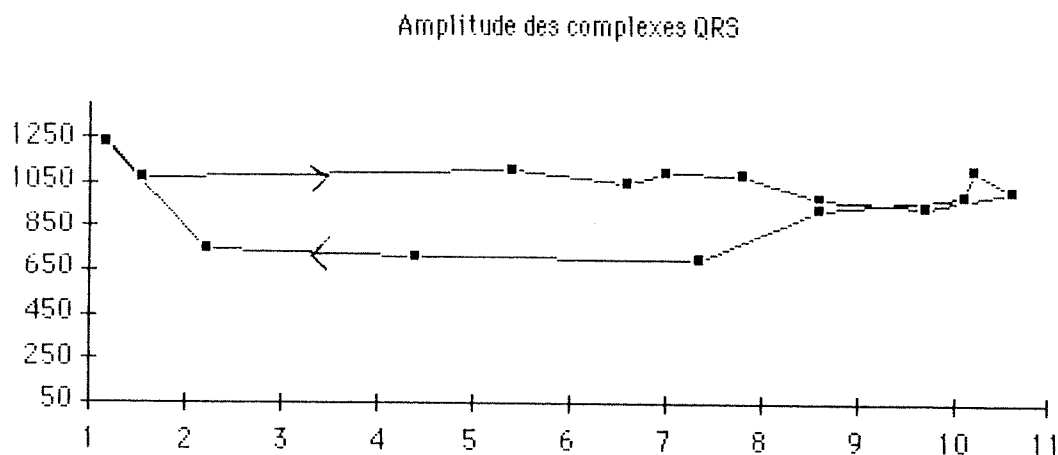


FIG 6: Valeurs de la moyenne des amplitudes des complexes QRS (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).

Il existe de même une stabilité de l'amplitude des QRS pendant la phase de compression, même si les valeurs mesurées sont légèrement inférieures à celles retrouvées à 1 ATA.

De manière similaire, il existe un microvoltage progressif débutant dès le début de la décompression, et se poursuivant jusqu'à la même zone de densité (7g/l) avant de se stabiliser à des valeurs très inférieures à celles de la compression.

3/ Enfin, le profil des amplitudes des ondes T confirme ce microvoltage en décompression:

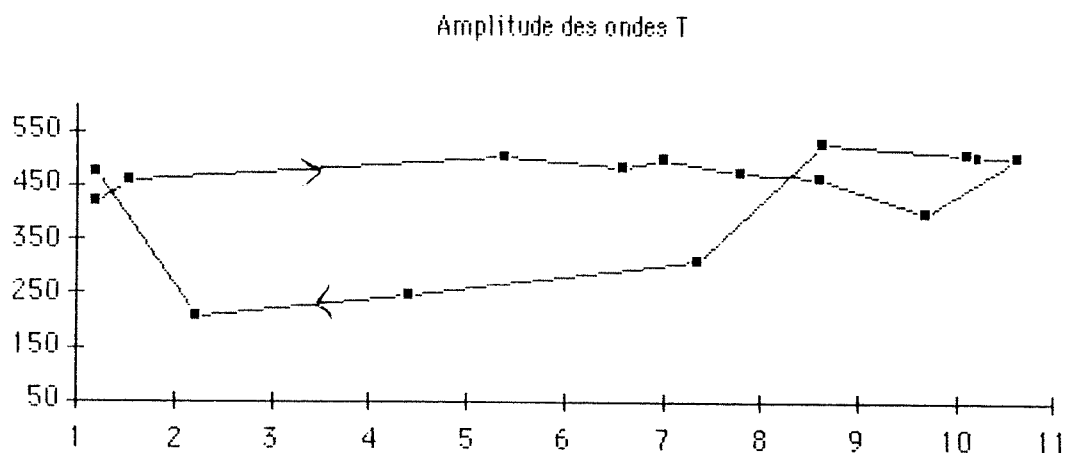


FIG 7: Valeurs de la moyenne des amplitudes des ondes T (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).

On remarque cependant comme pour les ondes P, une augmentation d'amplitude en fin de compression (densité > 10g/l). La décroissance ne se produit qu'un peu plus tard (mais dans les mêmes proportions).. à partir de 9g/l.

3.5. Le segment S-T

L'analyse du segment S-T a permis de montrer une absence de sous ou de sus décalage significatif par rapport à la ligne iso-électrique.

Les seules modifications sensibles de ce segment l'ont été sur les dérivations V1 à V4, et de manière différente chez les trois plongeurs.

4. COMMENTAIRES

4.1. La fréquence cardiaque

Comme lors de HYDRA IX (8), il n'existe pas de modification significative de la fréquence cardiaque pendant la compression. Celle-ci semble indépendante de la pression, de la densité, et de l'apport d'hydrogène dans le mélange respiratoire.

Les données de la littérature sont contradictoires à ce sujet, avec des descriptions de "bradycardie hyperbare" chez l'homme (10, 11, 3, 2, 14), ou l'absence de bradycardie significative observée lors de plusieurs plongées expérimentales humaines: Physalie V (518m), Sagittaire II (500m), Physalie VI (610m) (1) et HYDRA IX (8).

Il est intéressant de noter pour HYDRA X:

1/ Une bradycardie très significative retrouvée dès J2 qui semble être la conséquence de l'hyperoxie du mélange respiratoire (0,4ATA), dès le début de la compression.

2/ La disparition progressive de cette bradycardie est corrélée avec le temps. Elle peut évoquer deux hypothèses:

Une altération progressive de l'hématose sanguine, ou une altération progressive du transport de l'oxygène en périphérie, qui semblent appuyées par les résultats hématologiques retrouvant une augmentation de la concentration globulaire en hémoglobine à la fin du séjour en pression chez chacun des trois plongeurs.

3/ l'importante dispersion des courbes de fréquence lors de la décompression qui pourrait être la conséquence:

* de passages de bulles (non confirmées par les études Doppler).

* d'une susceptibilité individuelle accrue aux stress: la respiration en charge, la décompression, l'approche de la fin de l'expérimentation...

4.2. Les temps de conduction et de repolarisation

1/ Contrairement aux résultats d'HYDRA IX, nous n'avons pas retrouvé d'augmentation du temps de conduction auriculo-ventriculaire en fonction de la densité du mélange respiratoire.

Tout au plus, il existe ici une augmentation de l'espace P-R corrélée avec le temps chez un plongeur.

Cette notion n'est pas en accord avec les données de la littérature, mais celles-ci restent très rares et très parcellaires à ce sujet (14, 8).

Cette observation est néanmoins un argument indirect en faveur de l'absence de troubles ioniques sévères (hyper-Kaliémie ou Hyper-Calciémie importantes) chez les trois plongeurs.

2/ L'absence de modification des temps de conduction intra-ventriculaire, et de l'espace Q-Tc confirme les observations d'HYDRA IX, ces résultats sont contraires à ceux de Wilson, qui avait noté une diminution du Q-Tc.

Ceci est un deuxième argument en faveur de l'absence de dyskaliémie, ou de dyscalcémie importantes.

4.3. Les axes électriques

Il s'agit là d'une des observations les plus surprenante de cette étude. L'étude des axes électriques de l'ECG, chez l'Homme en hyperbarie, n'a, à notre connaissance, jamais été décrite dans la littérature.

1/ La stabilité de l'axe électrique du QRS est en faveur de quatre notions:

- absence de troubles de la conduction intra-ventriculaire.
- absence de variation de la position du cœur au sein du thorax.
- absence d'ischémie ventriculaire sévère.
- absence de surcharge systolique importante.

2/ L'éloignement de l'axe de T par rapport à l'axe QRS, peut être interprété comme une modification de la repolarisation dont les étiologies peuvent être multiples: ischémie, surcharge... mais aussi une diminution du gradient électrophysiologique de repolarisation entre l'endocarde et l'épicarde.

Cette modification de la repolarisation est significativement corrélée à la densité du mélange respiratoire et plaide donc pour un mécanisme en rapport avec des modifications de la pression intra-thoracique.

3/ La verticalisation de l'axe de l'onde P peut admettre de nombreuses interprétations dont trois seront éliminées:

- * variation de position des oreillettes: peu probable puisque l'axe QRS est inchangé, et que cette variation serait alors spécifique aux oreillettes et indépendante des variations de pression intra-thoracique.
- * ischémie auriculaire: peu probable, car elle ne modifierait pas cet axe de façon régulière et de manière identique chez les trois plongeurs.
- * trouble de la conduction intra-auriculaire ou pace maker ectopique: peu probable car la modification est progressive et vers la droite, alors qu'elle serait gauche en cas de trouble de la conduction.

L'hypothèse la plus vraisemblable reste une surcharge auriculaire droite.

- * Cette surcharge peut être due à une hyperpression. En faveur de cette hypothèse, plusieurs données de la littérature (7, 13) qui retrouvent une augmentation d'excrétion urinaire de Facteur Atrial Natriurétique (FAN) expliquant une augmentation de la diurèse lors du séjour en pression. Cette augmentation du FAN pourrait être secondaire à l'augmentation de la précharge droite due à l'augmentation de la dépression intra-thoracique inspiratoire.
- Un autre élément en faveur de cette hypothèse met en jeu une éventuelle toxicité infra clinique des mélanges hyperoxygénés (même en deça de 0,5ATA de PpO₂) décrite par Suzuki et coll. (12). Cette éventuelle toxicité pulmonaire pourrait-elle

engendrer une augmentation minime de pression télé-diastolique ventriculaire droite expliquant un retentissement auriculaire? L'argument faveur de cette étiologie est la régularité de la déviation axiale droite se poursuivant de manière identique pendant la phase de décompression.

* Cette surcharge peut être due à une modification de la volémie.

Les données de la littérature sont en faveur d'une hypovolémie chez le plongeur en saturation. Cette hypovolémie est due à une augmentation de la diurèse, non compensée par les apports hydriques, secondaire comme nous l'avons vu à une augmentation de sécrétion du FAN mais aussi à une diminution de la vasopressine (ADH)(5, 4, 13). Hors, il a été décrit par ailleurs, des verticalisations de l'axe de P lors d'hypovolémie aiguës (6). Nous n'avons pas retrouvé de notion similaire en ce qui concerne les hypovolémies chroniques qui touchent vraisemblablement les plongeurs en saturation.

4.4. Les amplitudes des complexes

Ces variations d'amplitudes sont mieux visualisées sur le graphique suivant considérant non pas les chiffres bruts, mais les pourcentages de variation par rapport aux mesures de référence.

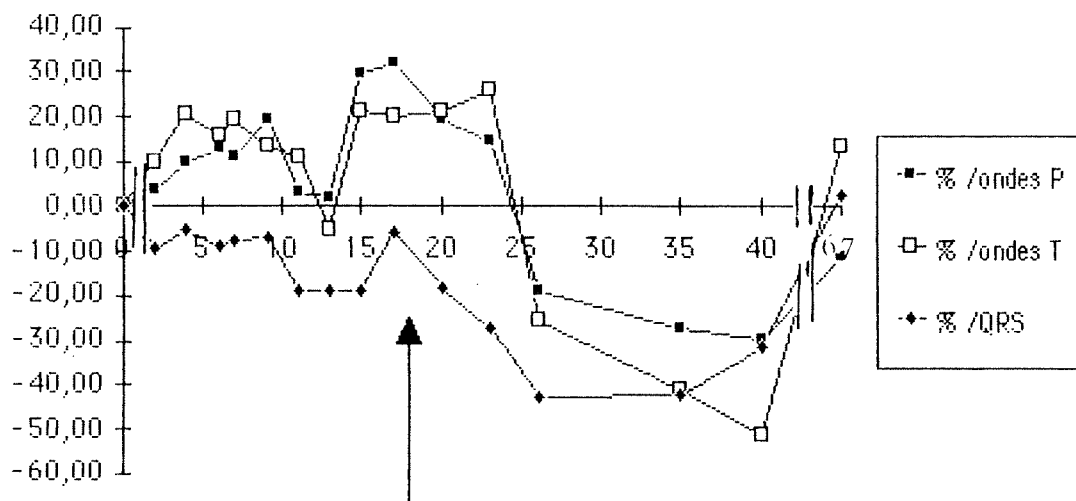


FIG 8: Moyennes des pourcentages de variation des différents complexes, mesurés chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.

Les deux phases, compression et décompression sont ici très distinctes:

1/ Pendant la compression:

Les profils de variations des amplitudes des ondes P et T sont similaires. Il existe une augmentation d'amplitude de ces deux signaux électriques surtout en fin de compression, pour des densités supérieures à 10 g/l. Cela rejoint partiellement les résultats d'HYDRA IX où l'amplitude de l'onde T est augmentée en fonction de la densité du gaz.

Lors d'HYDRA X, nous n'avons pas retrouvé de corrélation avec la densité du gaz. L'augmentation des amplitudes est peu significative pendant les 15 premiers jours de la compression, puis devient importante (+ 30%) pour des densités supérieures à 10 g/l.

Il ne s'agit d'ailleurs pas d'un macrovoltage du tracé, mais bien d'une augmentation d'amplitude de ces ondes P et T, puisque l'amplitude des complexes QRS est relativement stable, avec un discret microvoltage.

L'interprétation de ce phénomène peut s'intégrer dans le contexte précédemment décrit avec :

- une surcharge auriculaire droite se traduisant par une augmentation d'amplitude des ondes P au delà de 7g/l.

- un trouble de la repolarisation avec une augmentation d'amplitude des ondes T en fin de compression. Ceci étant plus en faveur d'une surcharge ventriculaire si l'on considère qu'il existe à cette phase de la plongée une dépression thoracique intermittente. Cette dépression engendre en effet une augmentation à la fois de la précharge (par augmentation du retour veineux) et de la post-charge (par augmentation du gradient thoraco-abdominal) (9).

- il n'existe pas de modification très sensible du QRS pendant la compression.

2/ Pendant la décompression :

Il existe un microvoltage global du tracé. Celui ci est important avec des valeurs d'amplitude diminuées de près de 50% par rapport aux valeurs de référence.

Il est stable dès que la densité du gaz est redescendue en dessous de 8 g/l.

Ce microvoltage touche directement le complexe QRS et l'onde P, avec une décroissance des amplitudes dès le début de la décompression, et secondairement l'onde T, après disparition des phénomènes retrouvés au delà de 8 g/l.

Le microvoltage des ondes P reste cependant un peu moins important, peut être en rapport avec la persistance de la modification de l'axe de P (persistance de la surcharge OD?).

L'interprétation de ce microvoltage est très difficile, mais doit évoquer deux hypothèses :

- * un trouble de l'électrogénèse: peu probable, car un tel trouble, en pratique courante devrait s'accompagner nécessairement de manifestations cliniques majeures à type d'insuffisance cardiaque.

- * un trouble de la transmission du signal? Cette hypothèse est vraisemblablement à retenir. Mais par quel mécanisme?

Un épanchement péricardique? Vraisemblablement pas, car pour obtenir une telle diminution d'amplitude des complexes, il faudrait envisager un épanchement important, et accompagné là aussi de manifestations cliniques.

Une augmentation du volume thoracique? Cela serait le plus logique, mais nous n'avons pas actuellement d'autres éléments en faveur d'une augmentation du volume de réserve expiratoire, ou du volume résiduel.

Par ailleurs, cette augmentation de volume thoracique devrait être très dépendante des efforts ventilatoires, et donc de la densité du gaz; or comment expliquer son apparition uniquement pendant la décompression?

La réponse à ces questions, ne pourrait être obtenue qu'en pratiquant des épreuves spirométriques répétées lors d'une nouvelle plongée expérimentale, car il n'existe pas, à notre connaissance de données à ce sujet dans la littérature, surtout pendant la phase de décompression.

5. EN CONCLUSION

Il s'agit de la première étude systématique des modifications de l'ECG lors d'une plongée expérimentale humaine.

Cet travail a permis de mettre en évidence des modifications des tracés ECG pendant la phase de compression, mais aussi pendant la décompression.

Les éléments nouveaux apportés par cette recherche sont:

1/ une déviation axiale droite de l'onde P, corrélée avec le temps d'exposition.

2/ une dissociation de l'axe de l'onde T par rapport à celui du QRS, avec déviation axiale droite de l'onde T corrélée avec la densité du mélange respiratoire.

3/ un microvoltage franc pendant la phase de décompression.

Par ailleurs se confirme la notion d'une augmentation d'amplitude des ondes T pour de fortes densités de mélange respiratoire. Les résultats obtenus lors d'HYDRA X ont mis en évidence une augmentation similaire d'amplitude des ondes P dans les mêmes circonstances.

La présence de trois plongeurs ne permet évidemment pas d'analyse statistique, en dehors du suivi, pour chaque plongeurs des différents tracés avec le temps.

Il est quand même remarquable de constater que les modifications décrites sont retrouvées dans tous les cas pour les trois plongeurs, dans le même sens, et dans des proportions comparables. Les interprétations proposées sont purement spéculatives, et doivent bien sur être confrontées avec d'autres lors de plongées ultérieures.

Il convient de rappeler enfin l'absence de symptomatologie cardio-vasculaire chez les trois plongeurs pendant cette plongée expérimentale.

S'il existe des modifications des ECG pendant le séjour sous pression, celles-ci sont parfaitement réversibles, pour les trois plongeurs d'HYDRA X, avec des tracés un mois après la sortie, comparables à ceux de référence.

BIBLIOGRAPHIE

1. BERGONZI M., 1973. Etude du comportement de l'appareil cardio-vasculaire dans la plongée profonde à saturation, réactions au travail musculaire de l'homme soumis à ces conditions. Thèse de médecine, Paris.
2. BRADLEY ME., ANTHONISEN NR., VOROSMARTI J., LINAWEAVER PG., 1971. Respiratory and cardiac responses to exercise in subjects breathing helium-oxygen mixtures at pressures from sea level to 19,2 atmospheres. CJ. LAMBERTSEN éditeur New York. Underwater Physiol. : 325-337.
3. BÜHLMANN AA., MATTHYS H., OVERRATH G., BENNETT PB., ELLIOTT DH., GRAY SP., 1970. Saturation exposures at 31 ATA in an oxygen-helium atmosphere with excursions to 36 ATA. Aerosp. Med., 41: 394-403.
4. CLAYBAUGH JR., MATSUI N., HONG SK., PARK YS., NAKAYAMA H., SHIRAKI K., 1987. Seadragon VI: a 7-day dry saturation dive at 31 ATA III. Alterations in basal and circadian endocrinology. Undersea Biomed. Res., 14: 401-411.
5. GOLDINGER JM., HONG SK., CLAYBAUGH JR., NIU AKC., GUTMAN SI., MOON RE., BENNETT PB., 1992. Renal responses during a dry saturation dive to 450 msw. Undersea Biomed. Res., 19: 287-293.
6. HARARI A., NITENBERG G., RAPIN M., SAMII K., LEMAIRE F., LE GALL JR., 1975. Chocs hypovolémiques simulant une embolie pulmonaire grave. Nouv. Presse Med., 4: 153-157.

7. HEBDEN RA., FREUND BJ., CLAYBAUGH JR., ICHIMURA WM., HASHIRO GM., 1992. Effect of inspiratory-phase negative pressure breathing on urine flow in man. *Undersea Biomed. Res.*, 19: 21-29.
8. JOULIA F., BARTHELEMY P., GUERRERO F., JANNES Y., 1992. T wave changes in humans and dogs experimental dives. *J. Appl. Physiol.*, 73: 0-05.
9. PETERS J., FRASER C., STUART RS., BAUMGARTBER W., ROBOTMAN JL., 1989. Negative intrathoracic pressure decreases independently left ventricular filling and emptying. *Am. J. Physiol.*, 257: H120-H131.
10. RAYMOND LW., BELL WH., BONDI KR., LINDBERG CR., 1968. Body temperature and metabolism in hyperbaric helium atmosphere. *J. Appl. Physiol.*, 24: 678-684.
11. SALZANO J., RAUSCH DC., SATZMAN HA., 1970. Cardiorespiratory responses to exercise at a simulated seawater depth of 1000 feet. *J. Appl. Physiol.*, 28: 34-41.
12. SUZUKI S., IKEDA T., HASHIMOTO A., 1991. Decrease in the single-breath diffusing capacity after saturation dives. *Undersea Biomed. Res.*, 18: 103-109.
13. TAO HY., CHEN HJ., ZHANG H., GUO J., RONG FK., 1992. Urinary ANP, ADH, and electrolyte excretion during saturation-excursion diving to pressures equivalent to 250 and 300 m. *Undersea Biomed. Res.*, 19: 159-169.
14. WILSON JM., KLIGFIELD PD., ADAMS GM., HARVEY C., SCHAEFER KE., 1977. Human ECG changes during prolonged hyperbaric exposures breathing N₂-O₂ mixtures. *J. Appl. Physiol.*, 42: 614-623.

MONITORAGE CARDIO-VENTILATOIRE PENDANT HYDRA 10

J. MEDELLI*, B. BOUFERRACHE*, H. JULLIEN*,
M. LAMBERT*, P. DORMOKRAY*
M. COMET**, J.Y. MASSIMELLI**, B. GARDETTE**

* AMIENS Université de Picardie

** COMEX S.A. Marseille

Amener des hommes à 700 m de profondeur constitue une formidable aventure technologique et humaine. Mais encore faut-il que cette expérience se déroule sans risques majeurs pour les sujets soumis à cette pression considérable et aux concentrations gazeuses utilisées. La fonction cardio-respiratoire est largement impliquée dans les processus d'homéostasie et il importe donc d'en étudier les paramètres avec précision afin de dépister à temps tout désordre majeur qui mettrait en jeu ses mécanismes d'adaptation et entraînerait un risque léthal. D'autre part tout ceci ne servirait à rien si l'homme se retrouvait dans des conditions de vie se rapprochant de l'état neuro-végétatif. L'intérêt est de prouver que l'homme est capable de vivre normalement ou du moins de pouvoir exercer une activité physique compatible avec les conditions de travail habituelles rencontrées par les plongeurs à des profondeurs moindres. D'où l'importance de disposer d'un système de monitoring cardio-respiratoire le plus fiable possible compte-tenu des conditions expérimentales et de tenter de simuler de manière spécifique le geste du plongeur au cours de son activité professionnelle.

I. MATERIEL

Habituellement, la réalisation de tests d'effort dans les laboratoires de physiologie s'effectue sur des ergomètres dont on peut calibrer la puissance développée en Watts ou en Kg/m/mn. Les ergocyclomètres à frein mécanique ou électromagnétiques sont les plus couramment utilisés. Lors des opérations HYDRA précédentes, l'étude de l'adaptation cardio-respiratoire à l'exercice musculaire avait été réalisée sur ergocyclomètre à l'intérieur du caisson et dans les conditions à sec. Dans les conditions expérimentales d'immersion dans l'eau, la réalisation d'un ergomètre à bras reposant sur le principe de soulever des poids sur une hauteur donnée a permis d'effectuer des efforts quantifiés. Cependant, il apparaît que ces conditions expérimentales présentent plusieurs inconvénients :

- encombrement de l'ergocyclomètre à l'intérieur du caisson limitant ainsi l'espace vital des plongeurs,
- réalisation d'efforts de pédalage avec les membres inférieurs n'ayant aucun rapport avec les mouvements et l'activité physique professionnelle spécifique des plongeurs,
- utilisation d'un ergomètre différent pour les conditions d'immersion dans l'eau, mettant en jeu des masses musculaires différentes (membres supérieurs) rendant ainsi illusoire les comparaisons expérimentales entre les efforts à sec et dans l'eau.

Toutes ces raisons nous ont conduit à réaliser un ergomètre d'encombrement minimal, utilisable aussi bien à sec que dans l'eau et essayant au maximum de reproduire le geste spécifique du plongeur au cours de ses activités professionnelles au fond de l'eau.

1) ERGOMETRE A BRAS

Le principe est basé sur la manoeuvre alternative dans une amplitude angulaire d' un radian (environ 57°) d' un levier de longueur 0,40 m entraînant un limiteur de couple taré à une valeur donnée (couple compris entre 15 et 150 Nm).

La manoeuvre alternative est obtenue par un dispositif à cliquet dont on peut inverser le sens. Le travail s'effectue donc pendant une course articulaire correspondant au mouvement spécifique du bras lors du travail en plongée (serrage d' éléments filetés, manoeuvre de tirfor, etc...).

L' ensemble peut être replié et déployé sans aucun outillage annexe de façon à minimiser l'encombrement au sein du caisson et à permettre un usage aussi bien par des sujets droitiers ou gauchers.

L' ensemble peut être fixé sur une platine solidaire de la paroi du caisson également sans outillage annexe.

Dans cette première génération d'ergomètre spécifique, le tarage du limiteur de couple ne peut être modifié pendant l'épreuve, d' où l'intérêt de disposer de deux modules d' étalonnage différent, permutables sans outillage.

L' étalonnage est obtenu grâce à une clé dynamométrique de précision (clé FACOM) à affichage digital à capteur de force intégré.

Un dispositif de mise en équipression permet de fonctionner en milieu hyperbare et également immergé en raison de son étanchéité.

Pour un couple résistant donné, il est possible de modifier la puissance en faisant varier la fréquence de mise en action du bras de levier (Cf.diagramme).

Ex. : Effort sur la clé : 125 N

Soit un couple résistant de 50 m.N à une fréquence de 15 cycles/minute, la puissance développée est de 25 Watts.

2) PUZZLE

Le puzzle consiste à assembler des tuyaux de formes et dimensions différentes au moyen de boulons et d'écrous. Chaque pièce étant unique, le plongeur doit suivre à la lettre le plan imposé afin de réussir le montage. Le puzzle constitue le reflet réel des différentes activités du plongeur en situation de travail au fond de l'eau. La quantification exacte du travail ou de la puissance développée est par contre impossible, et l'estimation de la dépense énergétique ne peut reposer que sur une évaluation indirecte au travers du coût cardiaque.

3) MONITORAGE CARDIAQUE

a) électrocardiogramme de repos

Au cours d' HYDRA 10, nous avons enregistré régulièrement l'ECG de repos avec le MAC PC de la Société MARQUETTE. Electrodes des membres et de poitrine sont reliées au module indépendant AM 3 servant à digitaliser les informations; celui-ci est relié à l'un des boîtiers de connexion situé à l'intérieur du caisson et les transmissions sont effectuées hors caisson en numérique vers le MAC PC équipé de son logiciel 12 SL permettant l'aide au diagnostic. Tracés et analyses sont inscrits sur papier par enregistreur statique digital direct.

b) monitoring cardiaque

Lors des exercices musculaires au sec comme dans l'eau sur l'ergomètre à bras et

pendant les plongées lors du travail de montage/démontage du puzzle, la surveillance cardiaque a été réalisée à l'aide du moniteur série 7010 de chez MARQUETTE. Après préparation de la peau, 4 électrodes à usage unique sont fixées sur la poitrine en dérivation bipolaire CM 5 (équivalent de V5) et CM 5R (équivalent de V1). Ces électrodes sont reliées par un câble spécial connecté à l'un des boîtiers à l'intérieur du caisson et les informations sont transmises à l'extérieur au moniteur permettant de suivre en direct les dérivations choisies, les modifications éventuelles du segment ST, l'apparition de troubles du rythme et l'évolution de la fréquence cardiaque. A chaque instant il est également possible d'effectuer des enregistrements sur papier par l'intermédiaire de l'imprimante 7100 DDW.

4) MONITORAGE RESPIRATOIRE

Le monitoring de la fréquence ventilatoire a été effectué de manière indirecte en enregistrant la température des gaz lors de chaque cycle ventilatoire. Les informations émanant d'une sonde thermique à réponse rapide (YSI Thermistance) fixée au niveau du groin du casque sont transmises à l'extérieur du caisson sur une table traçante enregistrant ainsi les variations de température des gaz : air froid inspiré entraînant l'ascension du stylet, l'inverse se produisant avec l'air expiré plus chaud. Connaissant la vitesse de déroulement du papier, il est alors facile de compter les différents cycles représentant les mouvements ventilatoires.

II. RESULTATS

1) REFERENCES DE SURFACE

a) Evolution de la fréquence cardiaque lors de différentes puissances à sec :

Différents exercices d'une durée égale à 5 minutes chacun ont été réalisés sur l'ergomètre à bras pour chaque plongeur en surface et à sec, afin d'évaluer la réponse cardiaque en fonction de l'intensité de l'effort demandé (25, 35, 45 et 60 Watts).

La figure 1 montre que la fréquence cardiaque s'élève en fonction du niveau d'intensité de l'effort témoin de la validité du système. Ces mesures nous ont permis en outre de choisir, en fonction de l'avis des plongeurs, la gamme de puissance pour la suite de l'expérimentation. Il est apparu souhaitable de se limiter à la puissance de 25 Watts, ce qui peut apparaître relativement faible; cependant les différents plongeurs pensaient que cette puissance était tout à fait représentative des efforts qu'ils avaient à pratiquer dans leur activité professionnelle courante au fond de l'eau.

b) comparaison de la réponse cardiaque à sec et dans l'eau :

Les figures 2, 3 et 4 montrent chez les trois plongeurs la différence au niveau de l'évolution de la fréquence cardiaque pour un effort de 25 Watts réalisé à sec et dans l'eau : il apparaît que les conditions d'immersion sont plus exigeantes et impliquent une dépense énergétique plus importante à travail égal.

2) EFFET DE LA PRESSION (- 701 m) SUR L'ADAPTATION A L'EXERCICE

La figure 5 compare l'évolution de la fréquence cardiaque lors de l'exercice réalisé à une puissance de 25 Watts à sec en surface et à 701 m de profondeur : il existe une différence

significative de +25 pulsations à -701 m par rapport aux références de surface. Cependant, si l'on considère l'augmentation de cette fréquence cardiaque par rapport à l'état de base pré-exercice (pour éliminer l'effet de l'émotion compte-tenu du contexte), il n'y a pas de différence significative avec les références de surface (+10 en surface et +13 à -701 m). Il est à signaler que l'exercice a été stoppé au bout de 4 minutes à -701 m, non en raison de difficultés ou d'anomalies chez le sujet, mais dans le seul souci de prudence exigée par le contexte (sujet seul dans le caisson).

3) EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE DE REPOS PENDANT HYDRA 10

Les figures 6, 7 et 8 montrent l'évolution de la fréquence cardiaque de repos des trois plongeurs pendant toute la phase expérimentale depuis le début de la mise en compression (-10 m) jusqu'à la remontée en surface. Il existe une certaine similitude dans l'aspect des 3 courbes : la fréquence cardiaque atteint sa valeur minimale à -425 m pour les 3 plongeurs, remonte lentement en atteignant un premier pic lors de la phase correspondant aux pressions maximales, redescend lors du début de la décompression et remonte pour atteindre un second pic entre -500 et -400 m. Il est très difficile d'apporter une explication physiologique à ces constatations; tout au plus peut-on penser que la valeur minimale de la fréquence cardiaque correspond à la phase où la concentration en hydrogène était maximale, que le premier pic est vraisemblablement largement influencé par les conditions environnementales imposées aux 3 plongeurs (exiguïté dans le petit caisson, incidence des troubles digestifs et d'hydratation, stress et excitation de la phase finale amenant les sujets à l'objectif initialement fixé à savoir franchir la barre des 700 m) et que le second pic est vraisemblablement en rapport avec les bulles circulantes.

4) INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA FREQUENCE RESPIRATOIRE A L'EFFORT

Les figures 9 et 10 montrent les valeurs de fréquence respiratoire observées lors d'un exercice de 35 Watts sur l'ergomètre à bras en surface, lors des mesures de référence et celles observées lors du montage du puzzle à -635 m. Ces fréquences respiratoires oscillent entre 6 et 12 cycles/minute et il n'existe pas de différences significatives entre plongées de surface et plongées à différentes profondeurs.

5) MONITORAGE CARDIO-RESPIRATOIRES LORS DES PLONGEES

La figure 11 montre l'évolution de la fréquence cardiaque et de la fréquence respiratoire lors de la plongée à -580 m. L'objectif de cette plongée était le montage du puzzle qui a été réalisé en 70 minutes. Au cours de cette plongée les deux paramètres cardiaque et respiratoire ont évolué de manière identique avec une diminution progressive et constante depuis la phase d'équipement indiscutablement la plus pénible jusqu'à la remontée après la réussite du travail imposé. A aucun moment il n'existe d'anomalies et le parfait état stable de la fréquence cardiaque entre 75 et 85 pendant l'exécution du puzzle laisse à penser qu'un travail semble être possible à ces profondeurs.

La figure 12 montre l'évolution des paramètres cardio-respiratoires lors d'une plongée à -490 m. Au cours de cette plongée le sujet devait effectuer 2 exercices successifs sur l'ergomètre à bras (puissance 25 Watts) puis le démontage du puzzle réalisé par l'autre sujet au cours de la plongée à -580 m. La fréquence cardiaque est la plus élevée lors de la phase d'équipement (voisine de 130), est moins élevée pour les exercices sur ergomètre

(respectivement 115 et 110) que pour le démontage du puzzle (120); par contre la fréquence respiratoire est supérieure pour les exercices sur ergomètre (respectivement 8 et 7 de moyenne) par rapport au démontage du puzzle (état stable à 6 cycles:minute pendant les 15 minutes). La encore aucune anomalie dans l'adaptation cardio-respiratoire à l'effort, bien que le niveau de la fréquence cardiaque soit supérieure à celui du sujet ayant travaillé à -580 m.

La figure 13 montre l'évolution des paramètres cardio-respiratoires lors d'une plongée à -460 m avec comme objectif le remontage du puzzle. Celui-ci a été réalisé avec succès dans le temps record absolu de 52 minutes. Au cours de cette plongée la fréquence cardiaque, après avoir enregistré un pic à 140 en début de montage, s'est stabilisée en plateau entre 65 et 70 de moyenne alors que la fréquence respiratoire est un peu plus fluctuante (entre 8 et 10 cycles/minute avec un pic à 12 en fin de montage). Pas d'anomalie constatée au cours de cette plongée indiquant une adaptation parfaite au travail à cette profondeur.

Chez le même sujet, la figure 14 montre l'évolution de la fréquence cardiaque (moyenne et écart-type) à -145 m. Au cours de cette plongée devaient être effectués un exercice sur ergomètre (25 Watts) et un montage du puzzle. On remarque que le niveau de fréquence cardiaque est le même pour les deux types d'exercice (autour de 130 en moyenne). Par contre pour le même exercice (montage du puzzle) il existe une différence considérable par rapport à la plongée à -460 m où la fréquence cardiaque oscillait entre 65 et 70. On est en droit de penser que cette discordance est en rapport avec la présence de bulles lors de la décompression, ce qui souligne la nécessité d'éviter la pratique d'effort au cours de cette phase

III. DISCUSSION

Il serait tout à fait illusoire de vouloir tirer des conclusions scientifiques à partir de ces constatations. Le simple monitoring de la fréquence cardiaque, même si elle s'accompagne de l'étude du complexe QRS, et du cycle ventilatoire est une approche insuffisante du retentissement de la pression et des concentrations gazeuses (en particulier l'Hydrogène) sur la fonction cardiaque ou respiratoire. Notre démarche se veut plus pratique : l'homme est-il capable de travailler à de telles profondeurs et sous ce mélange gazeux sans risques, ou du moins existe-t-il des différences fondamentales dans la réalisation d'un même travail en surface et à des profondeurs comprises entre 500 et 700 m ?

Notre premier souci a donc été de tenter de nous rapprocher des conditions de travail habituelles pour évaluer la dépense énergétique, de manière indirecte au travers la fréquence cardiaque, lors de l'exécution d'exercices physiques imposés. La quantification de l'effort en terme classique de puissance en Watts ou de travail en joules est impossible lors de l'exécution du puzzle (montage ou démontage). L'évaluation classique sur ergocyclomètre de l'adaptation cardio-respiratoire à l'exercice musculaire reste l'élément de référence, mais les mouvements de pédalage avec les membres inférieurs n'ont qu'un lointain rapport avec les gestes spécifiques du plongeur lors de son activité professionnelle habituelle, sans tenir compte de l'encombrement d'un tel système dans un caisson exigü. De plus, la comparaison avec les résultats observés sur l'ergomètre à bras de la COMEX lors du travail dans les conditions de plongée dans l'eau est tout à fait aléatoire dans la mesure où l'on met en jeu des masses musculaires différentes (membres supérieurs et inférieurs), or il existe de larges différences significatives de consommation d'oxygène quand on compare l'adaptation de ces deux types d'exercice musculaire.

Devant toutes ces considérations, il nous a semblé judicieux de réaliser un prototype d'ergomètre à bras associant encombrement réduit au strict minimum, utilisation mixte au sec

comme dans l'eau, simulation du geste spécifique du plongeur dans son activité professionnelle habituelle, tant au niveau du montage que de la réalisation de l'effort. En ce sens l'avis des plongeurs s'est révélé important tant dans le mode d'utilisation que dans le choix des puissances développées. Le choix d'une puissance de 25 Watts peut apparaître sous estimé, mais l'expérience ultérieure nous a permis de constater que la dépense énergétique évaluée au travers de la fréquence cardiaque lors du montage/démontage du puzzle était comparable à celle développée lors du test sur l'ergomètre. D'autre part, cette puissance dans les conditions de référence à sec et en surface correspondait à 25% de VO_2 Max lors d'un test incrémental sur ergocyclomètre en laboratoire.

Les références de surface montrent qu'il existe une différence significative dans l'exécution d'une même charge de travail dans l'eau par rapport au sec. A puissance égale, le travail dans l'eau sollicite plus la fonction cardiaque (fréquence cardiaque supérieure de 10 à 15 pulsations/minute) pour les trois plongeurs. Ceci ne paraît pas anormal compte-tenu de l'équipement et des contraintes externes à la paroi thoracique.

L'exercice de 25 Watts à sec à 701 m de profondeur objective une élévation de 25 pulsations par rapport à la fréquence de référence en surface, mais si l'on considère l'augmentation de cette fréquence par rapport à l'état de base pré-exercice (éliminant ainsi l'influence émotionnelle due à l'excitation bien compréhensible en regard de l'évènement), il n'y a pas de différence significative avec les références de surface (+10 en surface et +13 à -701 m). Ainsi ni la pression, ni le mélange gazeux ne semble avoir d'influence sur la réponse cardiaque à l'exercice musculaire, du moins pour des niveaux de puissance relativement faibles mais correspondant au type d'activité professionnelle des plongeurs. En outre, nous n'avons constaté aucune anomalie en cours d'effort qui est resté cependant de courte durée, dans un strict souci de sécurité (le sujet étant seul dans le caisson, sans aucune aide extérieure possible en cas de problème).

L'étude de l'évolution de la fréquence cardiaque de repos pendant toute l'expérimentation s'est montrée sensiblement similaire pour les trois plongeurs : une valeur minimale à une profondeur de 425 m semblant coïncider avec la phase de concentration maximale d'hydrogène, un pic après remontée progressive en rapport vraisemblable avec le stress induit par les conditions environnementales (séjour à trois dans le petit caisson limitant considérablement les mouvements voire toute activité physique même légère, effets de la pression) et les désordres digestifs apparus à partir de 600 m (perte de l'appétit, nausées et même vomissements pour l'un des sujets) en rapport vraisemblable avec les effets de la pression, deuxième pic vers les 300 m lors de la décompression peut-être du à la présence de bulles circulantes.

En ce qui concerne les plongées effectuées respectivement à -635, 580, 490 et 460m, il est intéressant de constater que l'adaptation cardio-ventilatoire aux différents exercices imposés (ergomètre, montage et démontage du puzzle) n'a pas présenté de différence franchement significative avec les références de surface : la fréquence ventilatoire est tout à fait comparable et la fréquence cardiaque évolue même à un niveau inférieur. Aucune anomalie n'a été constatée lors des enregistrements au niveau des complexes cardiaques, laissant une impression favorable quant à la possibilité de travailler à ces profondeurs. Par contre lors de la plongée à -145 m, lors de la décompression, le niveau de fréquence cardiaque est quasiment doublé pour un même exercice; tout comme la fréquence cardiaque de repos, la présence de bulles circulantes ne doit pas être étrangère à ce phénomène, soulignant ainsi la nécessité d'éviter toute activité physique imposant un quelconque effort pendant cette phase à risques.

En conclusion, HYDRA 10 nous aura permis de réfléchir aux problèmes techniques et technologiques du monitoring cardio-ventilatoire inhérents aux conditions expérimentales, de réaliser un prototype d'ergomètre à bras visant à simuler le geste spécifique du plongeur

dans son activité professionnelle et de constater que l'adaptation cardio-ventilatoire à l'exercice musculaire semble être compatible avec une possible activité professionnelle à de telles profondeurs.

