

OCTOBRE 2021

# MEMOIRE

DIU de Médecine Subaquatique et  
Hyperbare

-----

**SOURGET CECHELLA Marie**



UNIVERSITÉ  
**BORDEAUX**  
S E G A L E N

# **CAISSON MULTIPLACE LEGER :** **Une originalité militaire**



# **SOMMAIRE**

## **Introduction**

### **1- La plongée militaire**

### **2- Données épidémiologiques**

### **3- Moyens de recompression**

#### **3.1- Le caisson hyperbare**

#### **3.2- L'oxygénothérapie**

### **4- Le Caisson Multiplace Léger**

#### **4.1- Fonction et description d'un CML**

#### **4.2- Maintenance d'un CML**

### **5- Indications**

#### **5.1- Rappels : les accidents de plongée**

#### **5.2- Recompression hyperbare sur place en urgence**

#### **5.3- Prise en charge et protocoles hyperbares réglementaires**

### **6- Futur et perspectives**

## **Conclusion**

L'essor de la médecine hyperbare est lié au développement de la plongée à des fins militaires et industrielles après la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. Le challenge consistait à sécuriser les unités de plongeurs et leur permettre également de travailler à des profondeurs plus élevées. Ainsi, la Marine française va créer en 1945 une nouvelle unité, compétente en matière de plongée sous-marine : le GRS (Groupe de Recherches Sous-marines), devenue par la suite le GERS (Groupe d'Etudes et de Recherches Sous-marines). On retrouvera au sein de ce groupe, des officiers de la Marine (Cousteau, Tailliez), des médecins militaires (Cabarrou, Barthélémy...) et des pharmaciens qui vont travailler en étroite collaboration et participer à l'essor de la plongée autonome. Leurs études se poursuivront dans le domaine de la plongée à grande profondeur à partir de 1978 au sein du GISMER (Groupe d'Intervention sous la Mer) avec le concours du CERB (Centre d'Etudes et de Recherches Biophysiques appliquées à la Marine). Ces équipes étudieront notamment les domaines de la ventilation pulmonaire ou de la régulation thermique lors de plongée en saturation. L'importance des contraintes physiologiques en plongée sous-marine ainsi que l'ergonomie et la modernisation des appareils de plongée associées à la diversité des missions réalisées par les différentes catégories de plongeurs militaires, sont autant d'exemples qui permettent de comprendre l'implication du Service de Santé aux Armées (SSA) durant toute la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle.

Les caissons vont alors se multiplier au sein des unités de plongeurs. Actuellement la Marine possède toujours de nombreux caissons embarqués et maintient un centre hyperbare 500 mètres à des fins de recherche au sein du CEPHISMER (Cellule de Plongée Humaine et d'Intervention Sous la MER).

# 1- La plongée militaire

La plongée sous-marine est une activité à risques.

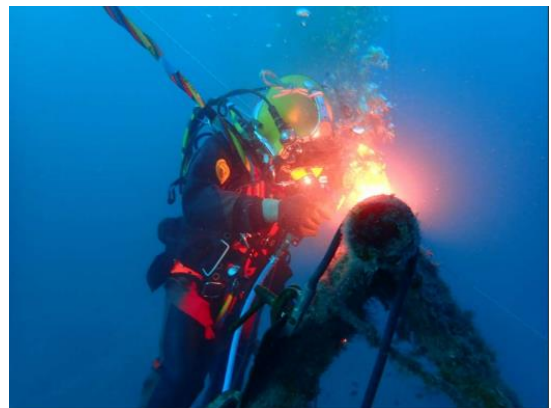
Le plongeur est soumis directement à des contraintes liées à son immersion dans un milieu irrespirable, caractérisé par des conditions de pression hydrostatique, de température, de courant et de turbidité variables, et à des risques spécifiques (faune et flore, pollution, ultrasons, explosions sous-marines). Ces contraintes environnementales s'exercent tant sur les plans : physiologique (ventilatoire, cardiovasculaire, sphère ORL, thermique), psychologique (maîtrise de soi, gestion de l'effort et de l'adversité) que matériel (fiabilité de l'appareil respiratoire). Plus spécifiquement, compte tenu de sa finalité opérationnelle (opérations spéciales, plongées offensives, déminage, sauvetage, opérations amphibies, opérations de Génie, travaux sous-marins, enquêtes, etc...) la plongée militaire se distingue au sein de la plongée professionnelle par la prise en compte des contraintes suivantes (1) :

- des délais de préparation qui peuvent être particulièrement courts
- des durées de plongée qui peuvent être longues et éprouvantes
- des conditions potentiellement dégradées du fait de l'environnement, de la menace militaire ou du contexte (houle, vent, courant, nuit, visibilité faible voire nulle,

températures extrêmes, plongée sous coque, plongée sous coque à la dérive, plongée sous plafond, sous glace ou en surface non libre).

- des conditions d'isolement géographique des lieux d'intervention et, en conséquence, des délais de ralliement d'un centre hospitalier potentiellement importants.
- des efforts physiques d'intensité variable (génie sous-marins, palmage).
- la mise en œuvre de matériels spécifiques (équipements individuels, appareils à recyclage des gaz, véhicules sous-marins, explosifs, armement, etc...) exigeant une formation et un entraînement adaptés. En conséquence, lors de la phase de préparation de toute plongée militaire, les plongeurs doivent réaliser systématiquement une analyse rigoureuse des risques.

Les plongeurs militaires peuvent aussi bien récupérer du matériel perdu en eaux profondes, contribuer à retrouver une boîte noire d'aéronef dans les abysses ou évacuer un équipage de submersible en difficulté. L'expertise des équipes d'intervention sous la mer de la force d'action navale est aujourd'hui reconnue au niveau international. Les plongeurs de la Marine s'entraînent avec des équipements de haute technologie et opèrent régulièrement au profit de notre pays ou de nations alliées. Bien qu'elle soit majoritaire, la Marine Nationale n'est pas la seule institution militaire à compter des plongeurs dans ses rangs.



