Techniques actuelles de sauvetage des sous-marins. Contexte de mise en œuvre du *Nato Submarine Rescue System*

J.-É. Blatteau[a], C. Pény[b], F. Leclercq[c], C. Robinet[d], E. Gempp[e], P. Louge[e], S. de Maistre[e], J.-M. Pontier[f], P. Constantin[g], M. Hugon[e]

a Équipe résidente de recherche subaquatique opérationnelle de l'Institut de recherche biomédicale des armées, BP 600 – 83800 Toulon Cedex 9.
b Cellule plongée humaine et intervention sous la mer de la Force d'action navale – 83800 Toulon Cedex 9.
c Escadrille des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins, CC 500 – 29200 Brest Cedex 9.
d Centre de formation de médecine navale de l'EVDG – 83800 Toulon Cedex 9.
e Service de médecine hyperbare et expertise plongée de l'HIA Sainte-Anne, BP 600 – 83800 Toulon Cedex 9.
f Cellule École de Plongée de l'antenne médicale Saint-Mandrier du CMA de Toulon, BP 311 – 83800 Toulon Naval Cedex 9.
g Unité fonctionnelle hyperbarie et plongée de la Fédération anesthésie réanimation urgence hyperbarie de l'HIA Val-de-Grâce, 74 bd de Port Royal – 75005 Paris.

Résumé

La France dispose actuellement avec le *Nato Submarine Rescue System* (NSRS) d'un des systèmes opérationnels les plus performants au monde pour le sauvetage collectif d'un équipage de sous-marin coulé. Néanmoins la mise en œuvre du NSRS est une opération délicate qui nécessite une bonne connaissance, de la part du personnel santé, des principaux risques qui vont conditionner la survie à bord du submersible en situation de détresse. Lors du naufrage d'un sous-marin, un des dangers majeurs est représenté par la voie d'eau qui va comprimer l'air ambiant et mettre l'atmosphère interne sous pression. Deux risques sont alors à prendre en compte, la survenue d'une toxicité pulmonaire liée à l'oxygène et d'un accident de décompression lors du retour en surface. Afin d'optimiser le sauvetage, une nouvelle procédure a été élaborée et validée par la France pour limiter ces risques et ramener en surface les naufragés et le personnel accompagnant avec le maximum de sécurité.

Mots-clés : Accidents de décompression. Bulles. Plongée. Saturation. Sauvetage des sous-marins. Toxicité pulmonaire de l'oxygène.

Abstract

CURRENT METHODS FOR SUBMARINE RESCUE; THE IMPLEMENTATION OF THE NATO SUBMARINE RESCUE SYSTEM.

With the Nato Submarine Rescue System (NSRS), France has one of the most efficient operational systems in the world for collective submarine rescue. However the deployment of NSRS is a difficult task which requires health staff to be well aware of the main risks, essential to survive on board. Flooded compartments is one of the main hazards in a disabled submarine and it can cause a raised internal submarine pressure. Two risks should be taken into account, the occurrence of pulmonary oxygen toxicity and decompression sickness when surfacing. To mitigate these risks and optimize the rescue, France developed and validated a new decompression schedule that allows the crew and attendants to return to the surface safely.

Keywords : Bubble. Decompression sickness. Diving. Pulmonary oxygen toxicity. Saturation. Submarine rescue.

Introduction

De la première catastrophe du sous-marin *Farfadet* en 1904, où 16 membres d'équipage trouvèrent la mort par une profondeur de 15 mètres, jusqu'à la récente tragédie du *Koursk* avec 118 hommes morts par 110 mètres de fond suite à l'explosion d'une torpille d'exercice, l'histoire des sous-marins naufragés (environ 200 en un siècle) est remplie d'exemples de sauvetages inefficaces

J.-É. BLATTEAU, médecin en chef, praticien certifié. C. PÉNY, médecin en chef, praticien certifié. F. LECLERQ, médecin principal. C. ROBINET, médecin en chef, praticien certifié. E. GEMPP, médecin en chef, praticien certifié. P. LOUGE, médecin en chef, praticien certifié. S. de MAISTRE, médecin principal, praticien certifié. J.-M. PONTIER, médecin en chef, praticien certifié. P. CONSTANTIN, médecin en chef, praticien certifié. M. HUGON, médecin chef des services, praticien certifié.
Correspondance : Monsieur le médecin en chef J.-É. BLATTEAU, IRBA/ERSSO, BP 610 – 83800 Toulon Cedex 9.
E-mail : jean-eric.blatteau@sante.defense.gouv.fr

car tardifs ou mal organisés, du fait de moyens de secours inadaptés ou d'un équipage non entraîné à ce type de situation (1).

Grâce à l'avancée des technologies, en particulier depuis le lancement des premiers Sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE), les sous-marins modernes sont de plus en plus fiables, cependant des accidents ou des avaries sont toujours possibles et peuvent aboutir à la perte d'étanchéité et à l'impossibilité de retourner en surface : le sous-marin ira alors se poser sur le fond de manière plus ou moins contrôlée. Les survivants du naufrage, entassés dans un compartiment refuge, auront la possibilité selon les circonstances d'envisager l'évacuation immédiate (un par un) ou alors d'attendre les secours. De nombreux paramètres sont à considérer dans le choix de la méthode de sauvetage.

Le cas du sous-marin péruvien *Pacocha* illustre la nécessité de prendre en compte les problèmes de décompression dans le cadre de l'organisation d'un sauvetage collectif (2). Le 26 août 1988, le SS-48 heurte un chalutier japonais dans le port de Callao, près de Lima alors que 49 personnes se trouvent à son bord. Vingt-trois membres de l'équipage parviennent à quitter le navire avant qu'il ne sombre en moins de 5 minutes sur un fond de 43 mètres. L'officier en second décide finalement d'évacuer le bâtiment 17 heures après le naufrage, en constatant une certaine agitation parmi les survivants affamés, assoiffés et exposés à la pollution de l'atmosphère par du chlore et du CO_2. Dans le sous-marin, les rescapés sont exposés à une pression interne de 2,6 ATA (soit 16 mètres d'eau), si bien que la remontée, un par un, directement en surface, va entraîner l'apparition de 22 cas d'accidents de décompression dont 20 graves avec notamment un décès et une tétraplégie.

Après avoir dressé un panorama des principaux risques qui vont conditionner la survie à bord dans le sous-marin en situation de détresse, nous exposerons les différentes techniques de sauvetage individuel et collectif, en décrivant notamment le dispositif du *Nato Submarine Rescue System*, actuellement en fonction et opérationnel pour la Marine nationale.

La survie à bord en milieu confiné

Les risques pour l'équipage vont dépendre de la nature de l'accident initial, de ses conséquences pour l'atmosphère du sous-marin et des possibilités de régénération de l'air ambiant (3, 4).