Arm Ergometer/HYDRA 10

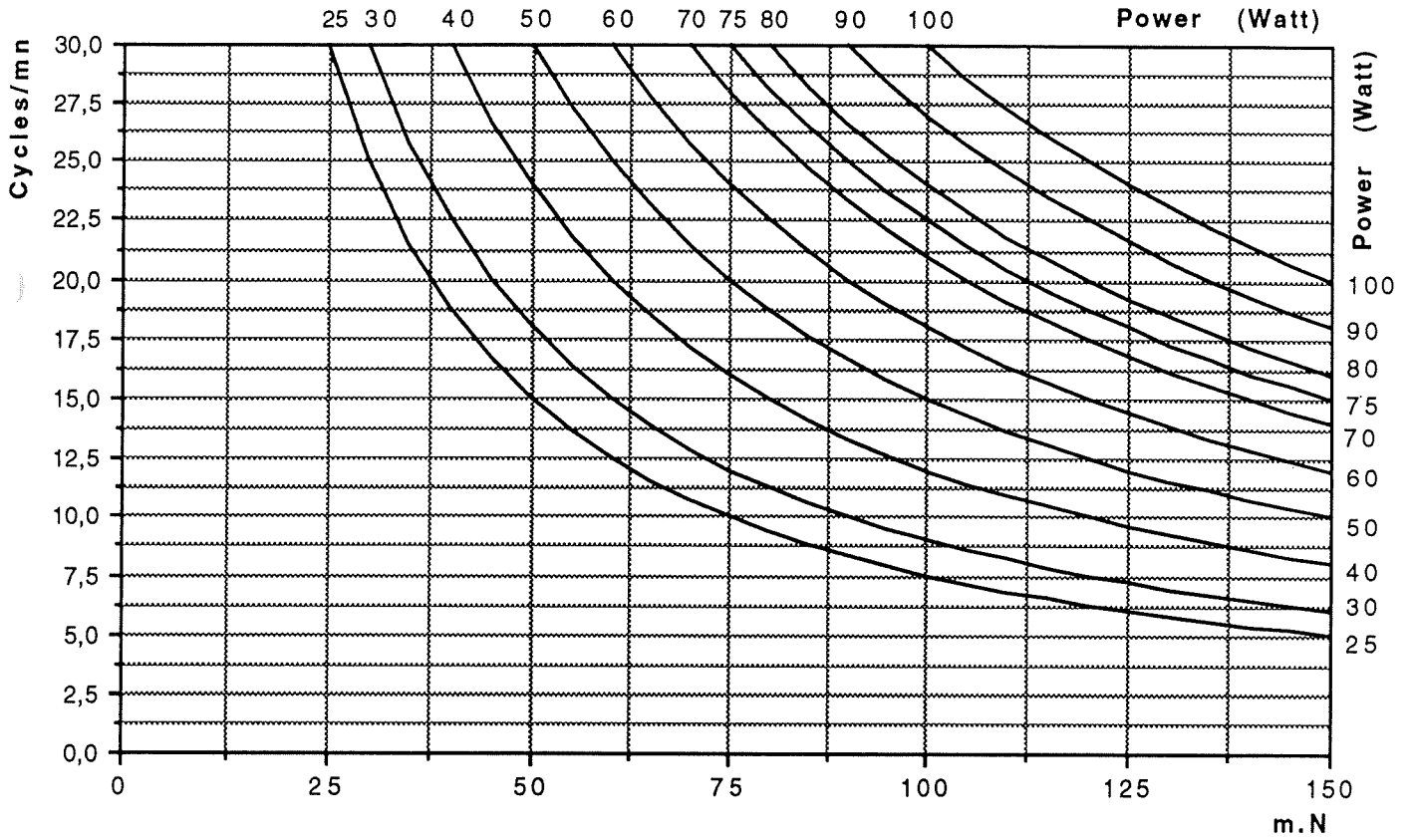


figure 1

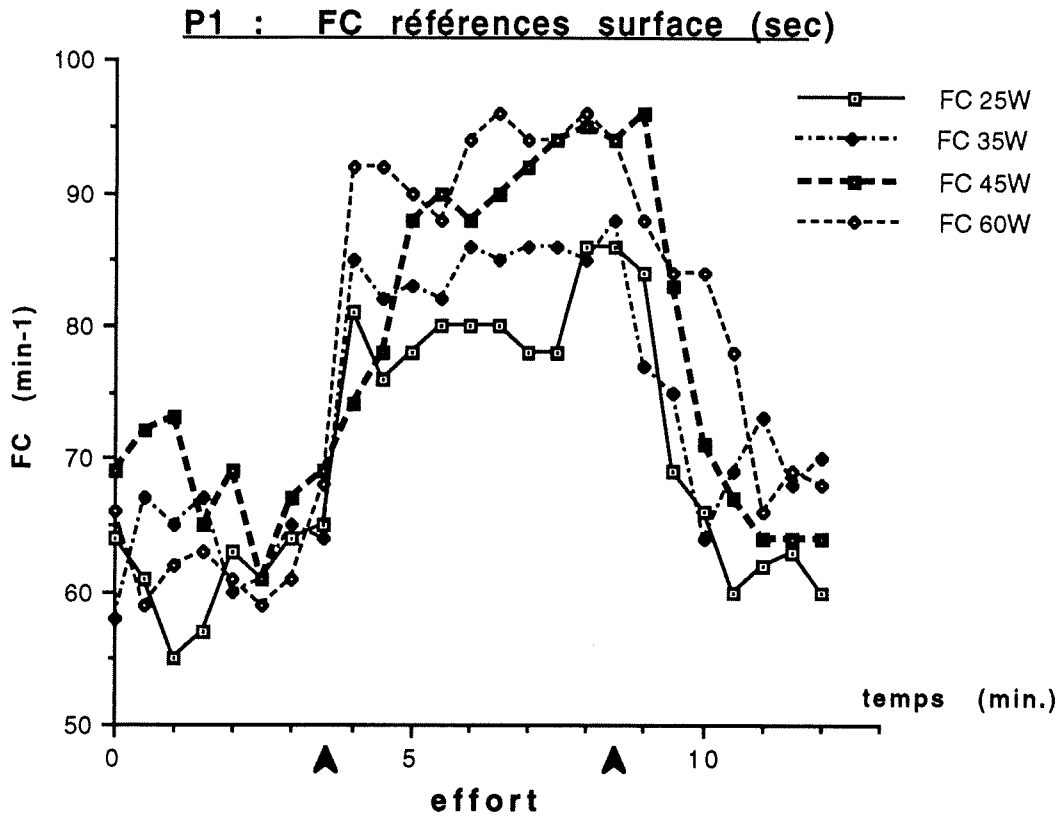


figure 2

P1: FC références surface (sec/eau)

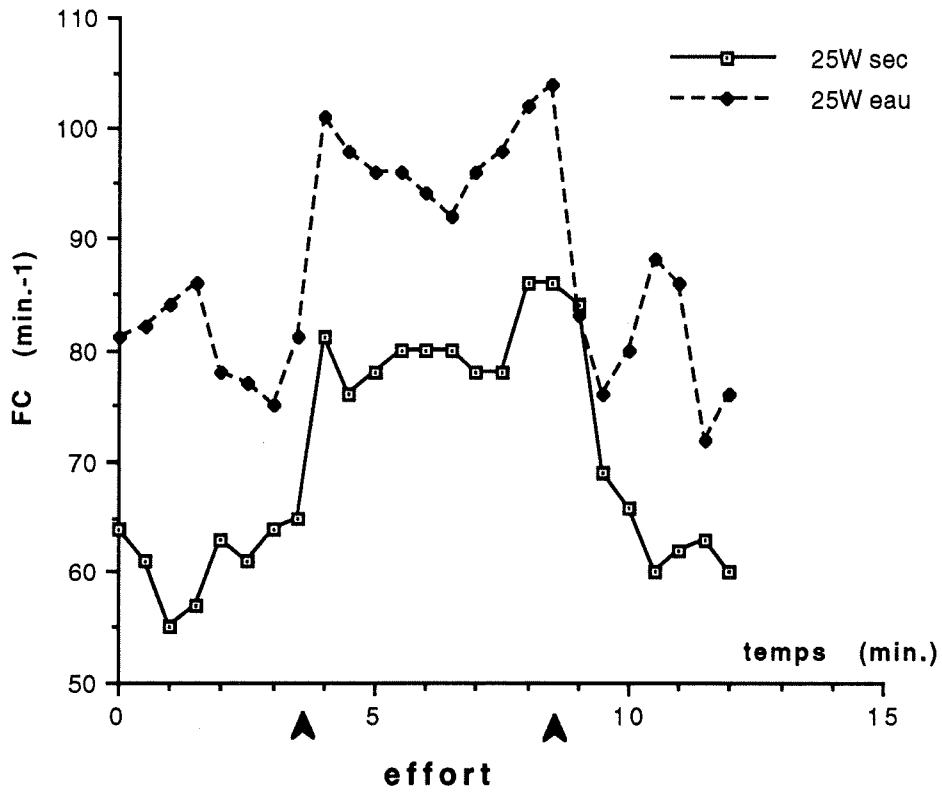


figure 3

P2 : FC références surface (sec/eau)

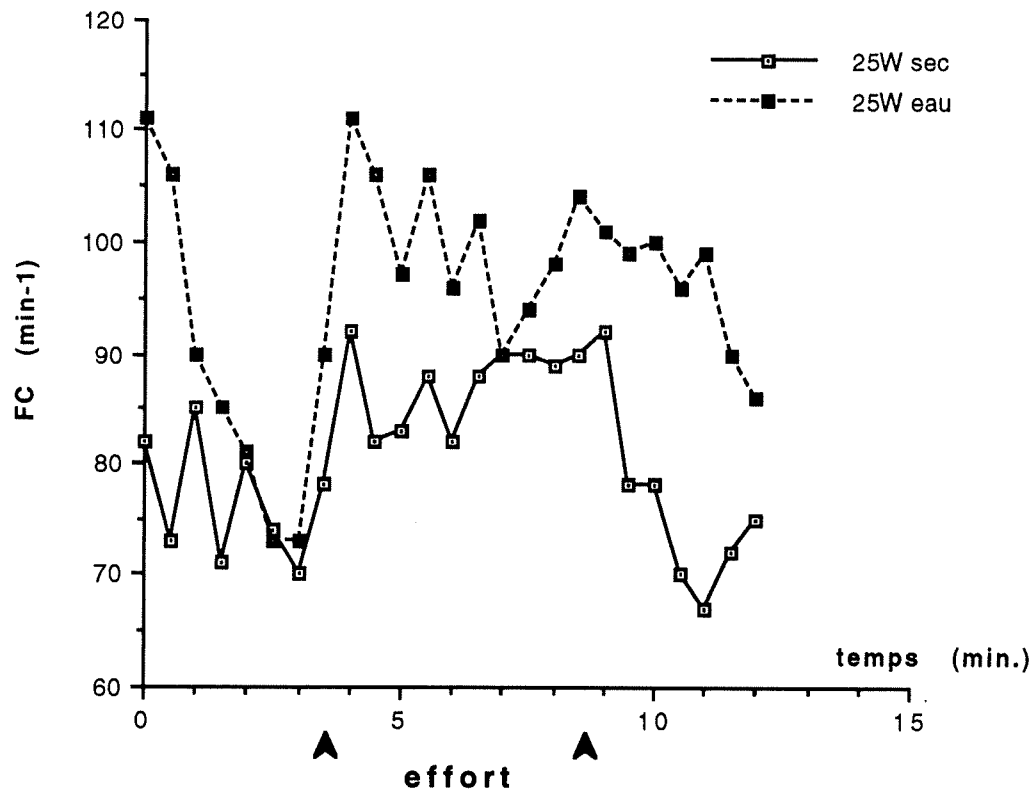


figure 4

P3 : FC références surface (sec/eau)

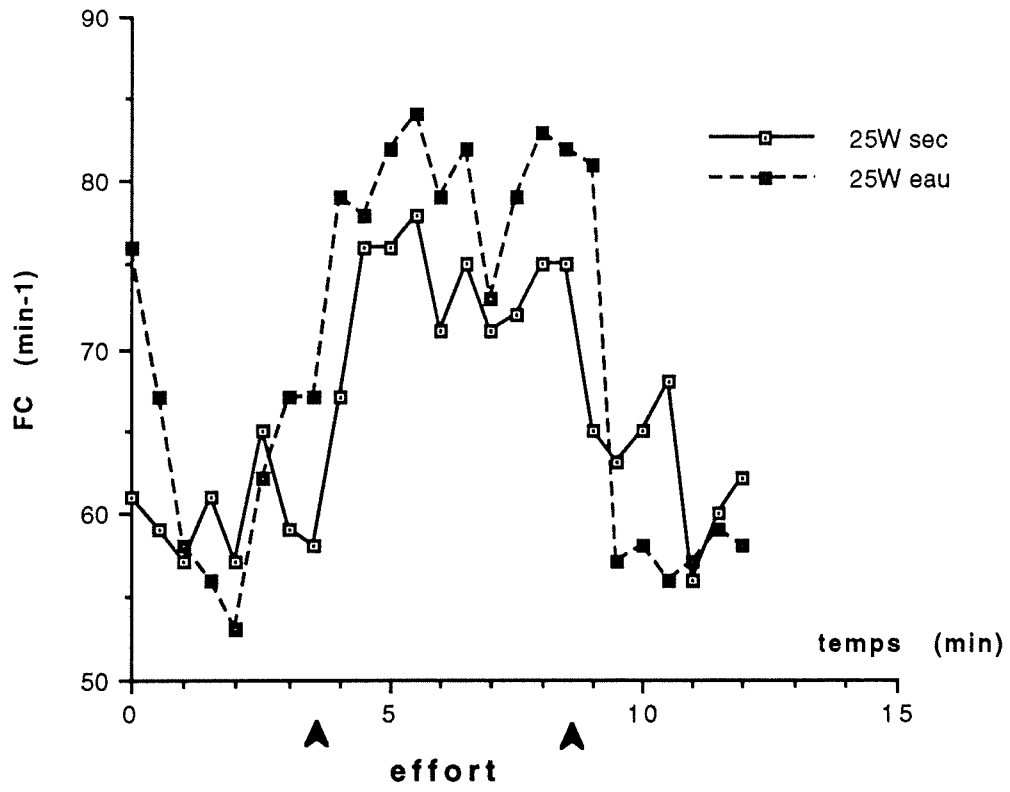


figure 5

P2 : FC surface et 701 msw (sec)

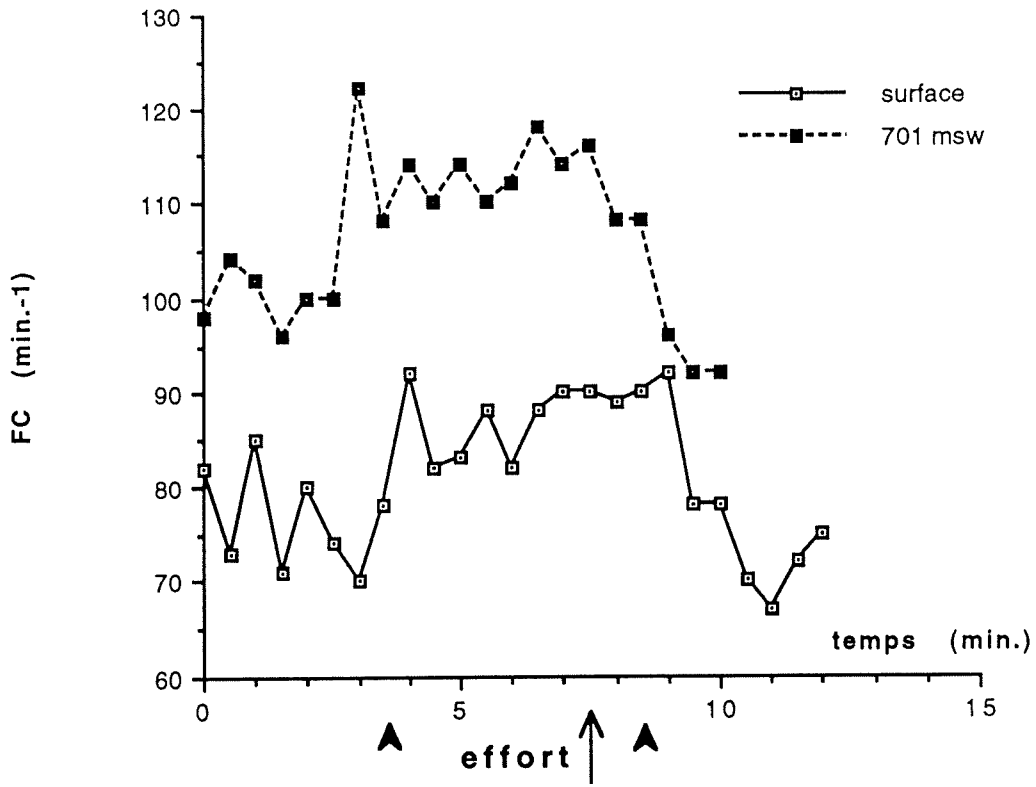


figure 6

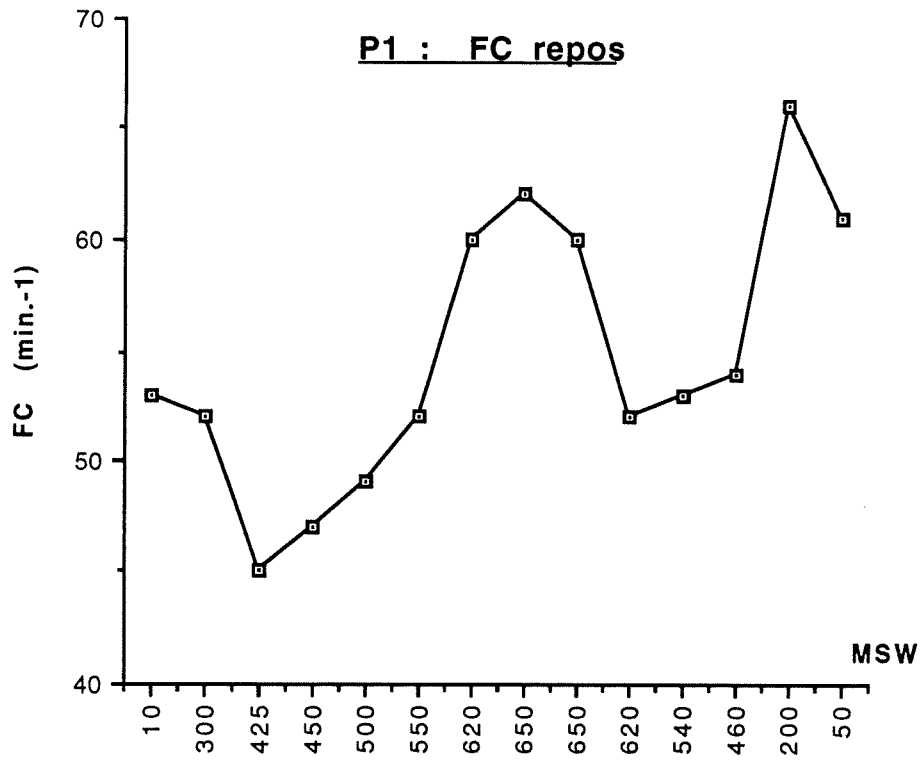


figure 7

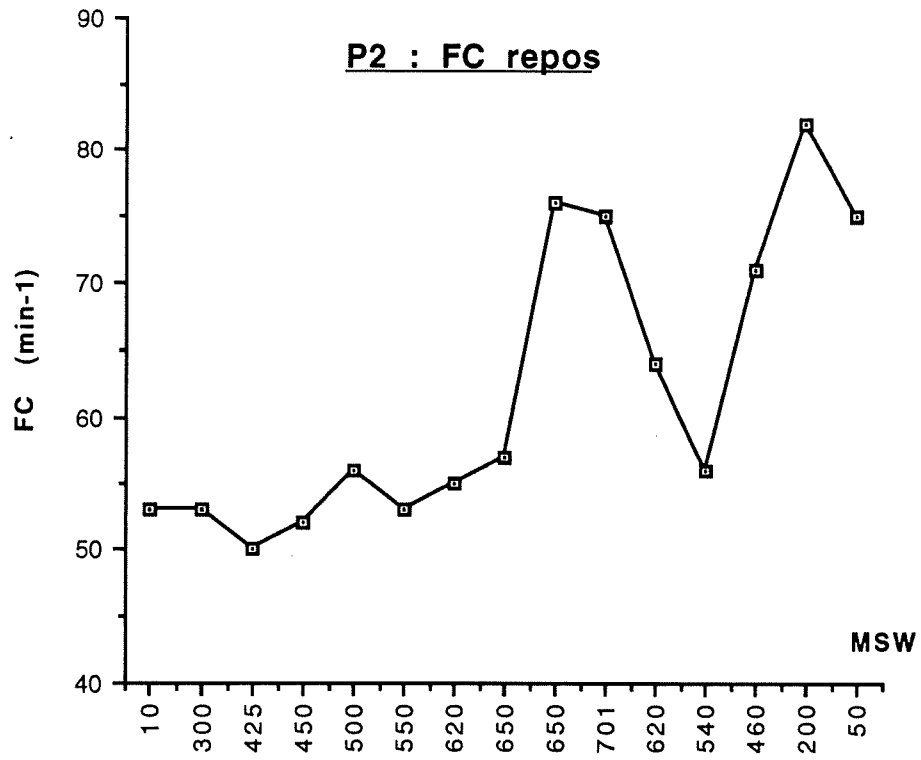


figure 8

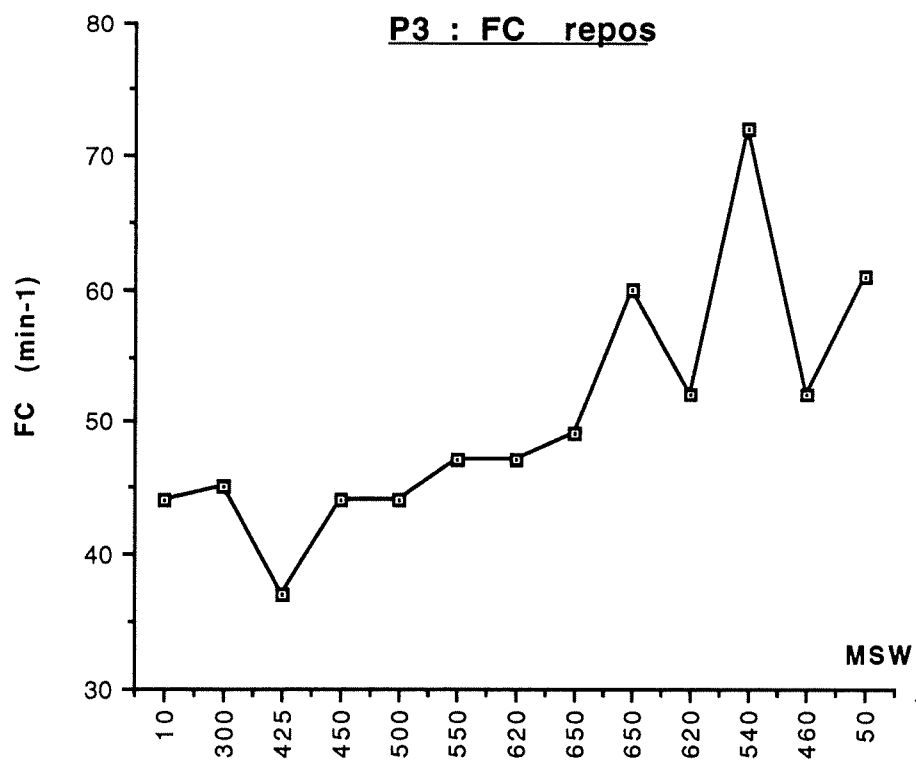


figure 9

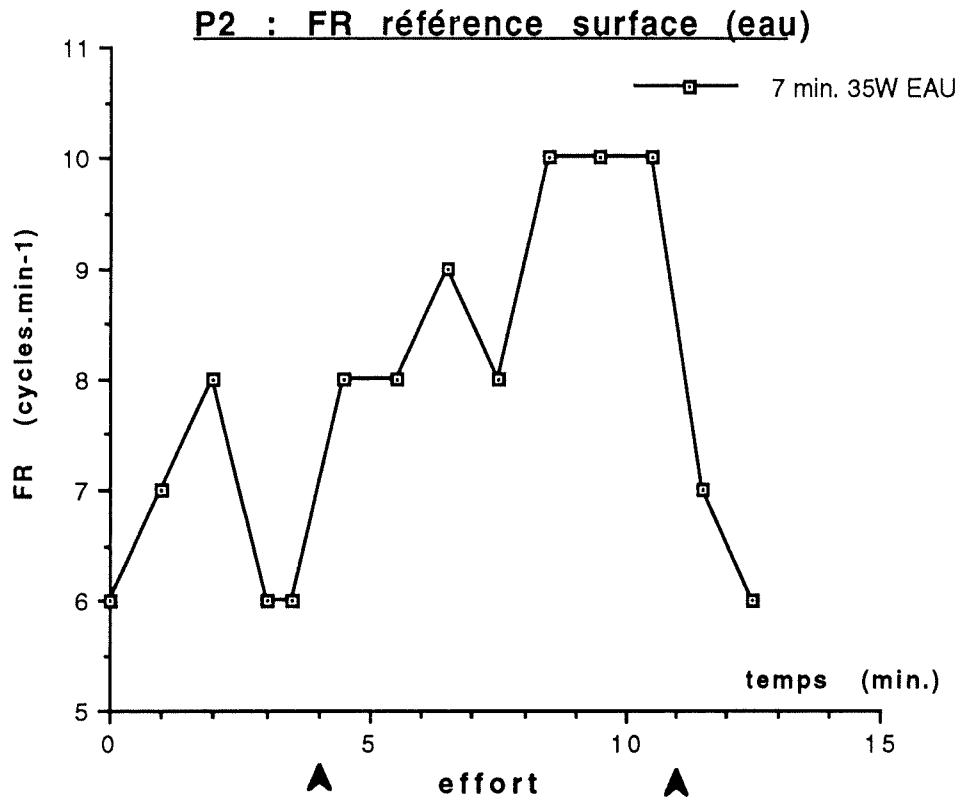


figure 10

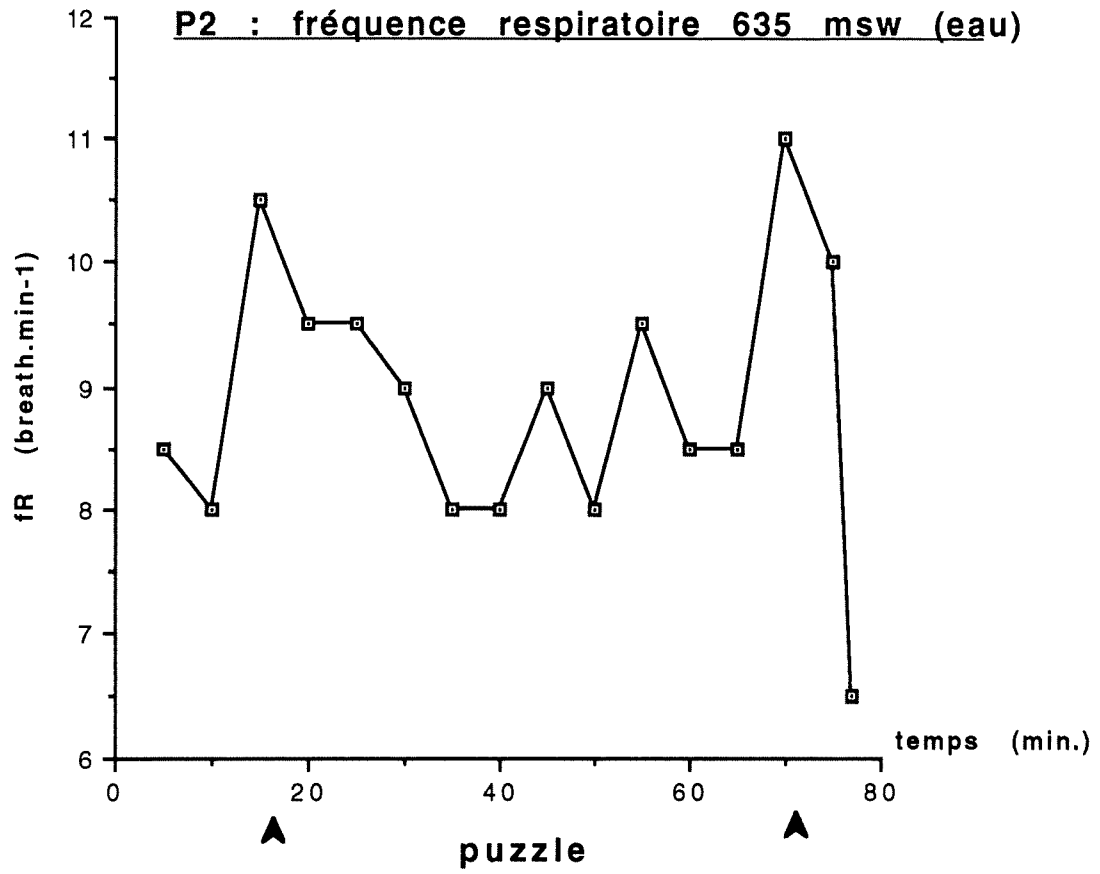


figure 11

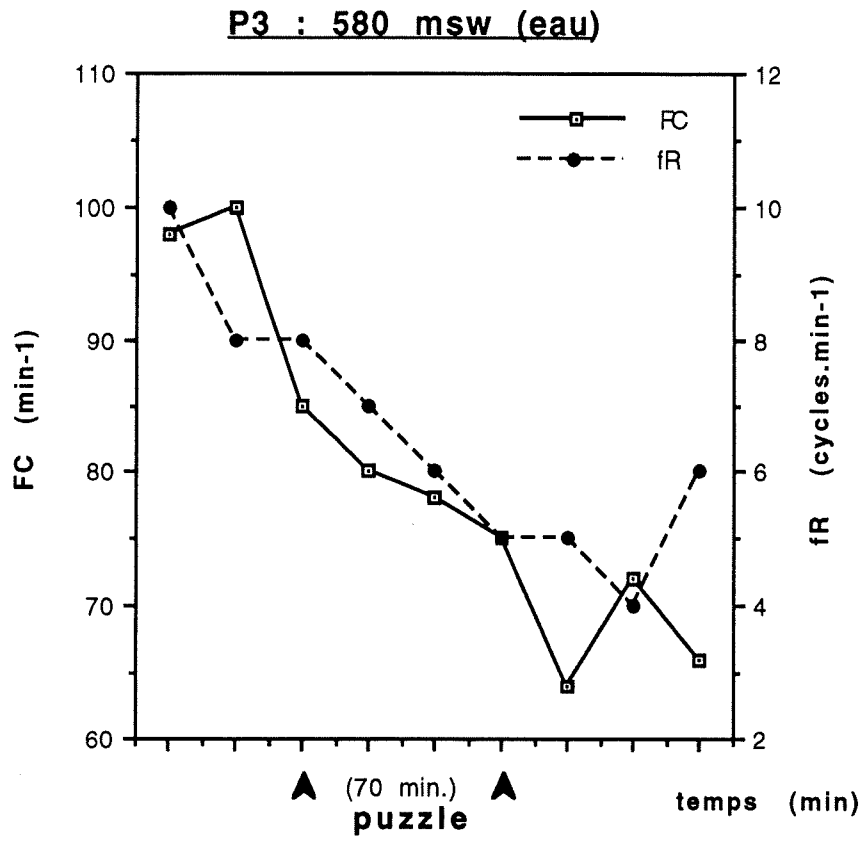


figure 12

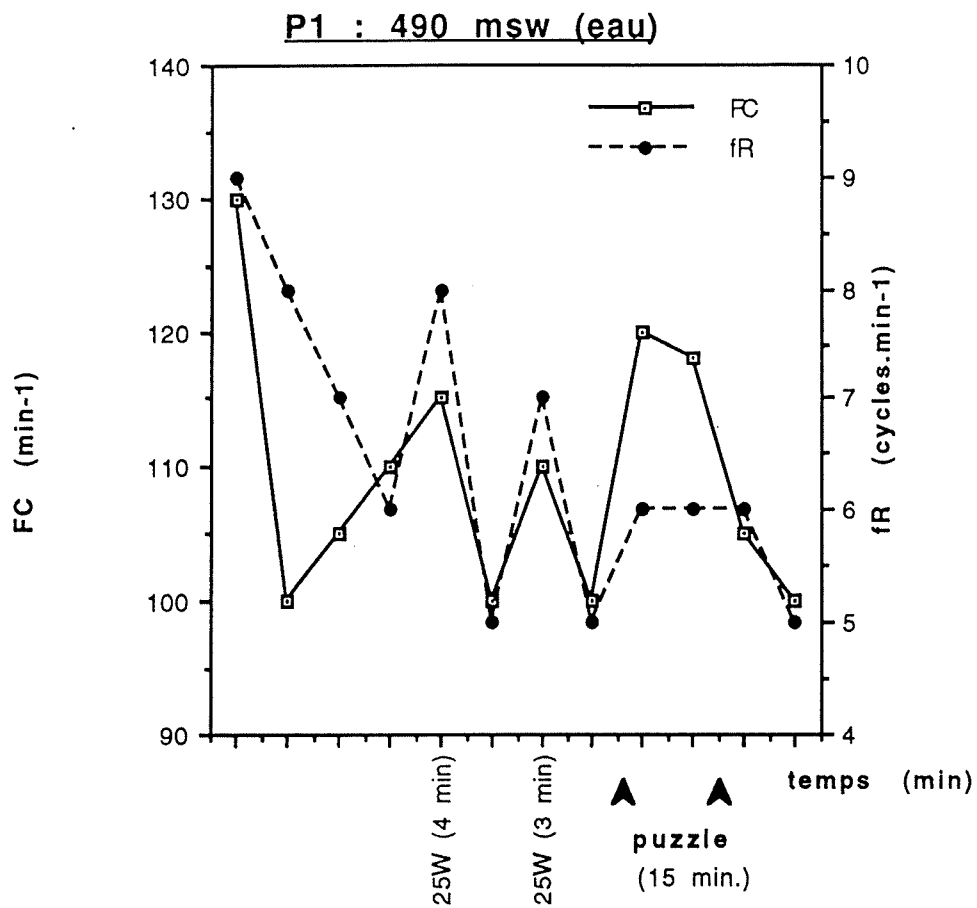


figure 13

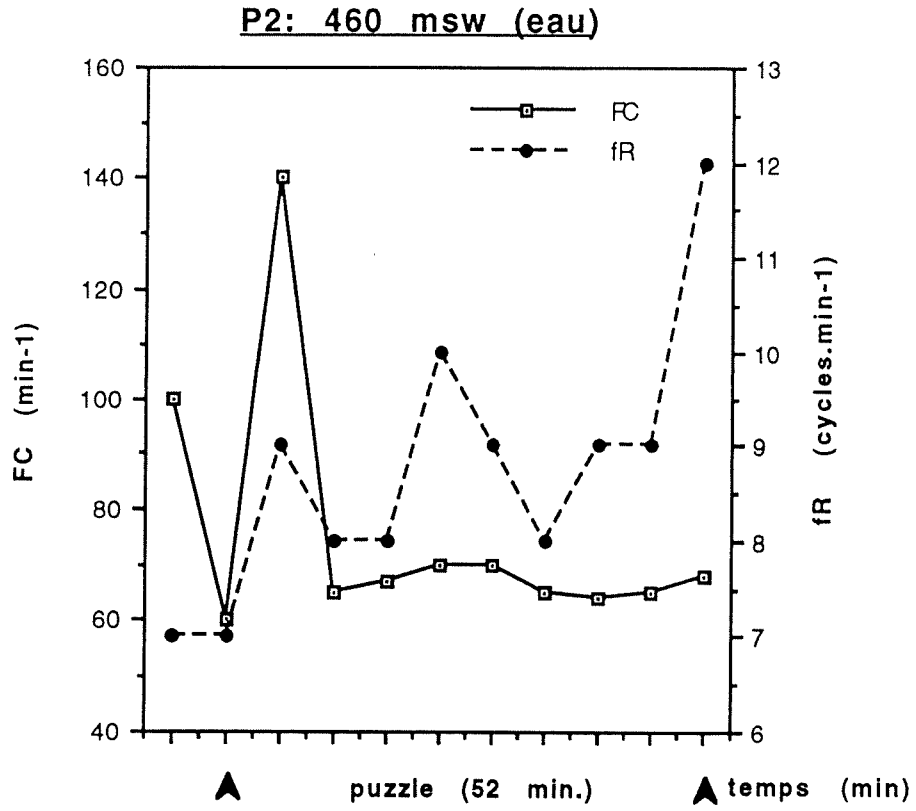
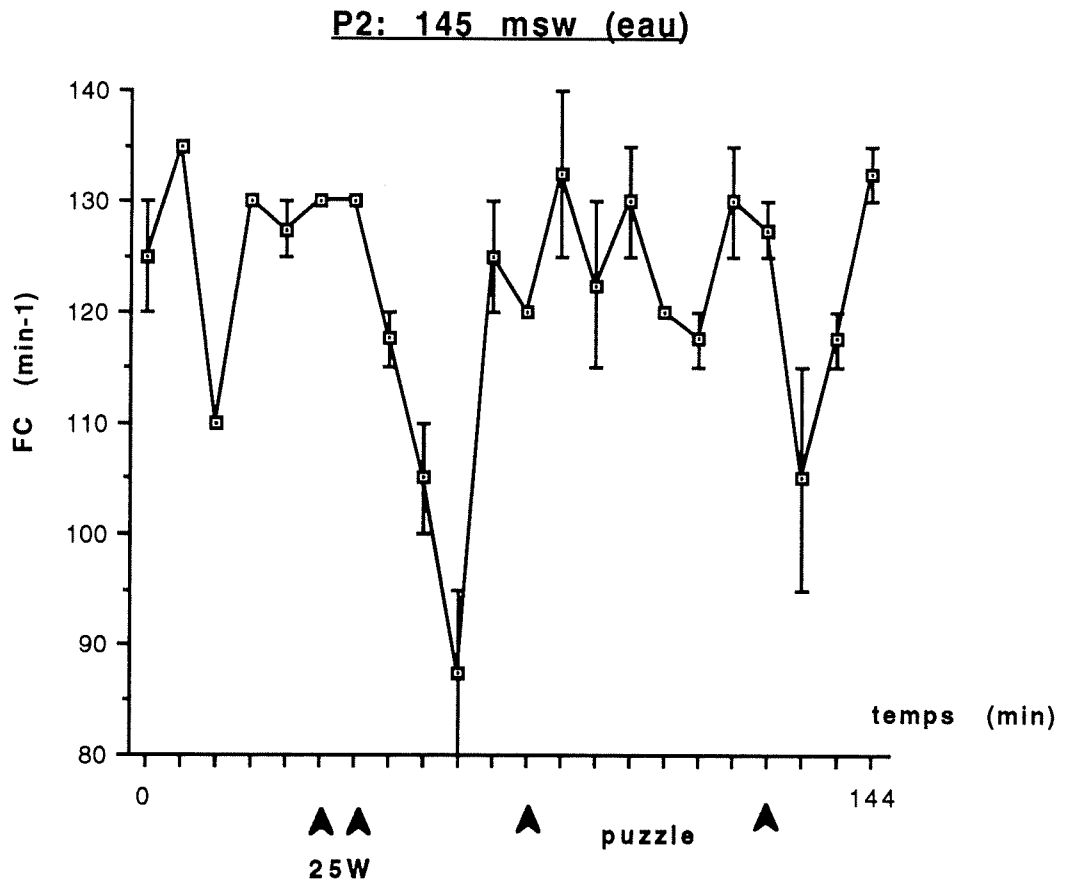


figure 14



ETUDE DOPPLER

HYDRA X

Dr GARDETTE B*
Dr BOUSSUGES A**

* COMEX SA Marseille

** Service de réanimation médicale et d'hyperbarie - Pr JM SAINTY -
Hôpital Salvator Marseille

SURVEILLANCE DE LA DECOMPRESSION PAR EFFET DOPPLER

1. INTRODUCTION

L'intérêt de la surveillance d'une décompression par la détection ultrasonore à effet doppler est connu depuis de nombreuses années (4), (6).

Des bulles circulantes en grande quantité ont en effet pu être corrélées avec un haut risque d'accident de décompression (neurologique ou vestibulaire) (1), (2), (8).

Depuis 1975 toutes les plongées expérimentales pratiquées à la COMEX ont bénéficié de ce mode de surveillance (3).

2. METHODE

Lors de la plongée HYDRA X, une surveillance par effet doppler a été réalisée de façon quotidienne tout au long de la décompression.

La sonde doppler est placée par le plongeur au niveau du bord sternal gauche afin d'évaluer le flux sanguin au niveau de l'artère pulmonaire.

L'enregistrement est effectué sous la surveillance d'un physiologiste entraîné à la technique.

La classification permettant le codage du débit de bulles est celle de SPENCER (7) modifiée par KISMAN et MASUREL (5).

Elle comporte l'analyse de trois paramètres:

- Le nombre maximal de bulles par systole,
- Le pourcentage de systoles comportant des bulles,
- L'amplitude du signal par rapport au bruit de fond.

Ce dépistage est pratiqué chez le plongeur au repos et lors de la flexion des membres inférieurs.

SURVEILLANCE DOPPLER

| DEGRES DE BULLES | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|--------|---|
| | 630m | 600m | 520m | 490m | 450m | 430m | 400m | 370m | 340m | 300m | 280m | 250m | 220m | 190m | 160m | 130m | 100m | 70m | 40m | 20m | sortie | |
| PLONGEUR 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | ++ | ++ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PLONGEUR 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | 0 | ++ | ++ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PLONGEUR 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | + | 0 | + | 0 | 0 | 0 | 0 | ++ | ++ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Les degrés de bulles sont ainsi définis:

Degré 0 : Absence totale de bulle

Degré 1 (+) : Une bulle occasionnelle isolée, la majorité des systoles cardiaques sont dépourvues de bulles

Degré 2 (++) : Des bulles isolées ou groupées retrouvées dans moins de la moitié des systoles

Degré 3 (+++) : des bulles isolées ou groupées occupent la presque totalité des systoles mais les bruits du coeur restent perceptibles

Degré 4 (++++): les signaux de bulles couvrent les bruits physiologiques du coeur.

3. RESULTATS

Aucune bulle circulante n'a été enregistrée au repos.

La réalisation d'une flexion des genoux a permis de mettre en évidence des degrés 1 de bulles chez les plongeurs 2 et 3 dès 450m; des bulles de degré 1 ont été dépistées chez le plongeur 1 uniquement à partir de la profondeur de 250 mètres. Ce faible degré de bulle n'a été retrouvé que de façon épisodique jusqu'à 160 mètres, profondeur à laquelle a été dépisté un degré 2 de bulles chez les trois plongeurs. Ces phénomènes bullaires ont persisté à 130 mètres puis n'ont plus été retrouvés jusqu'à la sortie.

4. CONCLUSION

Le dépistage des bulles par effet doppler a permis de contrôler la sécurité de la décompression.

Celle-ci est confirmée par l'absence totale de bulles circulantes au repos ainsi que par de faibles degrés révélés par le mouvement.

BIBLIOGRAPHIE

1) EATOCK BC

Correspondence between intra vascular bubbles and symptoms of decompression sickness

Undersea Biomed. Res. 1986; 326-329

2) GARDETTE B

Correlation between decompression sickness and circulating bubbles in 232 divers

Undersea Biomed. Res. 1979; 6 (1): 99-107

3) GARDETTE B

La décompression de plongées profondes

Schweiz. Ztschr. Sportmed. 1989; 37: 69-73

4) GUILLERM R, MASUREL G, GUILLAUD C, MONJARET J

Détection ultrasonore (effet doppler) par voie transcutanée de bulles circulantes chez l'homme

Med. Sub. Hyp. 1975; 12: 95-101

5) KISMAN KE, MASUREL G, GUILLERM R,

Bubble evaluation code for doppler ultrasonic decompression data

Undersea Biomed. Res. 1978; 5 (1) Suppl.: 28

6) SMITH KH, SPENCER MP

Doppler indices of decompression sickness: their evaluation and use

Aérop. Med. 1970; 41: 1396-1400

7) SPENCER MP

Decompression limits for compressed air determined by ultrasonically detected blood bubbles

J. Appl. Physiol. 1976; 40 (2): 229-235

8) VANN RD, DICK AP, BARRY PD

Doppler bubble measurement and decompression sickness

Undersea Biomed. Res. 1982; 9 (Suppl): 24

EXPLORATIONS HEMATOLOGIQUES

HYDRA X

Dr BOUSSUGES A*

Dr MENART C**

Dr FOSSAT C**

Pr JUHAN-VAGUE I**

Dr BERGMANN E*

Pr SAINTY JM*

* Service de réanimation médicale et d'hyperbarie - Pr JM SAINTY -
Hôpital Salvator Marseille

** Service d'hématologie - Pr I JUHAN-VAGUE -
Hôpital de la Timone Marseille

EXPLORATIONS HEMATOLOGIQUES HYDRA X

1. PRESENTATION DE L'ETUDE:

Nous avons effectué dans le cadre de la plongée à saturation à grande profondeur HYDRA X un bilan hématologique étendu.

Tous les dosages ont été pratiqués dans le service d'hématologie de l'hôpital de la Timone (Pr JUHAN-VAGUE).

Les trois plongeurs participant à la plongée ont été explorés et ont été codifiés de la façon suivante:

Plongeur n°1: S I...

Plongeur n°2: T M...

Plongeur n°3: R P...

1.1. PROTOCOLE DE PRELEVEMENT:

Les prélèvements sanguins ont été effectués:

- Avant l'entrée en caisson: prélèvement de référence (2 Novembre 1992)
- A la fin de la décompression (14 Décembre 1992)
- Dans la semaine suivant la sortie du caisson (18 Décembre 1992)
- Un mois après la sortie (18 Janvier 1993)

1.2. PARAMETRES MESURES:

Le bilan comportait:

* **Une Etude des éléments figurés du sang**
(Technicon H2, BAYER-DIAGNOSTICS):

Numération des érythrocytes et des réticulocytes, taux d'hémoglobine, mesure de l'hématocrite, du volume globulaire moyen et de la concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine.

Numération formule leucocytaire avec analyse de l'activation des neutrophiles par l'étude de leur potentiel de peroxydation: libération des anions superoxydes au cours de la réduction spontanée et après stimulation par le PMA (phorbol myristate acetate).

Numération des plaquettes avec étude de l'expression de la GMP 140 (immunofluorescence indirecte par cytométrie en flux) témoin de leur activation.

* **Une exploration de la coagulation:**

Etude de la voie endogène de la coagulation par le Temps de céphaline en présence d'un activateur (CK prest Stago, APTT Organon Technika)

Etude de la voie exogène par le Temps de Quick (néoplastine Stago)

Exploration de la fibrinoformation par le Temps de Thrombine à l'aide d'une méthode chronométrique (Thrombozyme Stago)

Dosage du fibrinogène (Fibriprest Stago).

Dosage des inhibiteurs de la coagulation: Anti-Thrombine III (Stachrom Stago), Protéine C (Staclot Stago), Protéine S (Staclot Stago)

Dosage des marqueurs d'activation de la coagulation: Complexes thrombine-antithrombine et D-Dimères (ELISA Stago)

* **Une exploration de la Fibrinolyse:**

Temps de lyse des euglobulines ou Test de von Kaulla,

Dosage de l'antigène de l'activateur tissulaire du plasminogène (tPA Ag) et de l'inhibiteur de l'activateur du plasminogène 1 (PAI 1 Ag) par une méthode Elisa (Stago)

Mesure de l'activité de l'inhibiteur de l'activateur du plasminogène 1 (PAI 1 Act) (Biopool)

Recherche des complexes solubles circulants (FS test Stago)

* **Une exploration des cellules endothéliales:**

Dosage de la Thrombomoduline et du facteur Willebrand (ELISA Stago)

2. RESULTATS

2.1. ELEMENTS FIGURES DU SANG

* **Erythrocytes:**

- Il existe lors de la sortie du caisson une baisse simultanée de la numération globulaire et de l'hématocrite par rapport au prélèvement de référence chez les trois plongeurs.

Cette baisse se majore au prélèvement de contrôle à J4 puis se corrige lors du prélèvement effectué un mois plus tard.

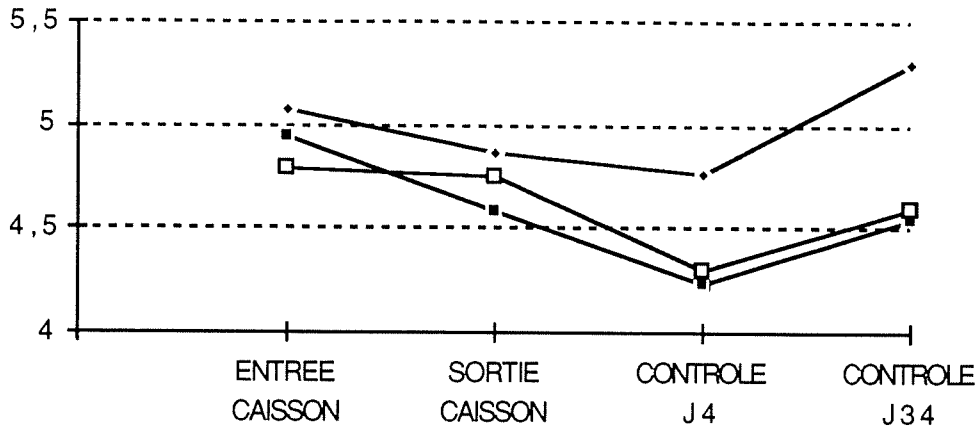
Le taux de réticulocytes reste bas à tous les prélèvements.

Cette baisse de la numération globulaire est retrouvée de façon inconstante lors de plongées à saturation (13). Elle pourrait être la conséquence d'une diminution de la production médullaire secondaire à l'exposition prolongée à l'hyperoxie (FiO₂ de 30 à 50%). Une baisse simultanée de l'érythropoïétine a en effet pu être constatée par certains auteurs (10).

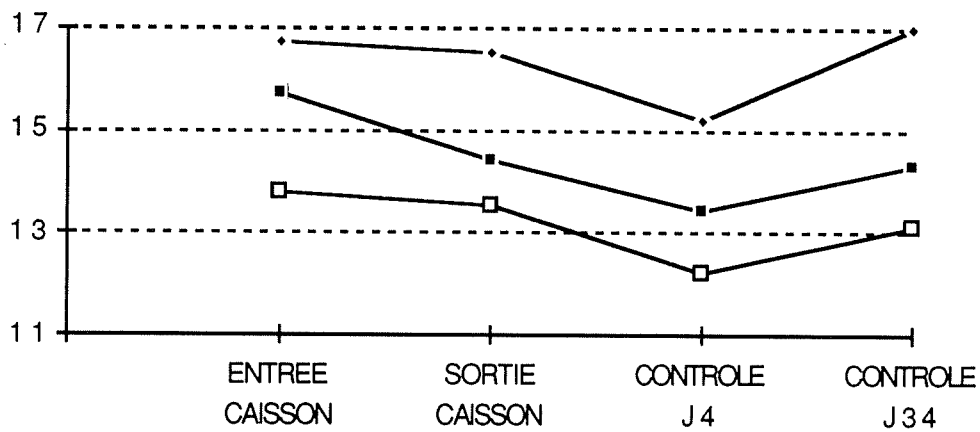
- Les autres modifications de la lignée rouge comprennent une diminution du volume globulaire moyen et une augmentation franche de la concentration corpusculaire en hémoglobine toutes deux maximales lors de la sortie. Elles s'accompagnent d'une augmentation du pourcentage de cellules hyperdenses.