Ainsi, l'armée emploie 2 240 plongeurs répartis comme suit (2) :

- Marine Nationale avec 1 620 plongeurs dont 1 200 Plongeurs de bord (PLB) et Plongeurs Hélicoptère (PLH), 320 Plongeurs démineurs (PLD) et 100 Nageurs de combat (NC).
- Gendarmerie Nationale avec 200 plongeurs.
- Armée de Terre avec 300 plongeurs regroupant les Plongeurs Armée de Terre (PAT), les Plongeurs de Combat du Génie (PCG), les Nageurs de Combat (NC), les plongeurs Spécialistes en Intervention Subaquatique de la BSPP (SIS).
- Armée de l'Air avec 50 Plongeurs Sauveteurs (PS).
- Service de Santé des Armées avec 60 plongeurs (infirmiers et médecins).

## 2- Données épidémiologiques

Dans les armées et services, les accidents de plongée restent peu fréquents avec moins de 40 cas chaque année pour un effectif d'environ 2000 plongeurs qui réalisent annuellement plus de 120 000 plongées. Parmi ces plongées, près des trois quarts sont effectuées à l'air comprimé en circuit ouvert et le reste avec des appareils de plongée spécifiques utilisant des mélanges gazeux (nitrox et trimix, oxygène pur). Les deux tiers environ des accidents surviennent en plongée de formation initiale en école, et concernent très majoritairement les élèves-stagiaires.

Pour les plongées à l'air comprimé en circuit ouvert, la grande majorité des accidents de désaturation (ADD) survient malgré le respect de la procédure. A titre de comparaison, en plongée sportive de loisir, 350 à 400 ADD sont observés chaque année, soit une incidence de 1 à 3/10 000 plongées selon les données de la FFESSM (Fédération Française, alors qu'en plongée militaire, l'incidence moyenne des ADD est d'environ 1 pour 30 000 plongées.

Depuis plusieurs années, les ADD survenus ont tous connu une évolution favorable à l'issue d'une recompression hyperbare en urgence.

## 3- Moyens de recompression

La médecine de plongée est née lorsque la profondeur atteinte et le temps de séjour sous l'eau furent suffisamment importants pour entraîner des pathologies spécifiques : les accidents de désaturation.

La recompression associée à une oxygénation représente le traitement de choix. Ainsi, au sein du Service de Santé aux Armées (SSA), il existe aujourd'hui trois centres hyperbares. Le premier centre hyperbare militaire hospitalier a été mis en place en 1965 à Toulon, c'est HIA Saint Anne, puis Paris et Metz. Ces centres sont également accessibles aux civils. Ainsi, chaque année, le centre de Toulon accueille plus d'une centaine de cas d'accidents de plongée civile, ce qui représente le tiers des accidents de plongée traités en France.

Le traitement d'une surpression pulmonaire avec aéroembolie cérébral ou d'un accident de désaturation (ADD) repose sur une recompression rapide en vue d'un séjour en ambiance hyperbare suivie d'une décompression lente et adaptée avec inhalation de mélanges gazeux suroxygénés et d'oxygène pur. Les profondeurs initiales du séjour en pression et les profils de retour en surface constituent un catalogue de tables thérapeutiques. Il en existe plusieurs dont les indications dépendent du type d'ADD et de la forme clinique associée à ce dernier. La doctrine de prise en charge des ADD dans la Marine française repose sur plusieurs principes : la précocité de la recompression afin de limiter l'évolution, la profondeur de recompression, équivalente à 30 mètres ou 4 ATA afin de privilégier un effet mécanique sur la formation de bulles et enfin la durée de la table qui est un élément à prendre en considération.

## 3.1- Le caisson hyperbare

Les caissons hyperbares entrent dans la catégorie des équipements lourds et sont soumis à autorisation pour mise en place. Il s'agit d'une enceinte étanche et résistante qu'il est possible de soumettre à une pression supérieure à l'atmosphère ambiante qui est de 1,013 bars.

En France, les caissons thérapeutiques sont multiplaces. Ils comportent au moins une chambre thérapeutique (recevant les malades), un sas permettant au personnel de l'équipe soignante d'aller et venir à l'intérieur et d'un sas à médicament pour échanger du matériel ou des médicaments. Par ailleurs d'autres éléments caractérisent, en termes de sécurité, les chambres hyperbares actuelles.

Elles doivent disposer entre autres (2) :

- d'une soupape de sécurité tarée à la pression maximale d'utilisation.
- un système permettant de visualiser à l'intérieur de la chambre.
- un système de communication acoustique permettant d'écouter en permanence l'intérieur de la chambre.
- un système de lutte contre l'incendie
- un système de ventilation automatique permettant de remplacer une partie de l'air enrichi en oxygène tout en ne modifiant pas la pression de la chambre.
- un système de mesure de la concentration en oxygène dans la chambre.

Un caisson de recompression est une installation en mesure d'assurer les fonctions suivantes :

- La compression puis la décompression : le personnel présent dans le caisson (soumis soit à une table thérapeutique, soit à la table de plongée MN 90) est comprimé puis progressivement décomprimé. Le gaz utilisé pour la compression est de l'air respirable
- la ventilation : simultanée ou séparée des éléments constitutifs (sas, chambre) du caisson multiplace. Elle est réalisée avec de l'air respirable pour permettre, grâce à un balayage de l'atmosphère des enceintes, le contrôle des paramètres d'ambiance (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, température) à l'intérieur des enceintes du caisson ;
- la respiration de gaz : des circuits indépendants de gaz respiratoires équipent les différentes enceintes du caisson. L'inhalation effective de ces gaz (oxygène pur ou mélanges suroxygénés) est un élément primordial pour l'exécution des tables thérapeutiques, ou pour la réduction de la durée des paliers effectués dans le caisson ;
- le rejet des gaz : les mélanges suroxygénés exhalés par les occupants du caisson sont rejetés à l'extérieur du caisson par l'intermédiaire de déverseurs, et accessoirement par la ventilation ;
- l'assistance médicale : le personnel extérieur est en mesure de rejoindre l'intérieur du caisson pour apporter une assistance médicale ;
- le transfert de médicaments : le caisson comporte un sas permettant de délivrer du matériel aux accompagnateurs.

