Narcose aux gaz inertes : risque cognitif pour l'équipage d'un sous-marin en détresse et pour son équipe de sauvetage

J.-J. Risso[a], J.-É. Blatteau[a], N. Vallée[a], J.-H. Abraini[b], F. Vidal[c], C. Meckler[a]

a Équipe résidente de recherche subaquatique opérationnelle de l'Institut de recherche biomédicale des armées, BP 600 – 83800 Toulon Cedex 9.
b Université de Caen, France et Université de Laval – Canada.
c CNRS (LNC, UMR 7291) Case C, 3 place Victor Hugo – 13331 Marseille Cedex 3.

Résumé

Dans un sous-marin en détresse avec une voie d'eau, la compression de l'air présent dans un compartiment augmente la pression partielle d'azote, soumettant ainsi l'équipage à un risque de narcose. Afin de pouvoir se connecter à ce sous-marin, le véhicule de secours doit être à la même pression. L'équipe médicale intervenante est ainsi soumise au même risque. La narcose entraîne des symptômes apparents, mais aussi une dégradation du traitement sensorimoteur, potentiellement dangereuse pour le bon déroulement de la mission de sauvetage. Le traitement sensorimoteur est en effet à la base de la majeure partie des actions volontaires. Afin d'appréhender l'impact de la narcose dans le contexte du sauvetage de sous-marin, nous avons bénéficié de sessions de plongées d'essais à saturation, ce qui nous a permis de comparer une condition non narcotique (normobare) à une condition narcotique (hyperbare). Les plongeurs ont réalisé, dans ces deux conditions, une tâche particulière permettant l'étude spécifique de l'étape décisionnelle du traitement sensorimoteur. La méthode des facteurs additifs a confirmé l'altération de cette étape par la narcose.

Mots-clés : Narcose aux gaz inertes. Prise de décision. Sauvetage de sous-marin, Temps de réaction.

Abstract

INERT GAS NARCOSIS: RISK OF COGNITIVE IMPAIRMENT IN A WRECKED SUBMARINE AND ITS RESCUE VEHICLE.

In a wrecked submarine with a water leak in the hull, the compression of air in a compartment increases the partial pressure of nitrogen, subjecting the crew to the risk of narcosis. In order to be connected to the submarine, the emergency vehicle must reach the same pressure. The medical team is thus submitted to the same risk. Narcosis causes noticeable symptoms, but also an impairment of sensorimotor information processing, which is potentially dangerous for the success of the rescue mission. Indeed, this sensorimotor processing is at the origin of most of voluntary actions. To understand the impact of inert gas narcosis in the context of rescue submarine, we benefited from test saturation dives, which allowed us to compare a non narcotic condition (normobaric) to a narcotic one (hyperbaric). In both conditions, subjects performed a specific task which is supposed to affect response selection processes. The additive factor method showed that response selection processes are impaired by inert gas narcosis.

Keywords : Inert gas narcosis. Reaction time. Response-selection. Submarine rescue.

La narcose : définition, physiopathologie et problématique militaire

Les troubles de la narcose ont été décrits pour la première fois en 1835, par V.T. Junod dans son « Traité thérapeutique et pratique de l'hémospasie », qui décela chez les scaphandriers lourds « *une imagination vive et des pensées qui ont un charme particulier* » (p327). Ces manifestations, qui apparaissent de façon générale chez les plongeurs respirant de l'air comprimé, surviennent à partir de pressions absolues de l'ordre de 0,4 MPa (30 mètres), pouvant aller de la simple euphorie à la perte de conscience pour des pressions supérieures à 1 MPa (90 mètres). Elles sont réversibles, apparaissant au cours de la descente et disparaissant généralement à la remontée. Elles s'expriment différemment selon les individus : troubles de l'humeur, de l'idéation, désorientation temporo-spatiale, troubles perceptifs,