ERYTHROCYTES (1)

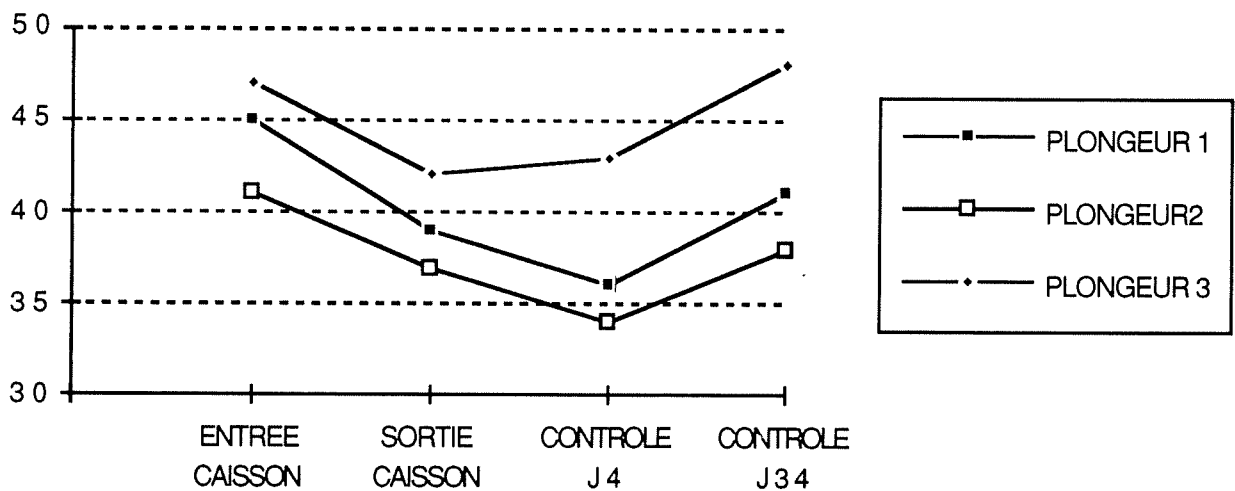
NUMERATION DES HEMATIES (4,5 à 5,5 M/ml)



HEMOGLOBINE (13 à 18 g/100ml)

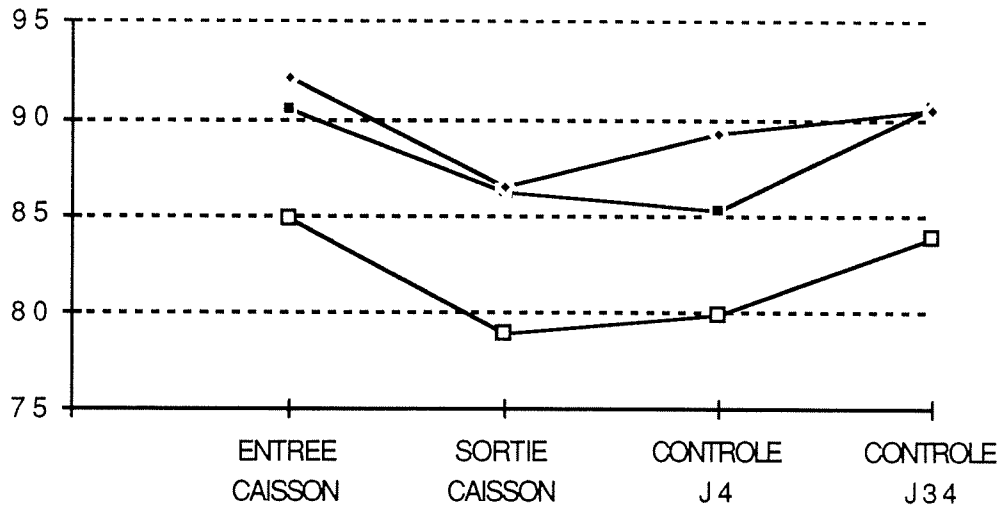


HEMATOCRITE (40 à 54%)



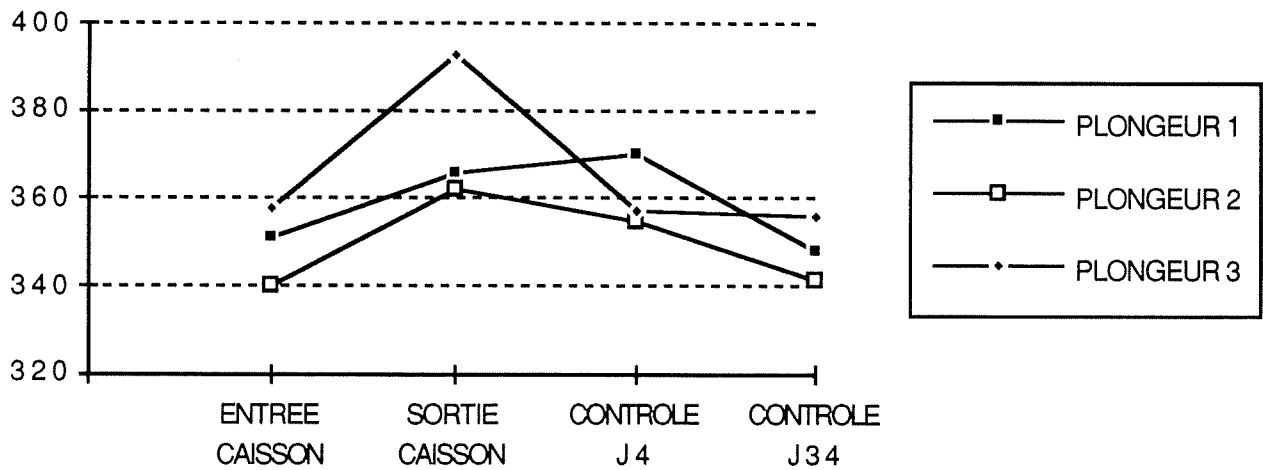
ERYTHROCYTES (2)

VOLUME GLOBULAIRE MOYEN (80 à 100 fl)



CONCENTRATION CORPUSCULAIRE MOYENNE EN HEMOGLOBINE

(320 à 360 g/l)



Le prélèvement pratiqué un mois après la sortie retrouve des valeurs comparables au prélèvement de référence.

Des perturbations des échanges ioniques trans-membranaires érythrocytaires ont pu être mises en évidence lors d'exposition in vitro d'érythrocytes à des pressions élevées (5), (7). Les perturbations des échanges trans-membranaires entraînent des variations du contenu hydrique du globule rouge, SAGAWA a montré son augmentation en hyperbarie et sa diminution après retour à la pression atmosphérique (14).

Les techniques habituelles de calcul des constantes érythrocytaires (Technique de Wintroke) n'ont par contre jamais retrouvé d'augmentation de la valeur de la CCMH après plongée à saturation.

L'utilisation d'une technique de mesure directe de la concentration en hémoglobine de chaque globule rouge, pris individuellement et mesurés par passage devant un rayon laser (Technikon H2), permet d'établir un histogramme en fonction du volume globulaire et de la concentration en hémoglobine. La projection de cet histogramme sur une courbe isovolumétrique et isoconcentrationnaire permet de connaître le pourcentage de cellules microcytaires, macrocytaires, hypochromes et hyperdenses.

Les perturbations retrouvées chez les trois plongeurs d'HYDRA X pourraient donc correspondre à une diminution du contenu hydrique du globule rouge.

* **Leucocytes:**

- Le prélèvement de sortie note une augmentation modérée du nombre de leucocytes chez les trois plongeurs.

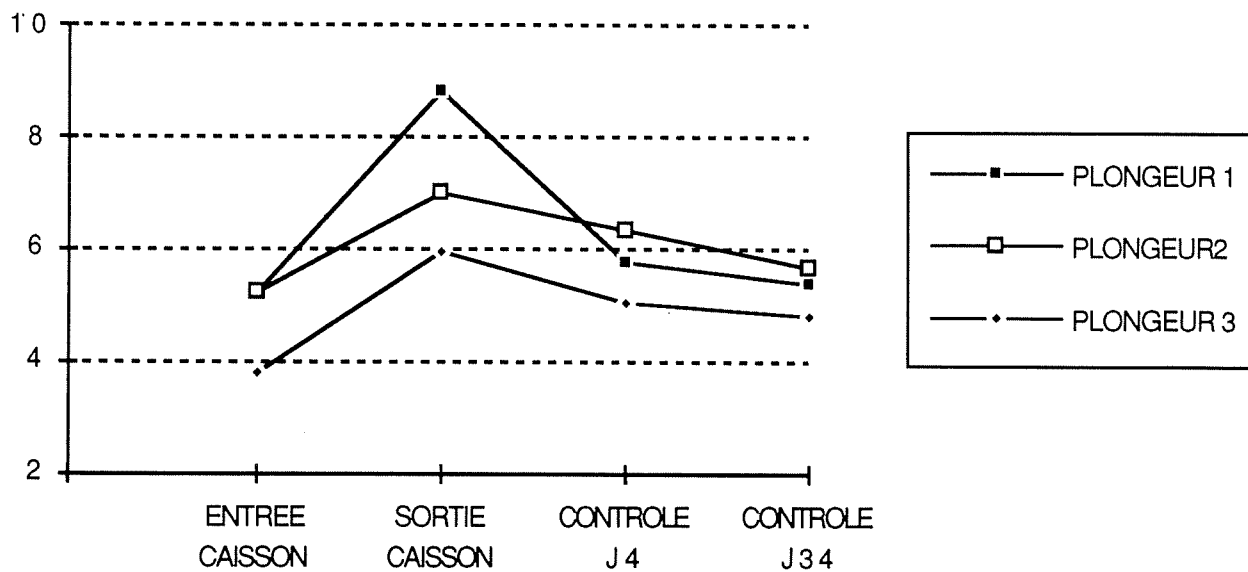
Cette augmentation est secondaire à une élévation homogène de toutes les lignées. Elle a déjà été mise en évidence lors de plongées à saturation précédentes (NEREIDE 1 (3), JASON 1 (4)) mais elle est inconstamment retrouvée lors des plongées de la série HYDRA (1), (15).

- L'analyse qualitative met en évidence, à la fin de la décompression, une augmentation de l'activation des neutrophiles, par les deux techniques utilisées (réduction spontanée et après stimulation par PMA), chez les trois plongeurs. Cette activation sera régressive au prélèvement de contrôle.

L'activation des polynucléaires neutrophiles pourrait être la conséquence de plusieurs phénomènes.

LEUCOCYTES

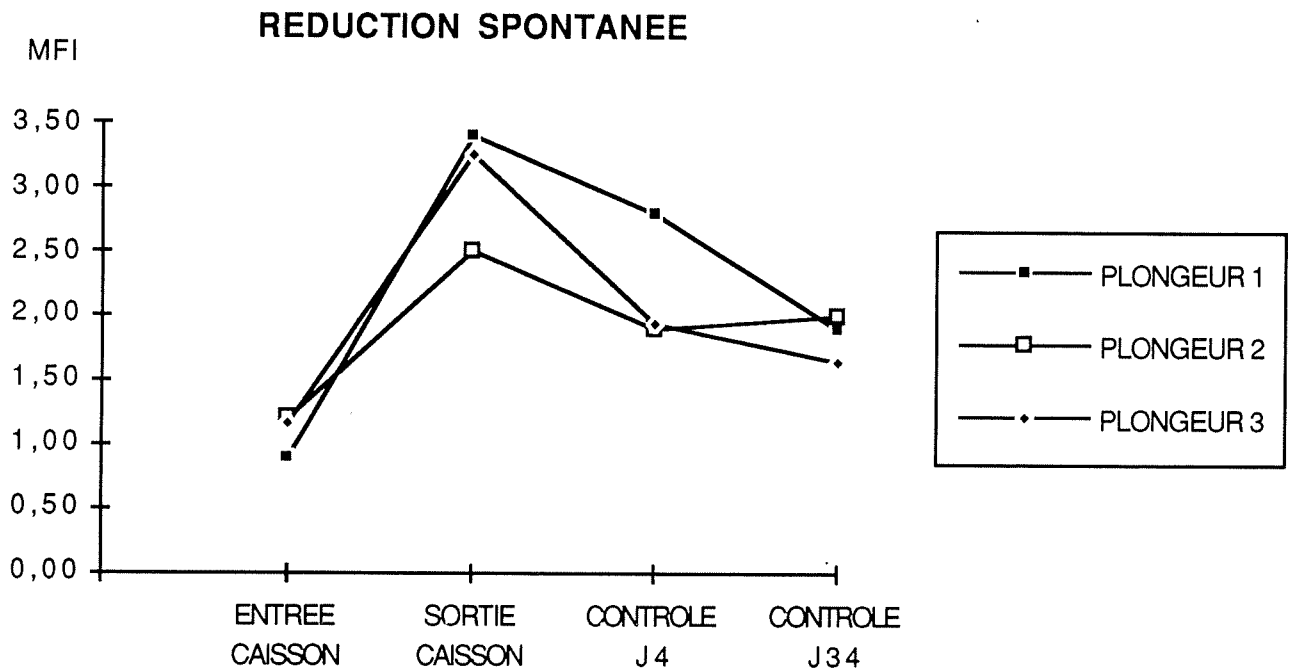
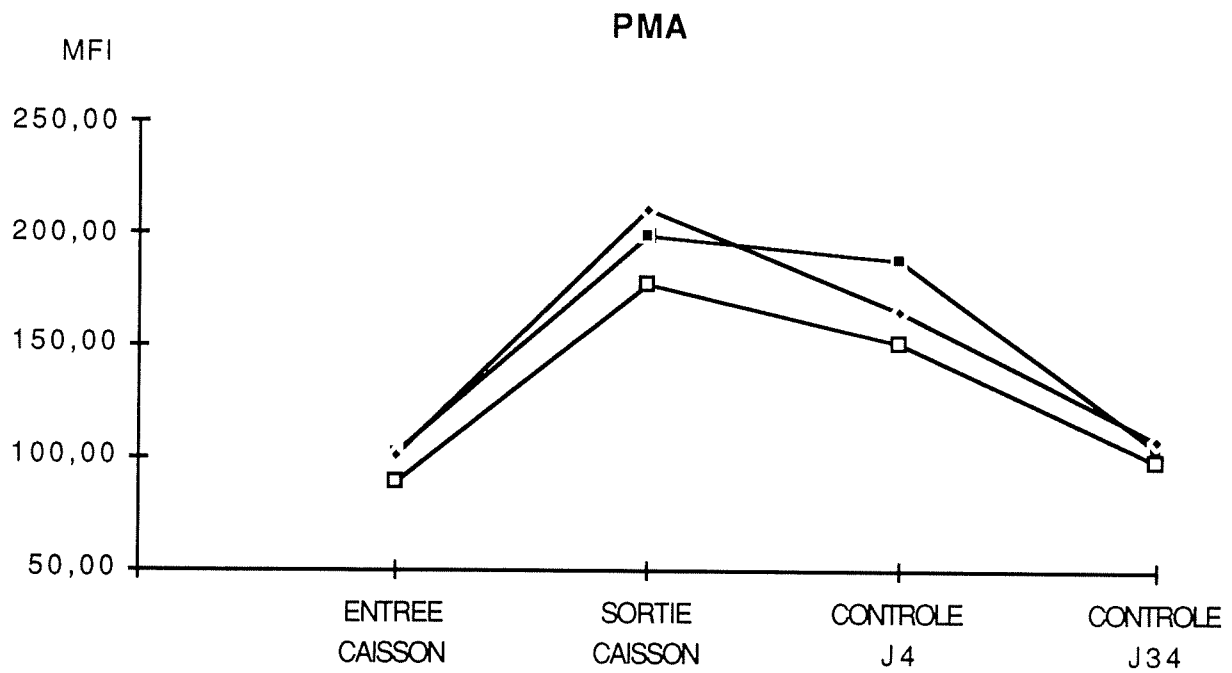
NUMERATION LEUCOCYTAIRE



Formule sanguine:

Augmentation Neutrophiles, lymphocytes, monocytes, éosinophiles, basophiles.

ACTIVATION DES POLYNUCLEAIRES NEUTROPHILES



Certaines études ont constaté aussi bien chez l'animal de laboratoire que chez le volontaire sain une activation leucocytaire après inhalation de mélanges hyperoxygénés (16). Cette activation peut être effective pour des mélanges modérément hyperoxiques (PpO₂ : 0,5 ATA) inhalés durant plusieurs heures (6).

L'embolisation gazeuse expérimentale chez l'animal est source de lésions pulmonaires provoquées par l'activation des leucocytes (2). La décompression avec phénomènes bullaires circulants (dépistés par l'étude doppler lors d'HYDRA X) pourrait donc également être la cause de l'activation des neutrophiles.

* **Plaquettes:**

- Il existe une baisse concordante de la numération plaquettaire chez les trois plongeurs à la sortie du caisson.

Cette baisse plaquettaire a fréquemment été mise en évidence par les équipes étudiant les plongées à saturation (9), (12), (15).

Elle reste lors de cette expérience dans les limites physiologiques de la numération plaquettaire.

- L'évaluation de l'activation plaquettaire lors de la plongée HYDRA X a fait appel à l'étude de l'expression de la GMP 140.

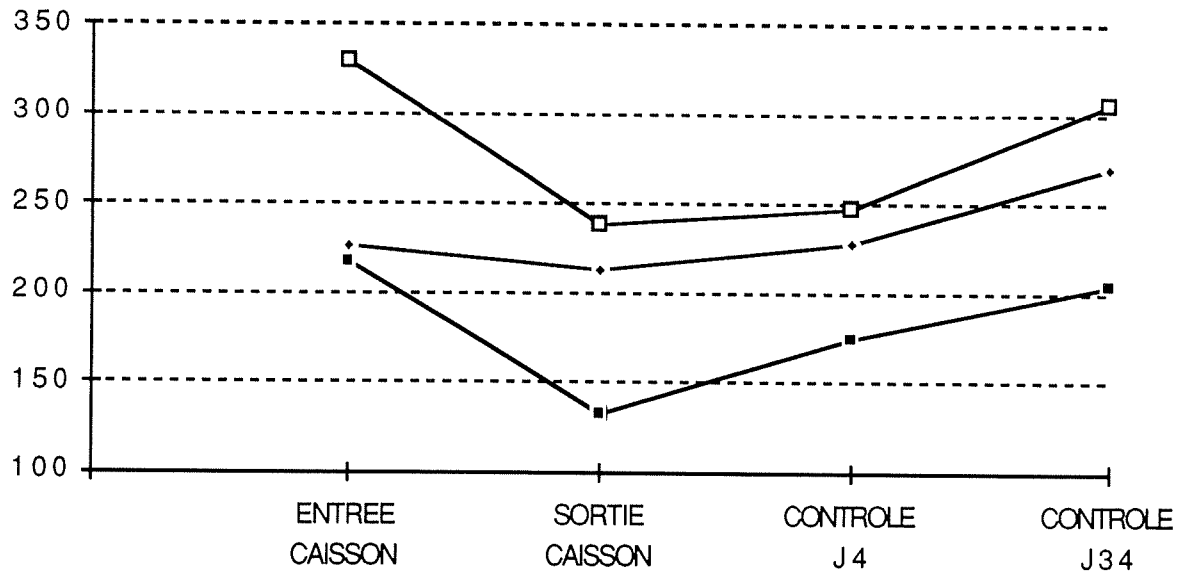
Une activation plaquettaire nette est mise en évidence uniquement chez le plongeur n°2.

L'activation plaquettaire est attribuée par la plupart des auteurs aux bulles circulantes apparaissant à la décompression (9). Le plongeur n°2 est celui qui a subi le profil de plongée le plus sévère (profondeur maximale 701m), la surveillance quotidienne de la décompression par effet doppler n'a cependant pas retrouvé de grades de bulles plus sévères par rapport aux deux autres plongeurs.

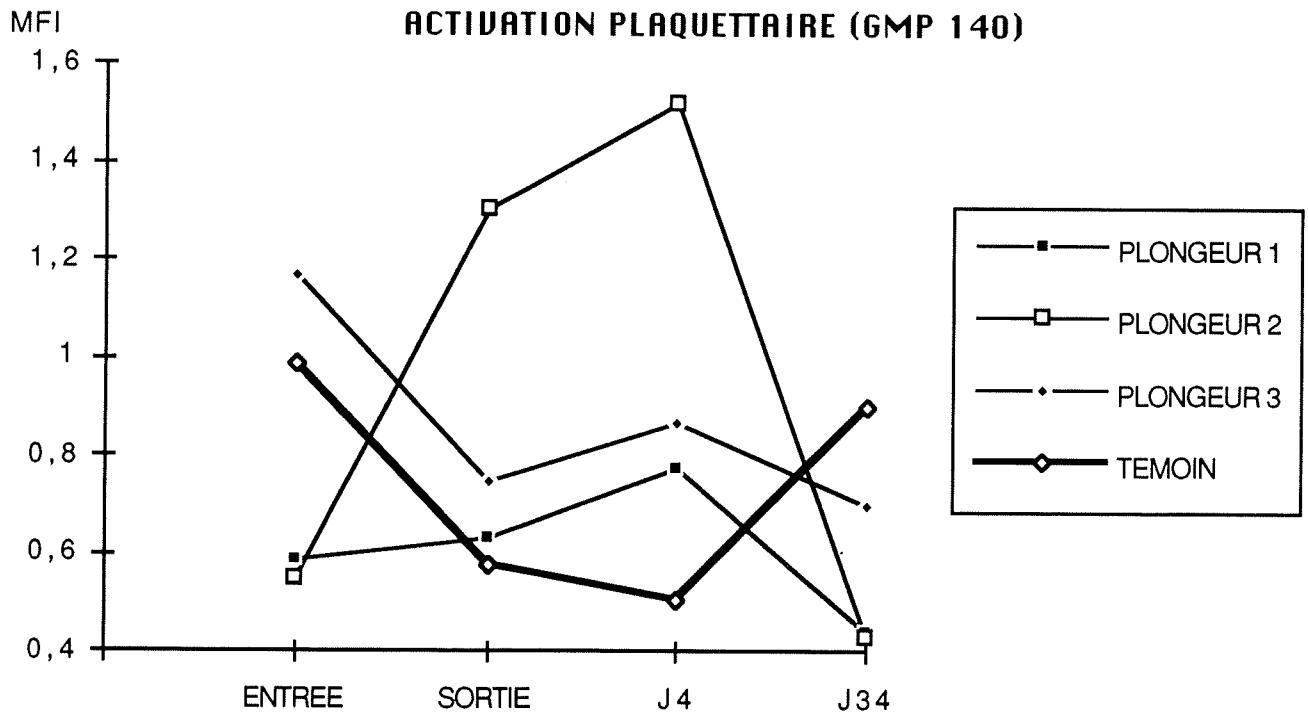
Les bulles de diamètre inférieur à 50 microns ne sont pas dépistées par le doppler, il n'est donc pas exclu que le dégazage ait été plus important chez ce plongeur et que l'activation plaquettaire persistante à la sortie traduise la sévérité de la décompression.

PLAQUETTES

NUMERATION PLAQUETTAIRE



ACTIVATION PLAQUETTAIRE (GMP 140)



2.2. HEMOSTASE:

* Coagulation

- Le dosage des inhibiteurs de la coagulation ne met en évidence de déficit chez aucun des trois plongeurs.

- Il n'existe aucune perturbation dans les tests explorant de façon globale la coagulation: Temps de céphaline et activateur, temps de Quick, Temps de Thrombine.

- Le dosage du fibrinogène ne révèle pas de valeurs anormales. Il existe, par contre, une élévation de son taux chez les trois plongeurs, quatre jours après la sortie, par rapport au prélèvement de référence.

- Le dosage des D-Dimères est sans particularité chez deux plongeurs sur trois (plongeurs n°2 et 3).

Le plongeur n°1 a lors du prélèvement de référence une valeur de base des D-Dimères élevé, c'est le seul qui présente une augmentation plasmatique notable de ce paramètre lors des deux prélèvements dans la semaine suivant la plongée.

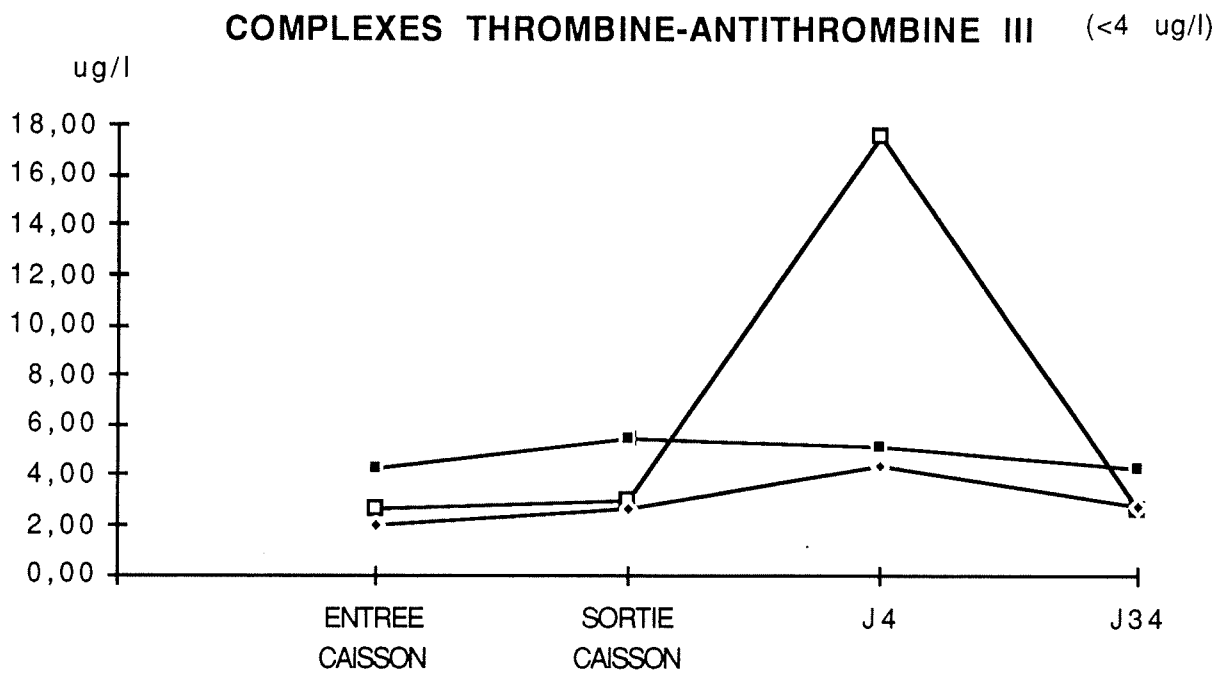
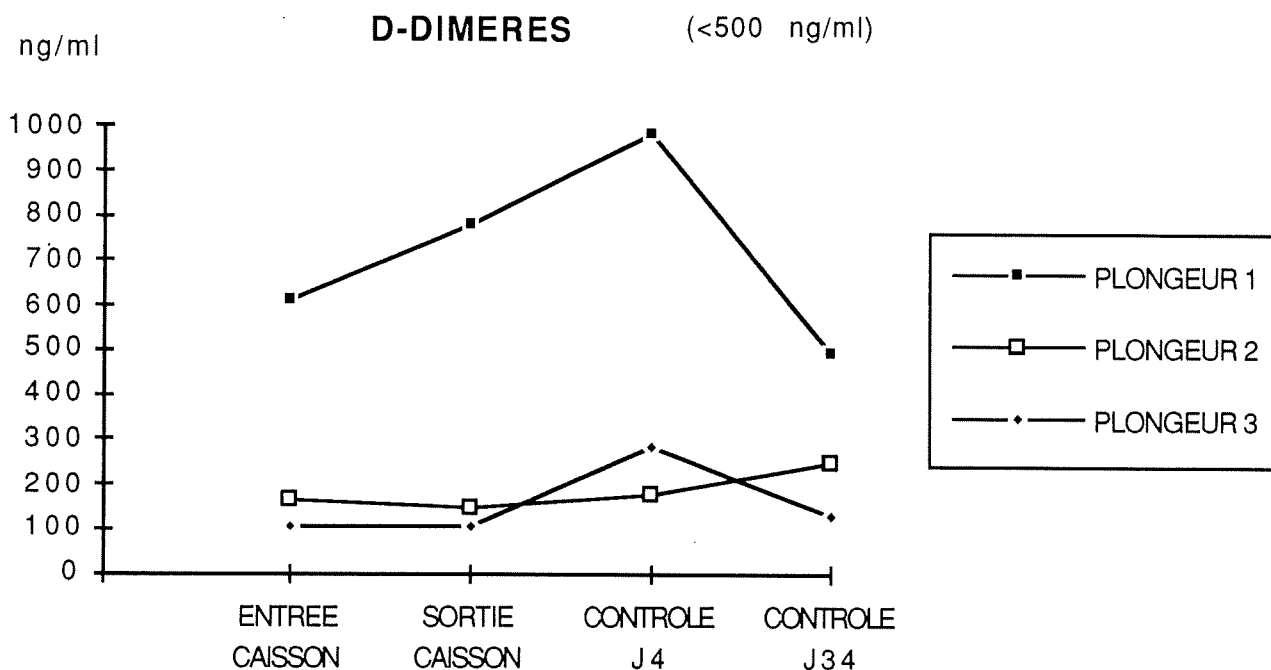
- Les valeurs plasmatiques des complexes Thrombine antithrombine III sont légèrement plus hautes après la saturation chez les trois plongeurs sans que l'élévation ne paraisse significative.

* Fibrinolyse:

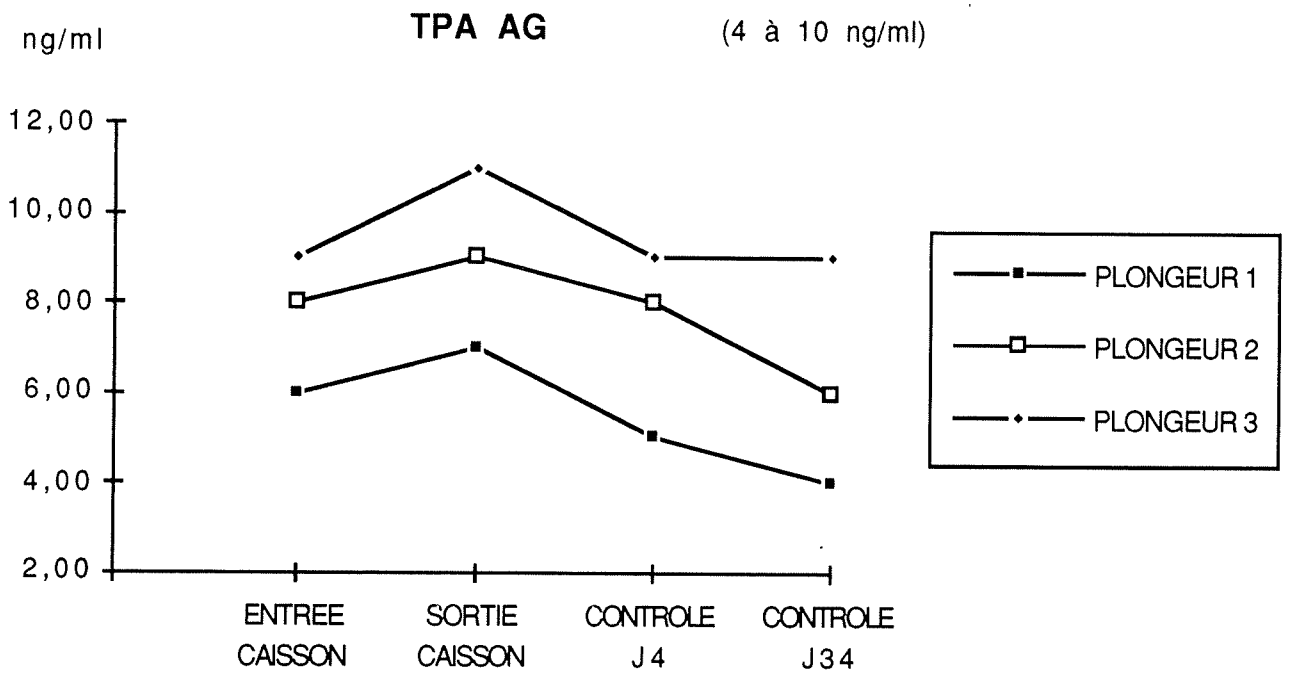
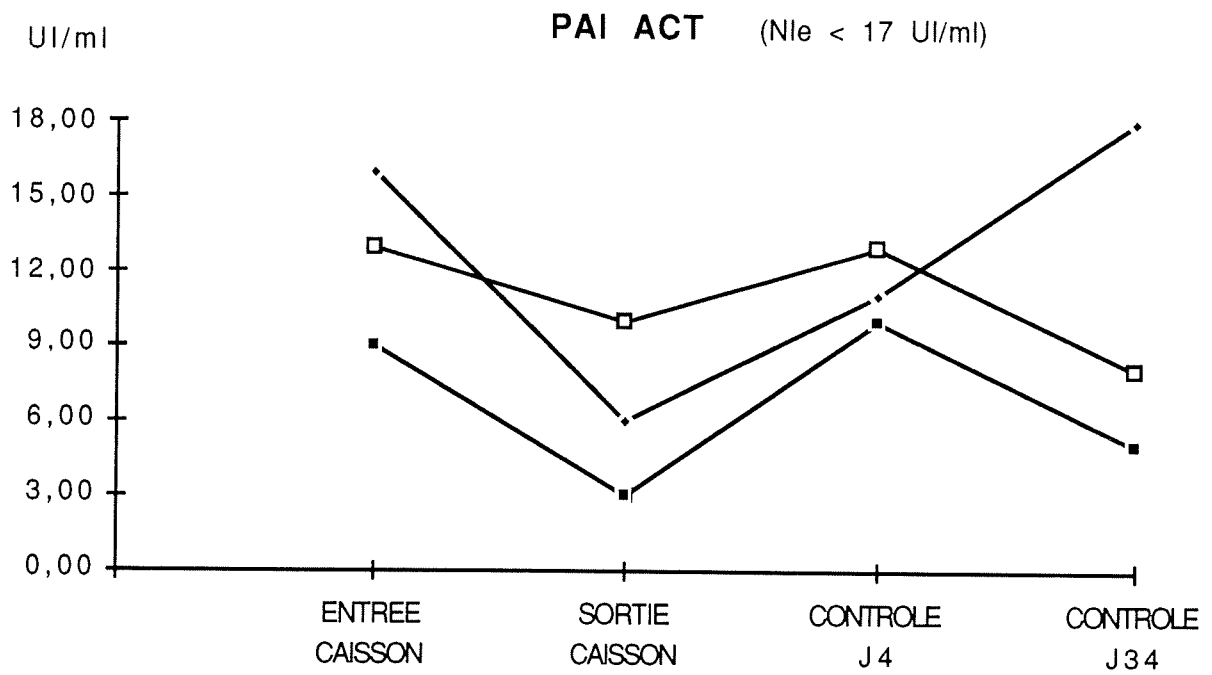
- Le test de von Kaulla est plus court après la plongée par rapport à sa valeur de référence. Nous ne retrouvons cependant aucune valeur pouvant être considérée comme pathologique et il n'existe pas de complexes solubles circulants.

- Le dosage du tPA Ag et du PAI Act ne met en évidence aucun taux plasmatique anormal. On peut cependant noter une légère diminution du PAI act lors de la sortie avec augmentation parallèle du tPA Ag.

ACTIVATION DE LA COAGULATION



FIBRINOLYSE



2.3. CELLULES ENDOTHELIALES:

Les valeurs du facteur Willebrand et de Thrombomoduline sont plus élevées à la sortie du caisson par rapport aux prélèvements de référence (contrôle avant plongée et un mois après la plongée).

Le dosage du tPA Ag, également synthétisé par les cellules endothéliales, a montré la même cinétique (voir chap. Fibrinolyse).

Chez deux plongeurs sur trois les dosages plasmatiques de Thrombomoduline sont supérieurs ou égaux à des valeurs considérées comme normales dans une population de sujets témoins.

Des lésions endothéliales peuvent donc être évoquées.

Plusieurs auteurs ont précédemment rapporté l'existence d'altérations endothéliales secondaires au dégazage produit par la décompression (8) (11).

3. CONCLUSION:

Les constatations biologiques retrouvées lors de la plongée HYDRA X comprennent des éléments classiques fréquemment mis en évidence aux bilans de sortie pratiqués lors de plongées à saturation antérieures :

Baisse de la numération globulaire
Augmentation discrète de la numération leucocytaire
Chute de la numération plaquettaire
Absence de perturbation importante de l'hémostase

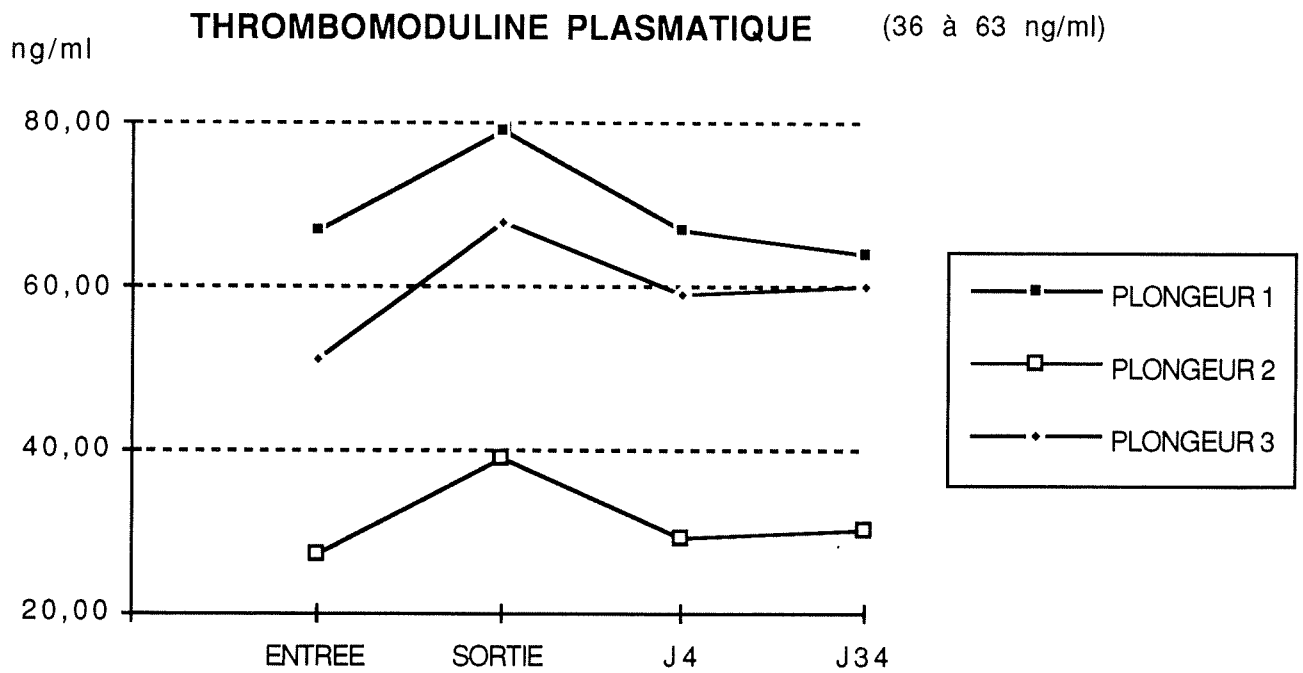
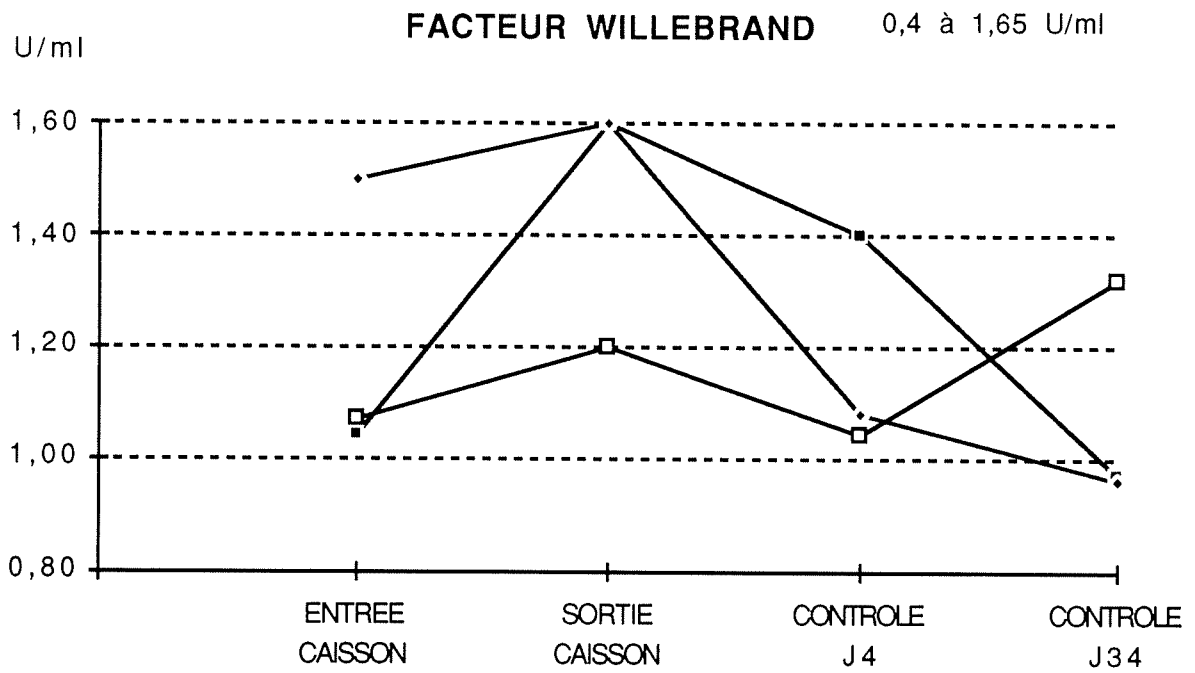
Certains paramètres sont par contre originaux:

- Soit en raison de résultats inhabituels:

Les modifications du VGM et surtout de la CCMH n'avaient jusqu'alors jamais été soulignées. Elles évoquent des troubles des échanges ioniques trans membranaires.

L'utilisation d'une nouvelle méthode de mesure ne nous permet pas de conclure à la spécificité de ce résultat lors de cette plongée, en effet les modifications de la CCMH ont pu être méconnues par les techniques de mesure précédentes.

CELLULES ENDOTHELIALES



- Soit en raison de l'absence de résultats antérieurs de référence:

L'activation des polynucléaires neutrophiles est nette à la sortie du caisson chez les trois plongeurs. Aucune étude n'avait à notre connaissance jusqu'alors étudié ce paramètre dans ces circonstances. L'existence de plusieurs travaux expérimentaux nous permettent par contre plusieurs hypothèses physiopathologiques telles qu'une activation secondaire à l'hyperoxie ou au dégazage lors de la décompression.

L'activation plaquettaire étudiée par l'expression de la GMP 140 n'est nette que chez un plongeur, elle pourrait être le témoignage d'un profil de plongée plus sévère.

Le dosage des marqueurs de cellules endothéliales confirme des lésions endothéliales modérées qui ont déjà été évoquées par de nombreux travaux expérimentaux.