Dans les armées, et très majoritairement dans la Marine, ces installations sont caractérisées par des caissons multiplaces destinés à :

- assurer le traitement complet d'un ou deux plongeurs victimes d'un accident.

- permettre l'exécution de paliers de décompression en surface lors d'incidents de plongée.
- permettre la formation et l'entraînement des accompagnateurs et des manipulateurs caisson.

## 3.2- L'Oxygénothérapie

L'oxygénothérapie hyperbare, telle que définie par la Haute Autorité de Santé (HAS) (3) est une modalité thérapeutique d'administration de l'oxygène par voie respiratoire à une pression supérieure à la pression atmosphérique standard (1 bar ou 1 ATA). Elle est définie comme l'inhalation d'oxygène pur (O<sub>2</sub> à 100%) par un sujet placé dans un caisson d'acier ou de polymère à des pressions partielles supra-atmosphériques. (2)

Outre l'effet mécanique de la pression sur les volumes gazeux, l'élévation de la pression partielle d'oxygène induit des modifications biochimiques et cellulaires.(4) La compression des volumes gazeux et la dénitrogénéation sont à la base des traitements des accidents de décompression, des embolies gazeuses et d'autres pathologies bullaires. La variation des volumes gazeux au cours des modifications de pression peut cependant être responsable d'accidents barotraumatiques, qu'il convient de prévenir. L'augmentation de la PO<sub>2</sub> artérielle et capillaire améliore le transport de l'oxygène sous forme dissous et élève la PO<sub>2</sub> tissulaire. La vasoconstriction hyperoxique dans les tissus sains entraîne une redistribution sanguine au profit des tissus hypoxiques. Les synthèses cellulaires diminuées en milieu hypoxique sont améliorées par l'élévation du gradient de PO<sub>2</sub> et les alternances d'hypoxie-hyperoxie. Il s'ensuit une stimulation de l'angiogénèse, de l'activité des macrophages et une synthèse du collagène par les fibroblastes.

Par ailleurs, l'OHB agit sur les processus infectieux à trois niveaux : effet bactériostatique et bactéricide, potentialisation de l'action de certains agents antimicrobiens, amélioration du pouvoir phagocytaire des polynucléaires. La formation de radicaux libres dérivés de l'oxygène pourraient expliquer l'effet bactériostatique et bactéricide, mais également les effets toxiques de l'oxygène, en particulier la toxicité neurologique sous forme de crises convulsives (« effet Paul Bert ») qui est peu fréquente en pratique courante et régressive à l'arrêt de l'inhalation d'oxygène. (2)

Par sécurité, un pourcentage d'oxygène inférieur à 23% devra toujours être maintenu dans la chambre afin de réduire les risques d'incendie.

## 4- Caisson Multiplace Léger (CML)

La présence d'un moyen de recompression hyperbare sur les lieux de la plongée est obligatoire au sein de la Marine pour toute plongée effectuée à une profondeur supérieure à 35 mètres, ainsi que pour les plongées imposant la réalisation



de paliers de décompression. Le Caisson Multiplace Léger (CML) également appelé caisson de chantier ou caisson de sauvegarde, est en mesure de recevoir au moins deux accidentés et un accompagnateur (médecin, infirmier ou plongeur). Ces installations peuvent être embarquées à bord de bâtiments de la Marine (vedettes, bâtiments-base de plongeurs démineurs, chasseurs de mines) mais également installées à terre (Ecole de plongée) ou encore être déplacées par voie routière et/ou aérienne. (5)



*Installation hyperbare multiplace CM 20 de l'Ecole de plongée de Saint Mandrier*

## 4.1- Fonction et description d'un CML

Dans les armées et la gendarmerie, ces installations sont assimilées à un moyen de recompression d'urgence (caisson hyperbare de chantier et/ou caisson hyperbare de transport). Elles sont décrites comme des moyens de sauvegarde. Il existe différents types de caissons de recompression multiplaces en service.

- des caissons amagnétiques pour certaines formations de la force de guerre des mines
- des caissons sans exigence magnétique particulière pour les autres formations

Ils présentent une possibilité d'accouplement (connexion) : avec un caisson de transport aux normes OTAN au moyen d'une « couronne d'adaptation OTAN » ;

Ils comprennent au minimum deux enceintes, à savoir une chambre de traitement (chambre principale) destinée à recevoir un ou plusieurs plongeurs accidentés, couchés ou assis, et un accompagnateur. Ainsi qu'un sas permettant d'entrer dans la chambre ou d'en sortir sans en modifier la pression intérieure.

Les portes ou panneaux ne comportent pas de verrouillage et sont autoclaves s'ouvrant vers l'intérieur des enceintes.

Comme tous caissons hospitaliers, le CML est alimenté en air respirable, en oxygène et mélanges suroxygénés, en eau pour le refroidissement du caisson et en électricité.

### **La chambre principale :**

La chambre principale possède à l'intérieur :

- un sas à médicaments et petits objets
- deux couchettes pour accidentés
- un siège pour accompagnateur
- des inhalateurs-déverseurs (au moins trois) permettant l'inhalation de mélanges suroxygénés et d'oxygène pour les patients et éventuellement l'accompagnateur
- un système de communication phonique avec l'extérieur
- un manomètre intérieur
- un système d'aspiration de mucosités
- un dispositif de ventilation manuelle et/ou automatique
- une évacuation d'eau
- un dispositif d'extinction mobile.

Elle comporte également :

- un système de réchauffage ou de maintien de la température (ruban chauffant)
- un système d'arrosage en pluie
- un dispositif de manutention
- des hublots pour assurer la surveillance visuelle des occupants
- un éclairage, situé à l'extérieur ou à l'intérieur.

Selon le type de caisson, le sas comporte des équipements identiques à la chambre, à l'exception bien sûr des couchettes pour accidentés et du sas à médicaments.