On distingue trois grandes catégories de risques (fig. 1), la première correspond à des risques d'ambiance comme par exemple la survenue d'une explosion et/ou d'un incendie qui peuvent être responsables d'un afflux de sujets polytraumatisés, blastés et brûlés. Ainsi la rupture de conduites de vapeurs d'eau brûlantes a été à l'origine d'un accident gravissime en 1994 à bord du sous-marin *Émeraude*. En fonction de l'évolution de la situation, un risque psychologique peut apparaître et entraîner des réactions de paniques collectives entravant le bon déroulement de l'évacuation. La mise en place d'une « police » pour la gestion des moments critiques peut s'avérer indispensable. Si le sous-marin en avarie est immobilisé pour une durée prolongée, des problèmes de



Figure 1. Risques spécifiques pouvant influencer la survie à bord d'un sous-marin en avarie.

déshydratation et de dénutrition peuvent survenir après l'épuisement des lots de survie. L'hypothermie peut également être problématique en cas d'immobilisation prolongée du sous-marin dans des eaux froides.

La seconde catégorie correspond aux risques toxiques de pollution de l'atmosphère du sous-marin. Le dégagement de fumées toxiques (CO, acide cyanhydrique) est possible dans le cas d'un incendie. En présence d'eau de mer, des réactions d'hydrolyse de batteries peuvent libérer du chlore et provoquer des lésions pulmonaires. D'autres dangers potentiels sont représentés par le CO_2, les vapeurs d'huiles, l'hydrogène, sans oublier la menace spécifique des sous-marins à propulsion nucléaire avec des risques de contamination radiologique ou d'irradiation en cas d'atteinte du compartiment « réacteur ».

La dernière catégorie est en rapport avec les modifications de la pression interne du sous-marin. Lors d'un naufrage de sous-marin, la présence d'une voie d'eau est à craindre car elle peut non seulement provoquer l'inondation des compartiments avec un risque de noyade, mais également mettre le submersible en pression. Dans cette situation, il faut tenir compte de la pression partielle (Pp) de chaque gaz, fonction du % du gaz et de la pression ambiante (P_{amb}) régnant dans le sous-marin, avec la relation (selon la loi de Henry) : $Pp = \%\ gaz \times P_{amb.}$ Ainsi l'augmentation de la pression interne du sous-marin va se traduire par une élévation des pressions partielles avec des risques spécifiques selon le gaz présent dans l'ambiance du sous-marin. Lors d'une exposition prolongée, l'élévation de la Pp d'azote engendre un état de saturation de l'organisme avec ce gaz diluant. La seule possibilité pour éviter un accident de désaturation lors du retour en surface sera de réaliser une décompression très lente et prolongée jusqu'à la pression atmosphérique. Par ailleurs, l'élévation de la Pp d'oxygène peut entraîner une toxicité neurologique, responsable de convulsions et/ou d'une toxicité pulmonaire, responsable de symptômes respiratoires de gravité variable. L'expression de ces deux formes de toxicité est directement fonction du niveau de PpO_2 et de la durée d'exposition. En dehors de ces deux risques

principaux, il existe également la possibilité de narcose à l'azote ou « ivresse des profondeurs » en cas de pressurisation importante et qui peut être responsable de troubles cognitifs divers et variés (désorientation spatio-temporelle, troubles de l'humeur, de l'idéation, de la mémoire, etc.), des risques d'hypercapnie (céphalées, sueurs, hyperventilation, essoufflement, etc.) avec élévation de la $PpCO_2$.

Les dotations de secours, réparties dans des zones « refuge », à l'avant et à l'arrière du sous-marin, permettent la survie à bord pendant environ une semaine. Elles comprennent des réserves d'eau, des rations alimentaires, des couvertures de survie, des chandelles à oxygène et des systèmes passifs d'absorption du CO_2. En présence d'une atmosphère appauvrie en oxygène, la mise en œuvre d'une chandelle permet de libérer 2 à 3 m^3 d'oxygène ; l'absorption du CO_2 relève de systèmes actifs (usine de décarbonatation), qui nécessitent l'autonomie électrique, ou de systèmes passifs (sacs suspendus) à base de chaux sodée ou d'hydroxyde de lithium (LiOH). L'utilisation d'osmoseur manuel, les pompes « Survivor », permettent de produire la quantité d'eau potable nécessaire à l'équipage (environ un litre par jour et par personne).

Une fois les procédures d'évacuation envisagées, l'équipe médicale du sous-marin doit établir un triage médico-chirurgical qui va permettre d'identifier les sujets à prendre en charge immédiatement ou en différé. Le triage est un paramètre essentiel dans le choix de la priorisation des sujets à évacuer. En raison de l'évolutivité des symptômes et des modifications des risques au cours du temps, le triage sera répété tout au long du processus de sauvetage. On distingue plusieurs niveaux de triage (3), le classement T correspond au triage médico-chirurgical classique avec quatre niveaux :

– T1 : pronostic vital engagé en l'absence d'un traitement immédiat de réanimation ou chirurgical ;

– T2 : traitement médical ou chirurgical indispensable, mais pouvant être différé ;

– T3 : atteintes moins sévères, management initial peut être délégué à des secouristes entraînés ;

– T4 : « *morituri* », traitement palliatif et antalgiques.

En situation de risque radiologique, on considère comme T2, les sujets irradiés avec une dose évaluée supérieure à 2 grays en dosimétries clinique ou physique. Le risque de contamination externe et interne est également à prendre en compte en appliquant des mesures de décontamination sommaire : déshabillage, prise d'iode.

Il existe également un triage spécifique avec le classement C qui correspond aux risques d'accidents de décompression après le retour en surface. Ce type de triage doit être réalisé au décours d'une procédure de sauvetage individuel par sassement ou pendant la phase de décompression d'une procédure de sauvetage collectif.

On distingue trois niveaux C0, C1 et C2 :

– C1 : recompression immédiate, risque vital et signes neurologiques déficitaires ;

– C2 : recompression à envisager mais avec un délai possible ;

– C0 : aucune recompression nécessaire.

Les techniques de sauvetage d'un sous-marin

Il existe deux méthodes d'évacuation : le sauvetage individuel, qui peut être réalisé rapidement et de manière autonome par le sous-marin et le sauvetage collectif qui nécessite la mise en place de moyens de secours extérieurs. La France, avec la Grande-Bretagne et la Norvège, dispose actuellement d'un système opérationnel de sauvetage collectif avec le « *Nato Submarine Rescue System* » (NSRS), en service actif depuis janvier 2009.

Sauvetage individuel par sassement

Le sauvetage individuel a longtemps fait appel à la « méthode de la jupe », où une collerette en toile caoutchoutée emprisonnait une bulle d'air dans laquelle les survivants pouvaient respirer (fig. 2). L'usage de la jupe était cependant limité à une profondeur maximale de 80 mètres, et la mise en pression prolongée des derniers rescapés les exposaient inéluctablement à l'accident de désaturation.