J.-J. RISSO, chargé de recherche, ICT. J.-É. BLATTEAU, praticien certifié, médecin en chef. N. VALLÉE, chargé de recherche, ASC. J.-H. ABRAINI, professeur. F. VIDAL, professeur. C. MECKLER, praticien certifié, médecin en chef.
Correspondance : Monsieur ICT J.-J. RISSO. IRBA/ERRSO, BP 600 – 83800 Toulon Cedex 9.
E-mail : cyrilelie@gmail.com

de la mémoire immédiate, du schéma corporel, et troubles psychomoteurs (1). De telles manifestations, ultérieurement nommées « *ivresse des profondeurs* » par J.-Y. Cousteau, dans « le monde du silence », peuvent, il est vrai, se rapprocher de celles d'une intoxication alcoolique, avec des déstructurations comme celles que rapporte Honoré-Castellin (2) : « *Mon coéquipier était immobile, un oursin dans les mains. J'ai essayé d'attirer son attention, il n'a pas réagi, comme si il ne me voyait pas. J'ai compris que quelque chose n'allait pas et je l'ai attiré pour le faire remonter. Il était totalement passif… De retour à la surface il m'a dit qu'il lui était arrivé des choses extraordinaires, qu'il ne savait plus où il était, qu'il avait demandé son chemin à un oursin et que celui-ci lui avait indiqué la direction de la Tour Eiffel* ». Pour un individu donné, la susceptibilité à la narcose varie en fonction de la condition physique (fatigue) et psychique (stress), et de l'âge de l'individu. Même chez les plongeurs expérimentés, il existe une variabilité à la fois intra-individuelle et interindividuelle. Le rapprochement entre narcose et ivresse s'illustre encore dans l'échelle narcotique d'Edmonds (3) dont les degrés correspondent… au nombre de verres de Martini® (blancs) ingérés ! Un verre correspond à une profondeur de 23 mètres à l'air et 6 verres à une profondeur de 80 à 93 mètres !

Mais s'agit-il vraiment d'une « ivresse » ? Des études récentes montrent, en fait, que la narcose produirait des effets psychodysleptiques davantage comparables aux effets du LSD ou de la mescaline, substance présente dans les champignons hallucinogènes (1).

Ces effets sont-ils dus à la profondeur ? La véritable cause de ces troubles, comme le pensait déjà Behnke en 1935 (4), ne résulte en fait que de la pression partielle élevée d'azote dans l'organisme, et ce n'est que par cette dernière que la profondeur révèle la narcose. On comprit bientôt qu'il ne s'agissait pas d'une manifestation particulière impliquant l'azote, mais d'un phénomène plus général observé avec tous les gaz diluants de l'oxygène (5), d'où le terme de « *narcose aux gaz inertes* », beaucoup plus adéquat pour qualifier ce syndrome. Pour un gaz donné, il existe une pression partielle seuil, au-delà de laquelle les symptômes apparaissent et s'intensifient avec l'augmentation de la pression. Le pouvoir narcotique des gaz inertes, diluants de l'oxygène dans les mélanges respiratoires (tab. I), est en étroite corrélation avec leur solubilité dans les lipides (5). Le moins narcotique d'entre eux est l'hélium, avec un pouvoir narcotique dix fois moindre que celui de l'azote, et le plus narcotique est le xénon, anesthésique et donc *a fortiori* narcotique à pression atmosphérique, ce qui prouve bien que la narcose n'est pas due à la pression hydrostatique pure (6), même si, pour exprimer leur pouvoir narcotique, certains gaz doivent être sous pression.

Pour expliquer les effets de la narcose sur l'organisme, deux théories sont principalement avancées. La théorie lipidique prône une action diffuse des gaz inertes qui, en saturant la bicouche lipidique des membranes cellulaires, en augmenterait le volume (fig. 1), perturbant ainsi la transmission de l'influx nerveux (7). Ce modèle rend compte de l'antagonisme entre la narcose et l'effet de la pression hydrostatique ; alors que les gaz narcotiques fluidifient la bicouche lipidique, la pression hydrostatique à l'inverse, la rigidifie en la comprimant. Plus récemment, il a été montré que les gaz inertes se lient directement sur un site protéique des récepteurs membranaires et pourraient agir comme modulateurs allostériques de l'activité des récepteurs (8). Des études récentes montrent que ces théories ne s'excluent pas et qu'elles semblent au contraire se compléter.

