comex

HYDRA 10

RAPPORT SCIENTIFIQUE

Direction Scientifique

COMEX S.A

B. GARDETTE D.Sc.

Exemplaire n° .02.....

Remis à : J.Y. MASSINELLI.....

OCTOBRE 1993

COMEX S.A. 36, BOULEVARD DES OCÉANS B.P. 143 13275 MARSEILLE CEDEX 9 FRANCE
PHONE 91-23-50-00 TÉLEX 410985 F FAX 91-40-12-80

s.a. au capital de 15 016 800 francs — s.i.r.e.n. 062 802 459

AVANT - PROPOS

Ce rapport scientifique HYDRA 10 comporte vingt chapitres.

Les deux premiers chapitres constituent des synthèses (Version Française : Chapitre 1 et Version Anglaise : Chapitre 2).

Les autres chapitres représentent les comptes-rendus des travaux effectués par les différentes équipes scientifiques qui ont participé à cette plongée "record".

Ce document n'est pas destiné à être publié. Il ne sera l'objet que d'une diffusion limitée. Chaque exemplaire est délivré à titre personnel aux intéressés.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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*	*M. COMET* *J.Y. MASSIMELLI*
IV -	*Etudes neurophysiologiques*	*J.C. ROSTAIN* *M.C. GARDETTE - CHAUFFOUR* *C. TOMEI*
V -	*Etude thermique réalisée au cours du sommeil*	*J.P LIBERT*
VI -	*Etude des performances psychométriques et intellectuelles*	*C. LEMAIRE*
VII-	*Etude des sensations respiratoires et tactiles*	*H. BURNET* *Y. JAMMES* *S. SARRAMEGNA*
VIII-	*Etude ergonomique et électromyographique de muscles inspiratoires (diaphragme) et squelettique (adducteur du pouce)*	*Y. JAMMES* *M. BADIER* *C. GUILLOT* *C. TOMEI* *P. FONTANARI*
IX-	*Suveillance cardiologique des plongeurs*	*B. COMET* *V. LAFAY*
X -	*Etude de l'électrocardiogramme*	*V. LAFAY* *B. COMET*

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

XI - Préparation athlétique des plongeurs	*H. JULLIEN* *J. MEDELLI* *B. BOUFFERACHE*
XII- Monitorage cardio-ventilatoire	*J. MEDELLI* *B. BOUFFERACHE* *H. JULLIEN* *M. LAMBERT* *P. DORMOKRAY* *M. COMET* *J.Y. MASSIMELLI* *B. GARDETTE*
XIII- Etude Doppler	*B. GARDETTE* *A. BOUSSUGES*
XIV- Explorations hématologiques	*A. BOUSSUGES* *C. MENART* *C. FOSSAT* *I. JUHAN-VAGUE* *E. BERGMANN* *J.M. SAINTY*
XV- Explorations urinaires	*A. BOUSSUGES* *C. MENART* *J.C. BORDET* *I. JUHAN-VAGUE* *J.M. SAINTY*
XVI- Bilan neurologique	*J.L. GASTAUT* *B. CHAVE-ROVINI*
XVII- 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*

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

XVIII-	*Imagerie par résonnance magnétique du système nerveux central*	*O. BAYLE*
XIX-	*Bilan ophtalmologique*	*P. METGE* *A. COLLET* *O. PLATON*
XX-	*Evolution des seuils de perception au cours de la plongée Hydra 10 pour quatre saveurs fondamentales*	*Laboratoire d'Analyse Sensorielle NESTLE*

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

PREFACE

HYDRA 10, plongée "record" à 701 mètres, est l'aboutissement de dix années de recherche sur l'hydrogène et de trente années de travaux sur l'hélium au service de la plongée industrielle.

Au-delà de cet exploit, des conclusions peuvent être tirées : Avec l'emploi de mélanges respiratoires hydrogénés, la zone des 300 à 650 mètres peut être considérée comme ouverte à une large population de plongeurs professionnels. Le mélange respiratoire Hydréliox (hydrogène - hélium - oxygène), en limitant les effets du Syndrome Nerveux des Hautes Pressions et en augmentant le confort respiratoire, améliore considérablement l'efficacité et la capacité de travail des plongeurs sur les installations immergées de production d'hydrocarbures.

Les compagnies pétrolières sont maintenant assurées d'une capacité d'assistance technique humaine dans les zones de profondeur qui dépassent largement la possibilité de la plongée conventionnelle à l'hélium (300 mètres).

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

H.G DELAUZE
Président du Groupe COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE I

HYDRA 10

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

COMEX

HYDRA 10

Bernard GARDETTE D. Sc.

Directeur Scientifique

Responsable de la Coordination Scientifique

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

SOMMAIRE

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 (Syndrôme 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 (Syndrôme Respiratoire des Hautes Pressions - SRHP).
- Les douleurs et craquements articulaires (Syndrôme 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-helium-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 singeà 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 ($2{,}5\ \%\ O_2$)

- **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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

2.5 PHASE DE DECOMPRESSION

- Profondeur variable de 675 mètres à la surface.
- Mélange gazeux : Hydreliox (675 - 280 mètres), puis Héliox (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.

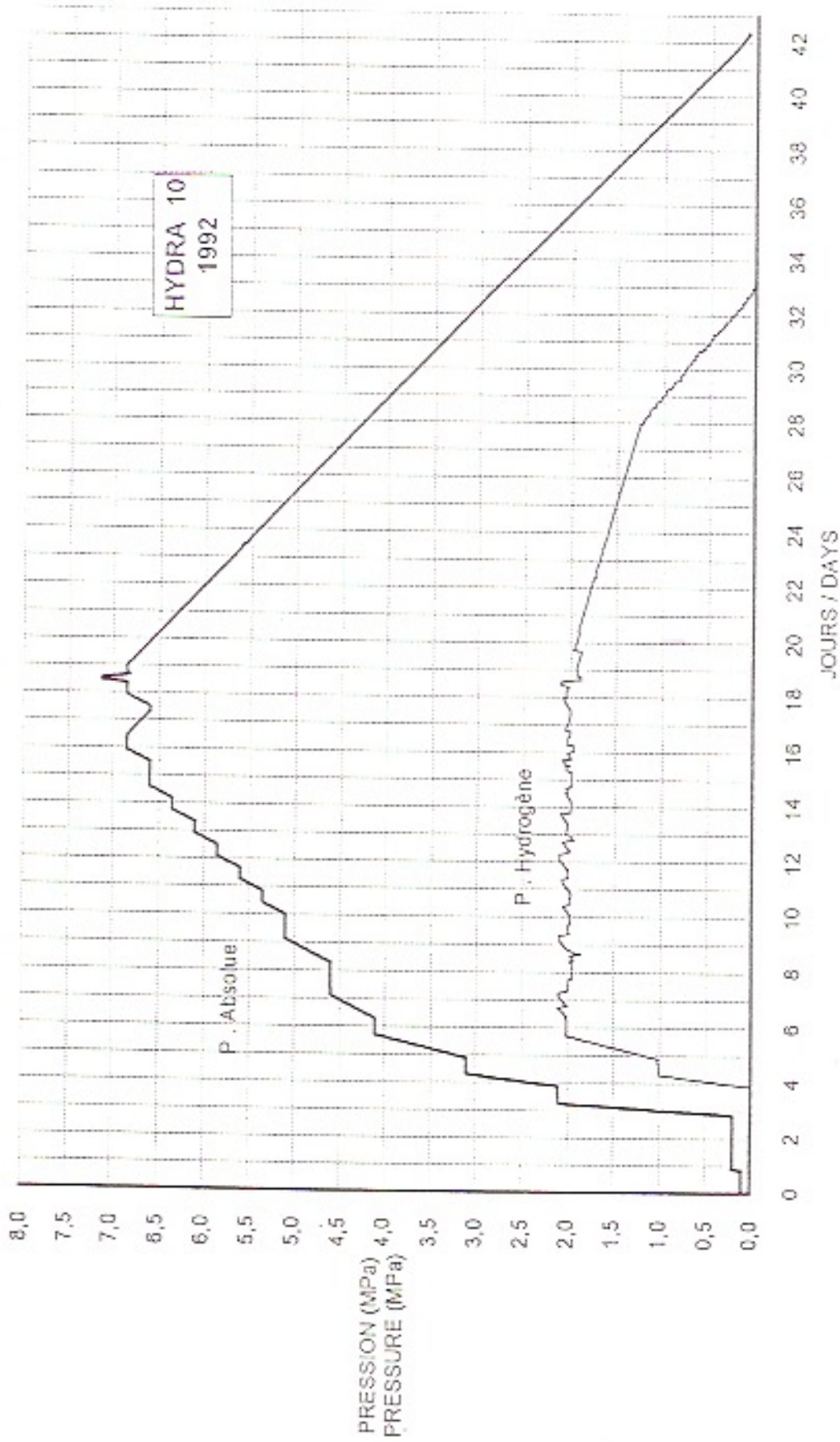
2.6 PHASE POST-PLONGEE

- 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.

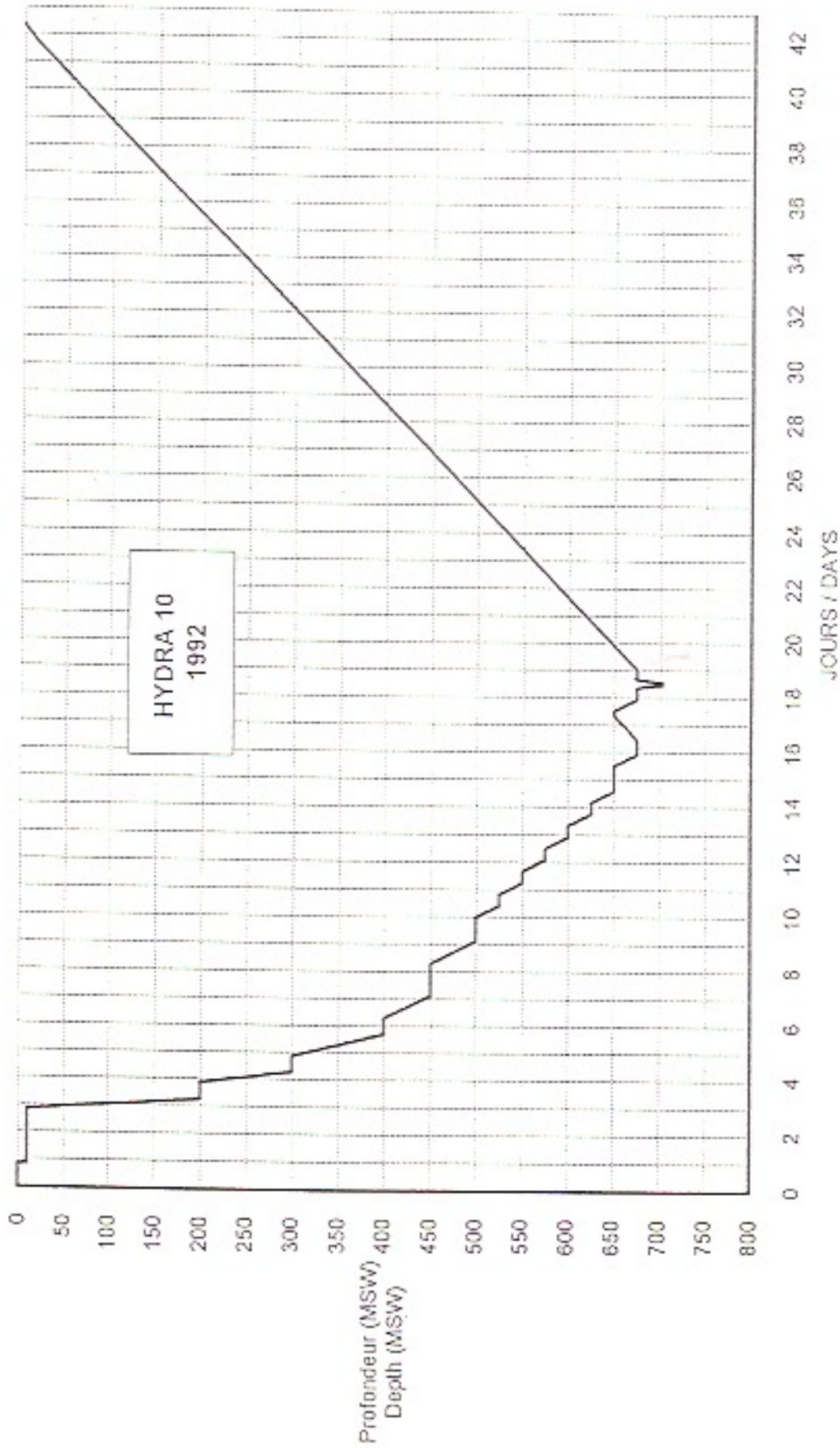
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

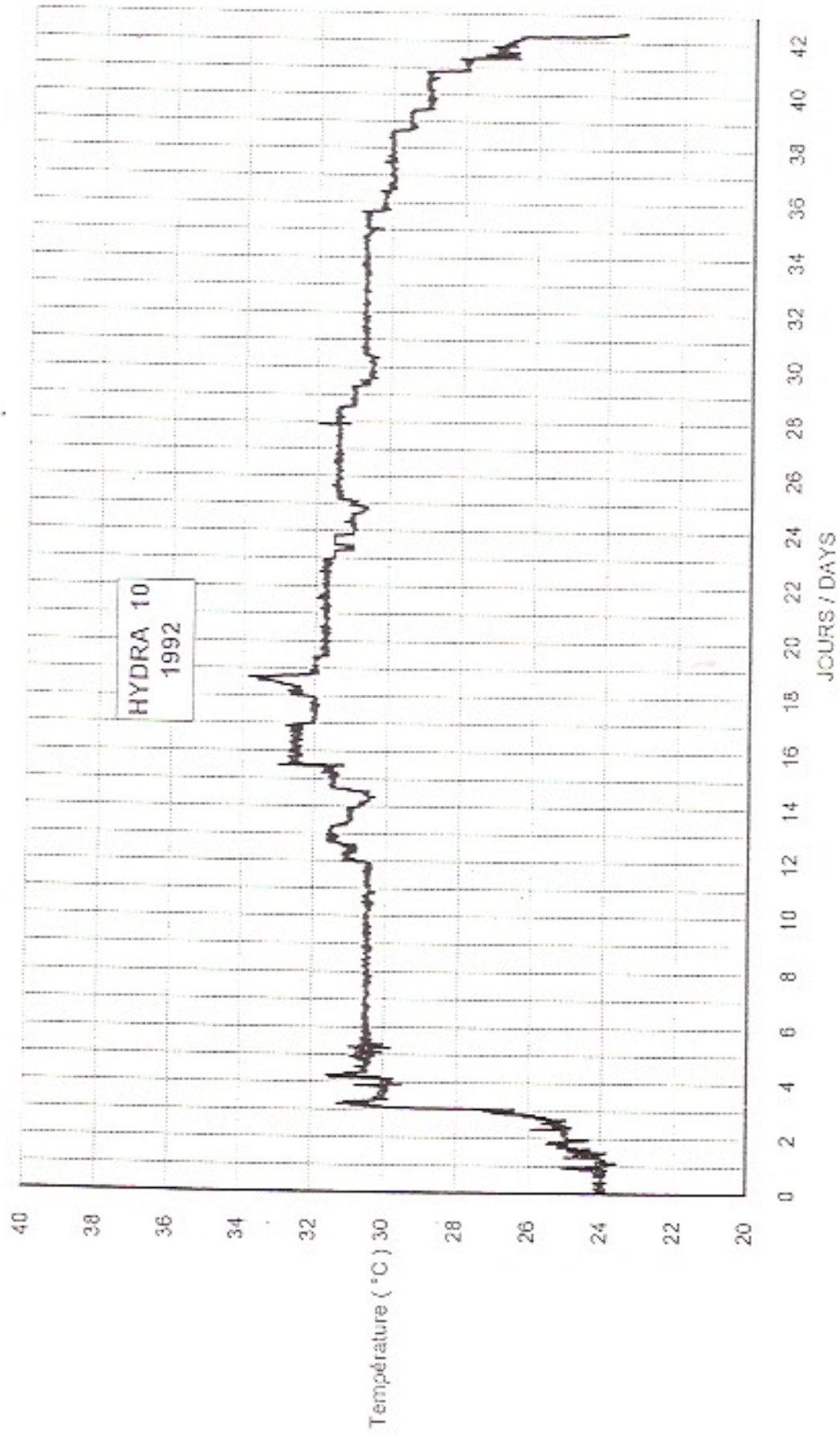
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- **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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- **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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 PO_2/PCO_2 (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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 reactivité 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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 : P_3)

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 : P_2)

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 : P_1)

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

3.3.2 Phase confinement : 10 mètres (de J_0 à J_2)

J_0 (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.

J_1

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.

J_2

07h30	Réveil.
	Toilette.
	Petit-déjeuner.
08h30	Entretien clinique.
	Mesure du tremblement.
09h00	E.E.G.
10h00	PO_2 / P CO_2 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 P_3)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

3.3.3 Phase de compression : 10 - 675 mètres (de J_3 à J_{15})

- J_4 (300 mètres) : Journée type J_1
- J_7 (450 mètres) : Journée type J_1 (sans EMG)
- J_9 (500 mètres) : Journée type J_1 (sans EMG)
- J_{11} (550 mètres) : Journée type J_1
- J_{13} (600-625 mètres) : Journée type J_1

En dehors de ces journées type J_1, il est réalisé :

- des analyses sensorielles gustatives en J_3 (200 mètres), J_8 (450 mètres, J_{10} (525 mètres) et J_{14} (650 mètres) ;
- des mesures de PO_2/PCO_2 transcutanées en J_3 (200 mètres), J_5 (350-400 mètres), J_6 (400-450 mètres), J_8 (450-500 mètres), J_9 (500 mètres) et J_{12} (575 mètres) ;
- un contrôle régulier ECG/TA de repos, plus des ECG de 24h00 (Holter) en J_3 (200 mètres) pour P_3, en J_4 (300 mètres) pour P_2 et J_5 (350-400 mètres) pour P_1 ;
- des prélèvements urinaires de 24h00 en J_6 (400-450 mètres), J_{13} (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 J_{16} à J_{18})

- **J_{16} (675 mètres)** : Entretien clinique
Tremblement - EEG - Voix
- **J_{17} (650 mètres)** : Entretien clinique
Tremblement - Psychométrie - ECG
- **J_{18} (675 - 701 mètres)** : Entretien clinique
Tremblement - EEG - ECG
Exercice au sec - Détection des bulles

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

3.3.5 Phase de décompression : 675 mètres - surface (de J_{19} à J_{42})

- J_{19} (660 - 650 mètres)

Entretien clinique - Tremblement
EEG.

15h00 Plongée dans l'eau (P_2) avec ECG et température du gaz respiratoire.

- J_{20} (640 - 630 mètres)

09h00 Plongée dans l'eau (P_1) avec température du gaz respiratoire.

10h30 Plongée dans l'eau (P_2) avec température du gaz respiratoire.
Entretien clinique.

- J_{21} (600 mètres) Entretien clinique - Tremblement - EEG - Détection des bulles.

- J_{22} (580 - 570 mètres)

09h00 Plongée dans l'eau (P_3) avec ECG et température du gaz respiratoire.
Détection de bulles - Voix
Entretien clinique.

- J_{23} (550 mètres)

09h00 Plongée dans l'eau (P_3) avec ECG et température du gaz respiratoire.
EEG - Tremblement - Détection de bulles
Entretien clinique.

- J_{24} (520 mètres) Journée type J_1 (sans EMG, ni analyse sensorielle).

- J_{25} (490 mètres) Tremblement - EEG - Détection de bulles.
Entretien clinique.

14h30 Plongée dans l'eau (P_1) avec ECG et température du gaz respiratoire.

- J_{26} (460 mètres) Tremblement - Détection de bulles - Voix.
Entretien clinique.

10h00 Plongée dans l'eau (P_2) avec ECG et température du gaz respiratoire.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

De J_{27} à J_{41} il est réalisé :

- des mesures de sensations tactiles et respiratoires en **J_{28}** (400 mètres), **J_{32}** (280 mètres) et **J_{41}** (20 mètres) ;

- des tests psychométriques en **J_{29}** (370 mètres) et **J_{36}** (170 mètres) ;

- de l'EMG diaphragmatique et squelettique en **J_{39}** (75 mètres) ;

- une plongée dans l'eau (P_2) avec ECG en **J_{37}** (145 mètres) ;

- des analyses sensorielles gustatives en **J_{28}** (400 mètres), **J_{31}** (310 mètres) et **J_{36}** (170 mètres) ;

- un contrôle régulier ECG/TA de repos, plus des ECG de 24h00 (Holter) en **J_{29}** (370 mètres) pour P_3, **J_{30}** (340 mètres) pour P_2, **J_{31}** (310 mètres) pour P_1 ;

- des prélèvements urinaires de 24h00 en **J_{27}** (430 mètres), **J_{31}** (310 mètres), **J_{36}** (170 mètres), **J_{41}** (20 mètres) ;

- des détections de bulles circulantes et des analyses de la voix une fois par jour ;

- des entretiens cliniques quotidiens.

J_{42} (Lundi 14 Décembre 1992) :

07h30 : Prise de sang.
11h00 : Sortie des plongeurs - Conférence de presse.
14h00 : E.F.R - Hôpital Sainte-Marguerite.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 J_0 à J_2)

Du Lundi 2 Novembre au Mercredi 4 Novembre 1992.

* Rien à signaler durant ces deux jours de séjour à 10 mètres sous Héliox (PO_2 = 0,4 b).

* Le soir de J_2 à 21h00, début de compression sous pression Héliox entre 10 et 200 mètres.

4.3 PHASE DE COMPRESSION (de J_3 à J_{15})

Du Jeudi 5 Novembre au mardi 17 Novembre 1992.

* Entre 400 et 450 mètres, P_3 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 (J_{14}), l'appétit est moins bon et s'accompagne chez P_2 d'une sensation d'écoeurement vis à vis de la nourriture. P_1 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

* A J_{15} (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 J_{16} à J_{18})

Du Mercredi 18 Novembre au Vendredi 20 Novembre 1992.

* Le matin de J_{16}, 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 P_1. Il est décidé, à 11h00, de décomprimer de 675 mètres à 650 mètres et de faire regagner aux plongeurs le grand caisson (à 16h00 : 669 mètres).

* A J_{17}, 8h00, arrivée au palier à 650 mètres.
  Après discussion avec les plongeurs, et compte-tenu d'une amélioration sensible de leur état, surtout pour P_2, une nouvelle compression 650 - 675 mètres est programmée. Elle débute à 12h20 pour se terminer à 22h20.

* A J_{18}, une excursion entre 675 et 701 mètres est réalisée par P_2 dans les sphères 1 et 2, alors que P_1 et P_3 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

4.5 PHASE DE DECOMPRESSION (de J_{19} à J_{42})

Du Samedi 21 Novembre au Lundi 14 Décembre 1992.

* L'après-midi de **J_{19}** à 660 mètres, première plongée de P_2 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 (**J_{20}**), deuxième plongée dans l'eau réalisée par P_1 d'une durée de 30 minutes.
  Le même jour (635 mètres), troisième plongée réalisée par P_2, durée 1h30 avec montage (incomplet) du puzzle en 1h05. Consommation moyenne de gaz : 24 l/min.

* A 580 mètres (**J_{22}**), quatrième plongée dans l'eau réalisée par P_3 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 (**J_{23}**), cinquième plongée dans l'eau effectuée par P_3, d'une durée de 40 minutes avec démontage du puzzle.

* A 490 mètres (**J_{25}**), sixième plongée dans l'eau réalisée par P_1, 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 (**J_{26}**), septième plongée dans l'eau réalisée par P_2, 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 (**J_{28}**), 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 (**J_{33}**).

* A 145 mètres (**J_{37}**), huitième plongée dans l'eau réalisée par P_2, durée 2h25, avec exercice de 25 watts sur ergométrie à bras, montage et démontage du puzzle.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 (J_{42}).

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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, P_2.

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 P_1 et P_3.

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 P_3, 650 mètres pour P_1 et 700 mètres pour P_2.
- 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 P_1 à partir de 650 mètres.
- Une perte d'appétit à partir de 625 mètres chez les trois plongeurs avec sensation de réplétion hydrique et écoeurement chez P_2, nécessitant un changement d'alimentation.
- Des nausées avec vomissements apparues chez P_1 à 650 mètres.
- Des perturbations du sommeil avec réveils fréquents dus à un besoin d'uriner.
- Une fatigue générale observée à 675 mètres chez P_1 et P_3.
- 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 Hydreliox 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 le plus profonde, au-delà de 600 mètres, des troubles de la concentration, de la mémoire immédiate et de l'écriture (dysorthographie).

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE II

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 enchances 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 thereshold 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.

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.

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 m^3 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 m^3 cylindrical chamber (internal diameter : 2.3 m - length : 9.35 m) with living area and sleeping quarters and sanitaries. 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 - 0_2)
  . PO_2 : 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,
  H_2 : 200 - 400 msw and He : 400 - 675 msw
  . PO_2 = 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 (PH_2 = 2 MPa)
  . PO_2 = 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)
  - PO_2 = 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.

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.

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.
- Cardiologiy : Les Alpilles Clinic/Marseilles.
- NMR Imagery : Timone Hospital/Marseilles.
- Ophtalmology : 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 PO_2/PCO_2 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 ergonomy : COMEX, North Hospital/Amiens.

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.

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.

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.

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).

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.

CHAPITRE III

SUIVI MEDICAL

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

HYDRA 10

SUIVI MEDICAL

CENTRE MEDICAL COMEX

Dr M. COMET
Dr. J.Y. MASSIMELLI

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

1 - SELECTION DES PLONGEURS

Quatre plongeurs ont été sélectionnés (trois titulaires - 1 remplaçant) parmi un groupe de volontaires, pour cette plongée d'essai, suivis par le Centre Médical COMEX.

Cette sélection a été réalisée selon les critères suivants :

- Antécédents médico-psycho-physiologiques : étude de leurs dossiers matérialisant un suivi médical sur dix ans et plus.
- Leur aptitude médicale actuelle à la plongée professionnelle
- Leur expérience dans la plongée professionnelle.
- Leur expérience en plongée profonde aux mélanges respiratoires Héliox ou Hydréliox.

Ont été retenus selon ces critères :

*	*P1*	*Participation à Hydra 5, 6 et 8*	*Titulaire*
*	*P2*	*2 plongées profondes à 450 m*	*Titulaire*
*	*P3*	*Participation à Hydra 7, 8 et 9*	*Titulaire*
*	*P4*	*2 plongées profondes à 450 m*	*Remplaçant*

Ces quatre plongeurs ont été soumis à un bilan médico-physiologique pré-plongée (le même devant être effectué à l'issue de la plongée d'essai). Ce bilan a comporté :

- **Centre médical Comex**	Biométrie - examen clinique RX thoracique et grosses articulations ORL Bilan sanguin
- **CHU Marseille**	Exploration fonctionnelle respiratoire IRM encéphalique Bilan neuro-psychologique Bilan ophtalmologique
- **Clinique Les Alpilles Marseille**	Bilan cardio-vasculaire
- **AMF - Aubagne**	Test psycho-sensori-moteurs et intellectuels

Les résultats de ce bilan médico-psycho-physiologique n'ont révélé aucune anomalie pouvant entraîner l'inaptitude d'un des quatre scaphandriers sélectionnés.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

2 - PHASE PREPARATOIRE OU D'ENTRAINEMENT

D'une durée de quatre semaines, cette phase préparatoire avait pour objectifs :

- De préparer physiquement et psychologiquement les plongeurs.
- De pratiquer les bilans cliniques et para-cliniques mentionnés dans le chapitre "Sélection".
- D'entraîner les plongeurs aux différents tests physiologiques et techniques qu'ils devront effectués dans le caisson durant la plongée d'essai.

Aucune pathologie n'est venue entraver ou perturber l'entraînement des scaphandriers, ni modifier la sélection prévue.

L'entraînement physique, effectué sous notre contrôle, a été dirigé de façon parfaite par un physiologiste de l'effort du CHU d'Amiens. Il a su allier, dans un heureux équilibre, l'entraînement physique individuel et d'équipe, développant ainsi un esprit de groupe très bénéfique dans ce type de plongée.

A signaler dans phase préparatoire ou d'entraînement l'apport intéressant de deux kinésithérapeutes par leur technique respective : ostéopathie et méthode Mézieres.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

3 - SEJOUR EN CAISSON - OBSERVATIONS JOURNALIERES

J1-J2 - Confinement 10 mètres

Sommeil de qualité moyenne, surtout chez P1 et P3.
(Filerie E.E.G et températures cutanées).

J3 - Compression Héliox - Palier à 200 m

P1 et P2
Signalent un léger encombrement nasal ainsi qu'une légère diminution du goût.

P3
Mentionne en plus un légère gêne respiratoire avec une hypoacousie ainsi qu'un érythème prurigineux sous les électrodes du Holter.

J4 - Compression 200 à 300 m à l'Hydréliox - Palier à 300 m

Les trois plongeurs notent un meilleur confort respiratoire dès l'arrivée à 300 m.

P2
Signale un érythème prurigineux sous les électrodes du Holter et mentionne l'absence de craquements articulaires habituels chez lui sous Héliox.

P3
Dit avoir été réveillé vers 2 heures du matin par un léger état d'excitation et d'énervement, sensation agréable qu'il rattache à la présence d'hydrogène.
Disparition de l'encombrement nasal et de l'hypoacousie.

J5 - Compression 300 à 400 m à l'hydrogène

P1
Apparition de légers craquements articulaires. Sommeil convenable.

P2
Bon sommeil. Se sent bien.

P3
Sommeil perturbé par la filerie.
Depuis la zone des 350 m - 400 m, impression de flottement, de fuite des idées au cours d'une conversation.

Les trois plongeurs apprécient le confort général de l'habitat et jugent l'alimentation satisfaisante.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

J6 - Compression de 400 à 450 m

P1
Apparition depuis la compression à partir de 400 m de fatigue et nausées par accès, apparaissant, disparaissant, mais sans aucune perturbation du point de vue mémoire, attention ou raisonnement.

P2
Tout va bien. Signale levers fréquents pour uriner pendant la nuit.

P3
Mentionne les mêmes troubles que la veille avec une légère perturbation de la mémoire immédiate : "il a besoin de s'accrocher pour rester présent" (évoque HYDRA 9). Affiche une certaine anxiété.
Il estime que P1 et P2 éprouvent les mêmes sensations que lui, mais ne le disent pas.

J7 - Palier à 450 m

P1
Sommeil convenable.
Calme, détendu, signale la persistance de vagues de fatigue, nausées, mais moins fréquentes.

P2
Tout va bien.

P3
Mêmes troubles que la veille mais atténués.
Sommeil de qualité moyenne.

J8 - Compression de 450 à 500 m

P1
Sommeil perturbé par l'agitation de P3.
Autrement tout va bien : pas de troubles de la mémoire, ni de la concentration.

P2
Bon sommeil.
Sensation de légère modification du goût.
Se sent infiniment mieux qu'à profondeur égale en Héliox.

P3
Mauvaise nuit imputée à la filerie dont il s'est débarrassé.
Se sent mieux que la veille, mais appréhende le séjour dans les sphères.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

J9 - Compression à 500 m

Bonne ambiance dans l'habitat.

Les trois plongeurs ne signalent aucune difficulté ventilatoire avec une élocution et un rythme de la conversation normaux.

P1
Signale l'apparition de frissons (chair de poule) sans sensation de froid.
Diminution de l'appétit.
Attention et concentration stables.

P2
Présente quelques troubles digestifs : digestion lente, borborygmes.

P3
Se dit agressif, irritable : communication un peu difficile avec ses camarades.
Persistance de cycles de fatigue physique et intellectuelle.
Semble légèrement ralenti du point de vue psycho-moteur.
Signale une légère baisse de l'appétit ainsi qu'une légère irritation pharyngée avec toux.

J10 - Compression 500 m - 525 m - 550 m

P1
Bon sommeil.
Présente toujours des frissons (fasciculations musculaires ?) sans impression d'inconfort thermique.
S'alimente moins. Se sent mieux que dans HYDRA 6 et 8.
Peu ou pas de troubles de l'écriture.
L'irritabilité et l'excitation de P3 provoque chez lui une certaine charge psychologique.

P2
Ne signale rien de particulier. A dormi convenablement.

P3
Sommeil perturbé par des rêves.
"Sent" ses articulations, sans douleur, mais se déplace avec prudence (troubles proprioceptifs, modification de la sensibilité profonde ?).
Se fatigue vite. S'alimente peu.
Impression de ralentissement intellectuel. Elocution lente et plus difficile.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

J11 - Palier à 550 m

P1
Toujours des frissons du même type avec impression de sensibilité au déplacement des gaz.
S'alimente peu.
Mêmes sensations que la veille.

P2
Ne signale rien de particulier, si ce n'est un ballonnement abdominal après les repas.
Comportement cohérent et calme.

P3
Est resté éveillé jusqu'au franchissement de 534 m.
Instable, agressif. Problèmes de vie en communauté. N'est pas écouté par ses camarades et appréhende le séjour dans les sphères.
Discours un peu décousu, sans phrases.
Mentionne avoir parfois quelques troubles visuels d'accommodation lors de la lecture ou de l'écriture.
Signale des frissons et une ventilation difficile. Pas d'appétit.
Mycose traitée aux orteils.

J12 - Palier à 575 m - Compression à 600 m

Nuit convenable pour les trois plongeurs.
Ils mentionnent une accentuation de la fatigue générale avec la perception de l'augmentation du travail ventilatoire.

P1
Toujours des frissons.
Difficulté de concentration lors d'une lecture prolongée, mais moins nette qu'à HYDRA 8.
S'alimente peu.

P2
Légères coliques avec selles liquides la nuit dernière (traité).
Bonne stabilité du comportement.

P3
Plus calme qu'hier mais reste anxieux en ce qui concerne le séjour dans les sphères.
Fuite des idées et troubles de la concentration.
Toujours des frissons. "Sent" ses articulations, sans douleur, ni limitation des mouvements.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

J13 - Palier à 600 m - Compression à 625 m

P1
Fatigue. Mentionne la nécessité d'un effort pour se concentrer et pour maintenir cette concentration.
Difficulté à la marche (marche à tâtons) avec élargissement du polygone de sustentation.
Irrité par le comportement de P3. S'alimente peu.

P2
Fasciculations musculaires.
Plus grande sensibilité cutanée lors des changements de température ou des déplacements.
Essoufflement rapide.

P3
N'arrive pas à estimer de façon nette la position de ses membres avec les mêmes phénomènes que la veille en ce qui concerne ses articulations.
Signale des zones de paresthésies sur les faces antéro-externes de ses jambes.
Toujours anxieux, avec fuite des idées, discours décousu, confus.
Ne se sent pas apte à effectuer certains travaux.

J14 - Compression à 650 m - Palier à 650 m

P1
Mauvais sommeil.
Fatigue plus nette objectivé par un faciès aux traits tirés.
Raisonnement et comportement habituel, calme.
Marche difficile (idem J13) mais sans trouble de l'appréciation des distances, ni vertiges.
Nausées par accès. Ne s'est pas alimenté ce jour.
Vers 18h30, après le déménagement du matériel pour l'installation dans les sphères, ce qui l'a énormément fatigué, il présente un vomissement bileux, non alimentaire, après une sensation de malaise.
Au repas du soir, peut s'alimenter légèrement sans problème digestif.
Frissons permanents, "tremble comme une feuille".

P2
Fasciculations musculaires signalées.
S'alimente peu.
Pas de troubles dans ses déplacements.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

P3
Idem J13 en ce qui concerne les articulations et les membres (compare sa marche à celle d'un enfant effectuant ses premiers pas). Signale une certaine dysmétrie avec des mouvements ralentis. Mentionne avoir présenté en milieu de journée un malaise s'accompagnant de nausées.
Dit que son état général évolue par vague, avec des hauts et des bas. Auto-analyse anxieuse de toutes ses sensations. A l'impression que son état physique et psychique se détériore lentement.

Etant donné l'état de P1 et P3, le transfert dans les sphères est différé au lendemain afin que les trois plongeurs dorment dans le grand caisson pour un meilleur sommeil.

J15 - Passage dans les sphères - Compression 650 à 675 m

L'exiguïté des sphères rend le séjour pénible pour les trois plongeurs qui présentent une anorexie renforcée par les difficultés pour s'attabler.

Devant cette anorexie presque totale chez les trois plongeurs, un changement de régime est proposé. Il consiste en un apport fractionné d'aliments facilement digestibles et à haute valeur calorique. Cette nouvelle alimentation semble bien acceptée par les plongeurs.

P1
Très fatigué, avec un faciès plus marqué que la veille.
Par nécessité (exiguïté de la sphère), passe son temps sur sa bannette où il somnole souvent. Pas ou peu de lecture.
Lors de ces phases de somnolence, on note des mouvements anormaux du bas de son visage et des ses lèvres que l'on peut, peut-être, rattacher à un tremblement généralisé et quasi permanent.
On observe aussi une sudation de la face sans qu'il signale un inconfort thermique.
Toujours une instabilité à la marche.
Pas de nausées, ni de vertiges.
Conserve un raisonnement sain, il estime que ceux de l'intérieur ne sont pas susceptibles d'évaluer la situation. C'est à la surface de le faire et de décider.
Montre une certaine sérénité et une volonté suffisante pour aider P3 dans certains gestes.

P2
Manque d'appétit. Etat général satisfaisant.
Comportement sain et cohérent.
Garde une motivation intacte et se dit prêt à plonger dans le cadre de cette plongée d'essai.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

P3
Agressif, énervé. fatigué.
Ventilation difficile.
Difficulté à effectuer certains gestes routiniers (manipulation du sas ou de la porte du caisson), lenteur des mouvements avec temps d'arrêt.
Mêmes sensations que les jours précédents en ce qui concerne ses articulations, ses membres et sa démarche.
Appréhension inconsciente. Manque de sérénité et de confiance.

J16 - Palier à 675 m, puis décompression de 675 m à 650 m

La nuit a été très éprouvante surtout pour P1 qui a très peu dormi.

Les plongeurs disent bien accepter le nouveau type d'alimentation mais l'anorexie persiste.

P1
Fatigue intense. "Vidé".

P2
Stable. Motivation intacte.

P3
Par son comportement lent et maladroit et par manque de lucidité, il perturbe l'ambiance générale et oblige ses camarades à intervenir à sa place, ce qui aggrave leur fatigue.
Appréhende d'aller plus loin.

Devant cette situation, concernant surtout P1 et P3, la décompression est décidée et débute à 11 heures. Le transfert des trois plongeurs vers le grand caisson s'effectue à 16 heures à 669 m. Cette décision semble satisfaire P1 et P3 qui manifestent un certain soulagement. En revanche, P2 exprime son désaccord et sa déception. Cela se traduit par une certaine morosité avec des phases d'isolement, la suite de cette plongée d'essai ne présente plus pour lui aucun intérêt.

J17 - Palier à 650 m - Compression 650 m à 675 m

P1
Toujours très fatigué. Etat général identique à celui de la veille.
A l'impression de percevoir une certaine amélioration due, selon lui, à un meilleur confort, à un sommeil plus réparateur et aussi à l'alimentation.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

P2
Persiste dans son désaccord concernant la décompression qu'il ressent comme un échec étant donné son état général et sa motivation.
Discours et comportement très cohérent et maîtrisé.

P3
Beaucoup moins anxieux depuis la décision prise de décomprimer.
S'alimente mieux.
Son comportement dans la vie courante est toujours aussi ralenti et il signale la même atteinte de son état général.

Le Comité Médico-Scientifique se réunit et, en tenant compte :

- de l'aptitude physique et psychologique de P2 à effectuer une excursion à 700 m et de l'influence de celle-ci sur son psychisme,

- de la possibilité technique de pouvoir amener les trois plongeurs dans le grand caisson jusqu'à 675 m,

- de la stabilisation de l'état général de P1 et P3, avec, semble t-il, une légère amélioration chez P1,

il est décidé de recomprimer les trois plongeurs jusqu'à 675 m, et de là, P2 effectuera seul l'excursion à 700 m dans les sphères, sous contrôle médicophysiologique (ECG - EEG - effort physique calibré - contrôle clinique).

Cette décision est annoncée aux plongeurs.

P1 accepte la décision avec calme et sérénité et se dit prêt à seconder P2.

P2 exprime sa satisfaction et son accord total.

P3 expose son désaccord à plusieurs reprises par des entretiens avec différents membres de l'équipe de surface.

J18 - Palier à 675 m
Pour P2, compression, séjour à 701 m et décompression de 701 à 675 m

P2
Sa compression de 675 m à 701 m est bien supportée avec un accroissement de la pénibilité ventilatoire avec obstruction nasale.

A 701 m, son comportement et son raisonnement sont normaux. L'examen clinique n'objective qu'un léger tremblement, ainsi qu'une légère instabilité au Romberg sensibilisé, pas de dysmétrie.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

La pose des électrodes ECG ainsi que l'installation de la clé dynamométrique ne lui pose aucun problème et cela est fait avec des gestes précis.

Il ressent une satisfaction intense d'avoir pu réaliser son objectif avec une pensée pour ses camarades qui n'ont pas pu l'accompagner.

P1
Se montre solidaire de P2 et satisfait de sa réussite. Se sent aussi fatigué que la veille et ses sensations diverses sont identiques.

P3
Mauvaise nuit.
Mentionne des algies para-vertébrales fulgurantes survenant par intermittence.
Cherche toujours ses repères.
La compréhension de ses entretiens est rendue difficile par une difficulté d'élocution.
Se dit inopérationnel avec un état général paraissant peu détérioré.
Manifeste toujours son désaccord pour l'excursion à 701 m pour laquelle il semble être totalement indifférent.

J19 - Décompression vers 650 m

P1
commence à récupérer mais s'alimente peu. Déplacements plus faciles. Bon moral, mais signale toujours les mêmes frissons.
Son comportement lors de la plongée de P2 en début d'après-midi a été calme et réfléchi.

P2
Excitation après son incursion à 701 m d'où mauvaise nuit.
S'alimente convenablement.
Myalgies (courbatures ?) au niveau des cuisses.
N'a pas apprécié la plongée en eau froide de l'après-midi (durée 3 min., avec une réaction intempestive de P3 due à un défaut de compréhension entre lui et la surface.
Enervé par ces événements, il demande une aide thérapeutique pour dormir (Bromazepam 4 mg).

P3
Mauvaise nuit. Se sent toujours fatigué.
Signale des algies articulaires temporo-maxillaires peut-être à l'origine de sa dysarthrie et de sa difficulté à s'alimenter.
Perturbations persistantes dans ses déplacements ainsi qu'au niveau de sa mémoire.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

J20 - Décompression en cours

9 heures - 640 m
Plongée de P1 assisté de P2. Durée : 30 min.

10h30 - 635 m
Plongée de P2 assistée de P1. Durée 1h30 avec montage du puzzle en 1h05 avec quelques erreurs.

P1
L'appétit revient. Frissons persistants.
Trouve P3 déstabilisant par ses raisonnements et problèmes.
Sa plongée s'est bien déroulée.

P2
Bon sommeil. Ne signale aucune sensation particulière.
Comportement normal lors de la plongée de ce matin.

P3
Mentionne toujours des frissons, des trous de mémoire, une faiblesse au niveau des membres inférieurs avec impression de passage de bulles à ce niveau cette nuit.
Son état semble s'améliorer.

J21 - Décompression en cours : Zone des 600 m

Journée de repos.

P1
Toujours des frissons. Alimentation fractionnée toujours bien supportée.
Amélioration de l'état général.

P2
L'appétit revient.
A besoin de repos et de converser avec l'extérieur.

P3
Doit toujours se concentrer sur les gestes qu'il effectue.
Trouble de la concentration. Instabilité à la marche.

J22 - Décompression en cours

10 heures - 575 m
Plongée de P3 assisté de P1. Durée : 1h30.
Montage partiel du puzzle.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

P1
Récupère progressivement.
Articulations bloquées ce matin, difficulté pour se lever.
L'appétit revient.

P2
Va bien. A besoin de détente et de relaxation.
Réalise sa réussite et se souvient de tout.

P3
Toujours fatigué mais réalise néanmoins une plongée convenable avec un comportement ralenti mais cohérent.
Se plaint toujours de difficultés de concentration.

J23 - Décompression en cours

550 m - Plongée de P3 assisté de P1.
Durée : 40 min. Termine le puzzle.

P1
Son état général s'améliore mais présente toujours des frissons.
Note l'apparition d'une hyperesthésie cutanée (à noter que la pression partielle d'H2 diminue progressivement par échappement du mélange).
Commence à sentir ses articulations.

P2
Analyse les événements de ces derniers jours.
Repos apprécié, signale une légère obstruction nasale.

P3
Comportement identique à celui d'hier lors de la plongée de ce jour.
Amélioration de l'état général.
Reprise de l'alimentation normale.

J24 - Décompression en cours - 510 m

P1
retour à une alimentation normale.
Persistance d'une hyperesthésie cutanée. "Sent" ses articulations.
Amélioration de l'état général. S'estime, aujourd'hui, pleinement opérationnel.

P2
Meilleur sommeil. Appétit normal. Est content.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

P3
Retrouve ses repères, sa stabilité générale.
"Sent" ses articulations.

J25 - Décompression en cours - 480 m

P1
A peu dormi.
Nette amélioration de son état général.
Plongée d'une heure, sans problème.

P2
Mauvaise nuit.
A assisté P1 dans sa plongée. Nez libre. Va bien.

P3
Mauvaise nuit (filerie EEG).
Continue de retrouver tous ses repères.

J26 - Décompression en cours - 450 m

P1
Amélioration continue de l'état général.
Diminution marquée de l'hyperesthésie cutanée.

P2
Va bien. Réalise ce jour une plongée avec un montage complet du puzzle en un temps égal à la référence surface.

P3
Retrouve ses sensations olfactives et gustatives. Bon état général.

J27 - Décompression en cours

Mise en route de la déshydrogénation.
Même tableau clinique qu'hier pour les trois plongeurs.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

J28 - Décompression en cours

P1
disparition des hyperesthésies cutanées.
Diminution des frissons.
Normalisation de l'appétit.

P2
Va bien.

P3
Récupération régulière de ses capacités physiques et intellectuelles.

J29 - Décompression en cours

P1
Amélioration continue de l'état général.
Disparition des frissons avec fasciculations musculaires.

P2
Va bien.

P3
Récupération de ses sensations articulaires normales, du champ visuel et de la vision.

J30 - Décompression en cours

P1 - P2
Rien de particulier.

P3
Se plaint de difficultés ventilatoires plus nettes que les jours précédents.

J31 - Décompression en cours

P1 - P2
Rien à signaler.

P3
Signale une amélioration continue de son état général.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

J32 - Décompression en cours - Héliox

Rien à signaler.

J33 - Décompression en cours

Rien à signaler.

J34 - Décompression en cours

P1 - P2
Rien à signaler.

P3
Se retrouve "normal".

J35/J36 - Décompression en cours

Rien à signaler.

J37 - Décompression en cours

Plongée de P2 assisté de P3.

J38 à J41 - Décompression en cours

Rien à signaler.

J42 - Fin de la décompression - Surface

P1 - P2
Rien à signaler.

P3
Vers 10 m, signale des douleurs articulaires au niveau du genou : résolution sous O2 au masque.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

L'examen clinique effectué chez les trois plongeurs ne révèle aucune anomalie, si ce n'est une perte de poids de 2 kg chez les trois sujets durant leur séjour en caisson.

Ils participent normalement et sans problèmes à toutes les manifestations médiatiques ou autres, inhérentes à ces sorties de plongées d'essais.

Dans les semaines qui vont suivre, ils vont êtres soumis à un bilan clinique et paraclinique identique à celui effectué avant la plongée. Les résultats et les conclusions de ces examens seront exposés par les équipes qui en ont la charge.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

4 - ESSAIS D'IDENTIFICATION ET DE QUALIFICATION

Au cours d'HYDRA 10, les tableaux cliniques des "Syndrômes des Hautes Pressions" (SHP), en particulier du "Syndrome Nerveux des Hautes Pressions" (SNHP) et de "narcose à l'hydrogène" n'ont pas été observés sous leur forme la plus classique et la plus complète.

4.1 MOTRICITE SPONTANEE

Au-delà de 550 mètres, chez deux des plongeurs à des degrés différents, la station debout ainsi que la marche ont été altérées. Chez le troisième, ces troubles ont été très peu perceptibles à l'observation clinique. Les trois plongeurs affirment, là encore à des degrés divers, avoir eu des difficultés à maintenir la coordination des gestes élémentaires dans l'exécution des mouvements.

Les plongeurs décrivent bien cette perte de l'automatisme de la coordination des gestes simples, les forçant à garder conscience de la séquence des gestes élémentaires qu'ils doivent effectuer afin que leurs actions conservent toute leur précision. Il semble que ce trouble porte préférentiellement sur la coordination dans l'espace alors que la coordination dans le temps est peu altérée. On relève en effet :

- une tendance à l'exagération de l'amplitude du mouvement (hypermétrie). Les sujets affirmaient avoir besoin en marchant de "calculer leur coup" suffisamment à l'avance afin d'éviter un objet posé au sol sur leur trajet ;

- un trouble dans l'association des mouvements élémentaires (asynergie) qui exige de la part du sujet une attention de tous les instants de la vie courante, lorsque par exemple, il installe le couvert ou quand il se sert à table.

Il ne semble exister ni retard à l'initiation et à l'arrêt du mouvement (dyschronométrie), ni de difficulté empêchant l'exécution rapide de mouvements alternatifs (adiadococinésie).

Nous devons insister sur le fait qu'il s'agit de "tendances" qui imposent au sujet une concentration beaucoup plus importante sur les gestes qu'il dit effectuer et à adapter son comportement en fonction de ce "handicap". En terme de bilan, cette adaptation est efficace car, des gestes même relativement complexes (équipement avec les électrodes ou les bonnets EEG) sont réalisés de manière satisfaisante, un peu plus lentement qu'en surface.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Concernant la marche, un élargissement du polygone de sustentation était visible chez deux sujets. La démarche est cependant restée régulière ainsi que la direction du trajet à effectuer, le sujet marchant un peu plus lentement et multipliant les appuis avec les membres supérieurs.

Lors des conversations on a pu noter chez un plongeur des difficultés d'élocution dont le sujet lui-même a pris conscience tardivement. Il ne s'agissait pas d'une dysarthrie typique avec discours ralenti et paroles explosives, mais plutôt de difficultés d'élocution telles que l'on peut les observer chez des sujets très asthéniques. Selon ce plongeur, ce trouble relèverait en partie de la gêne fonctionnelle ressentie aux mouvements des articulations temporo-mandibulaires.

Au-delà de 625 mètres, les trois sujets offraient, pendant les entretiens, une mimique plus pauvre.

Au-delà de 500 m, un tremblement de repos et d'attitude a été observé à certains moments chez deux des plongeurs. Chez l'un de ces deux sujets, s'y rajoutaient des myoclonies du visage nettement visibles au palier de 675 mètres. Ce dernier dit avoir été gêné par des sensations de myoclonies et de tremblement généralisé, de frissons atypiques, sensations qu'il décrit comme étant ressenties indépendamment de tout inconfort thermique.

L'ensemble des symptômes cités ci-dessus se rapportent à la motricité ou mobilité spontanée du sujet. Nous n'avons pas pu apprécier de manière objective ni le tonus musculaire, ni les réflexes. Cependant, rien dans l'observation ne nous a fait suspecter un trouble de ces fonctions.

4.2 SENSIBILITE

Nous parlerons, de manière classique, de signes subjectifs et de signes objectifs et ce, malgré l'impossibilité, en ce qui concerne les signes objectifs, de procéder pendant la plongée à des examens neurologiques complets.

4.2.1 Signes subjectifs

Les douleurs

L'un des plongeurs décrit le 20.11.92 (J18) à 675 mètres, au cours de l'entretien clinique, des sensations douloureuses siégant au niveau du rachis qu'il ressent à intervalles irréguliers depuis J12 - J13 (environ 600 mètres). Relativement stables dans leur intensité, leur localisation et leur trajet, leur fréquence de survenue a, par contre, varié proportionnellement à la profondeur. Il faut noter ici que ce plongeur a des antécédents de lombalgie commune. Aucune sensation de ce type n'a été signalée par les autres sujets.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Les paresthésies

Un des sujets a signalé le 15.11.92 (J13) à 600 mètres, des sensations bilatérales de picotements intenses perçues au niveau de la face antéro externe des jambes. De fréquence de survenue et de durées irrégulières, elles sont restées présentes pendant tout le séjour passé au-delà de 600 m.

Nous avons déjà évoqué dans le paragraphe I, les sensations de fasciculations, de frissons atypiques éprouvés par un plongeur et que nous aurions pu classer dans les paresthésies.

4.2.2 Signes objectifs

Hypoalgésie ou analgésie

Les trois sujets évoquent cette diminution très importante de la sensibilité douloureuse. Les chocs accidentels provoqués par exemple par le heurt d'un membre sur un coin de table ou une paroi ne s'accompagnaient pas de sensations douloureuses. Les douleurs, les petites gênes articulaires "familières" aux plongeurs en surface dans la vie courante, n'étaient plus ressenties, entraînant un état de "bien être". En ce qui concerne la sensibilité thermique, il est très difficile de qualifier les troubles ressentis. La température de l'eau de la douche était, selon les plongeurs, perçue avec une acuité suffisante pour permettre un réglage confortable. Nous le verrons plus loin, il semble que les plongeurs aient eu du mal à apprécier le confort thermique général.

Astéréognosie

L'un des plongeurs a dit (après sa sortie du caisson), avoir eu l'impression au-delà de 600 m, d'être moins précis dans la reconnaissance tactile des objets. Ceci, pense t-il, aurait pu être objectivé par une épreuve de reconnaissance effectuée yeux fermés. S'il existait une astéréognosie, elle était vraisemblablement très modérée ; il est difficile de savoir, dans l'hypothèse où le déficit existait vraiment, s'il s'agissait d'une astéréognosie vraie ou bien d'une conséquence de l'anesthésie partielle existante.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Troubles de la sensibilité profonde

Nous avons déjà parlé de troubles de la marche surtout ressentis par deux des plongeurs.

Concernant les signes "objectifs" que nous venons d'évoquer, il semble que les sensations élémentaires tactiles, thermoalgésiques et kinétiques aient été surtout altérées dans la perception différentielle de leurs qualités. En d'autres termes, les plongeurs, toujours à des degrés différents, percevaient mal l'intensité et la localisation des stimuli superficiels et profonds.

4.3 FONCTIONS VEGETATIVES

4.3.1 Thermo-régulation

Nous parlerons uniquement des sensations thermiques éprouvées et décrites par les sujets eux-mêmes, étant donné que nous ne disposons pas de mesures au-delà de 400 m.

L'un des plongeurs a décrit un confort thermique très fluctuant, sur son cahier personnel et pendant les entretiens, il s'est souvent plaint d'avoir froid alors que les deux autres, au même moment, n'éprouvaient pas cette sensation qu'ils ressentaient, eux, à d'autres périodes.

Il semble probable, comme nous l'avons évoqué plus haut, que les plongeurs ont eu une mauvaise perception de la température ambiante.
L'optimisation du système de régulation thermique des caissons a été d'une efficacité indiscutable, comme en ont témoigné les plongeurs dès les premiers jours de la compression. Ce fait a permis, par-rapport aux plongées d'essais précédentes, de rester en dessous des valeurs de températures habituellement considérées comme température de confort pendant ce type d'exposition.

Cependant, il est possible que, au-delà de 600 m, si l'on accepte l'hypothèse d'une mauvaise auto évaluation de la part des plongeurs, cette température de confort ait été sous-estimée. Si tel a été le cas, le déséquilibre thermique qui en a résulté a pu contribuer à l'altération de l'état général des trois sujets.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

4.3.2 Sudation

Durant J15 (650 mètres), on peut noter chez l'un des plongeurs des gouttes de sueurs perlant au niveau du visage (front, tempes). Pourtant à ce moment, le plongeur ne signale aucune sensation d'inconfort thermique. Il ne présente pas, non plus, de symptômes pouvant évoquer un syndrome infectieux. Il est donc difficile de préciser l'étiologie, mais on peut évoquer un déséquilibre nutritionnel présent sans aucun doute chez ce sujet à ce moment là. Un premier stade d'hypercapnie pouvait être également suspecté.

4.3.3 Appareils cardio-vasculaire et respiratoire

- A J15 (650 mètres), l'un des plongeurs a présenté des mouvements nets de tirage inspiratoire. Un autre a souvent parlé de la gêne respiratoire, au-delà de 500 m en compression. Ce dernier ponctuait ses discours de soupirs contrôlés accompagnés de gestes mimant la difficulté "d'aller chercher son air". A aucun moment chez lui nous avons observé de tirage involontaire. En ce qui concerne le troisième plongeur, la fluidité de son discours a été l'indice constant et principal de l'excellente qualité de sa ventilation.

  Une déclaration d'un plongeur faite à J4 (300 mètres) mérite ici d'être soulignée ; il affirme préserver ses capacités physiques en limitant volontairement ses efforts lors des tests ventilatoires.

- Sur le plan cardio-vasculaire, aucun signe fonctionnel ou physique n'a été signalé ou observé, mis à part l'épisode du vomissement de l'un des plongeurs (J14) à 650 mètres; difficile à identifier sur un plan étiologique, ce "malaise" a semblé toutefois coïncider avec une lipothymie.

4.3.4 Miction - Défécation

Aucun trouble majeur de ces fonctions n'a été noté.

4.3.5 Fonctions génitales

Les trois plongeurs ont dit n'avoir suspecté aucune altération de ces fonctions.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

4.4 VISION

Deux des plongeurs n'ont signalé aucun trouble visuel.
Au cours de la décompression, à J29 (360 mètres), l'autre plongeur déclare avoir pris conscience lors des tests psychométriques, de la récupération de l'intégrité de son champ visuel. Il semble que sa vision ait été perturbée de J13 (625 mètres) à J29, peut-être même avant. Il est difficile de préciser avec exactitude les troubles fonctionnels ressentis (champ visuel, acuité visuelle, vision des couleurs).

4.5 OLFACTION - GOUT

Nous ne possédons aucun moyen de quantifier les altérations alléguées. l'un d'entre eux s'est plaint quasiment à chaque repas de la "mauvaise qualité" des mets proposés. Les deux autres apprécient le goût de ces repas très faiblement modifié selon eux jusqu'à 500 mètres (à l'exception de J3 -200 mètres- où l'enchifrènement et la diminution du goût, classiques sous Héliox étaient présents). Pour tous, l'altération du goût s'est ensuite installée progressivement jusqu'à 625 mètres. Ensuite, c'est l'anorexie qui a prédominé. Au-delà de 650 mètres en compression, L'un des plongeurs décrit des sensations gustatives exacerbées, pour ce qui concerne les saveurs sucrées et salées. Cette exagération des saveurs étaient, selon lui, la cause principale de son anorexie. Il rapporte aussi qu'au-delà de 650 mètres, en compression, l'enchifrénement était réapparu. A 700 mètres, il ne pouvait respirer que par la bouche (réapparition du SHP). Ce symptôme a ensuite diminué d'intensité au fur et à mesure de la décompression.

4.6 AUDITION

En plus des distorsions de la propagation du son inhérentes à l'environnement, deux des sujets se sont plaints d'une perception des sons exacerbée et désagréable, comparant cet état d'hypersensitivité à celui que peut éprouver un migraineux en crise. l'un de ces deux plongeurs a, de plus, ressenti des acouphènes. Leurs fréquences de survenue et leurs intensités auraient été maximales durant le séjour au-delà de 600 mètres.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex

4.7 SOMMEIL

Nous ne parlerons pas ici des aspects électroencéphalographiques qui font l'objet d'un rapport spécialisé.

Beaucoup plus simplement, l'évocation de faits dépendants de l'organisation matérielle d'HYDRA 10 est incontournable, si l'on veut tenter d'expliquer les troubles du sommeil constatés pendant cette plongée.

Le bonnet EEG et les thermistances cutanées ont gêné les plongeurs. L'un des plongeurs n'a jamais conservé son bonnet une nuit complète prétextant une gêne trop importante. Les deux autres étaient réveillés aux changements de position, réveils le plus souvent de très courtes durées, responsables cependant d'un fractionnement du sommeil, jugé globalement moins réparateur que celui des nuits passées sans appareillage.

Aux réveils des trois plongeurs consécutifs à l'augmentation du nombre des mictions nocturnes (polyurie ?) s'ajoutaient ceux provoqués par l'un d'entre eux qui a souvent eu des comportements bruyants. Tout ceci contribuait aussi à fractionner le sommeil des trois sujets.

Au soir de J13 (625 mètres), alors que la dette de sommeil était déjà patente chez les trois plongeurs, un problème d'organisation en surface a fait qu'ils se sont endormis peu après minuit, après s'être équipés de leurs bonnets EEG (cf. ci-dessus). Un plongeur a rapidement arraché le sien. Cette nuit a été courte et le sommeil de mauvaise qualité.

Dans la sphère 1 (J15 - J16), l'un des sujets affirme ne jamais être parvenu à trouver le sommeil à cause de la couchette.

Chaque plongeur avait contracté au-delà de 600 mètres une "dette de sommeil" non négligeable de par son ampleur, d'autant plus qu'il s'y ajoutait ses conséquences très néfastes sur les capacités de récupération de sujets qui continuaient à subir l'augmentation des contraintes liées à la compression.

Cette "dette de sommeil" peut être imputée pour partie à une altération de la qualité du sommeil correspondante aux données classiques relatives au SNHP mais aussi, doit être imputée et pour grande partie, à la réduction de la "quantité de sommeil". Cette réduction a été la conséquence des circonstances matérielles évoquées ci-dessus qui ne peuvent pas être identifiées comme étant des paramètres d'environnement spécifiques et incontournables d'une plongée profonde sous mélange Hydreliox.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

4.8 NUTRITION

L'appétit a été faiblement diminué jusqu'à J14 (650 mètres). Les menus établis avec les plongeurs pendant la phase d'entraînement étaient modulés avec eux avant chaque repas en fonction de leurs désirs du moment.

A 650 mètres (J14), la diminution de l'appétit est franche chez les trois sujets. Cet état coïncide avec le renforcement d'autres symptômes :

- La fatigue générale très importante au matin d'une nuit courte et de mauvaise qualité.
- les altérations du goût.
- L'état nauséeux.
- Les troubles de la motilité spontanée qui rendent de plus en plus pénibles les phases de préparation des repas.

Cet état anorexique a provoqué très probablement un déséquilibre nutritionnel qui n'a pu être corrigé que tardivement en décompression. On ne peut malheureusement pas quantifier ce déséquilibre, ni préciser ses caractéristiques qualitatives. Sans grand risque de se tromper, nous pouvons affirmer qu'au-delà de 650 mètres, l'apport calorique était très insuffisant (< 1 000 Cal. ?).

La consommation hydrique était alors inférieure à 500 ml/24 heures avec une diurèse peu abondante (nettement diminuée par rapport aux jours précédents d'après les plongeurs). Seul un plongeur a signalé une adypsie franche associée à une sensation de réplétion hydrique.

Les trois plongeurs décrivent avoir éprouvé une sensation de "squeeze" du tube digestif otant toute envie de prise alimentaire, sensation comparable à celle que peuvent éprouver des sujets venant d'effectuer un exercice musculaire trop long et trop intense pour leur niveau d'entraînement.

Le régime fractionné proposé au-delà de 650 mètres n'a pas fait disparaître l'anorexie, l'adypsie, les nausées, mais il a permis aux plongeurs de se réalimenter. L'instauration de ce régime aurait été sans doute plus efficace, si elle avait été effectuée plus tôt et de façon progressive.