Les sous-marins français actuels privilégient la méthode du sassement individuel. Sur ordre du commandant, l'évacuation s'effectue individuellement par un sas du compartiment refuge du sous-marin (5). Ces procédures ne sont envisagées que si les conditions à bord ne permettent pas d'attendre les moyens de secours collectif. Chaque membre de l'équipage doit revêtir sa combinaison de sauvetage (les combinaisons « Mark » longtemps utilisées, sont actuellement remplacées par la tenue « Armadillo » de « Texcon ») qui permet de constituer une réserve d'air au niveau de la tête, nécessaire pour la respiration et qui apporte une flottabilité importante. Une fois le sas ouvert, la remontée s'effectue très rapidement vers la surface, la flottabilité de la combinaison permet une survie de plusieurs heures en surface en fonction des conditions météorologiques (température et état de mer) (fig. 2). C'est la vitesse de mise en pression rapide du sas (inférieure à 1 minute) qui permet de limiter le risque d'accident de désaturation. Il a été montré que le risque d'accident de désaturation augmentait avec l'élévation de la pression interne régnant dans le sous-marin, la profondeur d'immersion et le temps d'exposition. Il existe des abaques qui prennent en compte ces trois paramètres avec des estimations de risque de survenue d'un accident de désaturation entre 5 à 10 % lorsque la pression interne s'élève à 1,7 ATA (3).

Ainsi la principale limitation de cette méthode d'évacuation est qu'elle n'est autorisée qu'en cas d'absence de pressurisation interne du sous-marin ou alors en cas d'une pressurisation très faible, inférieure à 1,7 ATA (équivalent à 7 mètres de pression interne dans l'atmosphère du sous-marin). En respectant ces conditions, cette méthode est potentiellement réalisable jusqu'à 180 mètres si la pression interne est inférieure à 1,5 ATA et jusqu'à 90 mètres de profondeur si la pression interne est comprise entre 1,5 et 1,7 ATA. Sur 100 sassements réalisés par la *Royal Navy* à des profondeurs comprises entre 90 à 180 mètres pour une pression interne du sous-marin de 1 ATA, trois cas de

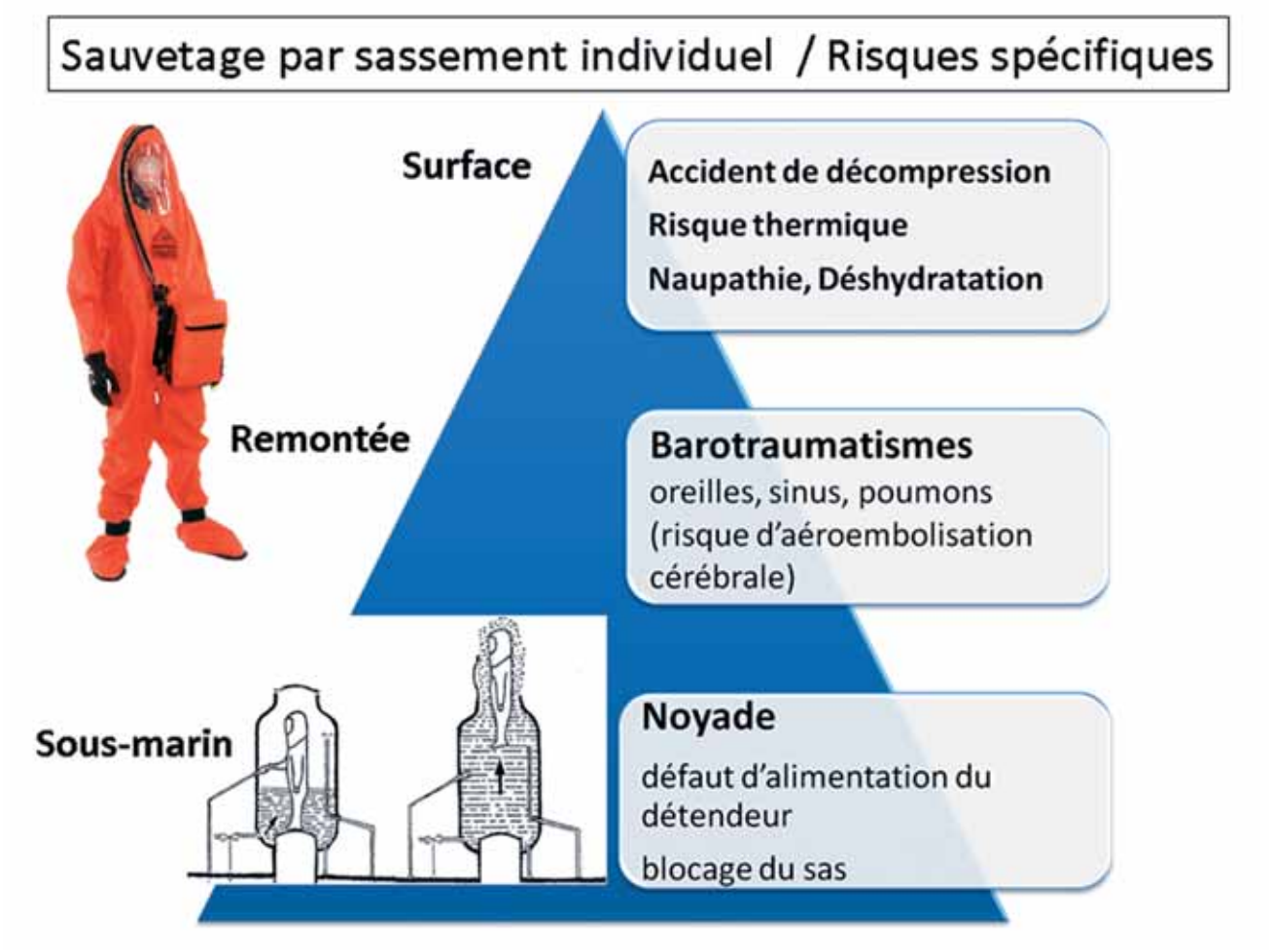


Figure 2. Sauvetage individuel par sassement, méthode et risques.

d'accidents de décompression neurologiques ont malgré tout été observés (6).

La figure 2 décrit les principaux risques liés à la méthode du sassement. Dans le sous-marin, un risque de noyade est possible en cas de défaut d'ouverture pendant la phase de remplissage du sas, ou en cas de rupture de la combinaison.

Du fait des vitesses de remontée très rapides vers la surface, en dehors du risque d'accident de décompression, la méthode du sassement expose également à la survenue de barotraumatismes qui sont liés aux variations rapides de volumes à la remontée au sein des cavités aériques de l'organisme, en l'absence de processus d'équilibration efficace (figure). Ces barotraumatismes affectent principalement les oreilles (barotraumatismes auriculaires) en cas de dysperméabilité tubaire et les sinus, ainsi que les poumons, en cas de blocage expiratoire. Les barotraumatismes pulmonaires peuvent être redoutables si les lésions alvéolaires se compliquent d'une aéroembolisation cérébrale pouvant entraîner des symptômes neurologiques et parfois mettre en jeu le pronostic vital.

En surface, la combinaison permet aux naufragés la survie en eaux froides en limitant le risque d'hypothermie pendant environ 24 h En revanche en ambiance chaude, il existe de sérieux risques d'hyperthermie et de déshydratation. Soif et déshydratation seront au premier plan si le délai de récupération dépasse plusieurs jours ; par ailleurs des problèmes de naupathie et de vomissements peuvent majorer cette problématique (fig. 2).

Un entraînement et des exercices sont donc indispensables et régulièrement organisés avec le centre d'entraînement au sauvetage individuel (CESI) afin de familiariser les utilisateurs et de limiter les risques.