Tableau II. Pouvoir narcotique des gaz inertes rapporté à celui de l'azote. Masse molaire (g/mol), solubilité dans l'huile à 37° et à pression atmosphérique (ml/l). Le pouvoir narcotique est uniquement corrélé à la solubilité du gaz inerte dans l'huile. Le protoxyde d'azote (N_2O) et le Xenon (Xe), très solubles dans la bicouche lipidique, sont déjà narcotiques à pression atmosphérique.

Gaz inerte	Masse molaire	Liposolubilité	Pouvoir narcotique
He	4	15	0,07
Ne	20,18	19	0,3
H2	2	50	0,6
N2	28,01	67	1
Ar	39,94	140	2,3
Kr	82,8	430	10
N2O	44,01	1400	28,1
Xe	130	1700	34,5

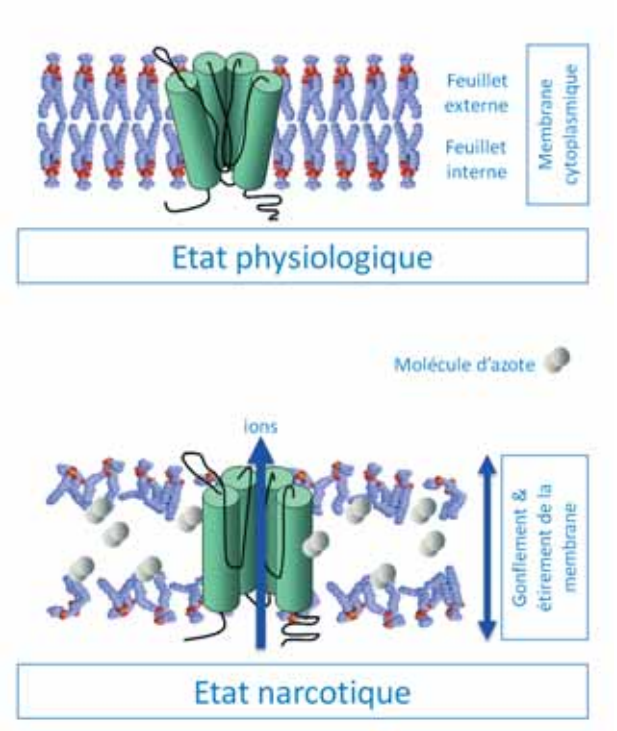


Figure 1. L'azote modifie la fluidité membranaire et le fonctionnement de la protéine transmembranaire. © Nicolas Vallée.

Les gaz inertes, malgré leur neutralité métabolique, peuvent ainsi avoir une véritable action pharmacologique. Et cette action peut avoir des conséquences sur la sécurité des personnels. Nous avons cité certaines manifestations symptomatiques de la narcose, cliniquement décelables, mais d'autres de ses effets, moins évidents à première vue, peuvent compromettre la sécurité d'une mission subaquatique opérationnelle. En effet, la narcose provoque une dégradation de la performance sensorimotrice (9). Cette dernière est ainsi altérée car la narcose affecte le bon déroulement de la chaîne de traitement sensorimoteur de l'information (10, 11), traitement qui est à la base de la majeure partie des actions volontaires de chaque personnel. Courtière et coll. (12) ont montré, chez l'animal, une détérioration du traitement sensorimoteur de l'information, induite par la narcose (obtenue grâce au protoxyde d'azote en normobarie).

L'équipage d'un sous-marin en détresse et l'équipe médicale du *Nato Submarine Rescue System* (NSRS) peuvent être exposés au risque de narcose. En cas de voie d'eau dans un compartiment du sous-marin, la compression de l'air présent aboutit à une augmentation de la pression partielle d'azote. Il en sera de même dans le véhicule de sauvetage du NSRS qui devra être comprimé à la même pression que celle du sous-marin, afin de pouvoir s'y connecter pour secourir l'équipage en détresse.