D'autre part, en raison de l'état nauséeux des trois sujets et des distorsions des sensations gustatives et olfactives bien décrites par l'un des sujets, les présentations devront, si ce régime est à nouveau préconisé dans des conditions similaires, être plus neutres sur le plan gustatif. (Ce plongeur avoue s'être très peu alimenté même lorsqu'il disposait des produits "diététiques" car les saveurs étaient écoeurantes).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

4.9 ASPECTS PSYCHOLOGIQUES

- Un effet psycho-dysleptique a été ressenti par les trois plongeurs.

- Aucun syndrome délirant n'a été observé.

- Les troubles existants étaient d'une faible intensité.

- Il s'agissait de difficultés de concentration et de mémorisation gênant surtout la lecture et l'écriture ; ainsi que d'une légère hyper-émotivité.

- Deux des plongeurs ont su intégrer ces modifications de leurs fonctions supérieures en plus des autres troubles neurologiques imposés par cet environnement ; ils ont adapté leur comportement en conséquence. En fonction des observations cliniques réalisées par l'équipe médicale et l'équipe de surface, ainsi que de l'évaluation faite par ces sujets, nous pouvons affirmer que l'effet psychodysleptique chez ces plongeurs est resté à un niveau d'intensité faible et compatible avec une activité opérationnelle.

- Un autre sujet a parfois présenté des épisodes d'hypovigilance avec une désorientation temporelle et surtout une anxiété quasi-permanente entrecoupée d'épisodes paroxytiques comme ceux observés à J6 (400-450 mètres) et J17 (650 mètres). Il a toujours craint (même avant la plongée, mais nous avions sous-évalué cette tendance) de se voir glisser vers un syndrome aigu de narcose à l'hydrogène.

- La variabilité inter-individuelle dans les conséquences fonctionnelles de l'induction psychodysleptique que constituait "le mélange Hydreliox Hydra 10" n'est pas spécifique de l'hydrogène.

En fonction des données acquises lors de l'ensemble du programme Hydra, nous savons que lors d'Hydra 10, l'effet psychodysleptique a été maintenu, chez les trois sujets bien au-dessous d'un seuil critique. Seuil critique signifiant ici une valeur de PH_2 au-delà de laquelle tout sujet même très motivé et indemne de toute appréhension péjorative, même entouré de conditions sociales et matérielles idéales, ne pourra pas échapper à une narcose importante et incontrôlable.

A de telles valeurs de PH_2 au potentiel psychodysleptique modéré, l'adaptation du sujet (et donc son comportement) peut être efficace et dépend essentiellement d'autres facteurs :

- Le niveau de condition physique et la stabilité psychologique (motivation, humeur, sociabilité...) de l'individu vont conditionner son adaptation d'où l'importance de la sélection et de la préparation.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- De même, les autres paramètres d'environnement : confort général (température, bruit, ergonomie, sommeil, alimentation), moyens de communication, définition des objectifs à réaliser, relations avec l'équipe de surface (niveau de confiance mutuelle), relations entre les plongeurs, relations avec les familles..., sont autant de facteurs pouvant interagir en fonction de leur niveau de qualité avec les effets induits par "le mélange Hydreliox Hydra 10" en potentialisant ces effets ou au contraire en permettant à l'individu de mieux s'y adapter.

Nous venons d'énoncer un concept banal non spécifique de l'hydrogène, concept qui s'applique également dans d'autres circonstances où l'individu se trouve confronté à un environnement "original" pour lui.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

5 - ANALYSE ET CONCLUSIONS

5.1 CONSIDERATIONS GENERALES

Durant leur plongée HYDRA 10, les trois plongeurs n'ont présenté aucune pathologie sérieuse courante ; simplement quelques troubles digestifs ou irritations naso-pharyngées vite maîtrisées par un traitement précoce.

Donc aucune agression de ce type n'ont pu affaiblir leurs défenses et entraîner une fatigue réactionnelle.

Il faut signaler le confort sonore et thermique ainsi que la qualité des communications de l'ensemble de plongée dans lequel ont évolué les trois sujets, eux-mêmes étonnés de cette qualité inhabituelle sur chantiers où les conditions de travail, il est vrai, sont tout à fait différentes.

Néanmoins, ces paramètres sont des éléments de sécurité et d'amélioration des performances car ils permettent une détente et une récupération meilleures pour les plongeurs avec des communications beaucoup plus fiable avec la surface.

La fatigue ressentie par les trois plongeurs a pu être accentuée par :

- Un sommeil souvent perturbé (léger et par épisodes) ne permettant pas une bonne récupération.

- La filerie EEG ou autres branchements ainsi que des levers nocturnes fréquents de l'un des plongeurs ont pu intervenir comme éléments perturbateurs du sommeil.

Un certaine anorexie est apparue chez les trois plongeurs vers 500 - 550 m pour s'accentuer par la suite et devenir presque totale chez P1 et P3, d'où accentuation de la fatigue.

Cela a nécessité une adaptation du type d'alimentation et fait penser que le problème nutritionnel peut être important dans une plongée profonde et mérite une attention particulière dans la préparation.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

5.2 EFFETS HYDROGENE

Curieusement, les deux sujets qui on ressenti ces effets (P1 et P3), sont ceux qui avait un passé de plongées à ce mélange : meilleure analyse, sensibilisation par le vécu de certaines plongées (HYDRA 9 pour P3) ?

En revanche, P2, le néophyte de l'Hydréliox, n'a pratiquement rien ressenti, d'après ses dires,.

Les effets de l'H2 ont été relativement discrets :

- Hyperémotivité chez les trois plongeurs à des moments différents.
- Troubles de le concentration et de la mémorisation précoce chez P3 (vers 500 m), plus tardifs chez P1 (575 m) et P2 (au-delà de 600 m).
- Troubles de la vigilance chez P3 (hyper mais parfois hypo).
- Exacerbation de la sensibilité émotionnelle (surtout chez P3) avec fragilité thymique.

Ces effets ont été bien maîtrisés par P1 et P2, plus difficilement par P3, mais sans jamais avoir provoqué une crainte de décompensation, ce qui prouve une bonne appréciation de la pression d'H2 dans le mélange.

5.3 EFFETS PRESSION

Ces effets sont apparus à partir de 550/600 mètres chez P1 et P3 et se sont accentués de 600 à 650 mètres.

Ils sont caractérisés par :

* ***Des effets neurologiques :***
- Tremblements chez P1 et P3, à 700 mètres seulement pour P2.
- Myoclonies et dysmétrie chez P1 et P3.
- Myoclonies très discrètes sans dysmétrie chez P2.
- Troubles de la sensibilité profonde. Proprioception surtout chez P1 et P3 entraînant des perturbations de la marche et une certaine incoordination motrice.
- Inappétence apparue vers 550 mètres chez P1 et P3, plus tardivement chez P2 (650 m).
- Fatigue générale qui débuté vers 550 - 600 mètres chez P1 et P3 pour devenir très importante au-delà de 650 mètres.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

* ***Des effets articulaires :***
  Algies, craquements sous Héliox seulement.

* ***Des effets respiratoires :***
  Difficultés ventilatoires dues à la densité du mélange.

5.4 CONCLUSIONS

Les symptômes cliniques présents dans HYDRA 10 relevant soit du Syndrome des Hautes Pressions, soit de la narcose à l'hydrogène, étaient étroitement imbriqués ; leur intensité modérée, sans retentissement fonctionnel important, mais entraînant néanmoins des modifications physiologiques nécessitait un effort d'adaptation de la part de l'organisme qui se fatiguait progressivement, particulièrement au-delà des 600 mètres.

Certains facteurs d'HYDRA 10 ont pu accentuer la fatigue des plongeurs et peuvent être corrigés :

- Mode d'alimentation inadapté (à étudier).
- Mauvaises conditions de sommeil.
- Equipe non homogène : sélection, préparation.
- Changement d'habitat en cours de plongée, surtout quand celui-ci s'effectue à grande profondeur.

Sans ces handicaps, la barre des 700 mètres aurait peut-être été atteinte plus aisément.

Cependant, on a pu noter que jusque dans la zone des 600 mètres, les plongeurs étaient opérationnels (les plongées effectuées l'ont prouvé), les manifestations cliniques s'étant intensifiées au-delà de cette profondeur.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Nous pouvons donc dire que la plongée HYDRA 10 - Hydréliox avec sa pression partielle d'hydrogène de 20 bar a permis :

- à trois plongeurs d'être comprimés jusque dans la zone des 600 - 620 mètres dans des conditions optimales par rapport aux autres méthodes de plongée utilisées à ce jour ;

- à deux plongeurs d'être parfaitement opérationnel dans cette même zone de 600 - 620 mètres ;

- de fournir aux plongeurs un type d'environnement hyperbare global optimum, reconnu par les plongeurs eux-mêmes.

Les symptômes induits par la respiration d'Hydréliox - HYDRA 10 sont, d'après les plongeurs, plus faciles à assumer dans le processus d'adaptation que ceux induits par la respiration d'Héliox dans la zone des 300 mètres.

De plus, le suivi médical sur six ans d'une dizaine de plongeurs soumis à des plongées Hydréliox de 450 à 530 mètres ne nous permet pas de suspecter d'effets secondaires à court, moyen ou long terme à une exposition à l'Hydréliox.

En revanche, nous croyons qu'à une profondeur équivalente, au-delà de 300 mètres, les plongées Hydréliox avec une pression d'hydrogène adaptée mais ne dépassant pas celle d'HYDRA 10, facilite l'adaptation des plongeurs, améliore leur confort général et contribue donc à accentuer leur sécurité et leur efficacité.

Pour toutes ces raisons, le bilan d'HYDRA 10 est excessivement positif et confirme que la respiration d'Hydréliox en plongée est la voie pour la plongée profonde.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE IV

ETUDES NEUROPHYSIOLOGIQUES

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'entrainer 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

	Hélium-Oxygène	Hélium-Azote-Oxygène 5% N2	Hydrogène-Hélium-Oxygène 54-56% H2
symptômes neurologiques	Nausées, vertiges Tremblement (8-12Hz) fasciculations myoclonies dysmétrie somnolence diminution importante des performances psychométriques	somnolence 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 potentiels 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 potentiels 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 ? ?

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'interieur 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

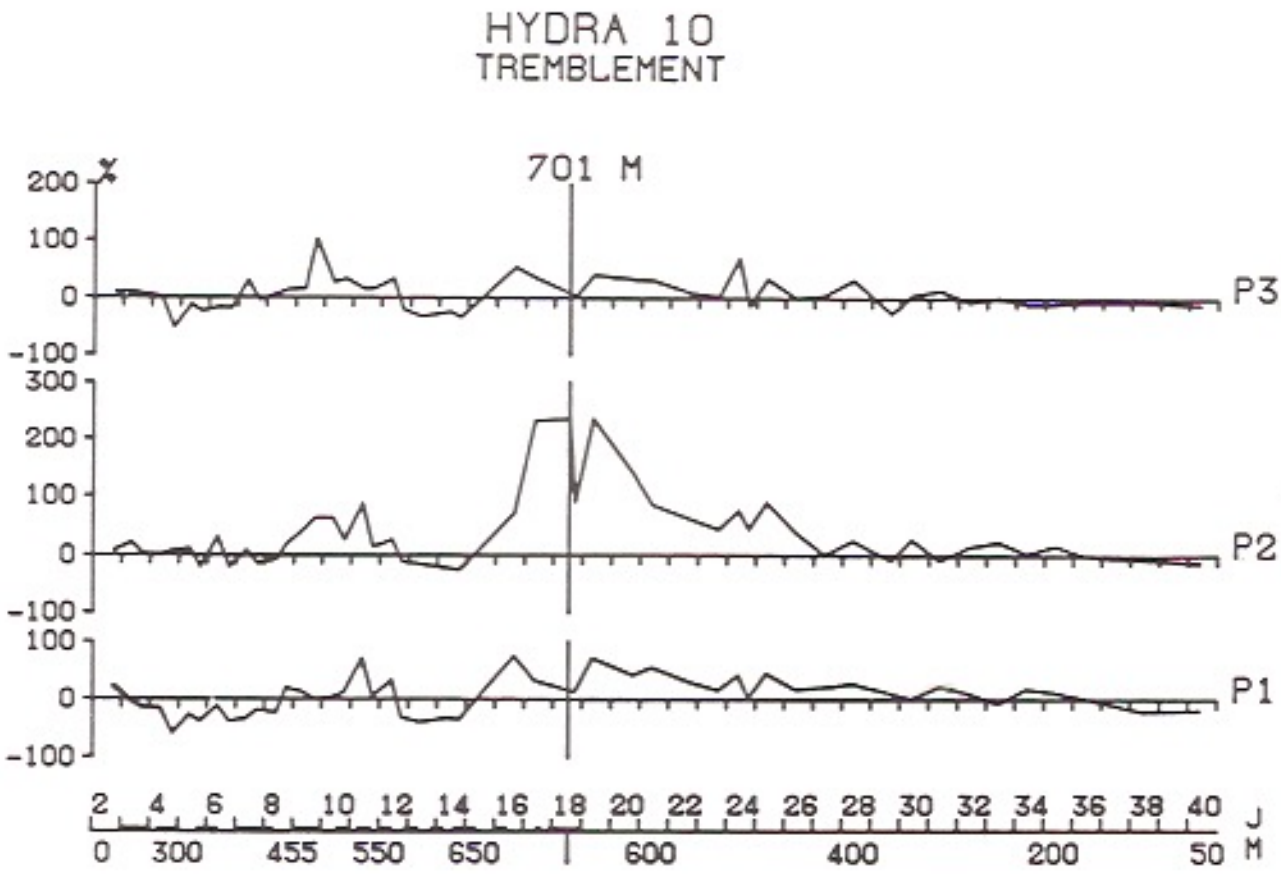


Fig. 1.
Evolution de l'amplitude au cours de la plongée HYDRA 10 exprimée en pourcentage de différence par rapport à la valeur de surface pour les trois sujets de bas en haut P1, P2, P3.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

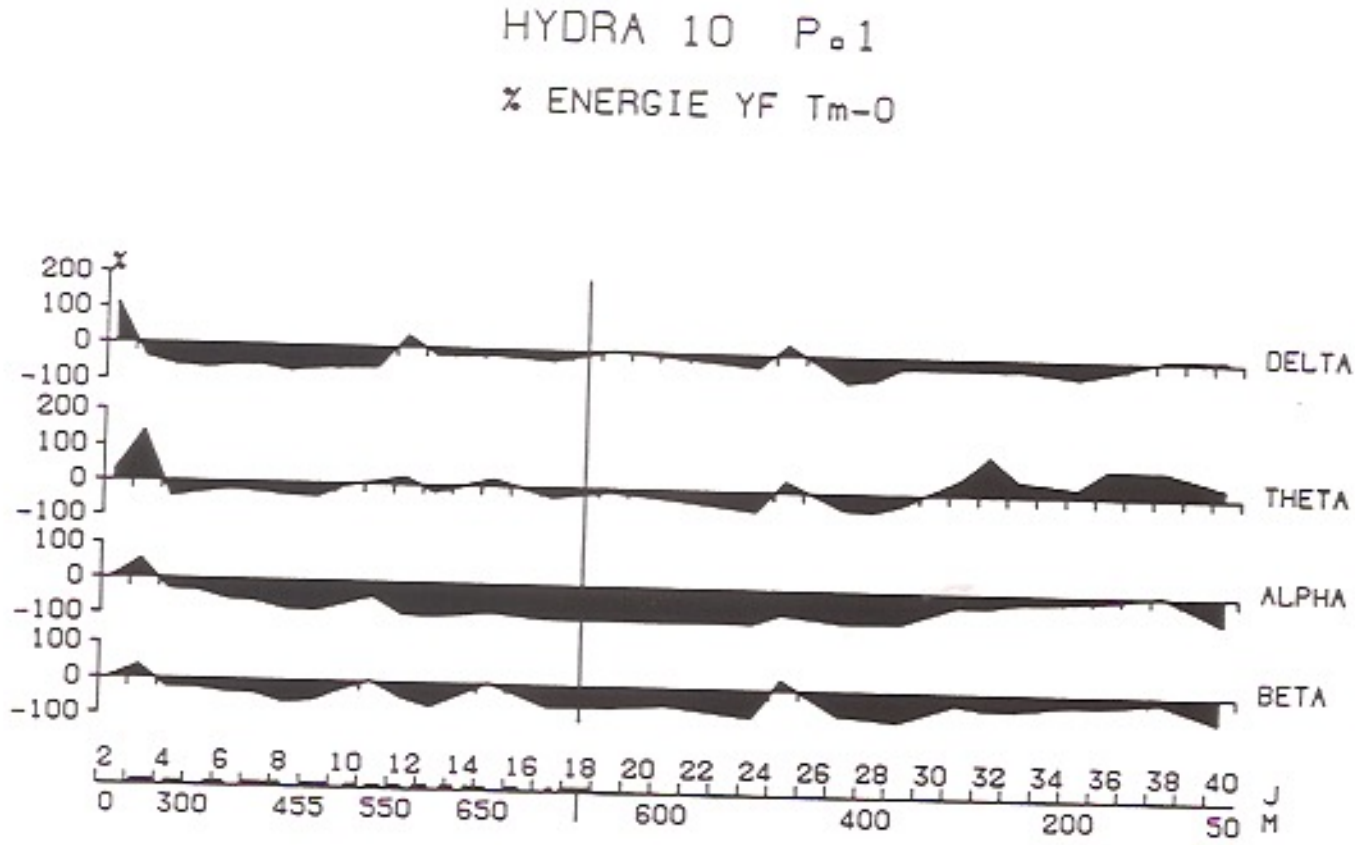


Fig. 2.
Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P1 sur la dérivation postérieure (temporale moyenne-occipitale, Tm-O), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

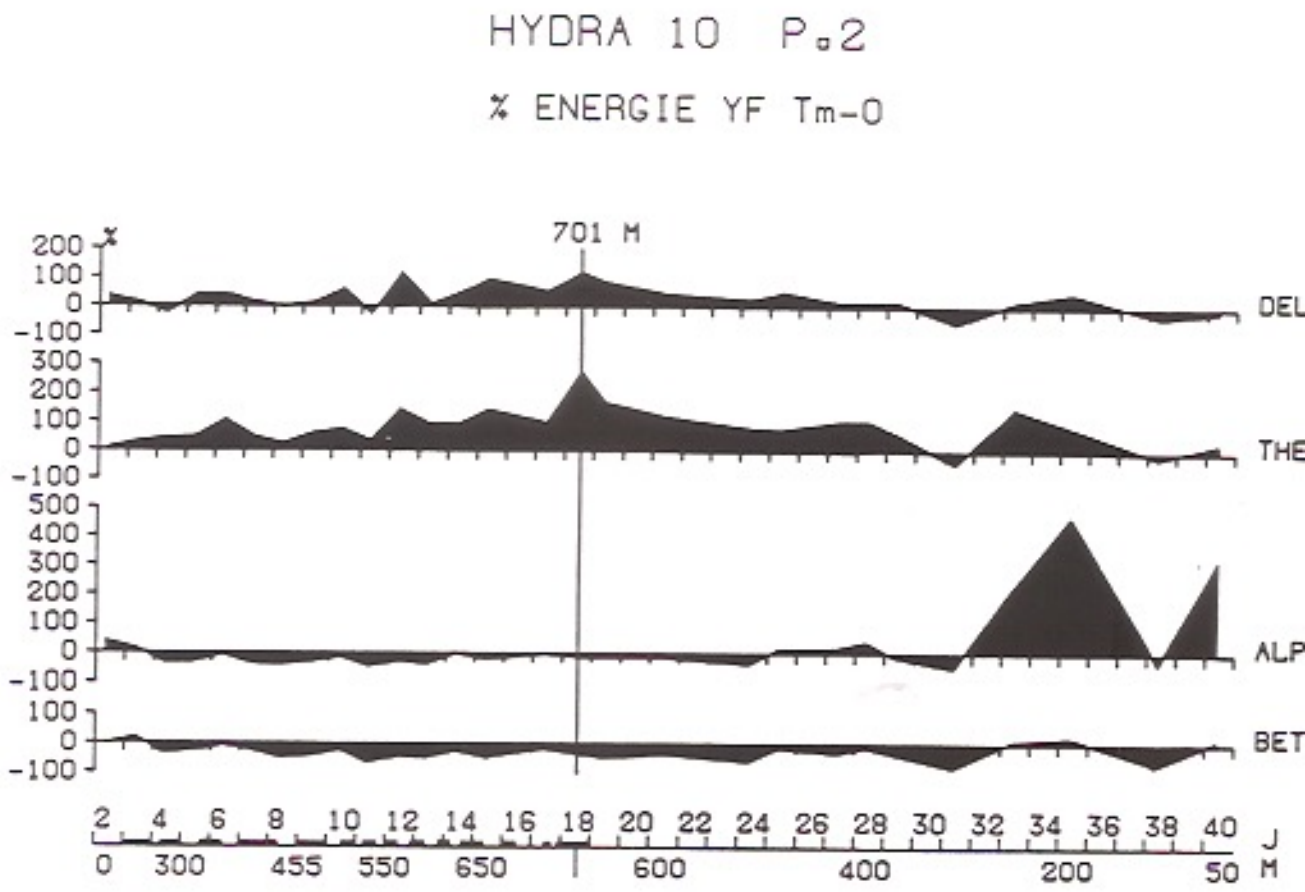


Fig. 3.
Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P2 sur la dérivation postérieure (temporale moyenne-occipitale, Tm-O), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

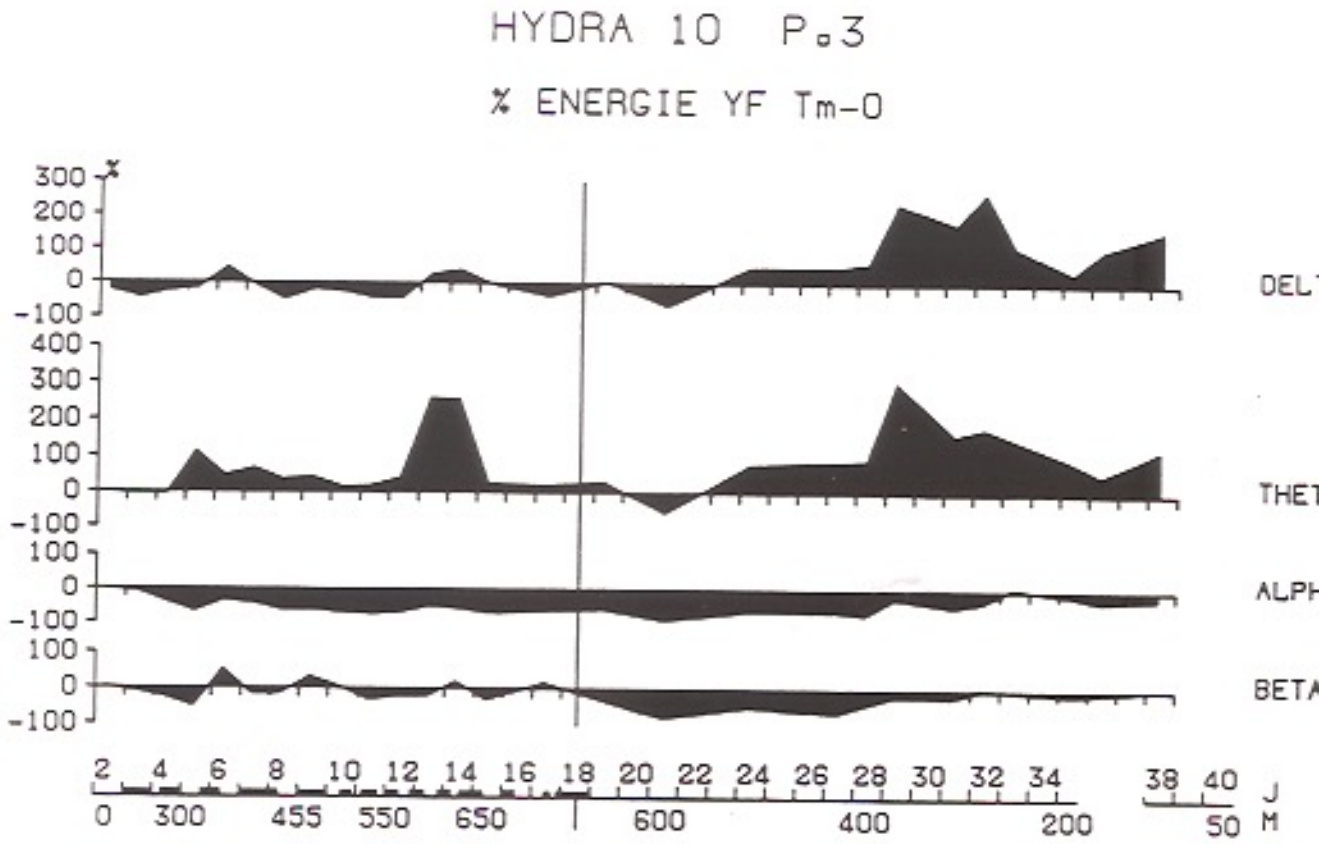


Fig. 4.
Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P3 sur la dérivation postérieure (temporale moyenne-occipitale, Tm-O), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

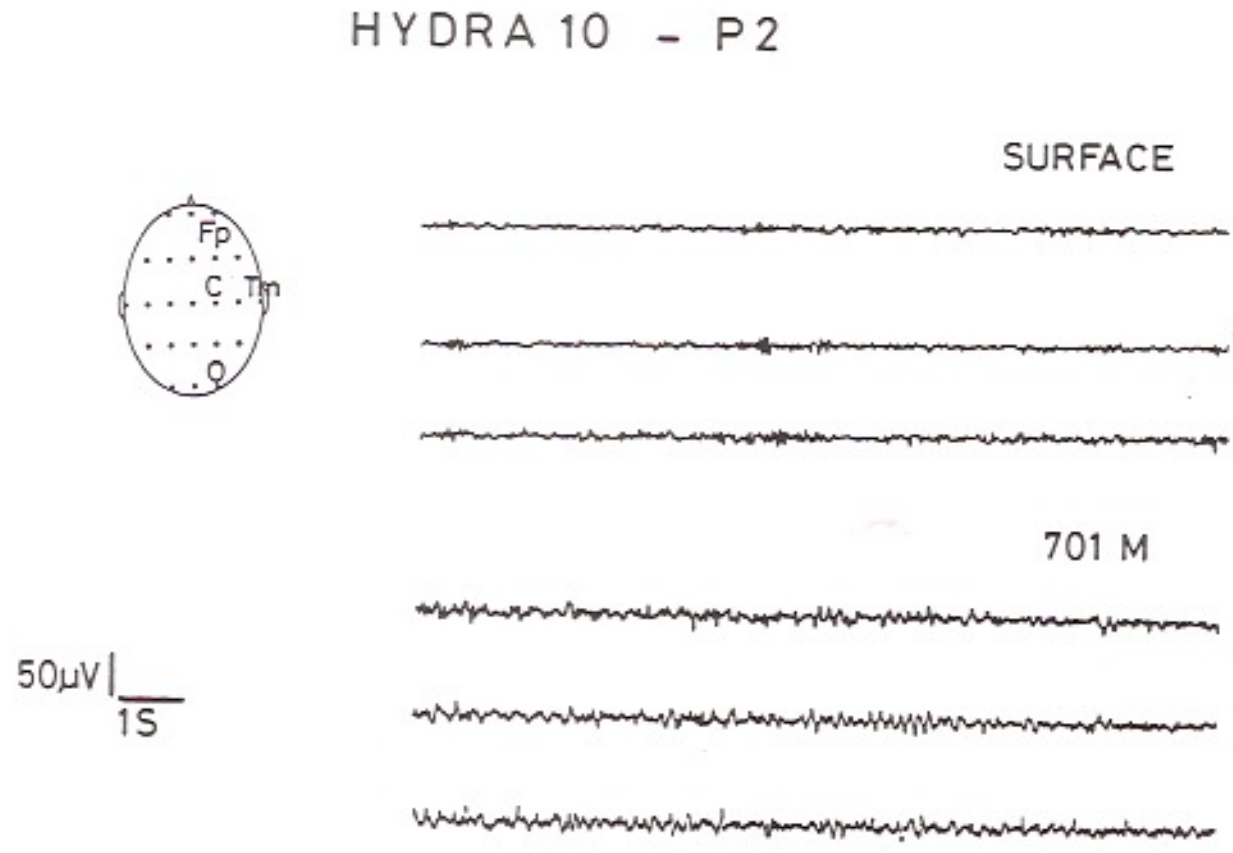


Fig. 5.
Tracés EEG du sujet P2 en surface (tracés supérieurs) et à 701 m (tracés inferieurs). Trois derivations sont représentées de haut en bas, Fp-C (frontopolaire-centrale), C-Tm (Centrale- temporale moyenne) et Tm-O (temporale moyenne-occipitale).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

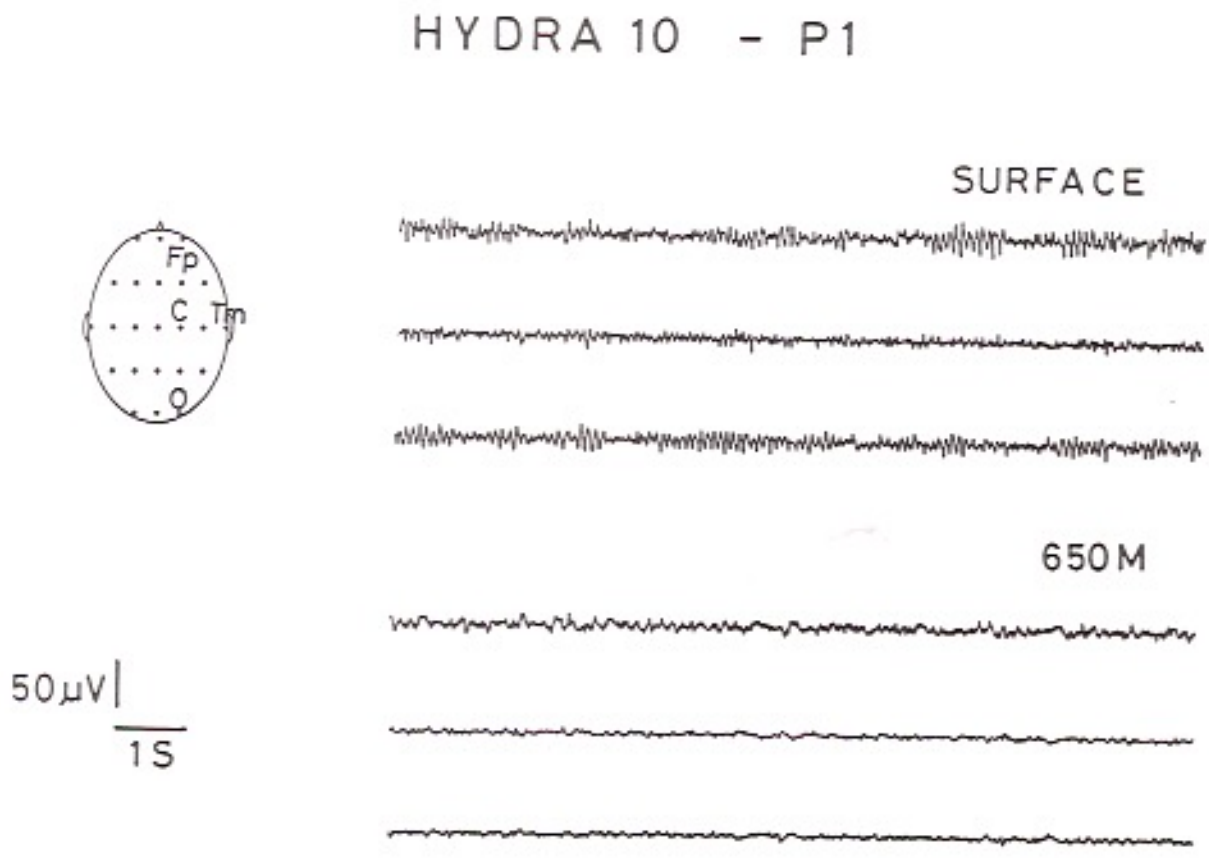


Fig. 6.
Tracés EEG du sujet P1 en surface (tracés supérieurs) et à 650 m (tracés inferieurs). Trois dérivations sont représentées de haut en bas, Fp-C (frontopolaire-centrale), C-Tm (Centrale- temporale moyenne) et Tm-O (temporale moyenne-occipitale).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

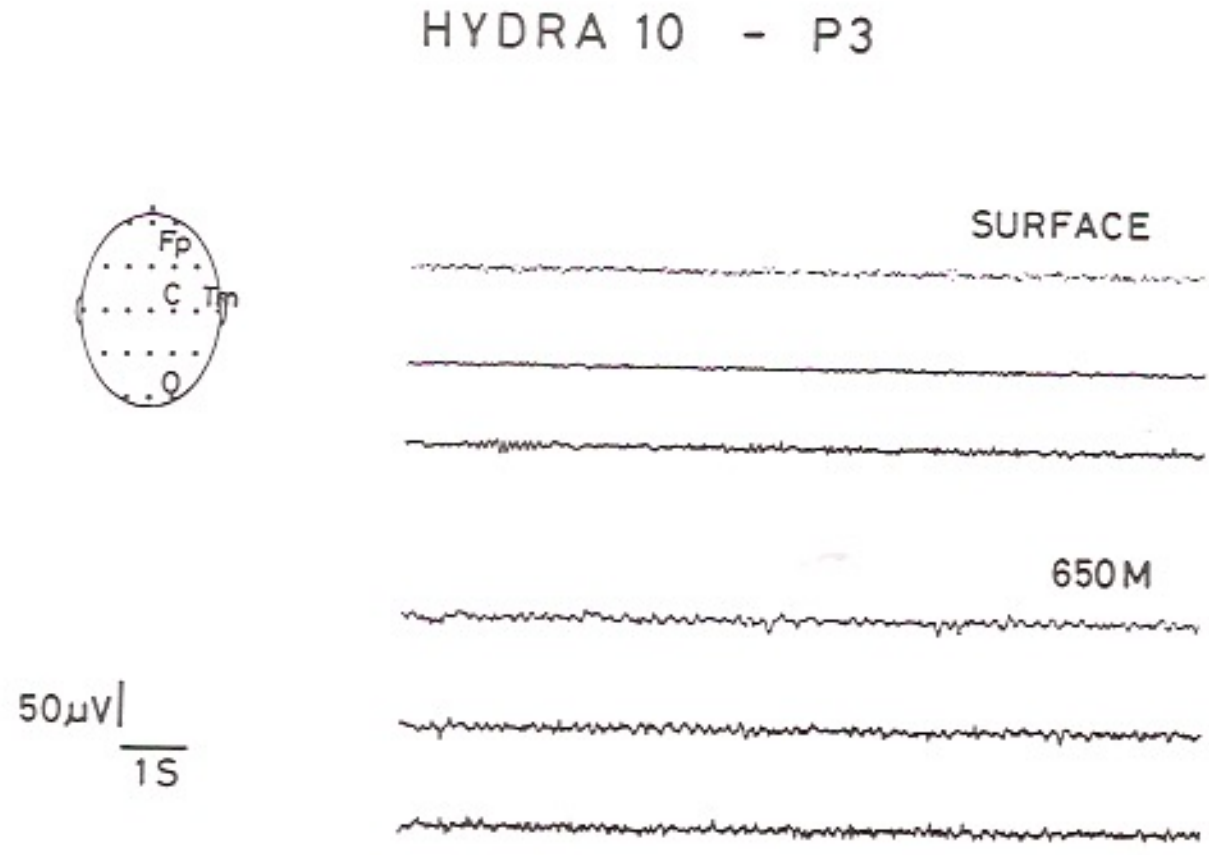


Fig. 7.
Tracés EEG du sujet P3 en surface (tracés supérieurs) et à 650 m (tracés inferieurs). Trois dérivations sont représentées de haut en bas, Fp-C (frontopolaire-centrale), C-Tm (Centrale- temporale moyenne) et Tm-O (temporale moyenne-occipitale).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

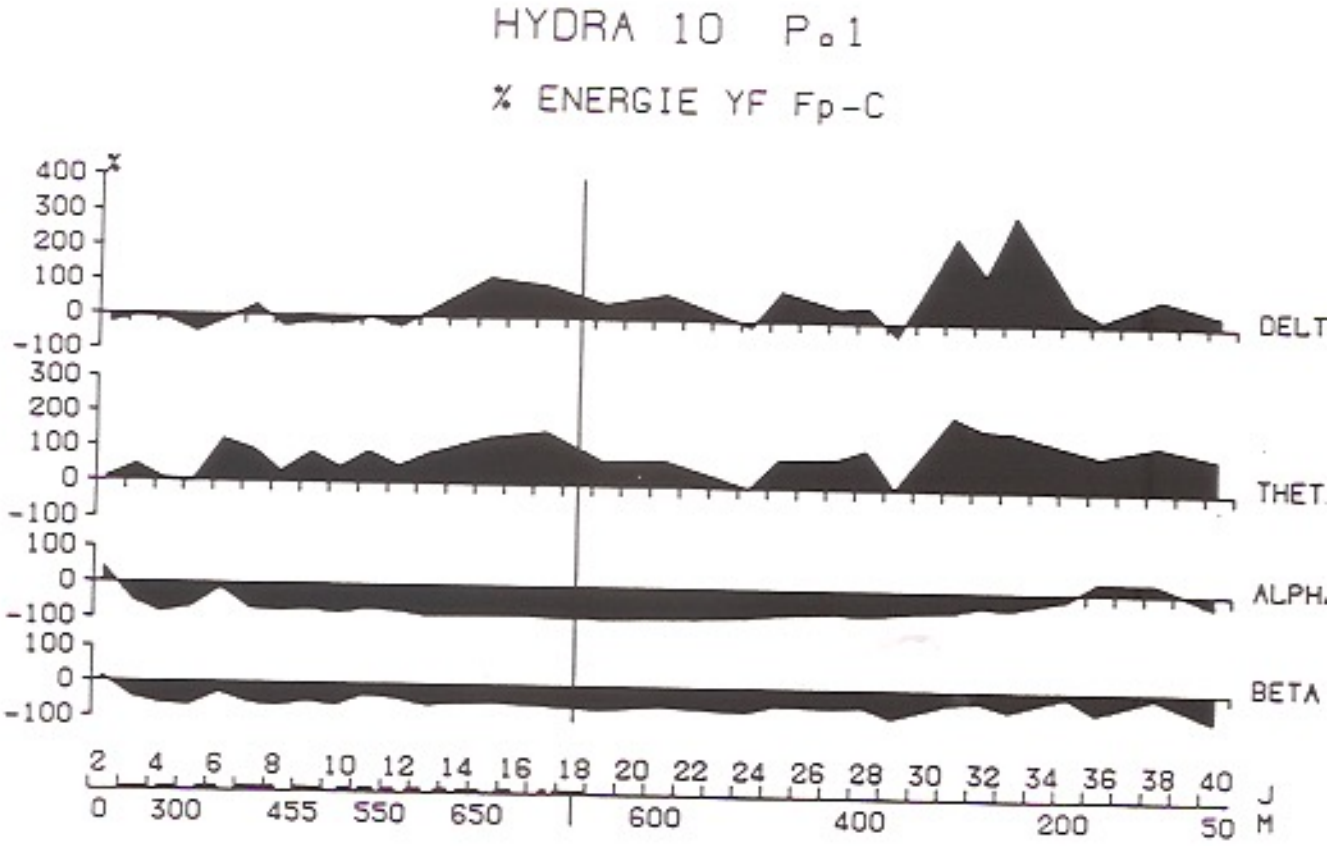


Fig. 8.
Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P1 sur la dérivation antérieure (fronto polaire-centrale, Fp-C), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de différence par rapport aux valeurs de référence en surface. Ces variations sont représentées de haut en bas pour la puissance des bandes de fréquences delta, théta, alpha et bêta. En abscisses, sont portés les jours et les profondeurs.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

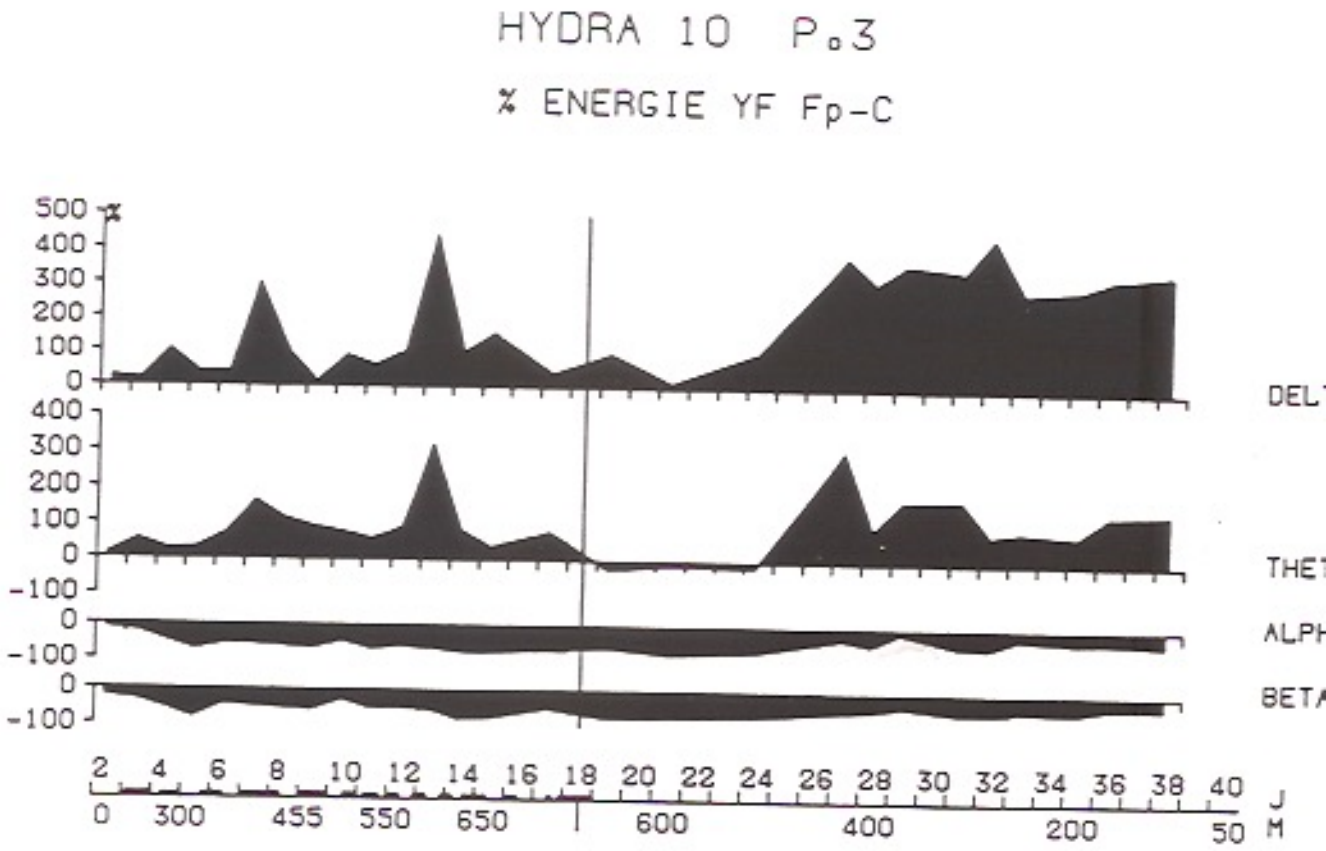


Fig. 9.
Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P3 sur la dérivation antérieure (fronto polaire-centrale, Fp-C), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de différence 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

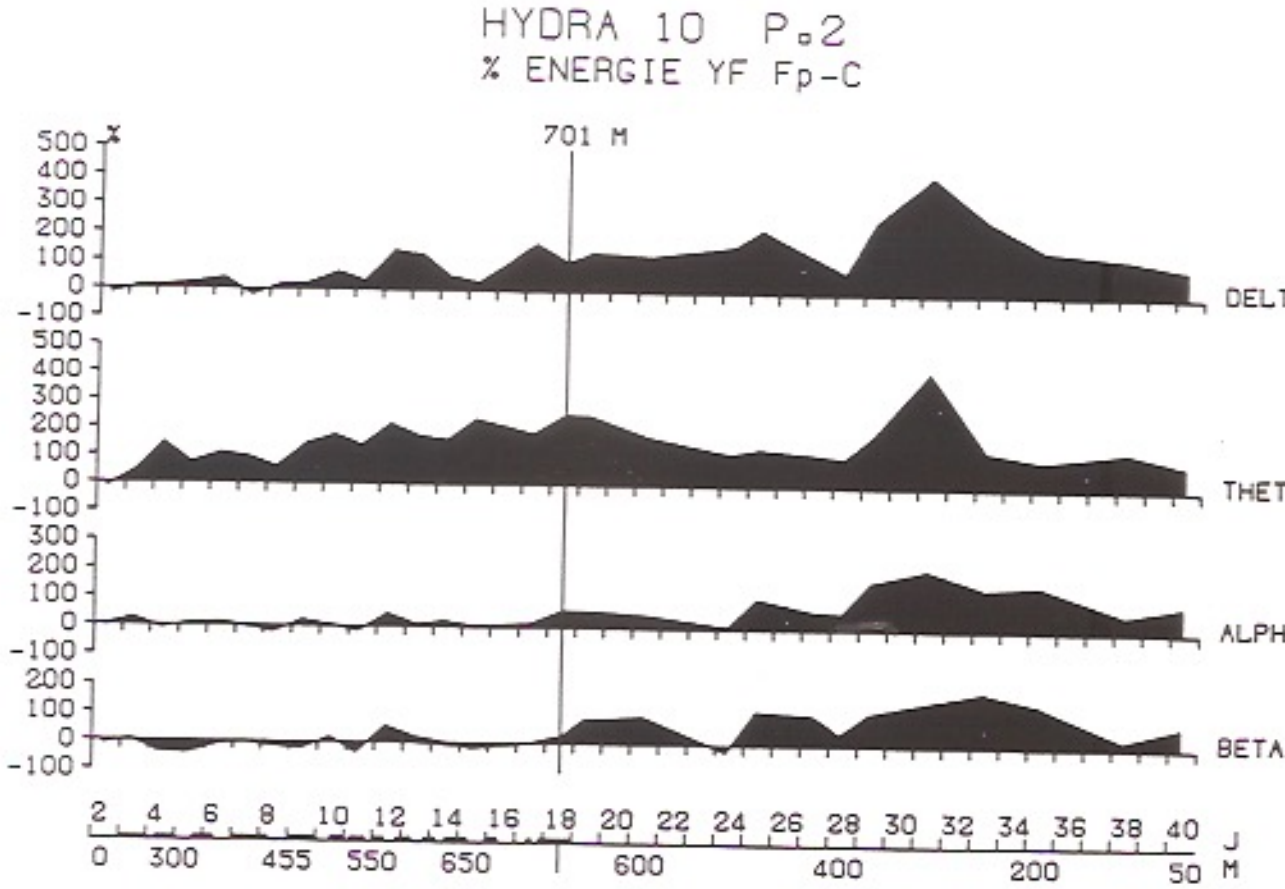


Fig. 10.
Evolution de la puissance des activités EEG enregistrées chez le sujet P2 sur la dérivation antérieure (fronto polaire-centrale, Fp-C), les yeux étant fermés (YF), au cours de la compression et de la décompression. En ordonnées les variations de la puissance sont exprimées en pourcentage de 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

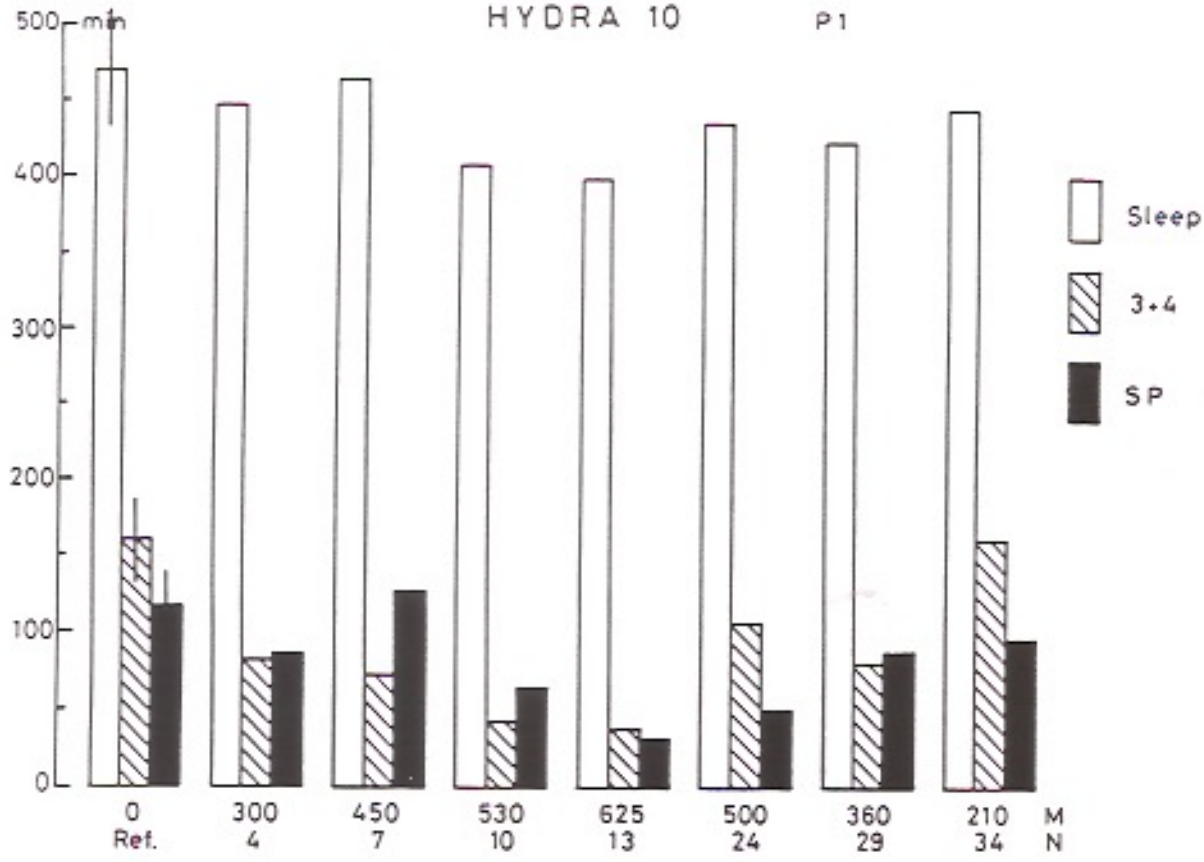


Fig. 11.
Evolution de la durée du sommeil (sleep), des stades 3+4 et du sommeil paradoxal (SP) au cours des nuits d'enregistrement effectuées chez le sujet P1 pendant la compression et la décompression. Les références correspondent à la moyenne ± écart type des durées calculée sur les 5 nuits effectuées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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

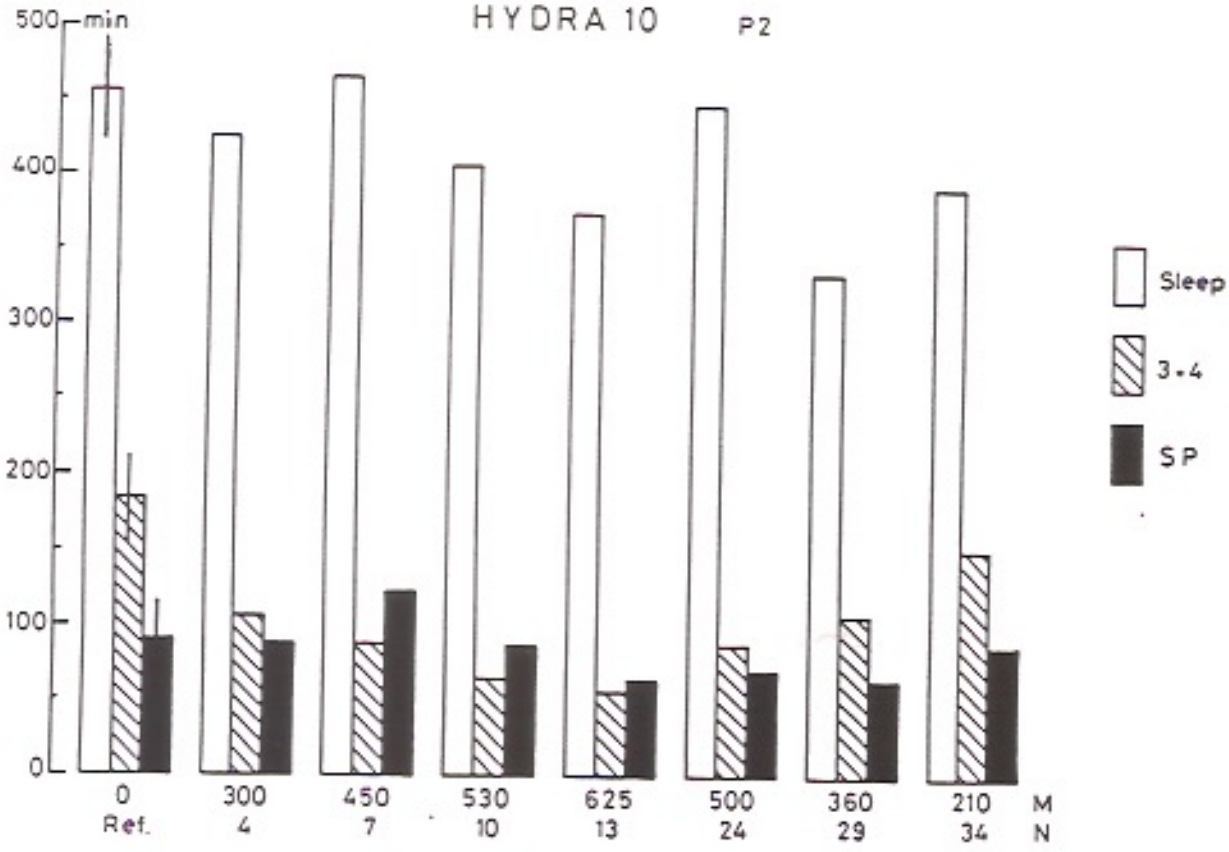


Fig. 12.
Evolution de la durée du sommeil (sleep), des stades 3+4 et du sommeil paradoxal (SP) au cours des nuits d'enregistrement effectuées chez le sujet P2 pendant la compression et la décompression. Les références correspondent à la moyenne ± écart type des durées calculée sur les 5 nuits effectuées en surface et en confinement.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 ± 1.1; P2 = 5.2 ± 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 ± 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 réapparait 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

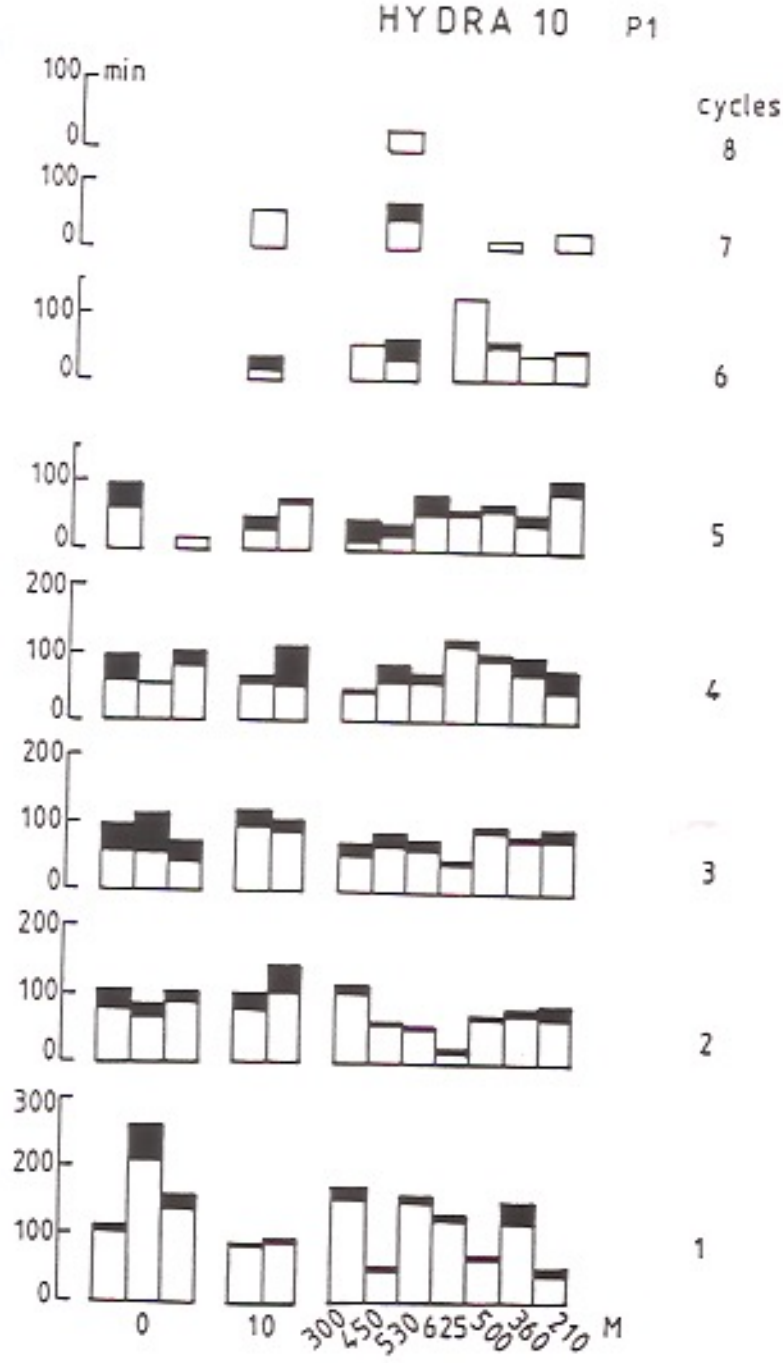


Fig. 13.
Evolution du nombre et de la durée des cycles de sommeil chez le sujet P1 au cours des nuits de référence à 0 et 10 m et pendant la plongée.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

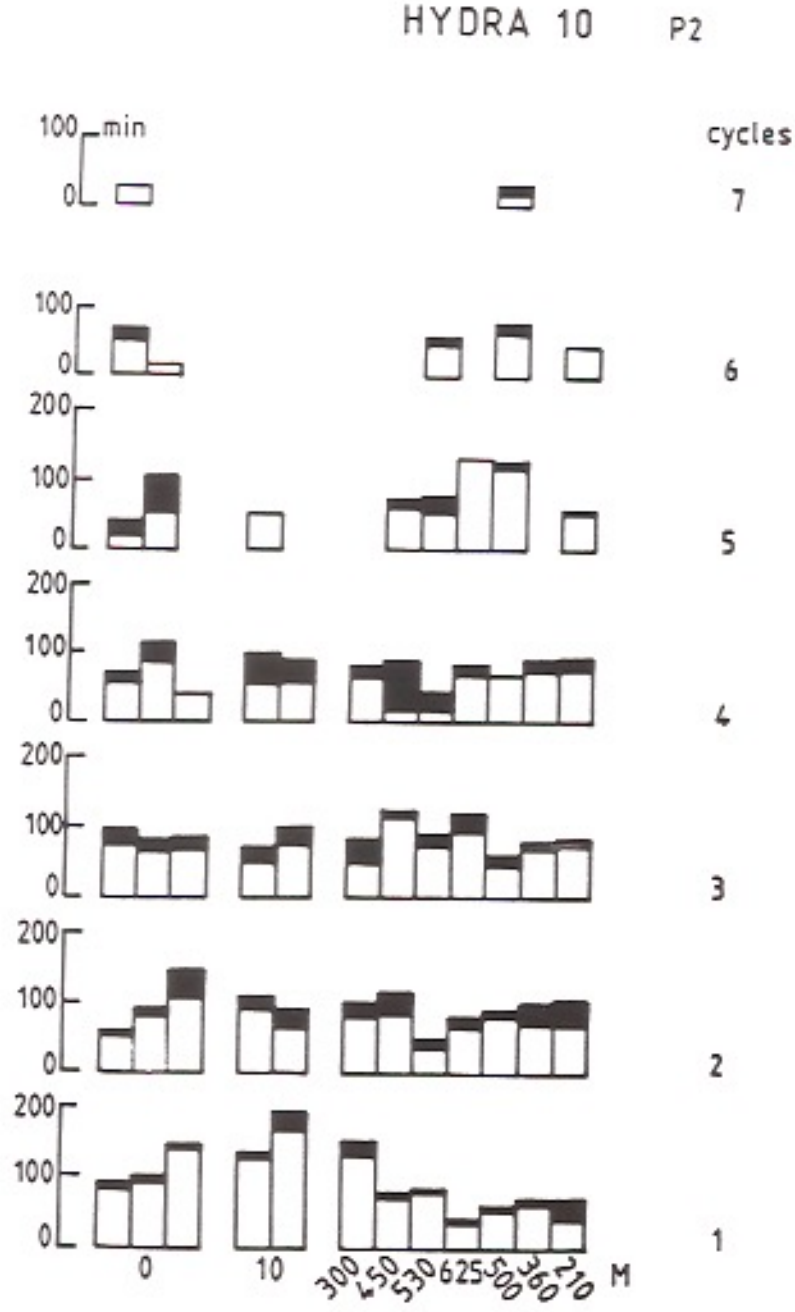


Fig. 14
Evolution du nombre et de la durée des cycles de sommeil chez le sujet P2 au cours des nuits de référence à 0 et 10 m et pendant la plongée.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

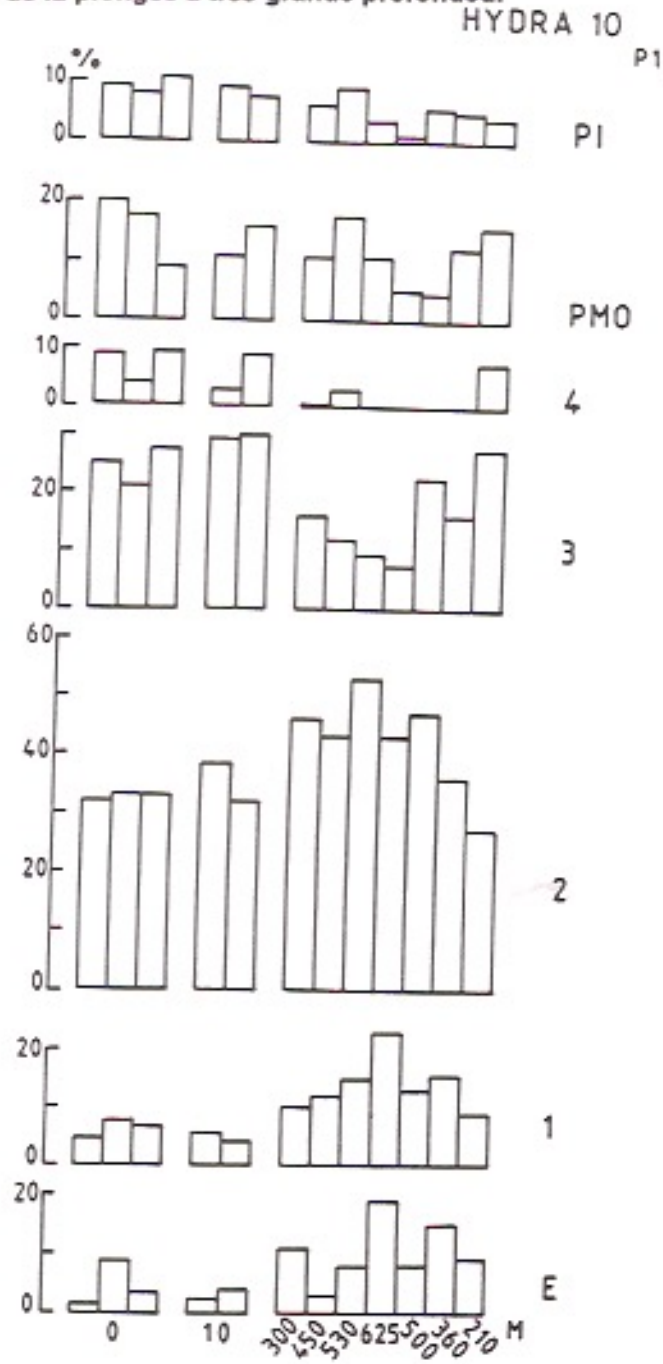


Fig. 15.
Evolution des pourcentages des durées des divers stades de sommeil au cours des enregistrements de référence à 0 et 10 m et pendant la plongée chez le sujet P1. Les divers stades de sommeil sont représentés de bas en haut, des periodes d'éveil au sommeil paradoxal (PMO) et aux phases intermédiaires (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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

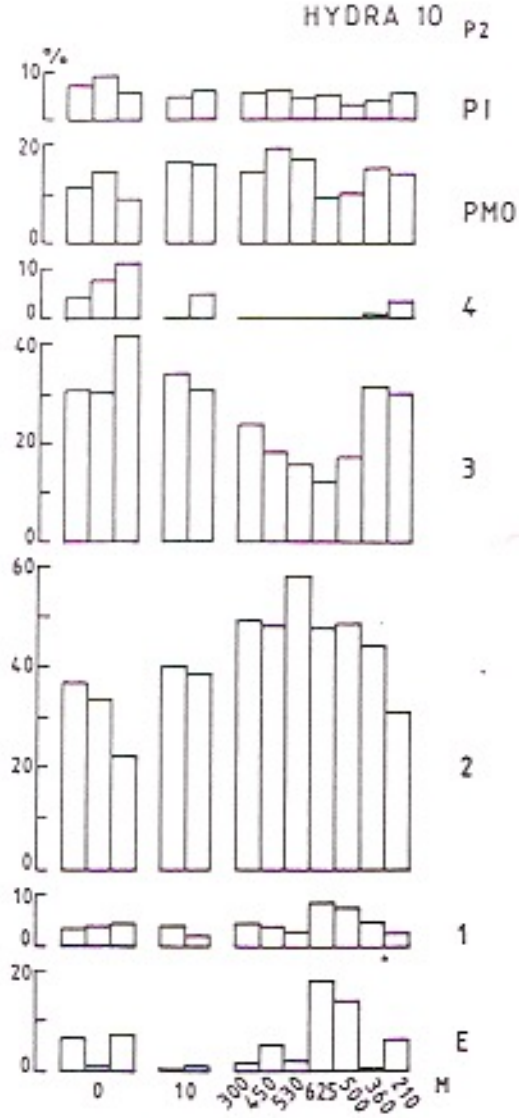


Fig 16.
Evolution des pourcentages des durées des divers stades de sommeil au cours des enregistrements de référence à 0 et 10 m et pendant la plongée chez le sujet P2.
Les divers stades de sommeil sont représentés de bas en haut, des périodes d'éveil au sommeil paradoxal (PMO) et aux phases intermédiaires (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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 apparait 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 apparait 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

(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 singe 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 apparait 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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. Ballliere 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-N2-02. 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 N20 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 ot 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-02 and He-N2-02 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-02 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. Comparatives studies of the effects of hydrogenated breathing mixtures and helium oxygen or helium-nitrogen-oxygen mixtures up to 450 msw in Man. In :

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.I-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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE V

ETUDE THERMIQUE REALISEE AU COURS DU SOMMEIL

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ETUDE THERMIQUE REALISEE

AU COURS DU SOMMEIL

J.P. LIBERT
AMIENS - UNIVERSITE DE PICARDIE

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TRAITEMENT DES DONNEES

Le traitement des données ne peut faire l'objet d'aucune analyse statistique en raison du petit nombre de sujet. L'analyse quantitative a porté sur :

- Les moyennes nocturnes des températures cutanées locales et de la température cutanée moyenne calculée selon la méthode de Ramanathan : ($\overline{T}_{sk} = 0,2\ T_{bras} + 0,2\ T_{cuisse} + 0,2\ T_{mollet} + 0,4\ T_{sein}$). Ces niveaux permettent de cerner si l'organisme évolue vers un état poïkilotherme ou reste en homéothermie ;

- Une analyse de la variation temporelle des différentes températures cutanées locales et de $\overline{T}_{sk}$. L'étude du rythme nocturne peut être mis en relation avec d'éventuelles perturbations du sommeil notamment la disparition du stade 4. Cette analyse a été complétée par une étude portant sur des périodes nocturnes successives (analyse par tiers de nuit) ;

- Une étude des dispersions des températures cutanées locales afin d'analyser l'hétérogénéité en températures des différents segments corporels. Cette hétérogénéité pourrait d'être mise en rapport avec des estimations subjectives d'inconfort thermique.