Sauvetage collectif avec le NSRS

Le sauvetage collectif pour la Marine nationale repose sur le *Nato Submarine Rescue System* (7), dispositif tripartite dont les coûts ont été partagés entre la France,

la Grande-Bretagne et la Norvège. Le NSRS est basé à Faslane en Écosse, il est transportable par aéronef, et théoriquement déployable en 72 h dans le monde entier, à l'exception des zones couvertes de glace, à compter de l'appel de détresse. Ce système peut être accueilli sur un bâtiment disposant d'une surface de 400 m^2 de pont, désigné sous le terme de « mothership ou MOSHIP » (fig. 3).

Le NSRS se compose d'un sous-marin de sauvetage (fig. 4), le « Submarine Rescue Vehicule (SRV) », de construction Rolls-Royce®, capable d'intervenir à la profondeur maximale de 600 m, avec une capacité d'emport de 12 à 15 personnes. Le SRV permet de récupérer l'équipage du sous-marin en maintenant une pression équivalente à la pression interne du sous-marin en détresse.

Après la connexion du SRV en surface sur le MOSHIP, l'équipage est transféré sous pression ou « *Transfer Under Pressure (TUP)* » (fig. 5), et réparti dans deux chambres de décompression à grande capacité, chacune d'elle permettant d'accueillir 32 personnes assises (fig. 6). La décompression peut alors commencer, l'ambiance des chambres étant composée d'air, mais les



Figure 3. Bâtiment d'accueil du NSRS, avec sous-marin de sauvetage SRV disposé sur le portique.

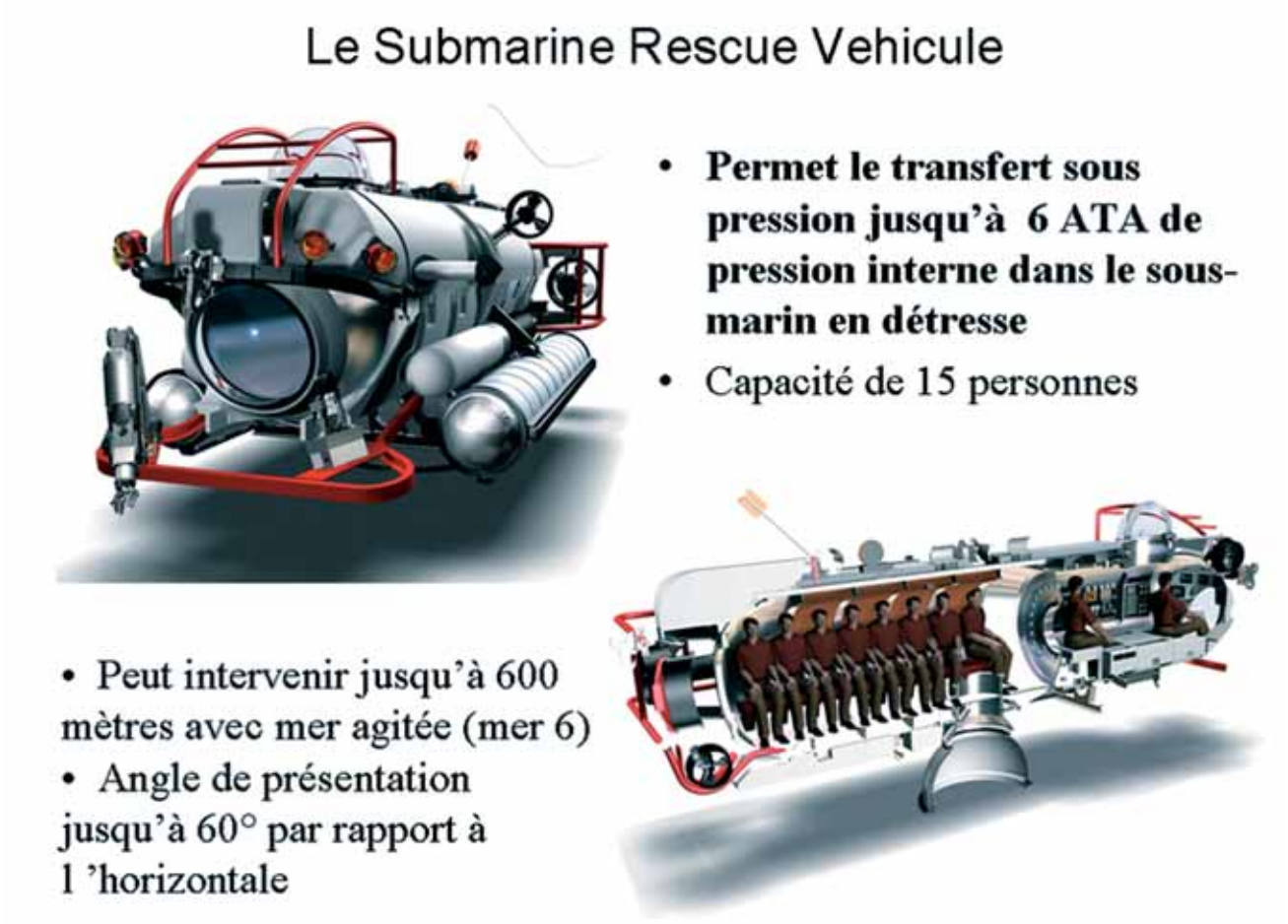


Figure 4. Le sous-marin de sauvetage SRV et ses caractéristiques.



Figure 5. Sauvetage collectif d'un sous-marin en avarie avec le NSRS. Principes du transfert sous pression.

rescapés peuvent respirer dans un masque permettant l'inhalation d'oxygène pur, voire d'un mélange suroxygéné (O_2/N_2).

Le choix de la procédure de décompression pour ramener en surface un équipage de sous-marin sous-pression et saturé à l'air est une question complexe qui ne fait pour l'instant pas l'objet de consensus entre les différentes nations impliquées dans le NSRS (8,9). Les objectifs d'une telle décompression sont en effet difficilement conciliables :

– ramener à la pression atmosphérique l'équipage et les accompagnateurs le plus rapidement possible avec le moins d'accident, ce qui implique l'utilisation d'oxygène dont l'intérêt est de réduire et de sécuriser la durée de la décompression ;

– utiliser des mélanges gazeux les moins toxiques possibles en évitant les phénomènes indésirables liés à l'inhalation excessive d'oxygène.

En effet, en ambiance hyperbare, il existe une toxicité particulière de l'oxygène, appelée toxicité chronique ou « effet Lorrain-Smith », qui va entraîner des lésions pulmonaires (10). Cette toxicité apparaît dès lors que la PpO_2 devient supérieure à 0,5 ATA, pour des expositions prolongées de l'ordre de plusieurs jours. L'atmosphère du sous-marin étant composée d'air, la survenue d'une toxicité pulmonaire peut s'observer lorsque la pression partielle d'oxygène dépasse 0,5 ATA (profondeur équivalente de 14 mètres). Si l'on prend en compte un délai d'acheminement des secours de l'ordre de plusieurs jours, le risque de toxicité pulmonaire devient significatif lorsque la pression interne du sous-marin dépasse 3 ATA et les sujets les plus atteints ne pourront plus supporter une décompression utilisant de l'oxygène.