* * * * *

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BARET A, COURTIÈRE A, VERDIÈRE M, PERAZZA G
Etude de paramètres biochimiques au cours d'une plongée fictive à saturation en mélange hélium oxygène (HYDRA V)
Rapport COMEX 1985; 10-1/10-8
- 2) FLICK MR, PEREL A, STAUB NC
Leukocytes are required for increased lung microvascular permeability after microembolization in sheep
Circ. Res. 1981; 48: 344-351
- 3) GARDETTE B, MARTIN-CHAVE F, CAVENEL P, FRUCTUS X
NEREIDE I: Air saturation dive to 15 meters (49') with excursions to 42 (138'), 60 (199') and 75 meters (246')
Eight symposium on underwater physiology VIII: 673-682
- 4) GARDETTE B
Oxygen-Argon saturation dive: JASON I
Rapport COMEX 1987

5) GOLDINGER JM, KANG BS, CHOO YE, PAGANELLI CV, HONG SK
Effects of hydrostatic pressure on ion transport and metabolism in human erythrocytes
J Appl. Physiol. 1980; 49 (2): 224-231

6) GRIFFITH DF, GARCIA JG, JAMES HL, CALLAHAN KS, IRIANA S, HOLIDAY D
Hyperoxic exposure in humans; Effects of 50 percent oxygen on alveolar macrophage leukotriene B4 synthesis
Chest 1992; 101 (2): 392-397

7) HALL AC, ELLORY JC, KLEIN RA
Pressure and temperature effects on human red cell cation transport
J Membrane Biol. 1982; 68: 47-56

8) LEVINE L, STEWART SJ, LUNCH P, BOVE A
Blood and blood vessel wall changes induced by decompression sickness in dogs
J Appl. Physiol. 1981; 50 (5): 944-949

9) MOON RE, FAWCETT TA, EXPOSITO AJ, CAMPORESI EM, BENNETT PB, HOLTHAUS J
Platelet count in deep saturation diving
Undersea Biomed. Res. 1992; 19 (4): 279-286

10) NAKABAYASHI K, MIZUKAMI H, HASHIMOTO A, OIWA H
Change in red blood cell production rate during a 330 msw saturation dive simulation
Undersea Biomed. Res. 1991; 18 (1): 32

11) PHILP RB, INWOOD MJ, WARREN BA
Interactions between gas bubbles and components of the blood: Implications in decompression sickness
Aerospace Med. 1972; 43 (9): 946-953

12) PHILP RB, FREEMAN D, FRANCEY I, ACKLES KN
Changes in platelet function and other blood parameters following a shallow open-sea saturation dive
Aerospace Med. 1974; 45 (1): 72-76

13) PHILP RB
A review of blood changes associated with compression-decompression: relationship to decompression sickness
Undersea Biomed. Res. 1974; 1 (2): 117-143

14) SAGAWA S, GOLDINGER JM, SHIRAKI K, NAKAYAMA H, HONG SK
Seadragon VI: a 7-day dry saturation dive at 31 ATA; VII. Erythrocyte
functions
Undersea Biomed. Res. 1987; 14 (5): 449-454

15) SICARDI F, GARDETTE B
HYDRA VI: Biologie
Rapport COMEX 1986; Chapitre Biologie: 4-8

16) SMALL A
New perspectives on hyperoxic pulmonary toxicity - a review
Undersea Biomed. Res. 1984; 11 (1): 1-24

ANNEXE

ERYTHROCYTES

| PLONGEURS | TEMPS | GR | HGB | HT | VGM | CCMHb |
|-----------|----------|------|-----|----|-------|-------|
| NUMERO 1 | 2/11/92 | 4,95 | 157 | 45 | 90,50 | 351 |
| | 14/12/92 | 4,58 | 144 | 39 | 86,20 | 366 |
| | 17/12/92 | 4,24 | 134 | 36 | 85,30 | 370 |
| | 22/1/93 | 4,54 | 143 | 41 | 90,60 | 348 |
| NUMERO 2 | 2/11/92 | 4,79 | 138 | 41 | 84,80 | 340 |
| | 14/12/92 | 4,75 | 135 | 37 | 78,90 | 362 |
| | 17/12/92 | 4,30 | 122 | 34 | 79,80 | 355 |
| | 22/1/93 | 4,59 | 131 | 38 | 83,90 | 341 |
| NUMERO 3 | 2/11/92 | 5,07 | 167 | 47 | 92,10 | 358 |
| | 14/12/92 | 4,87 | 165 | 42 | 86,50 | 393 |
| | 17/12/92 | 4,77 | 152 | 43 | 89,30 | 357 |
| | 18/1/93 | 5,29 | 170 | 48 | 90,50 | 356 |

LEUCOCYTES

| PLONGEURS | TEMPS | GB | PN | LYMP | MONO | EOS | BASO |
|-----------|----------|------|------|------|------|------|------|
| NUMERO 1 | 2/11/92 | 3,82 | 2,48 | 1,05 | 0,15 | 0,04 | 0,03 |
| | 14/12/92 | 5,94 | 3,50 | 1,95 | 0,29 | 0,07 | 0,03 |
| | 17/12/92 | 5,06 | 2,93 | 1,70 | 0,23 | 0,08 | 0,03 |
| | 22/1/93 | 4,80 | 2,65 | 1,35 | 0,56 | 0,17 | 0,03 |
| NUMERO 2 | 2/11/92 | 5,21 | 2,78 | 1,71 | 0,41 | 0,11 | 0,05 |
| | 14/12/92 | 6,98 | 4,19 | 2,82 | 0,40 | 0,13 | 0,06 |
| | 17/12/92 | 6,35 | 4,06 | 1,57 | 0,43 | 0,08 | 0,04 |
| | 22/1/93 | 5,68 | 3,18 | 1,76 | 0,37 | 0,18 | 0,07 |
| NUMERO 3 | 2/11/92 | 5,24 | 2,81 | 1,49 | 0,53 | 0,21 | 0,06 |
| | 14/12/92 | 8,80 | 6,07 | 1,58 | 0,79 | 0,26 | |
| | 17/12/92 | 5,74 | 2,90 | 1,74 | 0,76 | 0,22 | 0,04 |
| | 18/1/93 | 5,38 | 4,00 | 0,74 | 0,39 | 0,16 | 0,03 |

ACTIVATION DES NEUTROPHILES

| PLONGEURS | TEMPS | PMA | REDUCTION SPONTANEE |
|-----------|----------|-----|---------------------|
| NUMERO 1 | 2/11/92 | 102 | 0,90 |
| | 14/12/92 | 199 | 3,40 |
| | 17/12/92 | 188 | 2,80 |
| | 22/1/93 | 104 | 1,90 |
| NUMERO 2 | 2/11/92 | 89 | 1,20 |
| | 14/12/92 | 177 | 2,50 |
| | 17/12/92 | 151 | 1,90 |
| | 22/1/93 | 98 | 2,00 |
| NUMERO 3 | 2/11/92 | 101 | 1,17 |
| | 14/12/92 | 211 | 3,25 |
| | 17/12/92 | 165 | 1,93 |
| | 18/1/93 | 108 | 1,64 |

PLAQUETTES

| PLONGEURS | TEMPS | NTN PLAQUETTAIRE | VPM | GMP 140 |
|-----------|----------|------------------|------|---------|
| NUMERO 1 | 2/11/92 | 217 | 9,30 | 1,17 |
| | 14/12/92 | 132 | 8,20 | 0,75 |
| | 17/12/92 | 174 | 8,70 | 0,87 |
| | 22/1/93 | 104 | 7,60 | 0,70 |
| NUMERO 2 | 2/11/92 | 329 | 8,50 | 0,55 |
| | 14/12/92 | 238 | 7,20 | 1,30 |
| | 17/12/92 | 248 | 8,20 | 1,52 |
| | 22/1/93 | 306 | 7,50 | 0,43 |
| NUMERO 3 | 2/11/92 | 227 | 8,90 | 0,59 |
| | 14/12/92 | 213 | 8,40 | 0,63 |
| | 17/12/92 | 228 | 8,90 | 0,77 |
| | 18/1/93 | 270 | 9,40 | 0,44 |

COAGULATION

| PLONGEURS | TEMPS | TP | TCK | TT | FIB |
|-----------|----------|-----|-----|----|------|
| NUMERO 1 | 2/11/92 | 87 | 37 | 27 | 2,00 |
| | 14/12/92 | 100 | 26 | 29 | 3,00 |
| | 17/12/92 | 100 | 27 | 26 | 3,00 |
| | 22/1/93 | 83 | 31 | 29 | 2,10 |
| NUMERO 2 | 2/11/92 | 90 | 35 | 28 | 2,98 |
| | 14/12/92 | 100 | 27 | 26 | 2,90 |
| | 17/12/92 | 100 | 27 | 26 | 4,00 |
| | 22/1/93 | 100 | 30 | 29 | 2,33 |
| NUMERO 3 | 2/11/92 | 81 | 42 | 30 | 1,94 |
| | 14/12/92 | 92 | 39 | 25 | 2,69 |
| | 17/12/92 | 92 | 35 | 25 | 3,21 |
| | 22/1/93 | 100 | 38 | 28 | 2,64 |

MARQUEURS D'ACTIVATION DE LA COAGULATION

| PLONGEURS | TEMPS | D-DIMERES | TAT |
|-----------|----------|-----------|-------|
| NUMERO 1 | 2/11/92 | 613 | 4,30 |
| | 14/12/92 | 783 | 5,40 |
| | 17/12/92 | 984 | 5,10 |
| | 22/1/93 | 495 | 4,30 |
| NUMERO 2 | 2/11/92 | 167 | 2,70 |
| | 14/12/92 | 147 | 3,00 |
| | 17/12/92 | 175 | 17,60 |
| | 22/1/93 | 249 | 2,70 |
| NUMERO 3 | 2/11/92 | 107 | 2,00 |
| | 14/12/92 | 107 | 2,60 |
| | 17/12/92 | 287 | 4,40 |
| | 22/1/93 | 129 | 2,80 |

FIBRINOLYSE

| PLONGEURS | TEMPS | PAI ACT | TPA AG | VK | CS |
|-----------|----------|---------|--------|-----|----|
| NUMERO 1 | 2/11/92 | 9 | 6 | 270 | - |
| | 14/12/92 | 3 | 7 | 90 | - |
| | 17/12/92 | 10 | 5 | 150 | - |
| | 22/1/93 | 5 | 4 | 150 | - |
| NUMERO 2 | 2/11/92 | 13 | 8 | 330 | - |
| | 14/12/92 | 10 | 9 | 270 | - |
| | 17/12/92 | 13 | 8 | 330 | - |
| | 22/1/93 | 8 | 6 | 270 | - |
| NUMERO 3 | 2/11/92 | 16 | 9 | 270 | - |
| | 14/12/92 | 6 | 11 | 195 | - |
| | 17/12/92 | 11 | 9 | 240 | - |
| | 22/1/93 | 18 | 9 | 330 | - |

MARQUEURS DE LESIONS ENDOTHELIALES

| PLONGEURS | TEMPS | FACTEUR WILLEBRAND | THROMBOMODULINE |
|-----------|----------|--------------------|-----------------|
| NUMERO 1 | 2/11/92 | 1,04 | 67 |
| | 14/12/92 | 1,60 | 79 |
| | 17/12/92 | 1,40 | 67 |
| | 22/1/93 | 0,97 | 64 |
| NUMERO 2 | 2/11/92 | 1,07 | 27 |
| | 14/12/92 | 1,20 | 39 |
| | 17/12/92 | 1,04 | 29 |
| | 22/1/93 | 1,32 | 30 |
| NUMERO 3 | 2/11/92 | 1,50 | 51 |
| | 14/12/92 | 1,60 | 68 |
| | 17/12/92 | 1,08 | 59 |
| | 22/1/93 | 0,96 | 60 |

EXPLORATIONS URINAIRES

HYDRA X

Dr BOUSSUGES A*

Dr MENART C**

Dr BORDET JC***

Pr JUHAN-VAGUE I**

Pr SAINTY JM*

* Service de réanimation médicale et d'hyperbarie - Pr JM SAINTY -
Hôpital Salvator Marseille

** Service d'hématologie - Pr I JUHAN-VAGUE -
Hôpital de la Timone. Marseille

*** Laboratoire d'hémobiologie
Faculté de Médecine A. Carrel. Lyon

DOSAGE DU DEHYDRO-THROMBOXANE B2

URINAIRE

LORS DE LA PLONGEE HYDRA X

1. INTRODUCTION

Le thromboxane est produit en quantités importantes lors de l'agrégation plaquettaire.

La quantification in vivo de la production de thromboxane est possible par le dosage de ses dérivés urinaires et plus particulièrement du 11 Déhydro-Thromboxane B2 (10).

Lors d'une plongée à saturation à grande profondeur, ce dosage devrait nous permettre d'évaluer la cinétique de l'activation plaquettaire.

2. METHODE:

Lors de la plongée HYDRA X nous avons collecté les urines de 24 heures à 8 reprises (2 lors de la compression, 4 lors de la décompression et 2 prélèvements de référence).

Les dates de prélèvements sont les suivantes:

A: du 1er au 2 novembre 1992

(entrée en caisson)

B: du 8 au 9 novembre 1992

(phase de compression: 450m, Hydréliox)

C: du 15 au 16 novembre 1992

(phase de compression: de 600 à 620m, Hydréliox)

D: du 29 au 30 novembre 1992

(phase de décompression: de 430 à 400m, Hydréliox)

E: du 3 au 4 décembre 1992

(phase de décompression: 300m, Héliox)

F: du 8 au 9 décembre 1992

(phase de décompression: de 175 à 150m, Héliox)

G: du 13 au 14 décembre 1992

(sortie du caisson)

H: du 18 au 19 janvier 1993

(contrôle)

Les recueils sont effectués dans des bidons de 5 litres dans lequel est au préalable, placé un anti-oxydant (le Butylhydroxytoluène).

Après quantification des urines deux échantillons de 20cc sont prélevés puis congelés à -30°C.

Les dosages de la 11 Déhydro-Thromboxane B2 sont pratiqués dans le laboratoire du Dr BORDET (Laboratoire d'hémobiologie, Faculté de Médecine de LYON).

3. RESULTATS (Voir graphiques):

3.1. Diurèses de 24h :

Les courbes de diurèse révèlent une polyurie lors de la compression (nette à 450 mètres). La diurèse minimale est retrouvée lors de la décompression à 430 mètres, les diurèses de 24 heures restent par la suite stables aux alentours de 1700ml.

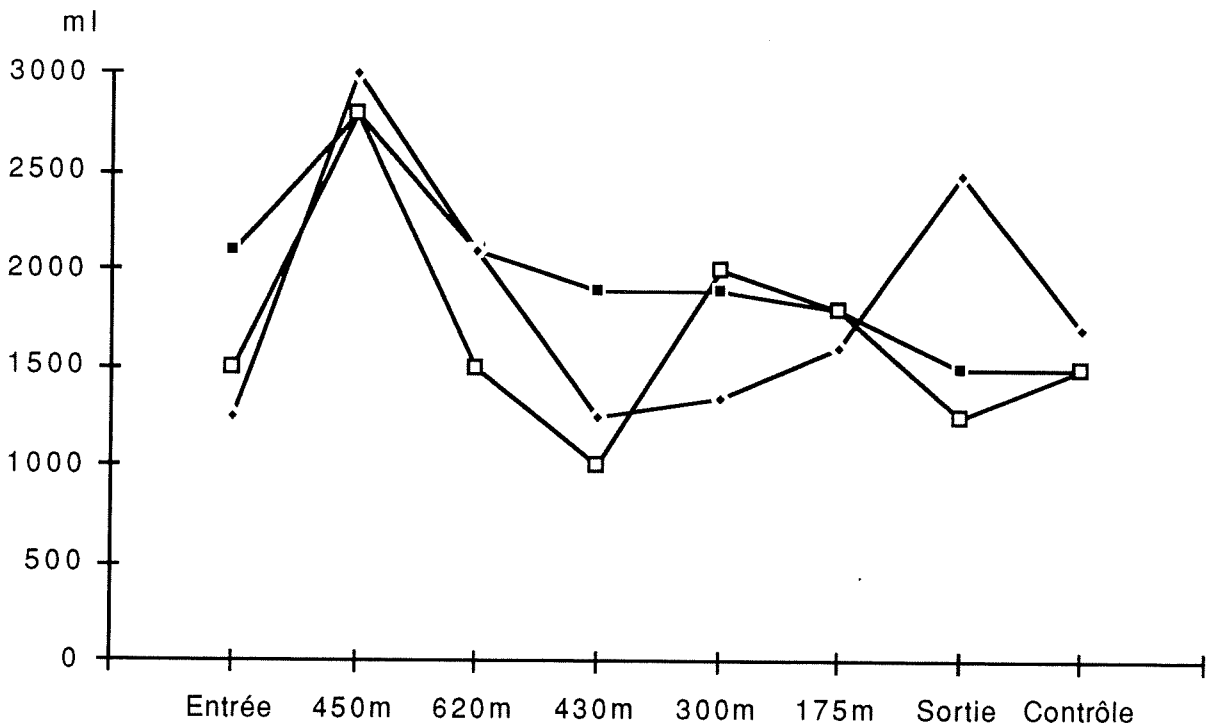
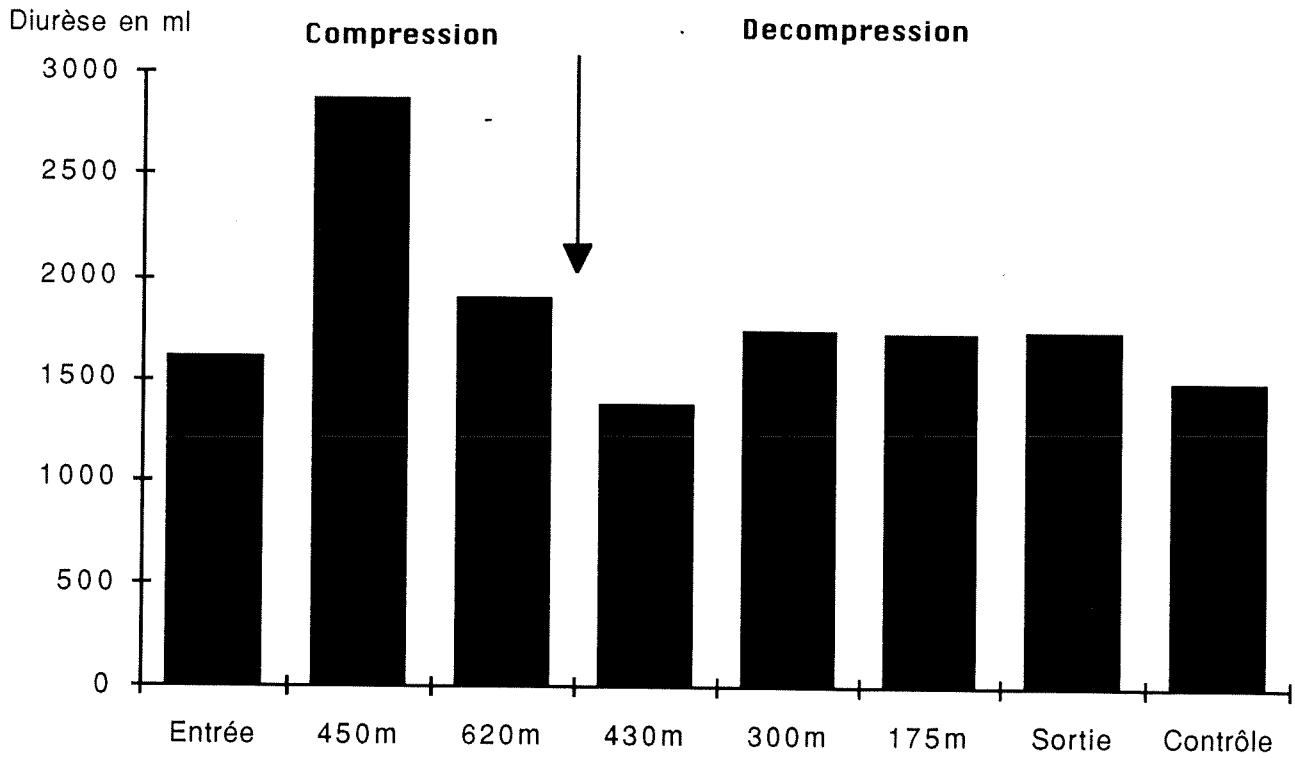
3.2. 11 Déhydro-Thromboxane B2 urinaire:

Le dosage du 11 Déhydro-Thromboxane B2 (en ng/24h) montre chez deux plongeurs sur trois (plongeurs 1 et 2) une valeur maximale lors du prélèvement effectué à la profondeur de 620 mètres. Le troisième plongeur (plongeur 3) a par contre à ce niveau un taux similaire au dosage de référence en surface.

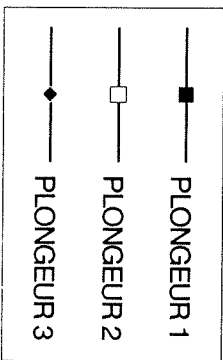
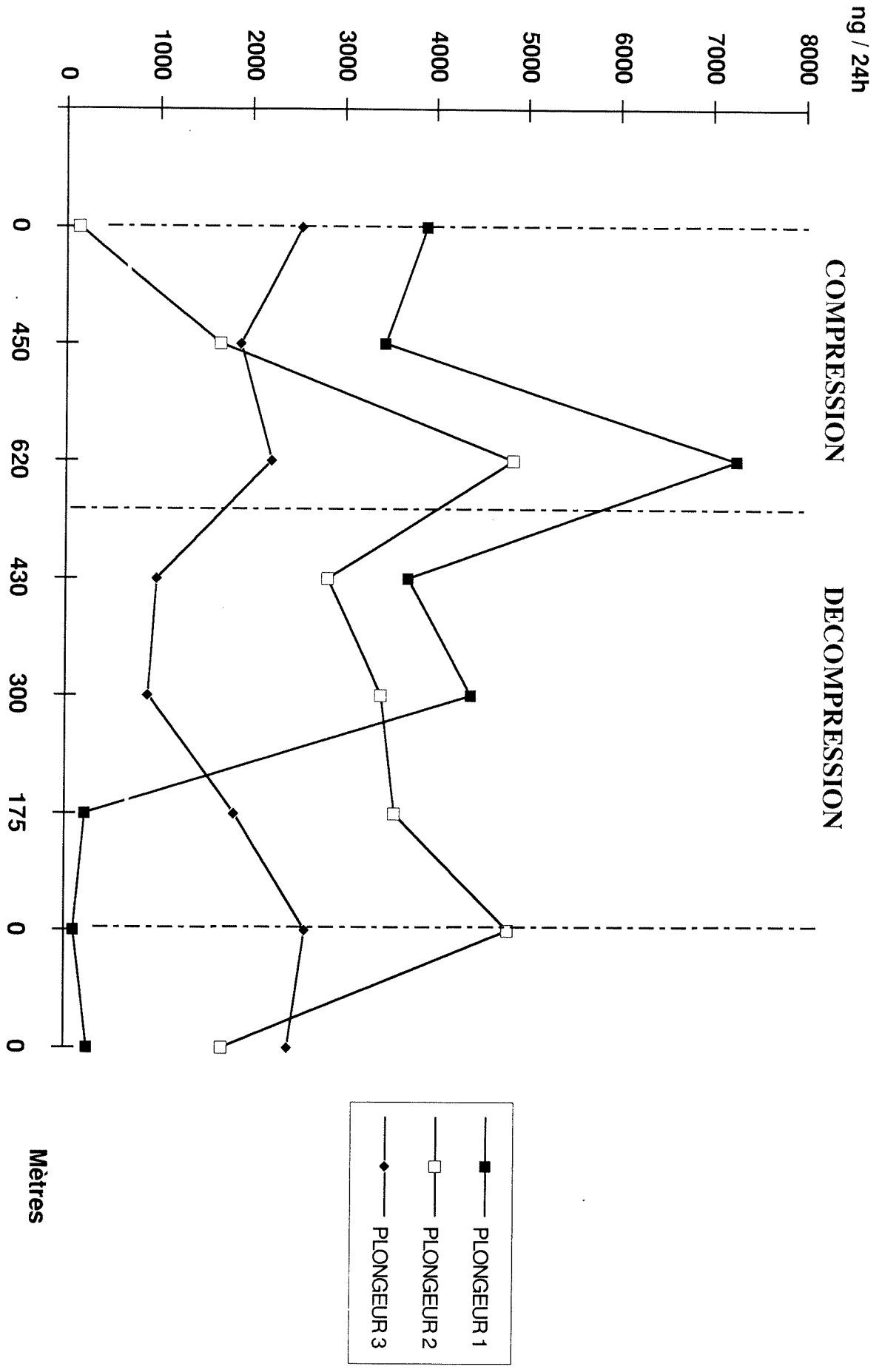
Le premier prélèvement effectué lors de la décompression retrouve un taux nettement inférieur par rapport à celui effectué à la profondeur maximale chez les trois plongeurs.

Par la suite les plongeurs 2 et 3 ont un taux qui s'élève progressivement et atteint son maximum à l'arrivée en surface. Le plongeur 1 a par contre une baisse très nette des valeurs de 11 Déhydro-Thromboxane B2 pendant la décompression.

DIURESES DES 24 HEURES



11-DEHYDRO-THROMBOXANE B2 URINAIRE



Mètres

4. DISCUSSION

Une augmentation de la diurèse des trois plongeurs est notée lors du prélèvement effectué à 450 mètres en compression.

Cette polyurie hyperbarique a été retrouvée par plusieurs équipes lors de plongées à saturation quel que soit le mélange respiratoire utilisé (Héliox, Trimix) (2), (4).

Des dosages hormonaux ont permis d'attribuer cette polyurie à une diminution de la sécrétion d'hormone anti diurétique.

Après un séjour hyperbare prolongé il est fréquemment observé une chute de la numération plaquettaire (6).

Elle a pu être vérifiée aux décours de l'expérience HYDRA X où les trois plongeurs ont présenté une baisse variable de 6 à 39%.

La cinétique de la baisse plaquettaire a été étudiée lors de plusieurs plongées expérimentales :

- MOON (5) a retrouvé une chute plaquettaire maximale au début de la décompression d'une plongée à saturation à 450 mètres.

- Lors de l'expérience HYDRA V à la COMEX la numération plaquettaire était minimale lors de la décompression à 450 et à 200 mètres, elle remontait à 20 mètres (1).

La diminution de la numération plaquettaire a été attribuée aux bulles circulantes, produites lors de la décompression, qui favoriseraient leur agrégation (7), (9).

La courbe des dérivés urinaires du Thromboxane établie lors de la plongée HYDRA X évoque une dégradation maximale en fin de compression (620 mètres).

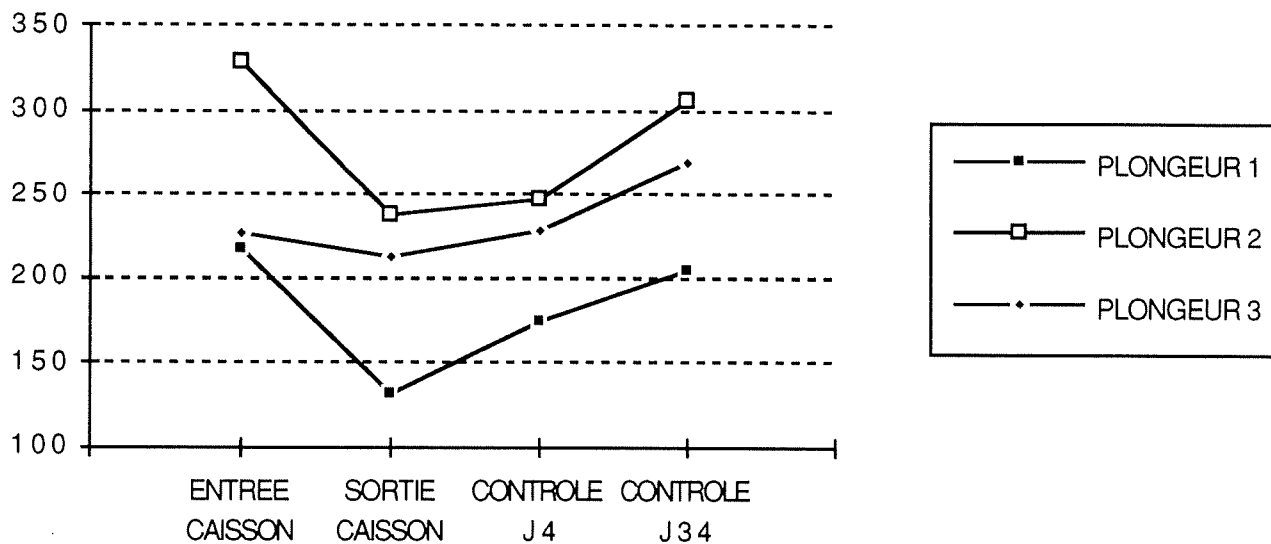
Les causes de cette dégradation restent à éclaircir, en effet des études in vitro ont, au contraire, montré que l'exposition de plaquettes à des pressions élevées diminuait leur potentiel d'agrégabilité (8).

Durant la décompression, l'augmentation progressive de la concentration en dérivés urinaires du Thromboxane, notée chez deux plongeurs, évoque une consommation plaquettaire croissante.

Les bulles produites lors de la décompression sont de tailles variables (3) et seules celles supérieures à 50 microns sont détectées par le doppler.

Bien que les scores de bulles dépistés par le doppler ne soient pas corrélés avec les dosages urinaires des dérivés du Thromboxane une dégradation plaquettaire secondaire à des microbulles silencieuses ne peut être écartée.

NUMERATION PLAQUETTAIRE ($10^9/l$)



| | ENTREE | SORTIE | % de Baisse |
|------------|--------|--------|-------------|
| PLONGEUR 1 | 217 | 132 | 39 |
| PLONGEUR 2 | 329 | 238 | 28 |
| PLONGEUR 3 | 227 | 213 | 6 |

SCORE DOPPLER ET 11 DEHYDRO-THROMBOXANE B2 urinaire

| | 450m | 300m | 160m | sortie |
|-----------------------|------|------|------|--------|
| PLONGEUR 1 | 0 | 0 | ++ | 0 |
| 11 DH TBX B2 (ng/24h) | 3699 | 4389 | 220 | 110 |
| PLONGEUR 2 | + | + | ++ | 0 |
| 11 DH TBX B2 | 2828 | 3405 | 3554 | 4799 |
| PLONGEUR 3 | + | + | ++ | 0 |
| 11 DH TBX B2 | 981 | 889 | 1820 | 2592 |

5. CONCLUSION

Le dosage urinaire des dérivés du Thromboxane est un moyen simple d'appréciation de l'état d'activation plaquettaire.

Nos résultats sur les trois plongeurs d'HYDRA X évoquent une activation plaquettaire maximale lors de la compression à 620 mètres.

La baisse de la numération plaquettaire observée au décours de la plongée ne semble donc pas devoir être uniquement attribuée aux bulles circulantes produites lors de la décompression.

De nouvelles études devraient nous permettre de préciser la cinétique de la dégradation plaquettaire lors des plongées à saturation et donc de mieux appréhender sa physiopathologie.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BARET A, COURTIERE A, VERDIER M, PERAZZA G
Etude de paramètres biochimiques au cours d'une plongée fictive à saturation en mélange hélium oxygène (HYDRA V)
Rapport final COMEX: 10-1/10-8
- 2) GOLDINGER JM, HONG SK, CLAYBAUGH JR, NIU AKC, GUTMAN SI, MOON RE, BENNETT PB
Renal responses during a dry saturation dive to 450 msw
Undersea Biomed. Res. 1992; 19 (4): 287-293
- 3) HILLS BA, BUTLER BD
Size distribution of intravascular air emboli produced by decompression
Undersea Biomed. Res. 1981; 8 (3): 163-170
- 4) HONG SK, CLAYBAUGH JR, FRATTALI V, JOHNSON R, KURATA F, MATSUDA M, Mc DONOUGH AA, PAGANELLI CV, SMITH RM, WEBB P
Hana Kai II: a 17 day dry saturation dive at 18,6 ATA. III. Body fluid balance
Undersea Biomed. Res. 1977; 4 (3): 247-265
- 5) MOON RE, FAWCETT TA, EXPOSITO AJ, CAMPORESI EM, BENNETT PB, HOLTHAUS J
Platelet count in deep saturation diving
Undersea Biomed. Res. 1992; 19 (4): 279-286
- 6) PHILP RB, FREEMAN D, FRANCEY I, ACKLES KN
Changes in platelet function and other blood parameters following a shallow open-sea saturation dive
Aerospace Med. 1974; 45 (1): 72-76
- 7) PHILP RB, SCHACHAM P, GOWDEY CW
Involvement of platelets and microthrombi in experimental decompression sickness: Similarities with disseminated intravascular coagulation
Aerospace Med. 1971; 42 (5): 494-501
- 8) PRICE RA, OGSTON D, McDONALD AG
Effects of high pressure on platelet aggregation in vitro
Undersea Biomed. Res. 1986; 13 (1): 63-75

9) THORSEN T, DALEN H, BJERKVIG R, HOLMSEN H

Transmission and scanning electron microscopy of N₂ microbubble-activated human platelets in vitro

Undersea Biomed. Res. 1987; 14 (1): 45-59

10) WESTLUND P, GRANSTROM E, KUMLIN M, NORDENSTROM A

Identification of 11-Dehydro-TXB₂ as a suitable parameter for monitoring thromboxane production in the human

Prostaglandins 1986; 31: 929-960

ANNEXES

DIURESES DES 24 HEURES

* **PRELEVEMENT A:** Du 1er au 2 Novembre 1992

Entrée en caisson
Plongeur 1: 2100 ml
Plongeur 2: 1500 ml
Plongeur 3: 1250 ml

* **PRELEVEMENT B:** Du 8 au 9 Novembre 1992

Phase de compression: 450 mètres
Plongeur 1: 2800 ml
Plongeur 2: 2800 ml
Plongeur 3: 3000 ml

* **PRELEVEMENT C:** Du 15 au 16 Novembre 1992

Phase de compression: de 600 à 620m
Plongeur 1: 2100 ml
Plongeur 2: 1500 ml
Plongeur 3: 2100 ml

* **PRELEVEMENT D:** Du 29 au 30 Novembre 1992

Phase de décompression: de 430 à 400m
Plongeur 1: 1900 ml
Plongeur 2: 1000 ml
Plongeur 3: 1250 ml

* **PRELEVEMENT E:** Du 3 au 4 Décembre 1992

Phase de décompression: 300m
Plongeur 1: 1900 ml
Plongeur 2: 2000 ml
Plongeur 3: 1350 ml

* **PRELEVEMENT F:** Du 8 au 9 Décembre 1992

Phase de décompression: de 175 à 150m

Plongeur 1: 1800 ml

Plongeur 2: 1800 ml

Plongeur 3: 1600 ml

* **PRELEVEMENT G:** Du 13 au 14 Décembre 1992

Sortie

Plongeur 1: 1500 ml

Plongeur 2: 1250 ml

Plongeur 3: 2500 ml

* **PRELEVEMENT H:** Du 18 au 19 Janvier 1993

Contrôle

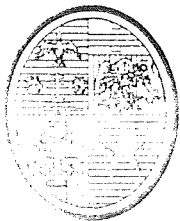
Plongeur 1: 1500 ml

Plongeur 2: 1500 ml

Plongeur 3: 1700 ml

11 DEHYDRO-THROMBOXANE B2 urinaire (ng/24h)

| METRES | PLONGEUR 1 | PLONGEUR 2 | PLONGEUR 3 |
|--------|------------|------------|------------|
| 0 | 3894 | 140 | 2544 |
| 450 | 3442 | 1655 | 1879 |
| 620 | 7257 | 4848 | 2215 |
| 430 | 3699 | 2828 | 981 |
| 300 | 4389 | 3405 | 889 |
| 175 | 220 | 3554 | 1820 |
| 0 | 101 | 4799 | 2592 |
| 0 | 249 | 1699 | 2406 |



Professeur JEAN-LOUIS GASTAUT

SERVICE DE NEUROLOGIE

Marseille le, 26 Mars 1993

Bilan neurologique des Aquanautes d'Hydra X

Un examen neurologique complet a été réalisé avant puis après l'opération hydra X le même jour où était effectué le bilan neuropsychologique. Monsieur Régis Peilho a donc été examiné une première fois le 16 juin 1992 puis, au décours de l'opération Hydra X le 8 Janvier 1993. Messieurs Serge Icart et Théophile Mavrostomos ont été examinés une première fois le 6 Octobre 1992 puis, au décours de l'opération Hydra X, le 8 Janvier 1993. Chez ces 3 sujets l'examen neurologique ayant notamment permis d'évaluer les fonctions motrices, sensitives, les réflexes ostéo-tendineux et cutanés, le tonus, la coordination, les différentes paires crâniennes... s'est avéré strictement normal aussi bien avant qu'après la plongée profonde à laquelle ils avaient participé.

Le premier bilan neuropsychologique qui a été effectué comprenait des épreuves: de mémoire, d'attention et d'efficacité intellectuelle globale; à l'issue de ce premier examen on n'a pu que constater le bon état de fonctionnement cognitif des trois plongeurs .

Le bilan de contrôle effectué au moyen des mêmes épreuves et d'un test supplémentaire le Wisconsin Card Sorting Test (WCST) , ne montre pas de modifications sensibles des performances, dans le sens d'une altération de celles-ci, on n'a pas relevé d'erreurs de type organique . Dans l'ensemble les performances se situent dans les normes pour leur tranche d'âge et le niveau socio-culturel .

Le WCST ne montre pas d'éléments de type frontal .

L'anxiété à l'échelle d'auto-évaluation de SPIELBERGER est absente .

Brigitte Chave-Rovini
Psychologue

Jean-Louis Gastaut
Neurologue

Assistance Publique - Hôpitaux de Marseille

Imp. APM - 149

Th. Mavr. / R. Pei. / S. Ica

| | 1°bilan | 2°bilan | 1°bilan | 2°bilan | 1°bilan | 2°bilan |
|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| Peg MD | 13 /12 | 15 /14 | 14 /14 | 16 /15 | 19 /16 | 16 /15 |
| MG | 13 /12 | 13 /15 | 12/12 | 15 /14 | 15 /16 | 14 /15 |
| 2M | 10 /10 | 9 / 11 | 13 /14 | 12 /13 | 14 /13 | 15 /14 |
| total | 33 /34 | 37/40 | 39 /40 | 43 /42 | 48 / 45 | 45 / 44 |
| TMTA | 30 | 35 | 30 | 45 | 20 | 20 |
| TMTB | 65 | 70 | 65 | 58 | 60 | 60 |
| Fluence A | 20 | 20 | 28 | 31 | 16 | 22 |
| M | 16 | 19 | 13 | 10 | 17 | 15 |
| SPAN | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Rey copie | 35 | 35 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Rey mém | 28 | 27 | 25 | 28 | 21 | 29 |
| Cubes | 36 | 41 | 34 | 35 | 46 | 45 |
| Simili | 22 | 23 | 24 | 23 | 21 | 24 |
| Arithm | 16 | 16 | 16 | 17 | 16 | 16 |
| WMS im | 16 | 17 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Wms dif | 17 | 15 | 14 | 11 | 15 | 15 |
| anxiété | XXXXXX | 45 | XXXXXX | 38 | XXXXXX | 45 |
| WCST | XXXXXX | 0 erreurs | XXXXXX | 0 erreurs | XXXXXX | 0 erreurs |

Quelques seuils :

- TMT A 45 secondes max
- TMT B 87 " "
- Fluence A limite inférieure 13
M " " 7
- Purdue Pegboard : variable selon le niveau socio-culturel
(barre inf. 33)
- REY copie moyenne = 32 \pm 1,8
mémoire = 22 \pm 4,9
- WMS rappel d'une histoire max 24 éléments
- Cubes max 51
- Similitudes max 28
- Arithmétique max 19

**INCIDENCE DE LA PLONGEE HYDRA X SUR
LA FONCTION RESPIRATOIRE, LE
METABOLISME ERYTHROCYTAIRE ET LA
TOLERANCE A L'EXERCICE MUSCULAIRE.**

P. VANUXEM ; D. VANUXEM ; M. BADIER ; S. DELPIERRE ; C.
GUILLOT ; E. FORNARIS.

Laboratoire d'Exploration de la Fonction Respiratoire et du Métabolisme
Musculaire
Hôpital Sainte-Marguerite, 270 Bd de Ste Marguerite,
13009 MARSEILLE

Les 3 plongeurs ont été vus à 3 reprises :

- pré plongée : le 05-10-1992,
- sortie : le 14-12-1992, environ 7 heures après la sortie du caisson,
- post-plongée : le 05-01-1993.

LES EXAMENS SUIVANTS ONT ETE REALISES :

1° - Exploration de la Fonction Respiratoire :

- Spirométrie et détermination de la Capacité Résiduelle Fonctionnelle (CRF) par la technique de dilution à l'hélium.
- Gazométrie sur sang capillaire artérialisé.
- Test de diffusion alvéolo-capillaire (TLCO) par la technique de l'apnée.
- Résistances des voies aériennes (Rva).
- Pente de l'azote, étude du volume de fermeture et de la capacité de fermeture.
- Test de provocation au carbachol avec étude de l'évolution des résistances des voies aériennes (Rva).

2° - Etude du métabolisme érythrocytaire :

- Concentrations érythrocytaires des phosphates organiques : Adénosine Triphosphate (ATP) et 2,3 - Diphosphoglycérate (2,3 - DPG).
- Propriétés fonctionnelles de l'hémoglobine, avec détermination de la P50 sur sang total et sur l'échantillon sanguin après déplétion en 2,3 - DPG, obtenue par un séjour de 24 heures au bain-marie à 37 °C (P50 DPG : 0).
- Concentration en hémoglobine (Hb), taux d'hématocrite (Hct) et saturation carboxyhémoglobinée (HbCO).

3° - Epreuve d'effort maximal sur cyclo-ergomètre :

Après une période de pédalage à vide de deux minutes, les charges sont augmentées de 30 Watts toutes les deux minutes, jusqu'à ce que la fréquence cardiaque maximale théorique ($220 - \text{âge}$) soit atteinte, ou qu'un facteur limitant impose l'arrêt de l'épreuve (hypertension artérielle, épuisement du sujet ...).

Trois groupes de paramètres sont étudiés :

- Paramètres cardio-vasculaires : fréquence cardiaque (Fc), pression artérielle (PA), pouls d'oxygène ou volume d'O₂ délivré par systole.

- Paramètres ventilatoires : évolution de la consommation d'O₂ (VO₂) en fonction de la charge et détermination de VO₂ max. Evolution du quotient respiratoire ($R = \text{VCO}_2/\text{VO}_2$) en fonction de la charge. Augmentation du volume expiré (VE) en fonction de VO₂, avec détermination du seuil ventilatoire, évolution du volume courant (VT) et de la fréquence respiratoire (FR).

- Paramètres métaboliques : cinétiques de lactatémie et d'ammoniémie.

FONCTION VENTILATOIRE AU REPOS

I/ PROPRIETES MECANQUES

Les résultats individuels des trois plongeurs figurent sur les tableaux I, II et III.

Il faut souligner en pré-plongée, les valeurs élevées de la capacité vitale (CV) et du VEMS par rapport aux valeurs normales utilisées (Tables CECA). Cette remarque a été faite par plusieurs auteurs (CLIFFORD - CROSBIE - DAVEY). Cette modification peut être attribuée à un véritable entraînement des muscles respiratoires, lié à l'augmentation du travail respiratoire (THORSEN).

Le séjour en ambiance hyperbare n'entraîne pas de variation significative de la CV chez les trois plongeurs : l'effet "entraînement" pouvant être contrebalancé par l'effet toxique de l'oxygène, mais PUY a montré que pour des pressions partielles en oxygène ambiantes inférieures à 50 KPa (375 mmHg), il n'y a pas de réduction significative de CV.

Les débits maximaux expirés sont diminués à la sortie chez deux plongeurs (RP et SI) et le rapport de Tiffeneau (VEMS/CV) devient inférieur à la limite normale (fig.1). Dans les deux cas, l'examen ultérieur montre pour ce rapport, des valeurs plus élevées, sans atteindre toutefois les valeurs initiales en particulier chez R.P. Chez ce dernier s'ajoute une diminution des débits à bas volumes, comme en témoigne la diminution de 35 % du DEMM 75-25.

La limitation des débits expiratoires en ambiance hyperbare est d'observation classique. Elle est essentiellement liée à l'augmentation de la densité du mélange inhalé, entraînant un collapsus dynamique expiratoire des voies aériennes (LUND GREN), et pour WOOD (1976) le débit expiratoire effort - indépendant (DEMM 75-25) devient progressivement plus faible quand la densité du gaz inhalé augmente. Dans le cas présent, il n'a pas été effectué de mesure des débits ventilatoires pendant le séjour en ambiance hyperbare, ce qui rend hypothétique l'interprétation de la réduction des débits expiratoires maximaux en période post-hyperbare.

La diminution du DEMM 75-25 pourrait être le témoin d'un oedème interstitiel par altération de la perméabilité vasculaire liée à la phase de décompression, car selon ELLIOTT, des microbulles emboliques seraient fréquemment dans les capillaires pulmonaires sans entraîner de

signes cliniques. Un autre témoin de cet oedème interstitiel étant l'augmentation du volume de fermeture ; seul TM (Tableau II) présente une augmentation isolée de 29 % de la capacité de fermeture (CF/CRF), mais ANTHONISEN souligne la variabilité des mesures du VF chez le sujet normal, donc pas d'interprétation hâtive.

Une augmentation significative de la CRF (+19%) et du volume expiratoire de réserve (VER + 67 %) existe chez RP (fig.7).

II/ DIFFUSION ALVEOLO-CAPILLAIRE (TLCO)

Les résultats des trois plongeurs figurent sur le tableau IV.

Un seul plongeur (RP) présente une diminution du test de transfert : le rapport TLCO/VA est 15 % plus bas en post-plongée et devient inférieur à la limite normale (fig.8).

Deux hypothèses peuvent être envisagées pour essayer d'expliquer cette modification :

1°/ Une atteinte réelle de la membrane alvéolo-capillaire (GUENARD). L'hyperoxie peut entraîner une dégénérescence progressive évoluant en deux phases : 1) - une phase aiguë exsudative avec oedème alvéolaire, exsudat fibrineux, destruction des cellules endothéliales et des cellules alvéolaires épithéliales de type I ; cette phase est complètement réversible. 2) - une phase proliférative sub-aiguë avec fibrose interstitielle, prolifération fibro élastique, hyperplasie des cellules épithéliales alvéolaires de type II. Cette phase est plus lentement réversible et peut entraîner des lésions permanentes des poumons (KAPANCI - KAPLAN - CLARK et LAMBERTSEN).

2°/ Des modifications du rapport ventilation/perfusion consécutives à des modifications de la distribution gazeuse, à rapprocher de l'altération des débits vue précédemment chez le même plongeur (RP).

III/ TEST DE PROVOCATION AU CARBACHOL

Les résultats sont présentés sur les fig. 9,10 et 11.

Les trois plongeurs présentaient un test positif lors de l'examen de pré-plongée : à 400 γ , les Rva augmentent de 300 % chez SI et TM, de 100% chez R.P.

En post-plongée, la réactivité bronchique est inchangée chez TM et RP, et diminue considérablement chez SI. Des tests allergologiques ont montré chez ce dernier une hyper-sensibilité au graminées.