Plusieurs difficultées ont été rencontrées pour ces analyses :

* Certaines valeurs des températures ont dû être corrigées voire éliminées lorsqu'elles sont en rapport avec des évènements nocturnes inhabituels (débranchement des électrodes, lever du sujet, etc...) ;

* Données très incomplètes. Pour les profondeurs de référence 0 mètre, -10 mètres et -450 mètres les calculs n'ont jamais pu être effectueés sur des nuits de durée identique en raison de problèmes techniques d'enregistrement. A -450 mètres l'acquisition des températures est inexploitable pour 2 plongeurs à partir de 3 - 4 heures (Théo et Régis) ;

* Absence d'enregistrement pour les profondeurs inférieures à -450 mètres.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

RESULTATS

* Les moyennes nocturnes des températures cutanées sont représentées dans le tableau 1. L'ensemble des résultats montrent que ces dernières oscillent entre 32 et 35 °C. Il n'y a pas de refroidissement excessif des extrémités corporelles (bras ou jambes). Les différences inter individuelles des niveaux de températures sont petites. Aucun effet de la profondeur ne semble évident sur les niveaux de températures calculées. Ces résultats permettent de penser que l'état homéothermique n'est pas compromis. Aucune tendance à l'hypo- ou à l'hyperthermie n'est révélée, dans ces conditions, la contrainte thermique ne semble pas être un facteur perturbant le sommeil.

* Les variations temporelles des températures sont représentées sur la figure 1 pour $\overline{T}_{sk}$ et la figure 2 pour la température cutanée locale de la tête.

Pour la température cutanée moyenne les résultats ne montrent pas de perturbation du rythme d'évolution des températures avec la profondeur. Les variations temporelles ne sont pas différentes selon les plongeurs. La température cutanée moyenne se stabilise (Régis, Théo) ou tant à augmenter légèrement dans le temps (Serge) (environ 0,5 °C sur l'ensemble de la nuit). Chez ce plongeur, la température cutanée moyenne est légèrement plus élevée que chez les autres.

En ce qui concerne la température locale mesurée au niveau du front, l'évolution diffère selon les plongeurs. Elle se stabilise chez Serge et Théo mais augmente fortement chez Régis (dérive nocturne d'environ 2 °C sur l'ensemble de la nuit). Ceci peut s'expliquer par le fait que ce plongeur a une température du front relativement basse au début de la nuit et qu'il tend a atteindre un équilibre (une valeur cible de température), dans la dernière partie de la nuit. Ainsi, plus la valeur de température en début de nuit est basse, plus l'augmentation nocturne de température locale est grande. Cela montre que pendant la période nocturne, la température frontale tend vers un équilibre. La température frontale reste généralement plus élevée que les autres températures cuta-

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

nées locales et se rapproche donc de la température centrale de l'organisme. Son utilisation en tant que telle est critiquable car elle ne révèle aucune modification de rythme d'évolution nocturne comme cela aurait dû être le cas à 0 mètre. Cela est particulièrement évident pour Régis. A noter que les températures cutanées moyenne et frontale de Serge sont plus élevées que celles des 2 autres plongeurs dont les mécanismes de régulation thermique semblent plus efficaces comme s'ils avaient été préalablement exposés à la chaleur (?).

L'analyse par tiers de nuit n'est pas plus informative.

La dispersion des différentes températures cutanées locales caractérisée par la valeur de l'écart-type sur les moyennes arithmétiques est représentée sur la figure 3 (Serge), 4 (Théo) et 5 (Régis). L'ensemble des résultats montre qu'il existe une grande variabilité inter-segment corporel à 0 et -10 mètres et que celle-ci tend à disparaître à -450 mètres sauf chez Régis. A cette profondeur les différences de températures entre les segments corporels sont donc plus importantes et moins stables chez ce plongeur (0,5 à 1,5 °C) que chez Serge (0,7 °C) et Théo (0,7 °C). Ceci pourrait donc se traduire par une estimation d'un inconfort thermique local plus important chez Régis que chez les 2 autres plongeurs.

CONCLUSIONS

En raison des conditions expérimentales ces conclusions n'ont qu'une valeur indicative. Il apparaît cependant que l'état homéothermique des plongeurs est maintenu. Les rythmes des températures cutanées ne semblent pas profondément modifiés et l'on ne peut pas considérer que la contrainte thermique soit le facteur perturbant le sommeil du plongeur. Les conditions expérimentales imposées en profondeur semblent réduire la dispersion des différentes températures locales sans que l'on puisse attribuer ce phénomène à la composition du gaz, aux conditions thermohygrométriques imposées dans le caisson et/ou à la

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

"physiologie du plongeur". Seul Régis semble avoir quelques difficultés à stabiliser ses températures cutanées locales.

Une étude plus approfondie de la régulation thermique serait donc nécessaire pour tirer des conclusions plus pertinentes. Cette étude devrait tenir compte de :

- la mesure d'une température interne qui permettrait une analyse plus précise des rythmes de températures. La température frontale telle qu'elle a été mesurée (non isolée par un déflecteur aluminisé et par de la mousse) ne peut pas être considérée comme un bon indicateur de la température centrale de l'organisme ;

- compléter les enregistrements mais en laissant la priorité à l'analyse d'autres fonctions physiologiques. Les conditions thermiques imposées dans cette plongée en caisson ne me semblent pas être un facteur limitant. Cette conclusion est cependant émise avec réserves vu les difficultées rencontrées dans les analyses. Le choix fait au cours de la plongée, HYDRA X d'arrêter les mesures thermiques en raison de l'inconfort généré par les capteurs me paraît tout à fait justifié ;

- une "analyse thermique" du caisson qui permettrait de détecter les zones d'hétérogénéité climatique (hétérogénéité en température, de ventilation,...), c'est à dire les points chauds ou froids qui gêneraient éventuellement le plongeur dès qu'il se situerait dans ces zones et modifierait son confort thermique.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

		0 m 1	0 m 2	0 m 3	10 m 1	10 m 2	450 m
Régis	T1	33,25 ± 0,72	33,46 ± 0,77	32,42 ± 1,44	33,83 ± 0,92	32,67 ± 0,97	33,89 ± 0,26
	T2	33,05 ± 0,49	33,70 ± 0,55	31,98 ± 1,09	34,05 ± 1,03	32,86 ± 1,07	33,73 ± 0,13
	T3	32,27 ± 1,44	31,46 ± 1,26	31,15 ±1,02	34,08 ± 0,79	32,63 ± 0,83	35,41 ± 0,93
	T4	33,51 ± 1,03	34,25 ± 0,69	33,55 ± 1,15	34,29 ± 0,50	33,90 ± 0,98	32,45 ± 1,34
	Tsk	33,06 ±0,38	33,26 ± 0,57	32,24 ± 0,88	34,00 ± 0,68	32,95 ± 0,81	33,81 ± 0,36 *
Théo	T1	32,06 ± 0,59	32,67 ± 1,27	33,32 ± 0,96	32,31 ± 0,56	31,74 ± 1,19	33,72 ± 0,59
	T2	31,88 ± 0,69	33,00 ± 0,96	32,60 ± 1,59	32,37 ± 0,37	32,17 ± 0,44	33,95 ± 0,74
	T3	34,12 ± 0,33	34,33 ± 0,53	34,70 ± 0,26	33,71 ± 0,37	34,64 ± 0,37	34,01 ± 0,25
	T4	34,36 ± 0,25	34,51 ± 0,34	34,48 ± 0,21	33,45 ± 0,43	34,59 ± 0,51	33,82 ± 0,93
	Tsk	32,90 ± 0,35	33,45 ± 0,65	33,71 ± 0,49	32,83 ± 0,21	33,01 ± 0,59	33,94 ± 0,34 *
Serge	T1	33,93 ± 1,55	35,32 ± 0,42		34,95 ± 0,59	35,02 ± 0,51	35,28 ± 0,16
	T2	33,78 ± 0,69	33,04 ± 1,09		33,99 ± 0,70	33,72 ± 0,40	34,02 ± 0,22
	T3	34,06 ± 0,84	33,72 ± 0,88		33,82 ± 0,47	33,46 ± 0,25	33,55 ± 0,25
	T4	31,20 ± 1,60	30,74 ± 0,86	31,15 ± 0,44	33,39 ± 1,31	31,74 ± 0,64	33,95 ± 0,83
	Tsk	33,39 ± 0,77	33,63 ± 0,40		34,22 ± 0,56	33,79 ± 0,26	34,41 ± 0,23

Tableau 1 : Moyennes (± 1 SD) nocturnes des différentes températures cutanées aux différentes profondeurs.
T1 : sein ; T2 : jambe ; T3 : mollet ; T4 : bras ; * : nuit incomplète ; Tsk : température cutanée moyenne.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Figure 1 : évolutions nocturnes de la température cutanée moyenne chez les trois plongeurs en fonction de la profondeur. o (0 m) ; • (-10 m) ; ◑ (-450 m). Pour les profondeurs de référence 0 et -10 m, les valeurs représentées sont des moyennes des données mesurées lors de 2 conditions expérimentales.

Figure 2 : évolutions nocturnes de la température frontale chez les trois plongeurs en fonction de la profondeur. o (0 m) ; • (-10 m) ; • (-450 m). Pour les profondeurs de référence 0 et -10 m, les valeurs représentées sont des moyennes des données mesurées lors de 2 conditions expérimentales.

Figure 3 : dispersion des différentes températures cutanées locales en fonction du temps et de la profondeur chez Serge.

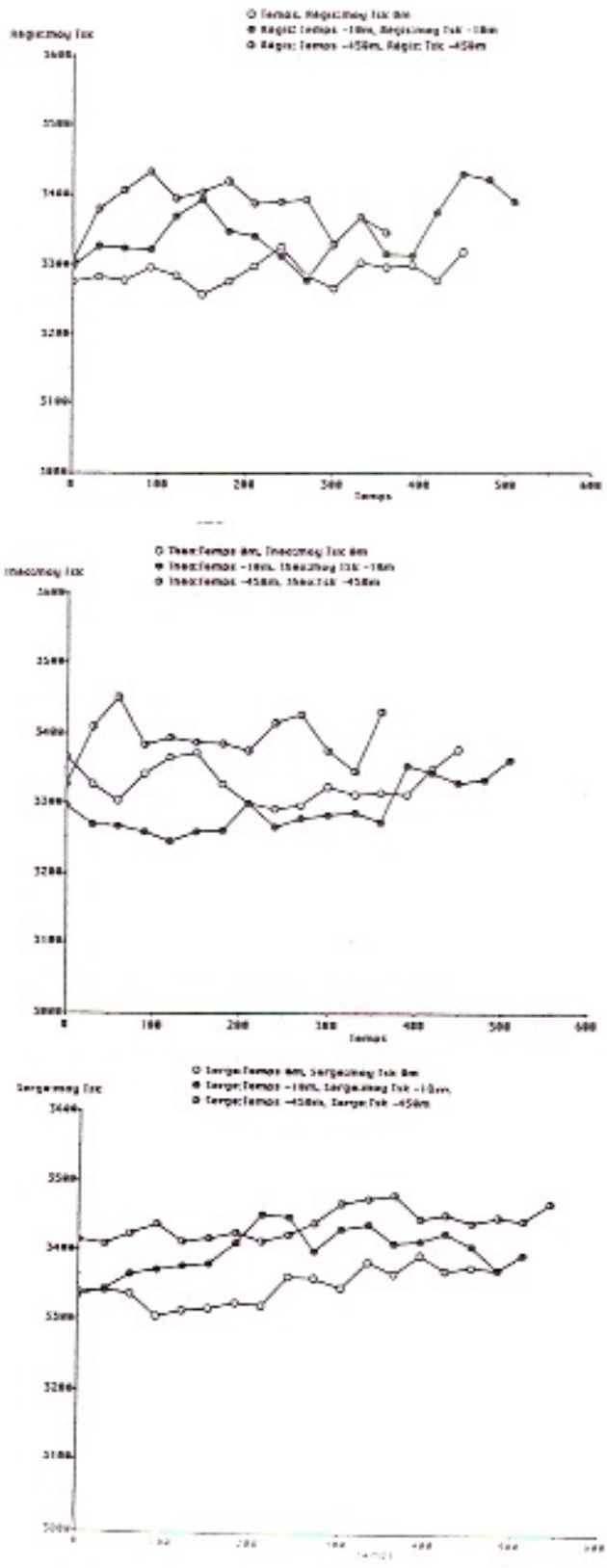
Figure 4 : dispersion des différentes températures cutanées locales en fonction du temps et de la profondeur chez Théo.

Figure 5 : dispersion des différentes températures cutanées locales en fonction du temps et de la profondeur chez Régis.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

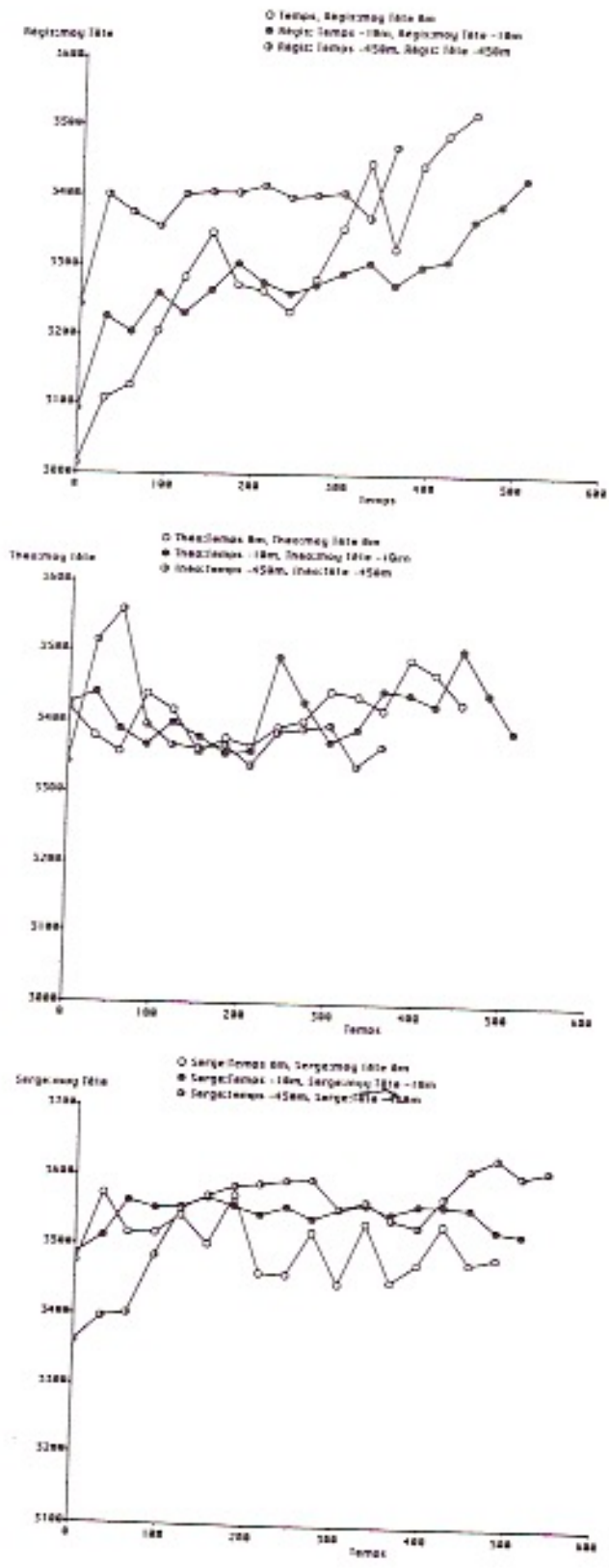
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

FIGURE 1



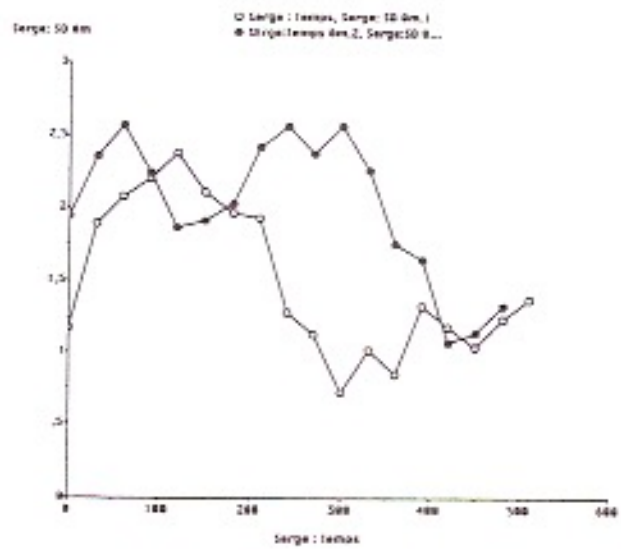
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

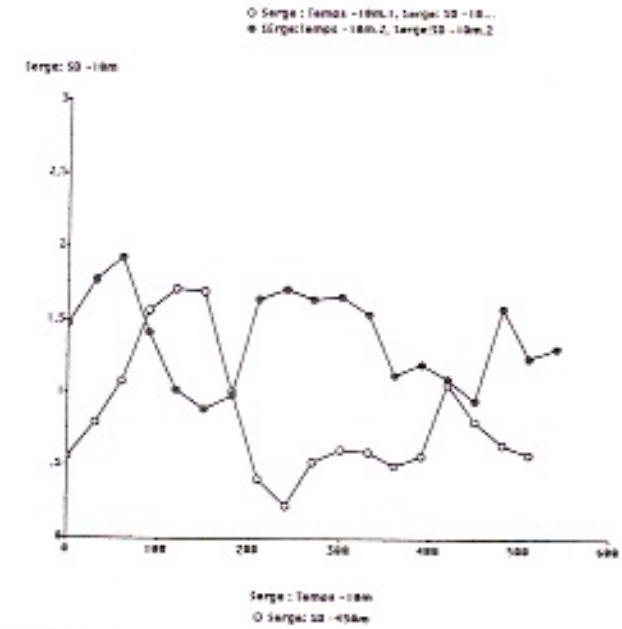
FIGURE 2

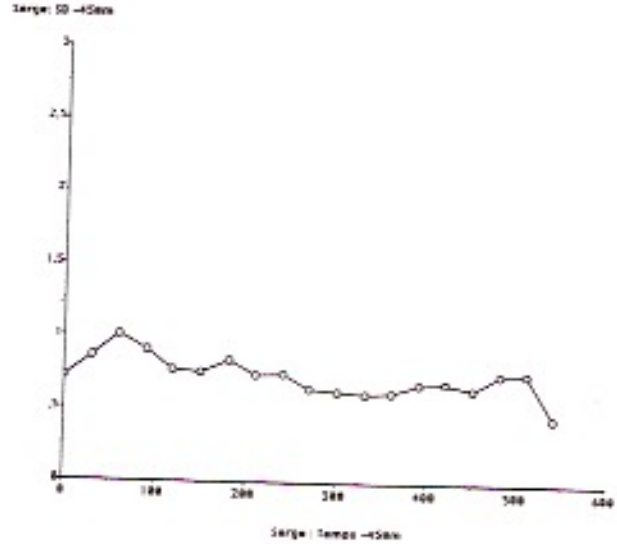


Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

FIGURE 3

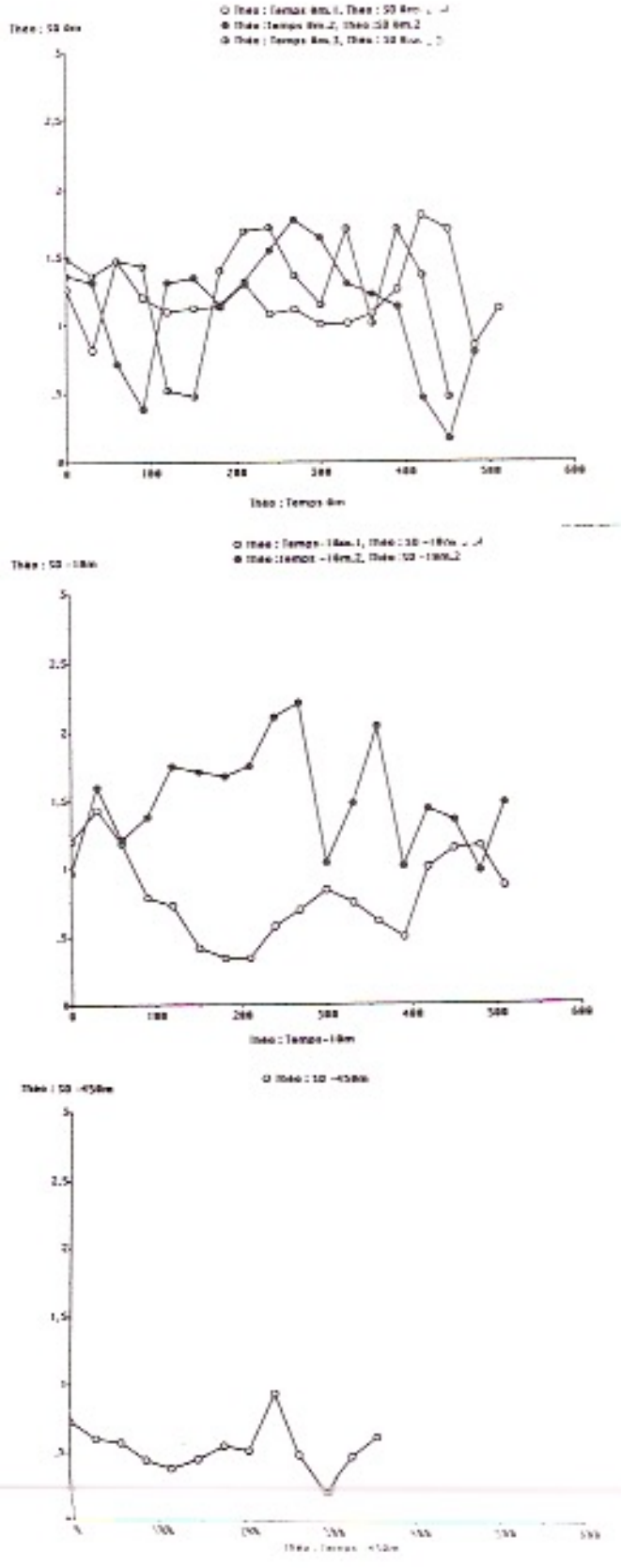






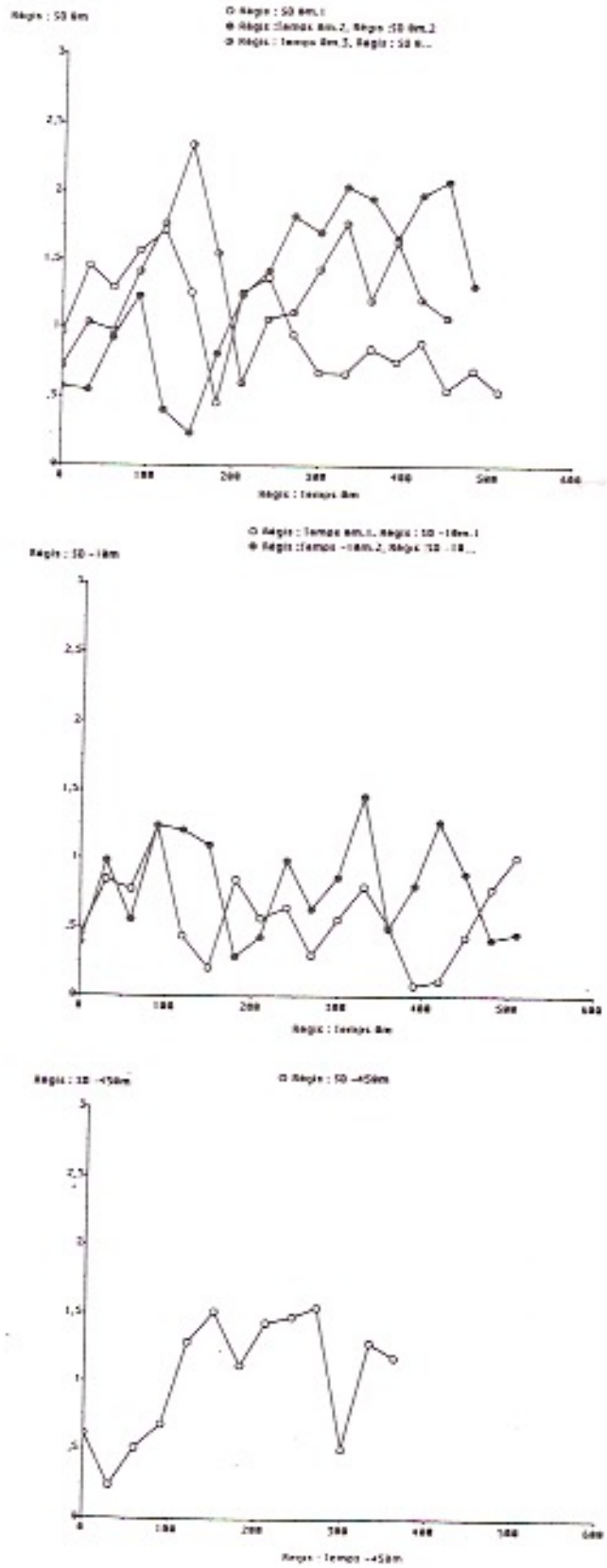
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

FIGURE 4



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

FIGURE 5



CHAPITRE VI

ETUDE DES PERFORMANCES PSYCHOMETRIQUES ET INTELLECTUELLES

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ETUDE DES PERFORMANCES

PSYCHOMETRIQUES ET INTELLECTUELLES

H Y D R A 1 0

Ch. LEMAIRE

A. M. F.
APPLICATIONS MEDICALES FRANCAISES
NOUVELLES TECHNOLOGIES
B.P 004 - 13781 AUBAGNE CEDEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'efficience 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

P R O T O C O L E E X P E R I M E N T A L : 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.

R E S U L T A T S : 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.

Dextérite 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 apparait 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%).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 entrainés 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 P_1, 21 % chez P_2 et 43 % chez P_3 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 P_1 et P_3, alors que P_2 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 P_1 (91, 92 et 96 cases respectivement à 500, 550 et 605 m) et chez P_2 (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 P_1, 2 % chez P_3 et 21 % chez P_3), avec une récupération relative dès 500 m chez P1 et à 550 m chez P2. Par contre la chute est continue chez P_3 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 P_1, - 15 % chez P_2 et - 30 % chez P_3).

En décompression, dès 525 m, la performance de P_3 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, P_1 réalise le meilleur score possible à 375 et 170 m (99 et 100), alors que P_2 atteint 96 cases sur 100 à 375 m.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

D I S C U S S I O N : Il apparait 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 apparait 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'efficience, (- 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 %).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 avions noté pour ENTEX 9 (mélange héliox avec 0,8 bar de N_2) 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 décroitre, 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 P_1 et P_2, alors que pour le sujet P_3 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 P_1 et P_2, alors qu'ils montrent une positivité nette chez P_3 (500 m, J.9).

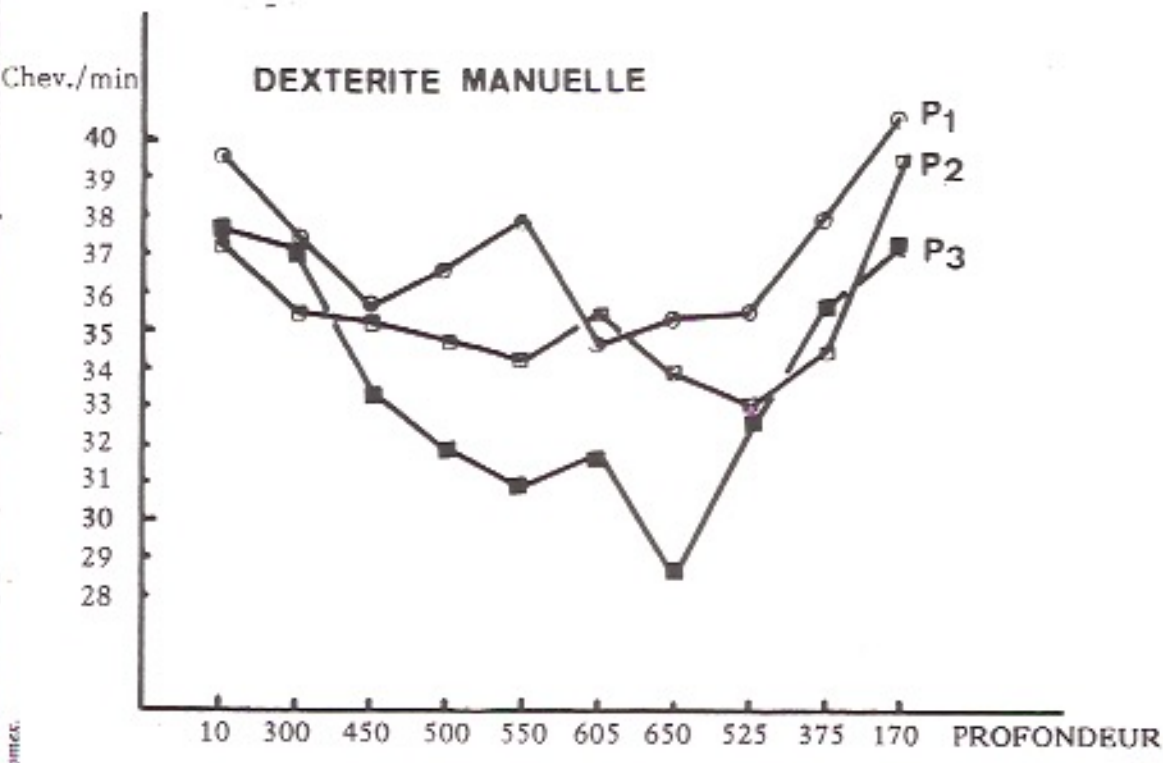
En conclusion, il faut donc retenir cette différence de sensibilité inter-individuelle, qui se pose comme un facteur majeur de la plongée très profonde, et vraisemblablement aussi comme de l'utilisation de l'hydrogène.

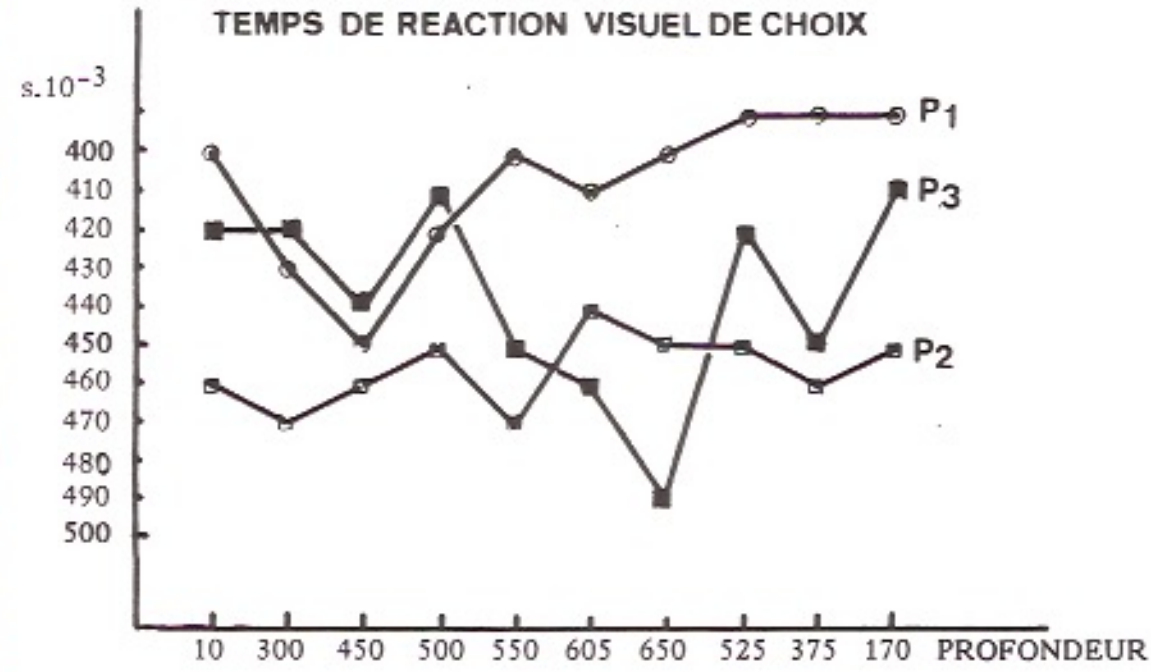
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en aliénant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

HYDRA 10 - PERFORMANCES PSYCHOMETRIQUES (valeurs absolues)

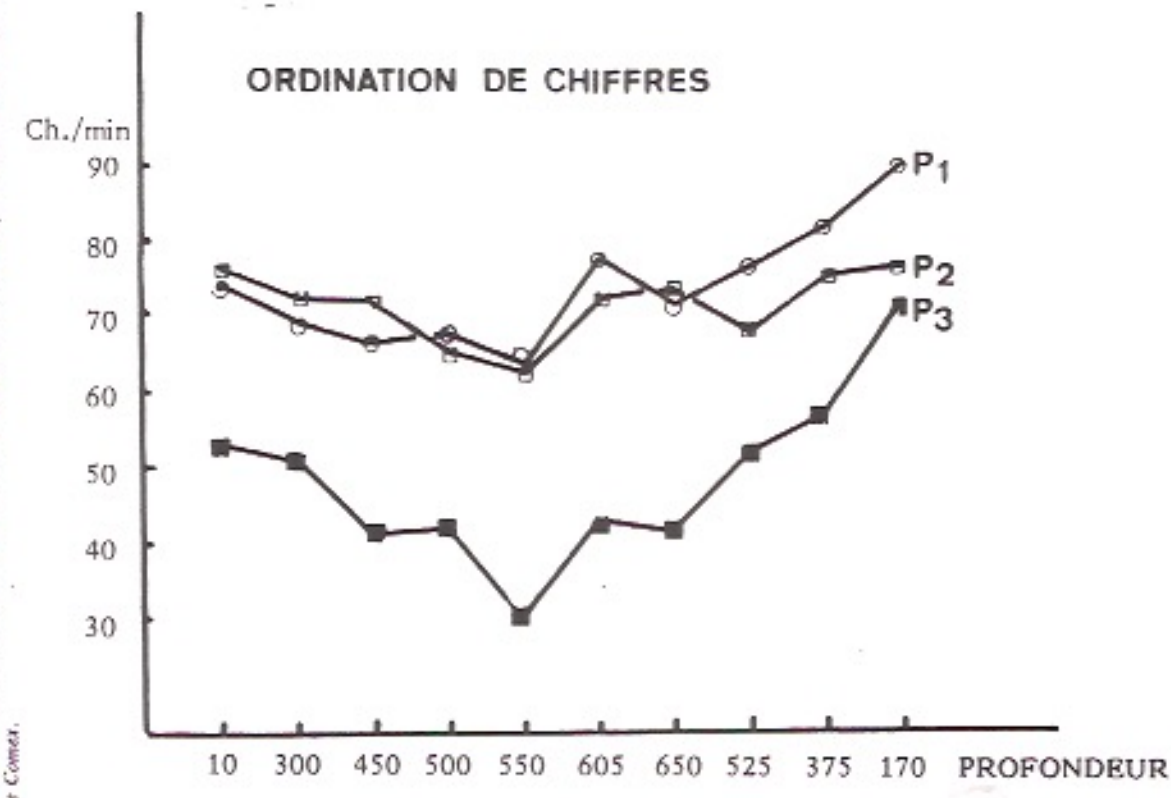
PROFONDEUR	PLONGEUR	DEXTERITE MANUELLE	TEMPS DE REACTION	ORDINATION DE CHIFFRES	PROMPTITUDE MENTALE
10 m	P_1	39,7	400	74	97
	P_2	37,3	460	76	89
	P_3	37,5	420	53	87
300 m	P_1	37,5	430	69	96
	P_2	35,5	470	72	98
	P_3	37,3	420	51	83
450 m	P_1	35,7	450	66	86
	P_2	35,3	460	72	96
	P_3	33,2	440	41	66
500 m	P_1	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

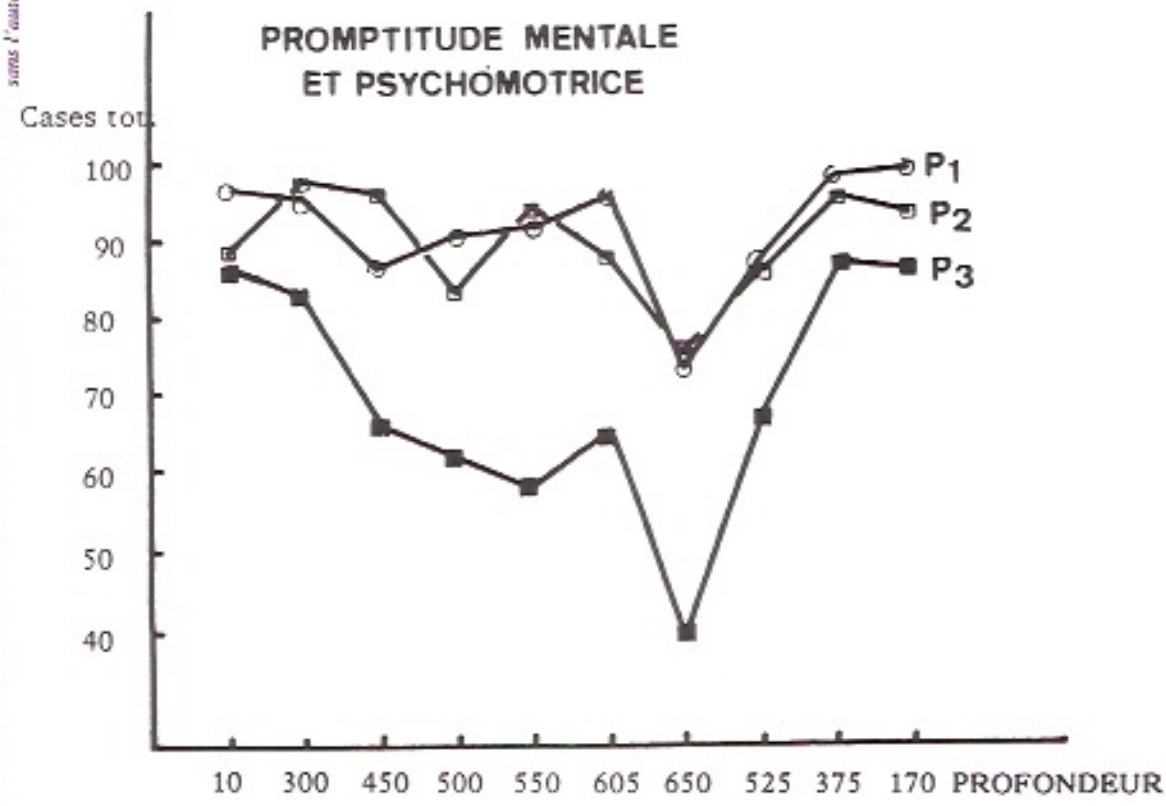
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.





Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.





CHAPITRE VIII

ETUDE ERGONOMIQUE ET ELECTROMYOGRAPHIQUE DE MUSCLES INSPIRATOIRES ET SQUELETTIQUE

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-O_2 (densité: 8,7 g/L) et 3,6 en mélange He-N_2-O_2 (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-O_2 et He-N_2-O_2 , durée du séjour sous pression maximale: 12 jours, 4 plongeurs) et Entex XVI (25 ATA: He-N_2-O_2 , 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 dicrète 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 sensitives 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:

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-O_2 et jamais en mélange He-N_2-O_2, 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'évenement 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 ($\pm$ 250 cmH_2O) monté en parrallèle avec un manomètre Protais (0 à - 250 cmH_2O).

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 concu 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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- énergie calculée dans une bande de basses fréquences (10-80 Hz) (EL)

- énergie calculée dans une bande de hautes fréquences (100-200 Hz) (EH)

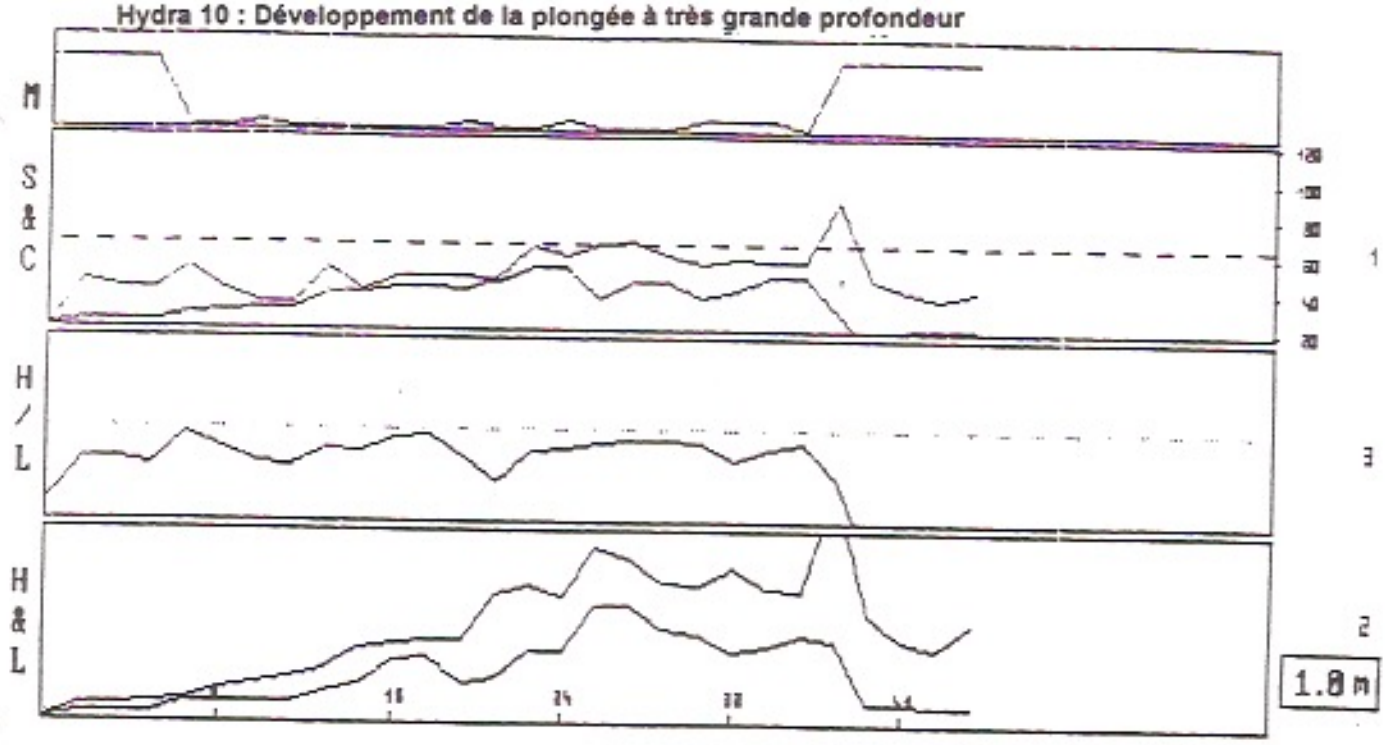
- rapport des énergies EH et EL , soit rapport H/L.

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 10ème 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Hydra 10 : Développement de la plongée à très grande profondeur



MAVOISE: ZET

REFERENCES pour le calcul des %

LOW	HIGH	MECA	H/L	Surf	Freq
48.7	69.7	9.7	0.5	5.0	15.0

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	40.0	-5.0
3	43.0	42.0	-7.0	-1.0	40.0	-4.0
4	26.0	54.0	-7.0	21.0	40.0	4.0
6	42.0	54.0	-7.0	8.0	40.0	0.0
-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	-6.0	40.0	-1.0
14	55.0	64.0	3.0	-1.0	60.0	0.0
16	65.0	138.0	3.0	44.0	80.0	6.0
-17	97.0	18.0	3.0	-48.0	80.0	-12.0

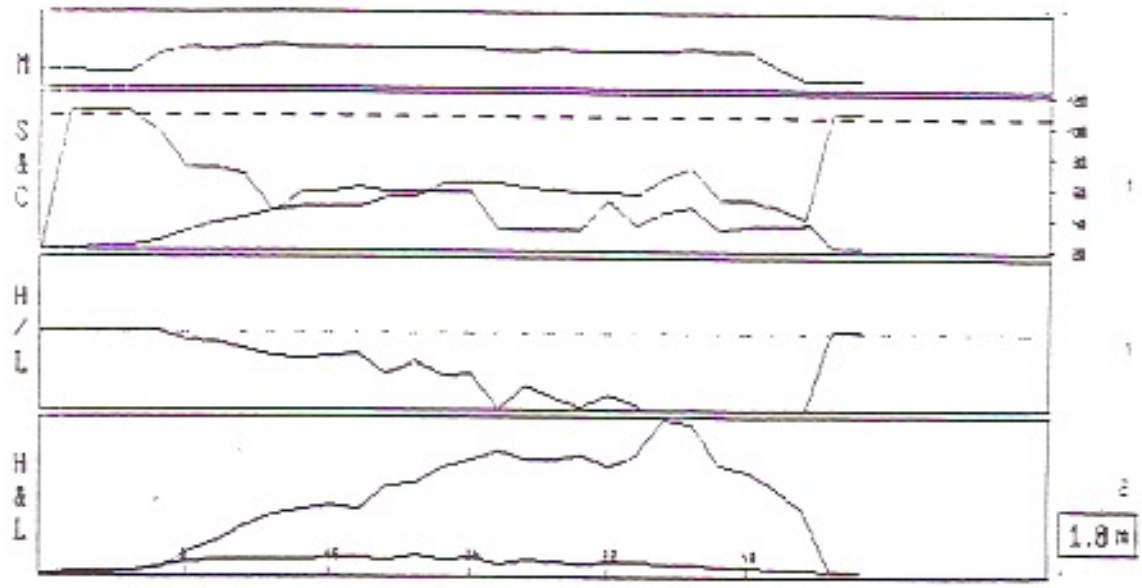
	PENTE	I.confi	R2
LOW.....	0.27	0.38	0.51
HIGH.....	0.18	0.17	0.09
MECA.....	0.38	0.32	0.65
H/L.....	-0.34	0.12	0.31
Surface..	0.25	0.07	0.30
Centroide.	-0.00	0.43	0.00

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Figure n°2



PLONGEE 227

REFERENCES pour le calcul des %

LOW	HIGH	MEDIUM	H/L	Surf	Time
76.7	88.3	26.3	0.7	0.3	47.2

VALEURS en % des TOLERES

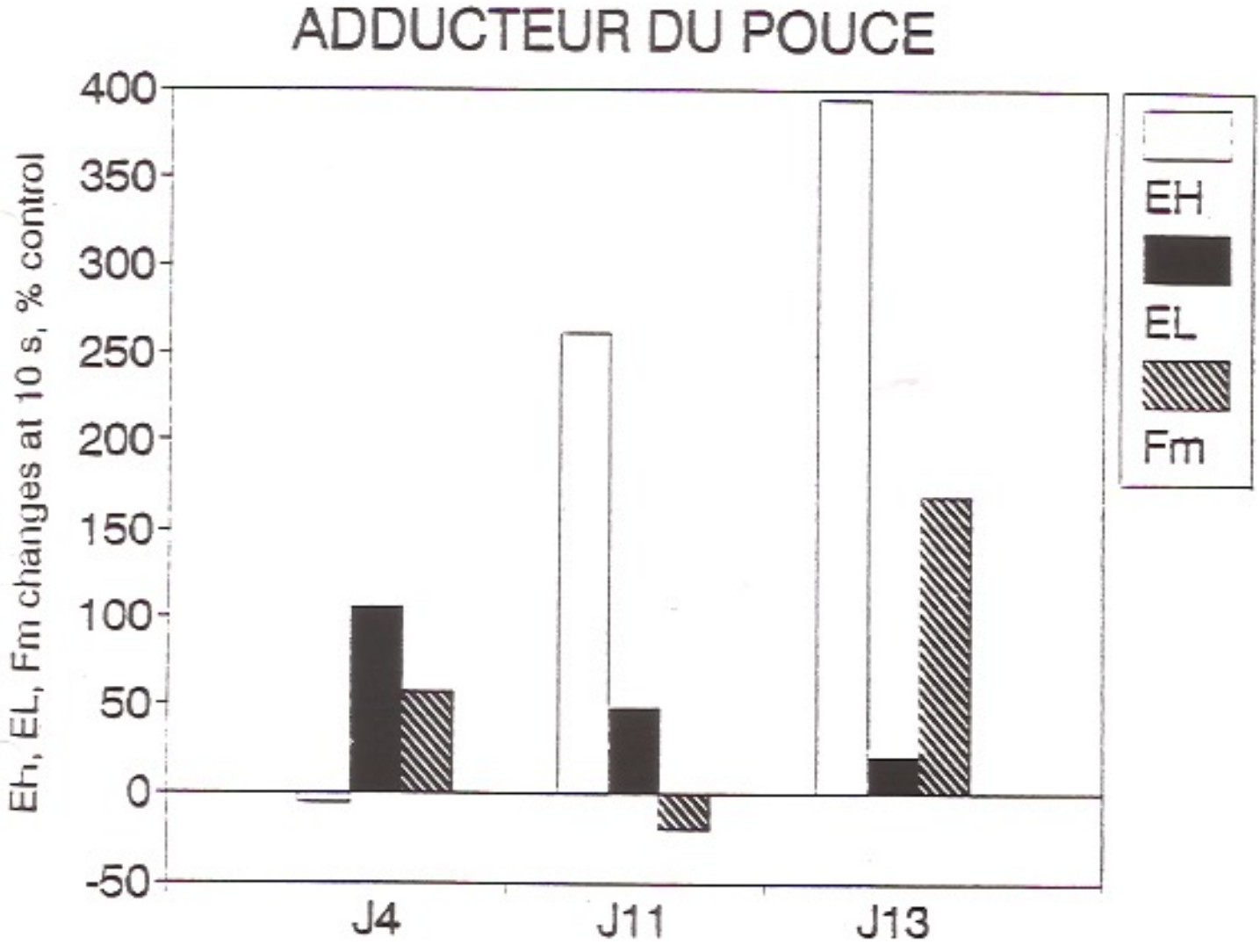
Temps	LOW	HIGH	MEDIUM	H/L	Surf	Tres.
0	0.3	3.3	0.3	0.3	0.3	3.1
1	17.3	-4.3	-1.3	-20.6	0.3	-4.3
2	-26.3	-42.3	-1.3	-24.3	-36.3	-2.3
3	-2.3	-13.3	3.3	-11.3	0.3	-4.3
4	-31.3	-39.3	6.3	-11.3	-25.3	-2.3
5	-44.3	-48.3	6.3	7.3	-40.3	3.3
6	-26.3	-40.3	3.3	-28.3	-35.3	-5.3
7	-33.3	-48.3	3.3	-18.3	-25.3	-4.3
8	-32.3	-42.3	3.3	-15.3	-25.3	-4.3
9	-37.3	-45.3	3.3	5.3	-38.3	3.3
10	-37.3	-41.3	-1.3	-22.3	-38.3	-4.3
11	-53.3	-48.3	3.3	-11.3	-48.3	-2.3
12	-31.3	-51.3	3.3	-29.3	-38.3	-7.3
13	-48.3	-47.3	3.3	7.3	-38.3	3.3
14	-38.3	-46.3	3.3	-13.3	-48.3	-4.3
15	-42.3	-13.3	3.3	-28.3	-35.3	-4.3
16	-39.3	-45.3	3.3	5.3	-38.3	3.3
17	-36.3	-48.3	-1.3	-4.3	-35.3	0.3
18	-42.3	-48.3	1.3	-11.3	-48.3	-2.3
19	-42.3	-42.3	6.3	1.3	-35.3	5.3
20	-34.3	-32.3	-1.3	16.3	-16.3	14.3
21	-18.3	-33.3	-1.3	-9.3	-35.3	0.3
22	-47.3	-41.3	-1.3	-11.3	-16.3	-2.3
23	-32.3	-48.3	3.3	-29.3	-48.3	-8.3
24	-46.3	-48.3	3.3	-29.3	-48.3	-7.3
25	-47.3	-47.3	-58.3	-34.3	-48.3	-7.3

	PENTE	T.JOUR	T2
LOW.....	-0.26	3.35	3.49
HIGH.....	-0.22	3.03	3.55
MEDIUM.....	-0.27	4.34	3.13
H/L.....	0.38	0.06	0.48
Surface.....	-0.28	0.05	0.37
Tensions.....	0.41	0.02	0.31

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'entrainement.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Références bibliographiques:

- Badier M., C. Guillot, F. Lagier-Tessonnier, 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- 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. Neuromusculzar function at hyperbaric pressures: pressure-anesthetic interactions. Amer. J. Physiol., 1976, 230: 1244-1249.

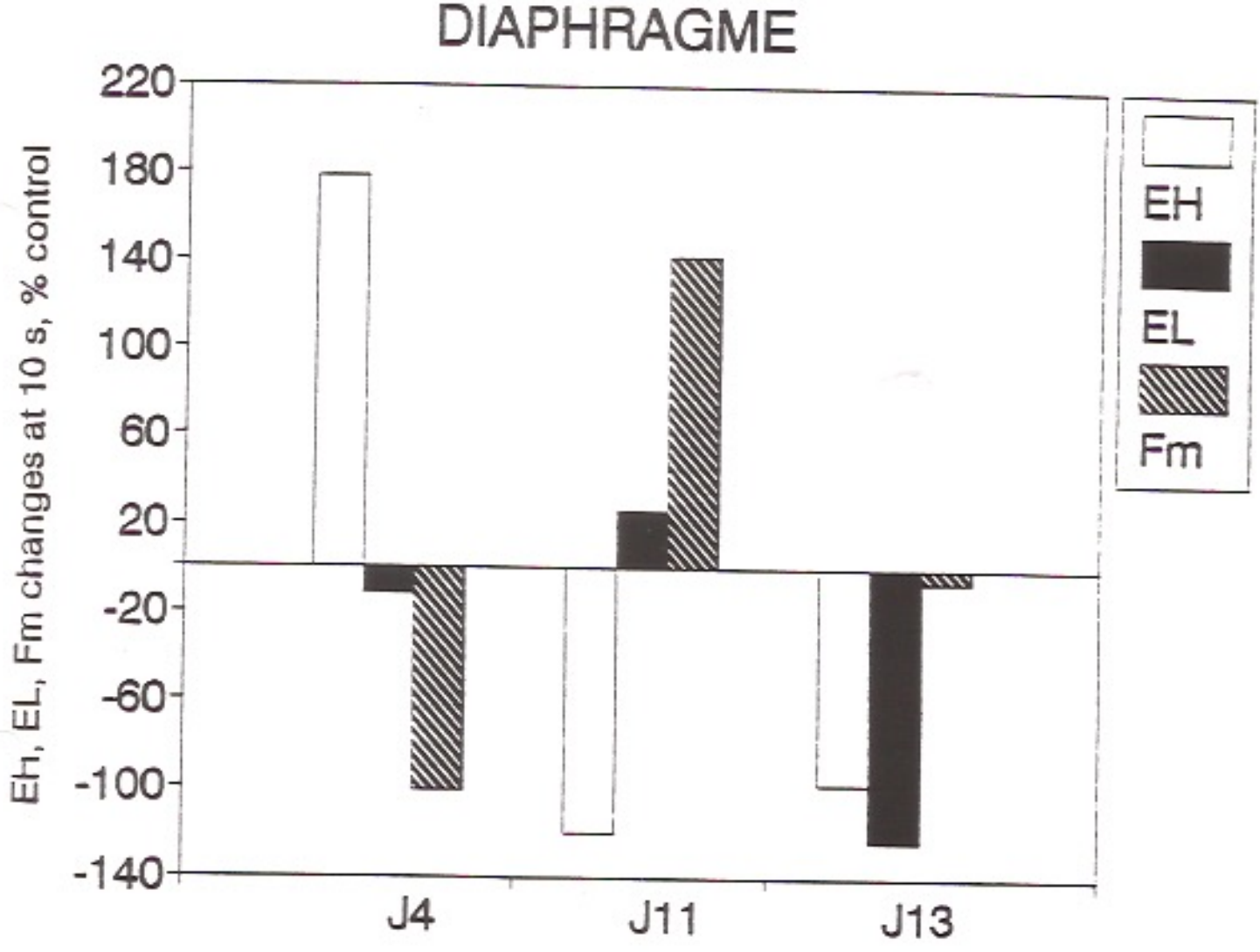
- Lagier-Tessonnier F, Balzamo E, Jammes Y: Comparative effects of ischemia and acute hypoxemia on muscle afferents from tibialis anterior in cats. Muscle Nerve, 1993; 16: 135-142.

- 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.

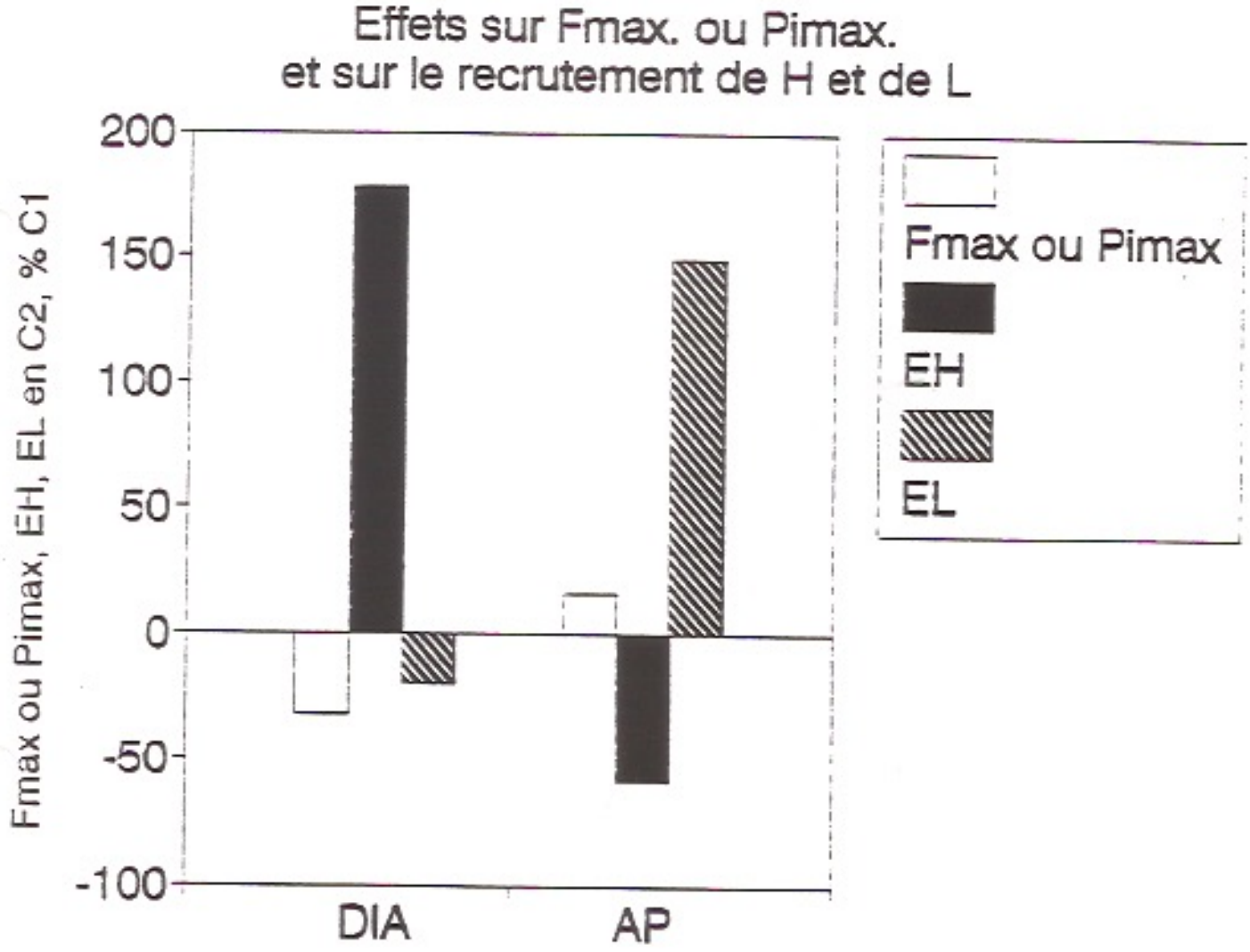
- Roussos Ch. and J. Moxham. Respiratory muscle fatigue. In: *The Thorax part II* , Roussos Ch. And P.T. Macklem eds., Marcel Dekker, New York, 1985, pp. 829-870.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Hydra 10 : Développement de la plongée à très grande profondeur



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

inspiratoires au cours du séjour hyperbare. En témoignent les modifications EMG et aussi la réduction des valeurs de Pi_{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 Pi_{max} s'accentue 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 Pi_{max} un mois après la fin d'Hydra 10 peut être attribuée à l'atténuation du phénomène de *muscle wisdom* constaté sur l'EMG.