Les procédures utilisées pour les plongées profondes à saturation classiques (plongées d'intervention sous la mer), réalisées avec une régulation de la PpO_2 maintenue sous le seuil toxique, ne peuvent être utilisées. Comme le système NSRS ne permet pas ce type de régulation, il a été nécessaire de valider une table de décompression, en ambiance air, permettant à l'équipage et au personnel accompagnant de réaliser en sécurité la totalité de la procédure.

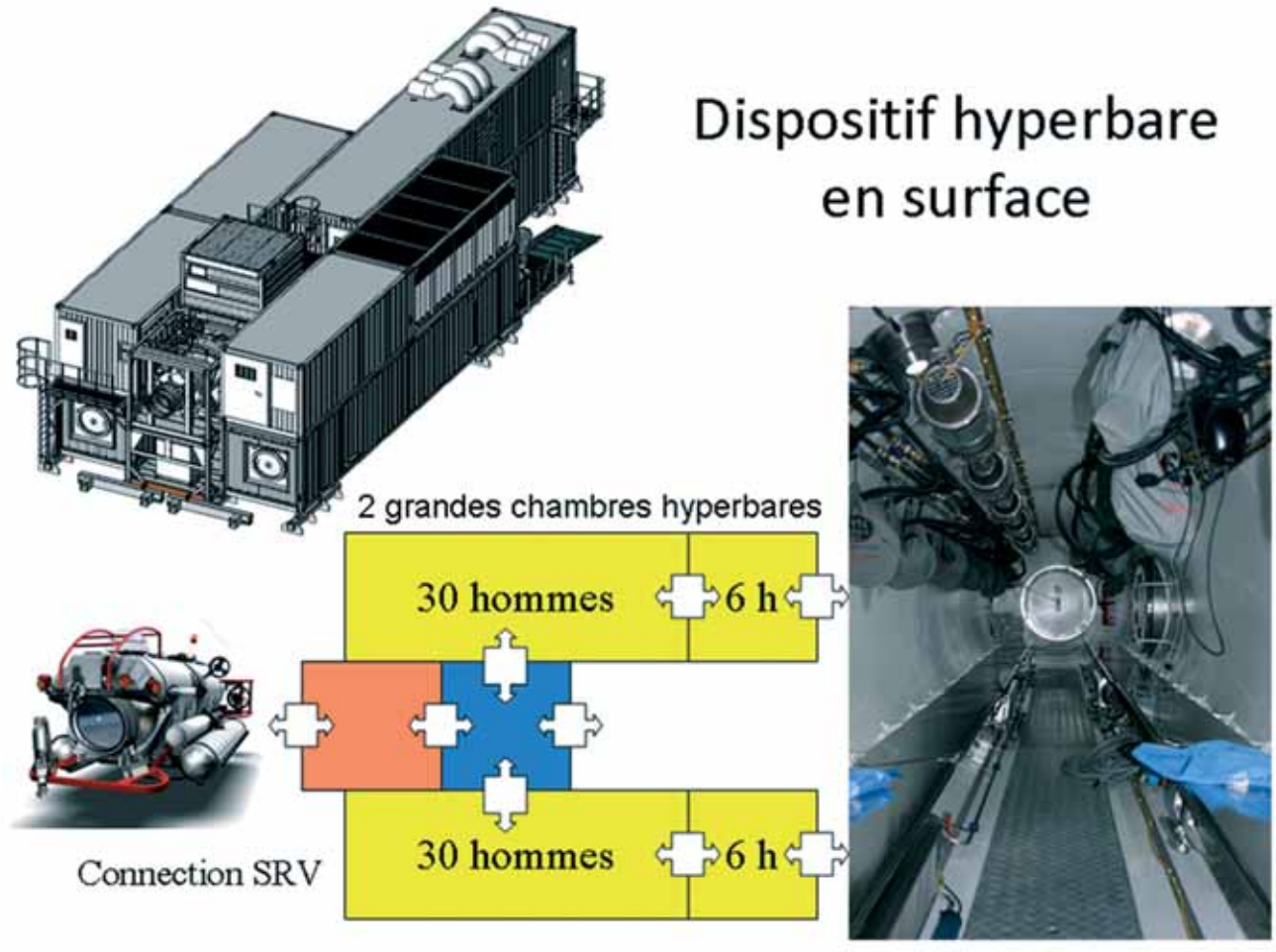


Figure 6. Installations hyperbares du NSRS déployées sur un bâtiment d'accueil en surface.

Nécessité d'utiliser une procédure de décompression

Le retour immédiat à la pression atmosphérique de sujets en état de saturation, sans réaliser une procédure de décompression est susceptible d'entraîner un grand nombre d'accidents neurologiques graves, voire de décès. Des expériences animales ont été réalisées sur des porcs saturés à l'air pendant 22 heures à des niveaux de pressions compris entre 2,52 et 5,55 ATA (profondeurs équivalentes de 15,2 à 45,5 mètres) puis remontés directement en surface à la vitesse de 9 mètres/minute (11). On a observé 61 % d'accidents de décompression sévères ; la moitié de ces animaux va décéder dans l'heure qui suit le retour en surface tandis que les autres présenteront des paralysies des membres. La fréquence et la gravité de ces accidents augmentent avec la profondeur d'exposition. Les formes mortelles sont plus fréquentes pour les profondeurs élevées tandis que les formes paralysantes prédominent pour les expositions à plus faible profondeur.

Chez l'homme des expériences ont été réalisées pour déterminer la profondeur à partir de laquelle on peut réaliser directement un retour en surface sans risque d'accident de décompression pour des sujets saturés à l'air (12). Dix-neuf sujets sont restés 48 heures à 1,77 ATA (profondeur équivalente de 7,7 mètres) et 15 sujets à 1,89 ATA (8,9 mètres), avec un retour en surface en 2 minutes. Aucun des 19 sujets à 1,77 ATA n'a présenté de signes d'accident de décompression, tandis que 4 sur les 15 à 1,89 ATA ont présenté des signes d'accident de décompression (douleurs articulaires, céphalées, myalgies, asthénie, prurit). Cette étude qui confirme les données théoriques et expérimentales, permet d'envisager la remontée directement en surface d'un équipage de sous-marin saturé à l'air pendant plusieurs jours lorsque la pression interne du sous-marin n'excède pas 1,7 ATA (7 mètres). Au-delà de ce seuil, le risque d'accident de décompression croit avec la pression d'exposition.

Risque de toxicité pulmonaire liée à l'oxygène

Les données concernant la toxicité pulmonaire de l'oxygène chez l'homme après une exposition à saturation en ambiance air sont extrêmement limitées, il existe néanmoins une étude qui objective 100 % de toxicité chez 12 sujets, respirant de l'air dans une chambre hyperbare, saturés à la pression de 5 ATA (profondeur équivalente de 40 mètres) pendant 48 h (13). Dans cette étude, les premiers signes cliniques apparaissent dès la douzième heure et s'accentuent au fil des heures. La toux devient permanente et insomniante, elle s'accompagne de précordialgies, d'une dyspnée d'effort puis d'une dyspnée permanente au repos. On note une grande variabilité interindividuelle dans l'expression et la gravité de ces symptômes. Cette variabilité est également observée pendant la phase de récupération qui dure 8 jours en moyenne jusqu'à plusieurs mois pour certains sujets (présentant une fatigue chronique et un essoufflement à l'effort). Si l'exposition hyperoxique persiste, le pronostic vital peut être engagé, du fait d'une insuffisance respiratoire aiguë liée à la fibrose du tissu pulmonaire.