Pour les deux autres plongeurs, il est difficile argumenter actuellement ces résultats. Il est évident que ces sujets subissent certainement des contacts répétés avec des substances irritantes (peintures), mais une enquête allergologique et des explorations suivies s'imposent. La diminution significative de la réactivité bronchique en post plongée chez SI peut s'expliquer par la disparition de l'allergène (graminées) pendant deux mois, mais des variations spontanées peuvent parfois se rencontrer.

IV/ TRANSPORT DE L'OXYGENE ET METABOLISME ERYTHROCYTAIRE (tableau V).

Il n'existe aucune modification significative des pressions partielles en oxygène (PaO₂) et en gaz carbonique (PaCO₂), et du pH plasmatique (pH) après la plongée.

La diminution de la concentration en hémoglobine est observée chez deux plongeurs (SI fig. 12 et TM fig. 13). Chez le premier, la diminution est de 12 % et chez le second de 3 %, mais chez TM, il faut souligner que l'examen de pré-plongée a eu lieu 5 jours après la fin d'une plongée à saturation, et lors d'un examen précédent (mars 1992), la concentration en hémoglobine, certainement plus fiable, était de 13,9 g.dl⁻¹ ; dans ce cas, on pourrait alors estimer la diminution post-Hydra X à 10,7 %.

Cette diminution de l'hémoglobine peut être liée à une hémolyse accélérée.

La fragilisation des hématies peut être consécutive à l'hyperoxie (FISCHER, MENGELL) et plusieurs hypothèses ont été avancées : formation de peroxyde de lipides, déficit en vitamine E, inhibition de la phosphofructokinase (PFK) et de la glycéraldéhyde 3-phosphate déshydrogénase (GA 3PD)... ; la fragilisation des hématies pourrait être due également à l'action des gaz "neutres" sur les couches phospholipidiques de la membrane cellulaire, leur action sous pression est proche de la pression en elle-même (VARENE). On peut évoquer aussi une répression de l'érythropoïèse par l'hyperoxie (érythropoïétine), mais ce n'est sans doute pas la cause essentielle (FISCHER).

La concentration érythrocytaire en 2,3-DPG diminue également chez les deux mêmes plongeurs (SI et TM) ; cette diminution, surtout marquée chez SI (- 14,5 % - fig 14), pourrait s'expliquer par l'inhibition de l'activité PFK dont nous avons parlé plus haut. Chez SI, la concentration mesurée à la sortie, est inférieure à la limite normale.

Malgré cette diminution du 2,3-DPG, la valeur de P50 ne varie pas de façon significative chez SI et a même tendance à augmenter chez TM ; compte tenu de la valeur normale de P50 mesurée sur le sang après déplétion en DPG (P50 DPG : 0), seule une modification de la liaison DPG/Hb consécutive à l'hyperbarie, peut a priori expliquer l'évolution de P50, cette hypothèse a déjà été envisagée par BRAUER. Nous avons déjà fait cette remarque lors de la plongée HydraIX.

| | PRE | SORTIE | POST |
|--|-------------|-------------|--------------|
| CV (l) | 5.57 (123) | 5.08 (112) | 5.19 (114) |
| VEMS (l) | 4.52 (129) | 3.70 (132) | 4.97 (113) |
| VEMS/CV (%) | 81.1 (74.8) | 72.8 (74.6) | 76.3 (74.8) |
| VMM (l.min-1) | 169.5 | 138.7 | 148.4 |
| DEMM 75-25 (l.s-1) | 5.23 (145) | 3.38(103) | 4.15 (128.6) |
| TEM (sec) | 0.53 (0.77) | 0.75 (0.77) | 0.598 (0.77) |
| CRF (l) | 2.53 | 3.02 | 3.09 |
| VER (l) | 1.16 | 1.94 | 1.81 |
| VR (l) | 1.37 | 1.08 | 1.27 |
| CPT (l) | 6.94 (1.17) | 6.16 (104) | 6.46 (107) |
| VR/CPT (%) | 19.4 (27) | 17.5 (27) | 19.7 (27) |
| Rva (cmH ₂ O.l-1.s-1) | 2.92 | | 2.05 |
| Pente N2 (% FN ₂ .l-1CV) | 0.44 | | 0.43 |
| CF/CRF (%) | 83 | | 70 |
| CF/CPT (%) | 39 | | 39 |

| | PRE | SORTIE | POST |
|---------------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| CV (l) | 5.32 (126) | 5.17(116) | 5.03 (113) |
| VEMS (l) | 4.28 (132) | 4.17 (121) | 3.94 (110) |
| VEMS/CV (%) | 810.5 (74.8) | 80.6 (74.8) | 78.3 (74.8) |
| VMM (l.min-1) | 160 | 156 | 148 |
| DEMM 75-25 (l.s-1) | 4.03(116) | 4.01 (119) | 3.81 (119) |
| TEM (sec) | 0.66 (0.77) | 0.64 (0.77) | 0.64 (0.77) |
| CRF (l) | 2.70 | 2.53 | 2.51 |
| VER (l) | 1.34 | 1.13 | 1.36 |
| VR (l) | 1.36 | 1.39 | 1.14 |
| CPT (l) | 6.68 (122) | 6.56 (113) | 6.17 (106) |
| VR/CPT (%) | 20.0 (27) | 21.2 (27) | 18.5 (27) |
| Rva (cmH ₂ O.l-1.s-1) | 1.86 | | 1.42 |
| Pente N2 (%FN ₂ .l-1CV) | 0.55 | | 0.42 |
| CF/CRF (%) | 65 | | 84 |
| CF/CPT (%) | 32 | | 38 |

| | PRE | SORTIE | POST |
|--|-------------|-------------|-------------|
| CV (l) | 5.7 (104) | 5.77 (105) | 5.42 (98.5) |
| VEMS (l) | 4.24 (100) | 4.02 (95) | 3.92 (92.5) |
| VEMS/CV (%) | 74.5 (74.6) | 69.7 (74.6) | 72.3 (74.6) |
| VMM (l.min-1) | 159 | 150.7 | 146.9 |
| DEMM 75-25 (l.s-1) | 3.27 (89) | 3.13 (83.5) | 3.10 (88) |
| TEM (sec) | 0.87 (0.77) | 0.92 (0.77) | 0.87 |
| CRF (l) | 3.33 | 3.24 | 2.97 |
| VER (l) | 1.73 | 1.68 | 1.62 |
| VR (l) | 1.60 | 1.56 | 1.35 |
| CPT (l) | 7.30 (102) | 7.33 (102) | 6.77 (94.3) |
| VR/CPT (%) | 21.9 (27) | 21.3 (27) | 19.9 (27) |
| Rva (cmH ₂ O.l-1.s-1) | 1.63 | | 1.81 |
| Pente N2 (% FN ₂ .l-1CV) | 0.45 | | 0.54 |
| CF/CRF (%) | 78 | | 76 |
| CF/CPT (%) | 36 | | 36 |

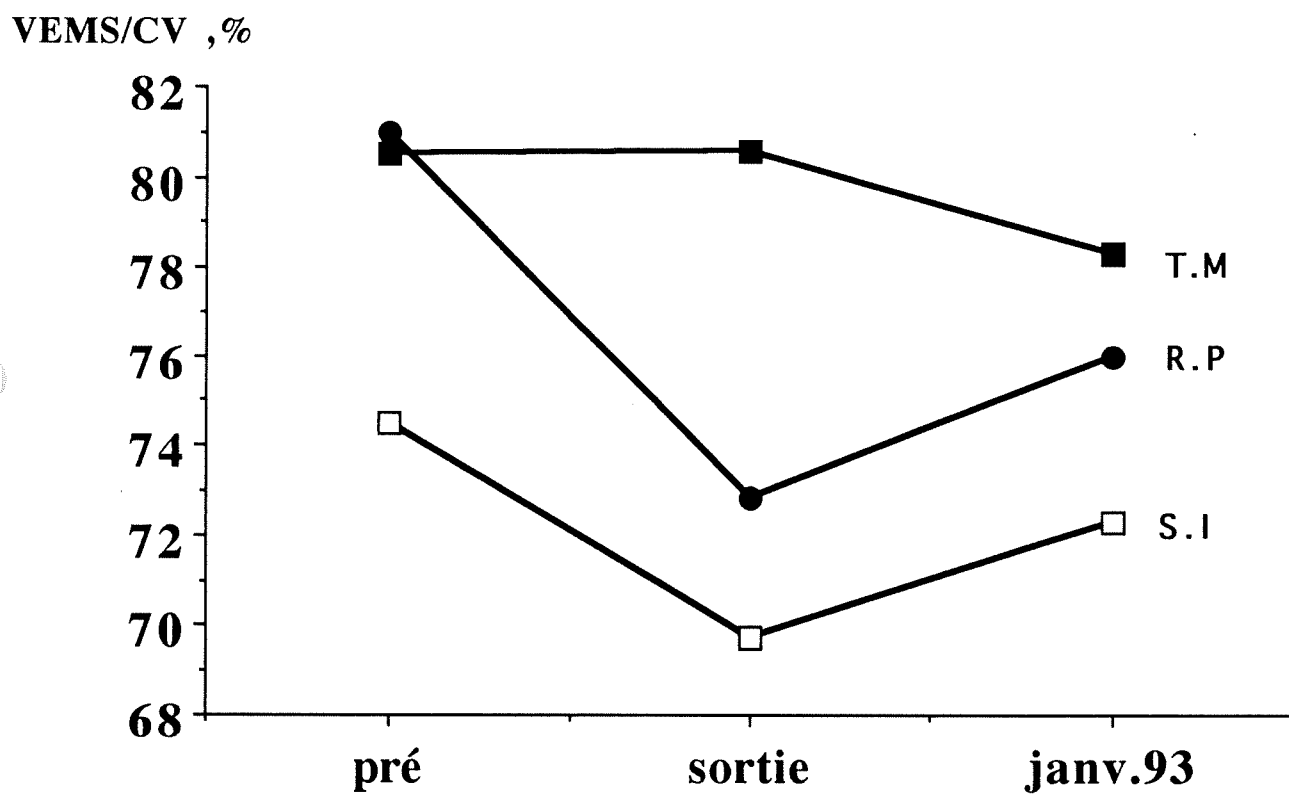


Fig.1

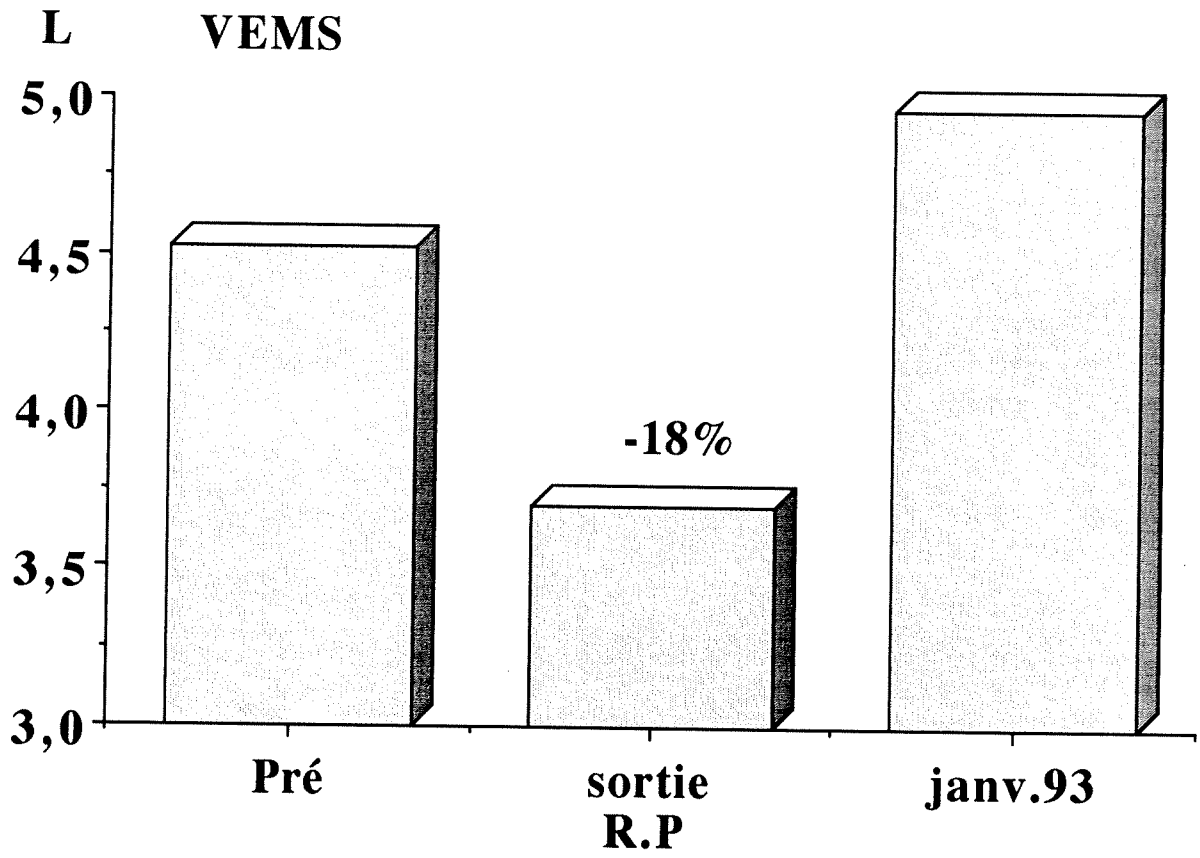


Fig.2

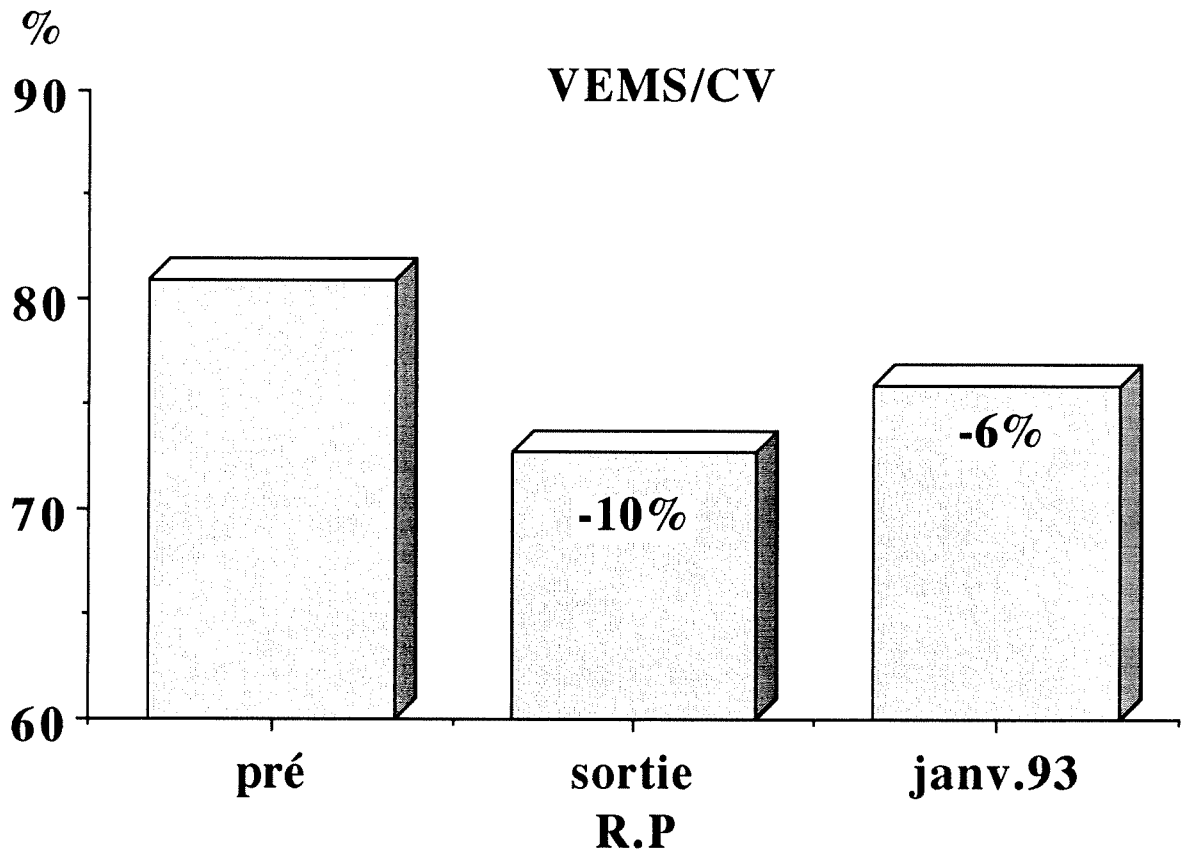


Fig.3

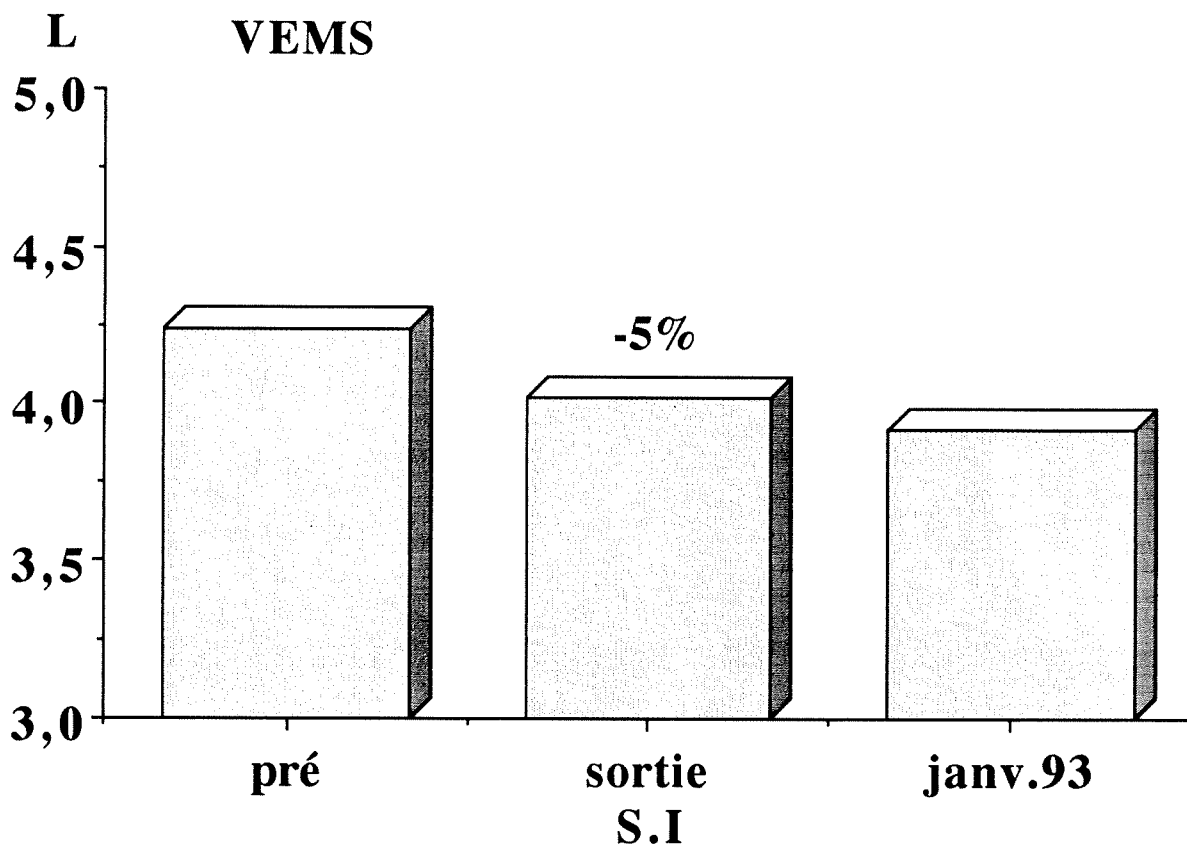


Fig.4

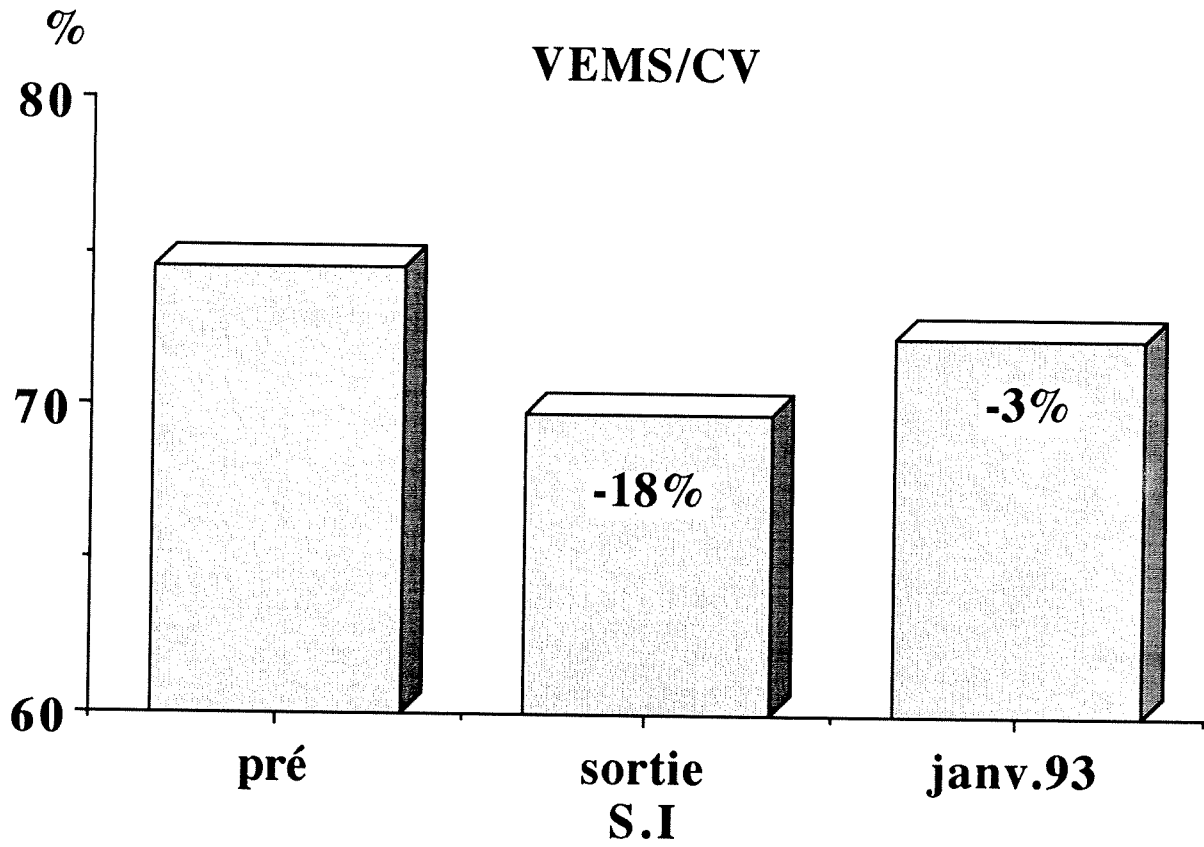


Fig.5

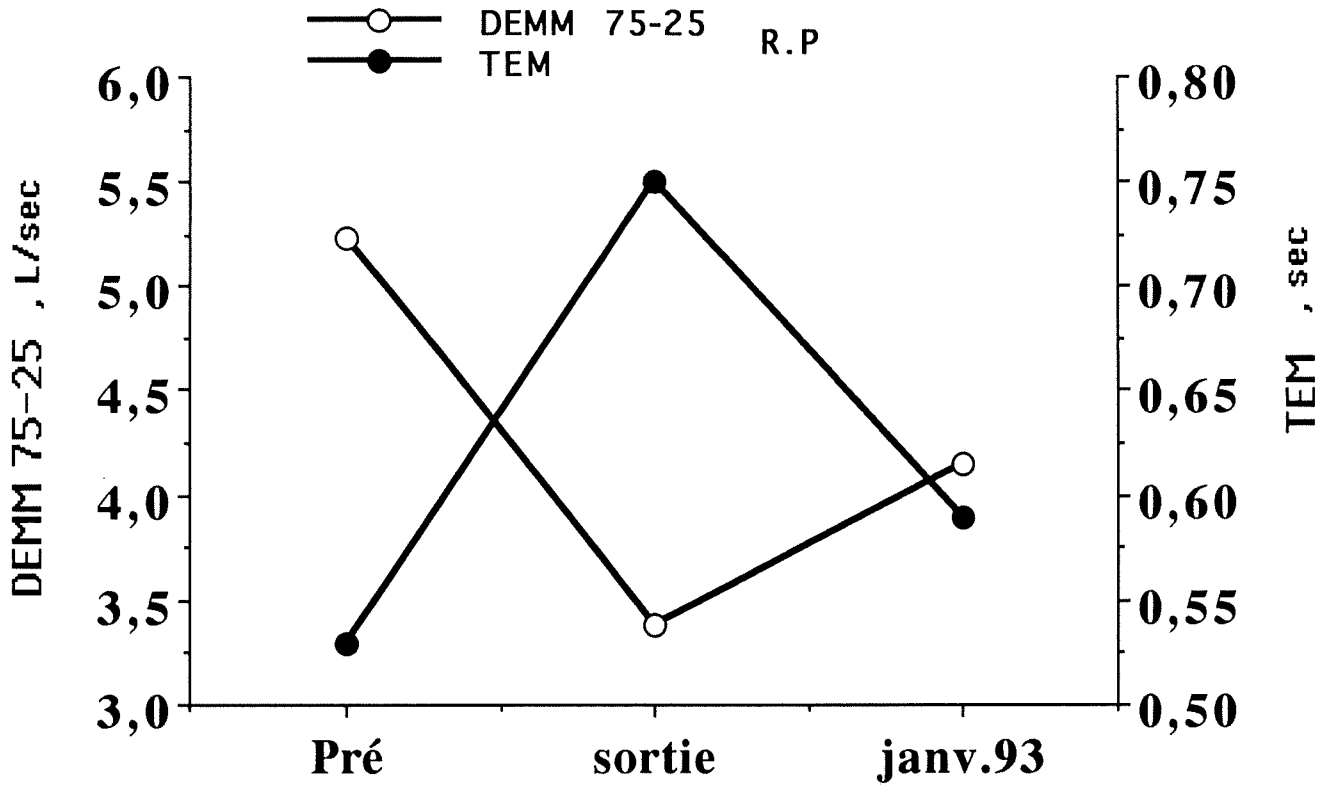


Fig. 6

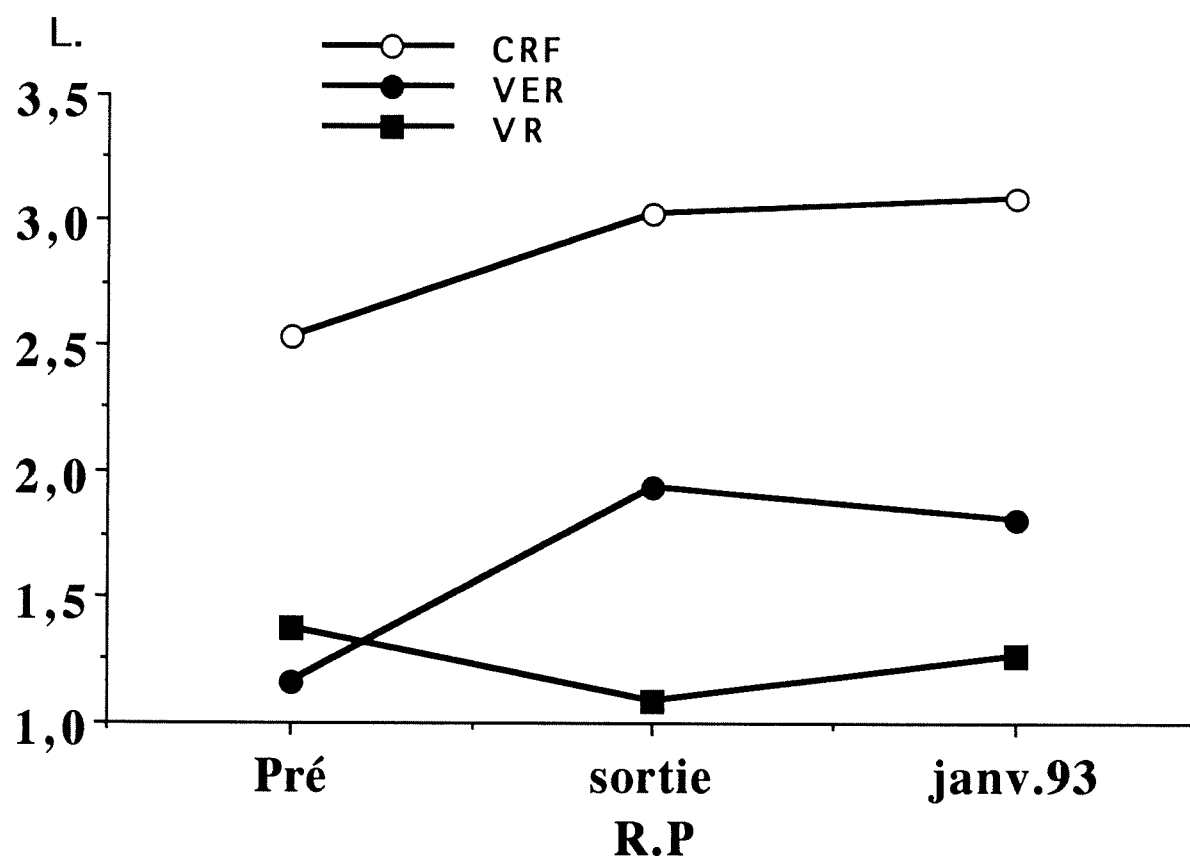


Fig.7

DIFFUSION ALVEOLO-CAPILLAIRE
exprimée par le rapport TLCO/VA

| | PRE | SORTIE | POST |
|--|------|--------|------|
| T.M | 5.17 | 4.98 | 5.30 |
| R.P | 4.25 | 3.58 | 4.37 |
| S.I | 4.93 | 4.63 | 4.70 |
| <u>LIMITE INFERIEURE NORMALE (AYERS)</u> | | | |
| 4.30 | | | |

TABLEAU IV

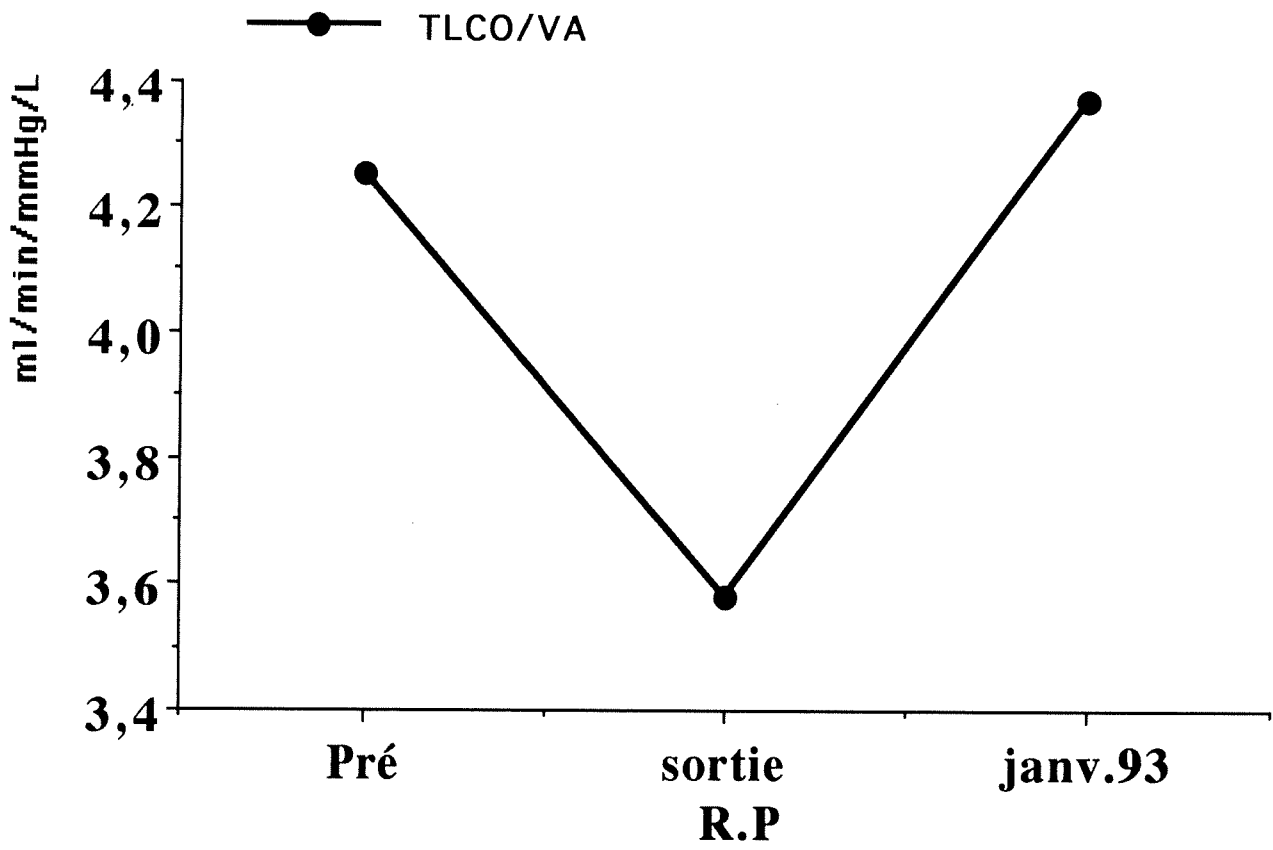


Fig. 8

SI

Test d'hyper-réactivité bronchique au CARBACHOL (dosimètre MFEAR)

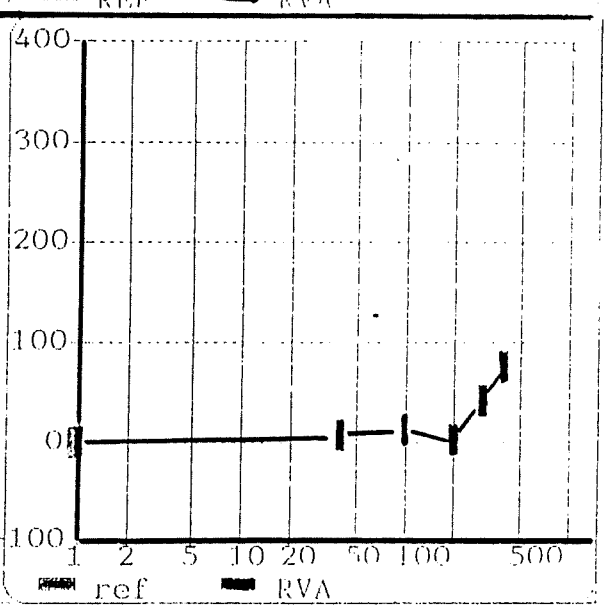
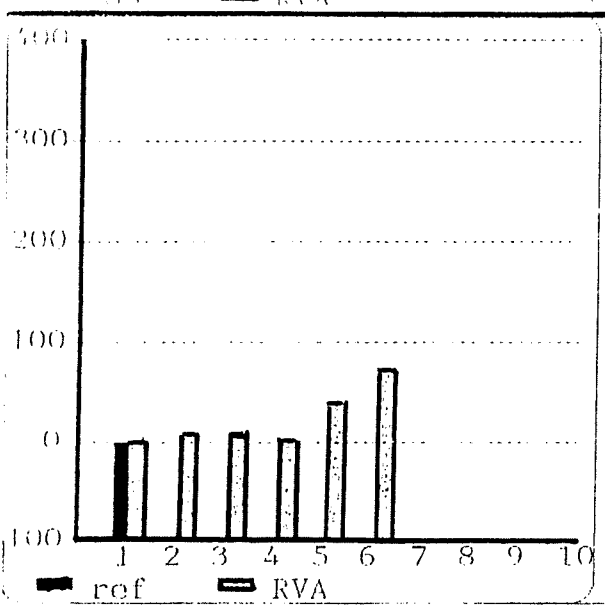
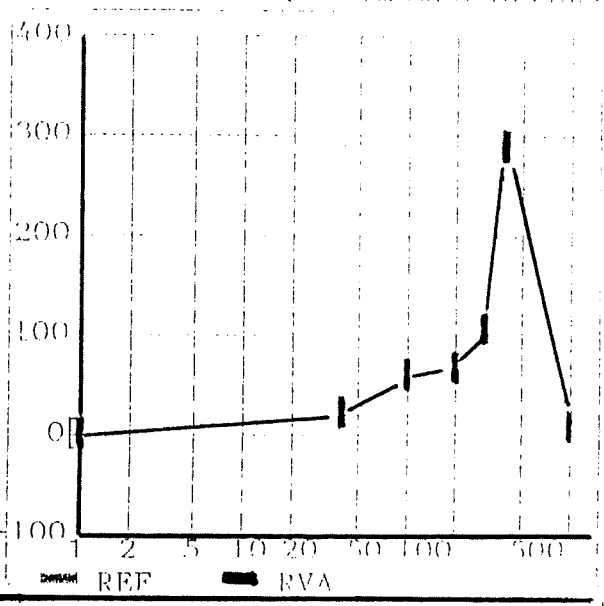
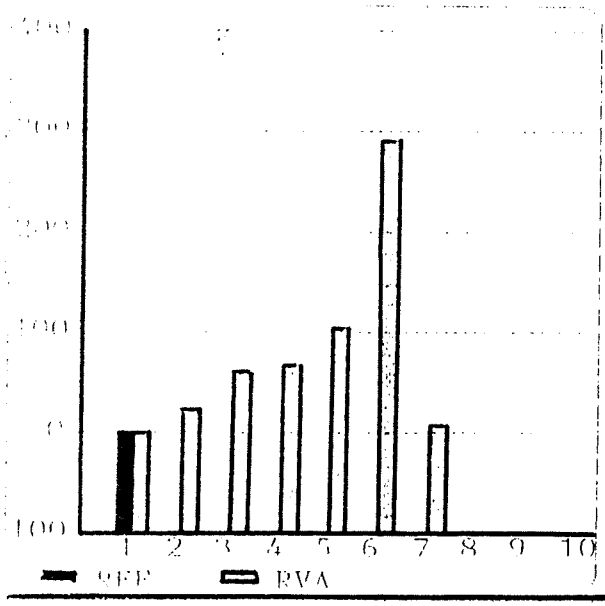


Fig. 9

TM

Test d'hyper-réactivité bronchique au CARBACHOL (dosimétrie MEFAR)

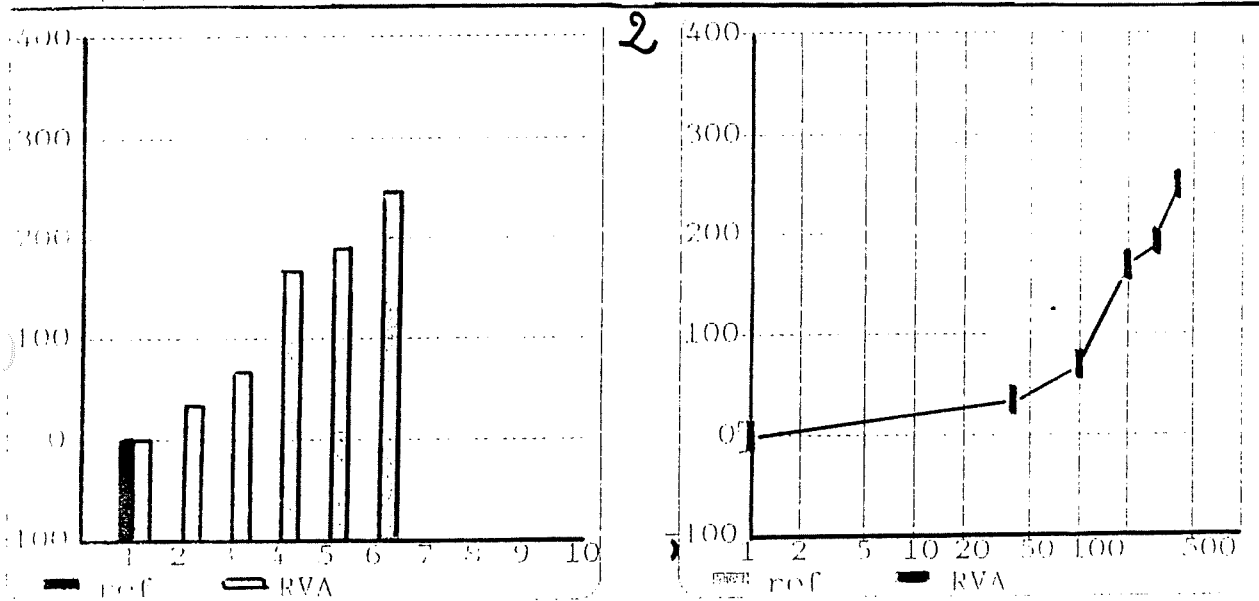
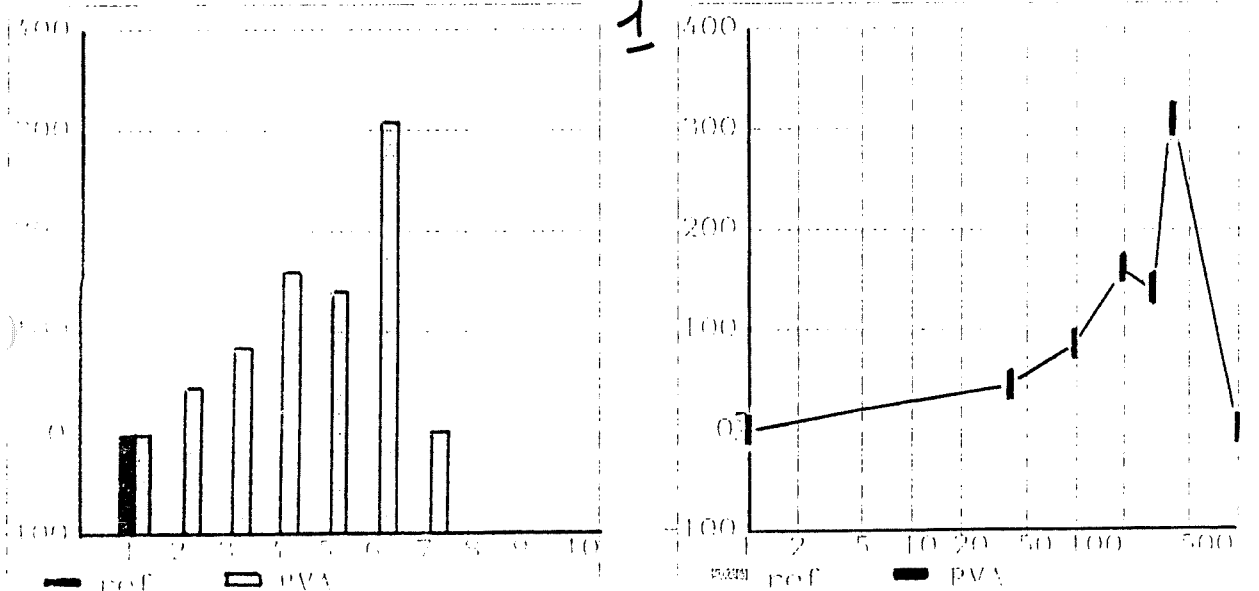


Fig:10

RP

test d'hyper-réactivité bronchique au CARBACHOL (dosages: MEFAR)