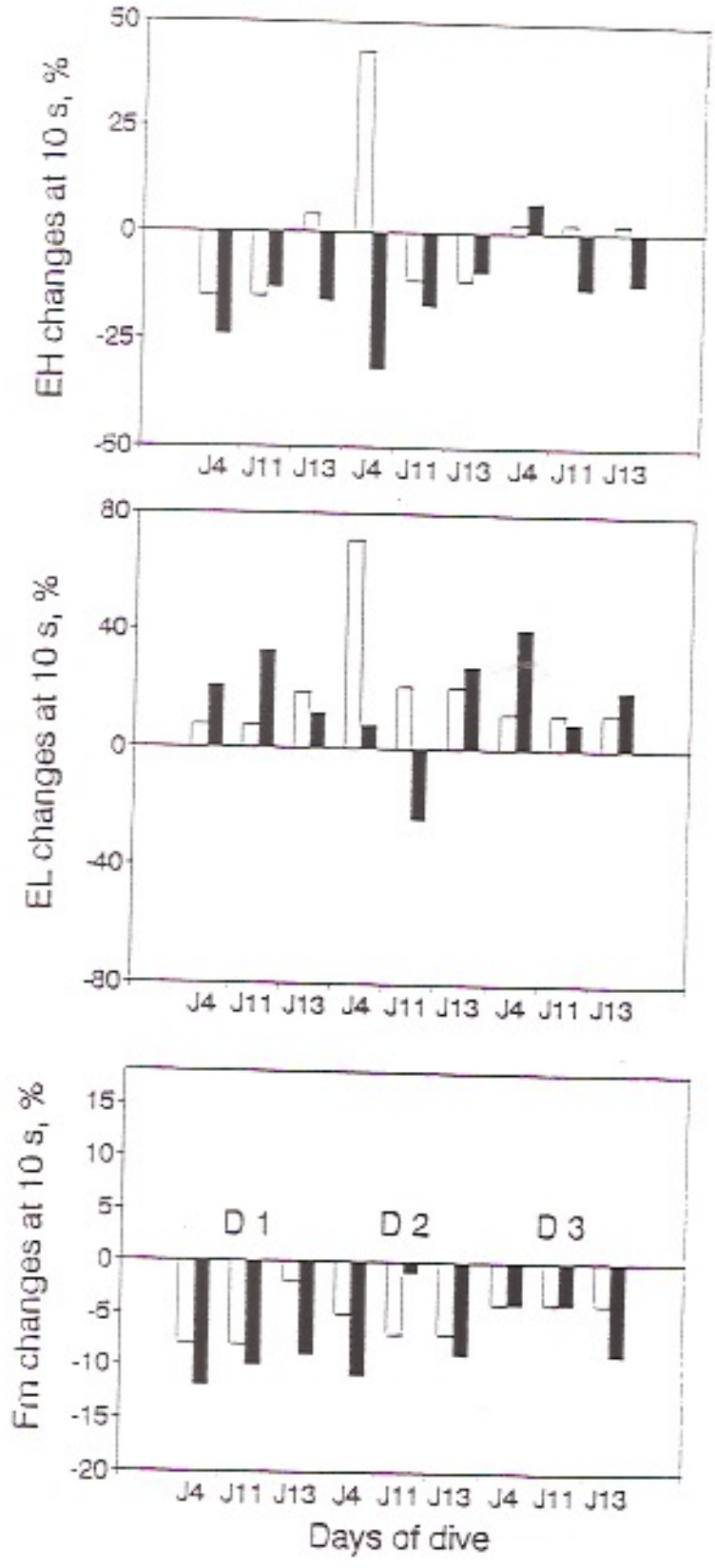
***Adducteur du pouce:**

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ADDUCTEUR DU POUCE

Figure n°



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

En raison des diminutions des valeurs de pression buccale ou de force maintenue au cours des tests réalisés en condition hyperbare, des valeurs de Pi 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:

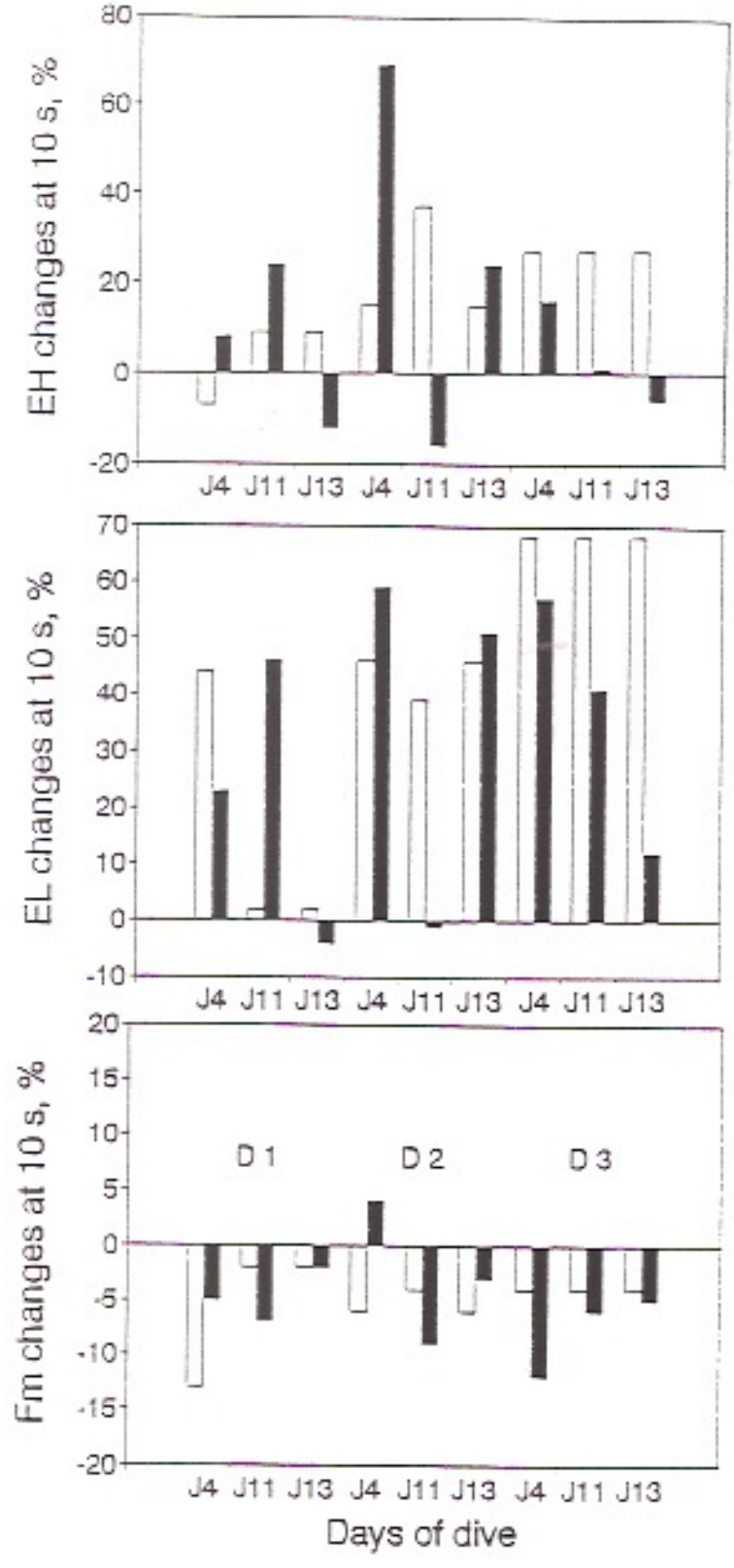
*** Diaphragme:**

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 aigue (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-Tessonnier et coll., 1993). Il semble donc apparaître un état de fatigue

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

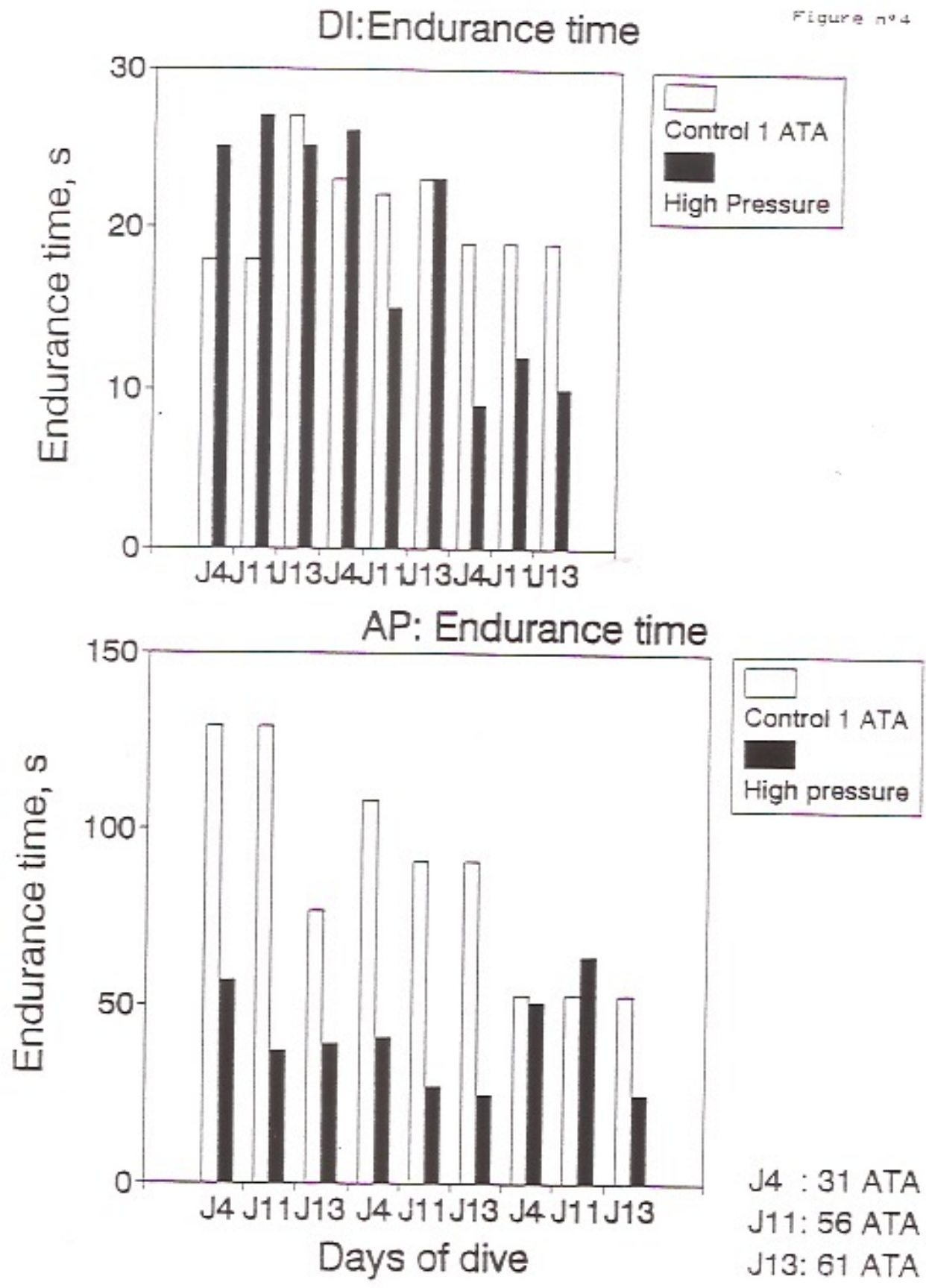
Figure n°5

DIAPHRAGME



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Figure n°4



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-O_2 (J 1), puis en mélange He-H_2-O_2 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-O_2) 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

C - Résultats et commentaires:

1 - Etude ergonomique des deux groupes musculaires:

*** Valeurs de Pi_{max} et de F_{max} :**

La figure 3 rassemble les valeurs individuelles de Pi_{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 Pi_{max} dès 31 ATA qui s'accentue tout au long de l'expérience hyperbare et persiste à la fin de la décompression. Pi_{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.

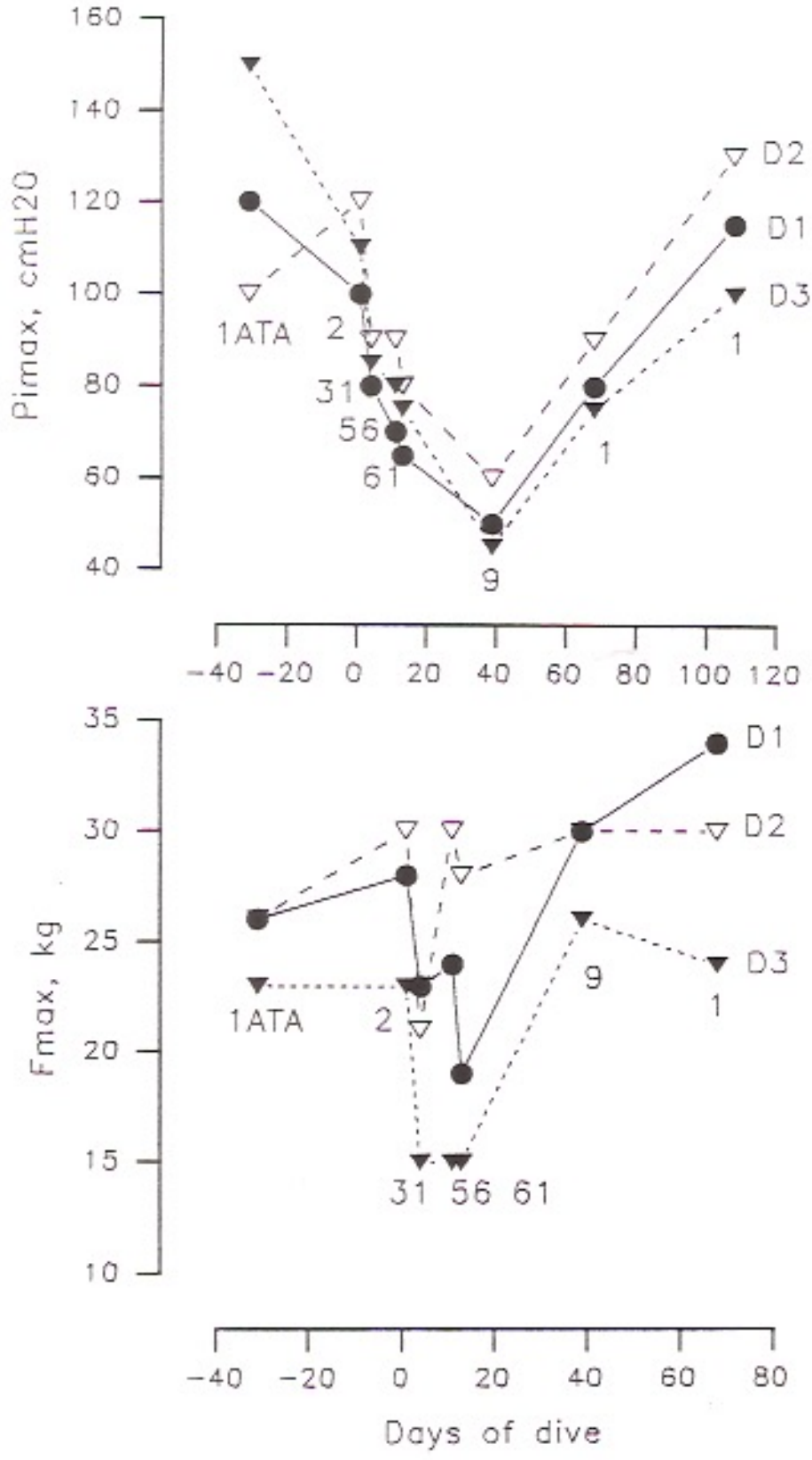
Le séjour hyperbare est donc responsable d'une diminution précoce et durable des performances maximales de la musculature inspiratoire. De façon surprenante ces anomalies persistent un mois après le retour à la pression atmosphérique. Elles peuvent s'interpréter comme des modifications structurales de 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).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Figure n°3



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE VIII

ETUDE ERGONOMIQUE ET ELECTROMYOGRAPHIQUE DE MUSCLES INSPIRATOIRES ET SQUELETTIQUE

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-O_2 (densité: 8,7 g/L) et 3,6 en mélange He-N_2-O_2 (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-O_2 et He-N_2-O_2 , durée du séjour sous pression maximale: 12 jours, 4 plongeurs) et Entex XVI (25 ATA: He-N_2-O_2 , 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 dicrète 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 sensitives 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:

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-O_2 et jamais en mélange He-N_2-O_2, 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'évenement 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 ($\pm$ 250 cmH_2O) monté en parrallèle avec un manomètre Protais (0 à - 250 cmH_2O).

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 concu 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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- énergie calculée dans une bande de basses fréquences (10-80 Hz) (EL)

- énergie calculée dans une bande de hautes fréquences (100-200 Hz) (EH)

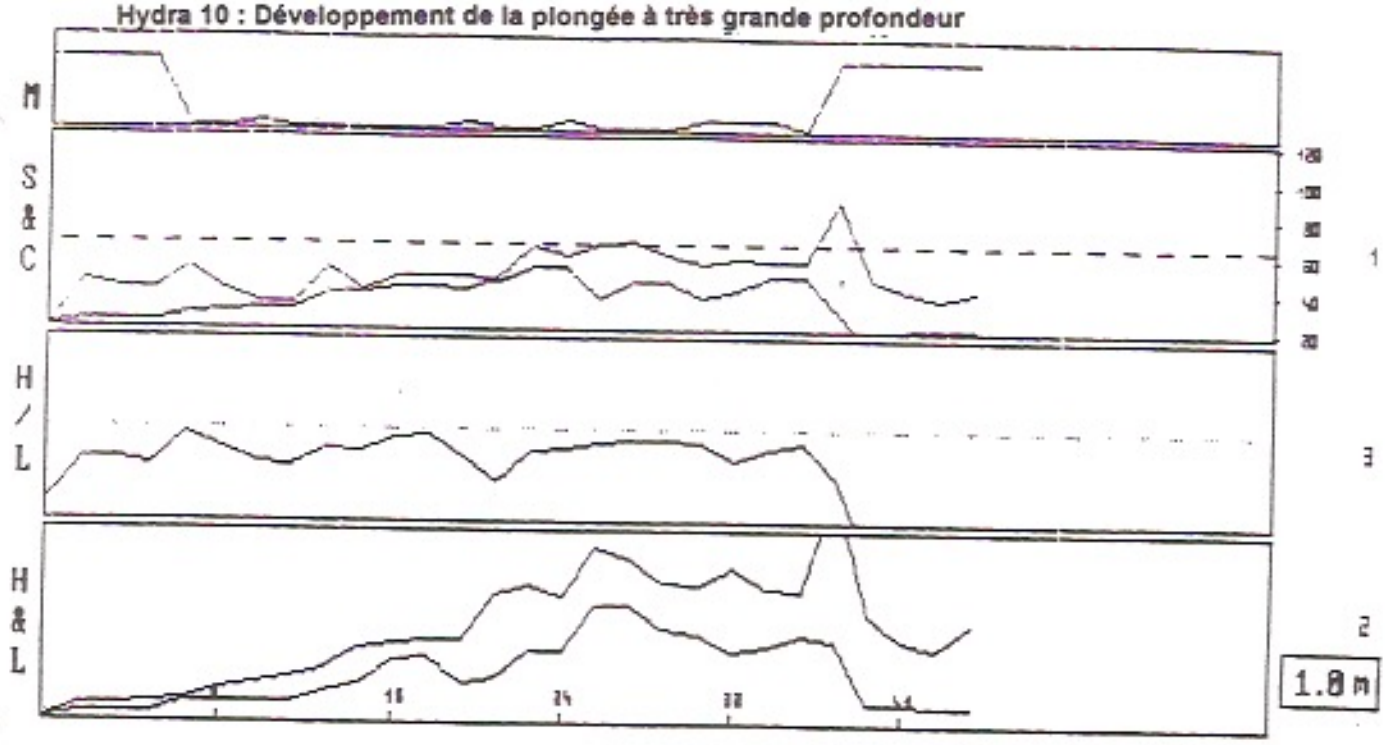
- rapport des énergies EH et EL , soit rapport H/L.

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 10ème 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Hydra 10 : Développement de la plongée à très grande profondeur



MAVOISE: ZET

REFERENCES pour le calcul des %

LOW	HIGH	MECA	H/L	Surf	Freq
48.7	69.7	9.7	0.5	5.0	15.0

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	40.0	-5.0
3	43.0	42.0	-7.0	-1.0	40.0	-4.0
4	26.0	54.0	-7.0	21.0	40.0	4.0
6	42.0	54.0	-7.0	8.0	40.0	0.0
-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	-6.0	40.0	-1.0
14	55.0	64.0	3.0	-1.0	60.0	0.0
16	65.0	138.0	3.0	44.0	80.0	6.0
-17	97.0	18.0	3.0	-48.0	80.0	-12.0

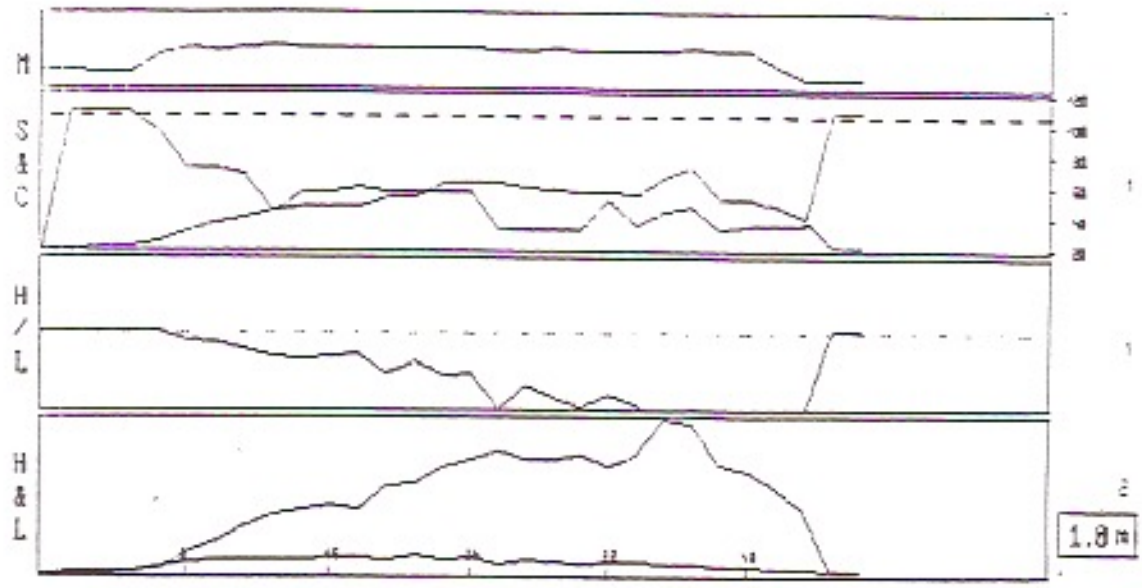
	PENTE	I.confi	R2
LOW.....	0.27	0.38	0.51
HIGH.....	0.18	0.17	0.09
MECA.....	0.38	0.32	0.65
H/L.....	-0.34	0.12	0.31
Surface..	0.25	0.07	0.30
Centroide.	-0.00	0.43	0.00

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Figure n°2



PLONGEE 227

REFERENCES pour le calcul des %

LOW	HIGH	MEDIUM	H/L	Surf	Time
76.7	88.3	26.3	0.7	0.3	47.2

VALEURS en % des TOLERES

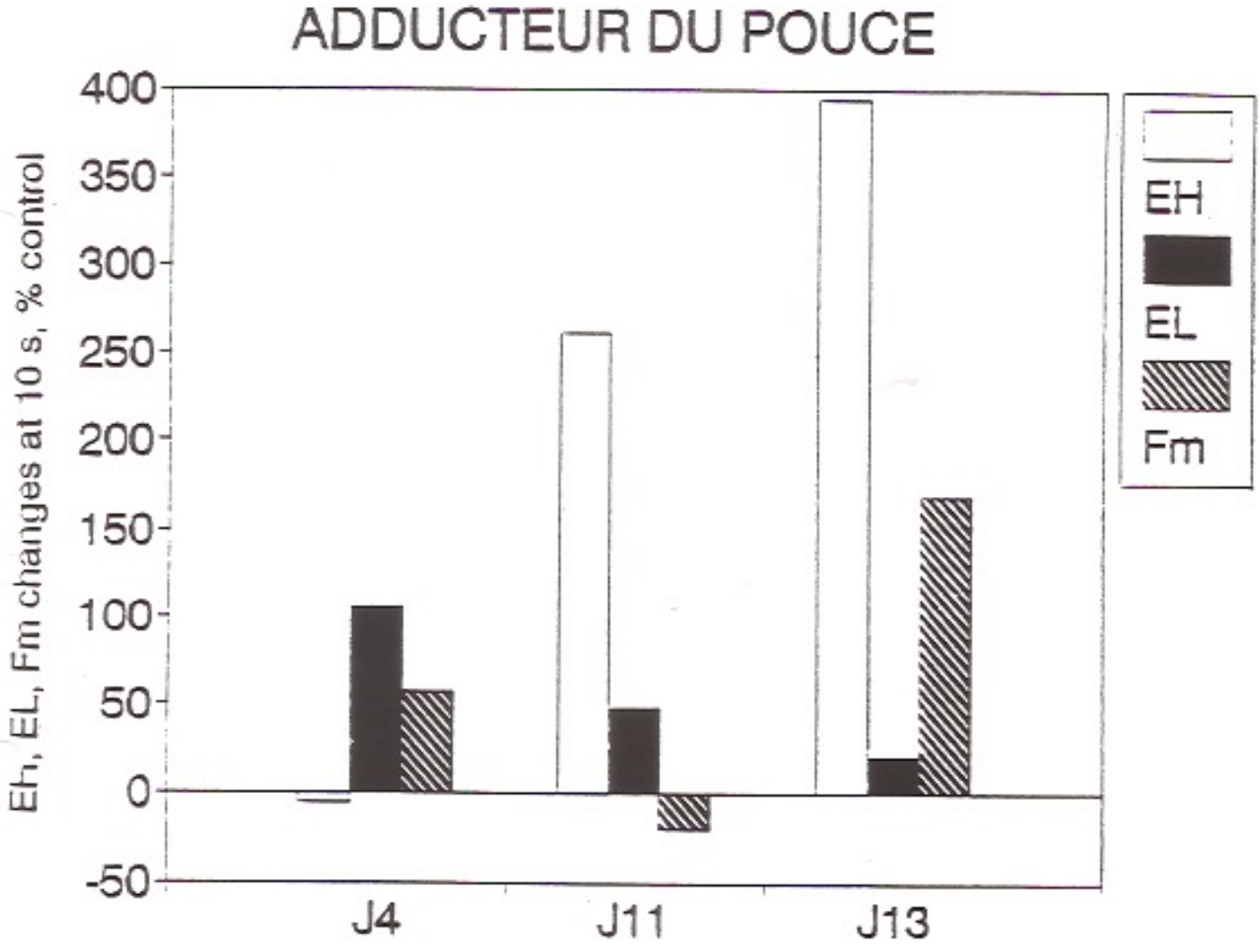
Temps	LOW	HIGH	MEDIUM	H/L	Surf	Tres.
0	0.3	3.3	0.3	0.3	0.3	3.1
1	17.3	-4.3	-1.3	-20.6	0.3	-4.3
2	-26.3	-42.3	-1.3	-24.3	-36.3	-2.3
3	-2.3	-13.3	3.3	-11.3	0.3	-4.3
4	-31.3	-39.3	6.3	-11.3	-25.3	-2.3
5	-44.3	-48.3	6.3	7.3	-40.3	3.3
6	-26.3	-40.3	3.3	-28.3	-35.3	-5.3
7	-33.3	-48.3	3.3	-18.3	-25.3	-4.3
8	-32.3	-42.3	3.3	-15.3	-25.3	-4.3
9	-37.3	-45.3	3.3	5.3	-38.3	3.3
10	-37.3	-41.3	-1.3	-22.3	-38.3	-4.3
11	-53.3	-48.3	3.3	-11.3	-48.3	-2.3
12	-31.3	-51.3	3.3	-29.3	-38.3	-7.3
13	-48.3	-47.3	3.3	7.3	-38.3	3.3
14	-38.3	-46.3	3.3	-13.3	-48.3	-4.3
15	-42.3	-13.3	3.3	-28.3	-35.3	-4.3
16	-39.3	-45.3	3.3	5.3	-38.3	3.3
17	-36.3	-48.3	-1.3	-4.3	-35.3	0.3
18	-42.3	-48.3	1.3	-11.3	-48.3	-2.3
19	-42.3	-42.3	6.3	1.3	-35.3	5.3
20	-34.3	-32.3	-1.3	16.3	-16.3	14.3
21	-18.3	-33.3	-1.3	-9.3	-35.3	0.3
22	-47.3	-41.3	-1.3	-11.3	-16.3	-2.3
23	-32.3	-48.3	3.3	-29.3	-48.3	-8.3
24	-46.3	-48.3	3.3	-29.3	-48.3	-7.3
25	-47.3	-47.3	-58.3	-34.3	-48.3	-7.3

	PENTE	T.JOUR	T2
LOW.....	-0.26	3.35	3.49
HIGH.....	-0.22	3.03	3.55
MEDIUM.....	-0.27	4.34	3.13
H/L.....	0.38	0.06	0.48
Surface.....	-0.28	0.05	0.37
Tensions.....	0.41	0.02	0.31

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'entrainement.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Références bibliographiques:

- Badier M., C. Guillot, F. Lagier-Tessonnier, 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- 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. Neuromusculzar function at hyperbaric pressures: pressure-anesthetic interactions. Amer. J. Physiol., 1976, 230: 1244-1249.

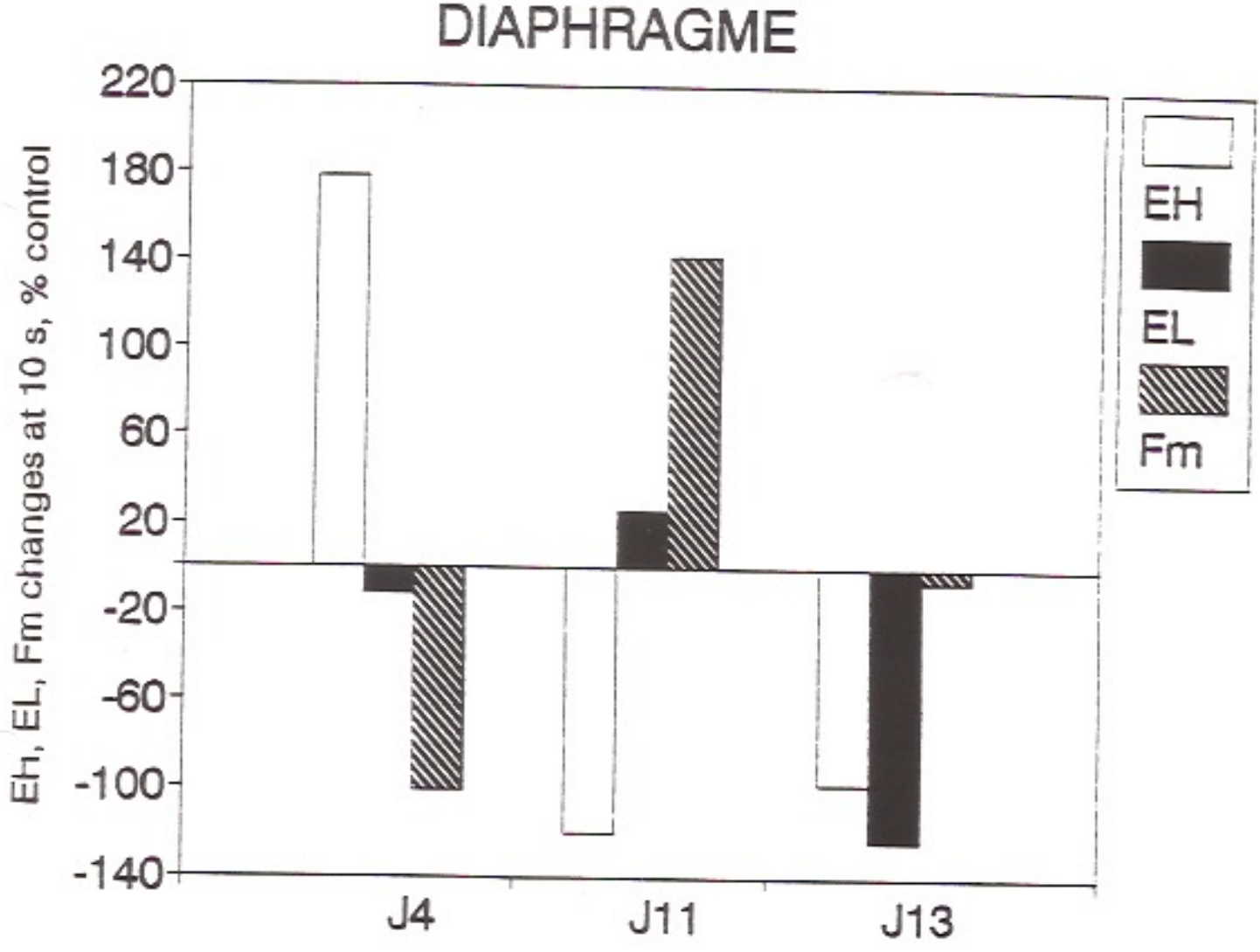
- Lagier-Tessonnier F, Balzamo E, Jammes Y: Comparative effects of ischemia and acute hypoxemia on muscle afferents from tibialis anterior in cats. Muscle Nerve, 1993; 16: 135-142.

- 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.

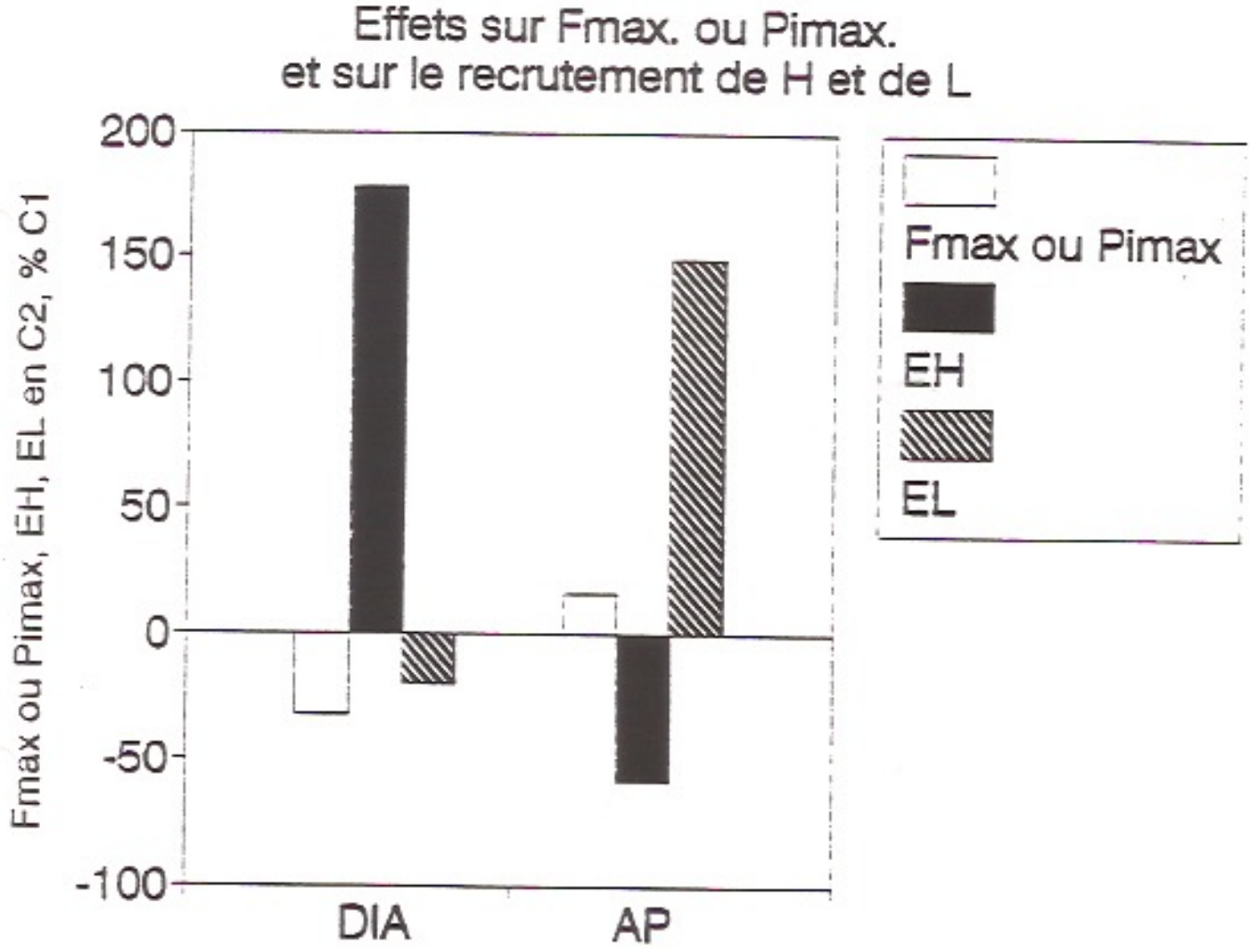
- Roussos Ch. and J. Moxham. Respiratory muscle fatigue. In: *The Thorax part II* , Roussos Ch. And P.T. Macklem eds., Marcel Dekker, New York, 1985, pp. 829-870.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Hydra 10 : Développement de la plongée à très grande profondeur



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

inspiratoires au cours du séjour hyperbare. En témoignent les modifications EMG et aussi la réduction des valeurs de Pi_{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 Pi_{max} s'accentue 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 Pi_{max} un mois après la fin d'Hydra 10 peut être attribuée à l'atténuation du phénomène de *muscle wisdom* constaté sur l'EMG.

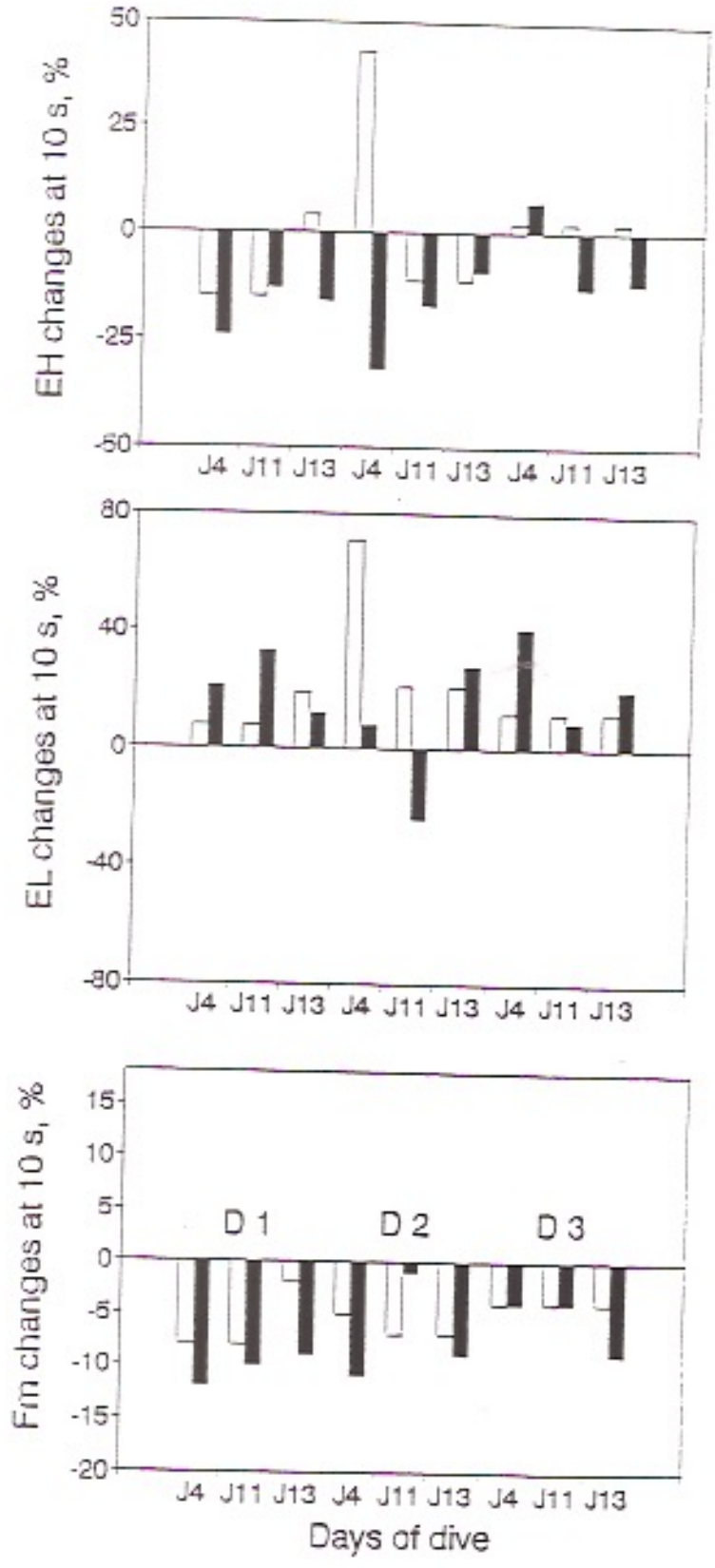
***Adducteur du pouce:**

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ADDUCTEUR DU POUCE

Figure n°



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

En raison des diminutions des valeurs de pression buccale ou de force maintenue au cours des tests réalisés en condition hyperbare, des valeurs de Pi 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:

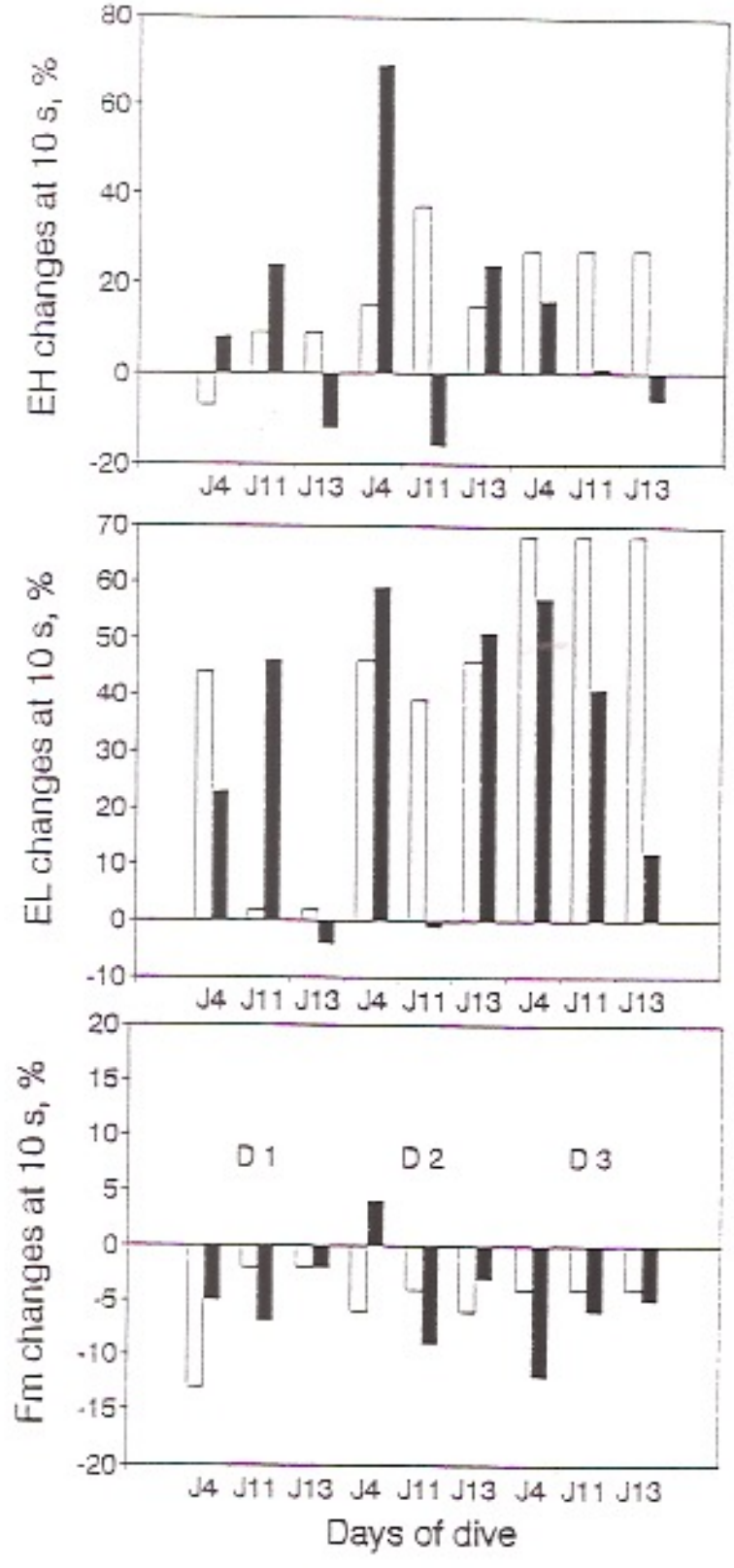
*** Diaphragme:**

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 aigue (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-Tessonnier et coll., 1993). Il semble donc apparaître un état de fatigue

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

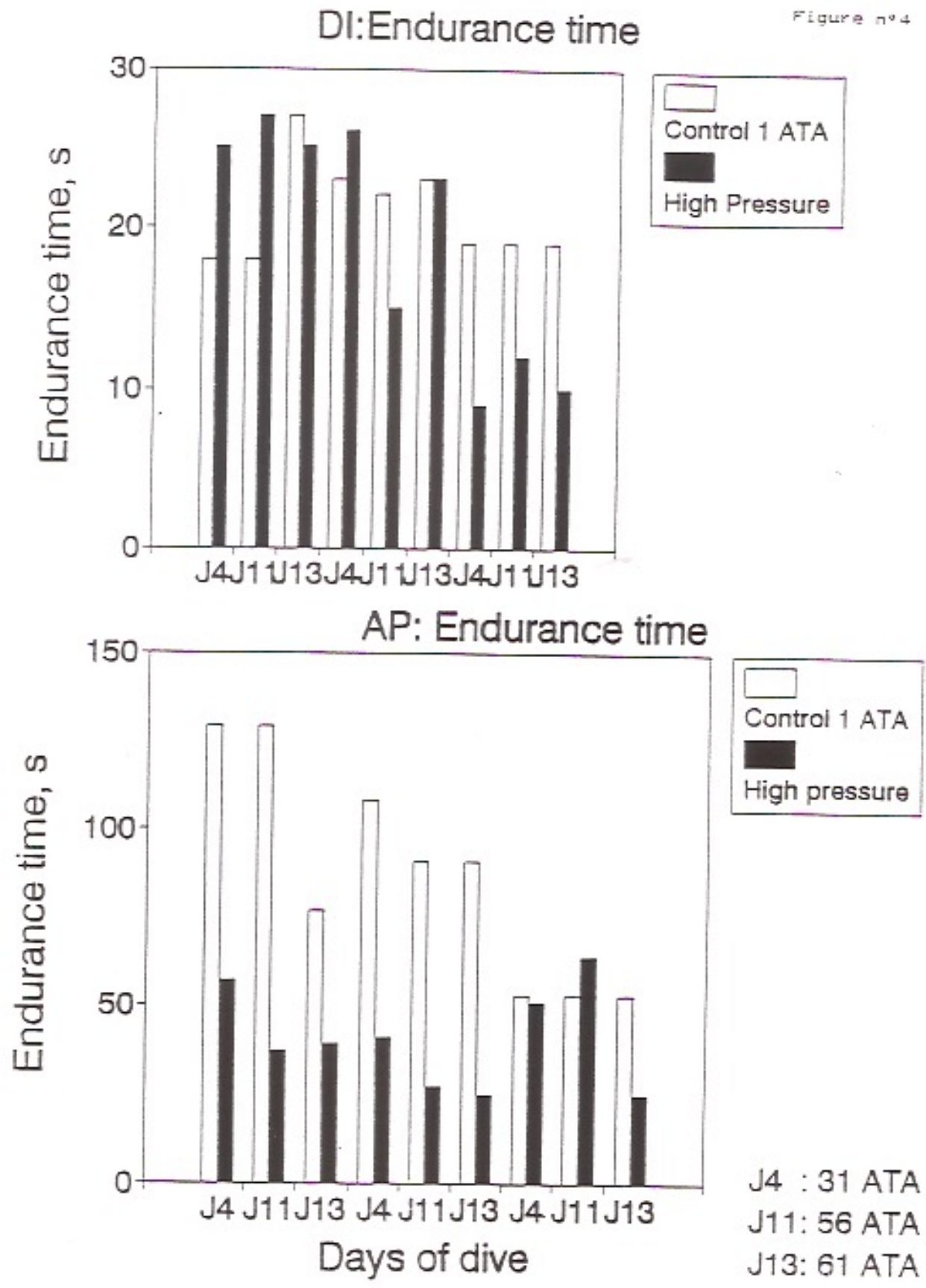
Figure n°5

DIAPHRAGME



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Figure n°4



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-O_2 (J 1), puis en mélange He-H_2-O_2 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-O_2) 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

C - Résultats et commentaires:

1 - Etude ergonomique des deux groupes musculaires:

*** Valeurs de Pi_{max} et de F_{max} :**

La figure 3 rassemble les valeurs individuelles de Pi_{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 Pi_{max} dès 31 ATA qui s'accentue tout au long de l'expérience hyperbare et persiste à la fin de la décompression. Pi_{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.

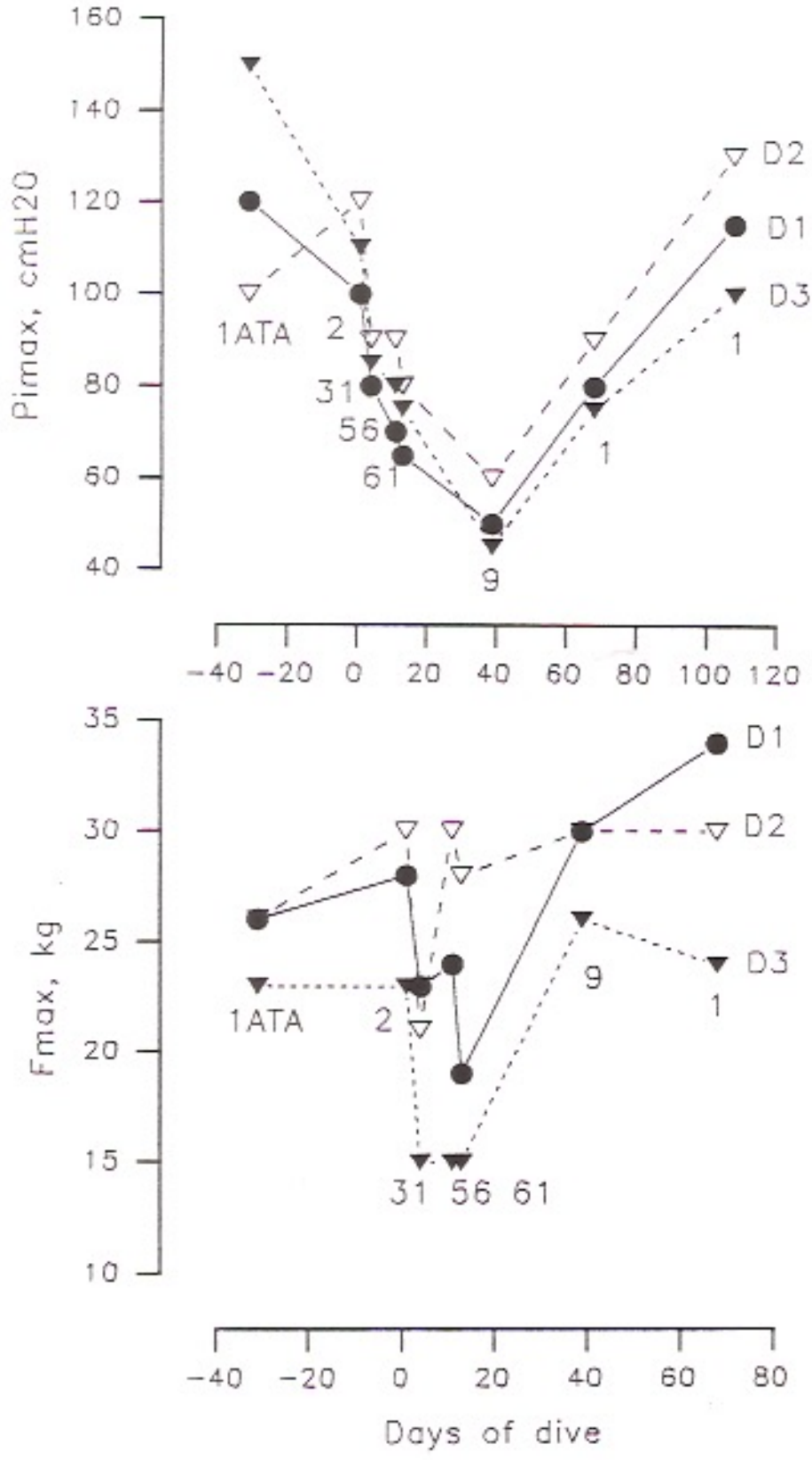
Le séjour hyperbare est donc responsable d'une diminution précoce et durable des performances maximales de la musculature inspiratoire. De façon surprenante ces anomalies persistent un mois après le retour à la pression atmosphérique. Elles peuvent s'interpréter comme des modifications structurales de 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).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Figure n°3



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE IX

SURVEILLANCE CARDIOLOGIQUE DES PLONGEURS

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 :

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 et 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).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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?

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 correlée 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ENREGISTREMENTS HOLTER DES 24 HEURES EFFECTUES PENDANT LA PLONGEE

- Tableau 2 -

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

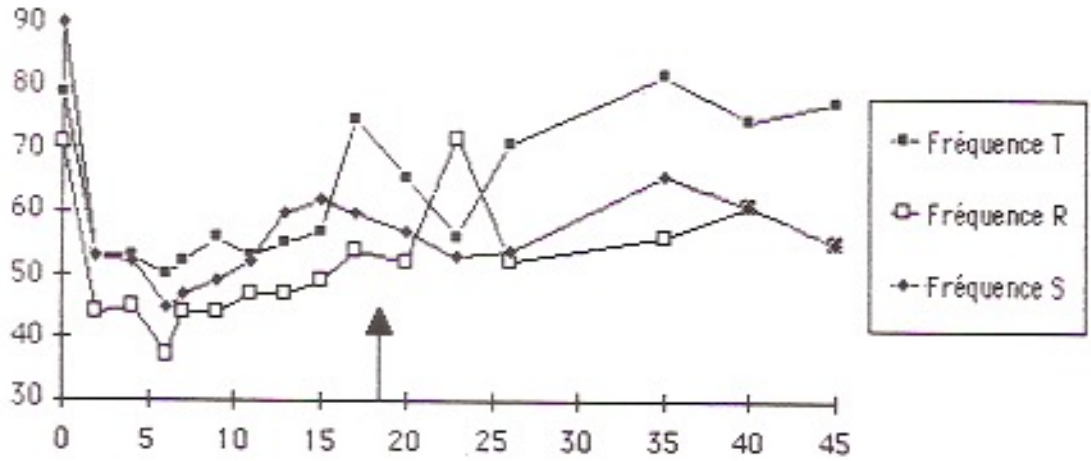


FIG 1: *Valeurs de la fréquence cardiaque (en systoles/min), mesurée chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.*

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

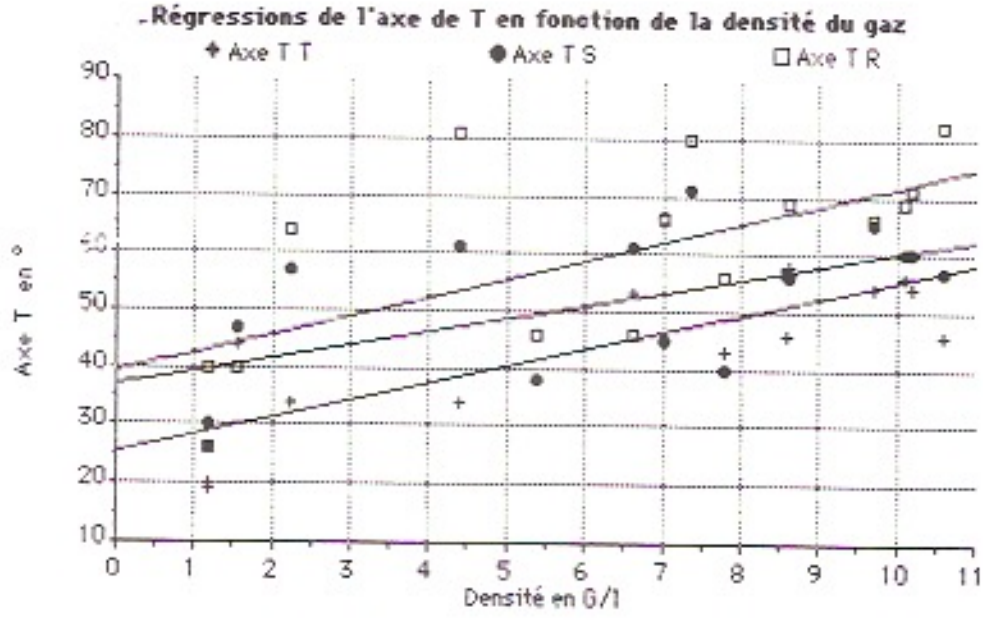


FIG 2: *Valeurs de l'angle de l'axe de T (en Degré), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).*

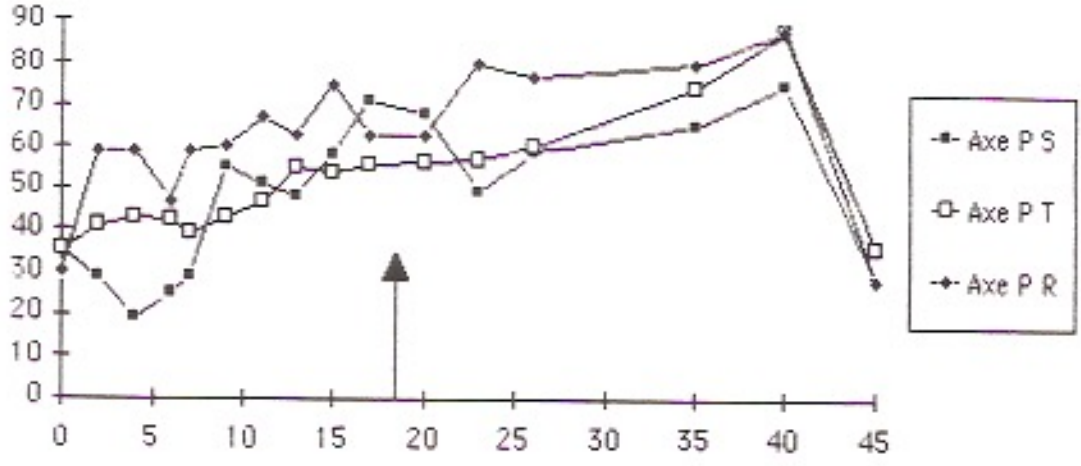


FIG 3: *Valeurs de l'angle de l'axe de P (en Degré), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.*

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

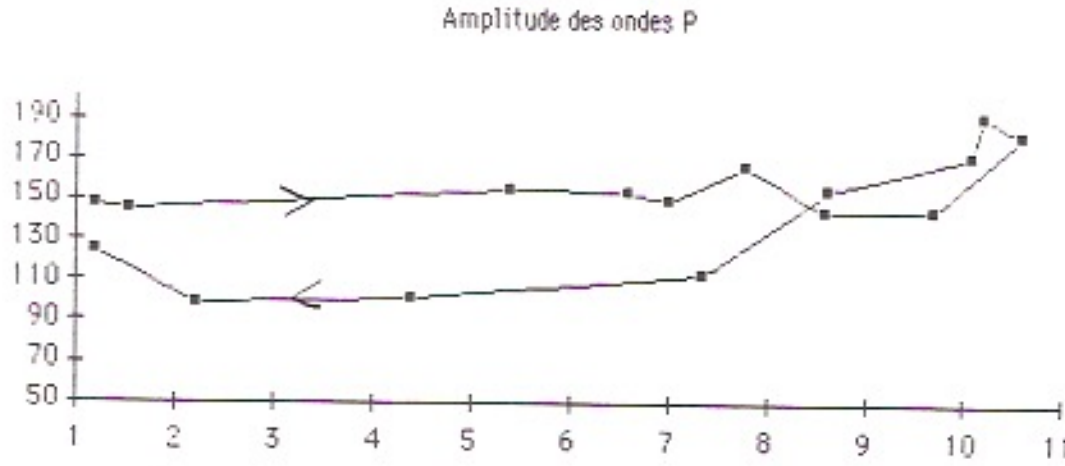


FIG 4: *Valeurs de la moyenne des amplitudes des ondes P (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).*

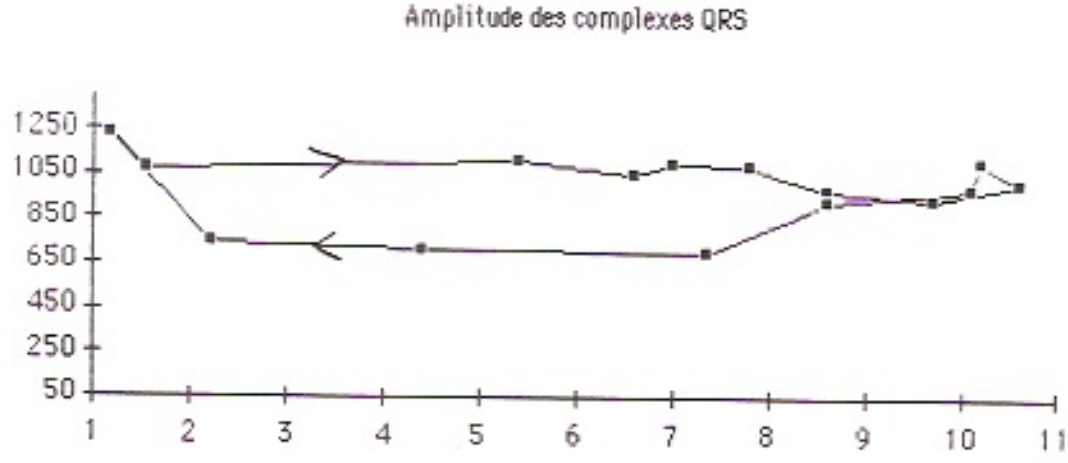


FIG 5: *Valeurs de la moyenne des amplitudes des complexes QRS (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).*

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

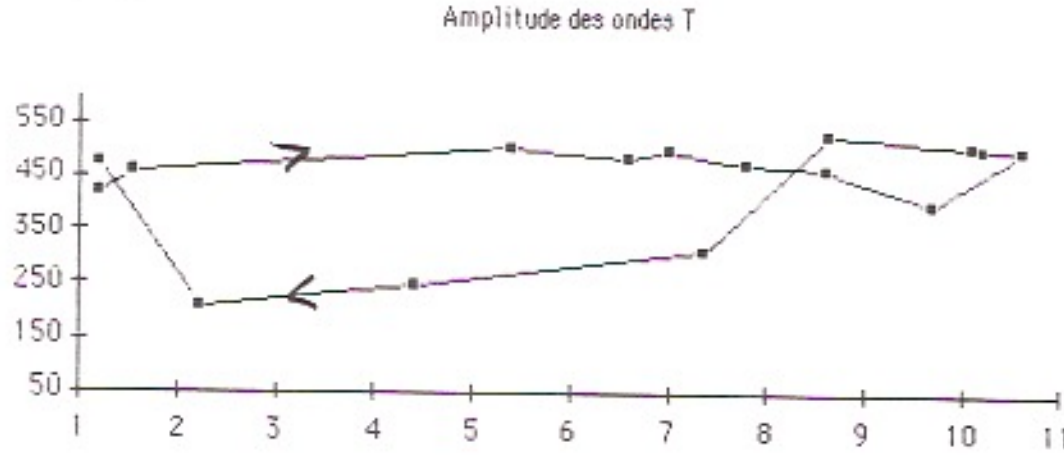


FIG 6: *Valeurs de la moyenne des amplitudes des ondes T (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).*

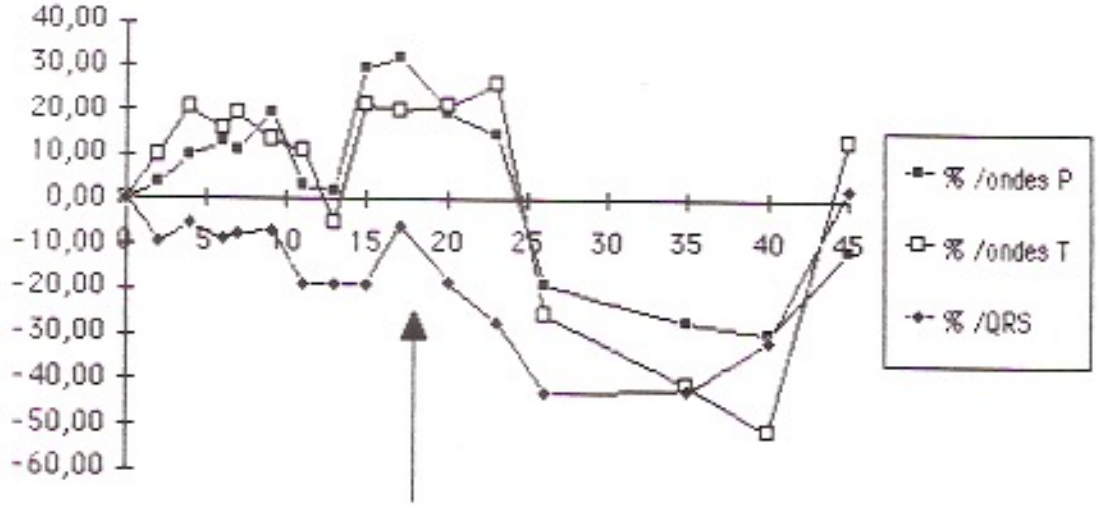


FIG 7: *Moyennes des pourcentages de variation des différents complexes, mesurées chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.*

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE X

ETUDE DE L'ELECTROCARDIOGRAMME

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Le but de notre travail à 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'antédédents 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 étés obtenus pour chacun des trois plongeurs à toutes ces profondeurs, sauf à 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 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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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:

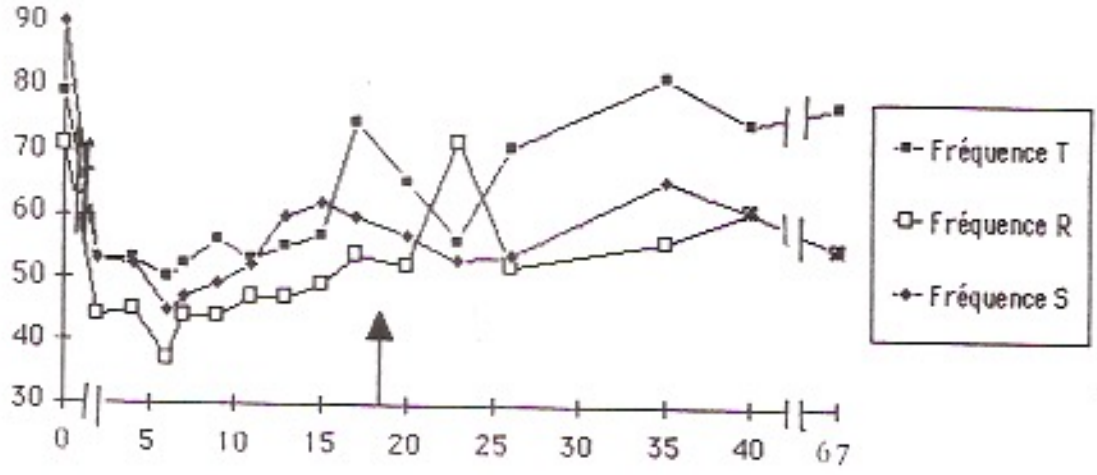


FIG 1: *Valeurs de la fréquence cardiaque (en systoles/min), mesurée chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.*

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

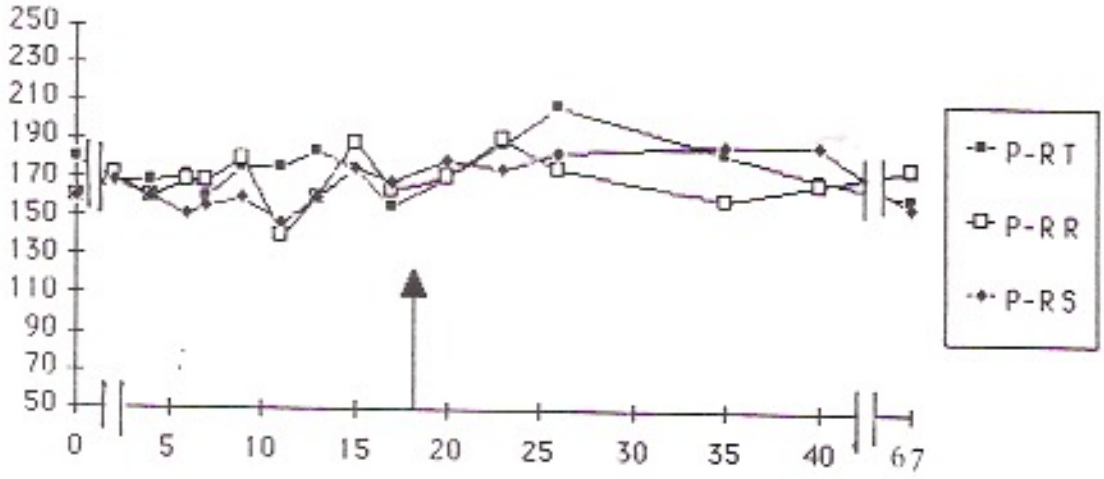


FIG 2: *Valeurs de l'espace P-R (en ms), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.*

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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).