La détermination de la dose toxique d'oxygène est un aspect essentiel dans la problématique du sauvetage des sous-marins. Il existe un certain nombre de méthodes visant à quantifier le niveau de toxicité, la plus connue étant l'Unité de toxicité de l'oxygène ou OTU (également désignée sous l'acronyme UPTD ou unité de dose toxique pulmonaire) qui est fonction de la durée d'exposition t et de la pression partielle d'oxygène avec la relation suivante : $OTU = t\,[(PO2-0.5)/0.5]^{0.83}$. La méthode Repex (14), qui utilise l'OTU, a été employée avec succès lors des expérimentations d'habitacles ou « maisons » sous la mer. Le principe est de ne pas dépasser des doses cumulées d'OTU afin de limiter le risque de survenue d'une toxicité pulmonaire. Ainsi 850 OTU sont acceptables pendant les 24 premières heures, 1 400 OTU pour 48 heures et 1 860 OTU pour 72 heures. En cas de pressurisation du sous-marin, cette méthode Repex permet d'établir un risque de toxicité pulmonaire faible si la pression interne du sous-marin reste inférieure à 3,3 ATA pendant 3 jours, inférieure à 3 ATA pour 5 jours, ou encore inférieure à 2,8 ATA pour 7 jours.

Choix d'une procédure de décompression pour le NSRS

En se basant sur les procédures de plongée à saturation utilisées dans le passé chez l'homme, deux situations sont à envisager en fonction du niveau de pression interne du sous-marin et du niveau de probabilité de survenue d'une toxicité pulmonaire liée à l'oxygène.

Absence de risque de toxicité pulmonaire liée à l'oxygène

Cette situation n'est envisageable que lorsque la pression interne du sous-marin reste inférieure ou égale à 3 ATA selon le délai d'acheminement des secours.

– Procédures de décompression air/oxygène de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)

Un certain nombre de procédures de décompression utilisées dans le passé lors de plongées à saturation pourraient être employées dans le contexte du sauvetage des sous-marins (15). Lors des expérimentations de « maisons sous la mer », le projet HYDROLAB de 1972 à 1975, 343 plongeurs ont réalisé des séjours hyperbares en saturation à différentes profondeurs jusqu'à 18 m pour des périodes allant de 1 à 13 jours (16). Quatre procédures de décompression ont été publiées par la NOAA en 1979 : les tables 12-10, 12-11, 12-12 et 12-13. La table 12-11 est la procédure la mieux évaluée, avec un seul cas d'accident de décompression articulaire rapporté à distance lors d'un vol aérien sur plus de 300 expositions en ambiance air à la profondeur maximale de 12,6 mètres. Cette table prévoit un retour en surface en 13 h 38 min à partir de 12,6 mètres, avec prise d'oxygène pur à partir de 3,6 m. La table 12-13, qui est considérée comme la plus conservative, prévoit 64 h 30 min pour le retour en surface de la profondeur maximale de 30 mètres (4 ATA) en alternant l'inhalation d'air et d'oxygène pur. Il semblerait cependant que les profondeurs au-delà de 18 mètres n'aient été testées que sur un nombre limité de sujets. Six sujets, jeunes et athlétiques, ont notamment réalisé une décompression à partir de 4 ATA après 14 jours passés en ambiance Nitrox (5,2 % O2, 94,8 % N2) lors des expérimentations *Predictive Studies II* (17). Neuf autres plongeurs scientifiques ont par la suite réalisé une procédure équivalente en mer au large de Porto Rico (16). Aucun phénomène pathogène n'a été enregistré pendant les deux jours de décompression, en utilisant ces procédures, proches des tables publiées par la NOAA.

– Procédures de décompressions accélérées à l'oxygène pur

Des procédures de décompressions accélérées développées pour le sauvetage des sous-marins, utilisant exclusivement de l'oxygène pur, ont été testées par la *Navy Experimental Diving Unit* (NEDU). Bien que ces procédures, avec des temps de décompression très rapides, aient occasionné un certain nombre d'accidents de décompression, il peut être envisagé de les utiliser dans un contexte de contrainte temporelle (18). La NEDU a testé chez un nombre conséquent de sujets des procédures de décompression accélérée à l'oxygène 100 %, utilisable pour un équipage de sous-marin saturé à l'air à une pression équivalente de 2,8 ATA (18). Les sujets ont été saturés pendant 72 heures à la pression maximale de 2,5 ATA (profondeur de 15 mètres) avec un mélange Nitrox (PpO_2 de 0,3 ATA), qui correspondait à une profondeur équivalente à l'air de 18 mètres (2,8 ATA). Différents protocoles avec des vitesses de décompression plus ou moins rapides ont été testés, avec réalisation ou non de périodes de pré-oxygénation variant de 2 à 4 heures avant le début de la décompression. Les décompressions trop rapides ont été à l'origine de plusieurs cas d'accidents de décompression avec notamment des formes neurologiques. Les décompressions les moins accidentogènes étaient celles réalisées avec au moins 2 heures de pré-oxygénation. L'US Navy a finalement retenu une procédure accélérée, avec « un risque accepté » d'accident, permettant de rejoindre la surface en 10 heures à partir de 2,8 ATA, avec 2 heures de pré-oxygénation avant de débuter la décompression.