### **L'équipement extérieur, la gestion des gaz :**

L'équipement extérieur comprend les appareils nécessaires au contrôle de la pression, au contrôle visuel de la teneur en oxygène, à la manœuvre de la chambre de traitement et aux communications.

Les réserves de gaz conditionnent la réalisation et l'exécution des tables thérapeutiques.

Les réserves d'air sont prévues et dimensionnées grâce à des bouteilles et à un ou deux compresseurs.

Il est donc possible de réaliser une table entière, complétées par un compresseur, ou alors de réaliser la mise en pression initiale de la table thérapeutique la plus pénalisante, puis la compléter par deux compresseurs afin de toujours disposer d'au moins un compresseur en cas d'avarie du second.

Les mélanges suroxygénés et l'oxygène pur (en bouteilles) alimentent des circuits de distribution qui sont doublés et indépendants pour la chambre et le sas. Ces gaz sont disponibles pour les occupants du caisson uniquement via les inhalateurs-déverseurs individuels. Il s'agit d'un système qui fonctionne en circuit ouvert, c'est-à-dire que le mélange gazeux expiré par l'individu à l'intérieur est éliminé à l'extérieur de l'enceinte. Cela possède le désavantage de consommer un volume de mélange gazeux relativement important.

#### Dotation normale en air et mélange gazeux :

Air à bord : 4 bouteilles 63 l x 200b + 1 bouteille 63 l x 170 b

Air du conteneur : 4 bouteilles 50 l x 200 b

Mélange à 60 % O<sub>2</sub> – 40 % N<sub>2</sub> : 5 bouteilles sur conteneur 50 l x 200 b

Oxygène pur : 7 bouteilles sur conteneur 50 l x 200 b

## **4.2- Maintenance d'un CML**

L'entretien courant est réalisé par le personnel d'exploitation et le service soutien de la formation détentric. Cet entretien courant consiste à réaliser des opérations de nettoyage, de lubrification, de remplissage en air, en oxygène et en mélanges suroxygénés dont les réserves doivent être régulièrement contrôlées, ainsi qu'au remplacement des quelques pièces prévues dans la notice d'entretien.

Les autres opérations sont du ressort de l'industriel contractuellement choisi pour l'entretien des caissons qui font l'objet d'une visite tous les 40 mois et d'une épreuve décennale. C'est donc la COMEX qui a remporté le marché public et signé un partenariat avec le ministère des Armées depuis 2009, assurant ainsi le maintien en condition opérationnelle des caissons de la Marine Nationale et de l'Armée de Terre jusqu'en 2025.

## **5- Indications**

La plongée sous-marine expose l'organisme à des contraintes environnementales majeures sur le plan ventilatoire, cardio-vasculaire et thermique liées à l'immersion dans un milieu dense, froid et irrespirable. Les plongeurs ventilent un mélange gazeux sous pression par l'intermédiaire d'un détendeur ou d'un appareil à recyclage de gaz. Les gaz utilisés sont le plus souvent de l'air comprimé mais parfois des mélanges artificiels suroxygénés de type Nitrox (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>), pour sécuriser la décompression, ou contenant de l'hélium (Héliox He/O<sub>2</sub> ou Trimix He/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>) en cas de plongées profondes pour prévenir la narcose. Ces conditions peuvent être responsables de pathologies et d'accidents particuliers qui nécessitent une démarche diagnostique et une prise en charge spécifiques. Tout signe clinique apparaissant dans les 24 heures après une plongée doit être considéré comme un accident de plongée jusqu'à preuve du contraire et le plongeur doit pouvoir bénéficier sans délai, d'une recompression thérapeutique.

Les enceintes multiplaces mobiles sont donc destinées à débiter une recompression hyperbare à proximité immédiate du chantier de plongée.

## 5.1- Rappels : accidents de plongée

Un accident de plongée se définit comme la survenue de tout symptôme en rapport direct avec l'environnement (hyperbare, subaquatique), au cours ou à l'issue d'une plongée sous-marine, ou en rapport avec les risques spécifiques en lien à la faune et flore, aux explosions sous-marines, aux ultrasons... Ils regroupent l'ensemble des accidents classés en fonction des lois physiques à l'origine des contraintes sur l'organisme du plongeur :

- les accidents barotraumatiques conséquences directes des variations de pression et de volumes gazeux au sein des différentes cavités aériques de l'organisme
- les accidents de désaturation liés à la désaturation de l'azote et/ou de l'hélium contenu dans les différents tissus de l'organisme du plongeur sous forme de bulles circulantes lors de la remontée vers la surface
- les accidents biochimiques également appelés accidents toxiques directement liés à la toxicité des mélanges gazeux respirés en ambiance hyperbare
- l'œdème pulmonaire d'immersion lié aux contraintes cardio-respiratoires du fait de l'immersion et de l'environnement
- la noyade en plongée qui est le corollaire de toute perte de connaissance en plongée.

Plus précisément, et parce que ce sont eux qui motivent la recompression hyperbare, les accidents de désaturation (ADD) constituent une urgence fonctionnelle en mesure de mettre en jeu le pronostic neurologique d'un plongeur en l'absence d'une prise en charge adaptée et spécifique.

Il s'agit d'accidents de plongée qui accompagnent le retour en surface du plongeur lorsque la pression ambiante diminue et que les tissus de l'organisme du plongeur sont saturés en gaz diluant comme c'est le cas avec l'azote lors d'une plongée à l'air. Ils surviennent exclusivement durant la phase de remontée vers la surface, en cours de réalisation des différents paliers, à la sortie de l'eau de façon brutale et soudaine ou encore à distance de l'horaire d'émersion et jusque dans les 24 heures qui vont suivre.

Cette catégorie d'accidents de plongée peut également, accompagner les autres accidents de plongée comme la survenue d'un barotraumatisme pulmonaire secondaire et/ou un accident biochimique. Il fait intervenir en premier lieu la notion de profondeur d'immersion, c'est-à-dire de niveau de pression ambiante d'exposition, de temps de séjour sur le fond pour la partie physique, mais également des facteurs physiologiques individuels : la respiration pulmonaire, la circulation sanguine, la dissolution des gaz dans les tissus, les caractéristiques propres de ces tissus. L'accident de désaturation survient lorsque le niveau de bulles circulantes et le volume de ces bulles sont trop élevés.