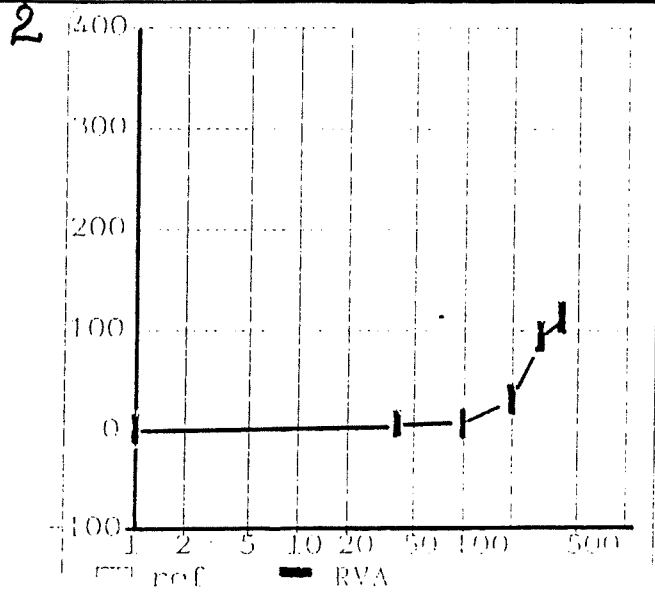
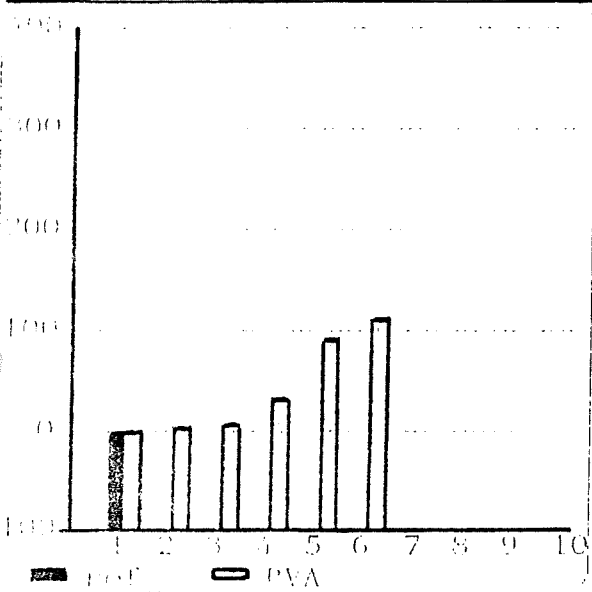
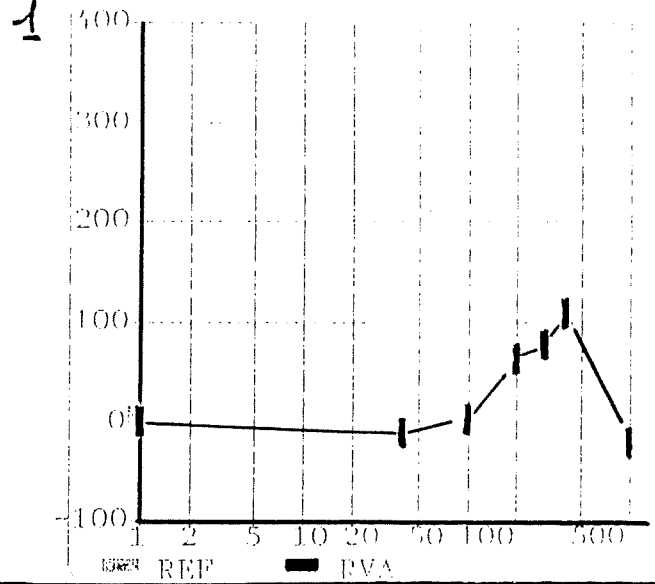
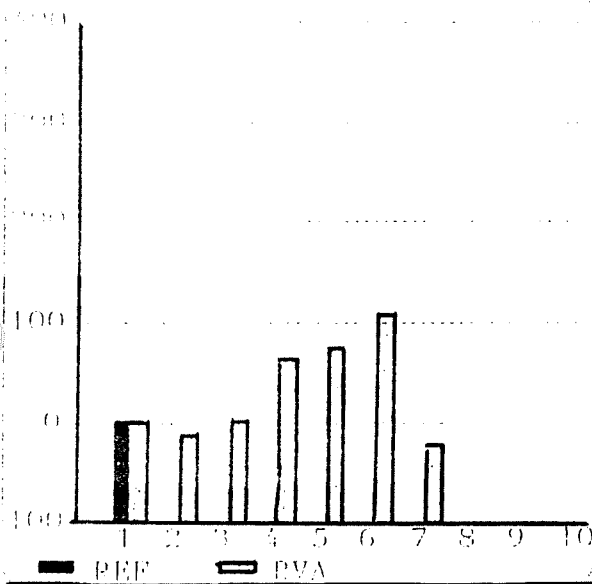


Fig.11

TRANSPORT DE L'OXYGENE

| | PRE | SORTIE | POST |
|---|-----------------------|--------|-----------------------|
| GAZOMETRIE DE REPOS | | | |
| S.I | 89 - 40 - 7,42 - 96 % | | 87 - 39 - 7,41 - 97 % |
| T.M | 85 - 41 - 7,43 - 97 % | | 83 - 37 - 7,41 - 97 % |
| R.P | 86 - 41 - 7,40 - 97 % | | 92 - 40 - 7,42 - 98 % |
| HEMOGLOBINE (g.dl-1) | | | |
| T.M | 14,7 | 12,9 | 13,7 |
| R.P | 12,8 | 12,4 | 12,9 |
| R.P | 15,3 | 15,9 | 15,7 |
| HEMATOCRITE (%) | | | |
| S.I | 44 | 38 | 41 |
| T.M | 38 | 37 | 38 |
| R.P | 46 | 47 | 48 |
| SATURATION CARBOXYHEMOGLOBINEE (%) | | | |
| S.I | 1,8 | 1,8 | |
| T.M | 1,2 | 1,4 | |
| R.P | 6,3 | 1,9 | |
| DPG (mmol.l-1 GR) | | | |
| S.I | 4,55 | 3,89 | |
| T.M | 5,15 | 4,73 | 4,73 |
| R.P | 4,5 | 4,28 | |
| Valeurs normales = 4.3 - 5.3 | | | |
| ATP (mmol.g-1.Hb) | | | |
| S.I | 4,34 | 4,45 | |
| T.M | 4,56 | 4,72 | |
| R.P | 4,87 | 4,46 | |
| Valeurs normales = 3.9 - 5.1 | | | |
| P50 standard (mmHg) | | | |
| S.I | 26,9 | 26,5 | |
| T.M | 27,5 | 28,1 | 26,4 |
| R.P | 24,5 | 27,1 | |
| Valeurs normales = 26.6 - 27.6 | | | |
| P50 (DPG = 0) | | | |
| S.I | | 17,6 | |
| T.M | | 17,2 | |
| R.P | | 17,8 | |
| Valeurs normales = 17 - 19 | | | |

TABLEAU V

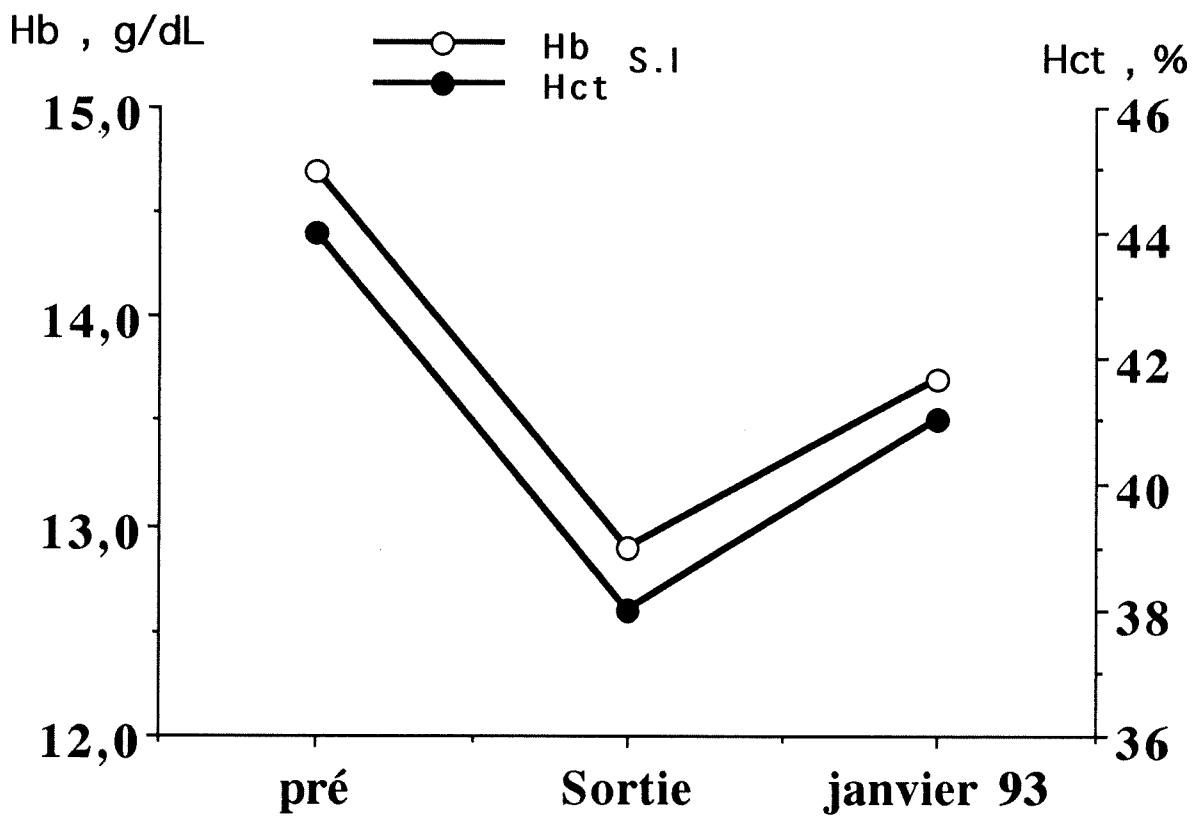


Fig.12

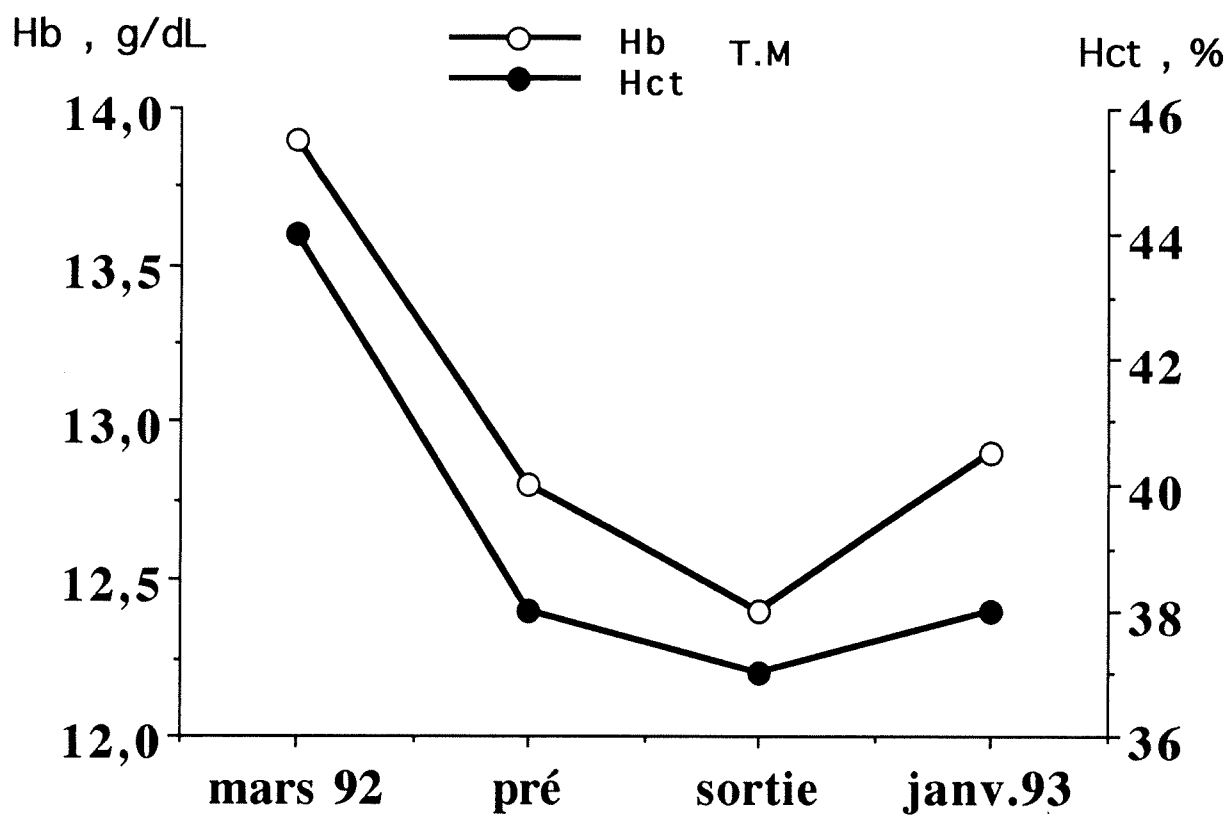


Fig.13

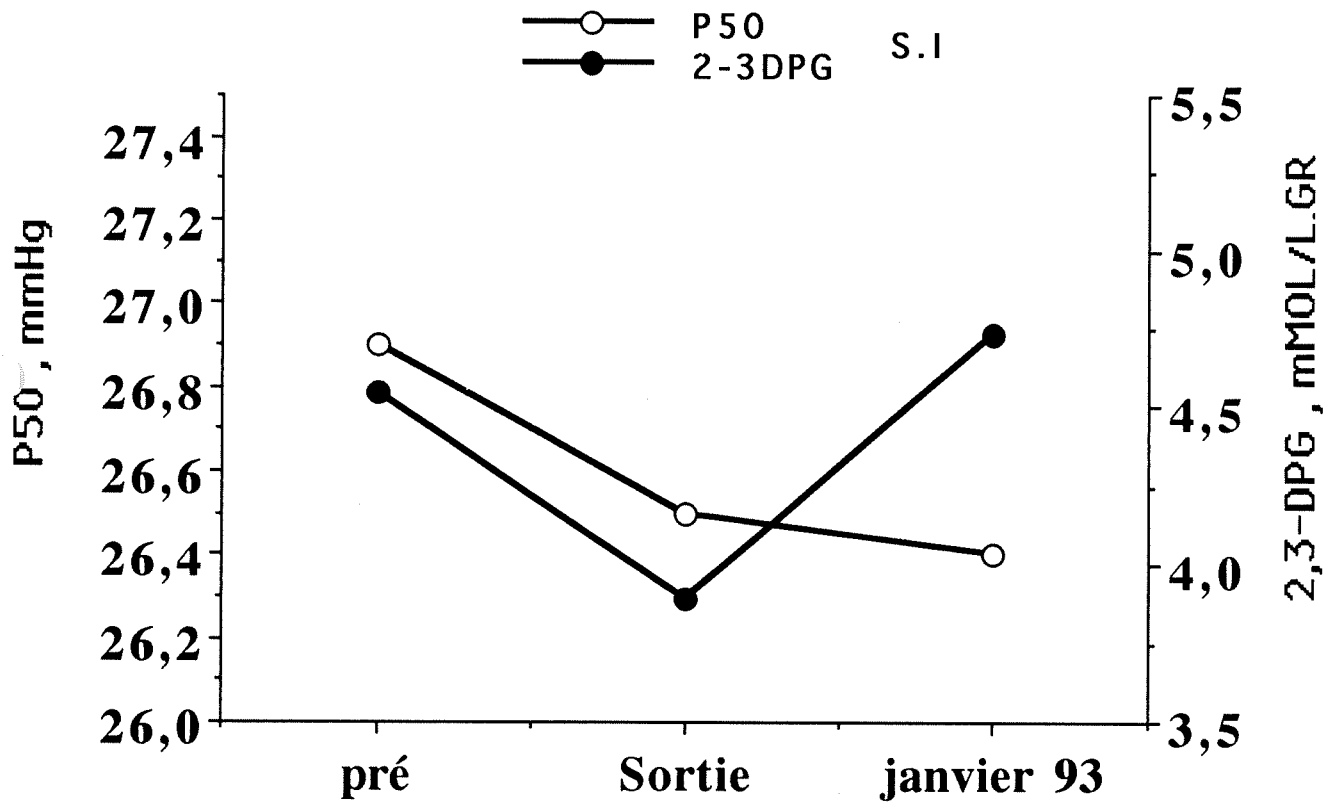


Fig.14

EFFORTS

Deux plongeurs (SI et TM) ont réalisé dans les 2 cas un effort maximal, pour le troisième (RP), la fréquence cardiaque atteint seulement 75 % de la valeur théorique maximale, mais la réaction hypertensive a entraîné l'arrêt de l'effort. Les charges maximales pré/post ne sont pas très différentes, toutefois SI n'a pu soutenir que 300 Watts contre 330 en préplongée. La tolérance à l'effort est moins bonne en post plongée et les plongeurs signalent l'apparition de myalgies (tableau I).

Les résultats globaux figurent sur les tableaux II, III et IV.

Un plongeur (SI) présente une diminution de la capacité aérobie, sa consommation maximale d'oxygène diminuant de 13 % en post-plongée.

Quel(s) facteur(s) limitant(s) peut-on mettre en cause ?

1 - Sur le plan cardio-vasculaire : chez les 3 plongeurs, l'évolution de la fréquence cardiaque est semblable pour les 2 examens. Par contre, chez 2 plongeurs (SI fig. 1 et TM fig.2), la réponse hypertensive, déjà élevée lors du premier examen, s'accroît encore, en particulier pour SI. Toutefois chez ce plongeur on trouve une diminution du pouls maximal d'oxygène égale à 11 % (tab. II).

2 - Sur le plan ventilatoire : il existe toujours une hyperventilation plus marquée à l'effort post-plongée (fig. 3, 4 et 5) avec survenue précoce du seuil ventilatoire chez 2 plongeurs (SI et TM).

Les gazométries faites à la dernière charge et au début de la période de récupération (fig. 6, 7 et 8) montrent une hypocapnie plus marquée et une acidose plus importante chez 2 plongeurs (SI et TM).

Le rapport VE MAX/VMM est toujours plus élevé en post plongée, ou en d'autres termes, la réserve ventilatoire diminue.

3 - Sur le plan musculaire : l'incidence de l'expérience Hydra X est manifeste chez SI et TM. Plusieurs facteurs apportent la preuve d'une limitation périphérique :

- Les myalgies d'effort
- L'accentuation de l'hyperlactatémie et de l'hyperammoniémie (SI et TM fig. 9, 10, 11, 12)
- La diminution du taux d'élimination du lactate sanguin pendant la période de récupération (TM fig. 10).

L'augmentation du lactate sanguin peut relever de 2 mécanismes :

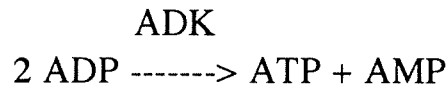
- a) augmentation de la synthèse liée à un déficit du métabolisme oxydatif.
- b) ralentissement de l'élimination.

La diminution du métabolisme oxydatif peut être expliquée par une action inhibitrice possible de l'hyperbarie sur l'activité d'enzymes polymériques (PENNISTON), la pyruvate déshydrogénase par exemple, qui régule l'entrée du pyruvate dans le cycle de krebs est une enzyme de ce type. La chaîne mitochondriale des transporteurs d'électrons peut également être inhibée (WOOD, 1975). Il faut également citer les travaux de MAIO qui montrent un effet dépresseur des gaz inertes (He - N₂ - Ar - SF₆) sur des coupes de tissu hépatique de rat (technique de Warburg) ; cet effet serait dû à un mécanisme d'action membranaire des gaz inertes, puisque la diminution de VO₂ n'apparaît pas après homogénéisation du même tissu hépatique.

L'élimination du lactate est lié en grande partie au métabolisme oxydatif et met en jeu à la fois les muscles qui participent à l'effort (fibres lentes) et les muscles non concernés par l'effort, donc une diminution du métabolisme oxydatif pourra expliquer une élimination ralentie. Le foie participe dans une certaine mesure à cette élimination par la néoglycogénèse, or GEIGER a montré que le mélange He - O₂ hyperbare pouvait inhiber certaines enzymes hépatiques. Enfin, il ne faut pas négliger la vasoconstriction périphérique (hypertension artérielle+++), gênant la circulation sanguine locale et donc pouvant participer au ralentissement.

L'hyperammoniémie s'explique par la mise en jeu de voies supplétives à la resynthèse de l'ATP musculaire, la voie principale (métabolisme oxydatif) étant déficiente.

Ainsi, à partir de 2 molécules d'ADP et par action de la myokinase (ou adénylatekinase ADK) il y a formation d'ATP et d'AMP :



L'AMP entre dans le cycle des purines-nucléotides : il est dégradé en inosine monophosphate (IMP) et ammoniac NH₃ grâce à l'action de l'AMP désaminase dont le stimulus principal est l'ADP. Ces différentes réactions expliquent l'hyperammoniémie observée chez le sujet normal au cours d'un effort maximal, et permettent de comprendre son élévation anormalement importante quand la resynthèse d'ATP devient insuffisante et donc que la concentration en ADP augmente.

En conclusion, trois semaines après la fin de l'expérience Hydra X, les plongeurs présentent une moins bonne tolérance à l'effort en particulier pour l'un d'entre eux (SI), chez qui le déficit du métabolisme est le plus marqué. La limitation semble être musculaire et cardiovasculaire (HTA d'effort), mais la composante ventilatoire, sans être un facteur limitant proprement dit constitue néanmoins un élément péjoratif par la sensation d'inconfort qu'entraîne l'hyperventilation d'effort.

| | CHARGE MAXI Watt | | VO2 MAX ml.min-1.kg-1 | | Fc MAXI | |
|---------------------------|---------------------------------|----------------|----------------------------------|------|--------------------|------|
| | Pré | Post | Pré | Post | Pré | Post |
| ICART | 330 | 300 | 46.7 | 40.7 | 187 | 190 |
| MAVROSTOMOS | 210 | 240 | 33.4 | 36.2 | 179 | 180 |
| PEILHO | 240 | 260 (1 min) | 40.0 | 40.0 | 140 | 140 |
| Sujets sédentaires | 160 - 240 | | 36 - 44 | | 220 - âge (180) | |

TABLEAU I

TABLEAU II S.I

| | PRE | POST |
|--|----------------------------------|---------------|
| Charge (Watt) | 330 | 300 |
| Fc max | 187 | 190 |
| PA max (cmHg) | 20/9 | 24/10 |
| Pouls O ₂ (ml.syst ⁻¹) | 18.9 | 16.8 (- 11 %) |
| VO ₂ max (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹) | 46.7 | 40.7 (- 13 %) |
| VE max (l.min ⁻¹) | 105.2 | 105.9 |
| Fréquence Respiratoire max | 32.7 | 32.2 |
| Volume Courant max (l) | 3.214 | 3.290 |
| Réserve Ventilatoire (%) | 32 | 28 |
| Seuil Ventilatoire (% VO ₂ max) | 79 | 66 |
| Lactate max (mmol.l ⁻¹) | 9.07 | 12 |
| Taux d'élimination du lactate (mmol.l ⁻¹ .min ⁻¹) | 0.23 | 0.29 |
| | (valeurs normales = 0.23 - 0.31) | |
| Ammoniémie max (μmol.l ⁻¹) | 99.7 | 141.3 |

TABLEAU III T.M

| | PRE | POST |
|--|----------------------------------|---------------|
| Charge (Watt) | 210 | 240 |
| Fc max | 179 | 180 |
| PA max (cmHg) | 20,5/9 | 22/10 |
| Pouls O ₂ (ml.syst ⁻¹) | 13.3 | 14.1 |
| VO ₂ max (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹) | 33.4 | 36.2 |
| VE max (l.min ⁻¹) | 82.3 | 96.7 |
| Fréquence Respiratoire max | 28 | 32.6 (+ 16 %) |
| Volume Courant max (l) | 2.979 | 2.966 |
| Réserve Ventilatoire (%) | 52 | 34 (- 17 %) |
| Seuil Ventilatoire (% VO ₂ max) | 77 | 51 |
| Lactate max (mmol.l ⁻¹) | 8.59 | 10.6 |
| Taux d'élimination du lactate (mmol.l ⁻¹ .min ⁻¹) | 0.29 | 0.22 |
| | (valeurs normales = 0.23 - 0.31) | |
| Ammoniémie max (μmol.l ⁻¹) | 73.5 | 120 |

TABLEAU IV R.P

| | PRE | POST |
|--|----------------------------------|----------------|
| Charge (Watt) | 240 | 270 (1 min) |
| Fc max | 140 | 140 |
| PA max (cmHg) | 21/9 | 22/9 |
| Pouls O ₂ (ml.syst ⁻¹) | 20.5 | 19.0 |
| VO ₂ max (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹) | 40 | 40 |
| VE max (l.min ⁻¹) | 88.4 | 110.9 |
| Fréquence Respiratoire max | 34.4 | 39.2 (+ 15 %) |
| Volume Courant max (l) | 2.569 | 2.826 (+ 10 %) |
| Réserve Ventilatoire (%) | 52 | 25 |
| Seuil Ventilatoire (% VO ₂ max) | 68 | 68 |
| Lactate max (mmol.l ⁻¹) | 5.08 | 6.77 |
| Taux d'élimination du lactate (mmol.l ⁻¹ .min ⁻¹) | 0.15 | 0.17 |
| | (valeurs normales = 0.23 - 0.31) | |
| Ammoniémie max (μmol.l ⁻¹) | 92.9 | 100.8 |

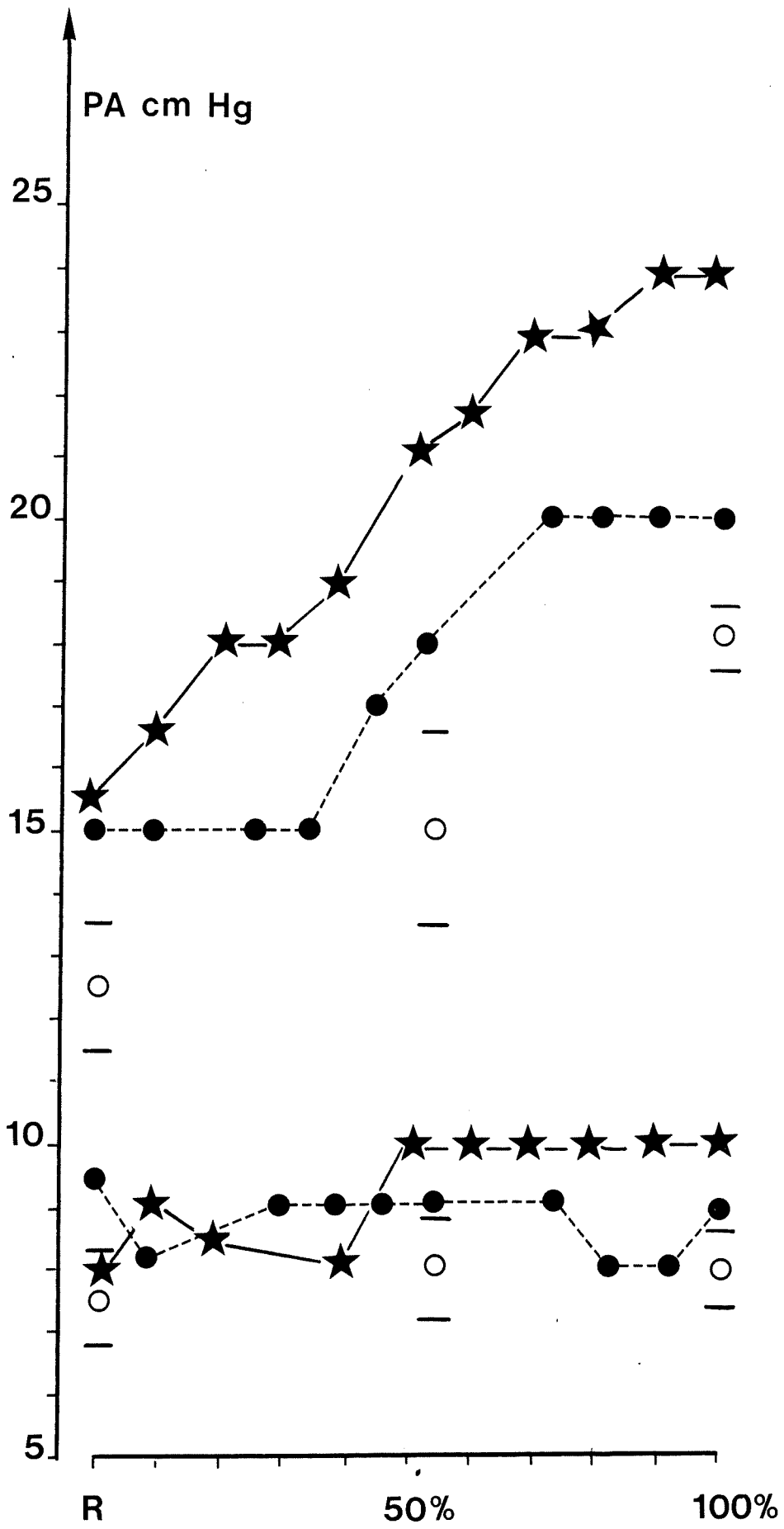


Fig.1 SI

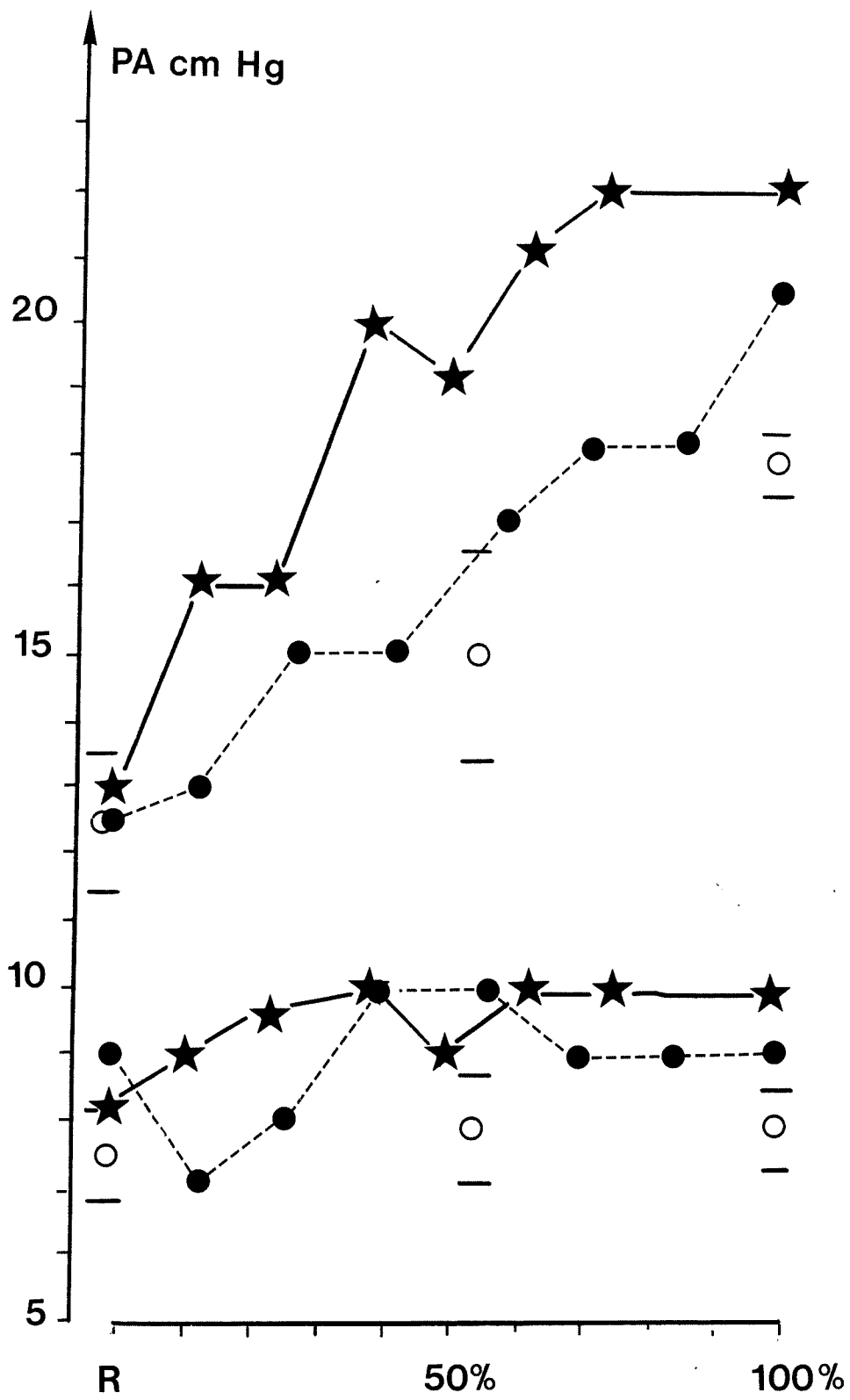


Fig.2 TM

Fig. 3 SI

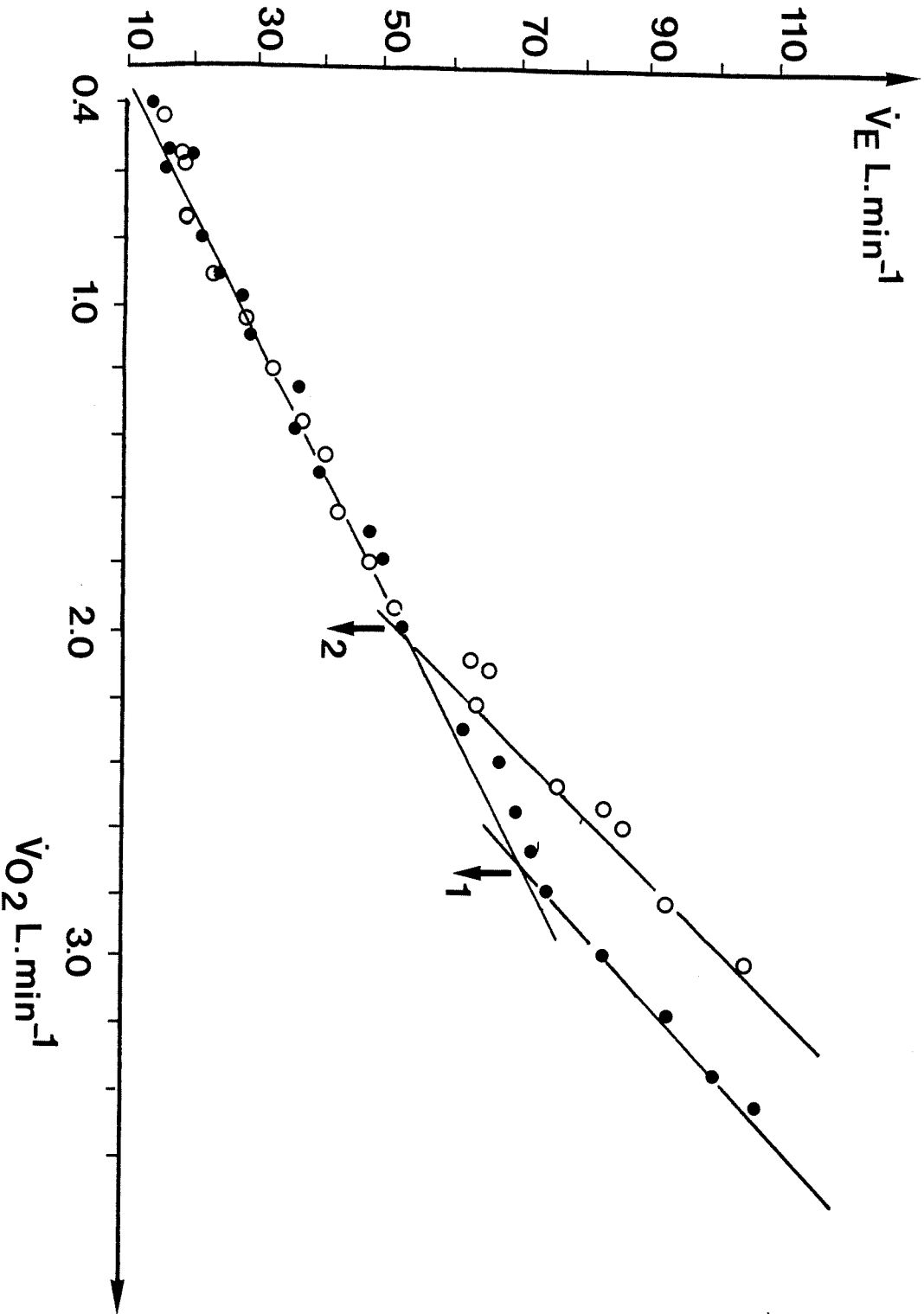


Fig. 4 TM

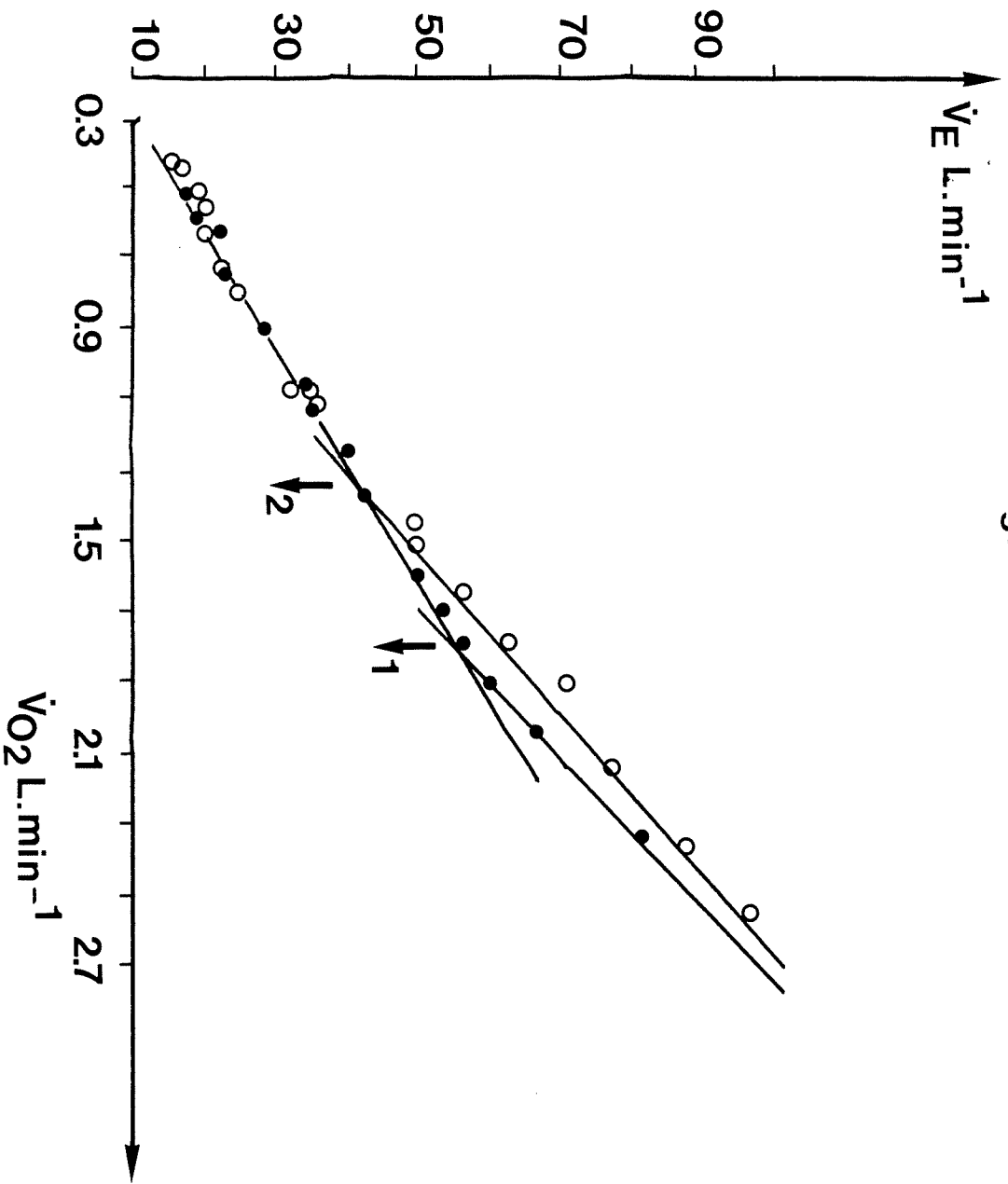
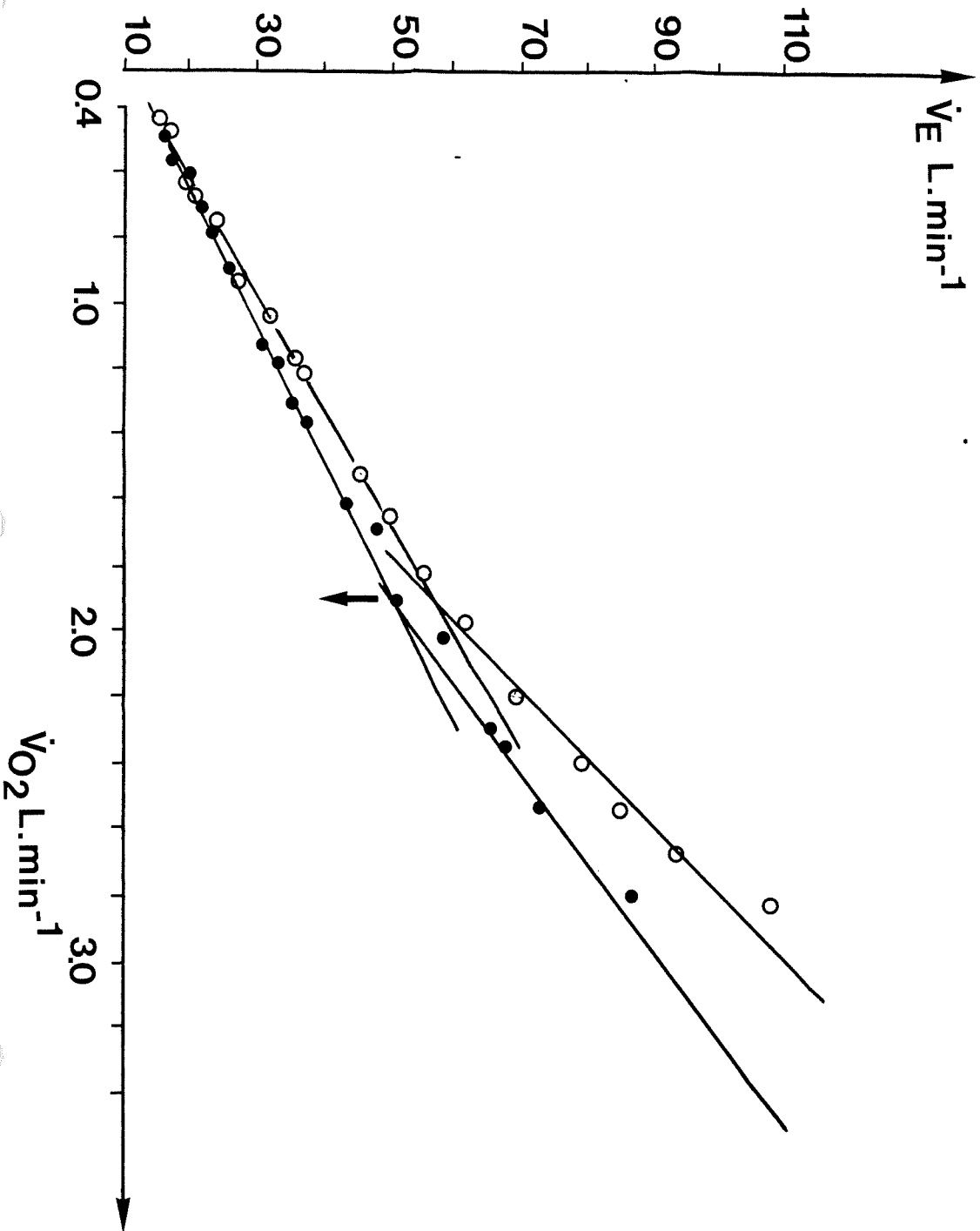