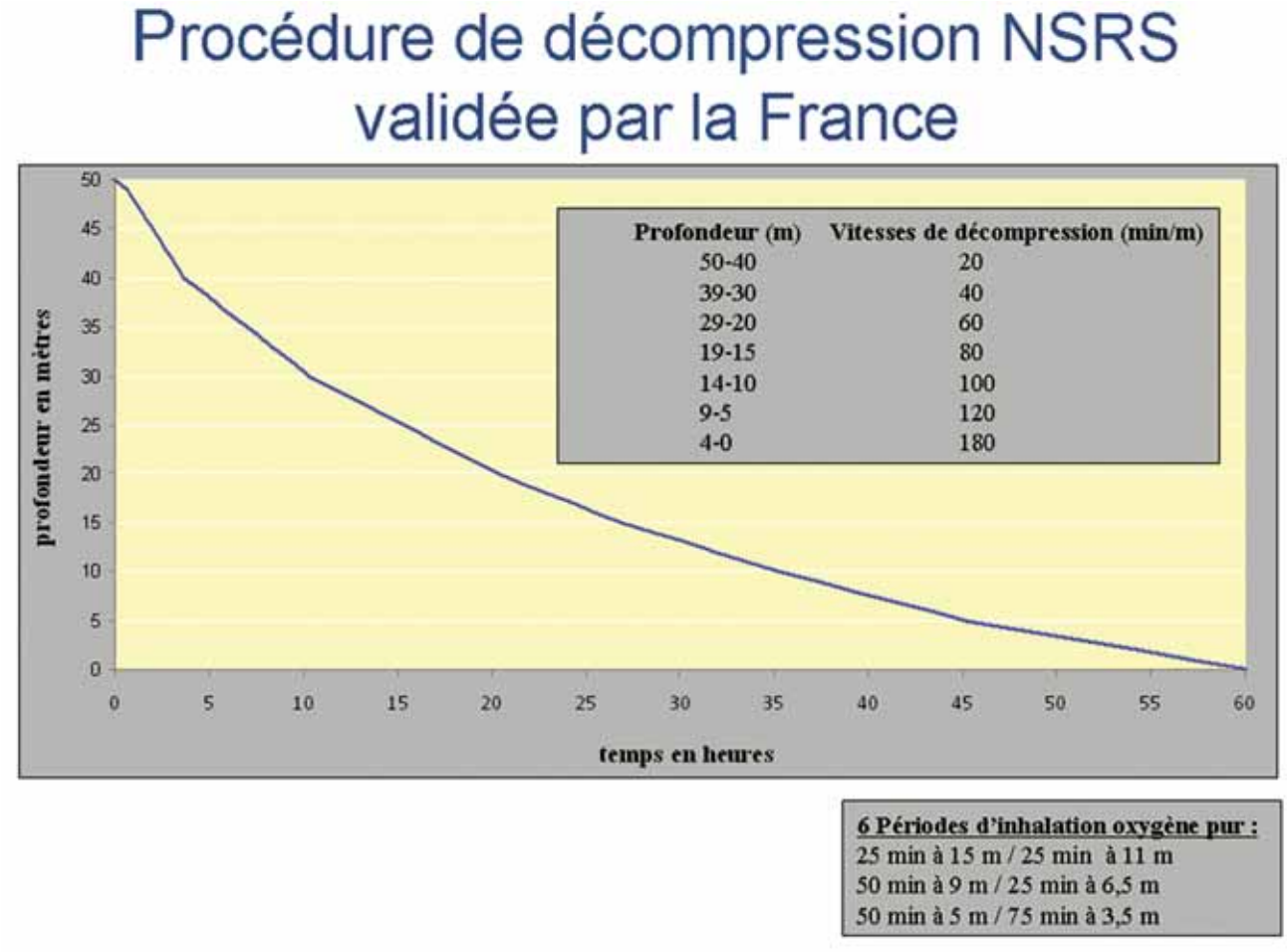


Figure 7. Procédure de décompression pour le NSRS validée par la France.

Présence d'un risque de toxicité pulmonaire liée à l'oxygène

Si l'on prend en compte le délai d'acheminement des secours, de l'ordre de 3 à 5 jours, la toxicité pulmonaire devient problématique lorsque la pression interne du sous-marin dépasse 3 ATA. Dans ce cas, il n'est plus possible d'utiliser des procédures de décompression accélérées à l'O_2 pouvant majorer la toxicité pulmonaire de l'O_2. Dans la mesure où il n'existait aucune procédure de décompression validée chez l'homme dans ce contexte d'élévation importante de la pression interne du sous-marin, l'IRBA/ERRSO et ALFAN/CEPHISMER ont élaboré et testé chez l'homme une procédure sécurisée, prenant en compte l'ensemble des risques liés à ce contexte (9).

Nous avons ainsi modélisé et testé une procédure de décompression à l'air capable de ramener à la pression atmosphérique du personnel soumis à une exposition hyperbare de longue durée jusqu'à 6 ATA (50 mètres) avec une PpO_2 maintenue à 0,5 ATA.

Nous avons adopté des vitesses de décompression lentes pour limiter la formation de bulles et le risque d'accident. Pour améliorer la décompression, des courtes périodes d'inhalation d'oxygène ont été incorporées sur la fin de la procédure, en contrôlant la dose inhalée pour éviter une toxicité pulmonaire liée à l'oxygène (fig. 7).

Avant de débuter l'expérimentation chez l'homme, les choix réalisés ont été confrontés à des modélisations mathématiques de la formation des bulles. La campagne expérimentale pour tester cette nouvelle procédure a été soutenue financièrement par la Mission Innovation Participative de la Défense nationale et réalisée de 2010 à 2012. Au total, 24 sujets ont séjourné dans le centre hyperbare de la CEPHISMER pendant 12 heures à des pressions de 5 et 6 ATA puis ont été décomprimés pendant 60 heures. Des explorations de la fonction respiratoire et des mesures de bulles circulantes (société BF systèmes) ont été répétées tout au long de la procédure. Au final, nous n'avons pas observé de forme constituée d'accident de désaturation, ni de symptôme sévère de toxicité pulmonaire liée à l'oxygène (9, 19). Nous disposons