Une recompression hyperbare en urgence doit donc être réalisée lorsque l'on se trouve face à un accident de désaturation ou un accident barotraumatique pulmonaire avec signes neurologiques.

## **5.2- Recompression hyperbare sur place en urgence**

La recompression hyperbare en urgence implique un intervalle de temps le plus court possible entre l'apparition des premiers symptômes et le séjour en ambiance hyperbare à l'intérieur de l'enceinte. Plus ce délai sera court, meilleures seront les chances de récupération des lésions chez le plongeur accidenté. Ainsi, le personnel est en mesure de débiter et de réaliser une table de recompression dans sa totalité même en l'absence de personnel médical (médecin et/ou infirmier).

Le traitement hyperbare est débuté dans l'idéal sur les lieux de la plongée. Des protocoles, également appelés « tables de recompression » prévoient des niveaux de profondeurs pour la recompression et des profils de retour à la surface.

Il existe une grande variété de tables de recompression. La multiplicité de ces tables prouve bien qu'aucune d'entre elles n'est universelle. Chaque table représente un compromis entre les moyens à mettre en œuvre et l'effet à obtenir. La doctrine d'une recompression hyperbare repose sur quatre principes :

- 1- délai de recompression le plus court possible.
- 2- profondeur de recompression en urgence d'au moins 2,8 ATA (18 mètres de profondeur équivalent) ou 4 ATA (30 mètres de profondeur équivalente) selon les arbres de décisions ou l'indication médicale
- 3- décompression avec inhalation de mélanges suroxygénés, et/ou d'oxygène pur, associé à la délivrance d'un traitement médicamenteux par l'équipe médicale. Cette procédure facilite l'élimination de l'azote (ou de l'hélium) dissous et diminue d'autant les risques de réapparition des symptômes en cours de décompression
- 4- un accompagnement systématique de l'accidenté pendant toute la durée de la recompression hyperbare en urgence par un personnel médical ou non. Le rôle de l'accompagnateur est essentiel pour porter assistance en cas d'apparition de symptômes de crise hyperoxique, provoquée par l'inhalation de mélanges suroxygénés et pour surveiller l'évolution de l'état de l'accidenté en cours de traitement.

## **5.3- Prise en charge et protocoles hyperbares réglementaires**

L'examen médical et la mise en condition de l'accidenté doivent être limités au minimum indispensable, afin de ne pas retarder la recompression. Le déshabillage du

malade, son examen et la plupart des gestes médicaux d'urgence peuvent être réalisés à l'intérieur d'un caisson multiplace. La déshydratation étant un facteur d'aggravation des accidents de désaturation, il est absolument nécessaire d'être en mesure d'assurer la réhydratation de l'accidenté par voie orale dans un premier temps puis par perfusions intraveineuses en cours de traitement.

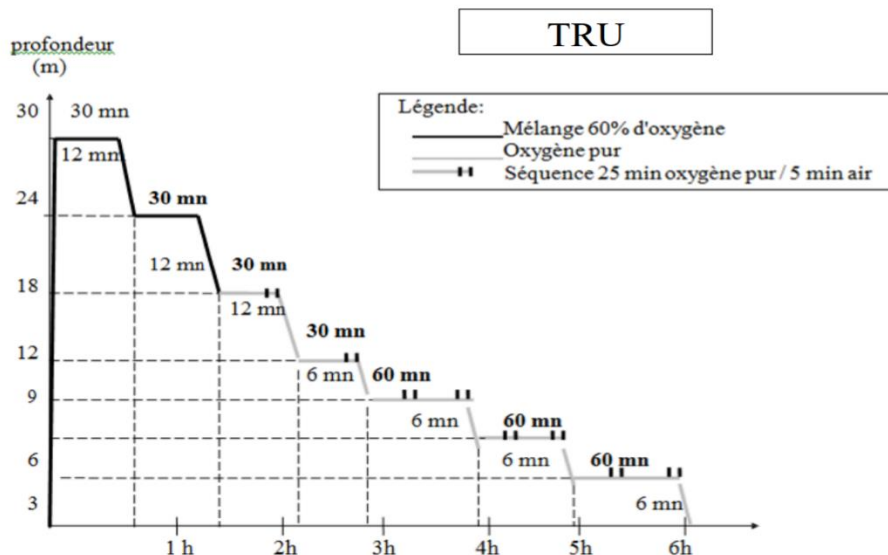
## **Protocoles hyperbares réglementaires** (1)

Une table thérapeutique est choisie selon l'arbre de décisions correspondant au type d'accident. Aucun raccourcissement de la table suivie ne doit être effectué, sauf cas de force majeure. Seul un médecin expert peut prendre la responsabilité de modifier le profil de la table de recompression hyperbare ou le traitement médicamenteux en fonction des symptômes et de leur évolution.

Les mélanges suroxygénés ainsi que l'oxygène seront inhalés par l'accidenté conformément aux prescriptions de la table choisie. Sur avis d'un médecin qualifié, des pressions partielles d'oxygène légèrement hyperoxiques pourront être employées dans certains cas. Les indications de l'analyseur sur la composition de l'atmosphère du caisson doivent être surveillées en permanence par le manipulateur du caisson. La marge de sécurité est étroite entre le pourcentage normal de 21 % d'oxygène présent dans l'air et le pourcentage de 23 % d'oxygène, à partir duquel apparaissent de sérieux risques. Lorsque l'accidenté inhale des mélanges suroxygénés, le gaz expiré est rejeté à l'extérieur du caisson par un déverseur. L'accompagnateur doit s'assurer que le masque est parfaitement ajusté sur le visage du malade, afin d'éviter que des fuites du mélange gazeux respiré par ce dernier n'augmentent le pourcentage d'oxygène dans l'atmosphère du caisson. La ventilation manuelle ou automatique