Notre équipe de recherche a souhaité évaluer l'impact de la narcose dans ces conditions opérationnelles, et ainsi tenter d'en percer certains mécanismes.

L'étude expérimentale

Pour notre étude, il a fallu comparer une condition non narcotique (atmosphérique), à une condition narcotique (hyperbare). Pour cette dernière, l'Équipe résidente de recherche subaquatique opérationnelle (ERRSO) de l'Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA), a bénéficié de sessions de plongées d'essais dans les conditions maximales de pression du NSRS, au Centre hyperbare de la CEllule de Plongée Humaine et Intervention Sous la MER (CEPHISMER). Cette condition narcotique était obtenue par une compression à 0,6 MPa (6 ATA), sous mélange Azote-Oxygène avec fraction d'oxygène réduite à 8,33 %, afin d'éviter le risque de toxicité pulmonaire liée à une éventuelle hyperoxie. Les plongeurs, à cette pression, étaient alors soumis à un niveau de narcose liée à l'azote équivalent à celui obtenu dans une plongée à l'air à une profondeur de 59,6 mètres. La condition non narcotique servait de condition contrôle, et était obtenue dans le même caisson, mais en pression atmosphérique.

Manifestations cliniquement décelables

Lors du séjour à pression maximale, les équipes de surveillance ont relevé une série de symptômes, ressentis également par les sujets : un épisode d'angoisse, des sensations de dysesthésies péribuccales, et des épisodes d'euphorie individuelle et collective. Un des sujets exposés a décrit dans ses notes personnelles une « *euphorie présente tout au long de la journée* ». De manière attendue, ces symptômes étaient régressifs avec la diminution de la pression partielle d'azote. Mais au-delà de ces manifestations décelables, des effets plus insidieux sont survenus.

Effet de la narcose sur la performance cognitive

Contrairement aux manifestations précédentes, ces effets ne sont pas ressentis par le sujet narcosé, et l'examinateur doit user d'une manipulation expérimentale pour les déceler.

Il s'agit de l'effet sur la chaîne de traitement sensorimoteur. Par des méthodes expérimentales appropriées, nous avons recherché le lieu d'impact de la narcose dans cette chaîne de traitement. Dans cet article, nous avons préféré développer le raisonnement sous-jacent à la méthodologie employée et rapporter le résultat majeur, plutôt que de reproduire l'intégralité de l'étude qui peut être trouvée dans Meckler et coll. (13).

Traitement sensorimoteur de l'information

Pour répondre volontairement à une sollicitation de l'environnement (une information externe), le système nerveux central met en jeu un traitement sensorimoteur de l'information. L'information présentée est donc traitée afin qu'une réponse adéquate soit produite. Ce traitement peut-être décomposé en une succession d'étapes (14) constituées d'opérations mentales élémentaires. On distingue classiquement au minimum trois grandes étapes successives : la première, perceptive (détection, perception et identification du stimulus) au terme de laquelle le signal est identifié, la seconde, décisionnelle (ou de sélection de la réponse), au terme de laquelle la réponse motrice à effectuer est choisie, la troisième, motrice, au terme de laquelle la réponse volontaire est exécutée.

Étude du traitement sensorimoteur : le paradigme du Temps de Réaction

Pour l'étude du traitement sensorimoteur, la contrainte temporelle, représentée par le paradigme du Temps de réaction (TR), s'est imposée comme un outil particulièrement utile. Elle oblige le système nerveux à fonctionner de façon optimale en ne lui laissant que le temps strictement nécessaire pour traiter l'information et y répondre. Elle permet aussi de le pousser à ses limites, dévoilant ainsi une partie de son fonctionnement et l'architecture des mécanismes de traitement de l'information qu'il met en œuvre. Dans les tâches de TR, un signal (signal de réponse ou SR) est présenté au sujet qui doit répondre le plus tôt et le plus précisément possible, en fournissant la réponse qui a été préalablement associée à ce SR. Les essais sont déclenchés les uns à la suite des autres, à cadence plus ou moins élevée. En situation particulière de TR de choix bimanuel, les sujets doivent produire une réponse (par exemple un appui sur un bouton), soit de la main droite, soit de la main gauche, en fonction du SR.