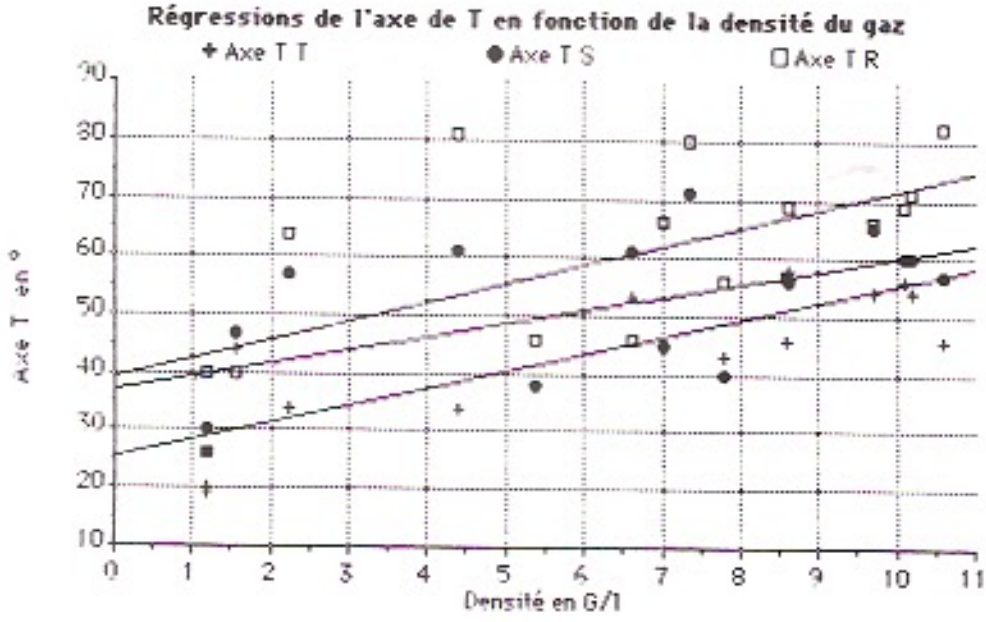


FIG 3: *Valeurs de l'angle de l'axe de T (en Degré), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).*

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 ($p = 0.0001$).

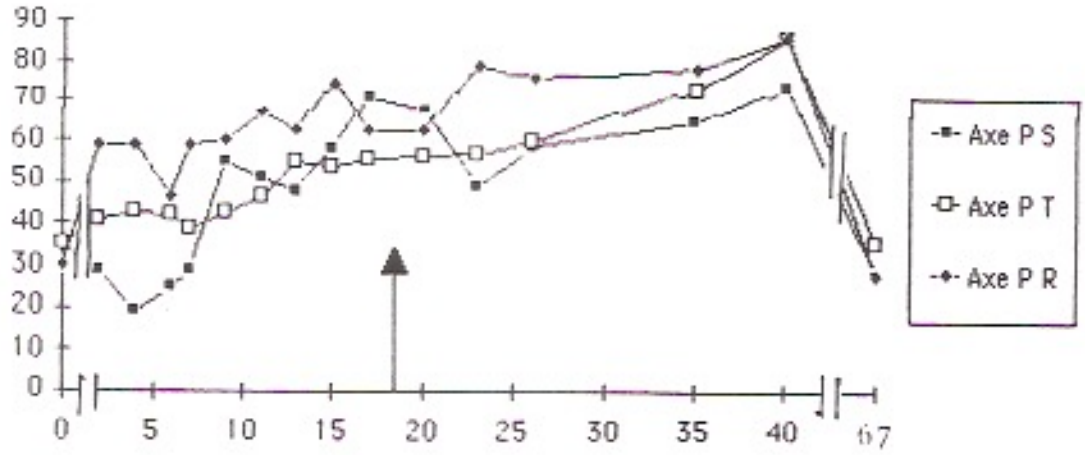


FIG 4: *Valeurs de l'angle de l'axe de P (en Degré), mesuré chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.*

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 dérivations de référence les plus proches.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

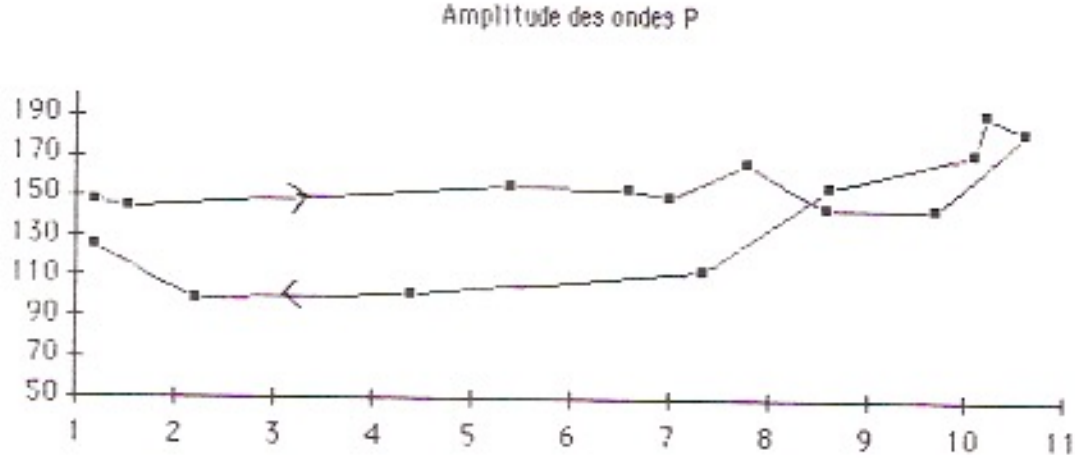


FIG 5: *Valeurs de la moyenne des amplitudes des ondes P (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).*

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 modidiée 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

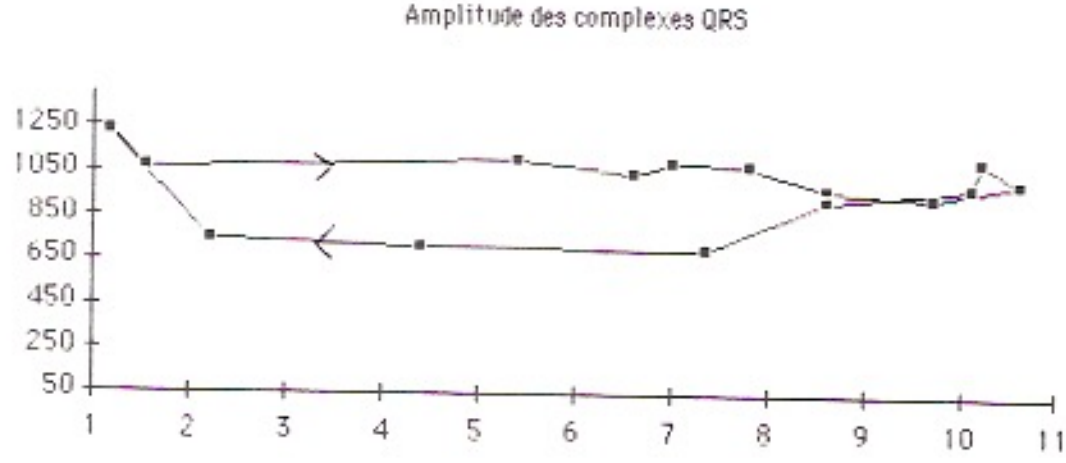


FIG 6: *Valeurs de la moyenne des amplitudes des complexes QRS (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).*

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

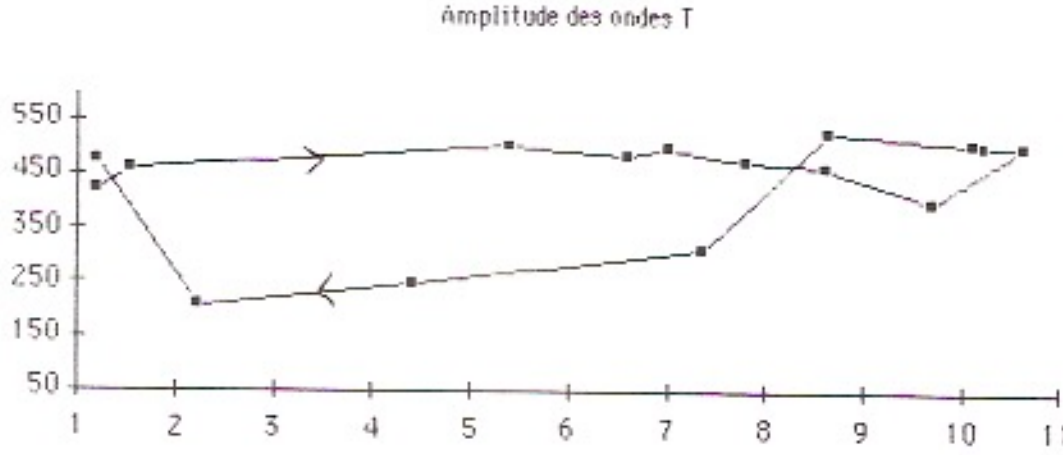


FIG 7: *Valeurs de la moyenne des amplitudes des ondes T (en microvolts) mesurées chez les trois plongeurs en fonction de la densité du mélange respiratoire utilisé (en g/l).*

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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...

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-Calcémie 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 <u>surcharge auriculaire droite</u>.

* 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

engendrer une augmentation minime de pression télédiastolique 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

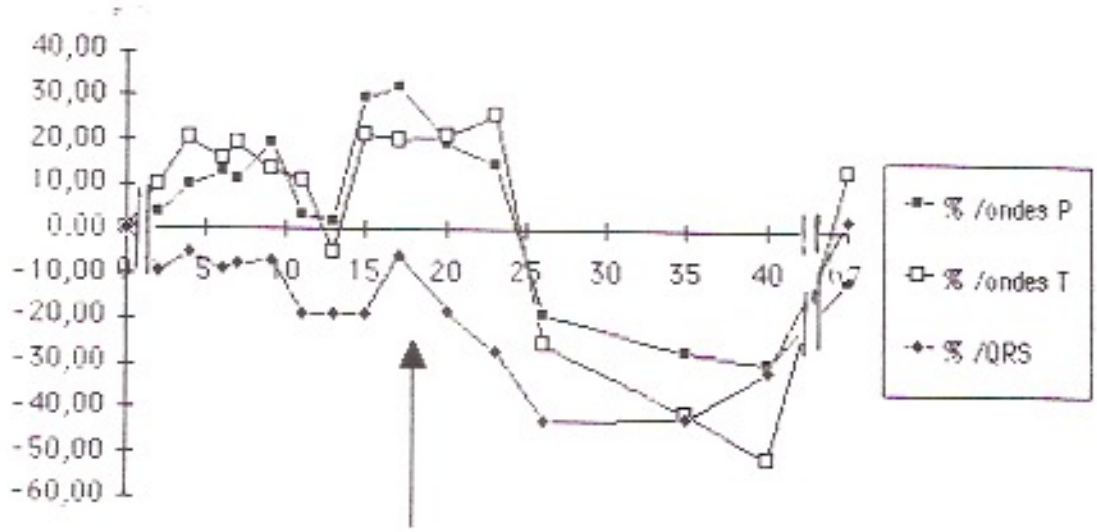


FIG 8: *Moyennes des pourcentages de variation des différents complexes, mesurées chez les trois plongeurs, en fonction du temps en jours. La flèche correspond à la profondeur maximale atteinte.*

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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?

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 à 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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., SHIPAKI K., 1987. Seadragon VI: a 7-day dry saturation dive at 31 ATA III. Alaterations 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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., JAMMES 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., ROBOTHAM 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 depht 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 N2-02 mixtures. J. Appl. Physiol., 42: 614-623.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XI

PREPARATION ATHLETIQUE DES PLONGEURS

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

PREPARATION ATHLETIQUE DES PLONGEURS

H. JULLIEN - J. MEDELLI - B. BOUFFERACHE
C.H.R.U AMIENS

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

1 - OBJECTIFS

Préparer les plongeurs "au mieux" à l'expérience HYDRA 10, donc pas d'entraînement intensif.

Amélioration de la condition athlétique pour habituer et renforcer l'organisme dans ses capacités à supporter des contraintes de différents types.

Entraînement individualisé en fonction de l'état physique actuel de chaque plongeur.

Contrôle individualisé dont les résultats sont diffusés à chaque plongeur.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

2 - MOYENS

Une pratique sportive "quasi-régulière" et variée.

Travail foncier (footing, raid VTT, natation).

Sports collectifs : BB., FB., VB., RG.

Athlétisme - Lancer - Saut - Course.

Tennis - Badminton - Squash.

Renforcement musculaire. Etirements, assouplissements. Coordination.

Toutes les pratiques seront évalués d'après des tables codifiées.

Apprentissage de certaines pratiques (javelot - disque).

Des manipulations nouvelles dans des conditions variées.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

3 - BUT

Créer une dynamique d'équipe à travers des situations variées et surtout développer la faculté d'adaptabilité constante. Ne jamais être pris au dépourvu.

Aide, entraide, soutien dans l'effort et sa difficulté.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

LA PROGRAMMATION

	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
SEMAINE du 5 au 10 Oct.	INITIATION AU TENNIS + STRECHING	INITIATION AU TENNIS + STRECHING	TRAVAIL FONCIER A LUMINY + RENFORCEMENT MUSCULAIRE + COORDINATION AU TENNIS	NATATION + STRECHING	SPORTS COLLECTIFS + AGILITE + COORDINATION
SEMAINE du 12 au 17 Oct.	TRAVAIL FONCIER SUR PARCOURS VARIE + STRECHING	RENFORCEMENT MUSCULAIRE + COORDINATION MOTRICE + DISQUE/VITESSE	GYMNASTIQUE D'ENTRETIEN + INITIATION AU TENNIS	NATATION + STRECHING	SPORTS COLLECTIFS + AGILITE + BADMINTON
SEMAINE du 19 au 24 Oct.	TRAVAIL FONCIER AVEC CHANGEMENT DE RYTHME + STRECHING	RENFORCEMENT MUSCULAIRE + AGILITE + JAVELOTHAIES	GYMNASTIQUE + PARCOURS D'ATHLETISME + BADMINTON	ETIREMENTS/ ASSOUPLISSEMENT+ NATATION + FOOTING	SPORTS COLLECTIFS + COORDINATION MOTRICE + STRECHING
SEMAINE du 26 au 31 Oct.	FOOTING LONG + STRECHING	BADMINTON + SQUASH + TENNIS	ATHLETISME + VOLLEY-BALL + STRECHING	TENNIS-BALLON + NATATION + FOOTING	RAID MARSEILLE- CASSIS EN FOOTING et CASSIS MARSEILLE en V.T.T.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

4 - PERIODE PRE-EXPERIMENTALE

Evaluation du niveau d'aptitude de départ.

Test d'effort sur bicyclette ergométrique (05.10.92)

P1 : Charge maximale : 330 W
FC : 187 (valeur max. théorique) → effort maximal.
VO_2 max. réel : 46,7 ml/min./kg → 106 %.
VO_2 max. théorique : 44 ml/min./kg.

P2 : Charge maximale : 210 W
FC : 179 (valeur max. théorique → effort maximal.
VO_2 max. réel : 33,4 ml/min./kg → 93 %
VO_2 max. théorique : 36 ml/Min./kg.

P3 : Charge maximale : 240 W
FC : 140 (78 % de la valeur max. théorique) → effort infra maximal.
VO_2 max. réel : 40 ml/min./kg → 100 %.
VO_2 max. théorique : 40 ml/min./kg.

P4 : Charge maximale : 210 W
FC : 160 (87 % de la valeur max. théorique) → effort infra maximal.
VO_2 max. réel : 32,7 ml//min./kg → 91 %.
VO_2 max. théorique : 35,9 ml/min./kg.

5 - LA PREPARATION PROPREMENT DITE

Bien qu'une programmation fut établie, nous avons dû modifier nos heures, nos fréquences, nos activités en fonction des changements imposés.

La souplesse à laquelle nous avons travaillé dans la préparation athlétique est essentiellement due à trois facteurs :

- Qualités d'adaptation des plongeurs à tout changement intervenant hors prévision.
- Possibilités d'accueil des différentes structures sportives.
- Mobilité aisée de l'équipe qui facilitait ces adaptations constantes.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Au regard des constats effectués sur l'état physiologique des plongeurs, nous avons réajusté notre programmation tant dans l'intensité que dans la nature des activités proposées.

La passation de tests de contrôle (épreuve triangulaire, test de Ruffier-Dickson) a situé notre niveau d'intervention. Nous avons en permanence suivi l'évolution des paramètres d'effort en fonction du travail dans la zone aéro-anérobie. De cette façon, le type d'activité proposé n'était pas le critère limitant d'un niveau d'engagement, seul le relevé de la fréquence cardiaque, à certains moments de l'effort, conditionnait le dosage de l'intensité du travail proposé.

De cette façon, nous avons pu amener les plongeurs à fournir des efforts progressifs, constants leur permettant d'acquérir une base foncière solide.

Cet entraînement individualisé dans un ensemble collectif nous a permis de respecter le rythme de préparation propre à chaque plongeur.

La spécificité de ce type de préparation a résidé dans la volonté de créer une dynamique d'équipe en dehors du caisson, à travers toutes les activités et sollicitations que les plongeurs ont pu avoir. La permanence de présence du début de la journée jusqu'à sa fin, la prise en commun systématique des repas, le partage des tâches, la répartition des obligations entre les quatre membres de l'équipe, ainsi que les suggestions proposées par l'un ou par l'autre ont, de façon constante, animé le désir de réussir le challenge proposé.

Ce document est la propriété de Comex [illegible] et s'engage à ne pas le reproduire [illegible]

CENTRE HOSPITALIER REGIONAL ET UNIVERSITAIRE D'AMIENS
SERVICE D'EXPLORATIONS FONCTIONNELLES CARDIO-RESPIRATOIRES
Professeur Pierre HAIICHAUX

BIOLOGIE DE L'EFFORT ET MEDECINE DU SPORT

Dr J. MEKELI

Date de l'épreuve: 16/09/1992
NOM: P 1
Prénom:
Date de naissance: 17/02/1953
Poids: 75 Kg.
Taille: 176 cm.
Sport: PLONGEE

I. RESULTATS:

VO2 au repos théorique: 0.26 l/min.

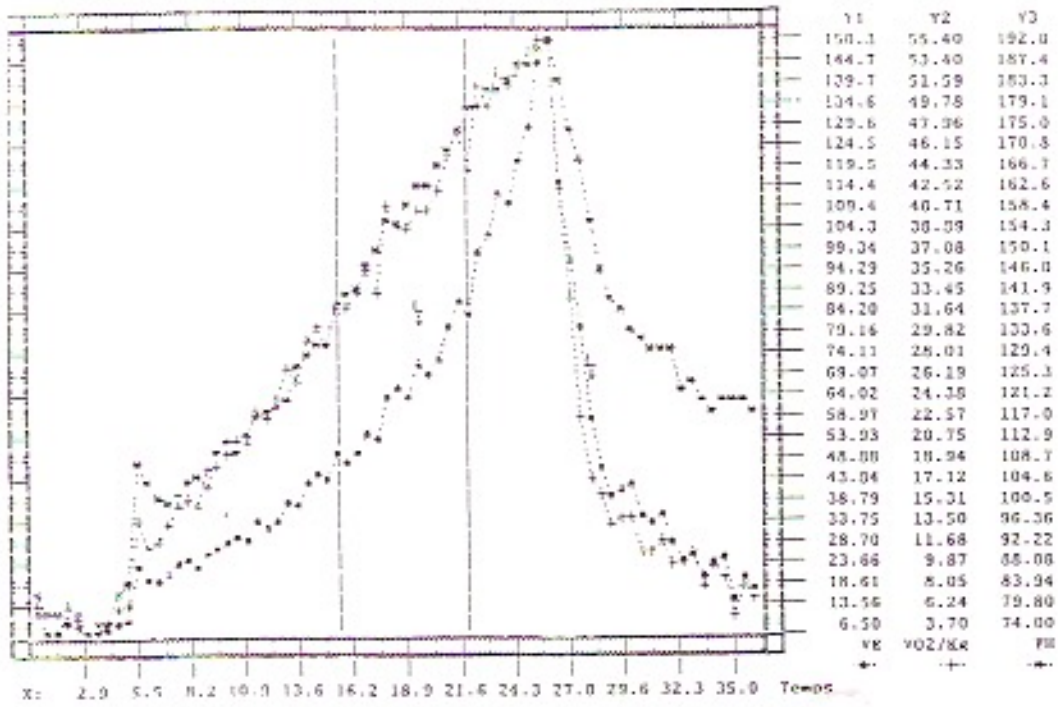
	Pwc W	Ventilation l/min	VO2/P ml/min/Kg	Fréq. card. bat/min	Qt Reso.	Lactate mmol/
AU REPOS:	0	8.2	5.00	78	0.76	
SEUIL AEROBIE	180	45.2	31.49	137	0.91	
% maximum	55	30	57	72	63	
SEUIL ANAEROBIE	270	86.6	47.07	177	1.06	7.60
% maximum	82	58	85	92	73	39
VALEURS MAX:	330	150.3	55.40	192	1.45	19.30

Durée de maintien du palier final : 01:00

II. COMMENTAIRES:

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

III - GRAPHIQUE GENERAL :



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CENTRE HOSPITALIER REGIONAL ET UNIVERSITAIRE D'AMIENS
SERVICE D'EXPLORATIONS FONCTIONNELLES CARDIO-RESPIRATOIRES
Professeur Pierre HARICHAUX

BILOGIE DE L'EFFORT ET MEDECINE DU SPORT

Dr J. MERELI

Date de l'épreuve: 16/09/1992
NOM: P 1
Prénom:
Date de naissance: 17/02/1953
Poids: 75 Kg.
Taille: 176 cm.
Sport: PLONGEE

I. RESULTATS:

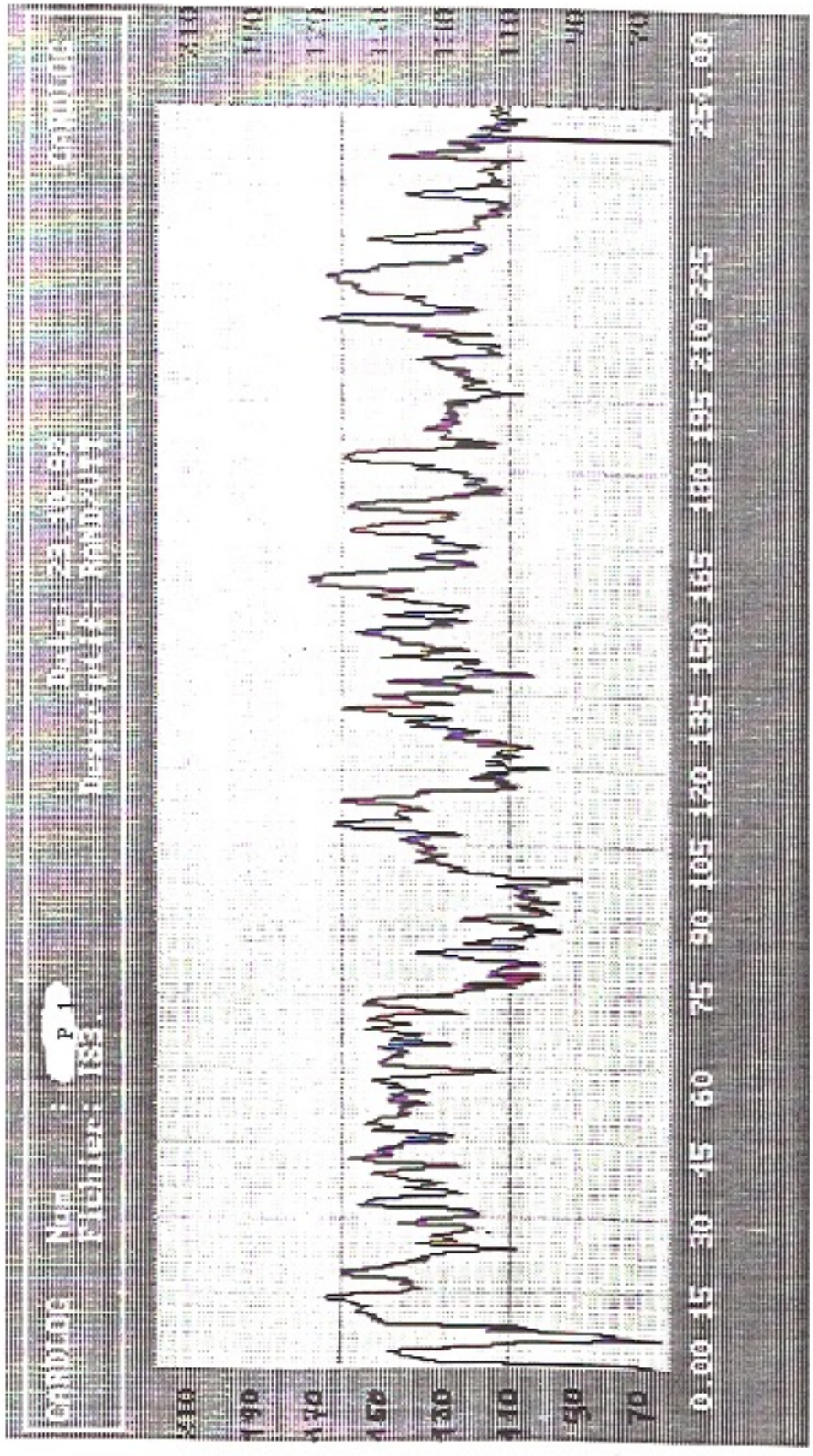
VO2 au repos théorique: 0.26 l/min.

	Pas N	Ventilation l/min	VO2/P ml/min/Kg	Fréq. card. bat/min	Qt Resp.	Lactates mmol/l
AU REPOS:	0	8.2	5.00	78	0.76	
SEUIL AEROBIE	180	45.2	31.49	137	0.91	
% maximum	55	30	57	72	63	
SEUIL ANAEROBIE	270	86.6	47.07	177	1.06	7.60
% maximum	82	58	85	92	73	39
VALEURS MAX:	330	150.3	55.40	192	1.45	19.30

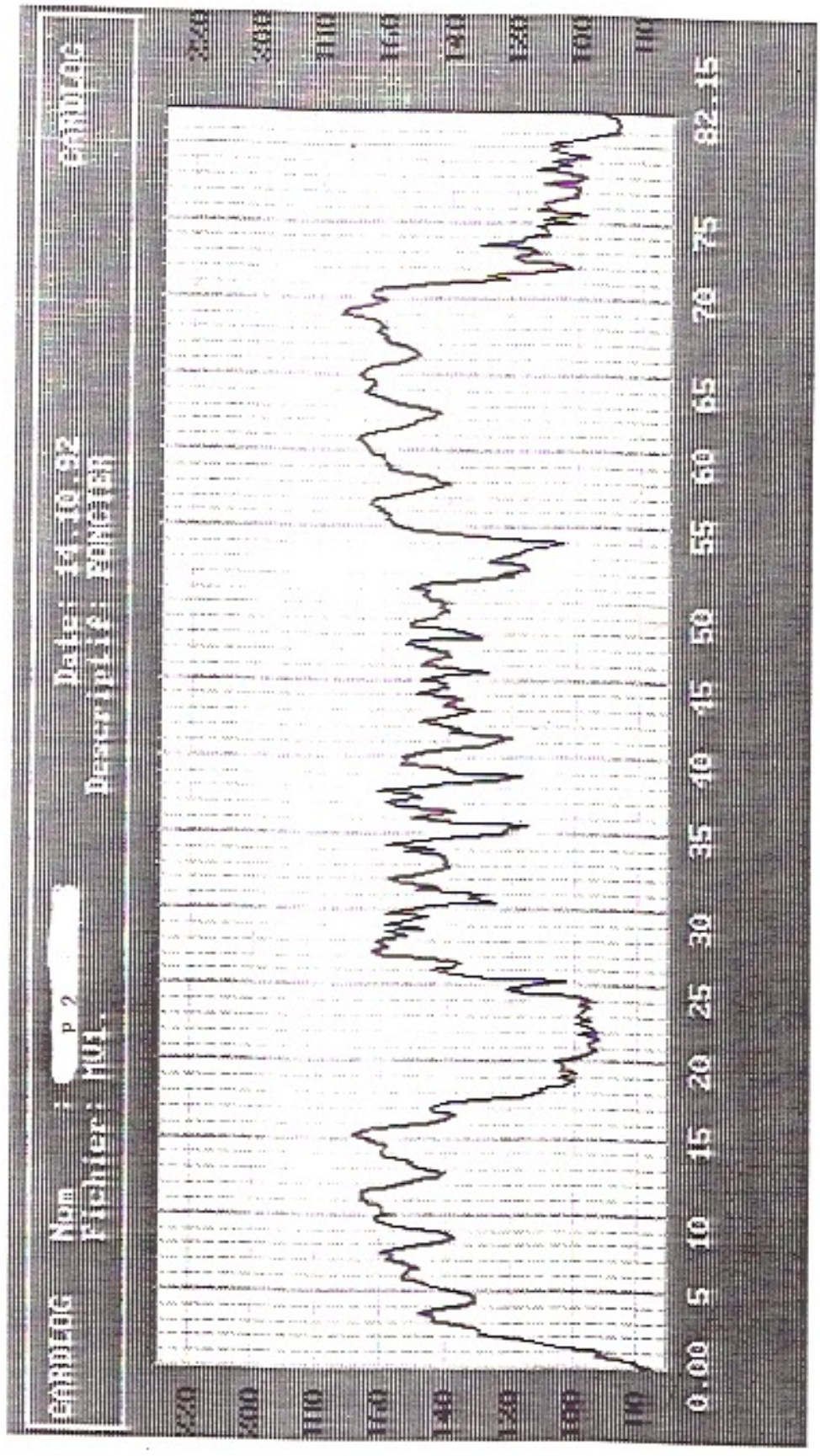
Durée de maintien du palier final : 01:00

II. COMMENTAIRES:

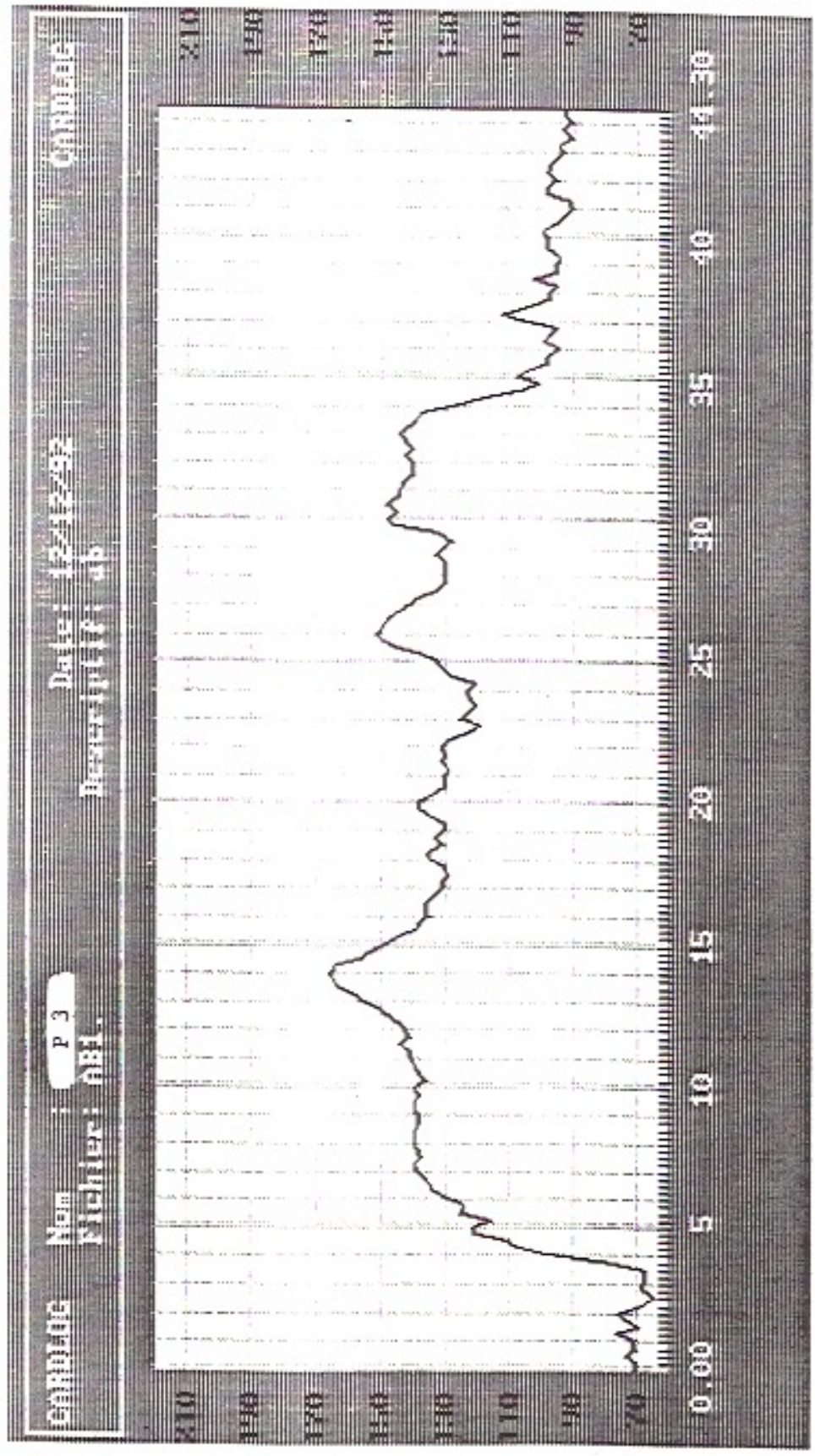
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XII

MONITORAGE CARDIO-VENTILATOIRE

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XII

MONITORAGE CARDIO-VENTILATOIRE

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

MONITORAGE CARDIO-VENTILATOIRE PENDANT HYDRA 10

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

* AMIENS Universite 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 létal. 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'interêt 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 monitorage cardio-respiratoire le plus fiable possible compte-tenues 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 illusoires 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

1) ERGOMETRE A BRAS

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

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

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

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

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

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

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

Pour un couple résistant donné, il est possible de modifier la puissance en faisan 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 puissanc 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 lettr le plan imposé afin de réussir le montage. Le puzzle constitue le reflet réel des différente 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 dépens 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) monitorage cardiaque

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, en le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 monitorage 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

significative de +25 pulsations à -701 m par rapport aux références de surface. Cependant, l' on considère l'augmentation de cette fréquence cardiaque par rapport à l' état de base pr exercice (pour éliminer l' effet de l' émotion compte-tenu du contexte), il n'y a pas d différence significative avec les références de surface (+10 en surface et +13 à -701 m).Il est signaler que l' exercice a été stoppé au bout de 4 minutes à -701 m, non en raison d difficultés ou d' anomalies chez le sujet, mais dans le seul souci de prudence exigée par 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 tro plongeurs pendant toute la phase expérimentale depuis le début de la mise en compressio (-10 m) jusqu'à la remontée en surface. Il existe une certaine similitude dans l'aspect des 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 pression maximales, redescend lors du début de la décompression et remonte pour atteindre u second pic entre -500 et -400 m. Il est très difficile d' apporter une explication physiologique ces constatations; tout au plus peut-on penser que la valeur minimale de la fréquenc cardiaque correspond à la phase où la concentration en hydrogène était maximale, que l premier pic est vraisemblablement largement influencé par les conditions environnementale imposées aux 3 plongeurs (exiguïté dans le petit caisson, incidence des troubles digestifs e d'hydratation, stress et excitation de la phase finale amenant les sujets à l'objectif initialemer fixé à savoir franchir la barre des 700 m) et que le second pic est vraisemblablement e 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'u exercice de 35 Watts sur l'ergomètre à bras en surface, lors des mesures de référence e celles observées lors du montage du puzzle à -635 m. Ces fréquences respiratoires oscille entre 6 et 12 cycles/minute et il n'existe pas de différences significatives entre plongées d 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 fréquenc respiratoire lors de la plongée à -580 m. L' objectif de cette plongée était le montage d puzzle qui a été réalisé en 70 minutes. Au cours de cette plongée les deux paramètre cardiaque et respiratoire ont évolué de manière identique avec une diminution progressive e constante depuis la phase d'équipement indiscutablement la plus pénible jusqu'à l remontée après la réussite du travail imposé. A aucun moment il n'existe d'anomalies et l parfait état stable de la fréquence cardiaque entre 75 et 85 pendant l'exécution du puzzl 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 plongé à -490 m. Au cours de cette plongée le sujet devait effectuer 2 exercices successifs sur ergomètre à bras (puissance 25 Watts) puis le démontage du puzzle réalisé par l'autre suje 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

(respectivement 115 et 110) que pour le démontage du puzzle (120); par contre la fréquenc respiratoire est supérieure pour les exercices sur ergomètre (respectivement 8 et 7 d moyenne) par rapport au démontage du puzzle (état stable à 6 cycles:minute pendant les 1 minutes).La encore aucune anomalie dans l'adaptation cardio-respiratoire à l'effort, bien qu 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 plongé à -460 m avec comme objectif le remontage du puzzle. Celui-ci a été réalisé avec succè 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 e plateau entre 65 et 70 de moyenne alors que la fréquence respiratoire est un peu plu fluctuante (entre 8 et 10 cycles/minute avec un pic à 12 en fin de montage). Pas d' anomali constatée au cours de cette plongée indiquant une adaptation parfaite au travail à cett profondeur.

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

III. DISCUSSION

Il serait tout à fait illusoire de vouloir tirer des conclusions scientifiques à partir de ce constatations. Le simple monitorage de la fréquence cardiaque, même si elle s' accompagn 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 exigu. 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 parait 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 présences 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 tout 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 monitorage 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
l'exercice musculaire semble être compatible avec une possible activité professionnelle à
telles profondeurs.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie, sans l'autorisation écrite de Comex.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Arm Ergometer/HYDRA 10

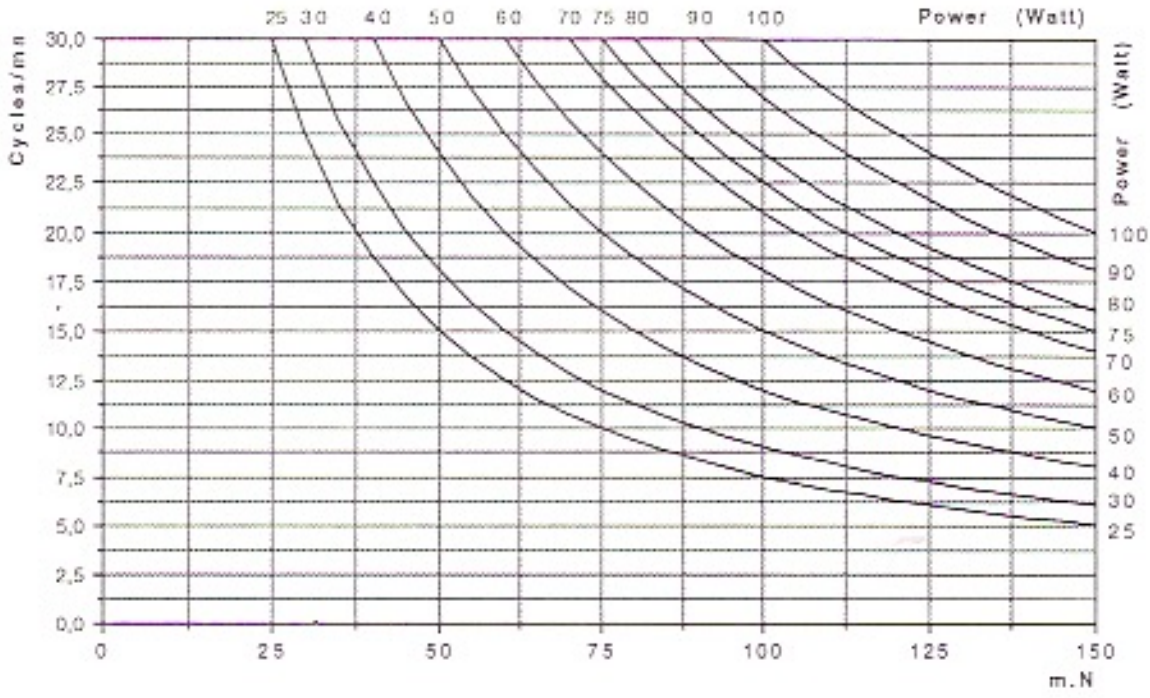
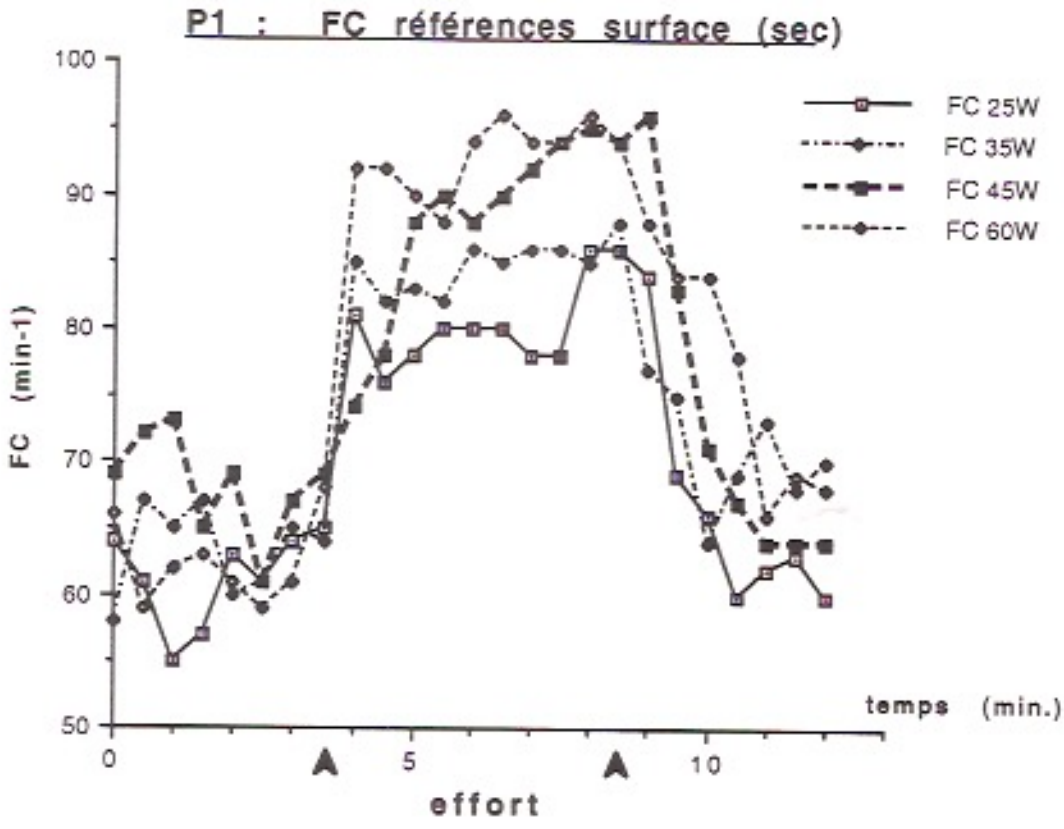


figure 1



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 2

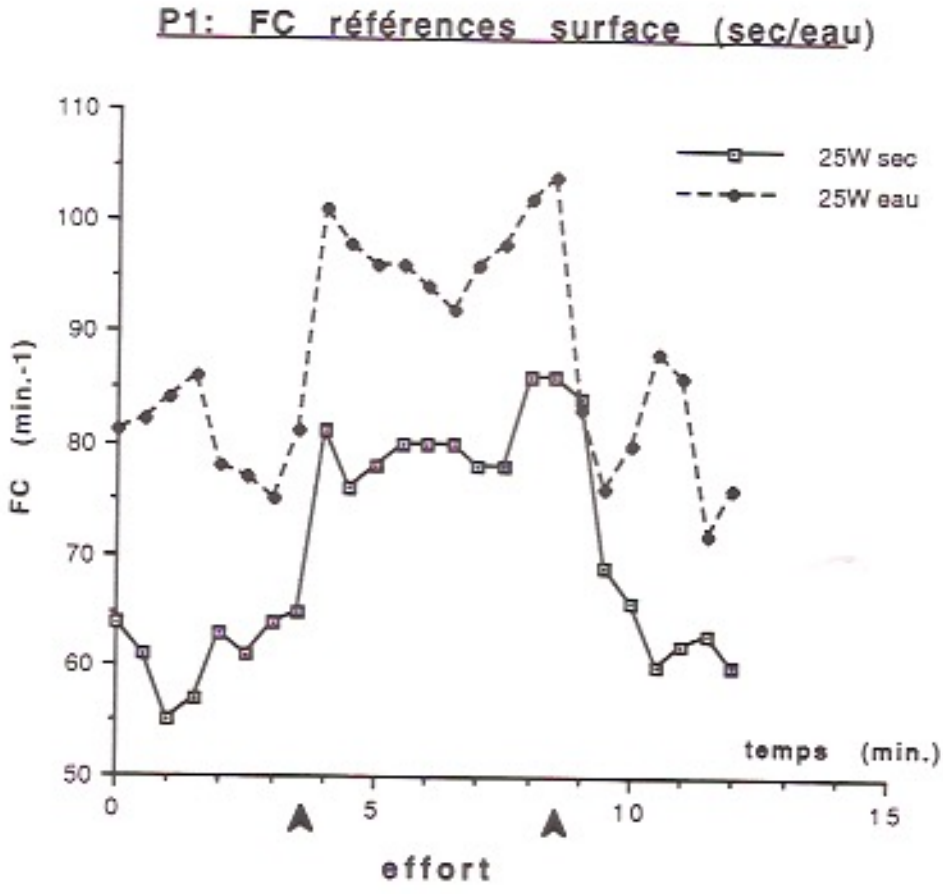
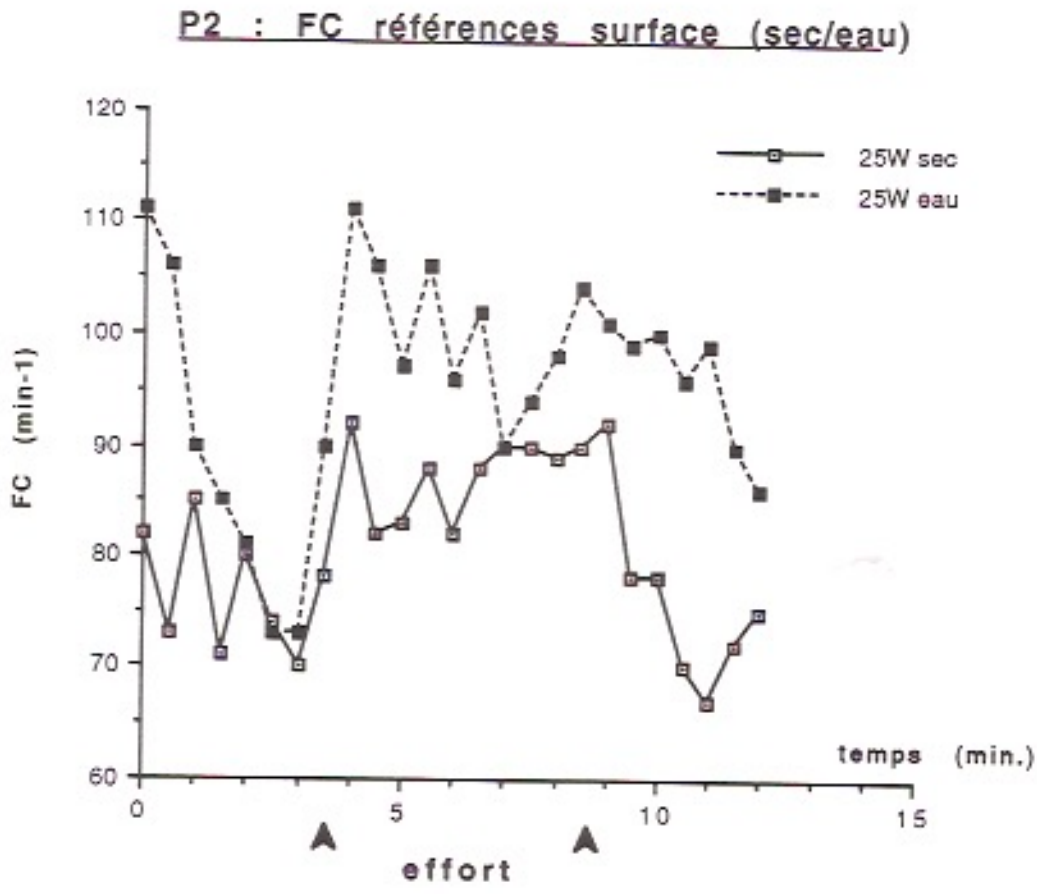
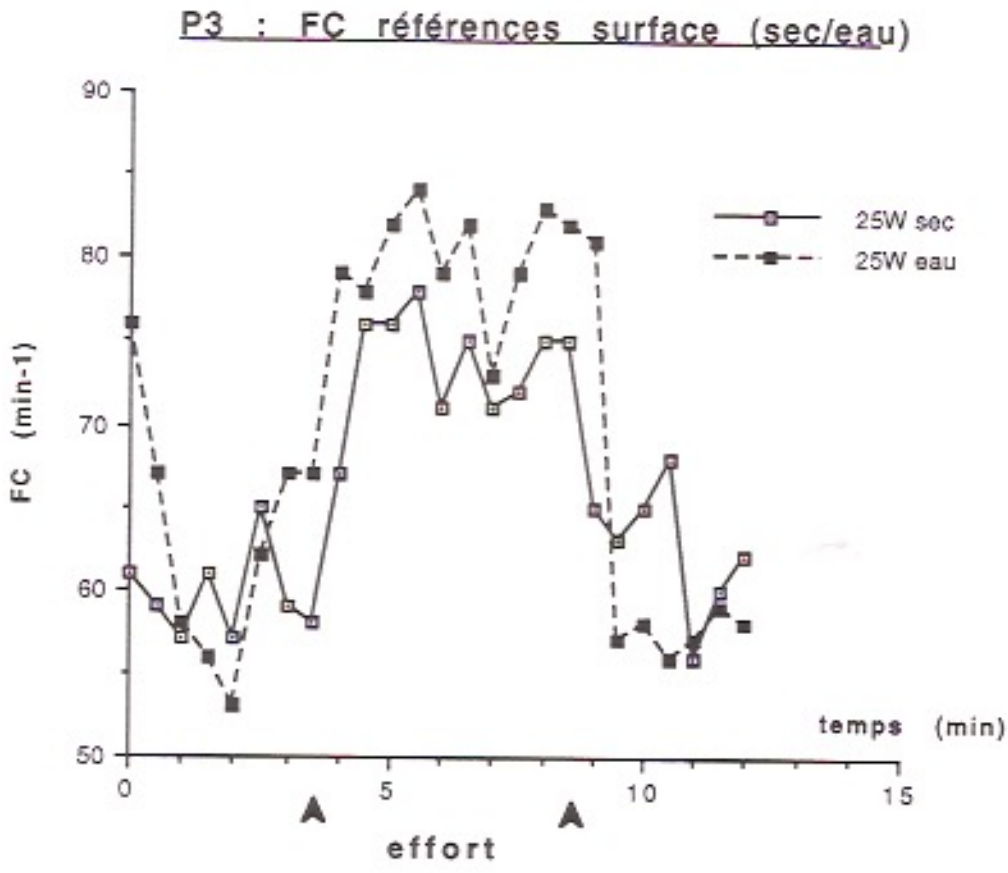


figure 3



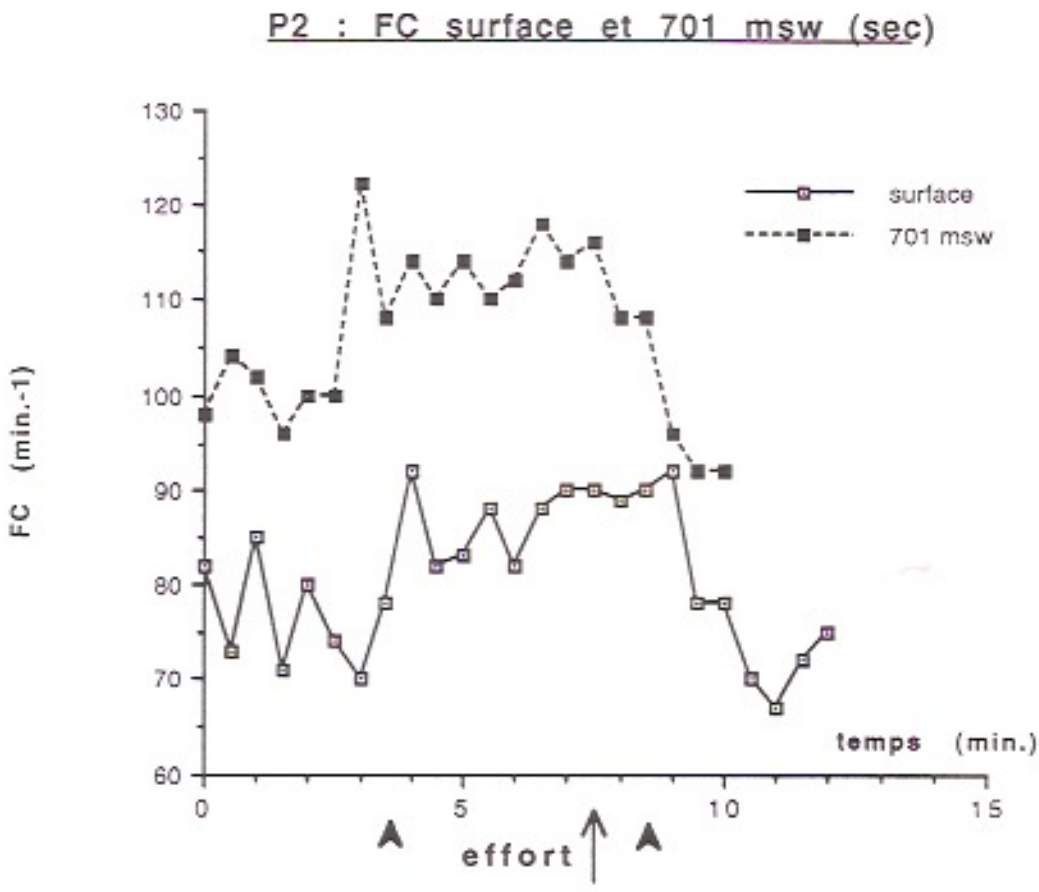
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 4



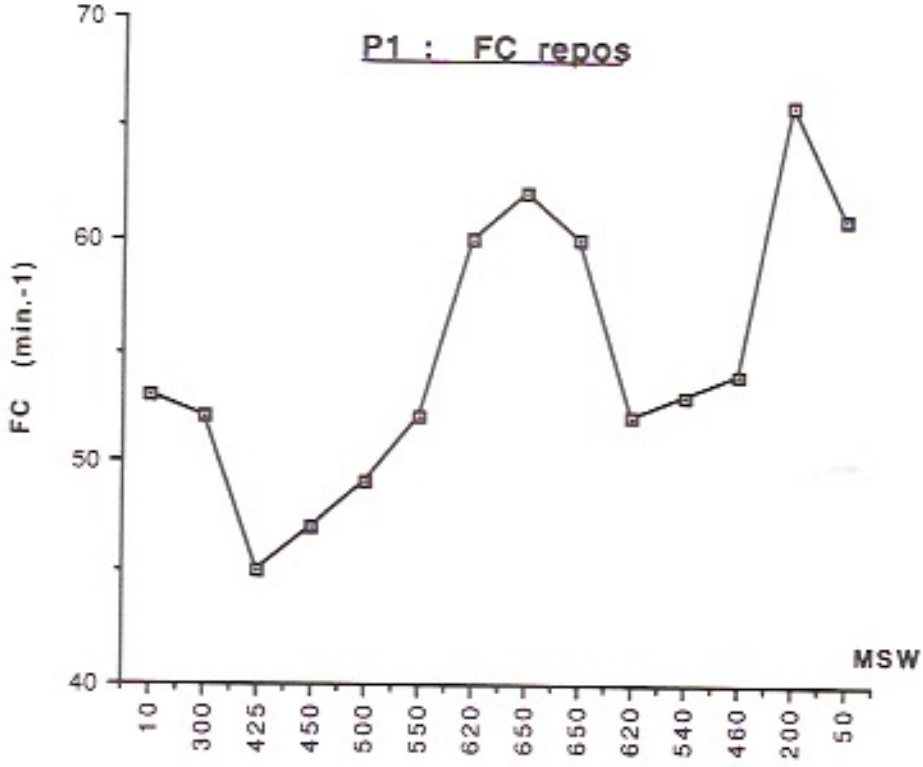
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 5