Fig. 5 RP



PaO₂ mmHg

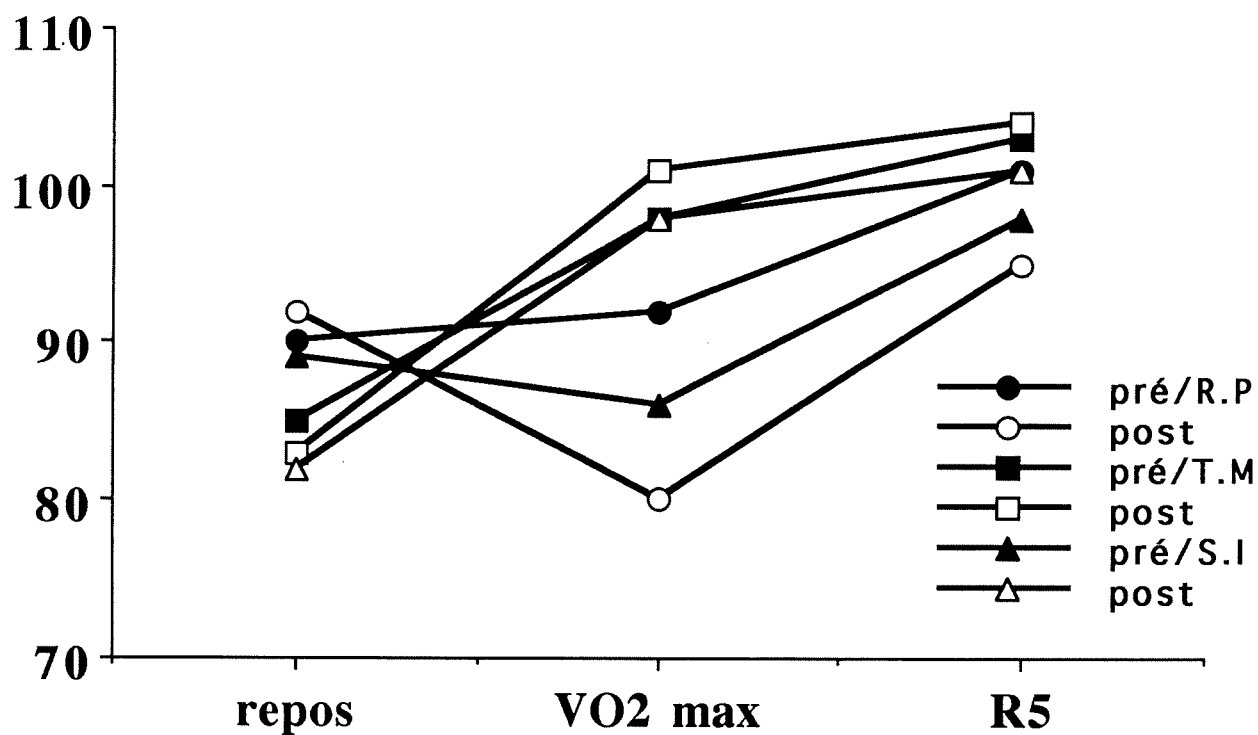


Fig. 6

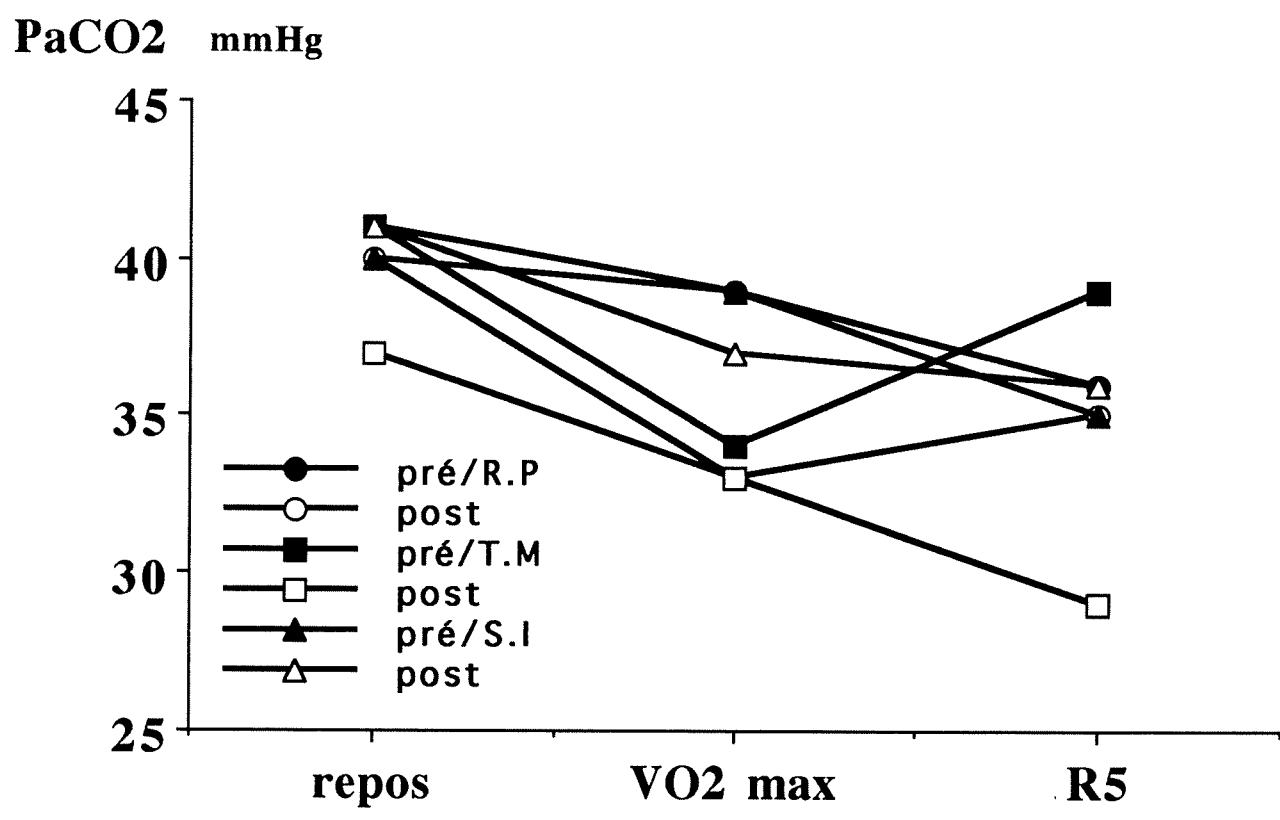


Fig.7

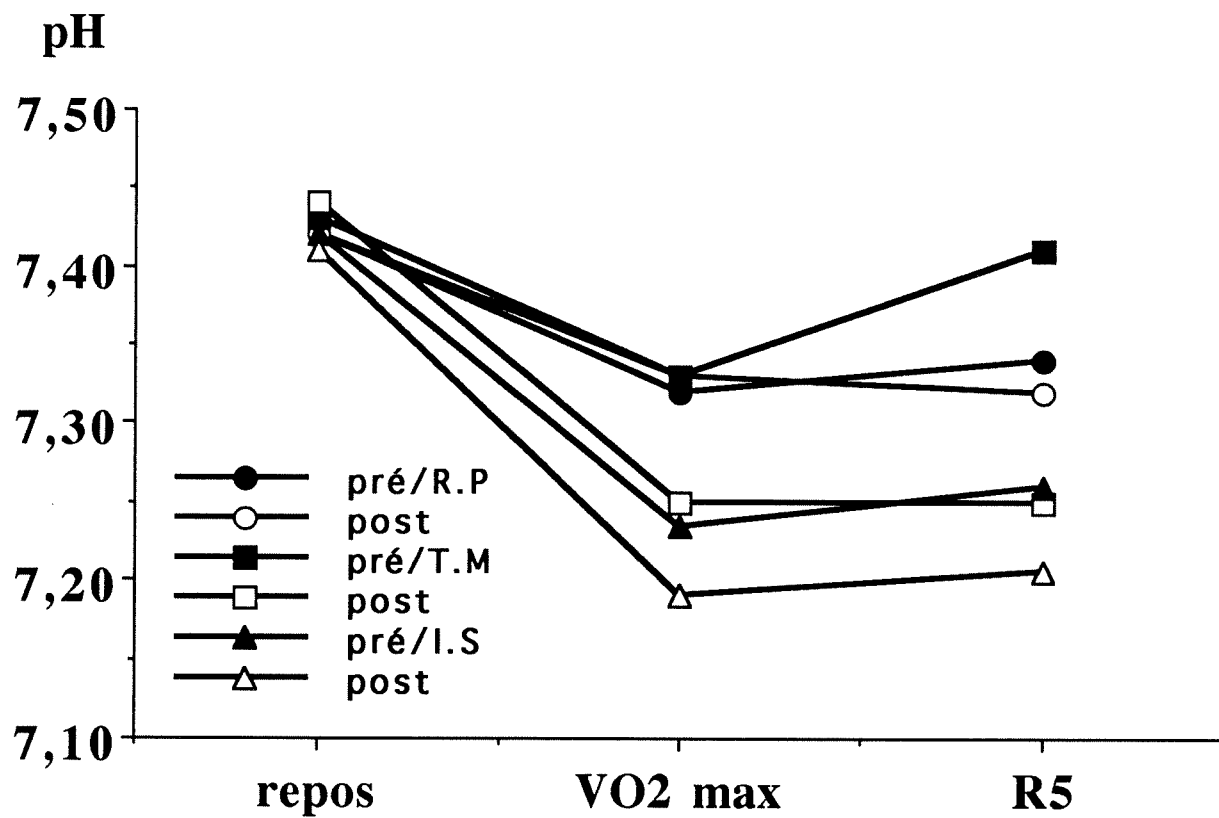


Fig. 8

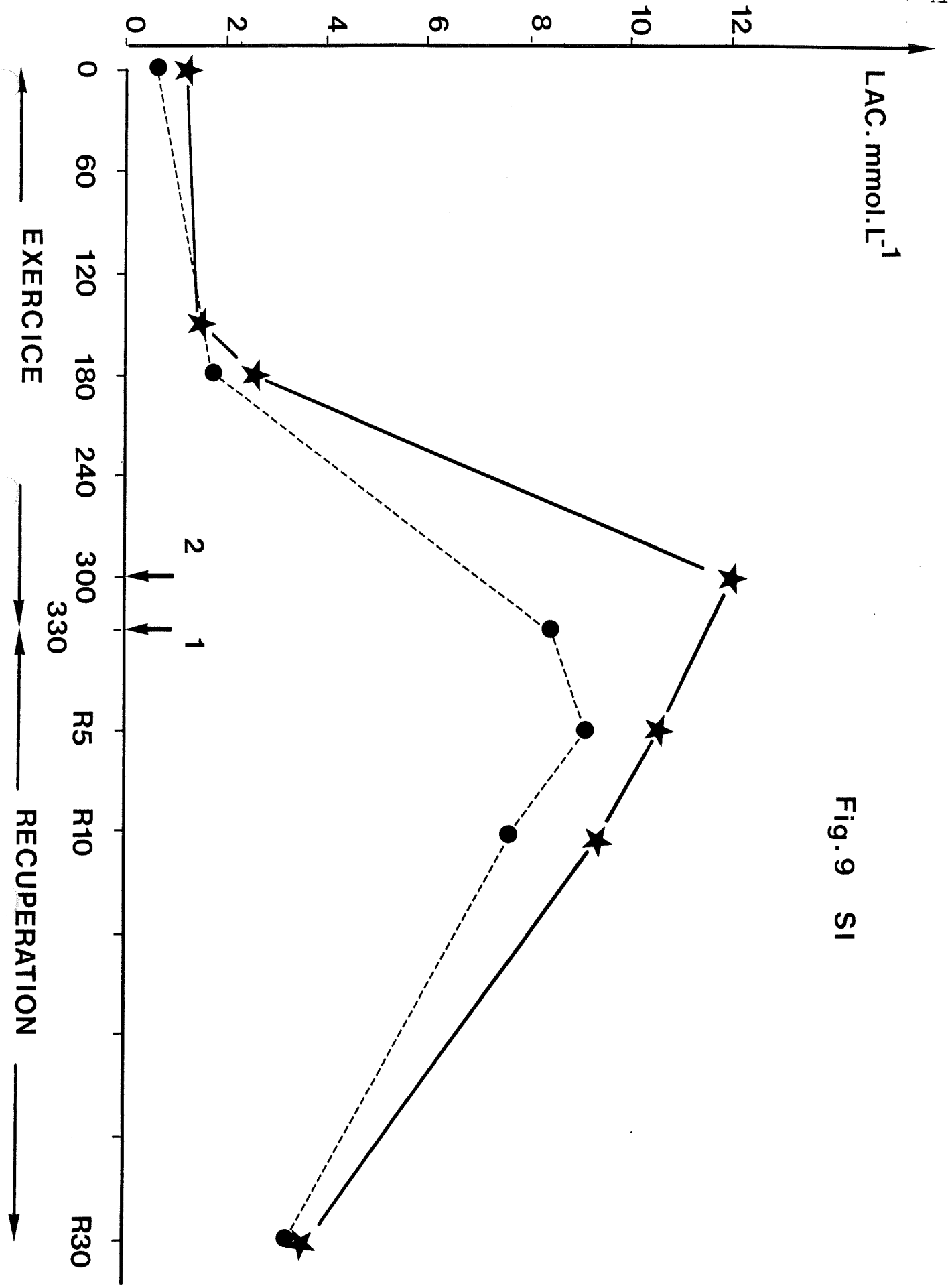


Fig. 9 SI

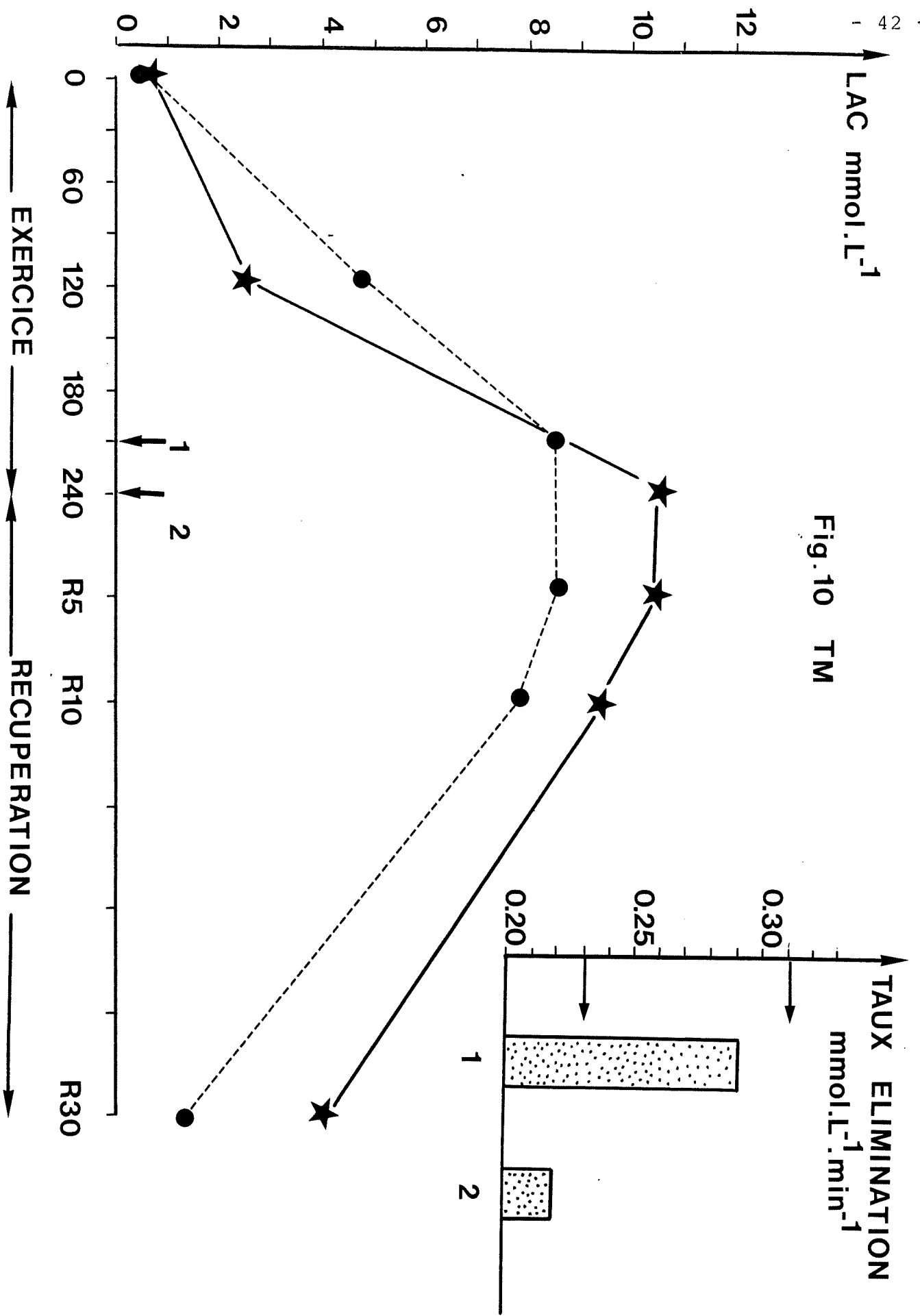


Fig. 10 TM

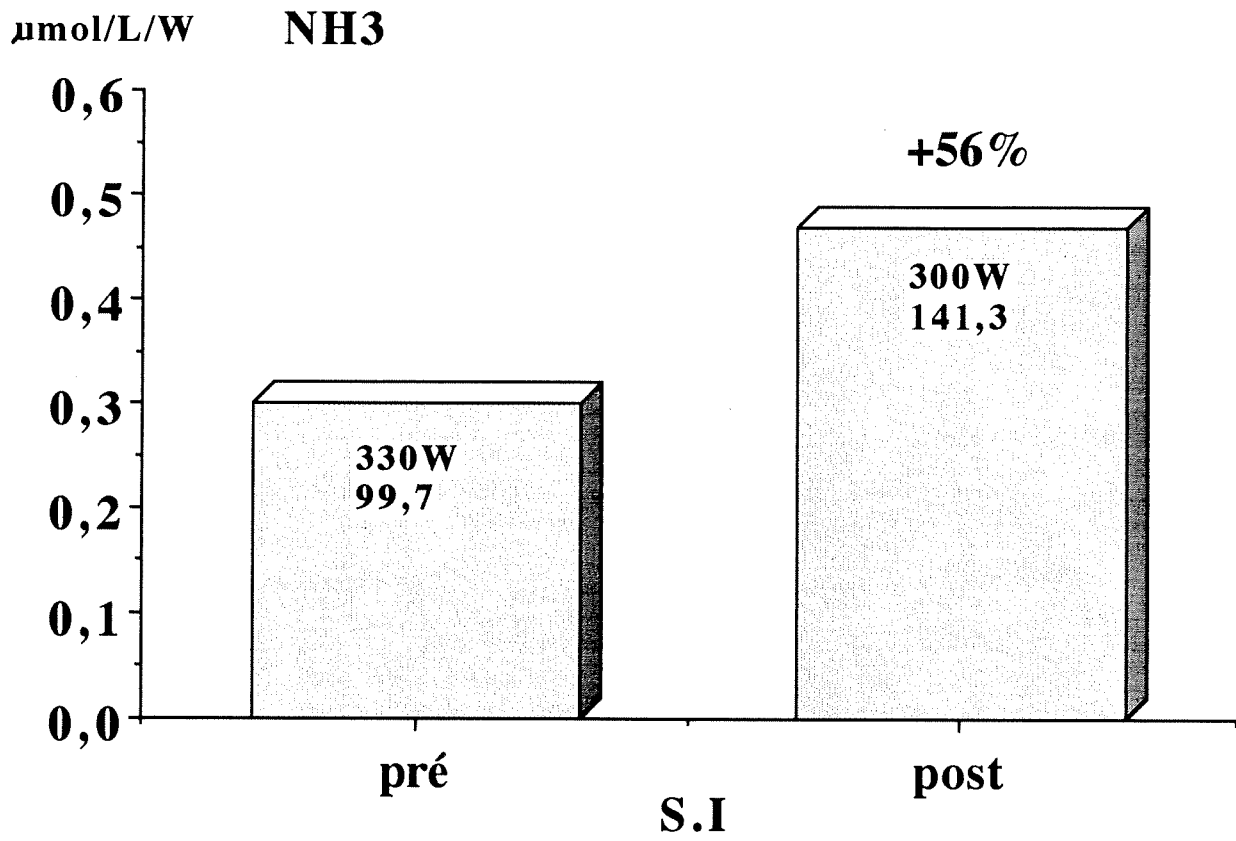


Fig.11

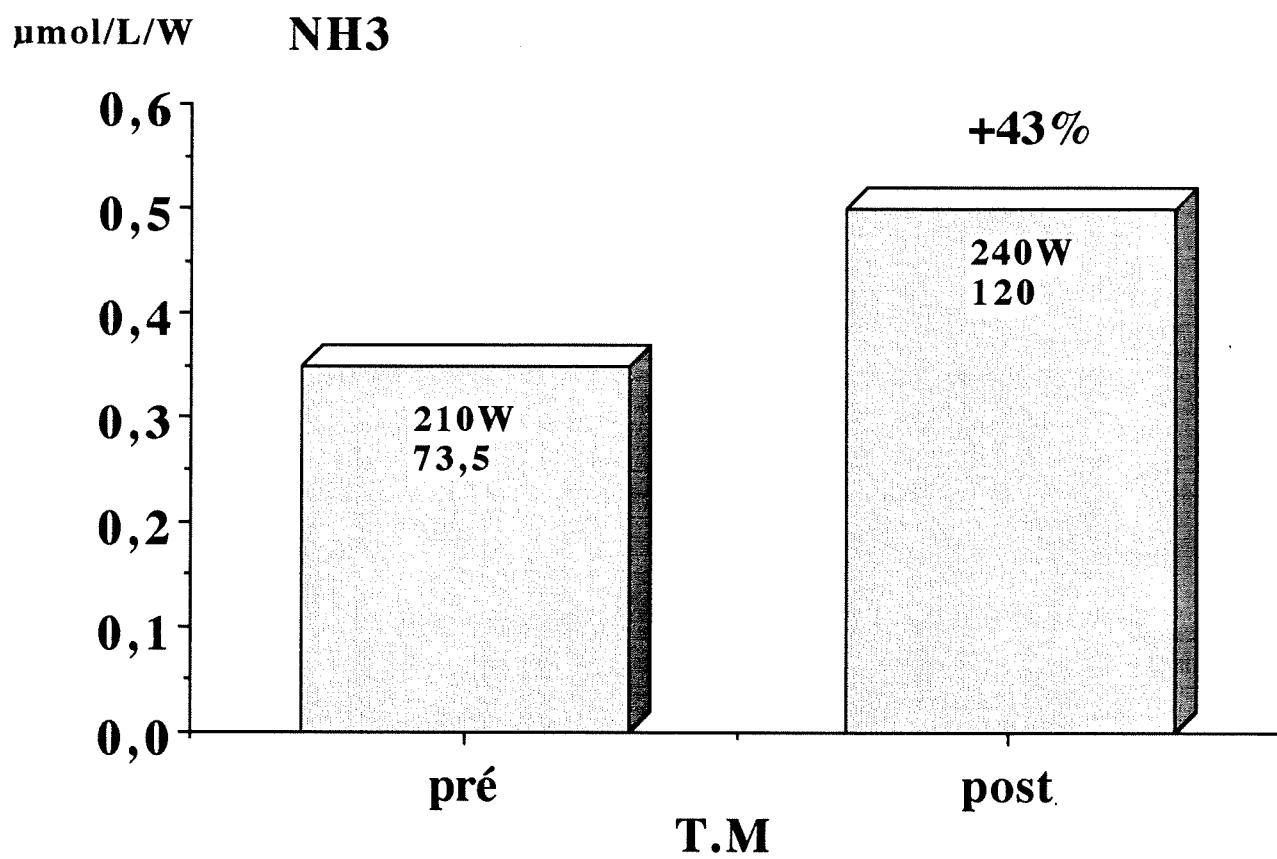


Fig.12

REFERENCES

ANTHONISEN, N.

"Closing volumes" determination

Bethesda, MD : Natl Heart Lung Inst. 1972, p.1-14

BRADLEY, M.E ; FLYNN, E.T ; ROBERTSON, CH.

Effect of decompression following compressed air diving on pulmonary function

Undersea Biomed. Res. 5 Suppl. 11, 1978.

BRAUER, R.W ; WAY, RO ; JORDAN, M.R ; PARRISH, D.E.

Experimental studies on the high pressure hyperexcitability. Syndrome in various mammalian species.

In Underwater Physiology

Ed. C.J. LAMBERTSEN 1971, p. 487-500.

Academic Press, New York - London

**CATRON, PW ; BERTONCINI, J ; LAYTON, RP ;
BRADLEY, M.E ; FLYNN, ET.**

Respiratory mechanics in men following a deep air dive.

J. Appl. Physiol. 61 (2) : 734-740, 1986.

CHANCE, B ; JAMIESON, D ; WILLIAMSON, JR.

Control of the oxidation-reduction state of reduced pyridine nucleotides in vivo and in vitro by hyperbaric oxygen.

In : Proceedings of the Third International Conference on Hyperbaric Medicine, 1965. p. 15-41

Ed. BROWN, I.N & COX, BG

Washington DC : Natl. Acad. Sci. Natl. Res. Council.

CLARK, J.M ; LAMBERTSEN C.J.

Pulmonary oxygen toxicity : a review.

Pharma. Rev. 1971, 223, p. 37 -133

CLIFFORD, GM ; SMITH, DJ ; SEARING SM

A comparison of lung volumes between divers and submariners in the Royal Navy.

J.R. Nav. Med. Serv. 1984, 70, p. 143-148.

CROSBIE, W.A, REED, J.W ; CLARKE, MC.

Functional characteristics of the large lungs found in commercial divers.

J. Appl. Physiol. 1979, 46, p. 639-45.

DAVEY, IS ; COTES JE, REED JW

Relationship of ventilatory capacity to hyperbaric exposure in divers.

J. Appl. Physiol. 1984, 56, p. 1655-1658.

ELLIOTT, DH ; HALLENBECK, JM

The pathophysiology of decompression sickness.

In : The physiology and medicine of diving and compressed air work.

Baltimore, M.D. : Williams & Wilkins 1975, p. 435-455

FISCHER, CL ; KIMZEY, SL.

Effects of oxygen on blood formation and destruction

In : Underwater Physiology.

1971, p. 41-47

Ed. CJ. LAMBERTSEN. Academic Press, New York, London.

GEIGER, J.D ; BRUMLEVE S.J ; BOELKINS, J.N ; PARMAR, S.S

Selective induction of liver during metabolizing enzyme in rats exposed to a 21 ATA He-O₂ environment.

Aviat. Space Environm. Med. 1977, 48, p. 737-40

GUENARD, H ; CHAUSSAIN, M ; CEBEAU, C

Respiratory gas exchange under normobaric helium-oxygen breathing at rest and during muscular exercise.

Bull. Eur. Physiopath. Resp. 1978, 14, p. 417-429

**KAPANCI, Y ; WEIBEL, ER ; KAPLAN, HP ;
ROBINSON, FR.**

Pathogenesis and reversibility of the pulmonary lesions of oxygen toxicity
in monkeys.

II Ultra structural and morphometric studies.

Lab. Invest. 1969, 20, p. 101-118

**KAPLAN, H.P ; ROBINSON, F.R ; KAPANCI, Y ;
WEIBEL ER**

Pathogenesis and reversibility of the pulmonary lesions of oxygen toxicity
in monkeys. I Clinical and light microscopic studies.

Lab. Invest. 1969, 20, p. 94-100

LUNDGREN, C.

Diving.

"The LUNG" Scientific Foundations

Ed. R.G. CRYSTAL ; J.B WEST et al.

Raven Press Ltd, New York 1991, p. 2109

MAIO, DA ; NEVILLE, JR.

Effects of chemically inert gases on oxygen consumption in living tissues.

Aerospace med. 1967, 38, p. 1049-1056

**MENGEL, CE ; ZIRKLE LG ; O'MALLEY, BW ;
HORTON, BD**

Studies of the mechanism of in vivo RBC damage by oxygen

Aerospace Med. 1965, 36, p. 1036-1041.

PENNISTON, J.T.

High hydrostatic pressure and enzymic activity : inhibition of multimeric
enzymes by dissociation.

Archs. Biochem. Biophys. 1971, 142, p. 322-332

**PUY, RJM ; HYDE, RW ; FISCHER, AB ; CLARK, JM ;
DICKSON, J ; LAMBERTSEN, CJ.**

Alterations in the pulmonary capillary bed during early O₂
toxicity in man

J. Appl. Physiol. 1968, 24, p. 537-543.

THORSEN, E ; HJELLE, J ; SEGADAL, K ; GULSVIK, A.

Exercise tolerance and pulmonary gas exchange after deep saturation dives.

J. Appl. Physiol. 1990, 68, (5), p. 1809-1814

VARENE, P ; VALIRON, MO.

Effets biologiques des gaz inertes

Bull. Eur. Physiopath. Resp. 1980, 16, p. 79-109

WOOD, JD.

Oxygen toxicity. In "The Physiologie and Medicine of diving and compressed air work".

Ed. BENNET, PB & ELLIOTT, DH.

Baillière Tindall - London 1975, p. 166

**WOOD, LDH ; BRYAN AC ; BAU SK ; WENG TR ;
LEVISON H**

Effect of increased gas density on pulmonary gas exchange in man.

J. Appl. Physiol. 1976, 41, p. 206-210

HYDRA X

Imagerie par Résonance Magnétique du Système Nerveux Central

O. BAYLE

* Service Central de Radiologie.
Pr KASBARIAN
Hôpital de la Timone - Marseille

* Laboratoire de Recherche et d'Enseignement en Imagerie Médicale.
Pr BARTOLI
Faculté de médecine - Marseille

* Service de Radiologie
Hôpital St JOSEPH - Marseille

I INTRODUCTION

L'IRM est apparue depuis plusieurs années la technique d'imagerie la plus performante pour l'exploration cérébrale et s'avère aujourd'hui indispensable en pratique neurologique. Seul le faible nombre d'appareils installés limite sa diffusion.

Peu de travaux ont été jusqu'à présent consacré à préciser son intérêt en médecine de plongée (1, 2, 3, 5, 6, 7, 8). Dans le domaine neurologique, elle a été employée pour réaliser le bilan d'accidents ou pour rechercher d'éventuels effets neurologiques à long terme de la plongée professionnelle.

Nous avons lors d'Hydra IX pratiqué une étude ostéo-articulaire et cérébrale par IRM des plongeurs. Il nous est apparu intéressant, ainsi qu'à l'équipe médicale et scientifique de la Comex de faire bénéficier une nouvelle fois les plongeurs de cette technique non invasive d'exploration du système nerveux central.

Notre objectif était d'une part de participer à la sélection médicale des plongeurs, et d'autre part de réaliser un bilan au décours de la plongée pour rechercher d'éventuelles modifications tissulaires ou morphologiques encéphaliques.

II MATERIEL ET METHODES

1 Les plongeurs

Seul un des plongeurs a présenté un antécédent neurologique avec trouble de la conscience lors d'un début de noyade en plongée (P3), le même plongeur avait déjà bénéficié au décours d'Hydra IX d'une IRM cérébrale qui s'était avérée normale.

2 Méthodes

2a Avant la plongée :

Les examens ont été réalisés 8 jours avant l'entrée en caisson avec un appareil supra-conducteur de 1,5 Tesla Siemens Magnetom (Hôpital de la Timone)

| | |
|---------------------|-----------------------------------|
| Séquences | : Spin-écho TR/TE 2 700/60-120 ms |
| Plan de coupe | : Axial (bicommissural) |
| Epaisseur de coupes | : 7 mm jointives |
| Matrice | : 256 x 256 |
| Excitation | : 1 |

2b Après la plongée :

Les examens de contrôle n'ont pu être pratiqués avec le même appareil du fait de l'impossibilité pour un des plongeurs d'être présent à la date fixée et du manque de disponibilité de l'appareil. Ce bilan a été effectué 51 jours après la sortie du caisson.

Les explorations ont donc été effectuées avec un appareil à aimant supra-conducteur de 0,5 Tesla Général Electric Signa (Hôpital St Joseph)

| | |
|--------------------|---|
| Séquences | : Spin-écho TR/TE 2 200/ 30-90 ms Fast Spin-écho TR/TE 4 500/20-140 ms |
| Plan de coupe | : Axial (bi-commisural) |
| Epaisseur de coupe | : 7 mm jointives |
| Matrice | : 256x256 |
| Excitation | : 1 |

III RESULTATS

Les examens aussi bien qu'avant la plongée sont strictement normaux sans anomalie morphologique ou de signal des structures cérébrales.

IV DISCUSSION

Les résultats normaux des IRM cérébrales chez les différents plongeurs nous ont permis d'une part d'éliminer une éventuelle contre-indication neurologique lors de la sélection médicale des plongeurs et d'autre part d'affirmer l'intégrité en IRM des structures encéphaliques plus d'un mois et demi après la plongée.

Nous avons choisi de nous limiter lors de cette plongée Hydra X à l'exploration cérébrale. En effet, l'exploration médullaire des accidents médullaires de décompression à la phase aiguë ou séquellaire est dans notre expérience décevante puisque nous n'avons jamais pu mettre en évidence d'anomalie (2). Les rares résultats positifs publiés sont par ailleurs discutables (8).

La recherche de lésions de petite taille demeure très difficile au niveau de la moelle épinière. Nous nous attachons par ailleurs à améliorer la sensibilité de l'IRM en particulier par l'injection intraveineuse de sels de Gadolinium qu'il nous paraît souhaitable dans un premier temps de limiter au bilan des accidents aigus ou aux séquelles symptomatiques d'accidents. Si les résultats s'avèrent positifs, cet examen médullaire pourra être proposé ultérieurement.

Sur le plan technique, nous avons choisi lors de l'exploration cérébrale des plongeurs d'utiliser des séquences d'acquisition avec contraste en densité protonique et en T2. Les coupes en densité protonique permettent une bonne analyse morphologique alors que les coupes avec contraste T2 présentent la meilleure sensibilité pour la mise en évidence des lésions inflammatoires, oedémateuses, ischémiques et démyélinisantes.

Ces deux types de contraste sont par ailleurs obtenus lors de la même acquisition permettant ainsi un intéressant gain de temps utilisé pour privilégier une meilleure résolution spatiale avec une matrice 256x256.

L'emploi de 2 appareils différents avant et après la plongée ne nous paraît pas préjudiciable du fait de l'emploi de paramètres permettant un examen comparatif.

L'examen de contrôle un mois et demi après la sortie du caisson est destiné à s'assurer de l'absence de conséquences précoces de la plongée. Il n'est pour nous que la première partie du suivi par IRM des plongeurs.

En effet en dehors des accidents aigus, où l'IRM cérébrale se positive dès la 6ème heure, la recherche de complications à long terme ne peut évidemment s'envisager que par suivi longitudinal sur plusieurs années.

Nous avons pu effectuer un an après Hydra IX, un contrôle par IRM cérébrale chez le plongeur ayant présenté des anomalies de signal de la substance blanche. Les deux lésions observées au décours de la plongée (alors qu'une seule anomalie n'avait été vue avant celle-ci) n'avaient pas évolué. Il n'est pas possible sur un seul sujet d'attribuer la moindre responsabilité de la plongée sur ces lésions puisqu'elles sont aspécifiques et retrouvées dans de nombreuses conditions pathologiques et même chez certains sujets asymptomatiques.

V CONCLUSION

Si l'IRM ne permet qu'une approche morphologique et tissulaire et non métabolique du système nerveux central, elle apparaît cependant parfaitement adapté pour l'exploration non invasive des plongeurs à la recherche de contre-indications lors de la sélection ou pour assurer leur surveillance après la plongée.

Son intérêt ne présente donc aucun doute lors de plongée expérimentale.

Alors que persistent de multiples interrogations sur les effets à long terme de la plongée, elle représente par ailleurs un excellent moyen de dépistage d'éventuelles anomalies intra-cérébrales (4, 6, 7).

BIBLIOGRAPHIE

- 1- Bayle O, Comet M, Bartoli JM, Moulin G, Di Stefano-Louineau D
Kasbarian M
Dépistage de l'ostéonécrose dysbarique par IRM
Med Sub Hyp 1990 ; 9, 4 : 93-104
- 2- Bayle O, Bergman E, Morval E, Chagnaud Ch, Moulin G, Bartoli JM,
Kasbarian M
Apport de l'IRM dans les accidents neurologiques de plongée
Réunion scientifique de la Société Française de Médecine
Subaquatique et Hyperbare Bordeaux 12.09.91
- 3- Bayle O, Siles S, Bergman E, Chagnaud Ch, Moulin G, Bartoli JM,
Kasbarian M
IRM et Spect dans les accidents ostéo-articulaire de décompression
Réunion scientifique de la société Française de Médecine Subaquatique
et hyperbare - Marseille 31.01.92
- 4- Elliot DH.
Long term sequelae of diving
J Rov Soc Med, 1989, 82 : 79-80
- 5- Puech B, Hugon M, Dufou M, Chateau J, Ellzagaray A, Tridivic A
Exploration par scintigraphie et IRM des accidents de plongée
ostéoarthromusculaires des épaules
Med Sub Hyp, 1989, 2 : 103-114
- 6- Todnem K, Nyland H, Skerdsvoll H, Svihus R, Rinck P, Kambestad
BK, Riisse T, Aarli JA
Neurological long term consequences of deep diving
British Journal of Industrial Medecine 1991, 48 : 258-266
- 7- Rinck PA, Svihus R, De Francisco P
Mr Imaging of the Central Nervous System in Divers
JMRI 1991, 1, 3 : 293-298
- 8- Warren LP, Djang WT, Moon RE, Camporesi EM, Sallee DS,
Anthony DC, Massey EW, Burger PC, Heinz ER
Neuro imaging of scuba diving injuries to the CNS
Ajr, 1988, 151 : 1003-1008

BILAN OPHTALMOLOGIQUE DES PLONGEURS DE HYDRA 10

SERVICE D'OPHTALMOLOGIE DE L'HOTEL-DIEU MARSEILLE
Pr P. METGE-Dr A. COLLET- Dr O. PLATON

Nous avons pratiqué un bilan ophtalmologique aux trois plongeurs professionnels ayant participé à HYDRA 10 : Mr Serge ICART, Mr Théo MAVROSTOMOS, Mr Régis PEILHO.

Le premier bilan a été fait en octobre 92 et a comporté: la mesure de l' acuité visuelle de près et de loin (AVL et AVP) sans et avec correction (SC et AC), un examen du segment antérieur à la lampe à fente avec prise du tonus (TO), un examen en biomicroscopie de la rétine, un champ visuel automatisé (CV), une vision des couleurs (CV) , une vision binoculaire (VB), une angiofluographie avec clichés anérythres, rouge, bleu , clichés apres injection .

Le second bilan a été fait en février 93 donc environ sept semaines apres la fin de HYDRA 10 et a comporté les mêmes examens sauf la VC et le CV .

RESULTATS:

PREMIER PLONGEUR : Mr ICART

Trente neuf ans-vingt ans de plongée professionnelle-Pas d' antécédents médicaux ni ophtalmologiques - Antécédents d' accident de décompression de type 1 (pas de type 2)- Toxiques : aucun .

Nous avons retrouvé au bilan de départ: AVL &10/10 P2)meilleure acuité de près) SC , TODG normal .

L'examen du fond d'oeil a trouvé un petit remaniement de l'épithélium pigmentaire (EP) para maculaire droit .Au CV: léger élargissement de la tache aveugle à gauche. VB normale.

L'angiographie a montré: un allongement du temps bras-rétine à 23", à droite un léger retard avec inhomogénéité de la perfusion choroidienne dans le territoire de l'artère ciliaire postéro-interne, de discrets effets fenêtrés supra-fovéolaires liés aux altérations de l'EP, à gauche il y a également des altérations de l'EP.

Ce retard circulatoire notable pour un patient de 39 ans a imposé un bilan cardiovasculaire. Celui-ci ayant été considéré normal, nous avons conclu à l'aptitude ophtalmologique de Mr ICART pour la plongée d'essai HYDRA 10.

Le deuxième bilan a retrouvé une acuité visuelle conservée, l'examen des segments antérieur et postérieur était normal. La VB était normale. L'angiographie a retrouvé l'allongement du temps bras-rétine, l'inhomogénéité de vascularisation choroidienne à droite et les effets fenêtrés aux deux yeux. Aucune autre anomalie n'a été retrouvée.

DEUXIEME PLONGEUR: Mr MAVROSTOMOS

Trente neuf ans-dix neuf de plongée professionnelle-Pas d'antécédent médicaux ni ophtalmologiques-Antécédent d'accident de décompression de type 1 (pas de type 2)-Toxiques: tabac +-

Au bilan de départ , nous avons retrouvé: une AVL 10/10 P2 ODG - Segment antérieur et TODG normaux. Le fond d'oeil a trouvé une paleur papillaire à gauche. La VB a retrouvé un léger déficit de convergence. Le CV a trouvé, à droite un élargissement de la tache aveugle et un scotome paracentral ; à gauche un élargissement de la tache aveugle avec ressaut nasal de RONNE ainsi qu'un petit scotome paracentral.

L'angiographie avait montré: un temps bras-rétine à la limite supérieure de la normale, une discrète raréfaction des fibres optiques à gauche, une vascularisation choroidienne très légèrement ralentie mais normale par la suite et un EP normal.

La normalité de ce bilan avait permis de conclure à l'aptitude ophtalmologique de Mr MAVROSTOMOS pour HYDRA 10 .

Le second bilan a révélé: une AVL identique, un examen des segments antérieur et postérieur normal, une VB et une VC normales L'angiographie a retrouvé des anomalies identiques.

TROISIEME PLONGEUR :Mr PEILHO

Trente neuf ans-Quatorze ans de plongée professionnelle-Pas d'antécédent médicaux ni d'accident de plongée de type 1 et 2. Amblyopie modérée ancienne de l'oeil droit .Toxiques: tabac :+. Le premier bilan a trouvé: une hypermétropie avec acuité corrigée OD 6/10 P6_ OG 10/10 P2 .Segment antérieur et TODG normaux. Au fond d'oeil ,il existe des remaniements de l'EP rétrofovéolaires aux deux yeux.Le CV a trouvé,à droite ,des déficits en rapport avec son amblyopie ,à gauche une discrète altération du seuil fovéolaire. La VB a retrouvé une absence de vision stereoscopique liée à son amblyopie.

L'angiographie a montré un allongement du temps bras-rétine à 24" avec un retard de vascularisation rétinienne et choroidienne qui se normalise par la suite . Il y avait à droite deux effets fenêtre paramaculaires et à gauche un léger remaniement rétrofovéolaire. Compte tenu de cet allongement du temps bras-rétine , nous avons là aussi demandé un bilan cardiovasculaire révélé normal . Etant donné l'existence de cette amblyopie et l'absence de vision stéréoscopique ,nous avons émis une réserve sur l'aptitude ophtalmologique de Mr PEILHO pour HYDRA 10.

Le bilan de février 93 a révélé : Sur le plan clinique, Mr PEILHO a signalé un trouble de la vision de près et de la vision des couleurs durant la phase de compression qui a disparu à la décompression. L'examen objectif de l'acuité visuelle , de la VB et de la VC était identique au précédent.

L'angiographie a retrouvé les mêmes anomalies sans élément nouveau .

CONCLUSIONS :

1. Chez ces trois plongeurs ,les deux bilans étant superposables, on peut conclure que la plongée d'essai HYDRA 10 n'a pas eu de retentissement objectif sur le plan ophtalmologique à court et à moyen terme.

2 . Il existe chez ces patients notamment Mr ICART et Mr PEILHO un allongement du temps bras-rétine notable pour des patients de trente neuf ans , avec ralentissement de la vascularisation rétinienne et choroidienne .

Ces anomalies doivent faire rechercher soit un obstacle sur les gros troncs artériels soit une défaillance de la pompe cardiaque soit encore une altération des échanges gazeux pulmonaires .
A ce jour les bilans pratiqués n'ont pas révélé d'anomalie

A ce jour , les bilans pratiqués n'ont pas trouvé d'éléments pouvant expliquer ces anomalies .

3 .Les lésions de l'épithélium pigmentaire retrouvées peuvent être des cicatrices d'ischémie choroidienne ancienne , mais sont également présentes dans la population generale (environ 20%) . Nous ne pouvons donc pas établir un lien de cause à effet entre ces lésions et la pratique de la plongée professionnelle . Dans cette optique , il aurait été intéressant de pratiquer le deuxième bilan très tôt apres la fin de la plongée d' essai HYDRA 10 .

Pr P. METGE - Dr A. COLLET - Dr O. PLATON

EVOLUTION DES SEUILS DE PERCEPTION

AU COURS DE LA PLONGEE

HYDRA X

POUR QUATRE SAVEURS FONDAMENTALES

Le confinement, les fortes pressions et la composition du mélange gazeux sont autant de paramètres qui influent sur la perception et sur l'appréciation générale des aliments.

Au cours d'une mission, les plongeurs sont amenés à rester plus d'un mois à très grande profondeur, enfermés dans un espace réduit. On peut aisément imaginer l'importance que prend la nourriture dans de telles conditions.

C'est pourquoi la COMEX s'est intéressée à l'évolution du "goût" des plongeurs au cours de la simulation HYDRA X.

Fiche à remplir par le dégustateur

| n° du verre | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| contenu | | | | | | | | | | | |

Il est demandé au dégustateur de noter pour chaque verre dans le tableau précédent:

0, s'il ne perçoit rien

x, s'il perçoit une saveur

xx, si la perception est plus forte

xxx, etc.

Il doit également signaler à partir de quel verre il reconnaît la saveur, et donner le nom de la saveur reconnue.

*-Les concentrations D8, D7,D1 de ces solutions sont celles de l'AFNOR et sont restées les mêmes pour le saccharose et le sel durant toute la mission.

*-Pour l'amertume et l'acide, les concentrations ont été réajustées car les seuils de détection de certains dégustateurs étaient trop élevés pour qu'ils puissent percevoir ces saveurs (l'agueusie à l'amertume, c'est-à-dire la très faible perception de la saveur amère est un phénomène courant).

Pour ces deux saveurs la concentration la plus faible D8 a été supprimée, et une solution de concentration D0 (= D1 / 0,8) a été rajoutée (0,8 étant la raison géométrique recommandée par l'AFNOR).

Ces changements de concentration ont été pris en compte dans l'analyse des résultats.

C/

RESULTATS

1/ Représentation des résultats

La représentation des résultats sous forme de tableaux a été choisie:

En colonne sont données les dates des séances, et en ligne les dilutions d0, d1,, d8 (classées ici par ordre de concentrations croissantes).

Remplissage du tableau

-Une case laissée blanche signifie que l'individu n'a rien perçu (il a noté "0" pour le verre correspondant)

- Une case légèrement grisée signifie que l'individu a noté "x" pour le verre correspondant, mais qu'il n'a pas su détecter le leurre suivant (il a mis également un "x" pour le verre d'eau).
==> A-t-il réellement perçu quelque chose?

- Une case fortement grisée signifie que le dégustateur a noté "x" pour le verre correspondant, mais que l'on ne peut savoir s'il a réellement perçu une saveur, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de leurre suivant directement ce verre, ou bien que le leurre qui précède a été également noté d'un "x".

-Une case noire représente soit un "x" confirmé par une bonne détection du leurre suivant, soit le fait qu'il y ait une amélioration significative de la perception par la notation "xx".

Autres indications:

-Ont été annotées "**test non réalisé**" les séries pour lesquelles le nom de la saveur annoncée par le dégustateur ne correspondait pas à celle qui leur a été servie.

-A droite de chaque tableau sont indiquées par une courbe rouge les différentes profondeurs auxquelles se trouvait le dégustateur.

2/ Interprétation des résultats par molécule

La phase de plongée correspond à une phase d'apprentissage pendant laquelle les résultats obtenus sont difficilement utilisables (On observe généralement une augmentation de la sensibilité aux différents saveurs au cours des toutes premières séances).

Nous nous intéresserons donc plus particulièrement à l'évolution des résultats pendant la remontée.

Chlorure de sodium:

Pour les plongeurs, la perception du goût salé par S.I. augmente de façon significative lors de la remontée. Ce phénomène n'a pu être confirmé par les deux autres plongeurs car les derniers tests n'ont, soit pas été correctement réalisés, soit montrent une trop grande incohérence (cf. le graphique pour T.M.). Les tendances semblent cependant être sensiblement les mêmes.

Pour les témoins, le goût salé a été perçu sans évolution notable par R.E., et même avec une diminution de la perception du sel par B.G.

Caféine et acide citrique:

L'hétérogénéité de l'évolution des seuils de perception et le nombre de tests non réalisés rendent l'analyse des résultats difficile.

Saccharose

La perception semble être meilleure en fin de remontée que pendant la phase à -650m pour les deux plongeurs R.P. et T.M. (ce qui ne se retrouve pas ni pour les deux témoins ni pour le troisième plongeur).