Le TR correspond à l'intervalle de temps séparant la présentation du SR de la réponse mécanique. La suite

d'étapes du traitement sensorimoteur se déroule, que le sujet soit ou non soumis à une contrainte temporelle. Mais sans cette dernière, l'approche expérimentale de ces processus serait problématique. En effet, quand ces opérations se déroulent sans contrainte, on peut envisager que certaines puissent prendre plus de temps que nécessaire, ou être effectuées à nouveau, et que des retours en arrière d'une opération à une autre soient possibles. Par contre, le TR, en contraignant la durée de chaque processus de traitement et l'articulation de ces processus entre eux, à la solution la plus rapide, représente le temps minimal nécessaire pour effectuer toutes les transformations conduisant à la réponse adéquate après la présentation du stimulus, et permet ainsi une approche expérimentale (15). En effet, le traitement effectué dans chacune de ces opérations prend du temps. Si deux tâches conduisent à des TR différents, on conclut que le traitement de l'information est quantitativement, voire qualitativement différent dans les deux tâches. Par exemple, si une opération n'est pas nécessaire et n'est pas effectuée, le TR est plus court (16).

Une tâche particulière de TR de choix bimanuel permet l'étude spécifique de l'étape décisionnelle du traitement sensorimoteur. Dans la tâche de Fitts, en effet (17), les sujets doivent produire une réponse droite ou gauche en fonction de la position d'un SR présenté à droite ou à gauche d'un point de fixation. La consigne d'appariement Stimulus-Réponse donnée aux sujets est soit ipsilatérale : si le SR apparaît à gauche, il faut produire une réponse gauche (et réciproquement pour le SR droit), soit controlatérale : si le SR apparaît à gauche, il faut produire une réponse droite (et réciproquement pour le SR droit) (fig. 2). La consigne d'appariement ipsilatérale correspond à la condition « compatible » et la consigne d'appariement controlatérale correspond à la condition « incompatible » : les TR sont plus longs en condition incompatible qu'en condition compatible. Cet effet est connu sous le nom « d'effet de compatibilité ».

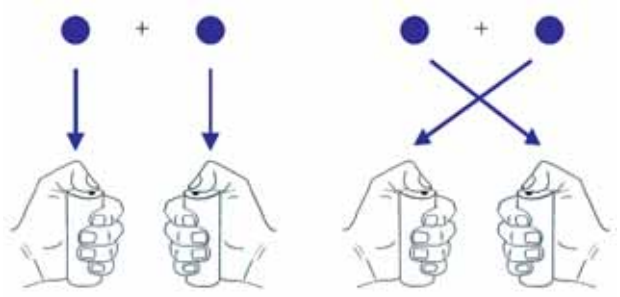


Figure 2. Tâche de Fitts. Les sujets ont pour consigne de donner une réponse de la main droite ou de la main gauche, en fonction de la position d'un signal de réponse, présenté à droite ou à gauche de l'écran. Dessin de gauche : condition compatible. Dessin de droite : condition incompatible.

Puisque le TR est différent en fonction de la consigne d'appariement, on en conclut que la quantité de traitement requise pour effectuer toutes les transformations conduisant du stimulus à la réponse appropriée est plus grande en situation incompatible qu'en situation compatible. L'effet de compatibilité est considéré comme sélectif de l'étape décisionnelle qui serait plus longue en condition incompatible qu'en condition compatible : l'association entre le stimulus et la réponse adéquate nécessiterait plus de temps (18, 19).