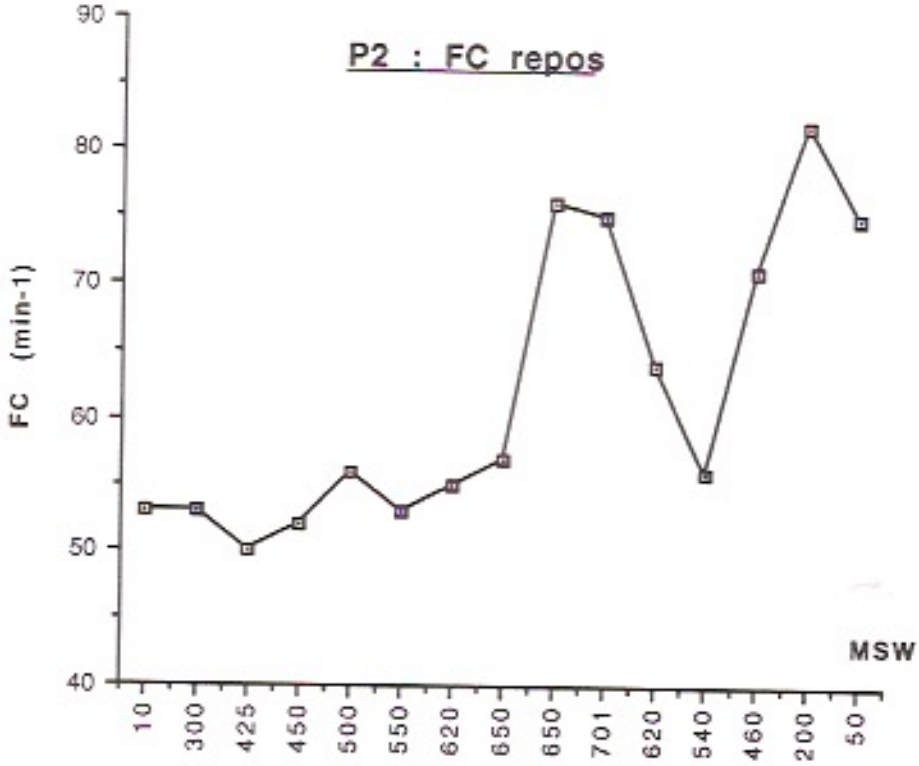
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni de communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 6



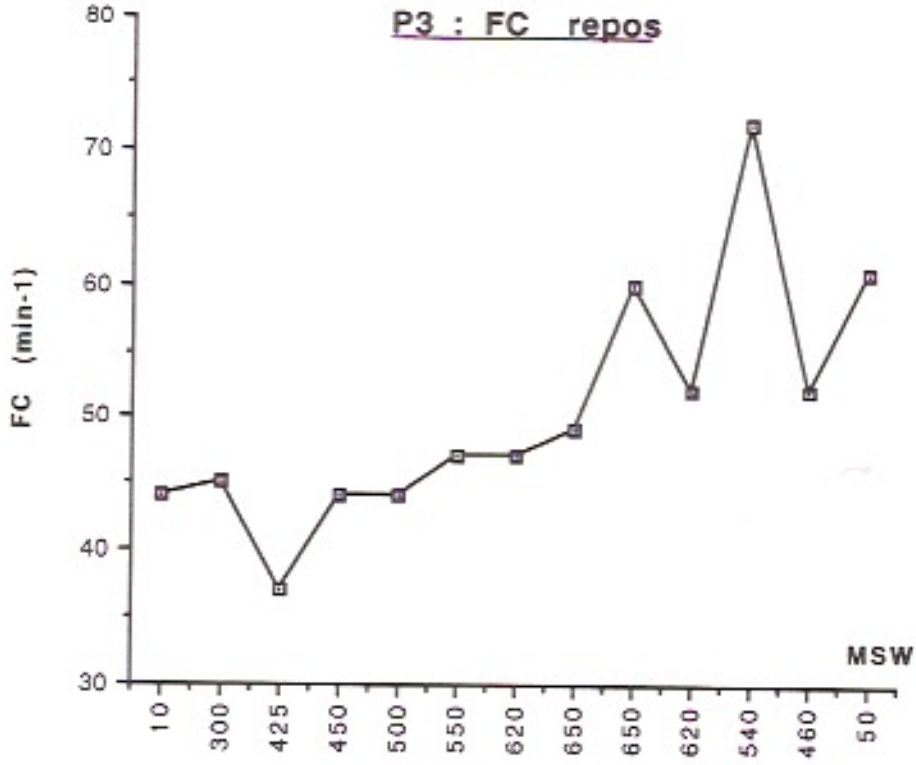
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 7



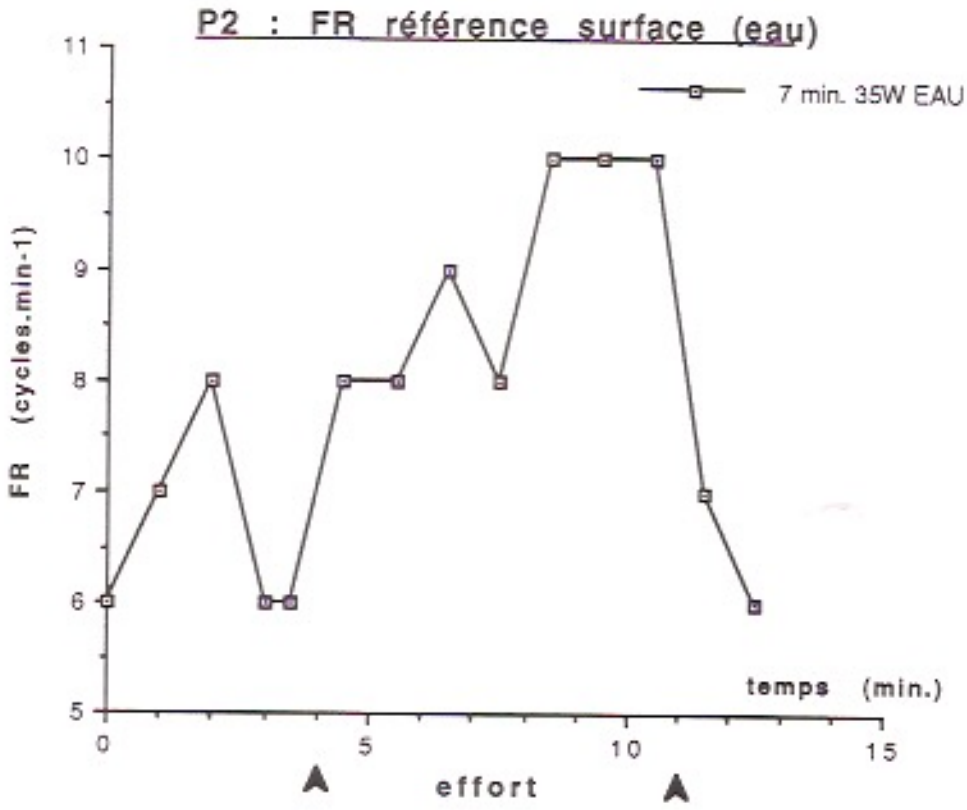
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 8



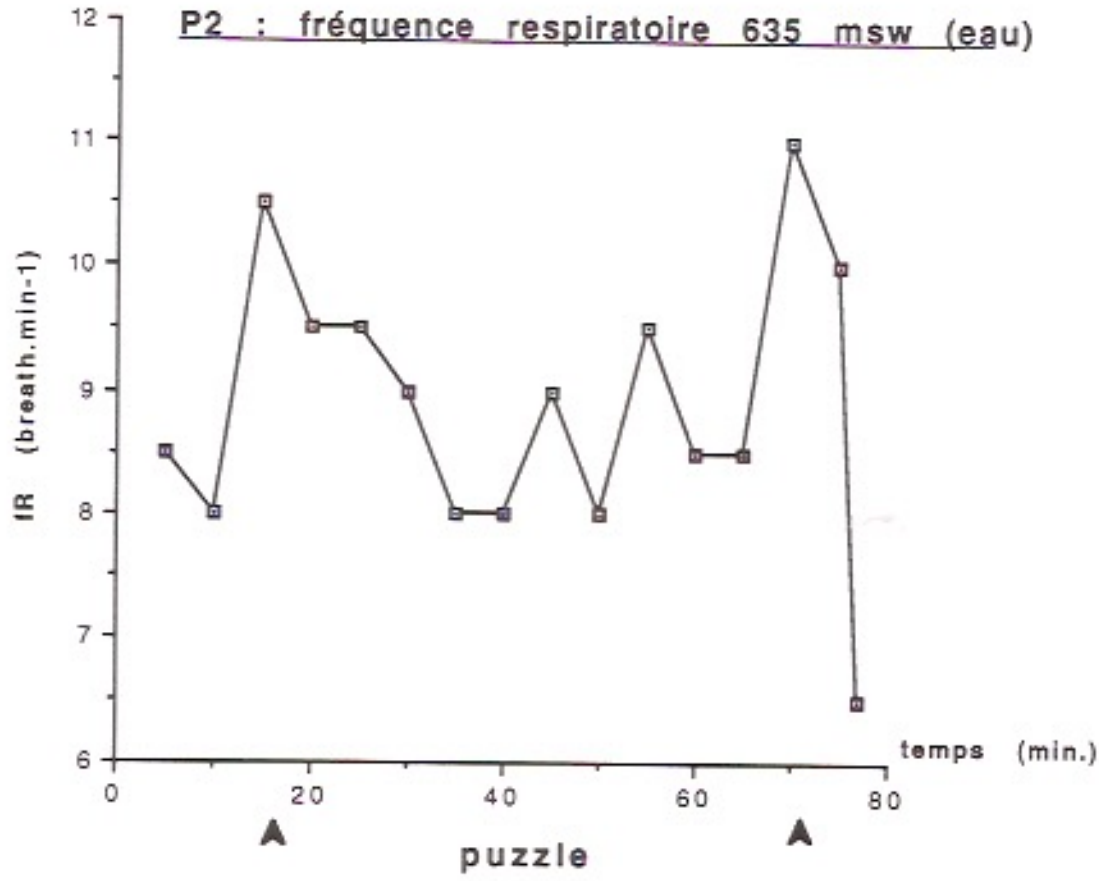
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 9



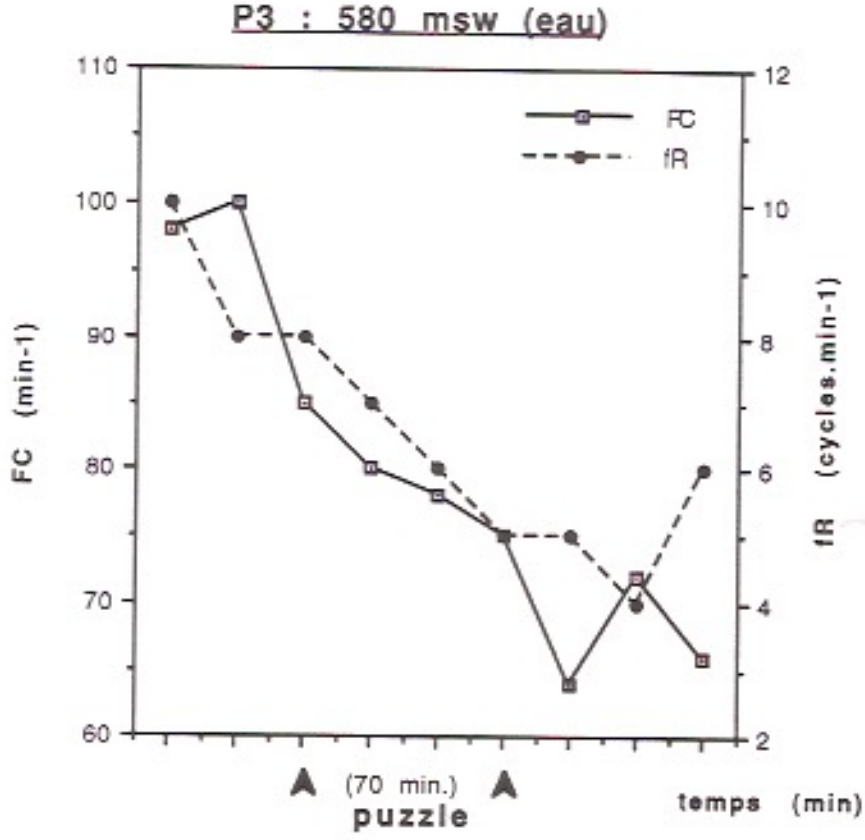
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 10



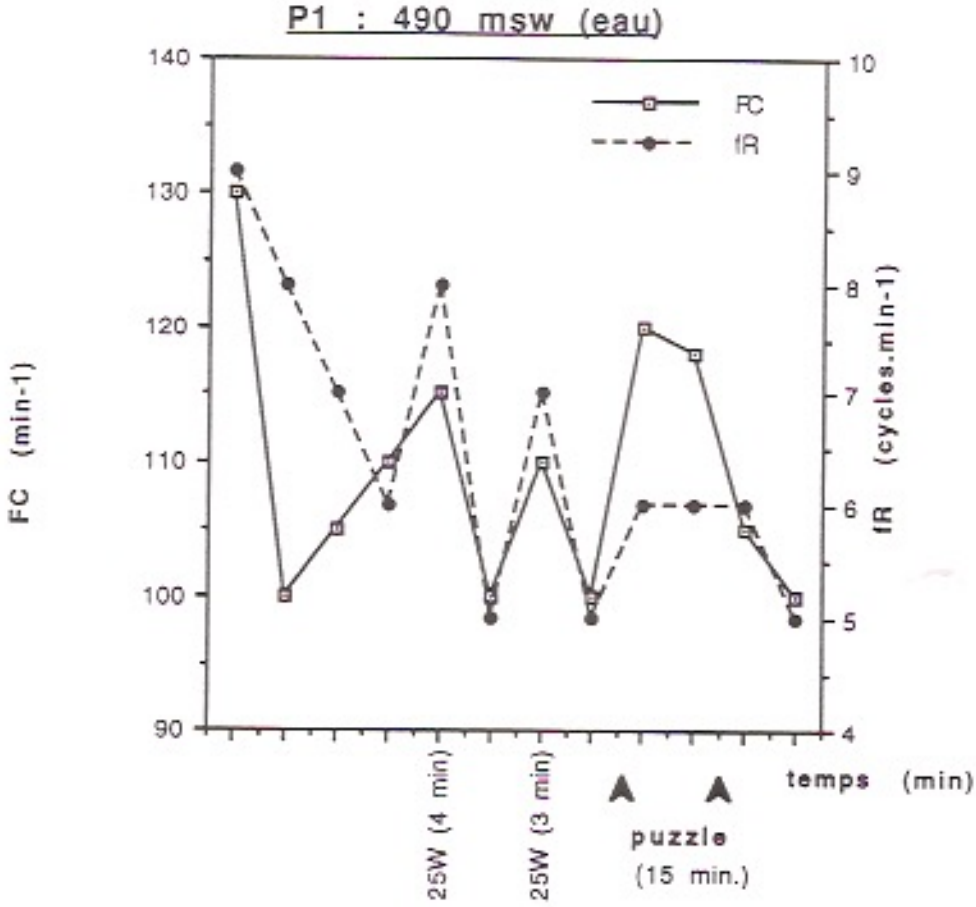
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 11



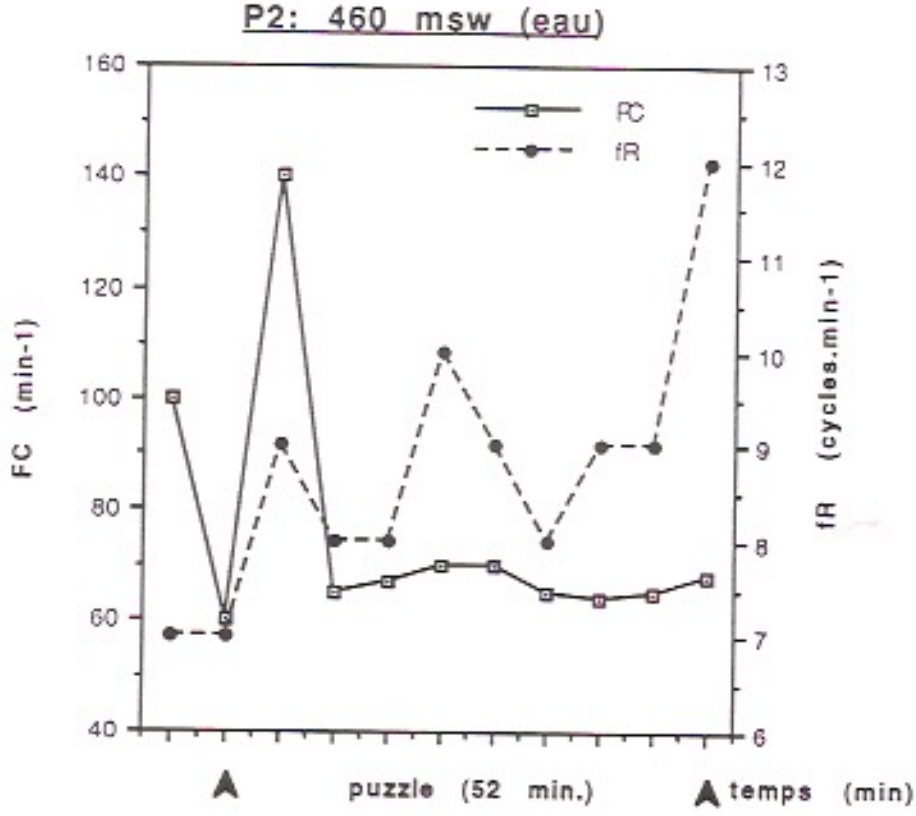
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 12



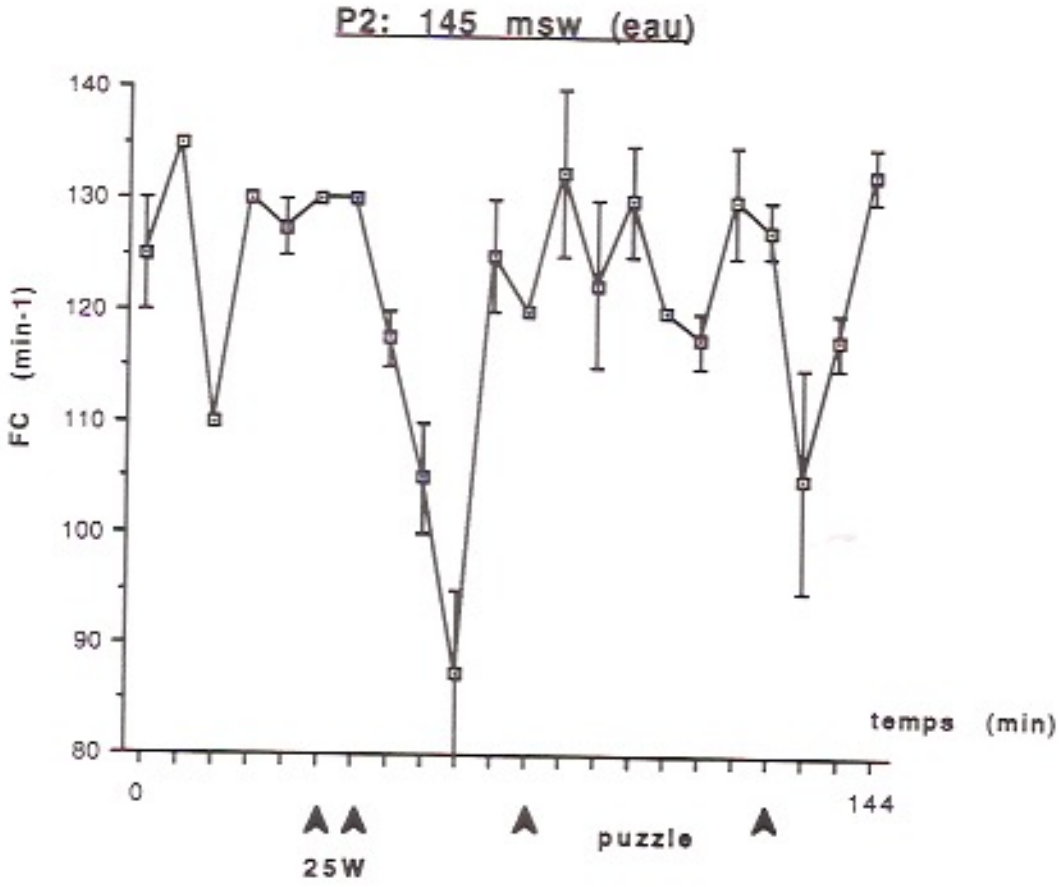
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 13



Le document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

figure 14



Document en la propriété de Comex. Toute personne en détenant, à exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie, sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XIII

ETUDE DOPPLER

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

SURVEILLANCE DE LA DECOMPRESSION PAR EFFET DOPPLER

1. INTRODUCTION

L'intérêt de la surveillance d'une décompression par la détection ultra sonore 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 entrainé à la technique.

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

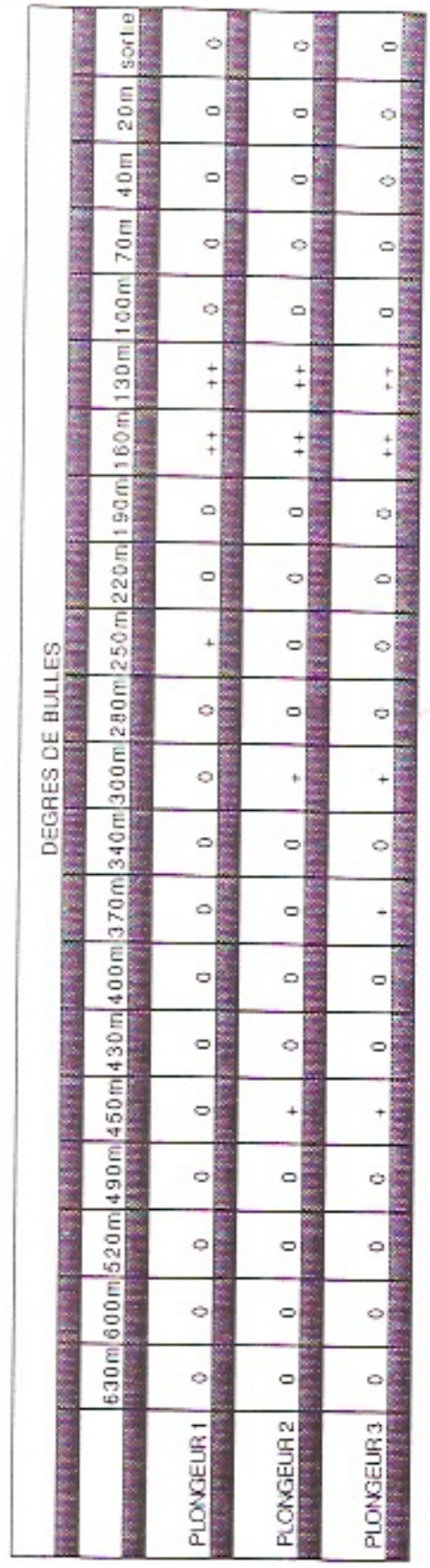
Elle comporte l'analyse de trois paramètres:

- 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

SURVEILLANCE DOPPLER



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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
Aérosp. 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XIV

EXPLORATIONS HEMATOLOGIQUES

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

* **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.

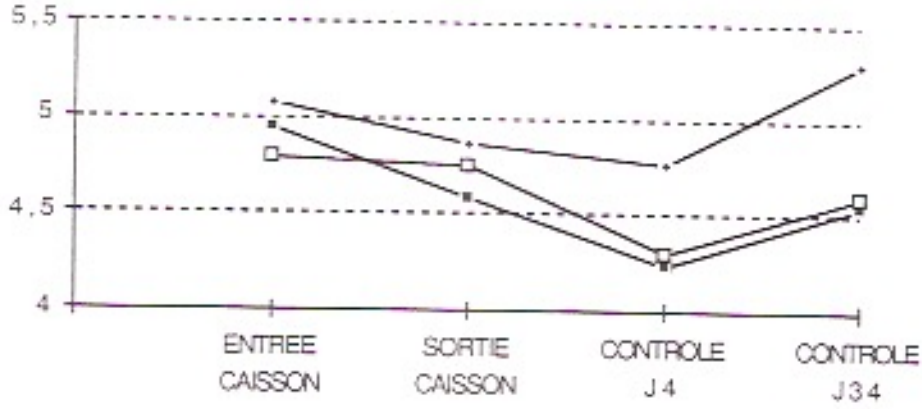
Cette baisse de la numération globulaire est retrouvée de façon inconstante lors de plongées à saturation (13). Elle pourrait être la conséquence d'une diminution de la production médullaire secondaire à l'exposition prolongée à l'hyperoxie (FiO_2 de 30 à 50%). Une baisse simultanée de l'érythropoïétine 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.

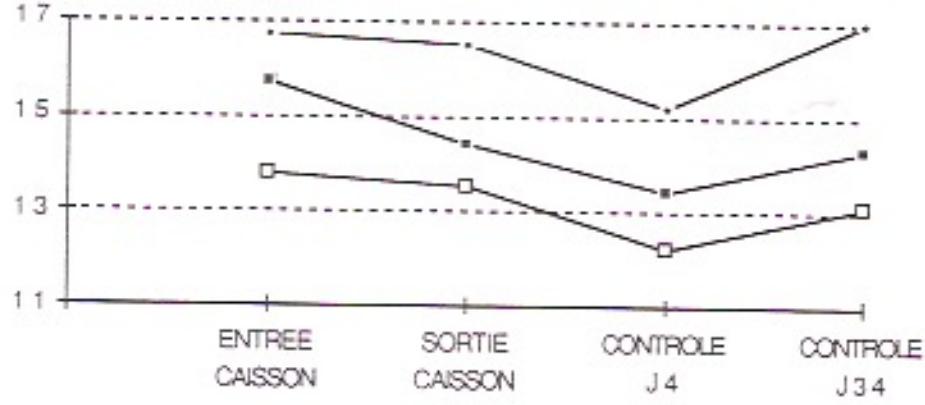
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ERYTHROCYTES (1)

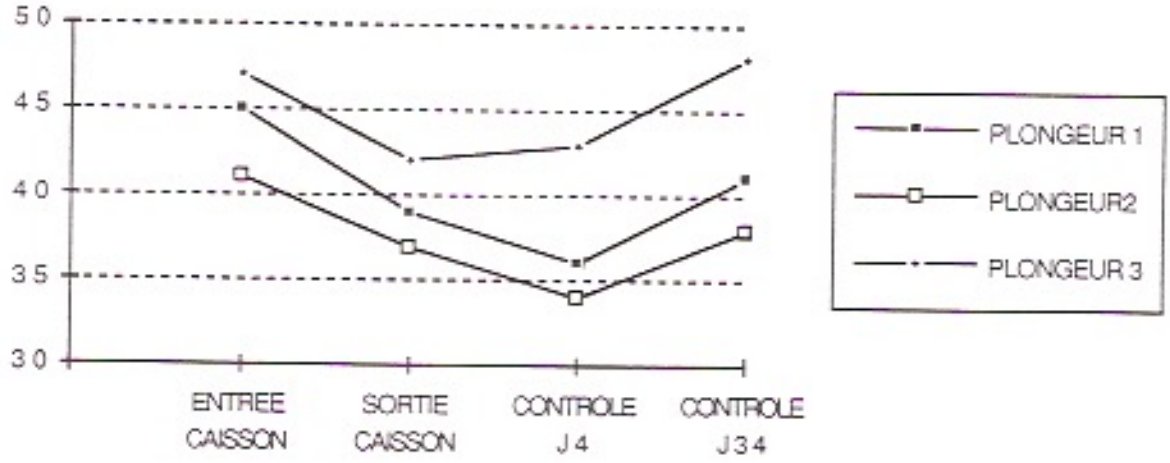
NUMERATION DES HEMATIES (4,5 à 5,5 M/ml)



HEMOGLOBINE (13 à 18 g/100ml)



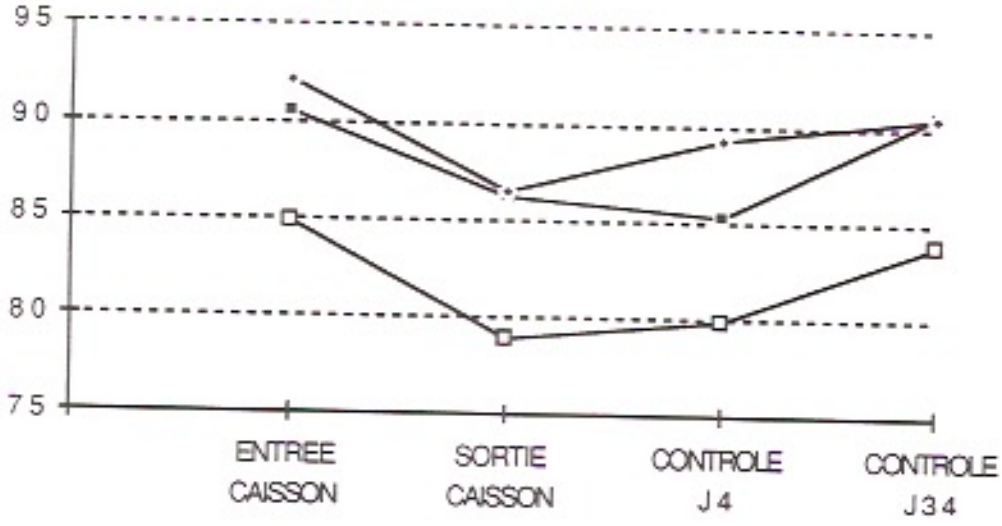
HEMATOCRITE (40 à 54%)



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

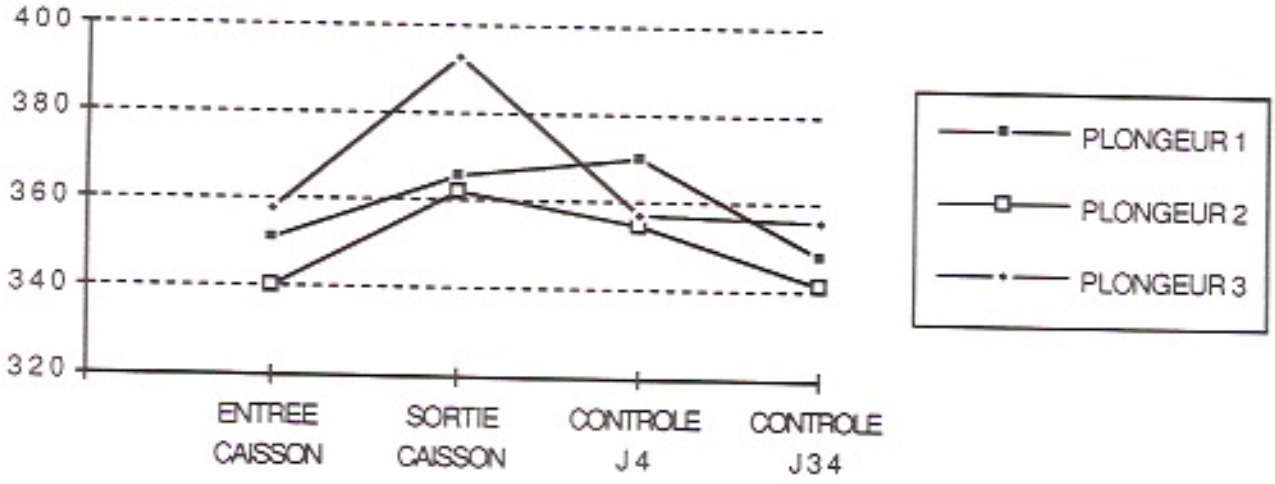
ERYTHROCYTES (2)

VOLUME GLOBULAIRE MOYEN (80 à 100 fl)



CONCENTRATION CORPUSCULAIRE MOYENNE EN HEMOGLOBINE

(320 à 360 g/l)



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 entrainent 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).

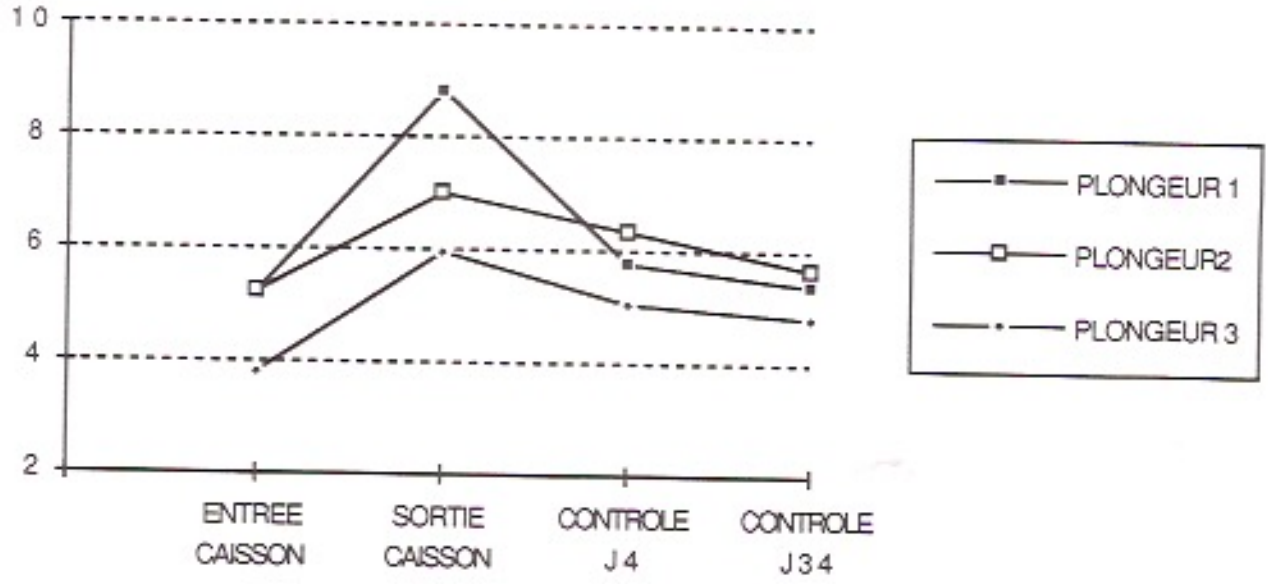
- L'analyse qualitative met en évidence, à la fin de la décompression, une augmentation de l'activation des neutrophiles, par les deux techniques utilisées (réduction spontanée et après stimulation par PMA), chez les trois plongeurs. Cette activation sera régressive au prélèvement de contrôle.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

LEUCOCYTES

NUMERATION LEUCOCYTAIRE

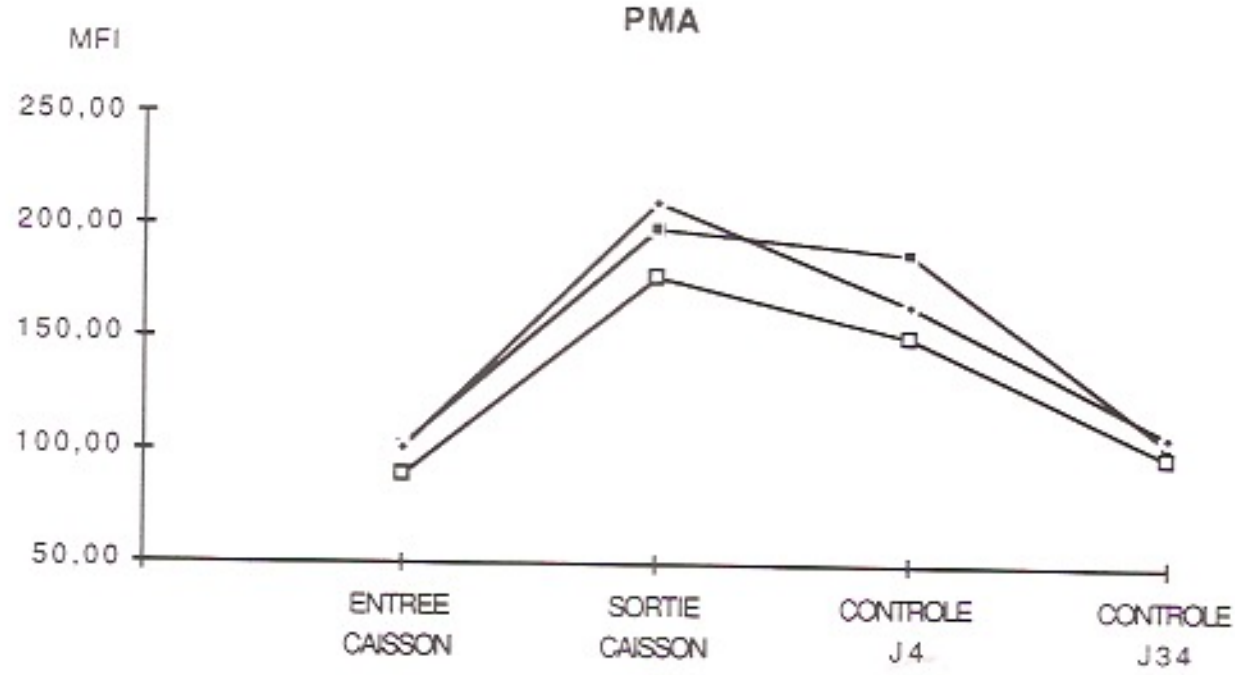


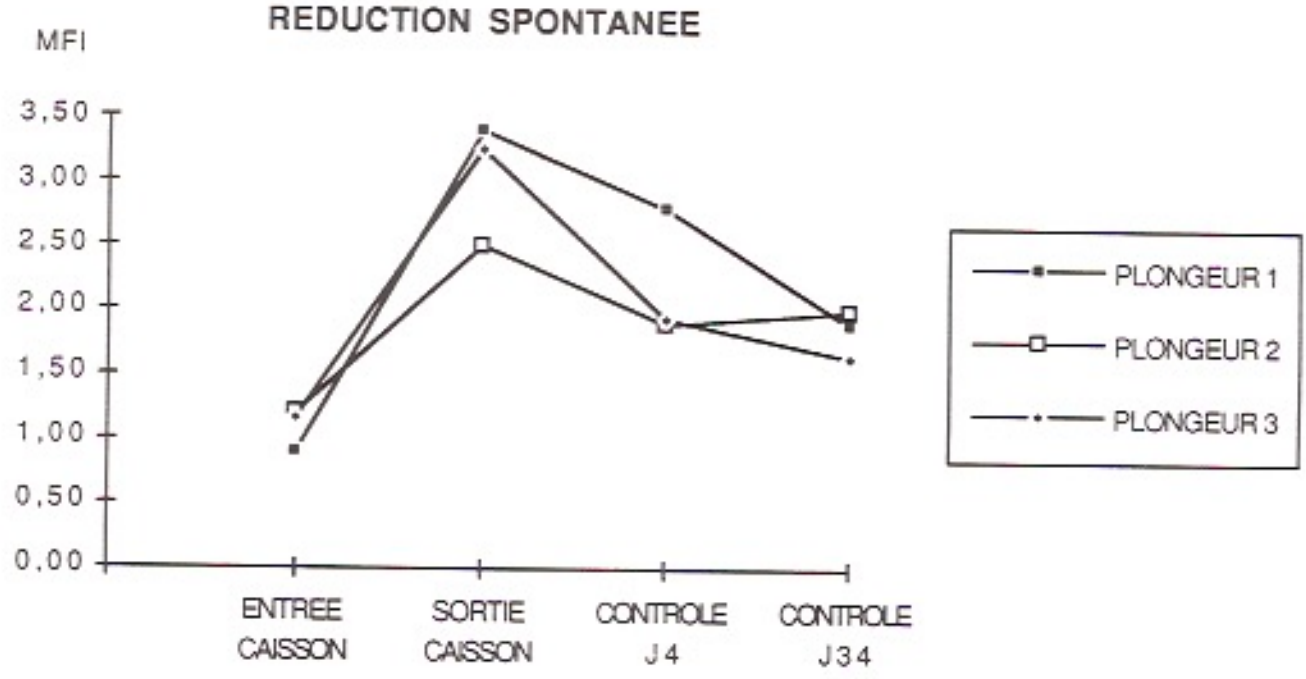
Formule sanguine:

Augmentation Neutrophiles, lymphocytes, monocytes, éosinophiles, basophiles.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ACTIVATION DES POLYNUCLEAIRES NEUTROPHILES





Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

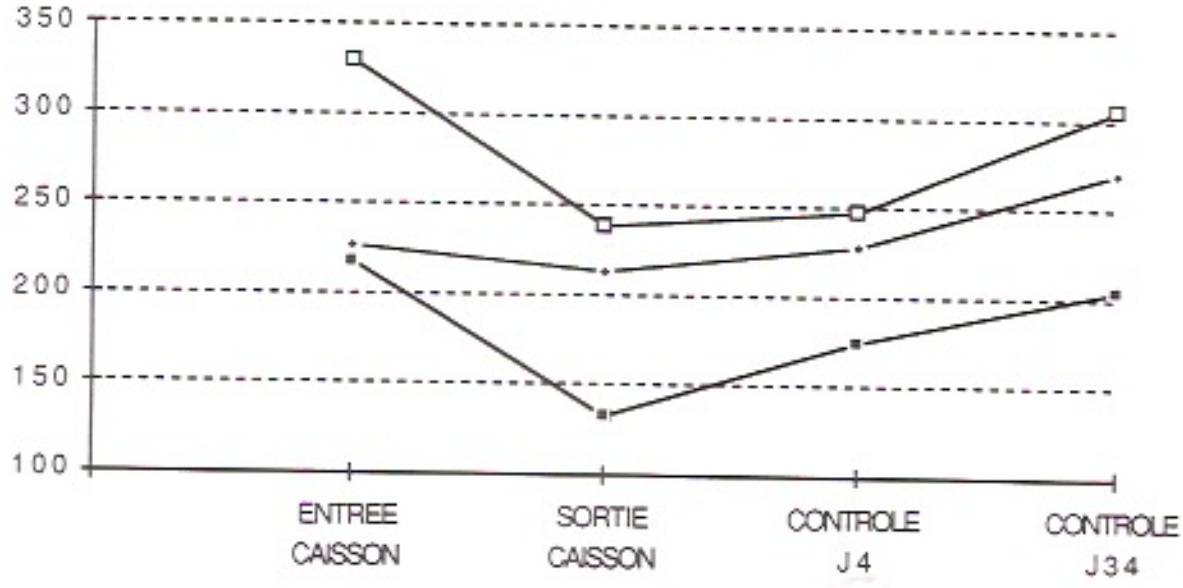
L'activation plaquettaire est attribuée par la plupart des auteurs aux bulles circulantes apparaissant à la décompression (9). Le plongeur n°2 est celui qui a subi le profil de plongée le plus sévère (profondeur maximale 701m), la surveillance quotidienne de la décompression par effet doppler n'a cependant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

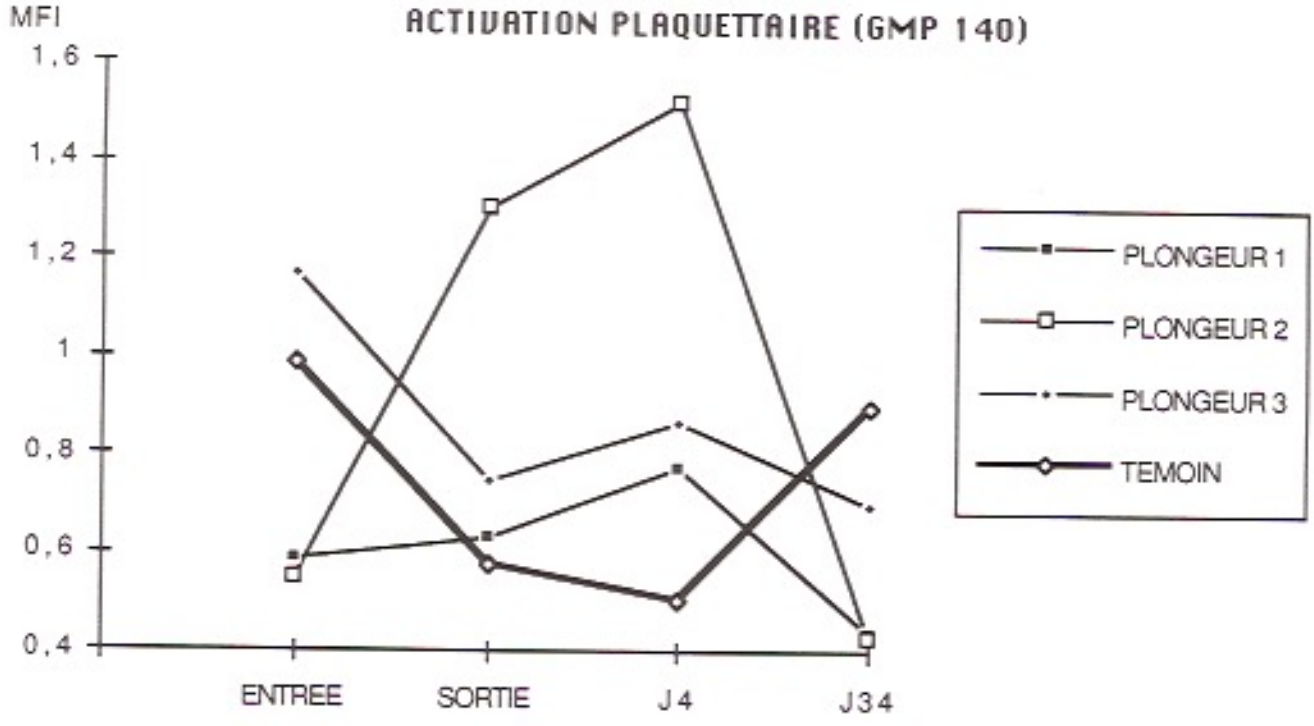
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

PLAQUETTES

NUMERATION PLAQUETTAIRE



ACTIVATION PLAQUETTAIRE (GMP 140)



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

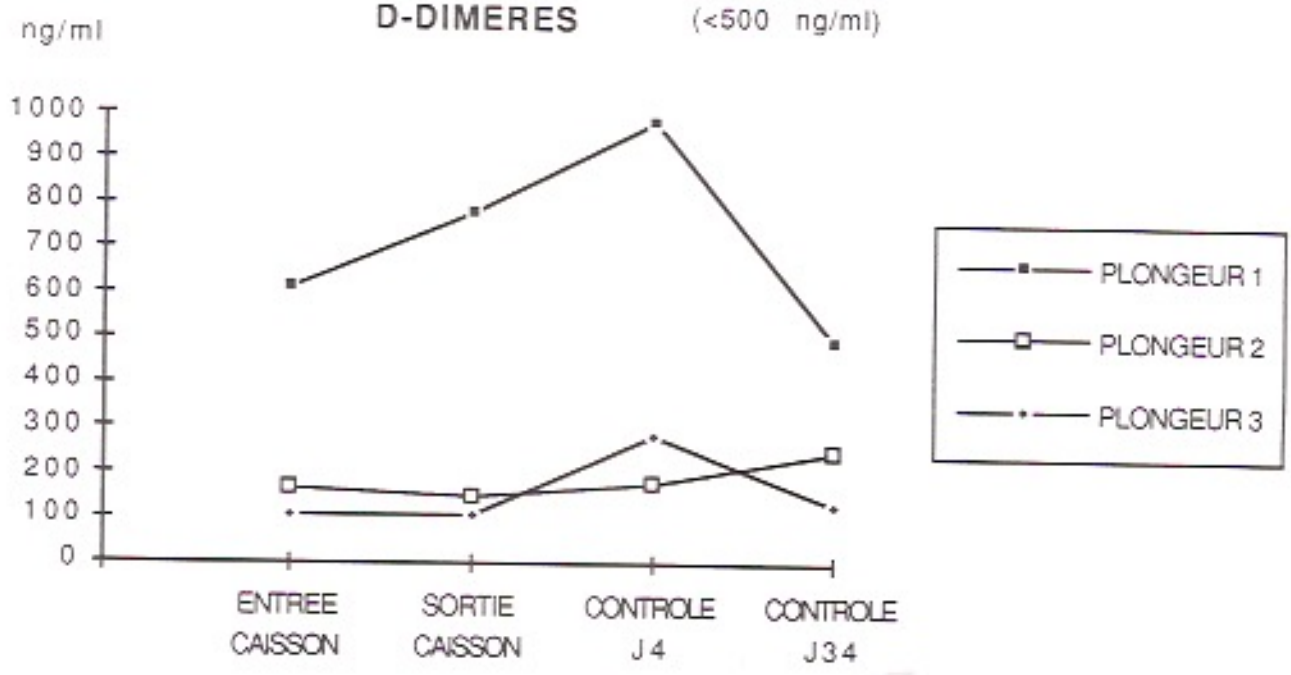
* Fibrinolyse:

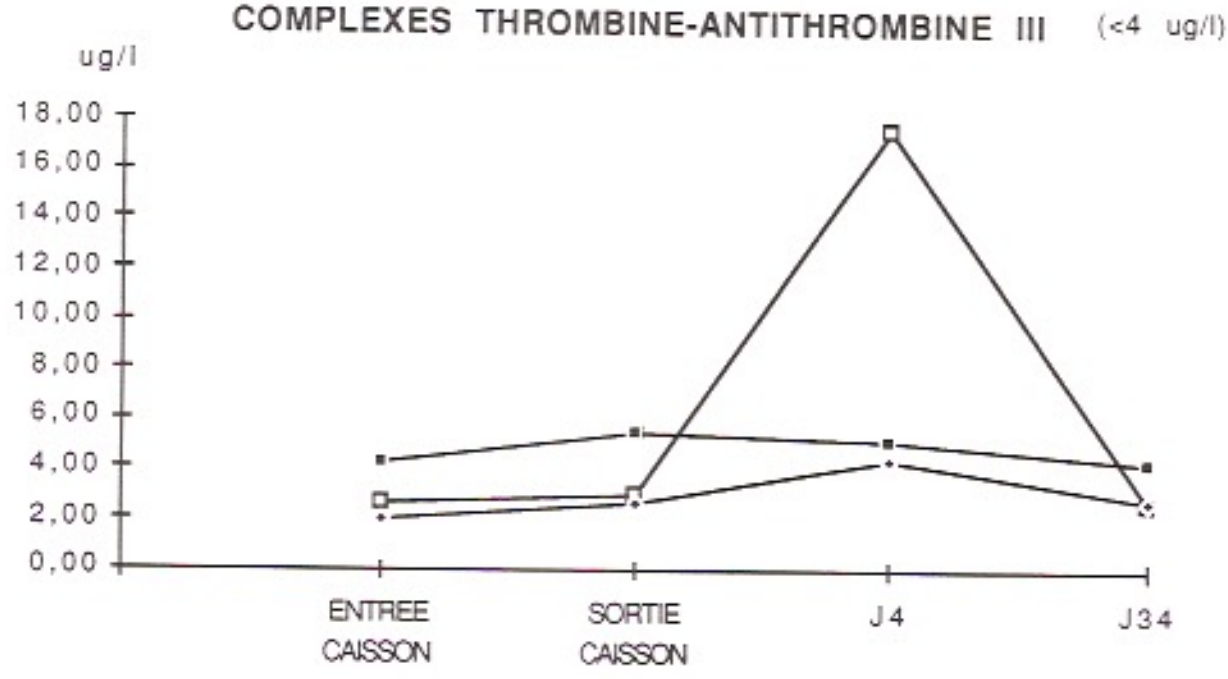
- Le test de von Kaulla est plus court après la plongée par rapport à sa valeur de référence. Nous ne retrouvons cependant aucune valeur pouvant être considérée comme pathologique et il n'existe pas de complexes solubles circulants.

- 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 paralèle du tPA Ag.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

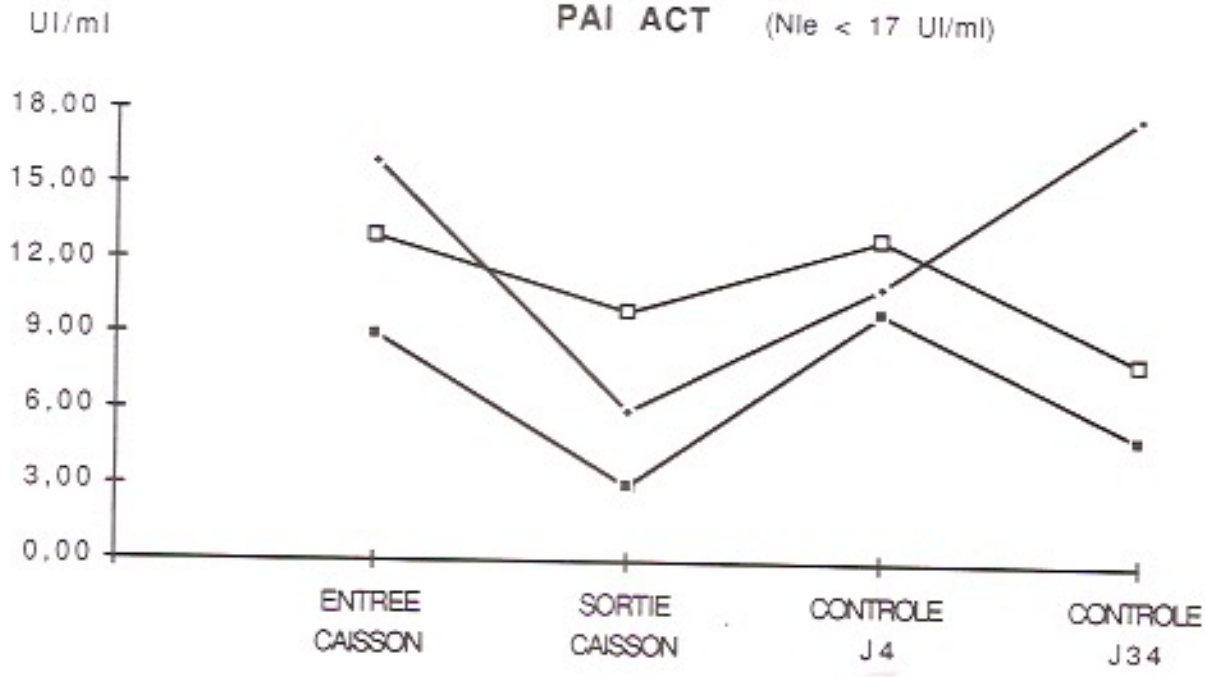
ACTIVATION DE LA COAGULATION

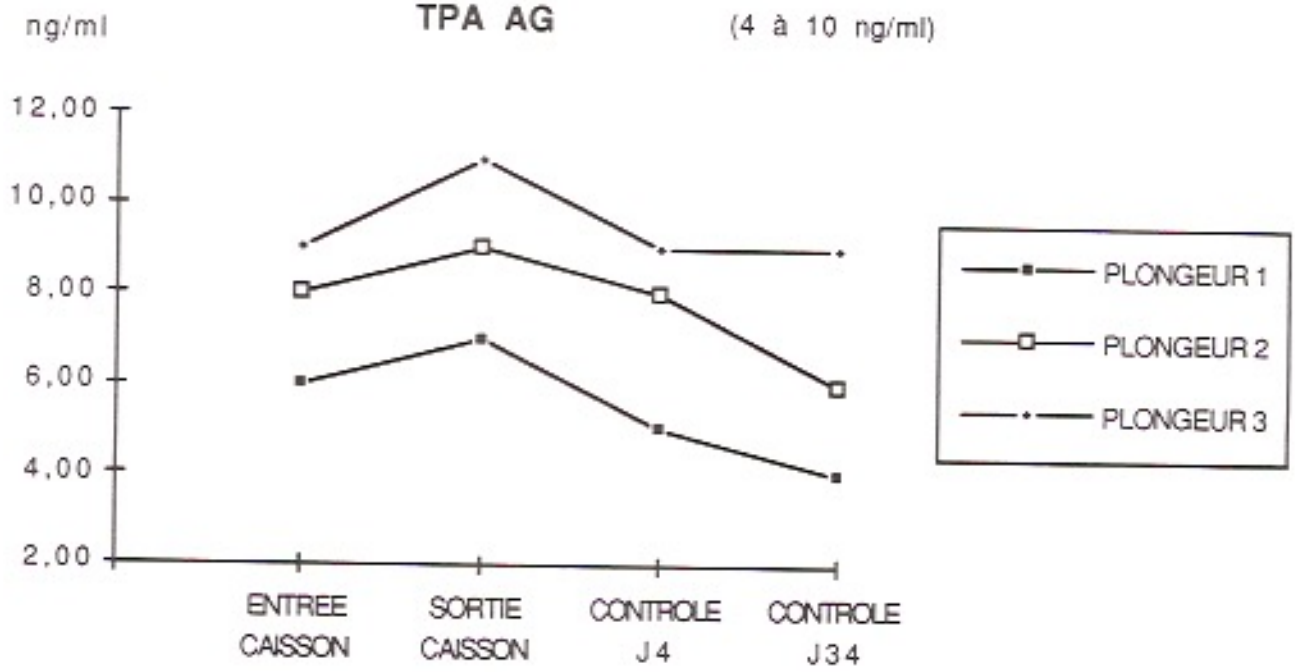




Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

FIBRINOLYSE





Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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:

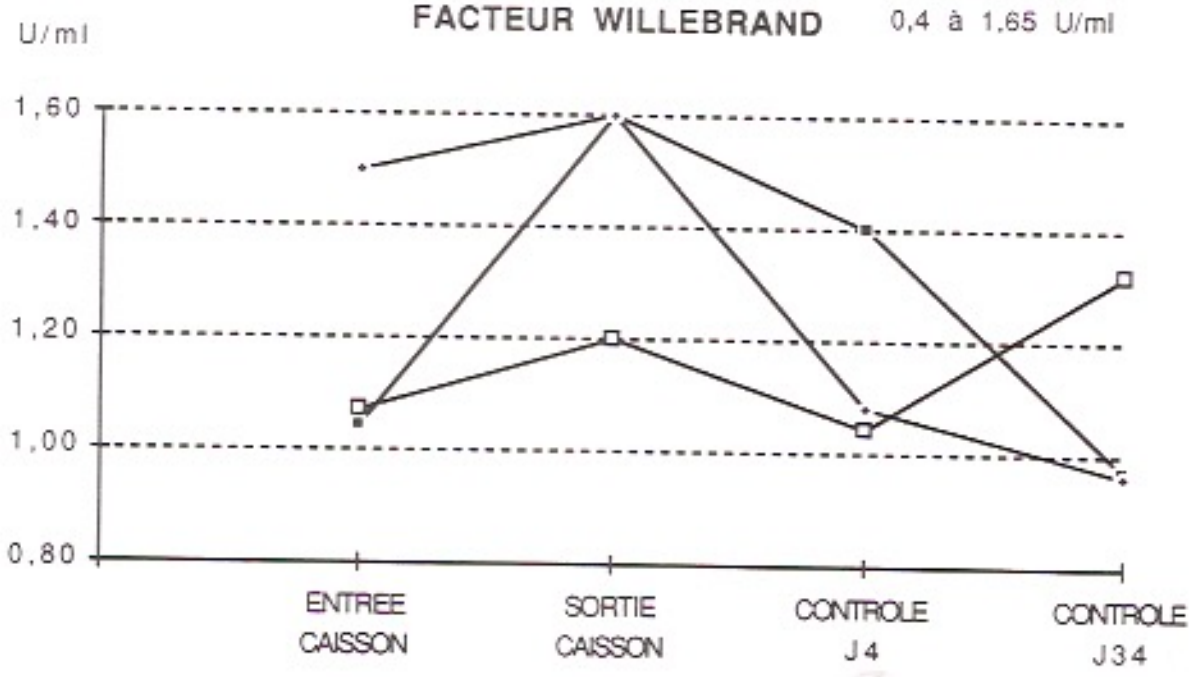
- Soit en raison de résultats inhabituels:

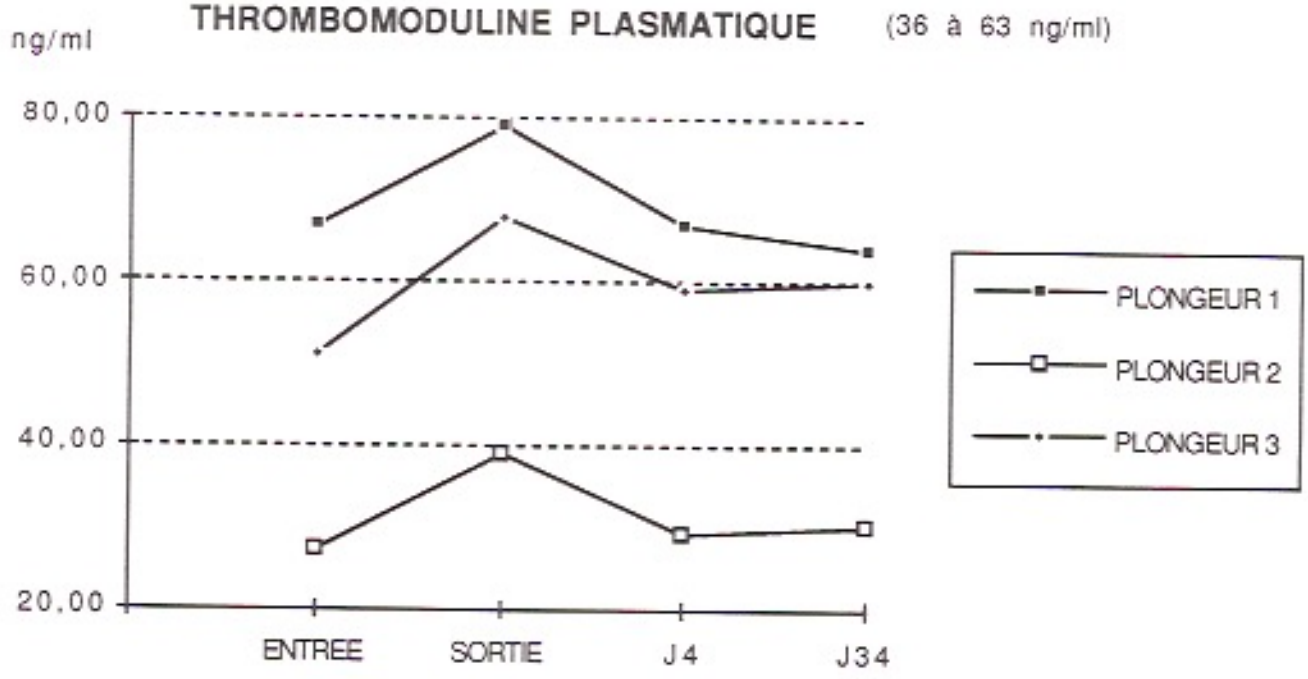
Les modifications du VGM et surtout de la CCMH n'avaient jusqu'alors jamais été soulignées. Elles évoquent des troubles des échanges ioniques trans membranaires.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CELLULES ENDOTHELIALES





Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- 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 déja été évoquées par de nombreux travaux expérimentaux.