Par soucis de simplification et d'efficacité, 3 protocoles de recompression ont été établis et permettent de procéder au traitement hyperbare sur place sans la présence systématique d'un médecin :

- **La table de recompression d'urgence (TRU)** comporte une recompression initiale à 4 ATA (30 mètres) suivie d'une décompression par paliers qui dure 6 heures avec inhalation d'un mélange suroxygéné (60 % O<sub>2</sub> – 40 % N<sub>2</sub>) puis d'oxygène pur. L'usage de cette table est réservé en première intention à la prise en charge des accidents de plongée avec signes déficitaires neurologiques liés à un accident de désaturation ou un accident barotraumatique pulmonaire avec aéroembolisme cérébral. Le plongeur accidenté doit être accompagné en permanence pendant toute la table. L'unité doit prévoir et former un nombre suffisant de personnels accompagnateurs caisson, a minima 4 accompagnateurs L'avis d'un médecin expert (médecin d'astreinte de la CEPHISMER et/ou du SMHEP-HIA Saint Anne à Toulon) est nécessaire avant la réalisation de cette table.

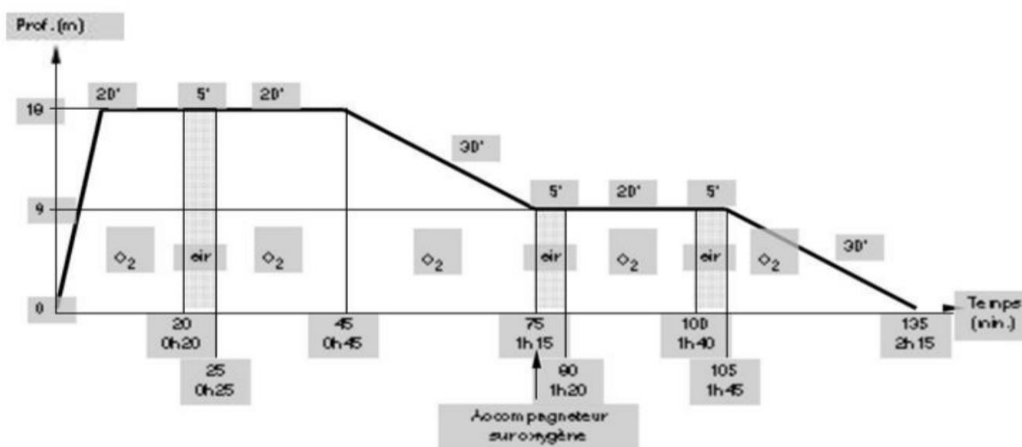


**- Les tables US Navy de recompression à l'oxygène pur**

Ces tables U.S. Navy comportent une recompression initiale à 2,8 ATA (18 mètres), suivie d'une décompression sous oxygène pur de 2 h 15 (« Table 5- US Navy » ou table de recompression à l'oxygène courte) ou de 4 h 45 (« table 6- US Navy » ou table de recompression à l'oxygène longue). Le plongeur accidenté doit être accompagné en permanence pendant toute la table. Ces tables sont réalisées sur indication d'un médecin qualifié en médecine de la plongée. L'avis d'un médecin expert (médecin d'astreinte de la CEPHISMER et/ou du SMHEP - HIA Saint-Anne à Toulon) doit être recherché.

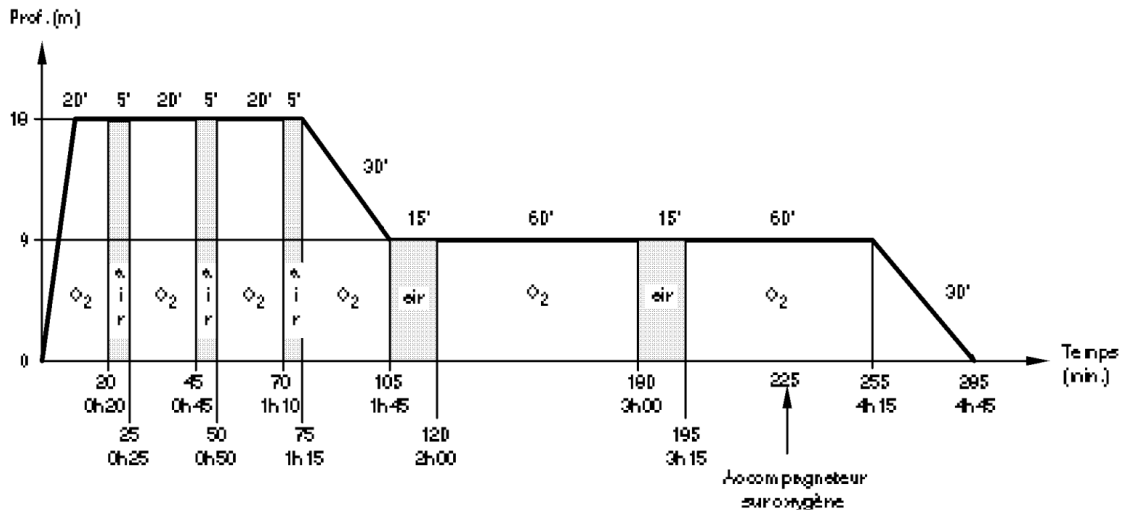
a- La table 5- US Navy est préconisée en première intention pour la prise en charge des accidents de désaturation avec signes ostéo-articulaires, cochléo-vestibulaires, cutanés (persistants), ainsi qu'en cas de symptômes neurologiques subjectifs ou après disparition de symptômes neurologiques.