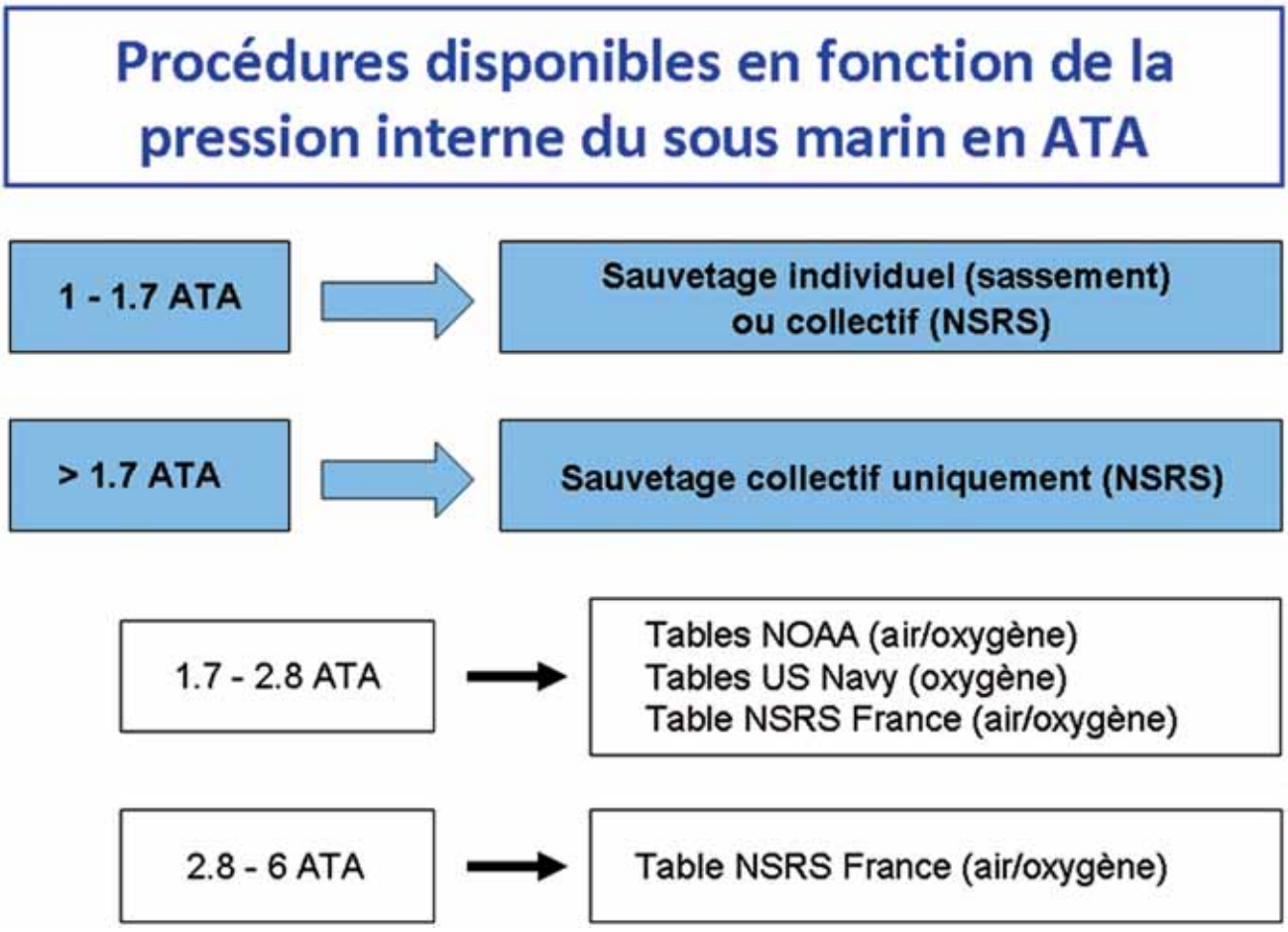


Figure 8. Choix de la procédure de décompression en fonction du niveau de pression interne.

maintenant d'une procédure de décompression validée pour le *Nato Submarine Rescue System* (NSRS) qui permet de ramener à la pression atmosphérique l'équipage d'un sous-marin en détresse en limitant le risque d'accident de décompression, ainsi que le personnel accompagnateur (plongeurs sauveteurs, médecins et infirmiers) chargé de la récupération sans lui faire courir de risque. La procédure est intégrée dans la documentation NSRS et OTAN. Elle est considérée comme la procédure de premier choix lorsque la pression d'un sous-marin en détresse est élevée de 2,8 à 6 ATA (fig. 8).

Conclusion

Les techniques de sauvetage ont beaucoup évolué ces dernières années, la France dispose actuellement avec le NSRS d'un des systèmes opérationnels les plus performants au monde pour le sauvetage collectif d'un équipage de sous-marin naufragé.

Néanmoins la mise en œuvre du NSRS est une opération délicate qui ne s'improvise pas et nécessite des formations et des entraînements réguliers, avec le déploiement au sein de la Marine nationale de personnels plongeurs et sous-mariniers ainsi que des médecins et des infirmiers du Service de santé des armées. Par ailleurs les derniers accidents comme celui du Koursk ont mis en évidence la nécessité d'une bonne coopération internationale. Des exercices internationaux sont ainsi régulièrement organisés afin de mettre en œuvre les systèmes de sauvetage en conditions réelles et de vérifier l'adaptation dans différentes configurations. Des groupes de travail spécifiques NSRS et des réunions OTAN sont également indispensables pour actualiser et harmoniser les procédures utilisables en cas d'accident.

Les auteurs ne déclarent pas de conflit d'intérêt concernant les données présentées dans cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Pény C, Louge P, Galland FM. Le sauvetage des sous-marins. Cinésiologie 2001. n°196 : 37-40.
2. Harvey C, Carson J. The BAP Pacocha (SS-48) Collision : The Escape and Medical Recompression Treatment of Survivors. Naval Submarine Medical Research Laboratory. Special Report SP89-1. Groton, USA, 30 March 1989.
3. NATO 2013/05. ATP 57 Edition C Version 1 Submarine search and rescue manual.
4. Marine nationale. Instruction permanente pour la recherche et le sauvetage d'un sous-marin (IP SUBMISS/SUBSUNK). Édition 2012.
5. Amabile JC, Defrance JP, Féraud M, Panet JJ, Roé H. Sauvetage des équipages de sous-marins. Médecine et Armées 2000 ; (28) 3 : 247-54.
6. Parker EC, Ball R, Tibbles PM, Weatherby PK. Escape from a disabled submarine : decompression sickness risk estimation. Aviat Space Envir Med 2000 ; 71 : 109-14
7. International Submarine Escape and Rescue Liaison Office (ISMERLO) website. Avalaible : http://www.ismerlo.org/assets/NSRS/NSRS % 20Factsheet % 20Issue % 204 % 201 % 20Io-res1 % 20_2_. pdf. Accessed 2013 March 4.
8. Risberg J. Procedures for saturation decompression of submariners rescued from a dissub. Norwegian armed forces joint medical service office of diving and submarine medicine. 5th edition, 2008
9. Blatteau JE, Pény C, Jammes Y, Hugon J, Barbaud A, Castagna, et al. Validation d'une procédure de décompression pour le « Nato Submarine Rescue System », dans le cadre de plongées humaines en saturation réalisées au centre hyperbare de la CEPHISMER. Rapport de Recherche N°12.06 IRBA, Brétigny, octobre 2012 : 88.
10. Clark J, Lambertsen C, Gelfand R, et coll. Effects of prolonged oxygen exposure at 1.5, 2.0, or.5ATA on pulmonary function in men (Predictive Studies V). J Appl Physiol 1999 ; 86 (1) : 243-59.
11. Dromsky D, Toner C, Survanshi S, et al. Natural history of severe decompression sickness after rapid ascent from air saturation in a porcine model. J Appl Physiol 2000 ; 89 : 791-8.
12. Eckenhoff R, Osborne S, Parker J, Bondi K. Direct ascent from shallow air saturation exposures. Undersea Biomed Res 1986 ; 13 (3) : 305-16.
13. Eckenhoff R, Dougherty JJr, Messier A, Osborne S, Parker J. Progression of and recovery from pulmonary oxygen toxicity in humans exposed to 5 ATA air. Aviat Space Environ Med 1987 Jul ; 58 (7) : 658-67.
14. Hamilton RW, Thalmann ED. Decompression practice. Brubakk AO, Neuman TS, Eds. In Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. 5th edition. London : Saunders, 2003.
15. Eckenhoff R, Vann R. Air and nitrox saturation decompression : a report of 4 schedules and 77 subjects. Undersea Biomed 1985 ; 12 (1) : 41-52.
16. Miller JW, Eds. Saturation divin. In NOAA Diving Manual, Diving for Science and Technology. First edition, 1974 and Second edition, 1979.
17. Lambersten CJ, Wright WB. Multiday exposure of men to high nitrogen pressure and increased airway resistance at natural inspired oxygen tension. A 14-day continuous exposure to 5.2 % O2 in N2 at 4.0 atmospheres absolute pressure. Aerospace Med 1973 ; 44 (7) : 703-869.
18. Latson G, Flynn E, Gerth W, Thalman E. Accelerated decompression using oxygen for submarine rescue. Summary report and operational guidance. Naval Sea Systems Command, Navy Experimental Diving Unit NEDU TR 11-00, December 2000.
19. Blatteau JE, Hugon J, Castagna O, Meckler C, Vallée N, Jammes Y, et al. Submarine rescue decompression procedure from hyperbaric exposures up to 6 bar of absolute pressure in man : effects on bubble formation and pulmonary function. PLoS One. 2013 Jul 2 ; 8 (7) : e67681. doi : 10.1371/journal.pone.0067681. Print 2013.



© O. Castagna