* * * * * *

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 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ANNEXE

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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	-

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XV

EXPLORATIONS URINAIRES

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

- 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)

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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:

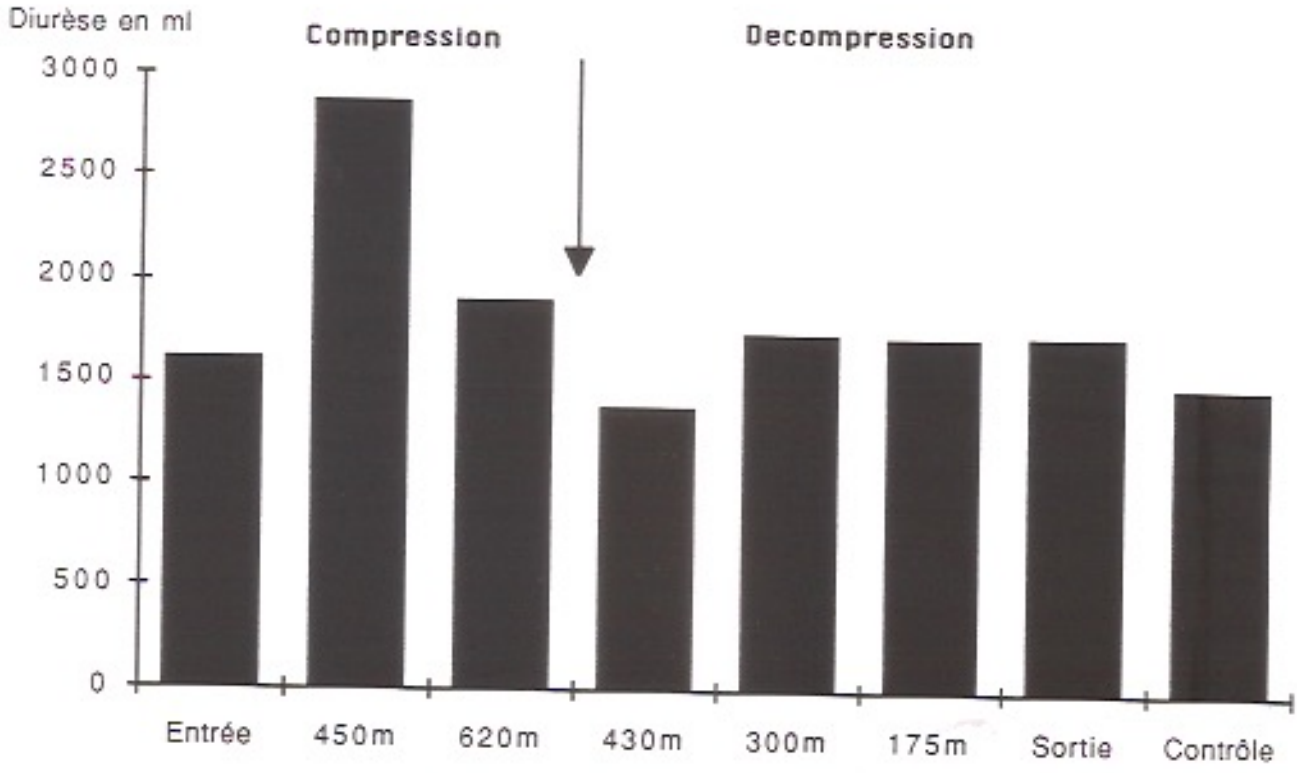
Le dosage du 11 Déhydro-Thromboxane B2 (en ng/24h) montre chez deux plongeurs sur trois (plongeurs 1 et 2) une valeur maximale lors du prélèvement effectué à la profondeur de 620 mètres. Le troisième plongeur (plongeur 3) a par contre à ce niveau un taux similaire au dosage de référence en surface.

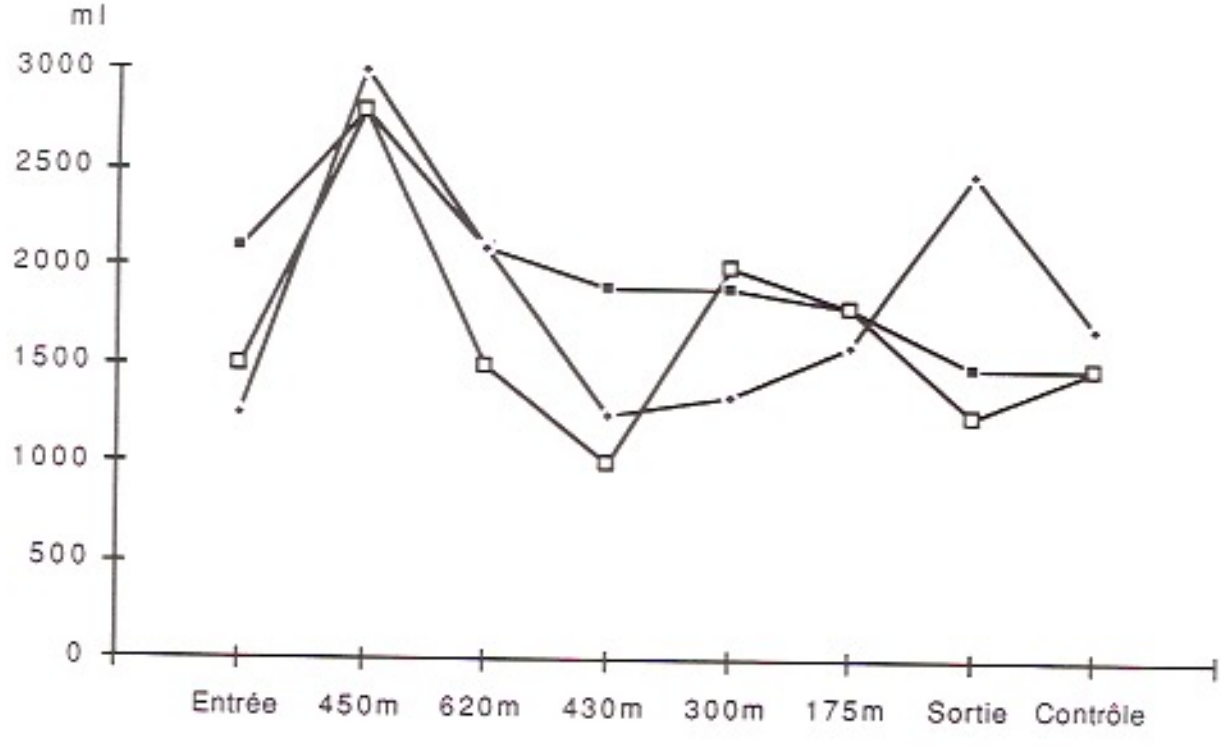
Le premier prélèvement effectué lors de la décompression retrouve un taux nettement inférieur par rapport à celui effectué à la profondeur maximale chez les trois plongeurs.

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.

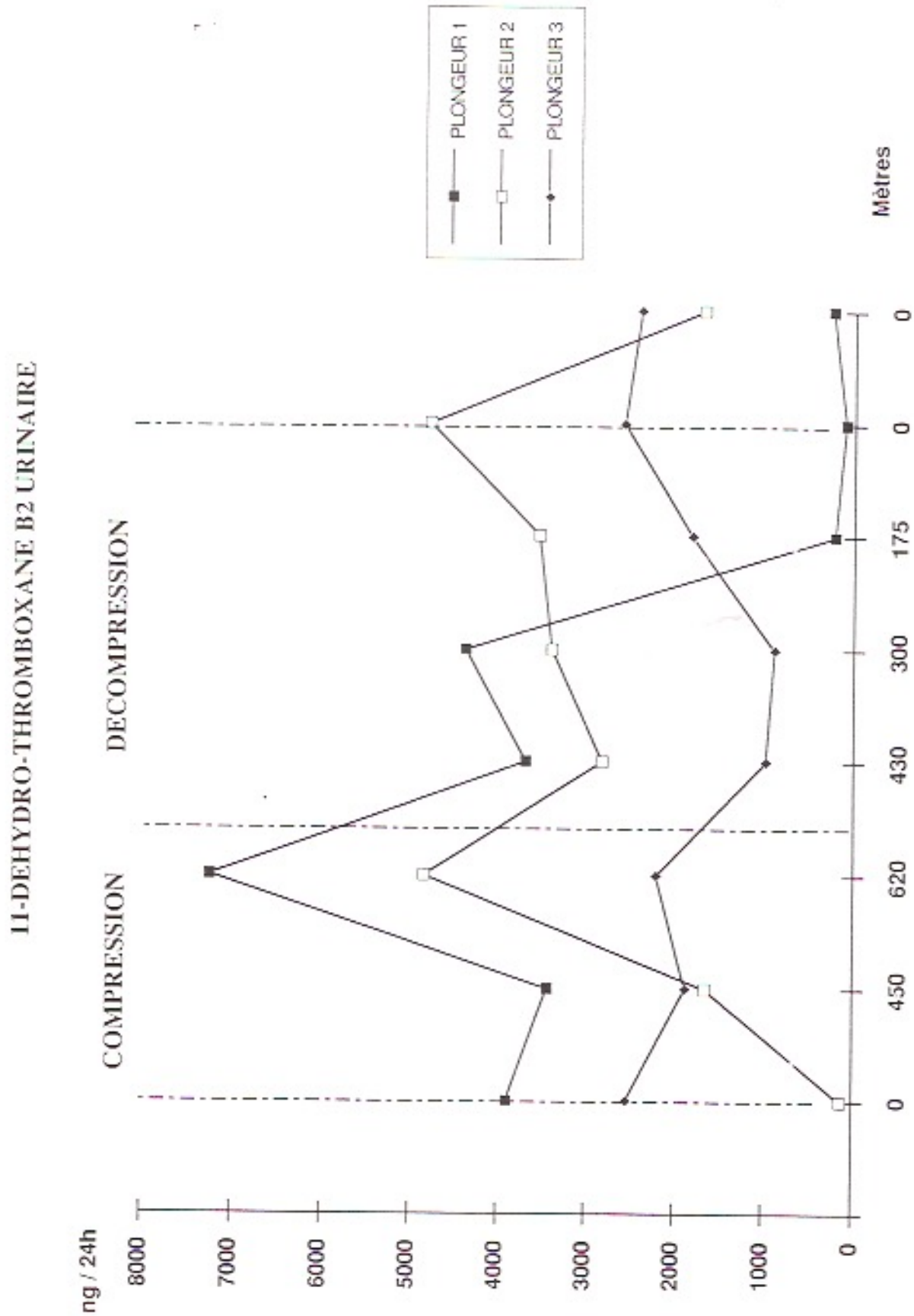
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

DIURESES DES 24 HEURES





Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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).

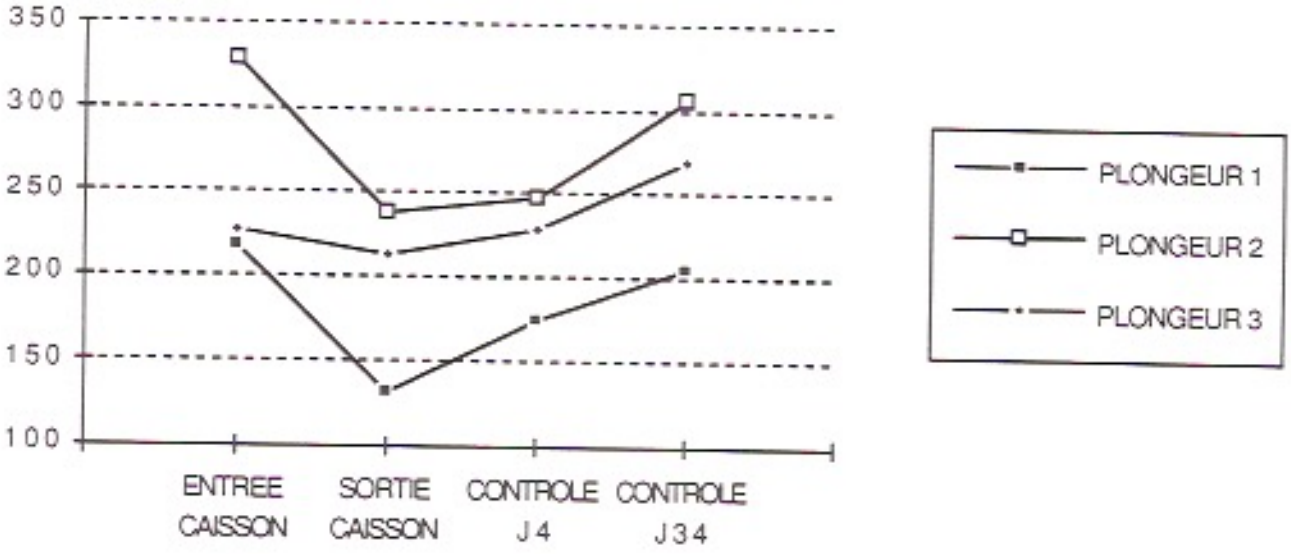
Durant la décompression, l'augmentation progressive de la concentration en dérivés urinaires du Thromboxane, notée chez deux plongeurs, évoque une consommation plaquettaire croissante.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

NUMERATION PLAQUETTAIRE (10^9/l)



	ENTREE	SORTIE	% de Baisse
PLONGEUR 1	217	132	39
PLONGEUR 2	329	238	28
PLONGEUR 3	227	213	6

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 au 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 Kaï 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

ANNEXES

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

* **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 Décembre1992

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

11 DEHYDRO-THROMBOXANE B2 urinaire (ng/24 h)

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XVI

BILAN NEUROLOGIQUE

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'efficience 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 controle 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 -+ 1,8
  mémoire = 22 -+ 4,9
- WMS rappel d'une histoire max 24 élèments
- Cubes max 51
- Similitudes max 28
- Arithmétique max 19

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XVII

INCIDENCE DE LA PLONGEE HYDRA 10 SUR LA FONCTION RESPIRATOIRE, LE METABOLISME ERYTHROCYTAIRE ET LA TOLERANCE A L'EXERCICE MUSCULAIRE

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 capactié 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).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-âge) soit atteinte, ou qu'un facteur limitant impose l'arrêt de l'épreuve (hypertension artérielle, épuissement 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 = VCO2/VO2) 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

FONCTION VENTILATOIRE AU REPOS

I/ PROPRIETES MECANIQUES

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 instertitiel par altération de la perméabilité vasculaire liée à la phase de décompression, car selon ELLIOTT, des microbulles emboli seraient fréquemment dans les capillaires pulmonaires sans entraîner de

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 aigue exsudative avec oedème alvéolaire, exsudat fibrineux, destruction des cellules endothéliales et des cellules alvéolaires épithéliales de type I ; cette phase est complétement 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).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 avions déjà fait cette remarque lors de la plongée HydraIX.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TABLEAU I R.P

	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 ($cmH_2O.l\text{-}1.s\text{-}1$)	2.92		2.05
Pente N2 ($\%FN_2.l\text{-}1CV$)	0.44		0.43
CF/CRF (%)	83		70
CF/CPT (%)	39		39

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TABLEAU II T.M

	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 ($cmH_2O.l\text{-}1.s\text{-}1$)	1.86		1.42
Pente N2 ($\%FN_2.l\text{-}1CV$)	0.55		0.42
CF/CRF (%)	65		84
CF/CPT (%)	32		38

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TABLEAU III S.I

	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 ($cmH_2O.l\text{-}1.s\text{-}1$)	1.63		1.81
Pente N2 ($\%FN_2.l\text{-}1CV$)	0.45		0.54
CF/CRF (%)	78		76
CF/CPT (%)	36		36

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

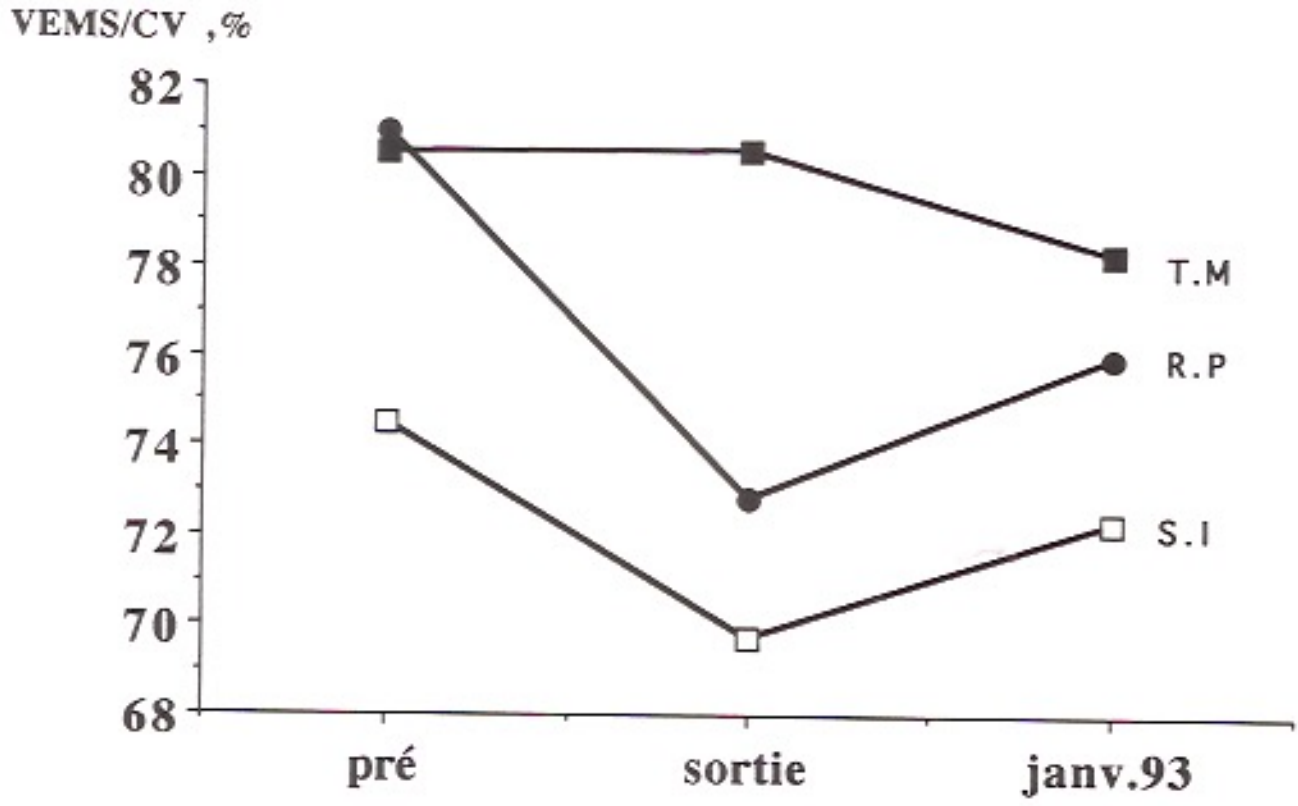


Fig.1

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

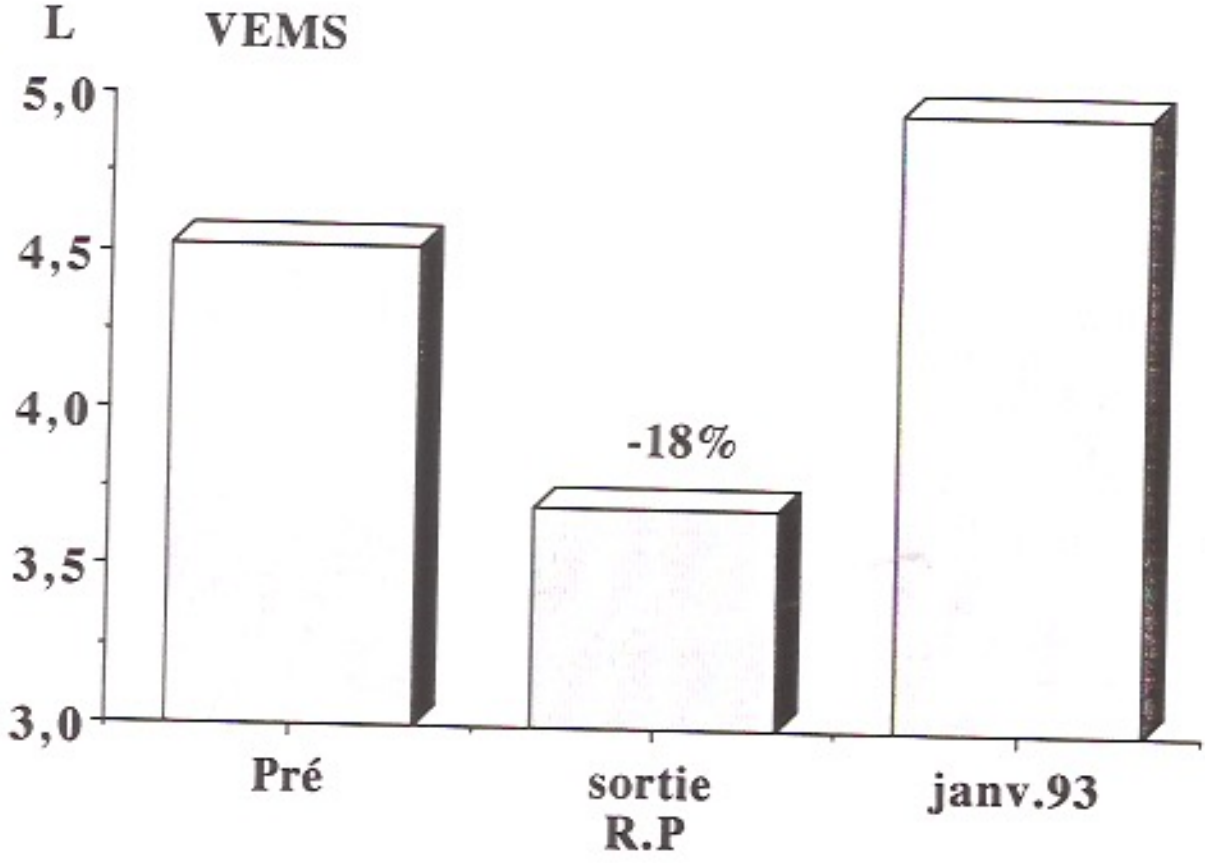


Fig.2

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

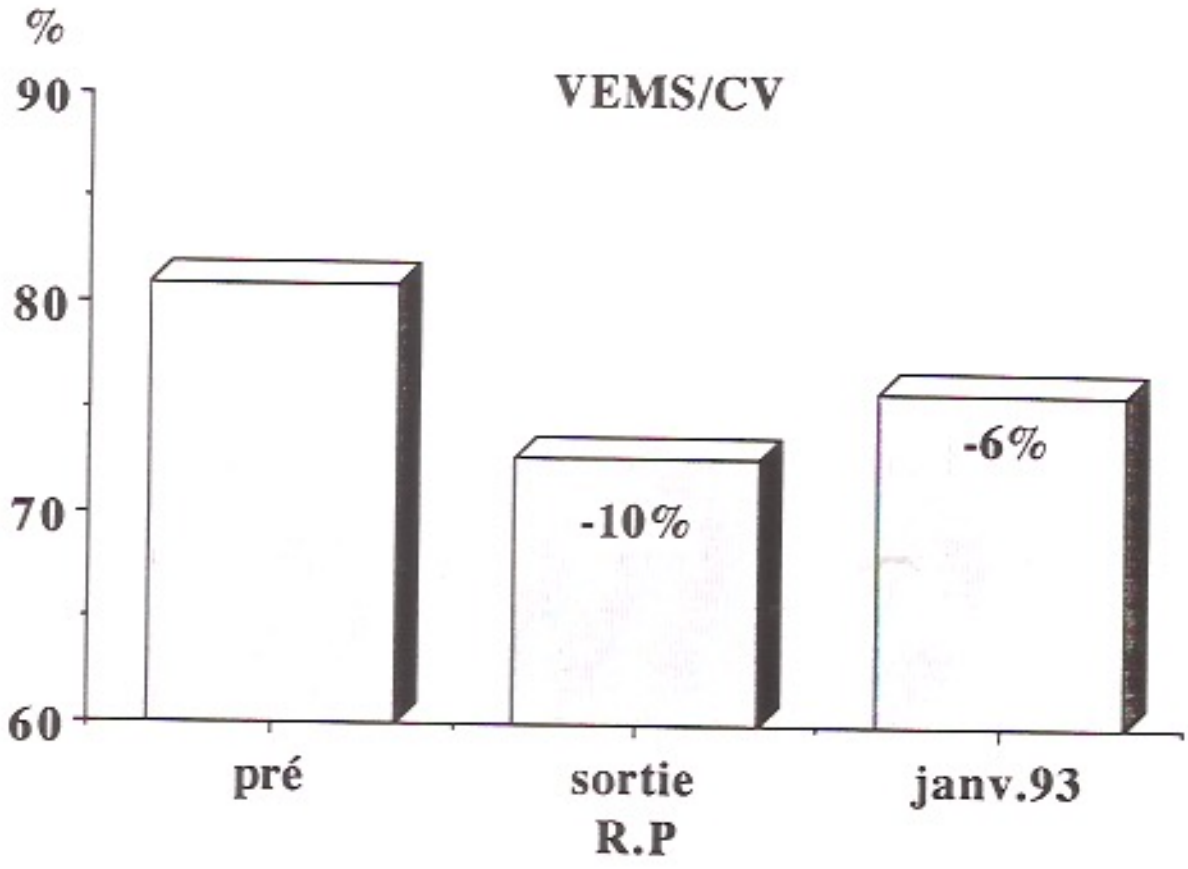


Fig.3

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

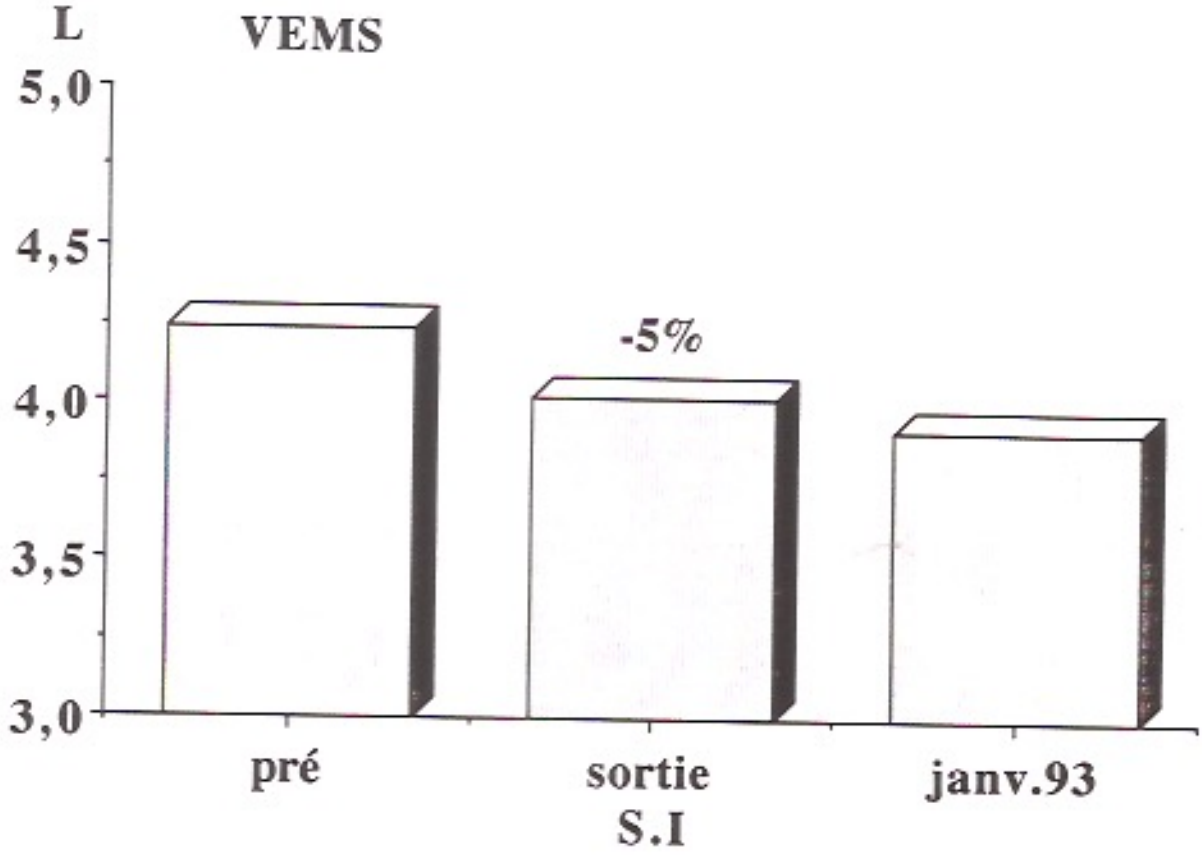


Fig.4

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

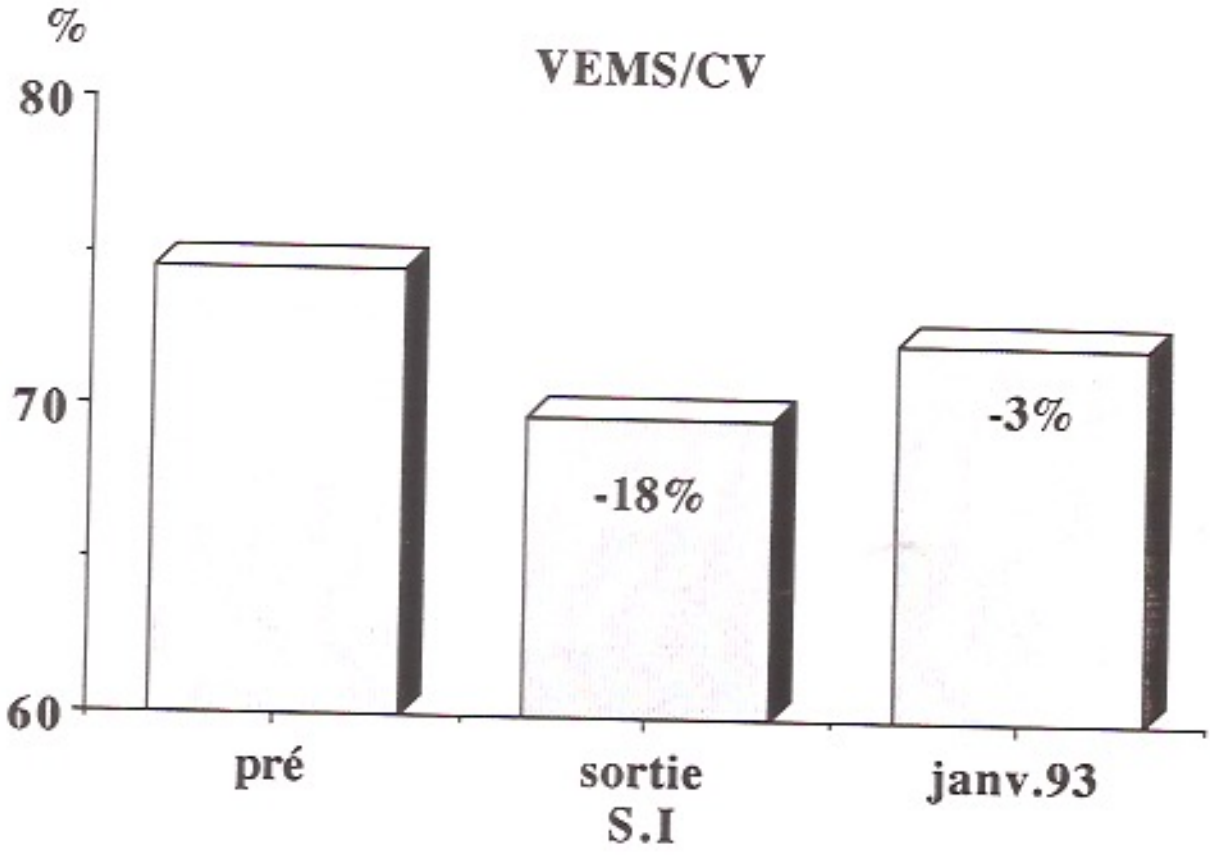


Fig.5

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

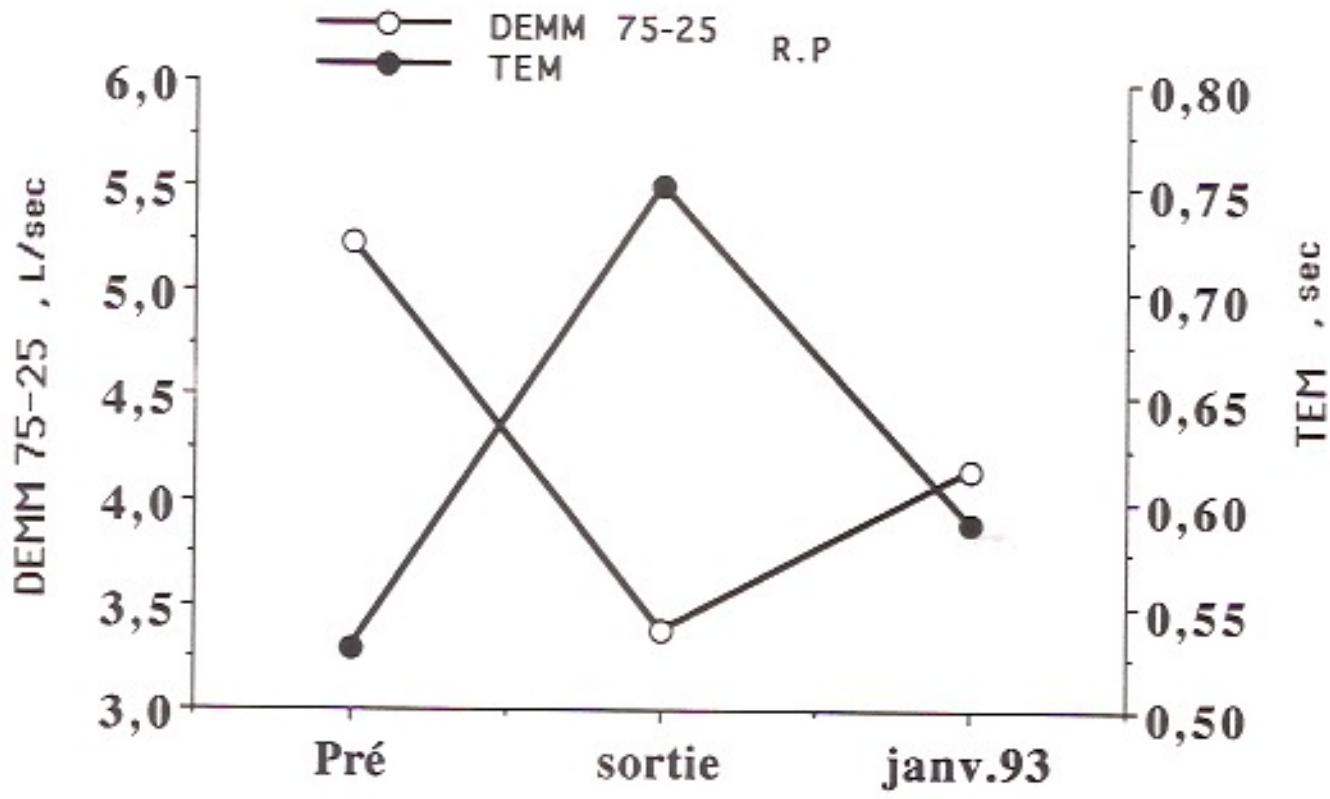


Fig. 6

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

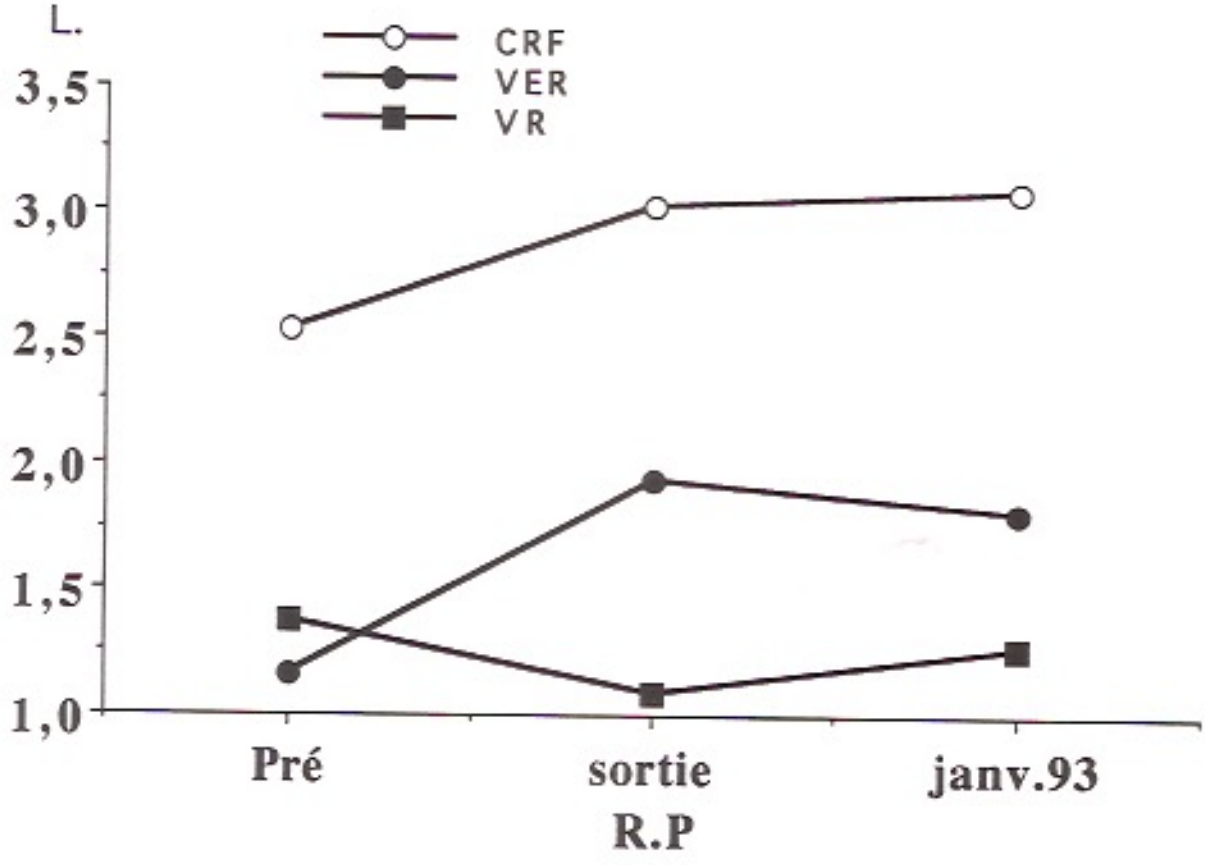


Fig.7

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

LIMITE INFERIEURE NORMALE (AYERS)

4.30

TABLEAU IV

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

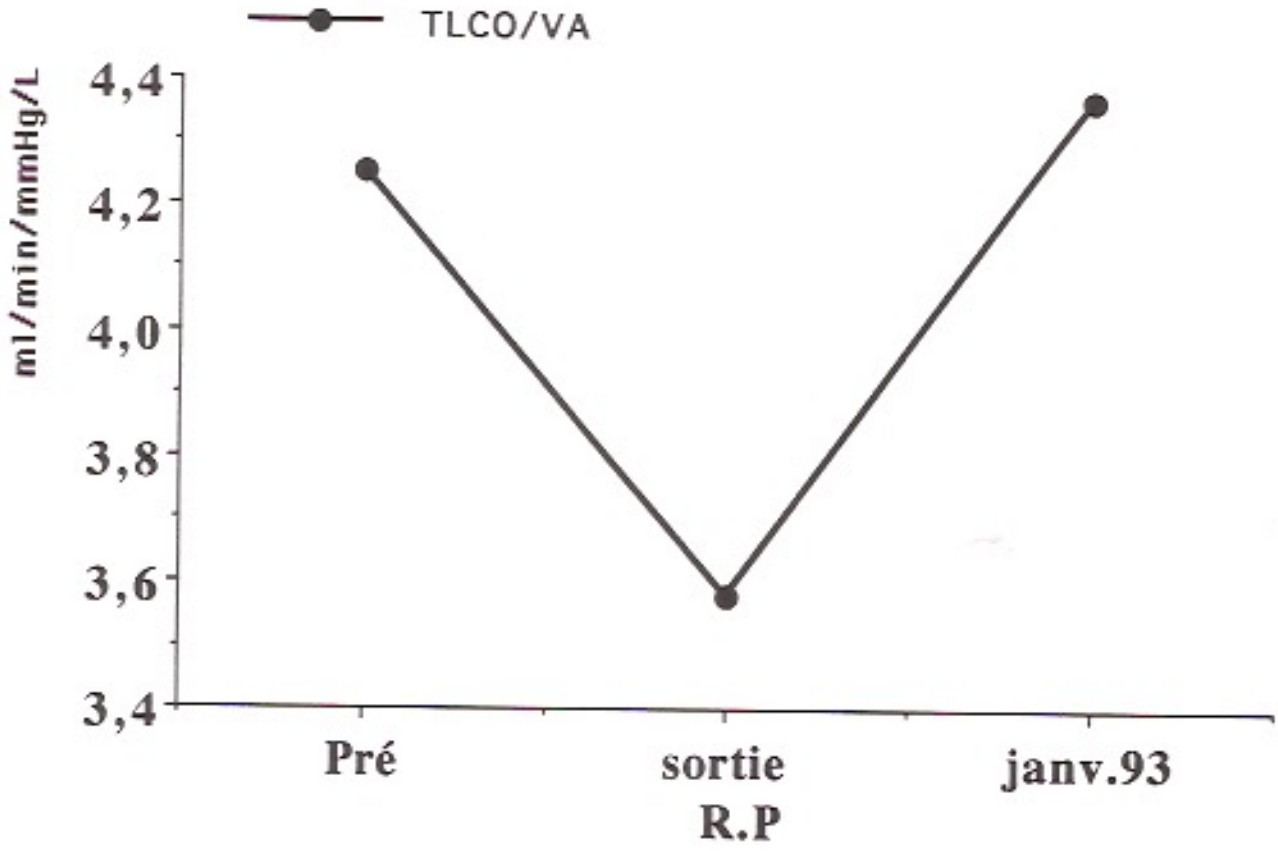


Fig. 8

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

SI

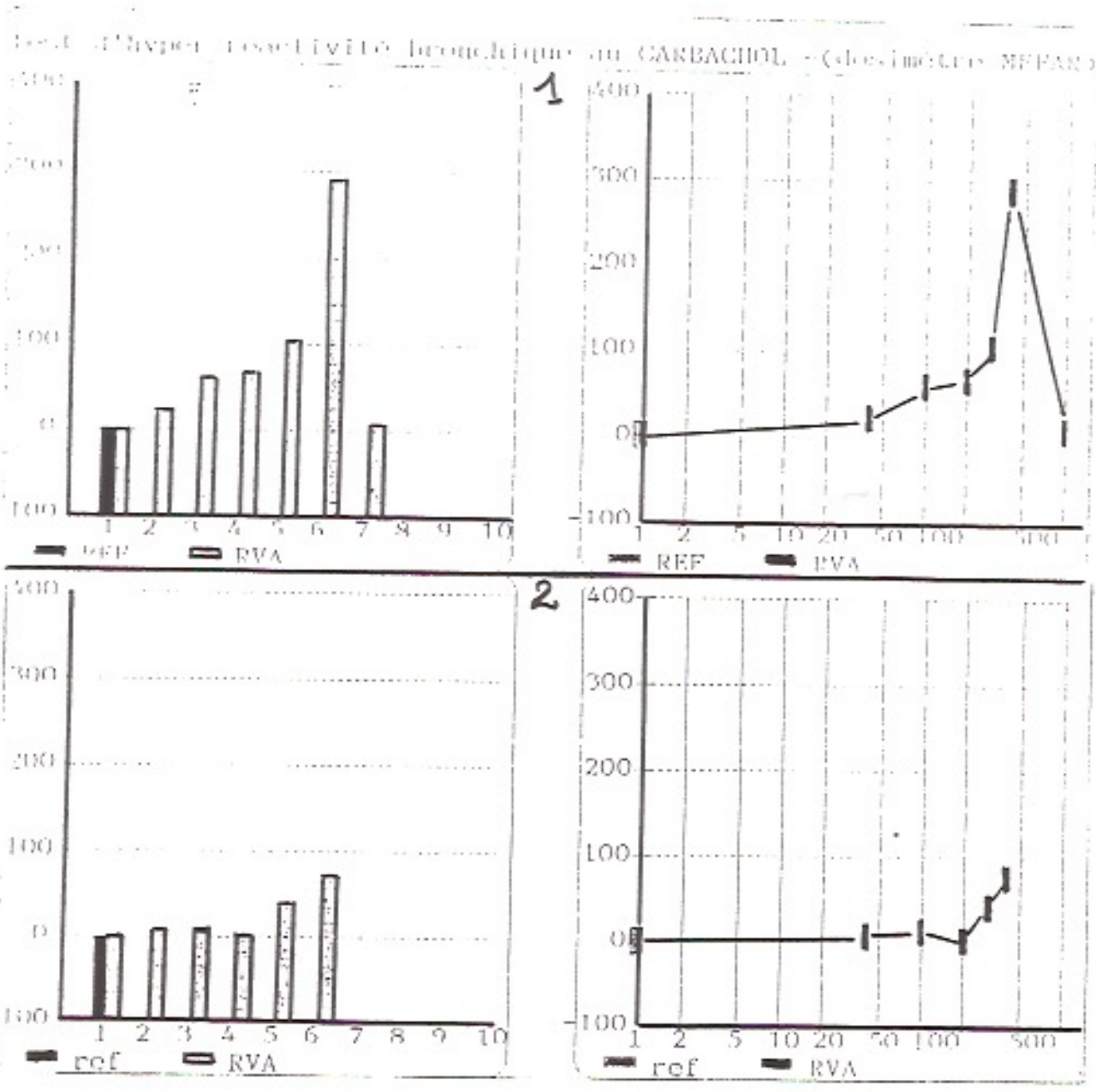


Fig. 9

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TM

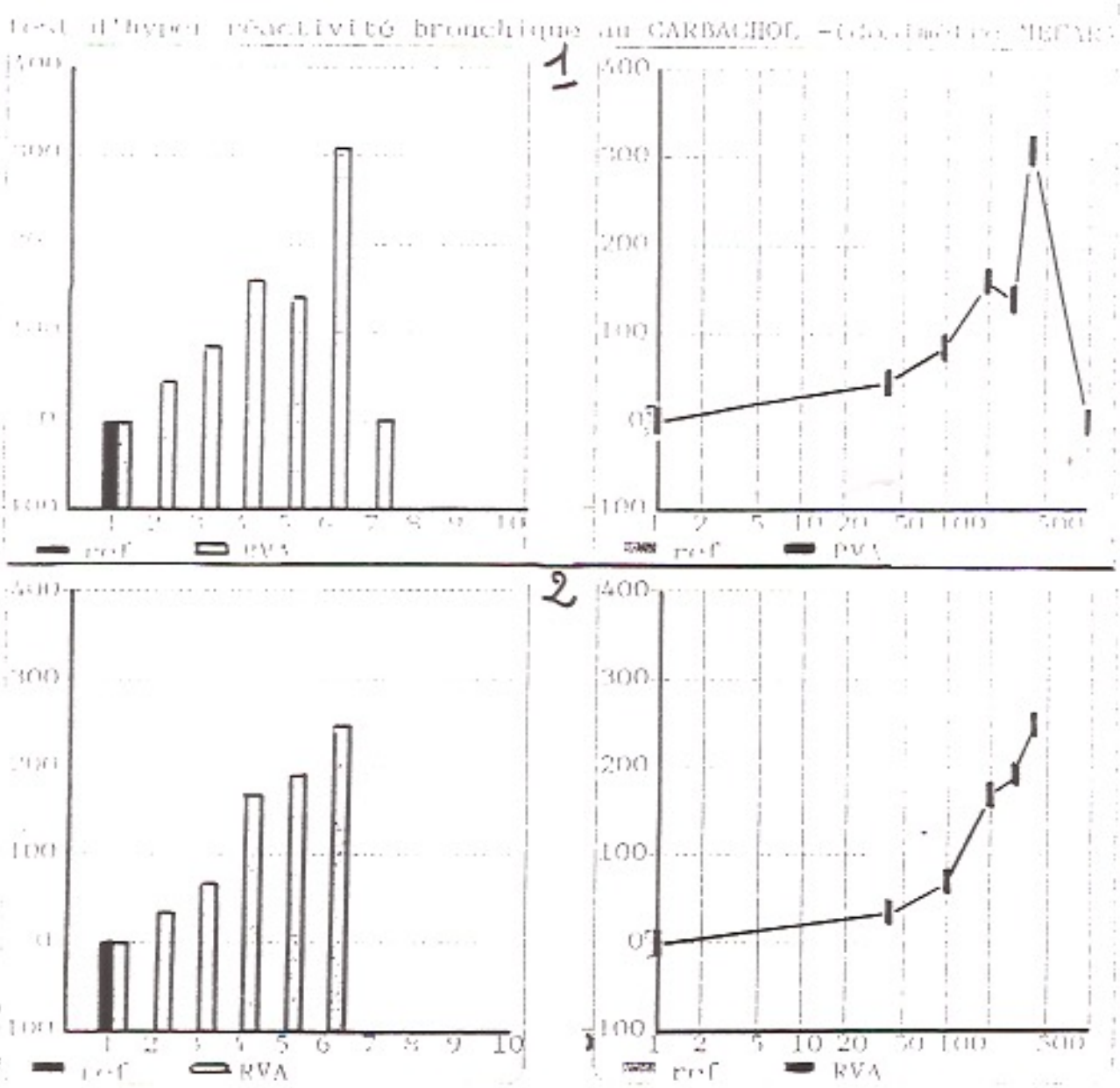


Fig : 10

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

R P

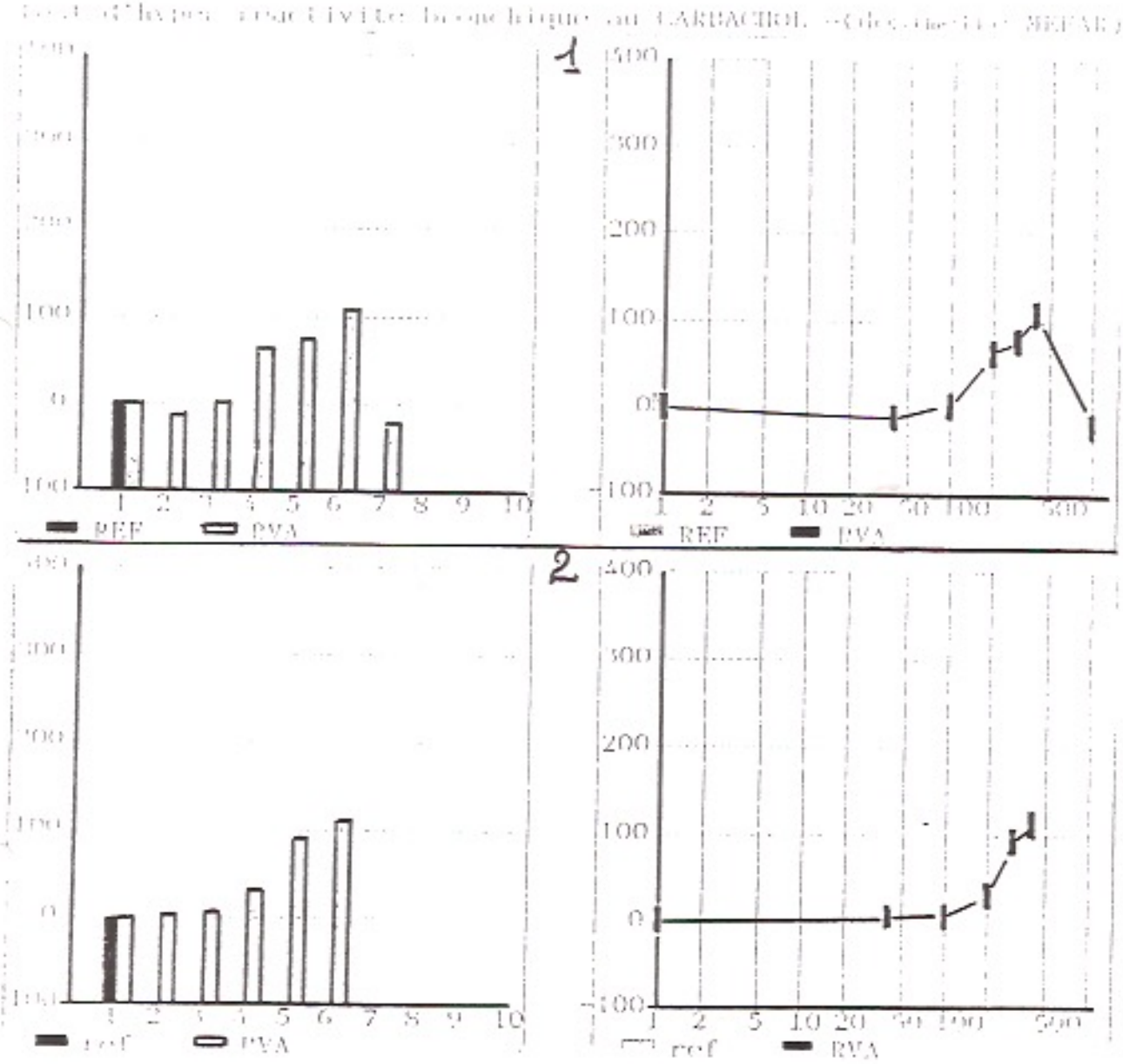


Fig.11

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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)			
	14,7	12,9	13,7
T.M	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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

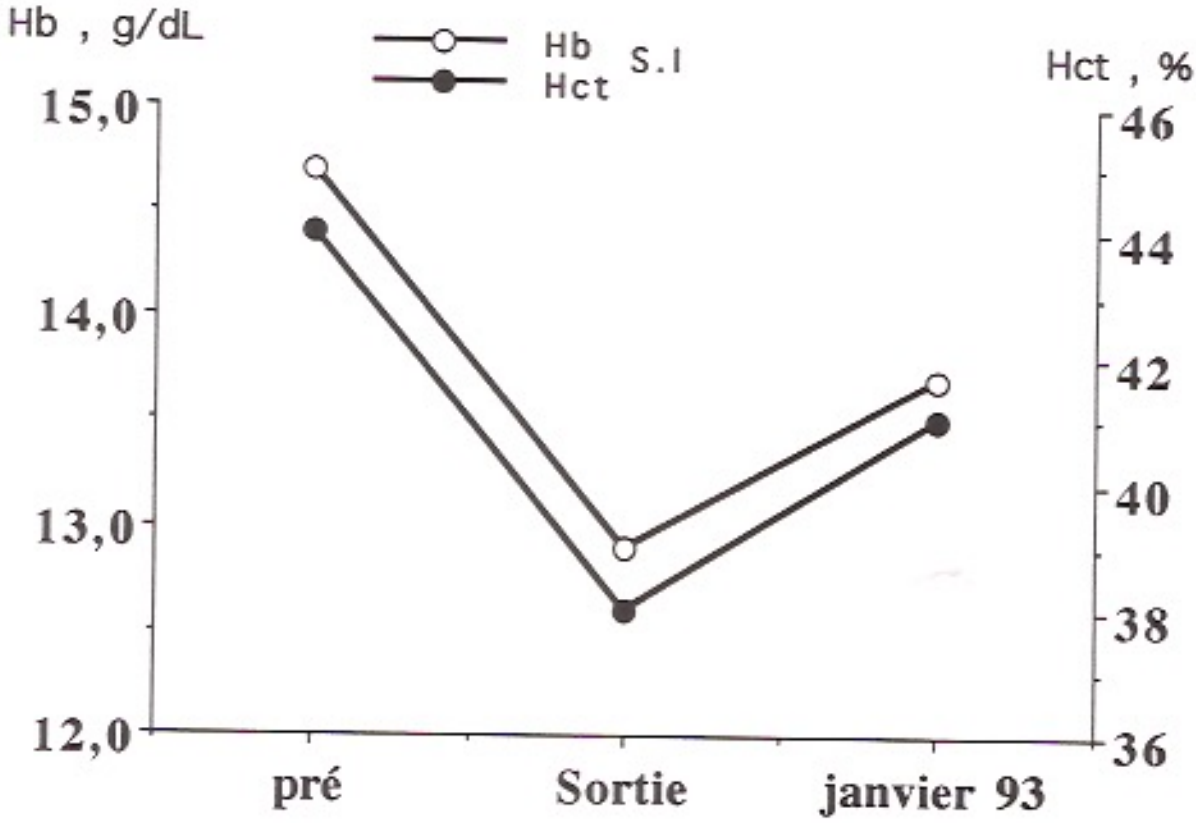


Fig.12

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

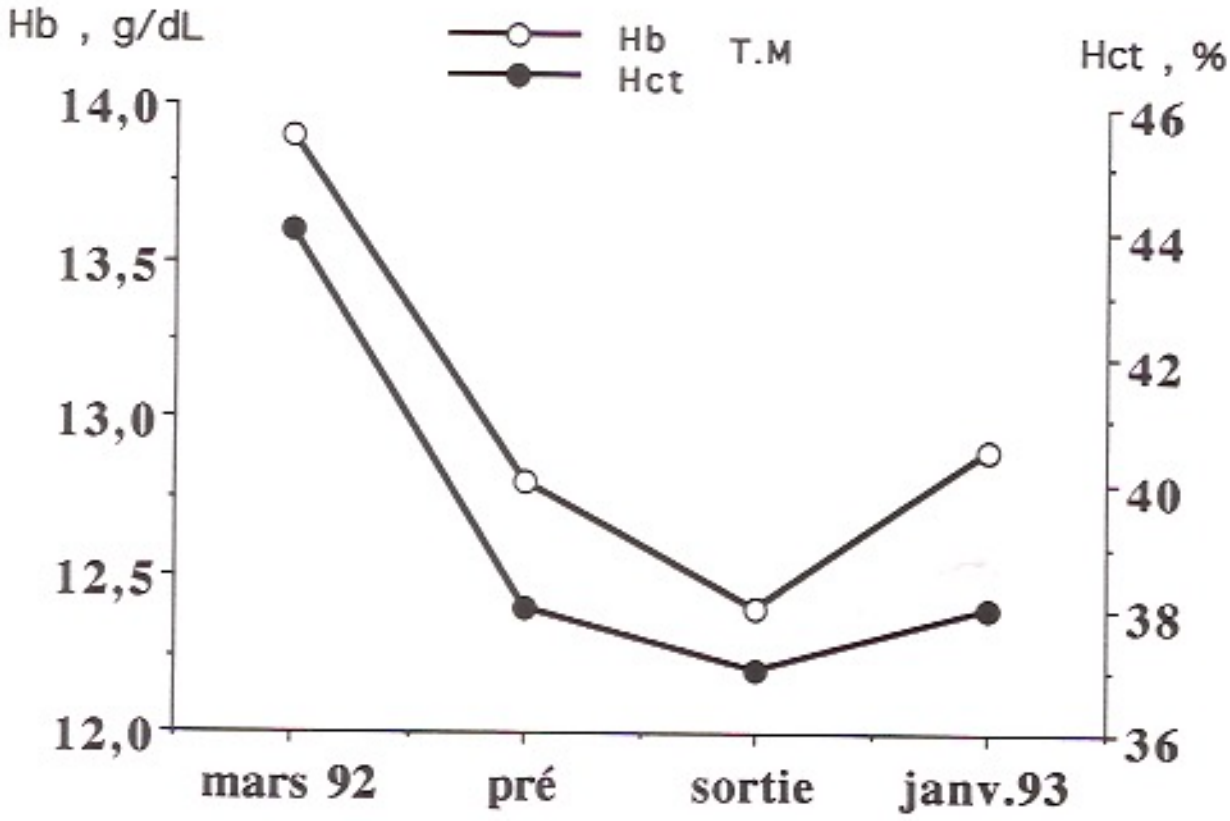


Fig.13

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

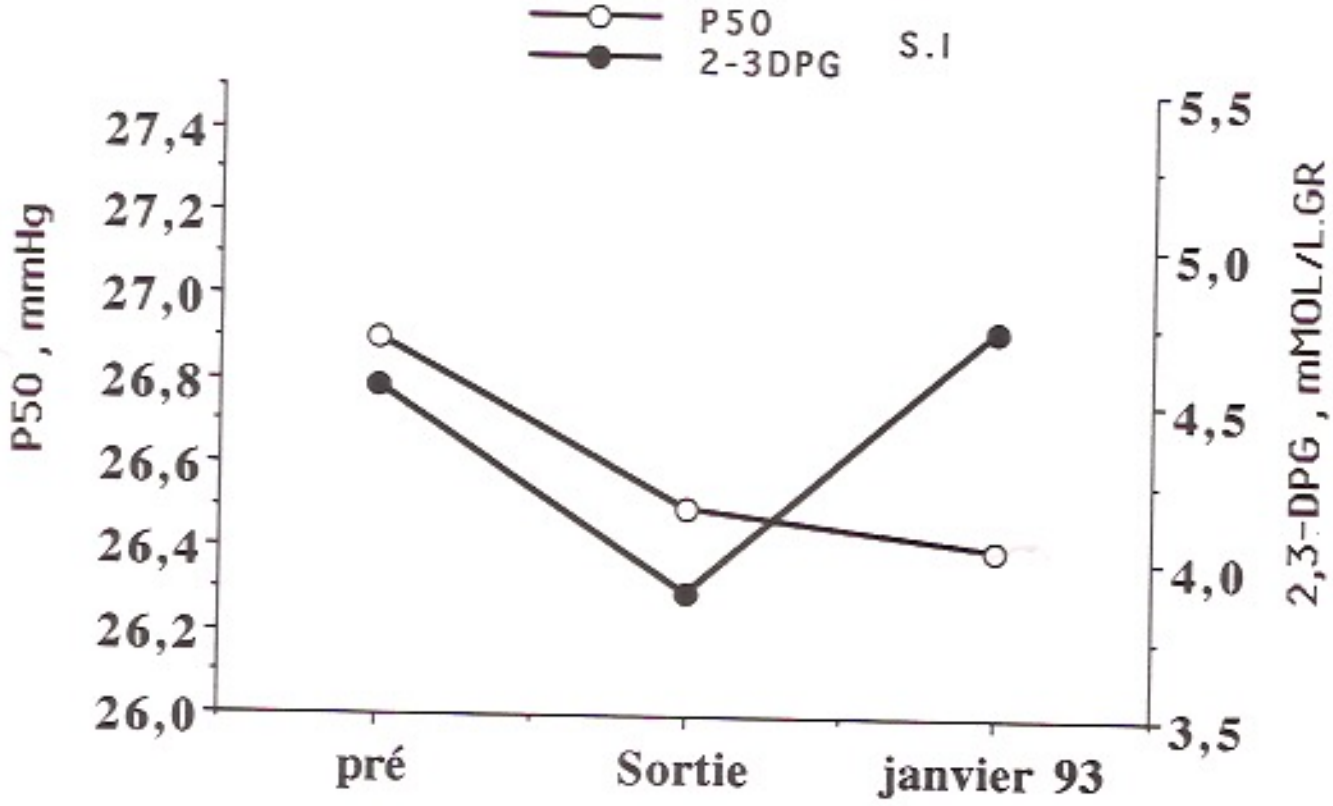


Fig.14

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'accentue 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 - N_2 - Ar - SF_6) 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 - O_2 hyperbare pouvait inhiber certaines enzymes hépatiques. Enfin, il ne faut pas négliger la vasoconstriction périphérique (hypertension artérielle+++), génant la circulation sanguine locale et donc pouvant participer au ralentissement.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 :

$$2\ ADP \xrightarrow{ADK} ATP + AMP$$

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 cardio-vasculaire (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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

	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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TABLEAU II S.I

	PRE	POST
Charge (Watt)	330	300
Fc max	187	190
PA max (cmHg)	20/9	24/10
Pouls O2 ($ml.syst^{-1}$)	18.9	16.8 (- 11 %)
VO2 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 (% VO2 max)	79	66
Lactate max ($mmol.l^{-1}$)	9.07	12
Taux d'élimination du lactate ($mmol.l^{-1}.min^{-1}$)	0.23 (valeurs normales = 0.23 - 0.31)	0.29
Ammoniémie max ($\mu mol.l^{-1}$)	99.7	141.3