**TABLE US NAVY 5**



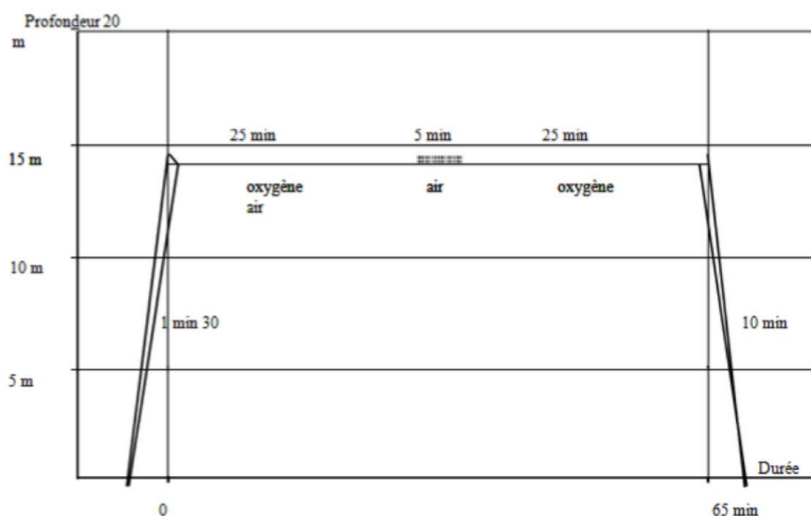
b- La table 6- US Navy peut être utilisée en première intention en présence de signes déficitaires neurologiques liés à un accident de désaturation ou un accident barotraumatique pulmonaire avec aéroembolisme cérébral (signes neurologiques objectifs). Elle peut aussi être réalisée en présence d'une aggravation du tableau clinique initial ou de l'apparition de nouveaux symptômes au cours d'une table T5. Elle permet d'allonger la durée du palier de 18 mètres ou 9 mètres à partir de la table T5. Le plongeur accidenté doit être accompagné en permanence pendant toute la table.

### US NAVY T6



### - La table de recompression hyperbare « O.H.B. 15 »

Cette table comporte une mise en pression à 2,5 ATA (15 mètres). La durée est de 67 minutes. Elle ne doit en aucun cas être utilisée comme traitement initial d'un accident de décompression. Cette table est utilisée dans la prise en charge d'un incident de plongée et en prévention des conséquences d'un incident de plongée.





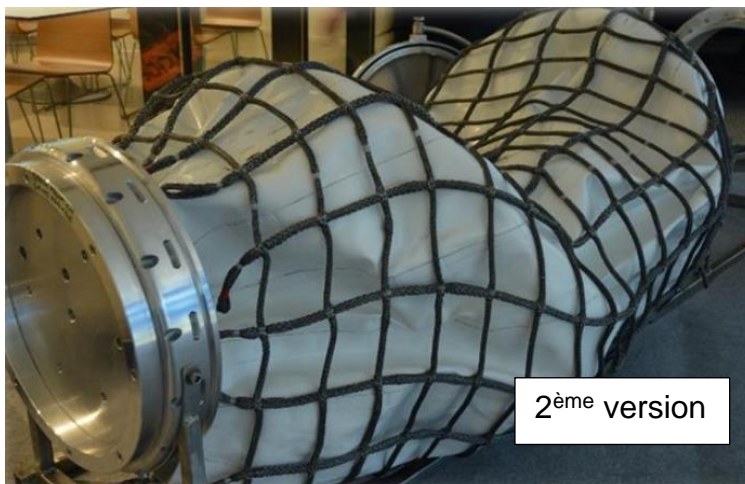
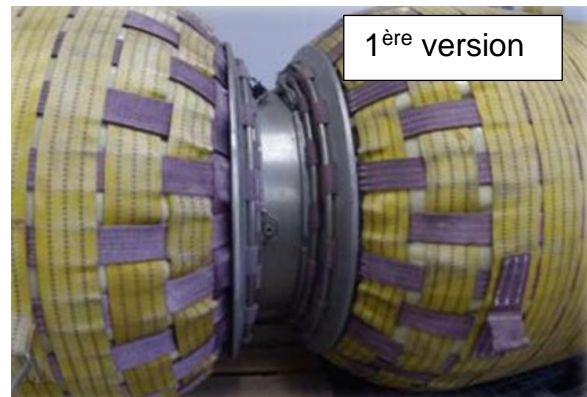
Après la fin du traitement, le plongeur est maintenu en observation médicale à proximité du caisson pendant 6 heures. Il ne sera autorisé à replonger que sur avis favorable du médecin expert du service de médecine hyperbare et expertise plongée (SMHEP°).

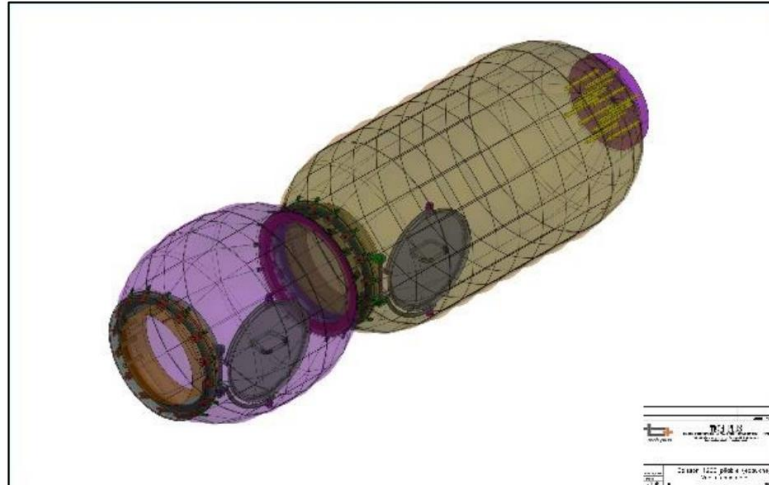
## 6- Futur et perspective

Si les enceintes multiplaces mobiles raccourcissent la durée de la prise en charge, elles restent néanmoins coûteuses à l'achat et en entretien et sont de dimensions importantes. Elles nécessitent une structure et des moyens adaptés ainsi que du personnel spécialisé pour sa mise en œuvre. Dans les armées, les installations hyperbares actuellement disponibles sont donc volumineuses et de ce fait non aérotransportables.