Conclusion

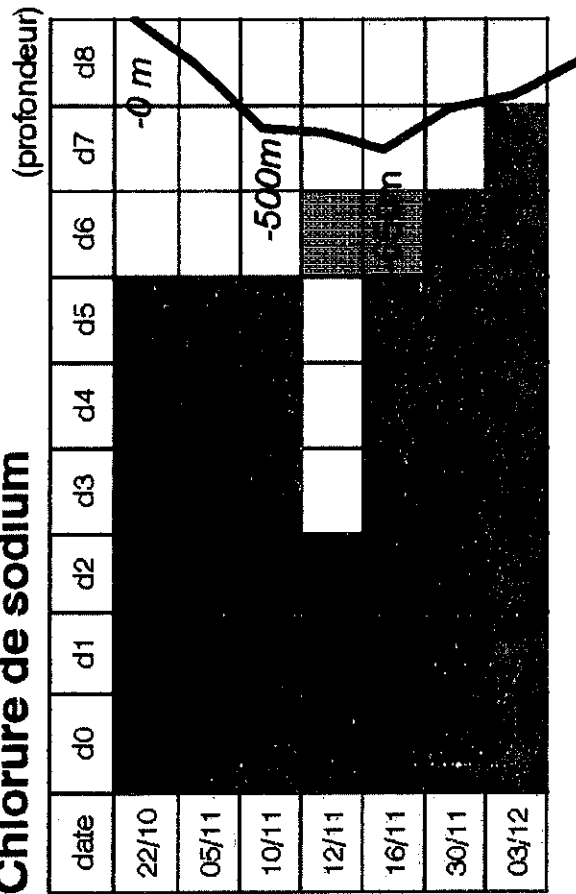
Seules les perceptions des saveurs sucrées et salées semblent avoir évolué au cours de la remontée.

Le manque de tests en fin de remontée et les tests "non réalisés" nous empêchent de vérifier ces évolutions de sensibilité.

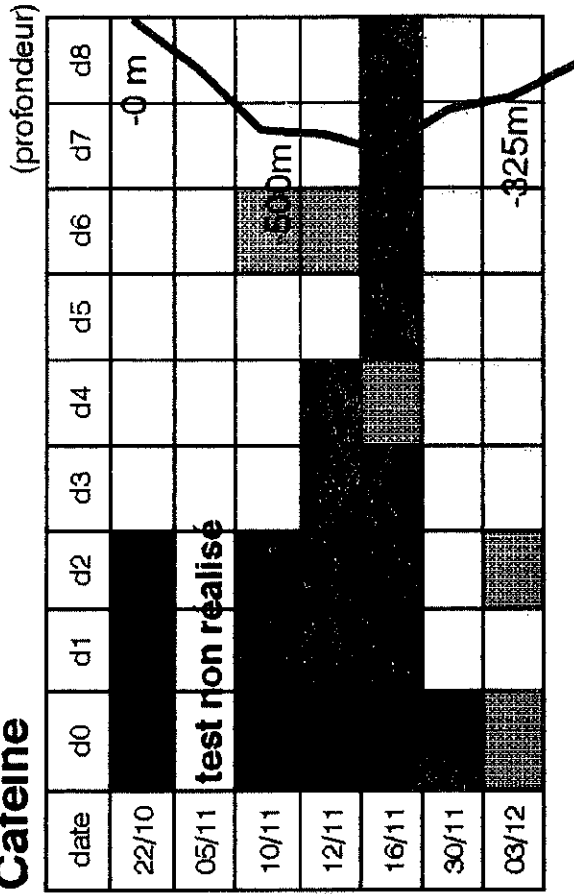
Une diminution de la perception des plongeurs à très grande profondeur décelée par ce genre de test, pourrait avoir plusieurs interprétations si jamais elle était confirmée:
Il pourrait s'agir soit d'un changement physiologique ou bien tout simplement d'une baisse de la capacité de concentration des individus en de telles conditions.
Cette confirmation nécessiterait de tester un plus grand nombre d'individus.

Evolution des seuils de détection de Serge Icart

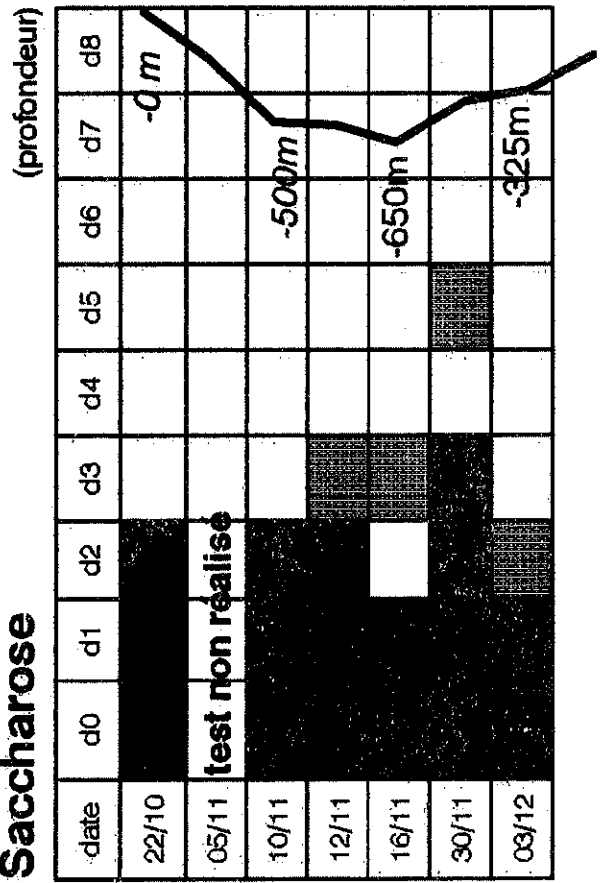
Chlorure de sodium



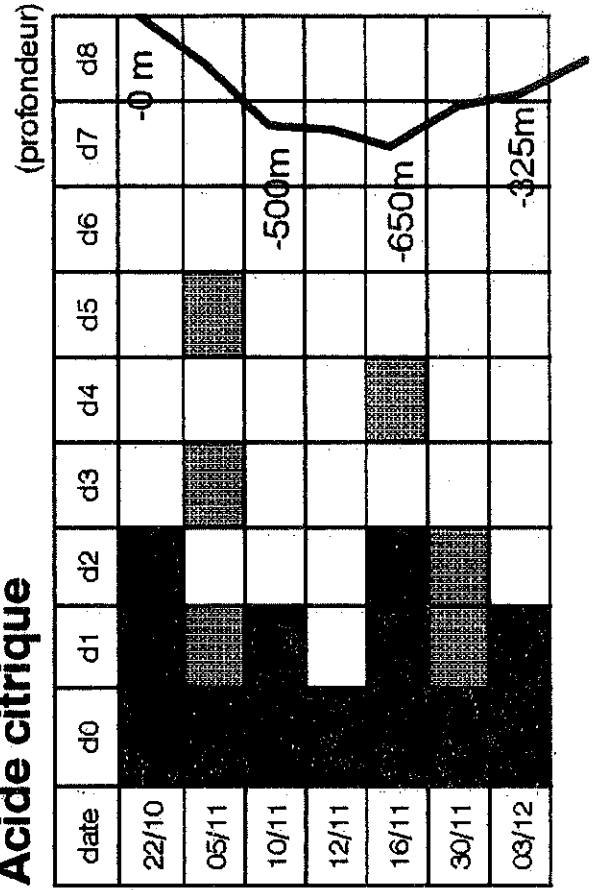
Caféine



Saccharose

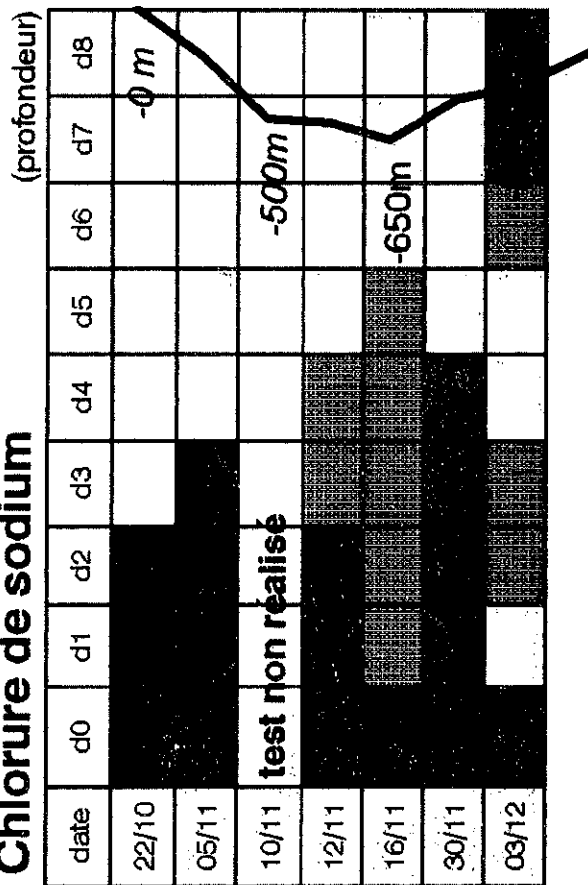


Acide citrique

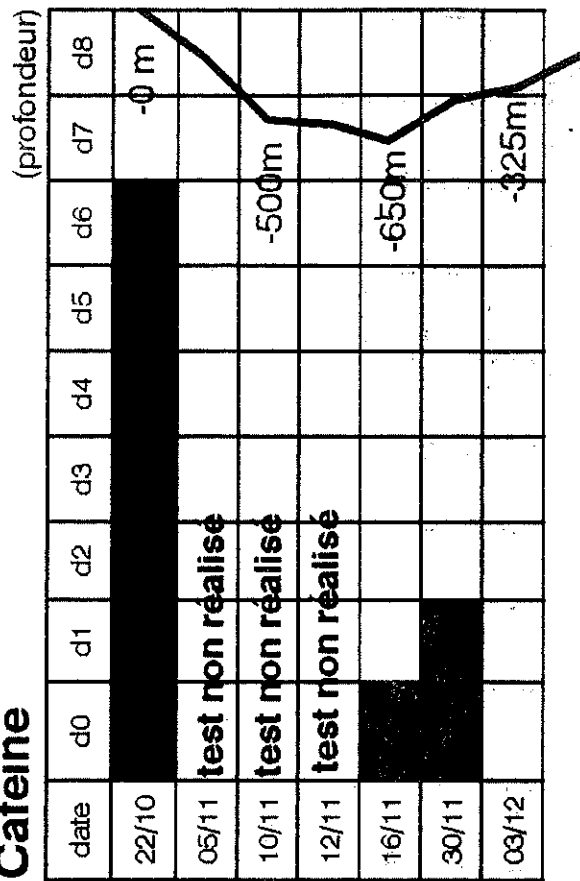


Evolution des seuils de détection de Théo Mavrotomos

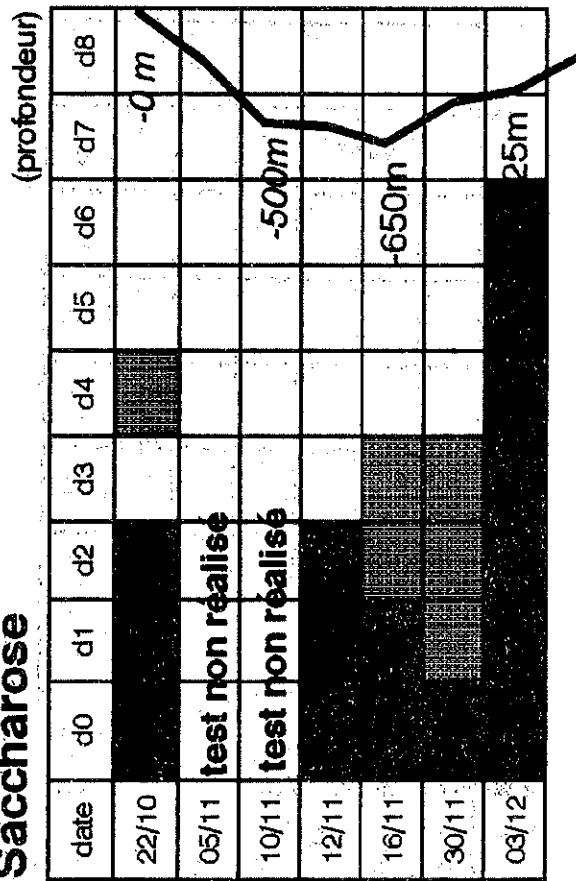
Chlorure de sodium



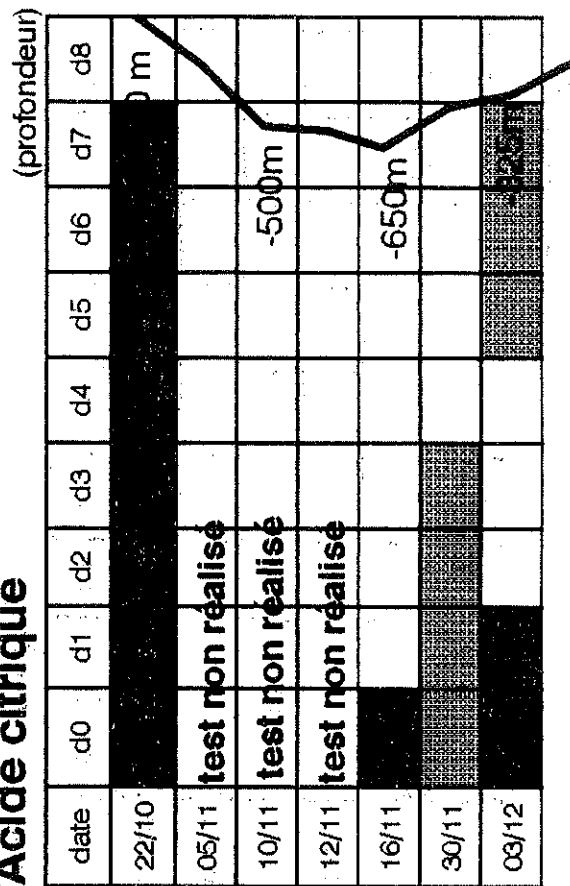
Caféine



Saccharose

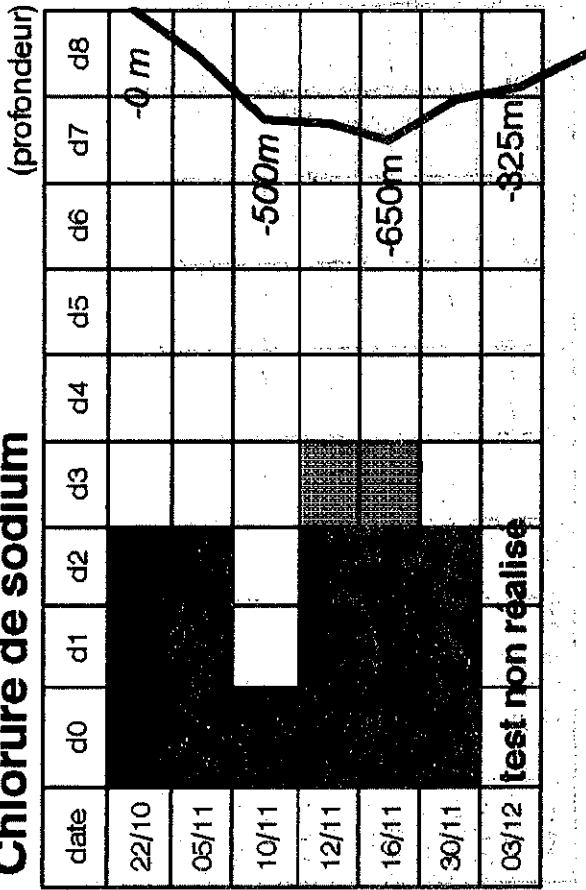


Acide citrique

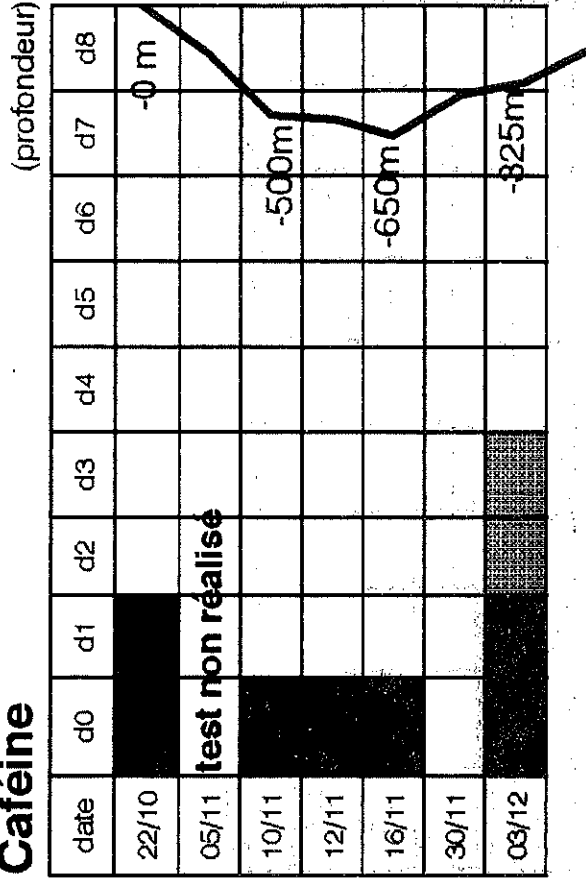


Evolution des seuils de détection de Régis Peilho

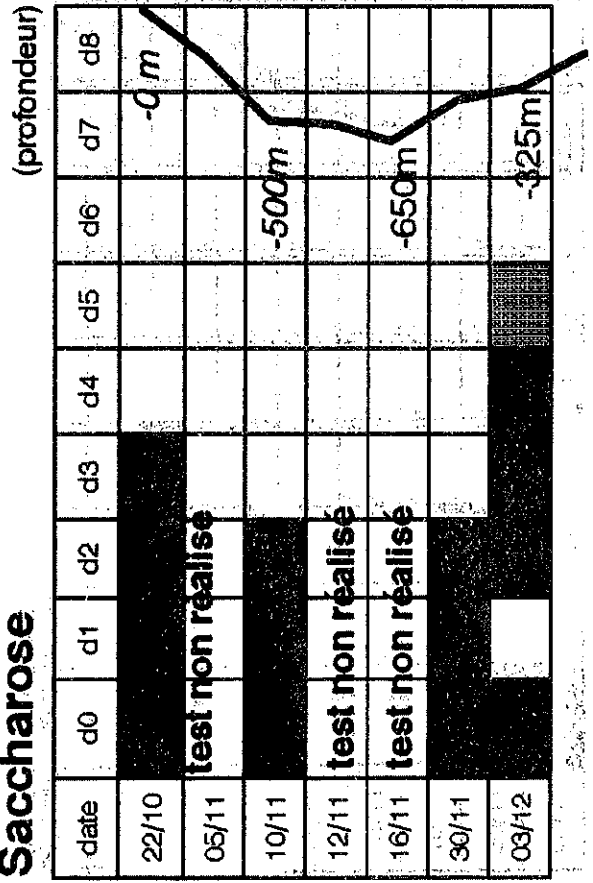
Chlorure de sodium



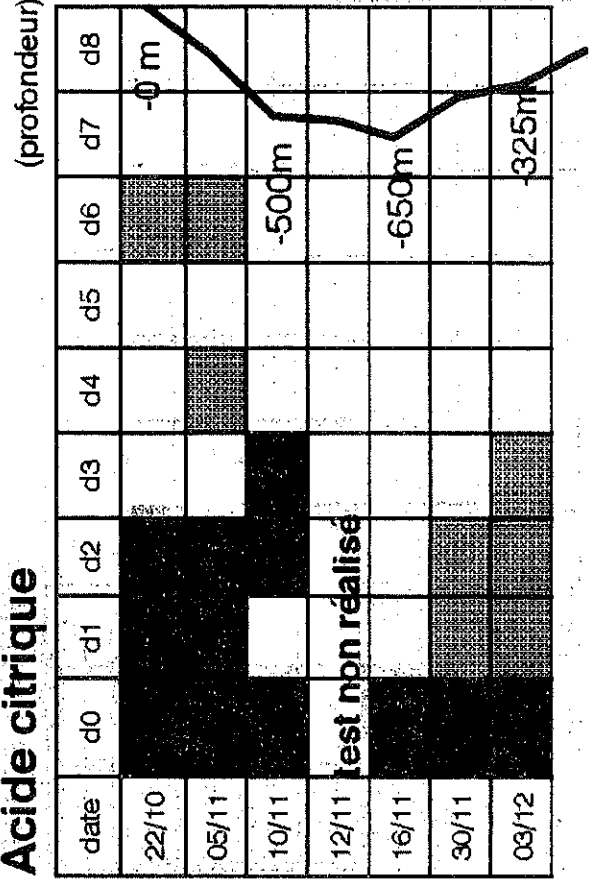
Caféine



Saccharose



Acide citrique



EVOLUTION DES SEUILS DE PERCEPTION
AU COURS DE LA PLONGEE
HYDRA X

POUR QUATRE SAVEURS FONDAMENTALES

Le confinement, les fortes pressions et la composition du mélange gazeux sont autant de paramètres qui influent sur la perception et sur l'appréciation générale des aliments.

Au cours d'une mission, les plongeurs sont amenés à rester plus d'un mois à très grande profondeur, enfermés dans un espace réduit. On peut aisément imaginer l'importance que prend la nourriture dans de telles conditions.

C'est pourquoi la COMEX s'est intéressée à l'évolution du "goût" des plongeurs au cours de la simulation HYDRA X.

A/

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les tests d'évaluation des seuils de détection sont effectués sur les quatre saveurs fondamentales: amer, sucré, acide, salé.

1/ Les produits utilisés sont ceux recommandés par la norme AFNOR:
(Association Française de Normalisation)

- La caféine monohydratée
- Le saccharose
- L'acide citrique monohydraté cristal
- Le chlorure de sodium

2/ L'eau utilisée est la même pour tous les tests, il s'agit de l'eau Vittel.

3/ La méthode d'évaluation des seuils est celle recommandée par l'AFNOR:

Elle consiste à faire goûter à l'individu une série de 8 solutions de concentrations croissantes où sont introduits trois leures (trois solutions d'eau pure), et à demander à partir de quelle solution un stimulus est perçu.

Exemple type:

(Les concentrations D8, D7,.....D1 sont de plus en plus élevées)

Contenu réel des verres

| n° du verre | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------|----|----|------------|----|----|----|------------|----|----|------------|----|
| contenu | D8 | D7 | <u>eau</u> | D6 | D5 | D4 | <u>eau</u> | D3 | D2 | <u>eau</u> | D1 |

Fiche à remplir par le dégustateur

| n° du verre | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| contenu | | | | | | | | | | | |

Il est demandé au dégustateur de noter pour chaque verre dans le tableau précédent:

0, s'il ne perçoit rien

x, s'il perçoit une saveur

xx, si la perception est plus forte

xxx, etc.

Il doit également signaler à partir de quel verre il reconnaît la saveur, et donner le nom de la saveur reconnue.

*-Les concentrations D8, D7,D1 de ces solutions sont celles de l'AFNOR et sont restées les mêmes pour le saccharose et le sel durant toute la mission.

*-Pour l'amertume et l'acide, les concentrations ont été réajustées car les seuils de détection de certains dégustateurs étaient trop élevés pour qu'ils puissent percevoir ces saveurs (l'agueusie à l'amertume, c'est-à-dire la très faible perception de la saveur amère est un phénomène courant).

Pour ces deux saveurs la concentration la plus faible D8 a été supprimée, et une solution de concentration D0 (= D1 / 0,8) a été rajoutée (0,8 étant la raison géométrique recommandée par l'AFNOR).

Ces changements de concentration ont été pris en compte dans l'analyse des résultats.

B/

Réalisation pratique des tests

*-Les 11 verres d'une série étaient servis sur un même plateau.

L'ordre de présentation des quatre séries était différent selon les dégustateurs, ce qui permet de contrôler si les dégustateurs ont noté ce qu'ils ont effectivement perçu.

*-Deux témoins au sol ont effectué les tests de détection en même temps que les plongeurs, afin de détecter les éventuelles erreurs de préparation des solutions.

*-Les solutions, préparées le matin même par les élèves de l'école hôtelière, étaient amenées aux dégustateurs à la même heure pour toutes les séances.

1/ Représentation des résultats

La représentation des résultats sous forme de tableaux a été choisie:

En colonne sont données les dates des séances, et en ligne les dilutions d0, d1,, d8 (classées ici par ordre de concentrations croissantes).

Remplissage du tableau

-Une case laissée blanche signifie que l'individu n'a rien perçu (il a noté "0" pour le verre correspondant)

- Une case légèrement grisée signifie que l'individu a noté "x" pour le verre correspondant, mais qu'il n'a pas su détecter le leurre suivant (il a mis également un "x" pour le verre d'eau).
==> A-t-il réellement perçu quelque chose?

- Une case fortement grisée signifie que le dégustateur a noté "x" pour le verre correspondant, mais que l'on ne peut savoir s'il a réellement perçu une saveur, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de leurre suivant directement ce verre, ou bien que le leurre qui précède a été également noté d'un "x".

-Une case noire représente soit un "x" confirmé par une bonne détection du leurre suivant, soit le fait qu'il y ait une amélioration significative de la perception par la notation "xx".

Autres indications:

-Ont été annotées "**test non réalisé**" les séries pour lesquelles le nom de la saveur annoncée par le dégustateur ne correspondait pas à celle qui leur a été servie.

-A droite de chaque tableau sont indiquées par une courbe rouge les différentes profondeurs auxquelles se trouvait le dégustateur.

2/ Interprétation des résultats par molécule

La phase de plongée correspond à une phase d'apprentissage pendant laquelle les résultats obtenus sont difficilement utilisables (On observe généralement une augmentation de la sensibilité aux différents saveurs au cours des toutes premières séances).

Nous nous intéresserons donc plus particulièrement à l'évolution des résultats pendant la remontée.

Chlorure de sodium:

Pour les plongeurs, la perception du goût salé par S.I. augmente de façon significative lors de la remontée. Ce phénomène n'a pu être confirmé par les deux autres plongeurs car les derniers tests n'ont, soit pas été correctement réalisés, soit montrent une trop grande incohérence (cf. le graphe pour T.M.). Les tendances semblent cependant être sensiblement les mêmes.

Pour les témoins, le goût salé a été perçu sans évolution notable par R.E., et même avec une diminution de la perception du sel par B.G.

Caféine et acide citrique:

L'hétérogénéité de l'évolution des seuils de perception et le nombre de tests non réalisés rendent l'analyse des résultats difficile.

Saccharose

La perception semble être meilleure en fin de remontée que pendant la phase à -650m pour les deux plongeurs R.P. et T.M..(ce qui ne se retrouve pas ni pour les deux témoins ni pour le troisième plongeur).

Conclusion

Seules les perceptions des saveurs sucrées et salées semblent avoir évolué au cours de la remontée.

Le manque de tests en fin de remontée et les tests "non réalisés" nous empêchent de vérifier ces évolutions de sensibilité.

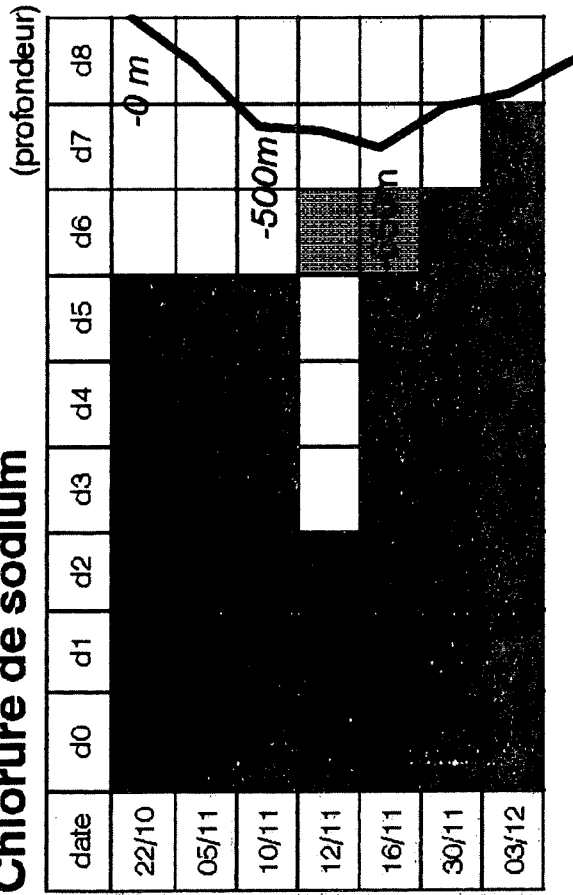
Une diminution de la perception des plongeurs à très grande profondeur décelée par ce genre de test, pourrait avoir plusieurs interprétations si jamais elle était confirmée:

Il pourrait s'agir soit d'un changement physiologique ou bien tout simplement d'une baisse de la capacité de concentration des individus en de telles conditions.

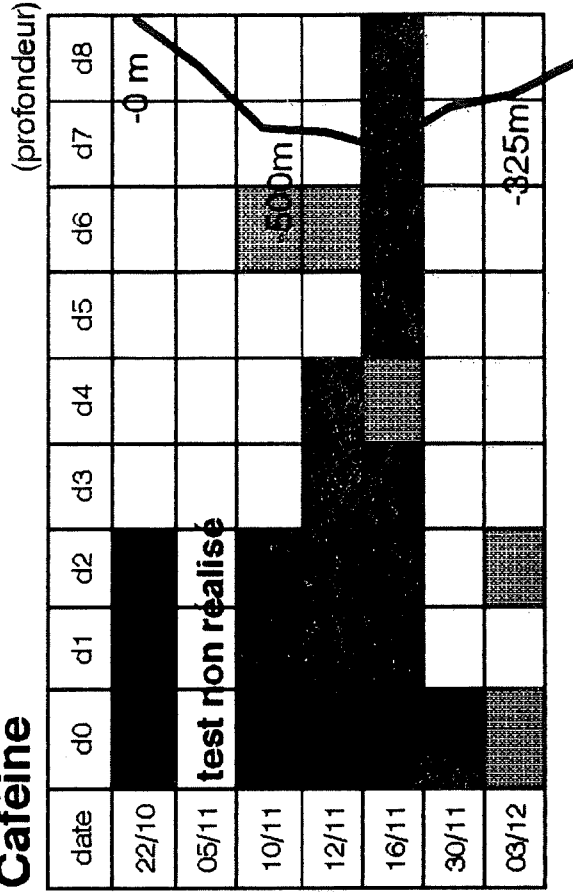
Cette confirmation nécessiterait de tester un plus grand nombre d'individus.

Evolution des seuils de détection de Serge Icart

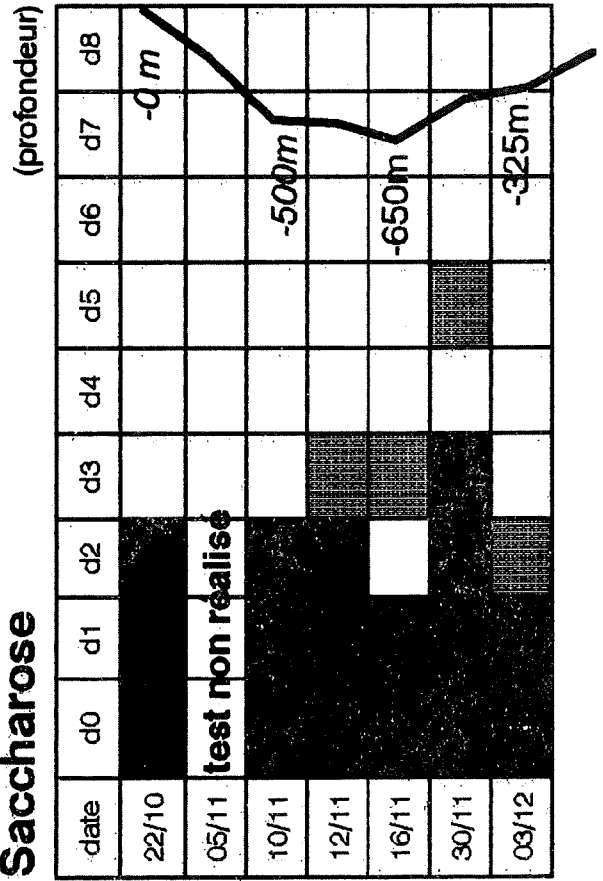
Chlorure de sodium



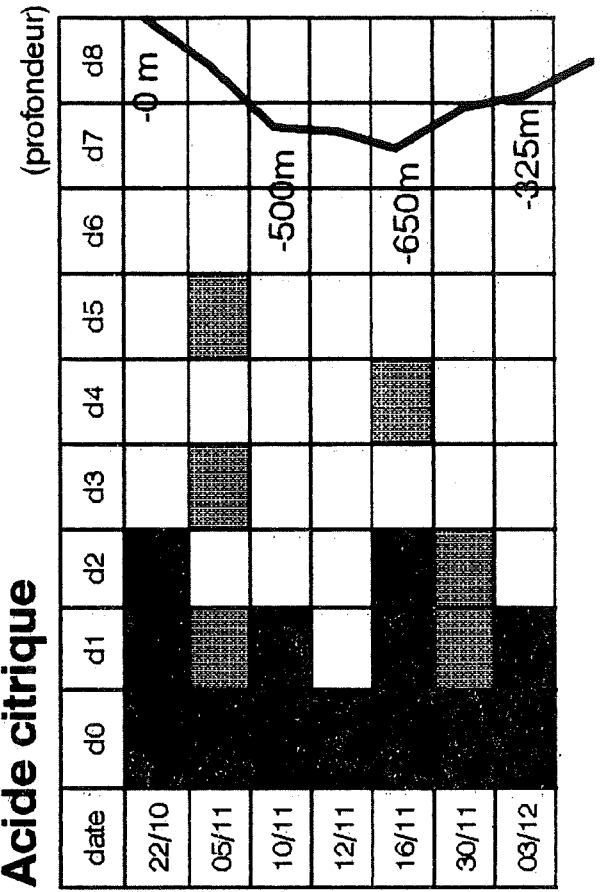
Caféine



Saccharose

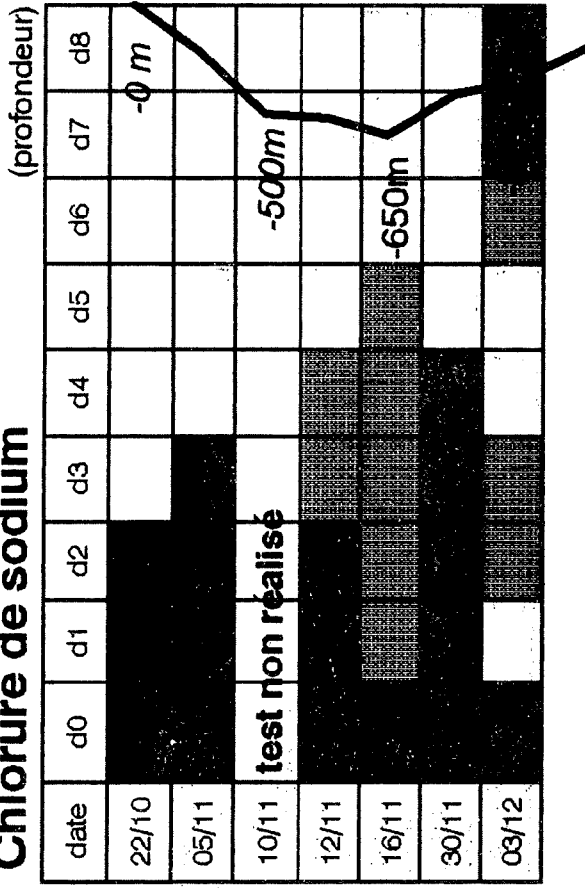


Acide citrique

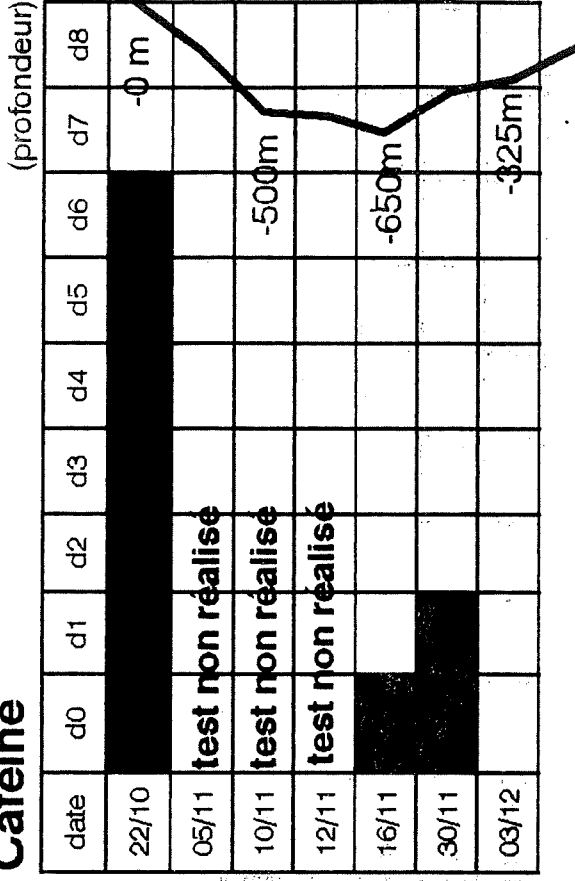


Evolution des seuils de détection de Théo Mavrotomos

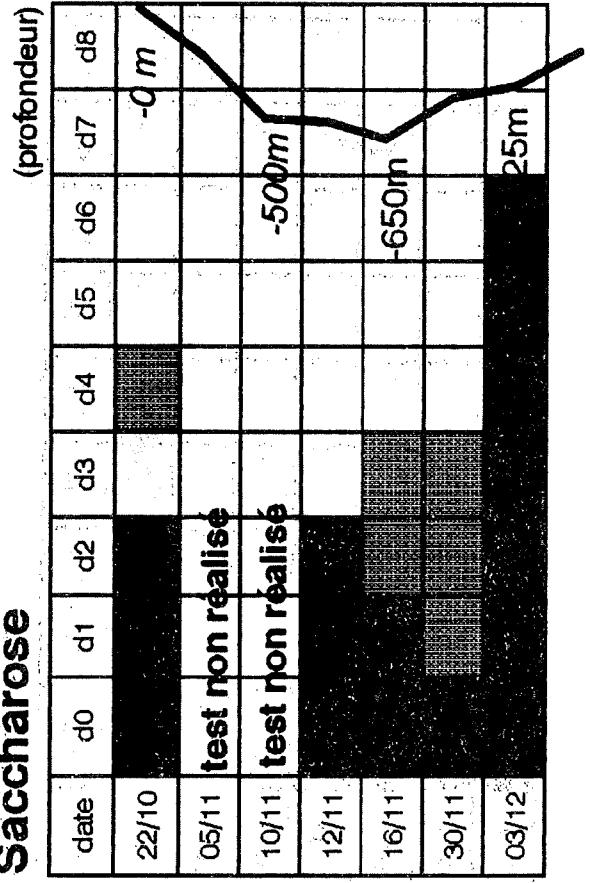
Chlorure de sodium



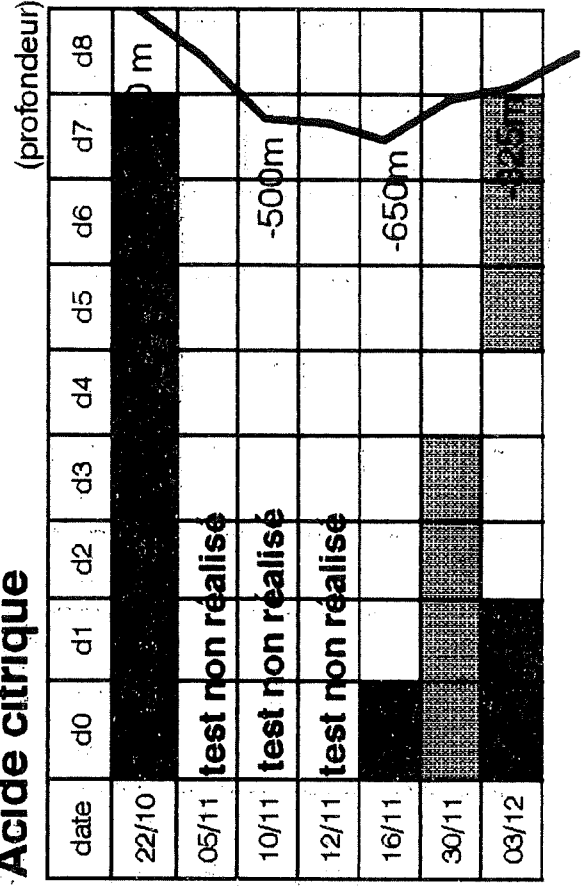
Caféine



Saccharose

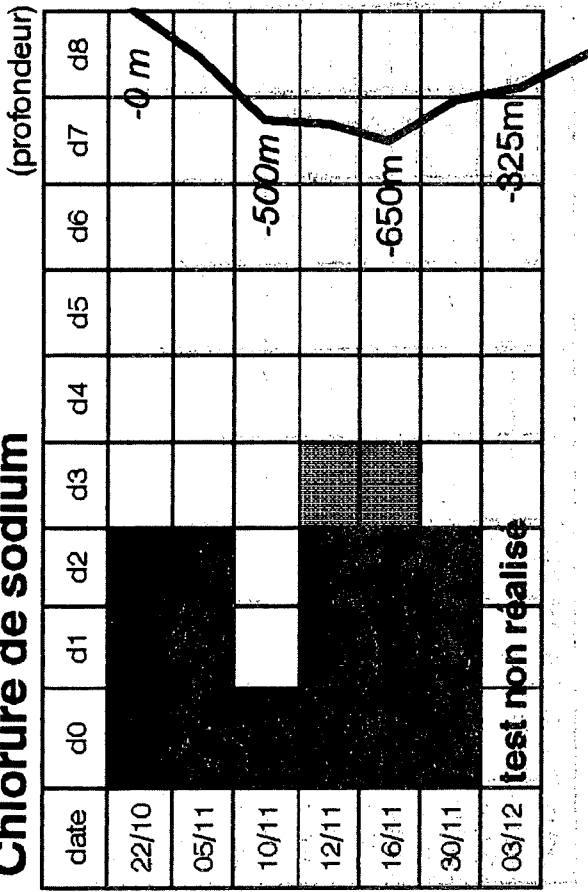


Acide citrique

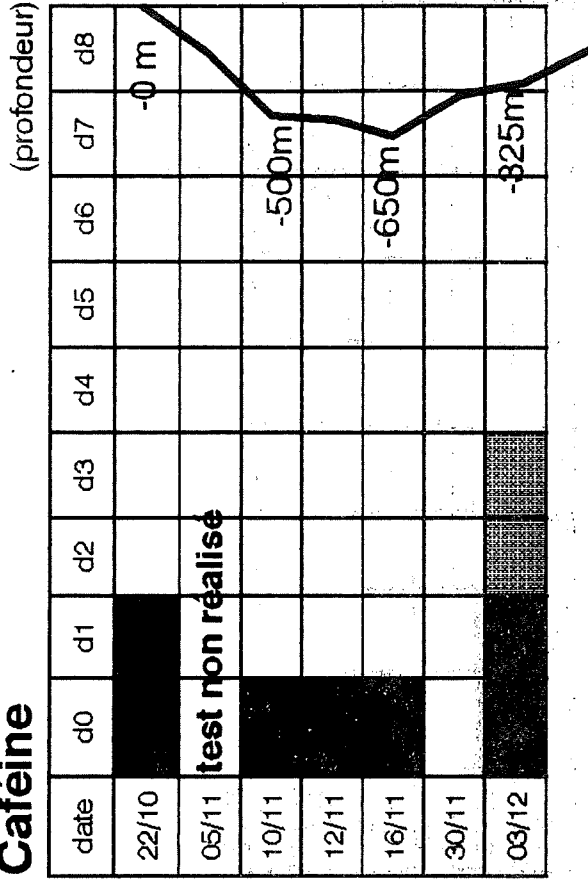


Evolution des seuils de détection de Régis Peilho

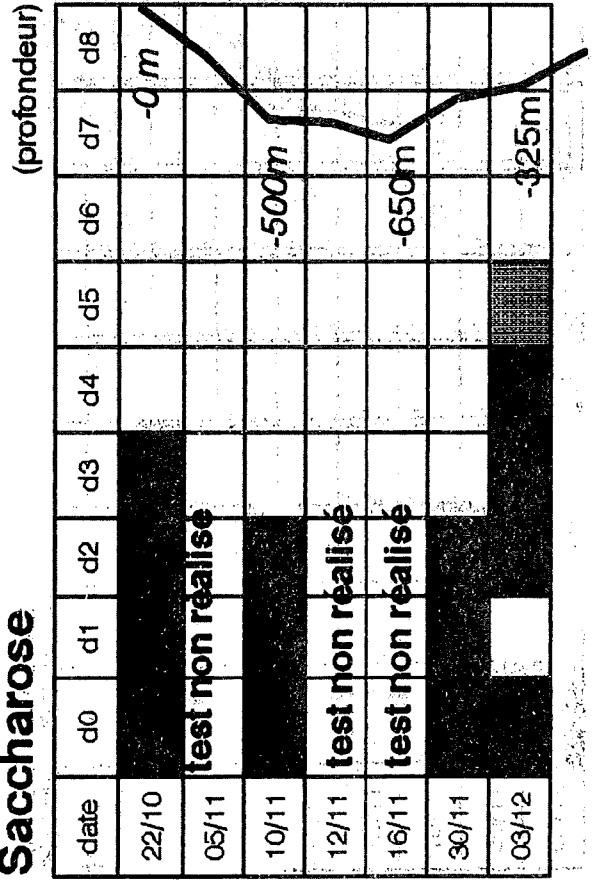
Chlorure de sodium



Caféine



Saccharose



Acide citrique