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TABLEAU III T.M

	PRE	POST
Charge (Watt)	210	240
Fc max	179	180
PA max (cmHg)	20,5/9	22/10
Pouls O2 ($ml.syst^{-1}$)	13.3	14.1
VO2 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 (% VO2 max)	77	51
Lactate max ($mmol.l^{-1}$)	8.59	10.6
Taux d'élimination du lactate ($mmol.l^{-1}.min^{-1}$)	0.29 (valeurs normales = 0.23 - 0.31)	0.22
Ammoniémie max ($\mu mol.l^{-1}$)	73.5	120

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TABLEAU IV R.P

	PRE	POST
Charge (Watt)	240	270 (1 min)
Fc max	140	140
PA max (cmHg)	21/9	22/9
Pouls O2 ($ml.syst^{-1}$)	20.5	19.0
VO2 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 (% VO2 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 ($\mu mol.l^{-1}$)	92.9	100.8

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

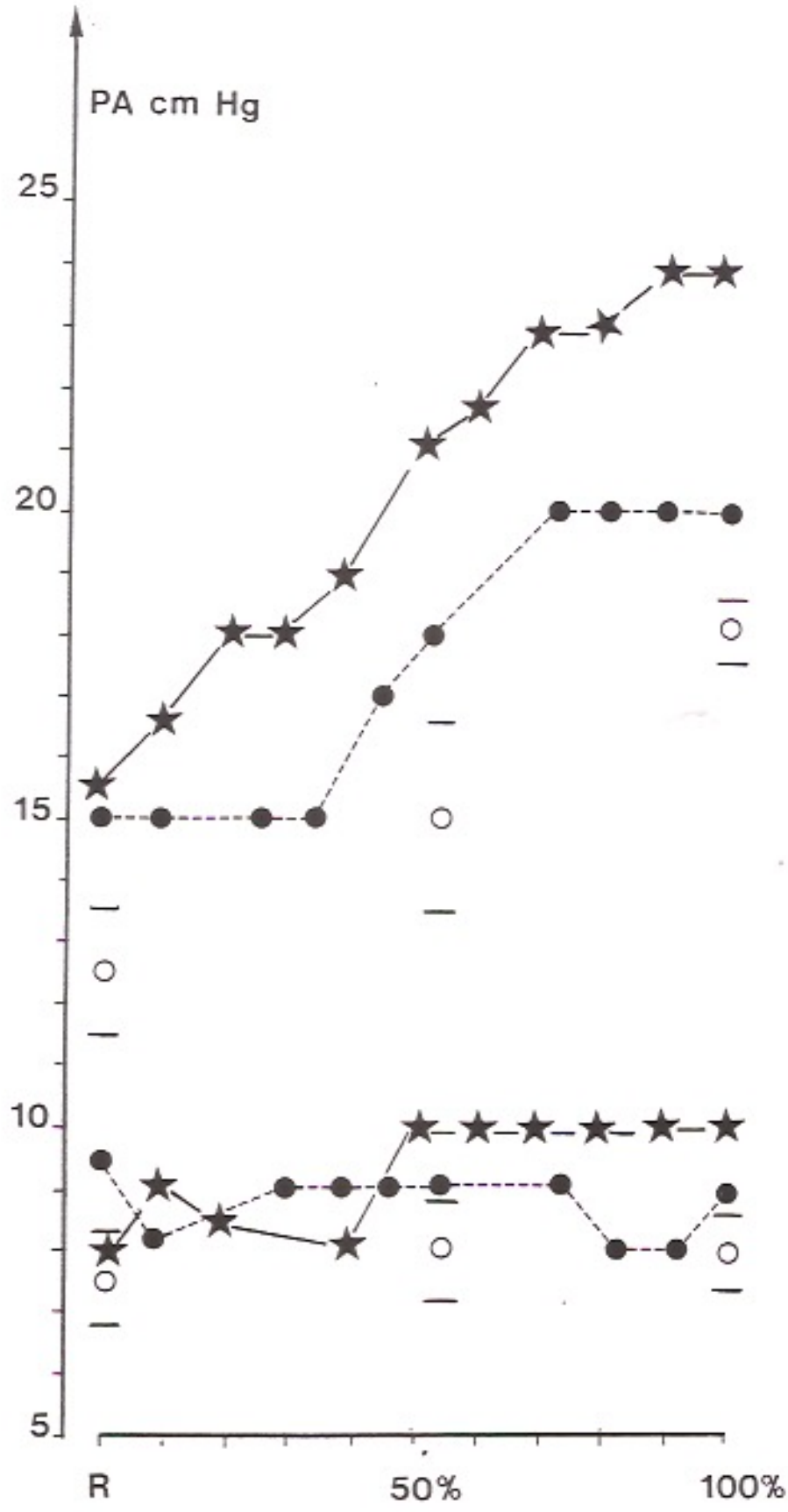


Fig.1 SI

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

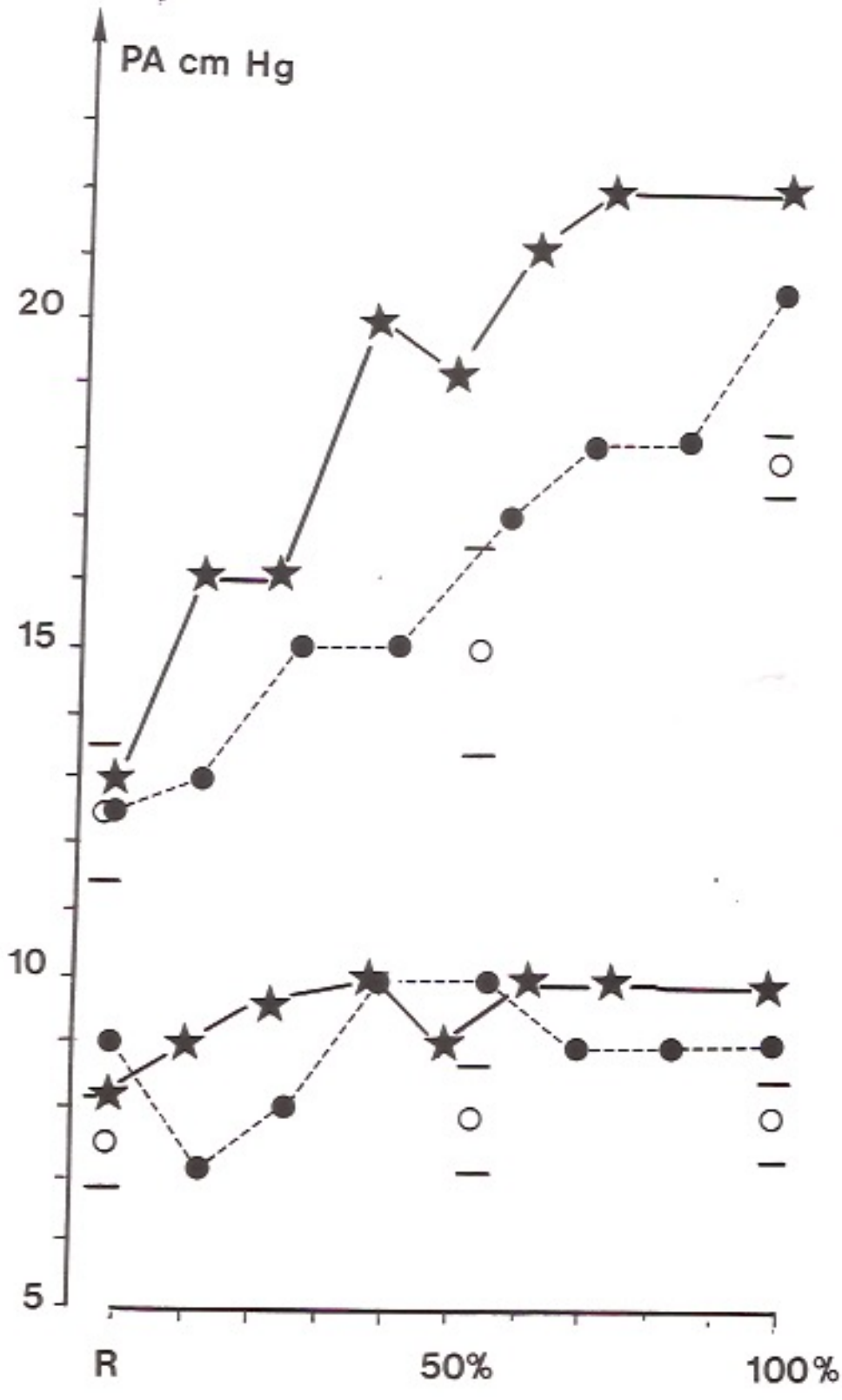


Fig.2 TM

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

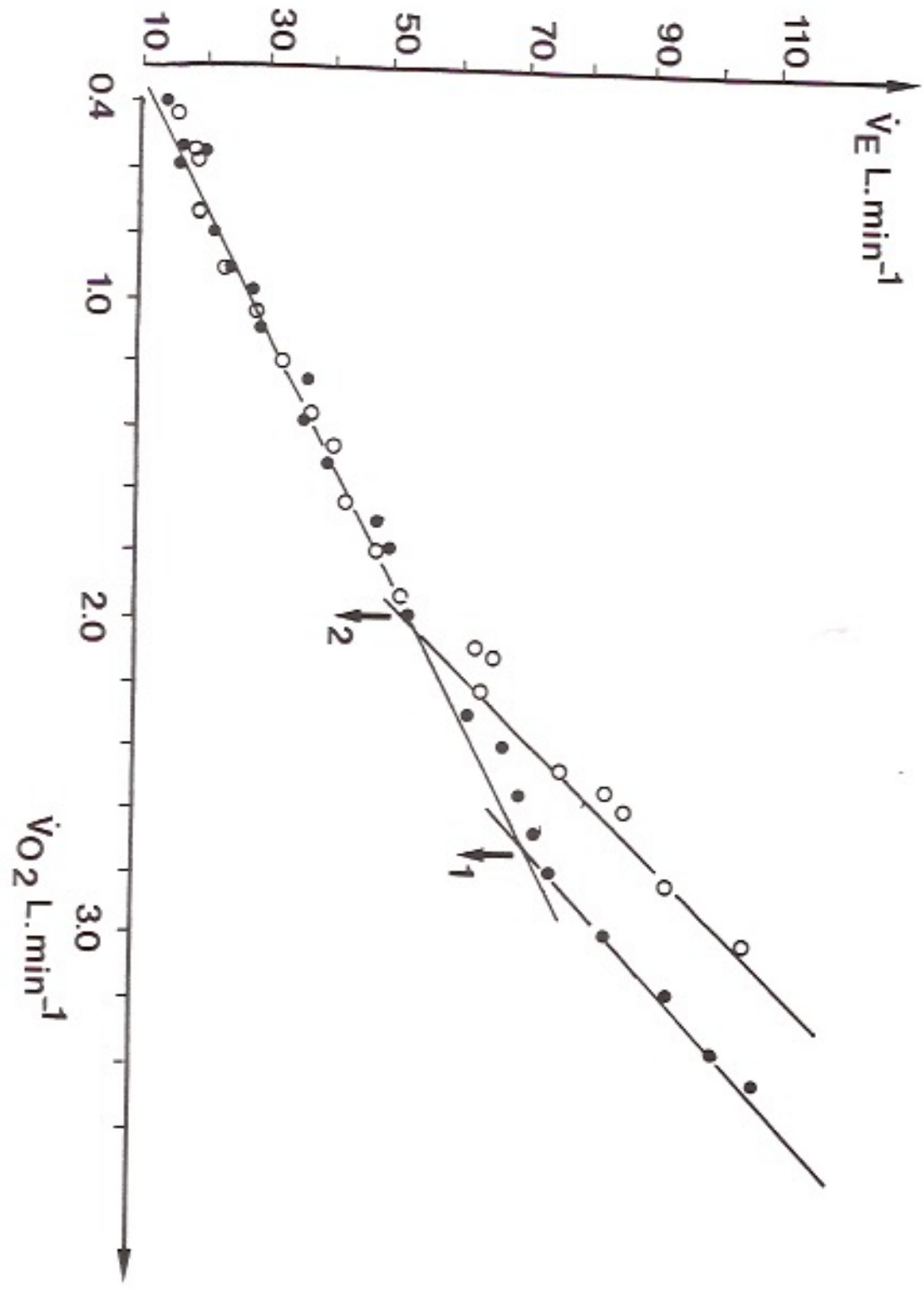


Fig. 3 SI

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

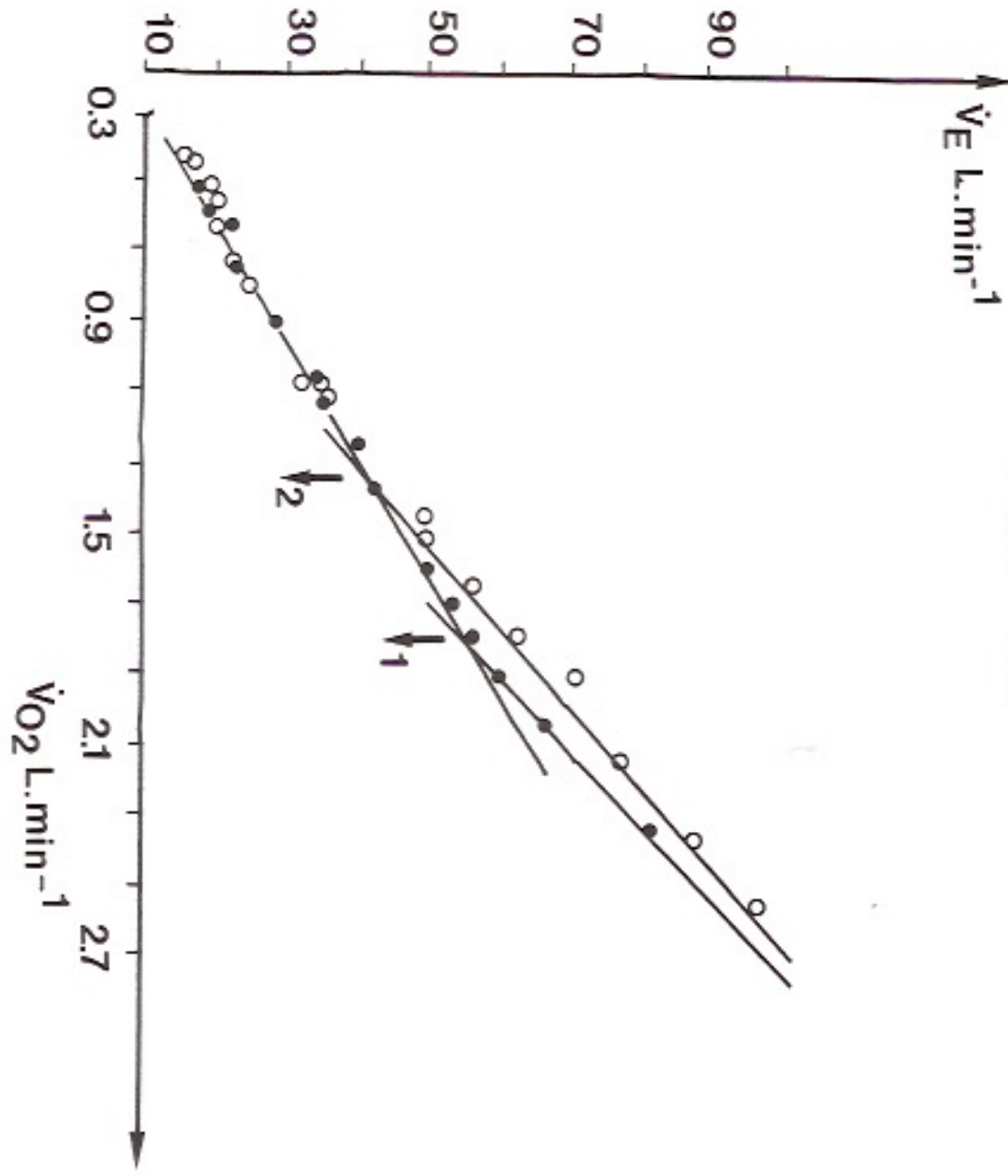


Fig.4 TM

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

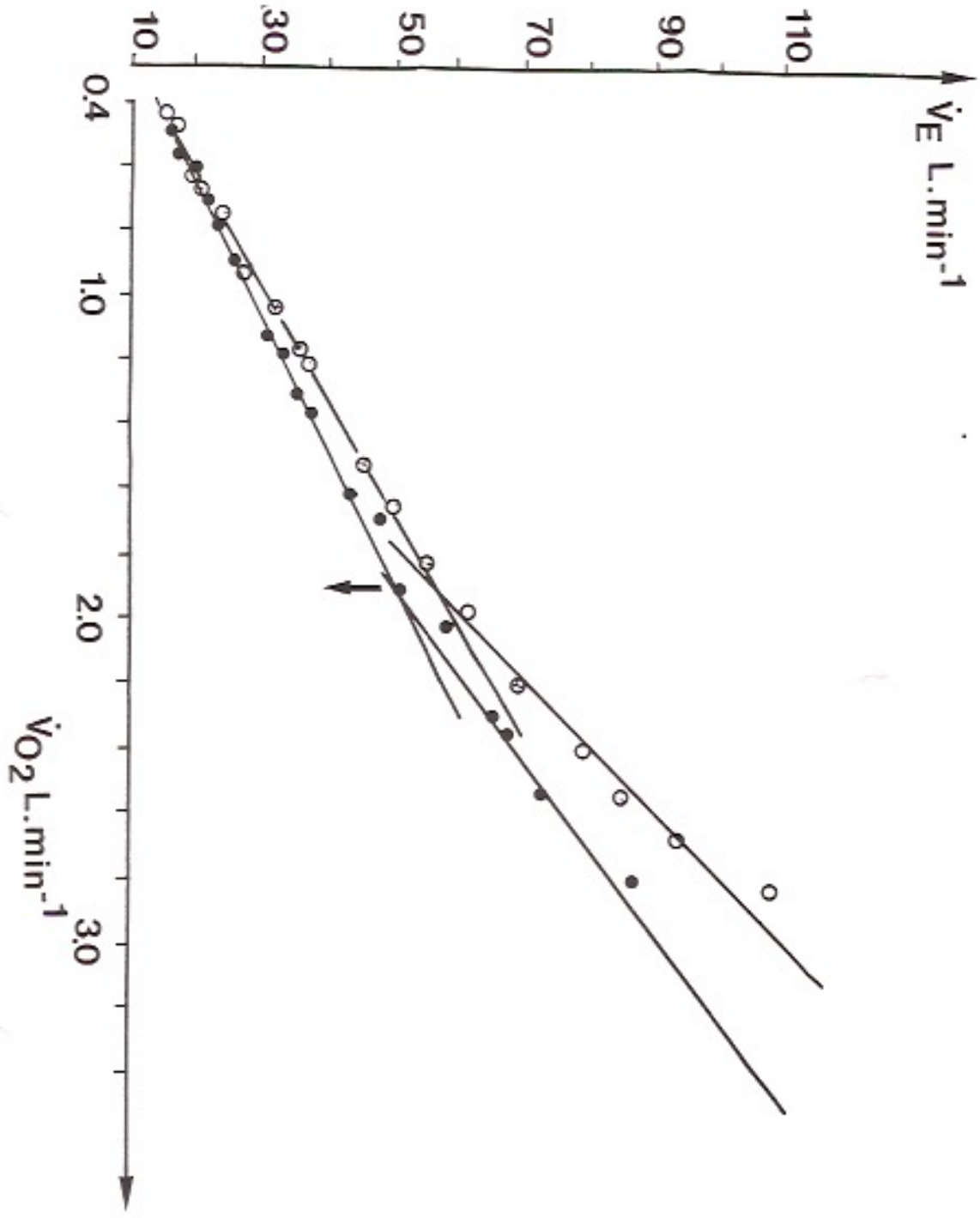


Fig. 5 RP

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

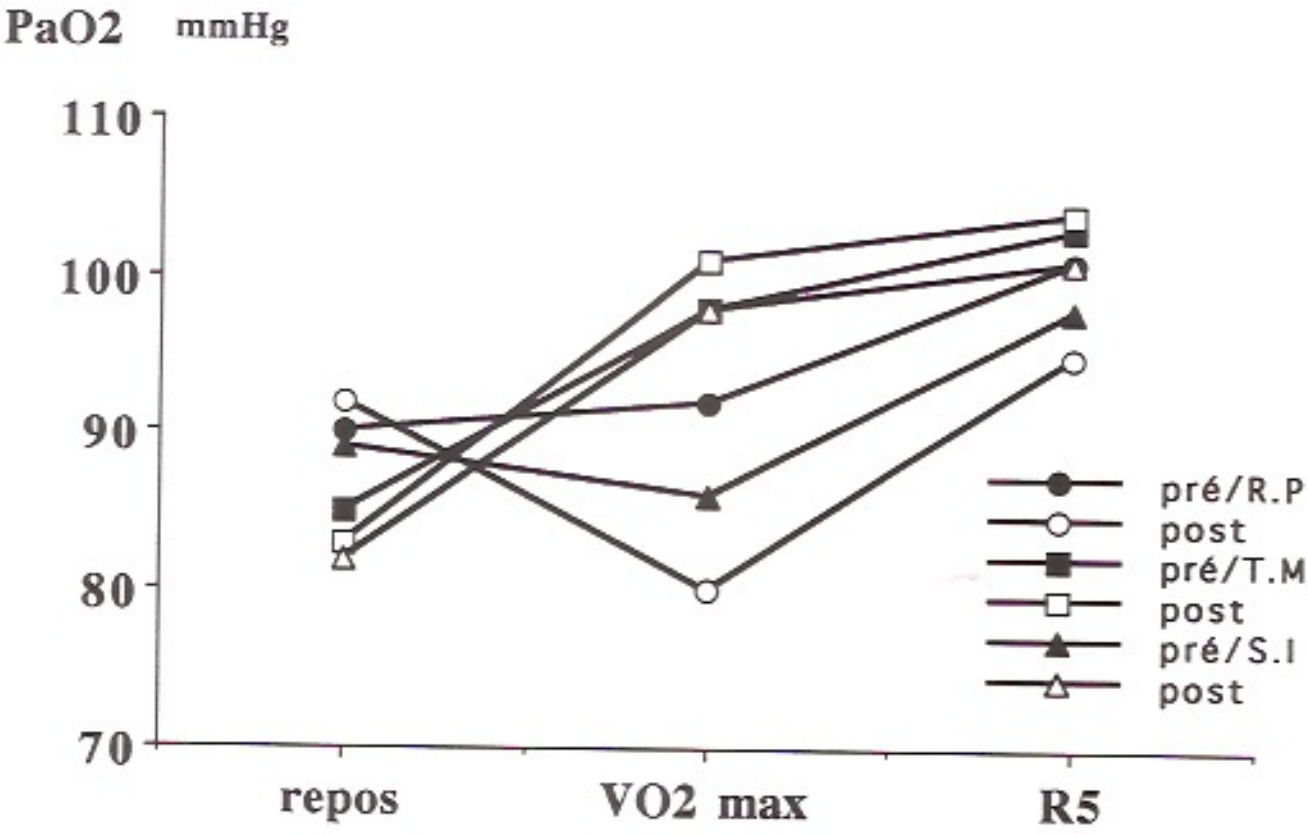


Fig. 6

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

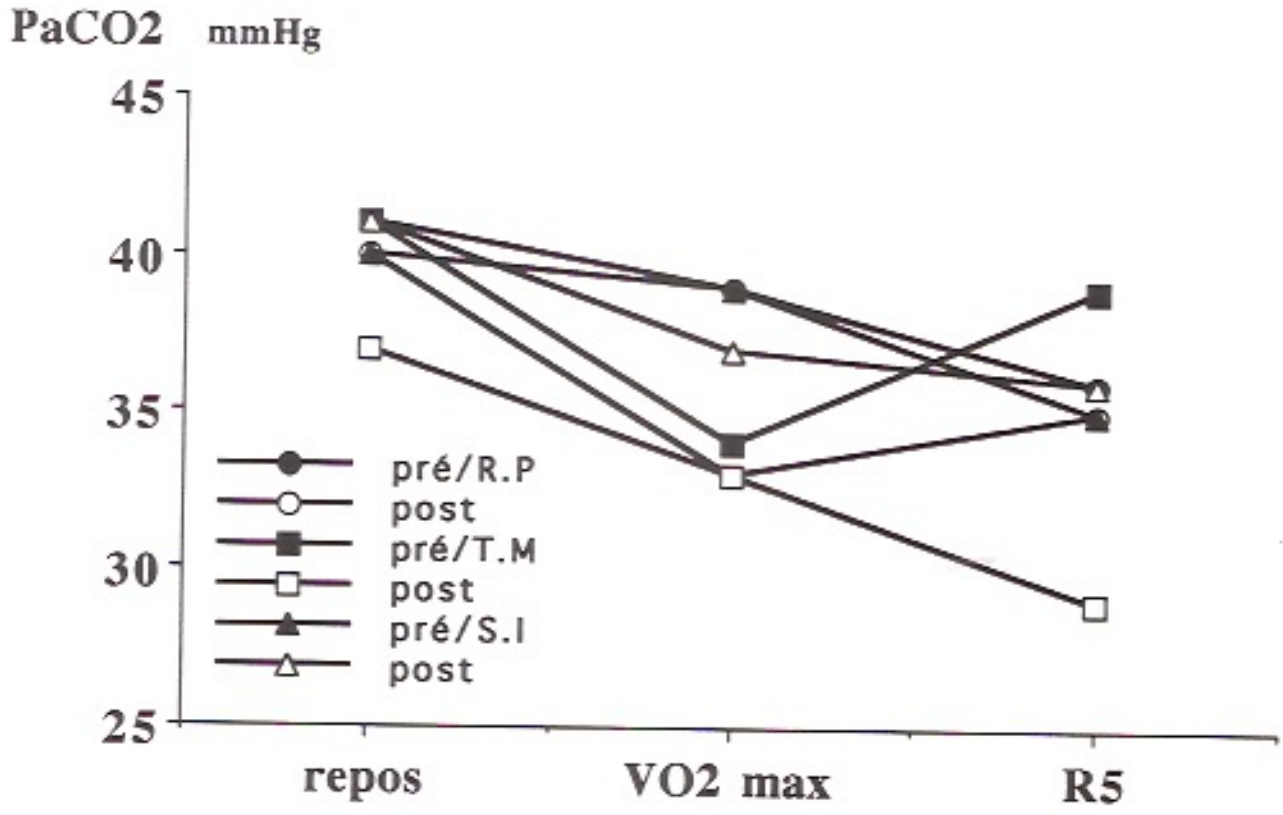


Fig.7

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

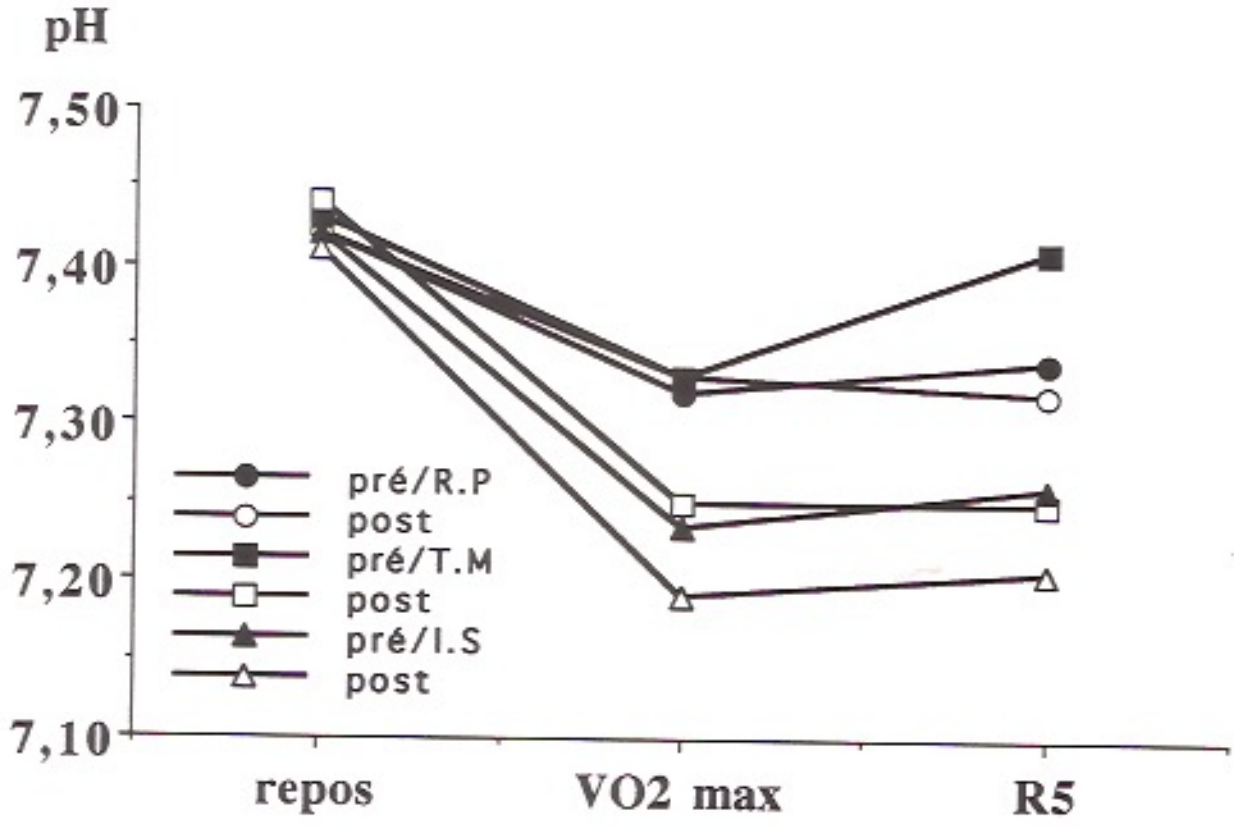


Fig. 8

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Hydra 10 : Développement de la plongée à très grande profondeur

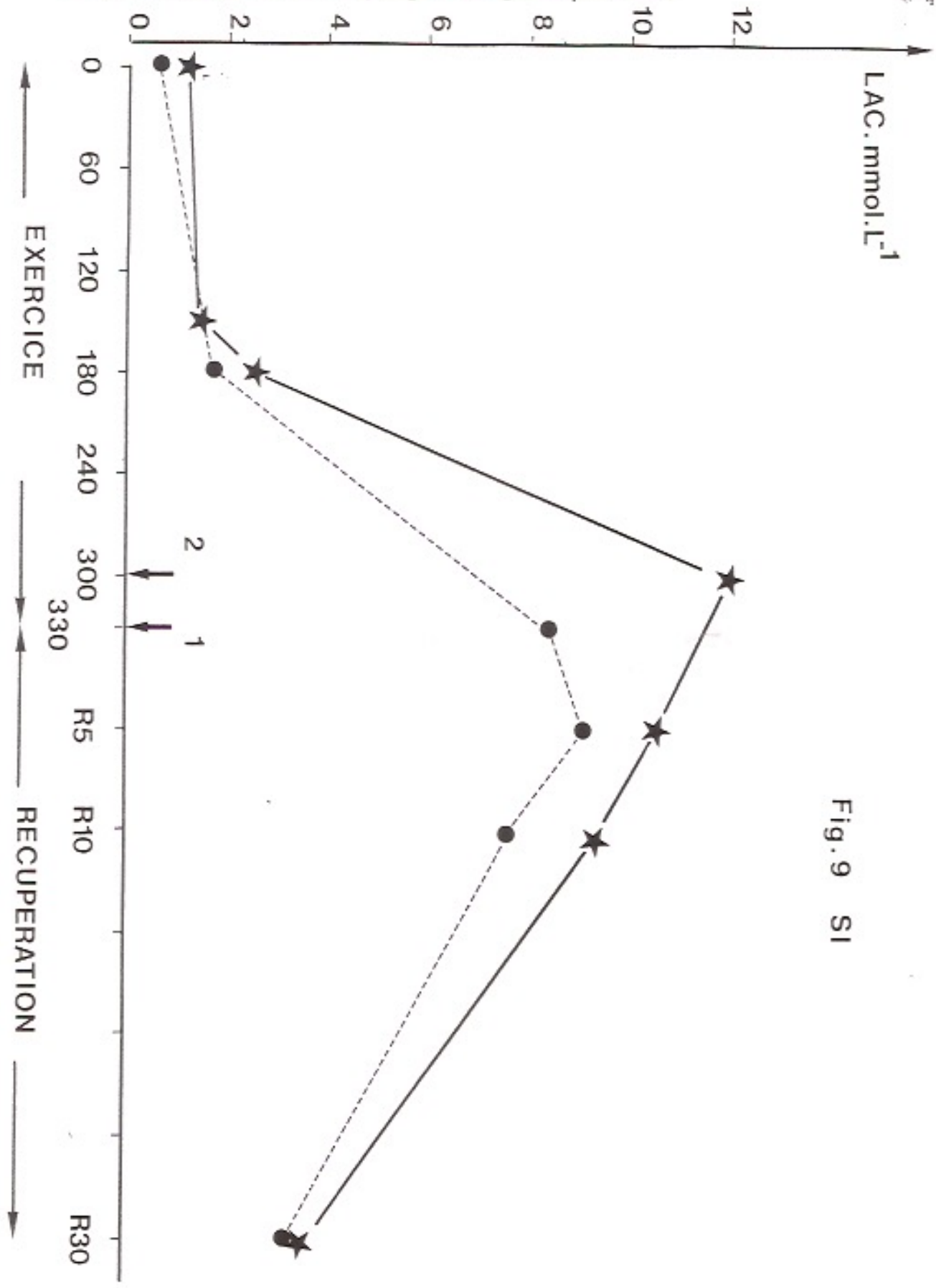


Fig.9 SI

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

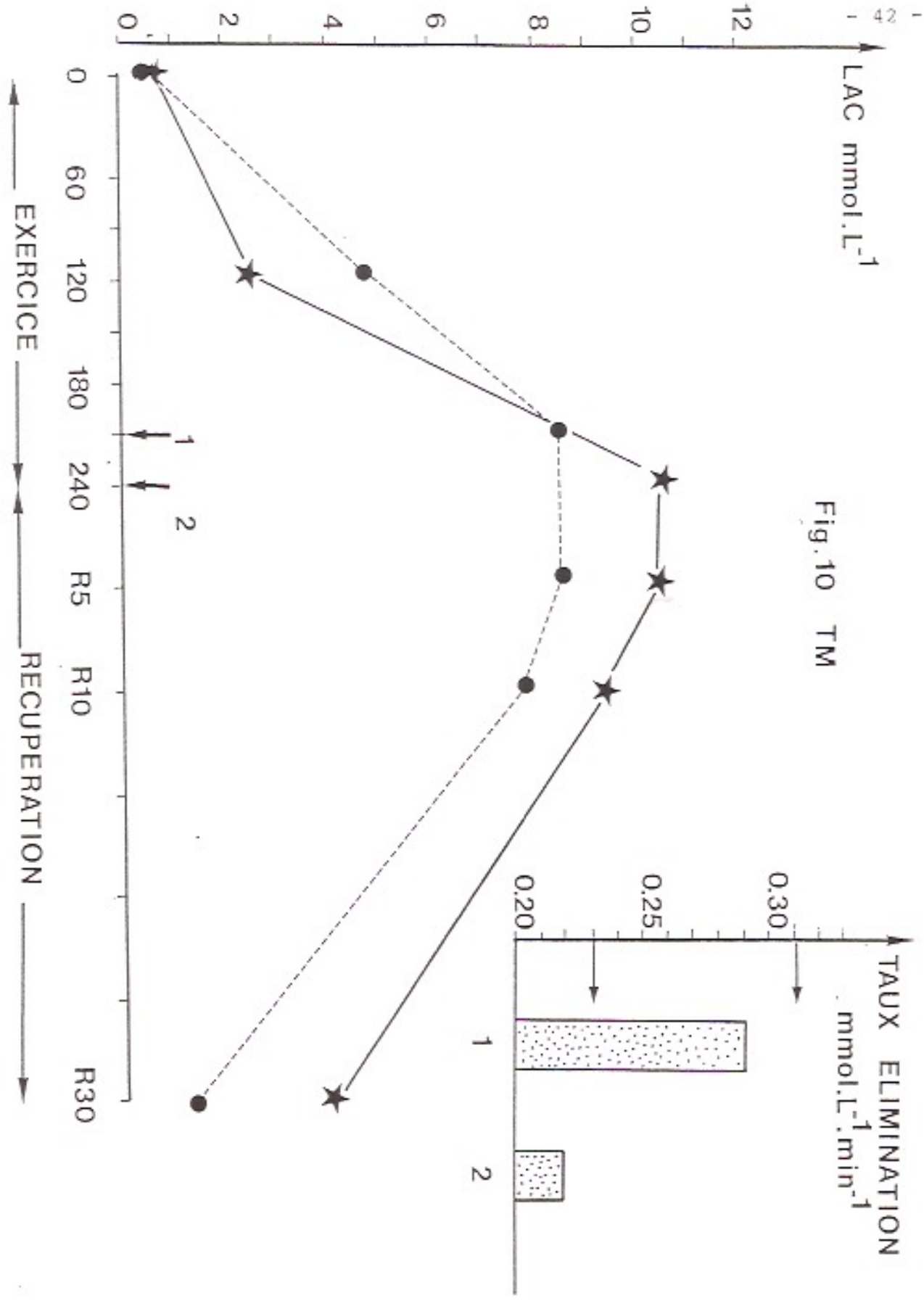


Fig. 10 TM

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

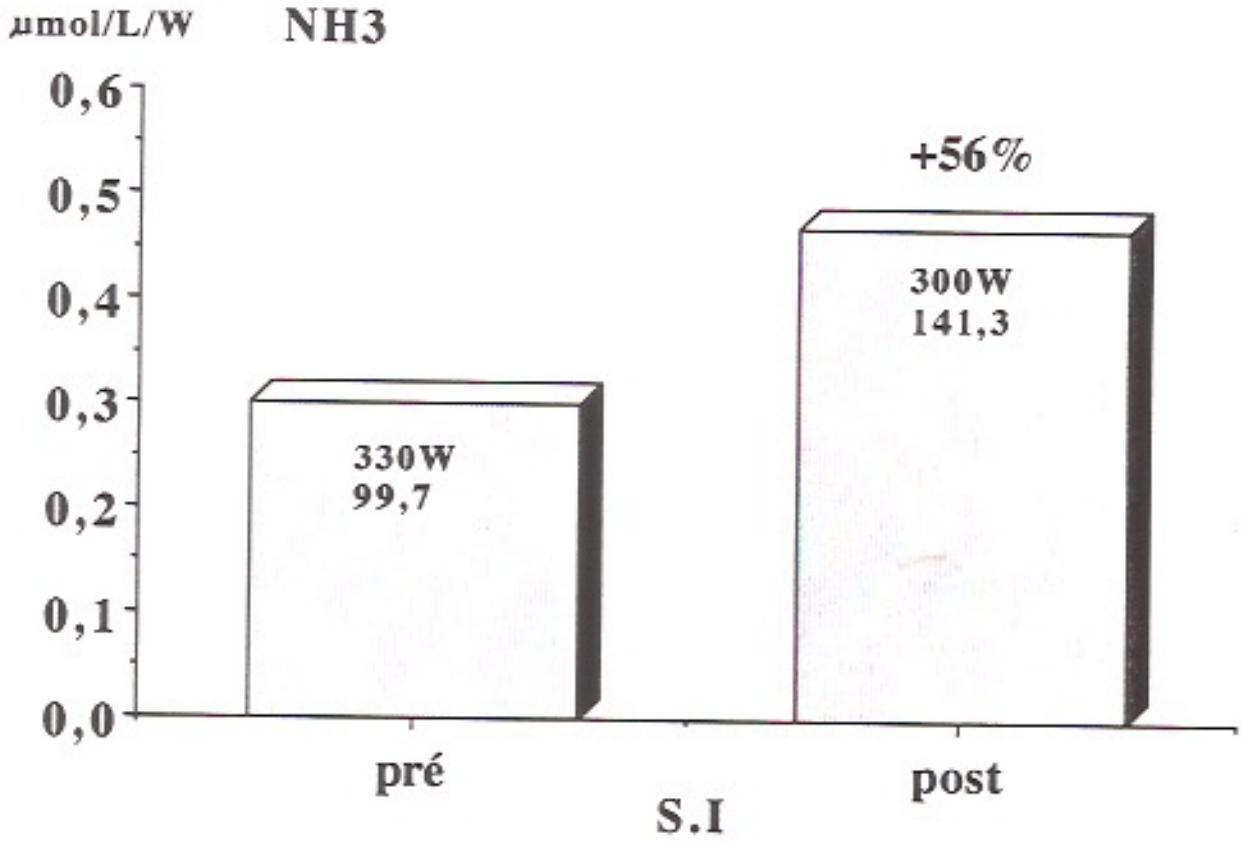


Fig.11

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

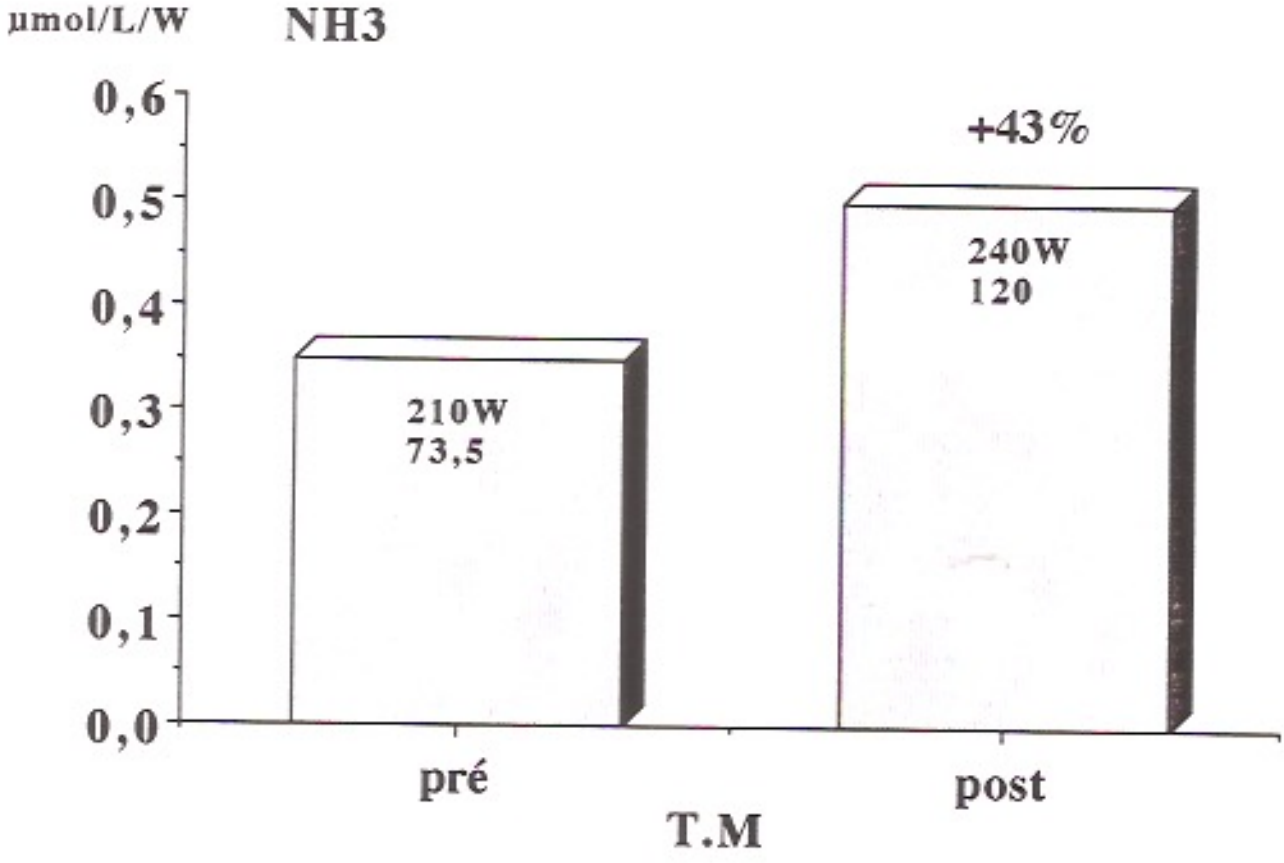


Fig.12

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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. CJ. LAMBERTSEN 1971, p. 487-500.
Academic Press, New Yord - 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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-O_2 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 O_2 toxicity in man
J. Appl. Physiol. 1968, 24, p. 537-543.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XVIII

IMAGERIE PAR RESONNANCE MAGNETIQUE DU SYSTEME NERVEUX CENTRAL

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 avions 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 (bicommisural)
Epaisseur de coupes	: 7 mm jointives
Matrice	: 256 x 256
Excitation	: 1

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 parait 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 ultèrieurement.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 apparait 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).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 Médécine 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

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XIX

BILAN OPHTALMOLOGIQUE

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 - Antécedents 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 .

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

L'examen du fond d'oeil a trouvé un petit remaniement de l'epithélium 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 à23", à droite un léger retard avec inhomogénéité de la perfusion choroidienne dans le territoire de l'artère ciliaire postéro-interne,de discréts effets fenêtre 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 deuxieme 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 fenêtre 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 trés 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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

TROISIEME PLONGEUR :Mr PEILHO

Trente neuf ans-Quatorze ans de plongée professionnelle-Pas d'antécedent medicaux ni d'accident de plongée de type 1 et 2. Ambliopie modérée ancienne del'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 ambliopie ,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 avions là aussi demandé un bilan cardiovasculaire révélé normal .
Etant donné l'existence de cette amblyopie et l'absence de vision stéréoscopique ,nous avions 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 précedent.
L' angiographie a retrouvé les mêmes anomalies sans élément nouveau .

CONCLUSIONS :

1. Chez ces trois plongeurs ,les deux bilans etant 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 nottament 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 .

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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'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 trés tôt apres la fin de la plongée d' essai HYDRA 10 .

Pr P. METGE - Dr A. COLLET - Dr O. PLATON

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

CHAPITRE XX

EVOLUTION DES SEUILS DE PERCEPTION AU COURS DE LA PLONGEE HYDRA 10 POUR QUATRE SAVEURS FONDAMENTALES

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Laboratoire d'Analyse Sensorielle
NESTLE

EVOLUTION DES SEUILS DE PERCEPTION

AU COURS DE LA PLONGEE

HYDRA X

POUR QUATRE SAVEURS FONDAMENTALES

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 leurres (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	**eau**	D6	D5	D4	**eau**	D3	D2	**eau**	D1

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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 différentes 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).

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

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.

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Evolution des seuils de détection de Bernard Gardette

Chlorure de sodium

(profondeur)

date	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
22/10									0 m
05/11									
10/11									
12/11									
16/11									
30/11									
03/12									

Caféine

(profondeur)

date	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
22/10									0 m
05/11	Test non réalisé								
10/11									
12/11									
16/11									
30/11									
03/12									

Saccharose

(profondeur)

date	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
22/10									0 m
05/11	Test non réalisé								
10/11									
12/11									
16/11									
30/11									
03/12									

Acide citrique

(profondeur)

date	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
22/10									0 m
05/11									
10/11									
12/11									
16/11									
30/11									
03/12									

Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Evolution des seuils de détection de Renée Eigenmann

Chlorure de sodium

(profondeur)

date	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
22/10									0 m
05/11									
10/11	test non réalisé								
12/11									
16/11	test non réalisé								
30/11									
03/12									

Caféine

(profondeur)

date	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
22/10									0 m
05/11	test non réalisé								
10/11	test non réalisé								
12/11									
16/11	test non réalisé								
30/11									
03/12									

Saccharose

(profondeur)

date	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
22/10									0 m
05/11	test non réalisé								
10/11	test non réalisé								
12/11									
16/11	test non réalisé								
30/11									
03/12									

Acide citrique

(profondeur)

date	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
22/10									0 m
05/11									
10/11	test non réalisé								
12/11									
16/11	test non réalisé								
30/11									
03/12									

Direction Scientifique - Octobre 1993

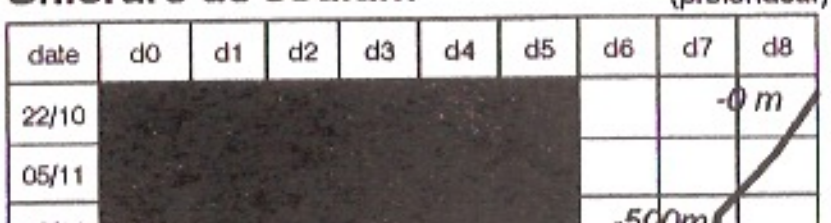
COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

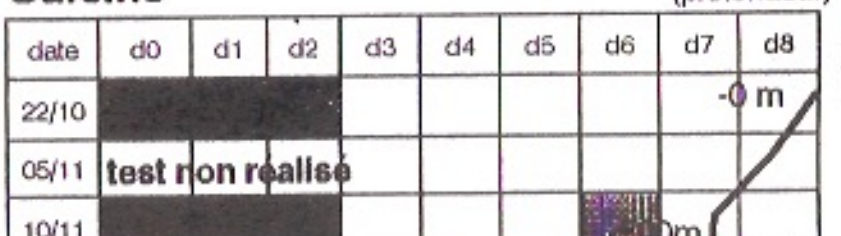
Hydra 10 : Développement de la plongée à très grande profondeur

Evolution des seuils de détection de Serge Icart

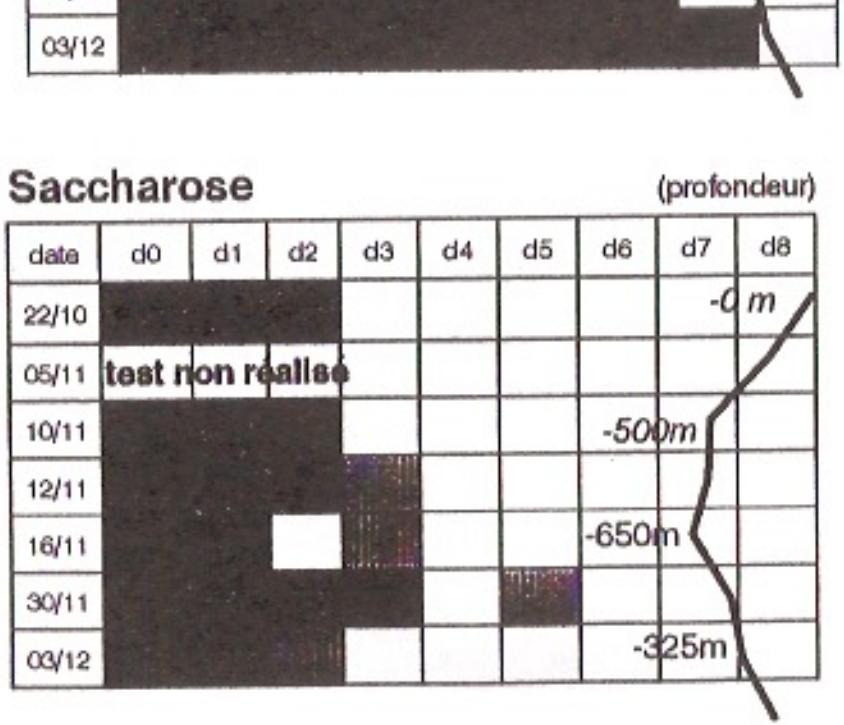
Chlorure de sodium



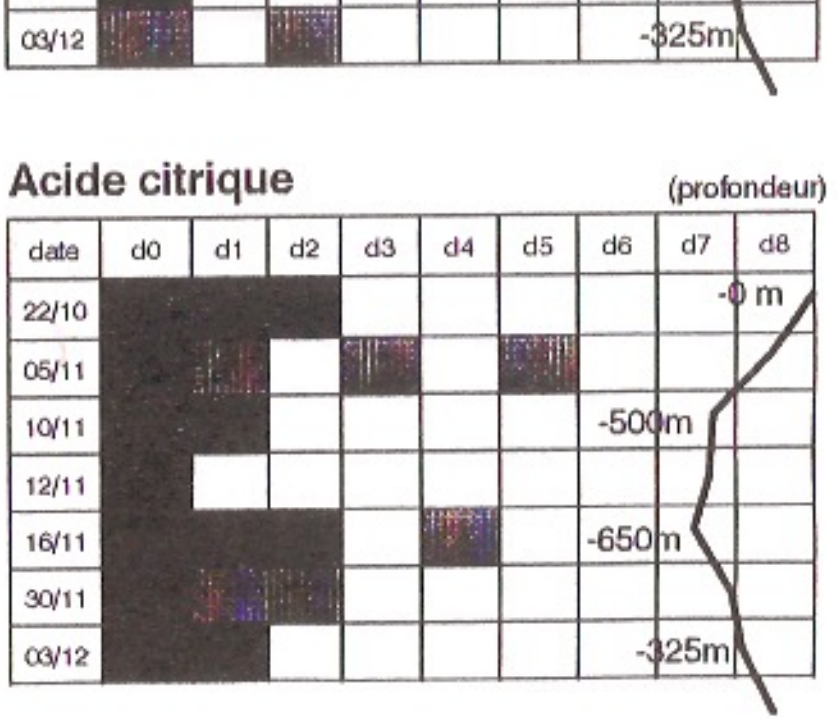
Caféine



Saccharose



Acide citrique



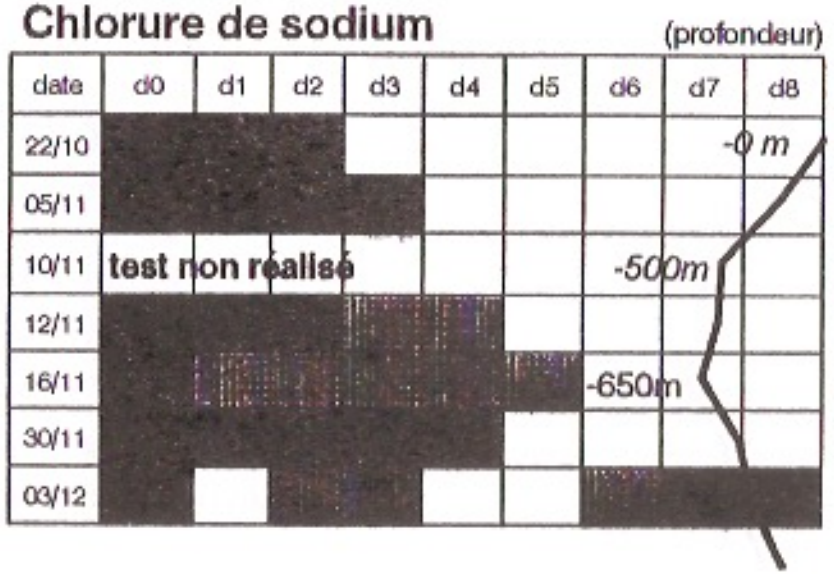
Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

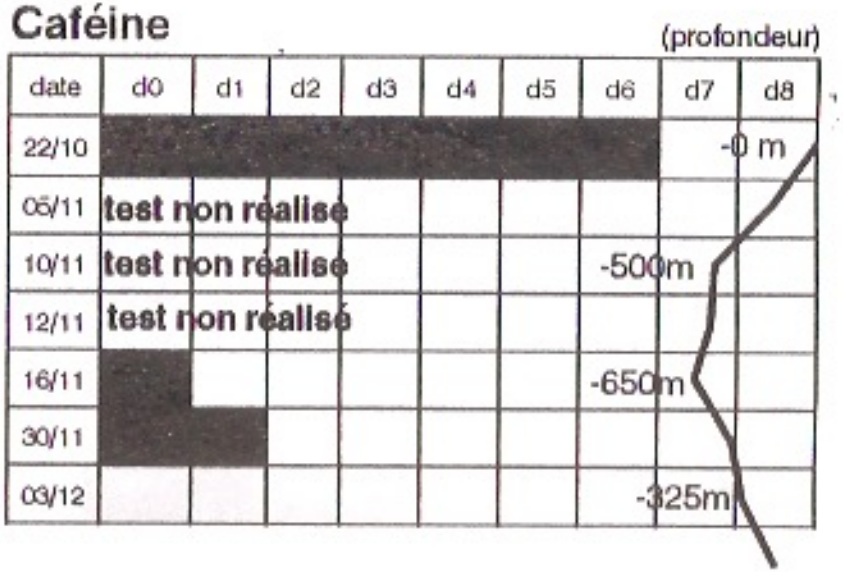
Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnaît être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Evolution des seuils de détection de Théo Mavrotomos

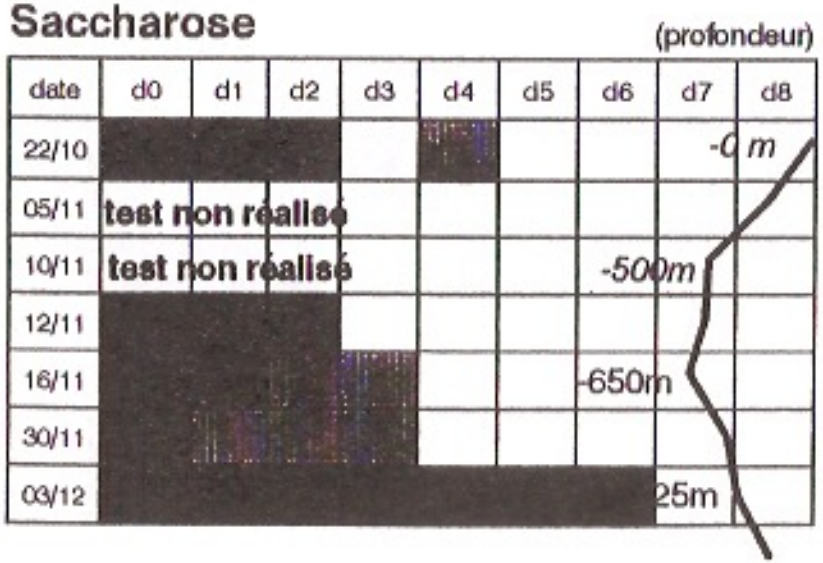
Chlorure de sodium



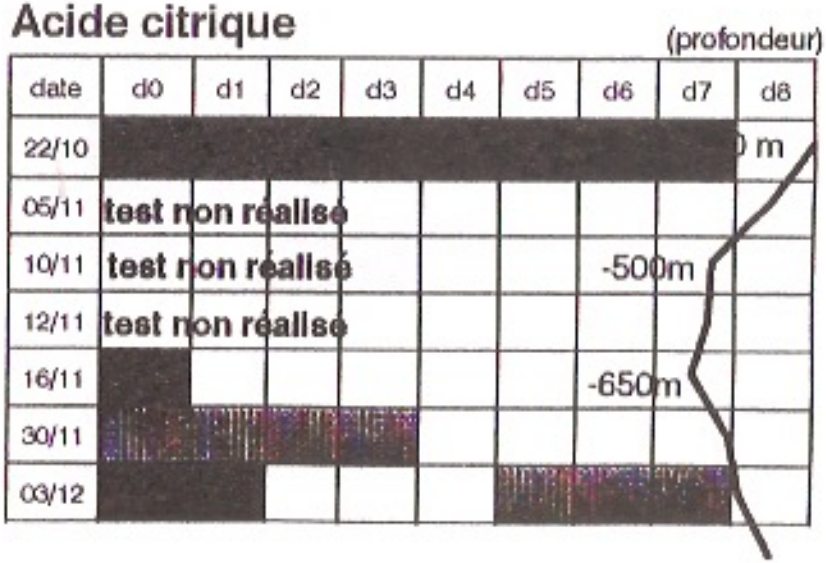
Caféine



Saccharose



Acide citrique

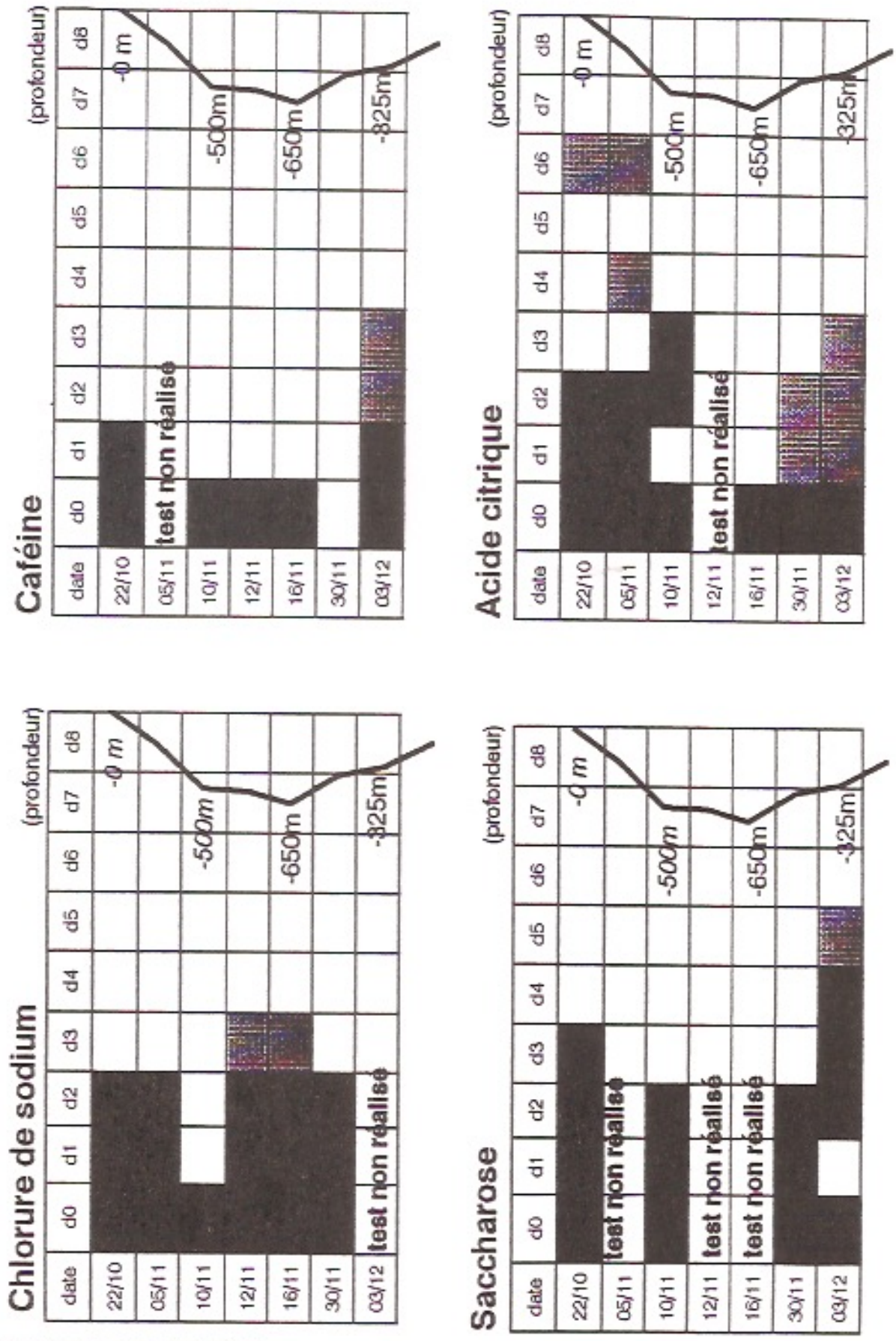


Direction Scientifique - Octobre 1993

COMEX

Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.

Evolution des seuils de détection de Régis Peilho



Ce document est la propriété de Comex. Toute personne en détenant un exemplaire reconnait être liée par une obligation de secret et s'engage à ne pas le reproduire, ni le communiquer à des tiers en tout ou partie sans l'autorisation écrite de Comex.