Un projet est en cours de développement afin de mettre au point une enceinte hyperbare modulaire, souple, transportable pour prendre en charge des accidents de plongée. Il s'agit du système **ORACLE**. (6)

L'intérêt de ce système innovant réside dans sa simplicité de mise en œuvre, sa rusticité dans son mode de déploiement et d'utilisation, et son coût de production réduit par rapport aux installations actuellement en service.





L'ensemble se compose d'une première enceinte hyperbare souple et transportable qui constitue la chambre principale destinée à recevoir le plongeur accidenté, d'une seconde enceinte hyperbare qui constitue le sas pour permettre le changement d'accompagnateurs sans modifier le niveau de pression à l'intérieur de la chambre principale et d'un système qui délivre le mélange gazeux respiratoire à l'intérieur de l'enceinte. Ce système est constitué d'un inhalateur-déverseur qui fonctionne en circuit ouvert dans la première version et en circuit fermé dans la deuxième version avec recyclage des gaz expirés par passage sur une cartouche de chaux sodée grâce à l'appareil respiratoire TRITON®.

Respirateur TRITON



La régulation des valeurs de la pression partielle d'oxygène délivré est contrôlée électroniquement au moyen de 3 cellules d'analyses. L'appareil utilise une bouteille de 1.5 litre d'oxygène à 200 bars de pression et une bouteille de gaz diluant qui peut être de l'azote ou de l'hélium.

Ce système permet la mise en pression jusqu'à la profondeur équivalent de 30 mètres (soit 4 ATA ).

L'ORACLE autorise la prise en charge d'au moins 2 plongeurs victimes d'un accident de décompression. Il permet la réalisation des différentes tables. Il est mobile et facilement transportable sur un chantier de plongée sous-marin.

L'évacuation en ambiance hyperbare du plongeur accidenté est rendue possible en toute sécurité.

Le caisson répond en particulier aux caractéristiques suivantes :

- un rapport poids/volume permettant la manutention et l'installation de l'ensemble par 3 personnes
- une capacité de transport de l'enceinte en pression à l'intérieur d'un aéronef civil et/ou militaire
- l'absence de réserve volumineuse de mélange gazeux respiratoire pour l'oxygénation.

Le caractère innovant de la deuxième version du prototype de l'ORACLE repose en partie sur :

- le système de fermeture de la porte de la chambre hyperbare et de l'enceinte de type autoclave qui confère au système un niveau de sécurité optimal lors de la mise en pression des enceintes.
- l'enveloppe de l'enceinte hyperbare pour la chambre et le sas (secret de fabrication).
- le système délivrant le mélange gazeux respiratoire TRITON (brevetable par le ministère des Armées).
- l'ergonomie générale et le design de l'ensemble dans la configuration transport et déployé .
- le système de contrôle de l'ambiance et enregistrement des constantes physiologiques.



# Conclusion

La plongée sous-marine sportive, militaire et professionnelle n'est pas sans risque.

La réglementation en plongée militaire impose la présence d'un caisson de recompression à proximité du chantier pour certains types de plongée qui exposent le plongeur au risque d'un accident de décompression.

Dans le monde, il existe plusieurs modèles de caissons de recompression qui varient en fonction des caractéristiques de l'enceinte hyperbare (nombre de personnes à l'intérieur caisson monoplace, biplace et multiplace et de leur caractère fixe ou mobile).

Les enceintes multiplaces fixes sont à vocation essentiellement thérapeutique et hospitalière. Les enceintes multiplaces mobiles, par principe non hospitalière (caisson de chantier ou caisson de sauvegarde) sont destinées à débiter une recompression hyperbare à proximité immédiate du chantier de plongée.

Même si ces dernières sont coûteuses, de dimensions contraignantes et nécessitent du personnel qualifié pour leur mise en œuvre, elles restent largement utilisées dans la Marine Nationale. Elles présentent d'une part l'avantage d'une recompression hyperbare sur site en urgence et d'autre part le traitement de deux plongeurs sous la surveillance d'un accompagnateur.

L'Armée possède une trentaine de caissons multiplaces légers (très majoritairement dans la Marine Nationale), ce qui en fait son originalité par rapport au secteur civil. Mais les innovations et la recherche militaire vont encore plus loin en ayant mis au point une unité mobile et autonome d'oxygénation hyperbare répondant aux mêmes caractéristiques hyperbariques que le CML : le système ORACLE.

Encore à l'état de prototype, ce caisson « en kit », souple et transportable, y compris en mode de fonctionnement, est en mesure de répondre aux besoins de certaines missions engageant des plongeurs sur des théâtres isolés. En pratique l'ORACLE est en cours de déploiement et d'utilisation à bord de la goélette scientifique de la fondation TARA. Cette collaboration avec le Service de Santé des Armées a été validée par la signature d'une convention qui met à disposition la 1<sup>ère</sup> version du prototype de l'ORACLE en vue de l'étude de son utilisation en conditions réelles durant toute une expédition dans l'océan Pacifique. La société TECH PLUS assurera par ailleurs son industrialisation et sa commercialisation future.

## Références

1. IPA2 : Instruction N°2 sur la Plongée Autonome dans les forces Armées. Service de Santé aux Armées; 2021.
2. CONSTANTIN P, DE RUDNICKI S, PONTIER J-M. Activité clinique en centre hyperbare militaire. févr 2015;TOME 43(1):19-24.
3. rapport\_oxygenotherapie.pdf [Internet]. [cité 10 oct 2021]. Disponible sur: [https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/rapport\\_oxygenotherapie.pdf](https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/rapport_oxygenotherapie.pdf)
4. Nielsen LK, Whelan M. Compartment syndrome: pathophysiology, clinical presentations, treatment, and prevention in human and veterinary medicine: Compartment syndrome in human and veterinary medicine. J Vet Emerg Crit Care. juin 2012;22(3):291-302.
5. PONTIER J-M, PENY C, ROBINET C. Médecine de la plongée : caractéristiques et spécificités du soutien des forces. févr 2015;TOME 43(1):5.
6. PONTIER J-M. ORACLE, unité mobile et autonome d'oxygénation hyperbare. CEPHISMER;