Quête de l'étape du traitement sensorimoteur affectée par la narcose : la Méthode des facteurs additifs

Pour savoir si l'étape décisionnelle est affectée par la narcose, on peut recourir à la Méthode des facteurs additifs (15, 20), qui s'appuie sur une analyse statistique multifactorielle. Pour en résumer le principe, si les effets sur le TR de chaque facteur s'ajoutent (ils sont additifs), alors ces facteurs affectent des étapes différentes du traitement sensorimoteur. À l'inverse, si ces effets interagissent (l'effet des deux facteurs est différent de la somme de chaque effet séparément), alors les facteurs manipulés affectent au moins une étape commune.

Comme nous venons de le voir, la tâche de Fitts, en manipulant explicitement la règle d'association stimulus-réponse, affecte l'étape décisionnelle. Ce premier facteur est désigné comme « compatibilité » (condition compatible/condition incompatible). Si nous faisons effectuer cette tâche à des sujets à pression atmosphérique, et sous pression partielle d'azote élevée (afin qu'ils soient narcosés), nous aurons là un second facteur, désigné comme « narcose ». C'est la méthodologie de l'étude que nous allons à présent aborder.

Protocole de l'étude

Les sujets effectuaient une tâche de Fitts ; pour rappel, la consigne était de répondre par un appui droit si le stimulus présenté était à droite de l'écran et par un appui gauche si le stimulus était présenté à gauche (condition compatible), ou par un appui droit si le stimulus était présenté à gauche et par un appui gauche si le stimulus était présenté à droite (condition incompatible). La moitié des sujets réalisaient la tâche de Fitts, d'abord en condition non narcotique (atmosphérique), puis en condition narcotique (hyperbare). L'autre moitié des sujets exécutaient la tâche dans l'ordre inverse. Dans les deux cas, une semaine séparait les deux conditions. La tâche de Fitts dans la condition narcotique était réalisée au minimum après 6 heures de séjour à pression maximale. D'autre part, l'ordre de passation des conditions compatibles et incompatibles au sein d'une même condition de pression (narcotique et non narcotique) était lui aussi équilibré. À l'issue de chaque bloc d'essais, l'investigateur prenait connaissance du taux d'erreur. Si le taux était inférieur à 1 %, il était demandé au sujet d'accélérer (tout en tentant de continuer à répondre le plus précisément possible), si le taux était supérieur à 10 %, il lui était demandé de répondre plus précisément. Cette procédure de contrôle du taux d'erreur, permet de s'assurer que les variations éventuelles de temps de réaction entre conditions sont bien dues à la manipulation des facteurs expérimentaux (compatibilité et narcose) et non à une stratégie du sujet qui pourrait favoriser la précision de sa réponse au détriment de la vitesse ou l'inverse.

Résultats et discussion

Nous nous sommes d'abord assurés que les données de notre condition contrôle (non narcotique, atmosphérique) reproduisaient les résultats classiques de la littérature dans ce genre de tâche. On pouvait alors en déduire que la manipulation expérimentale avait été efficace et que les sujets avaient parfaitement exécuté la tâche de Fitts. Ceci est un gage de qualité, et donne du crédit à la nouveauté de nos résultats.

Concernant la condition narcotique (obtenue en hyperbarie), l'effet de la narcose s'est manifesté par un allongement significatif du TR quand le sujet donne une bonne réponse. D'une condition de narcose à l'autre, il faut le même temps pour se tromper, mais pour pouvoir fournir une réponse correcte en condition narcotique, il faut plus de temps qu'en condition non narcotique. Ce résultat est conforme aux nombreux travaux de Fowler et collègues (10, 11). Il faut noter que cet effet ne peut être attribué à la pression *per se*, puisque Fowler et coll. (21), ont montré qu'il n'y avait pas d'effet de la pression lorsque les sujets respiraient un mélange non narcotique (Helium-Oxygène) jusqu'à 10 ATA.

Le classique effet de compatibilité était présent dans les deux conditions de narcose : le TR des réponses en condition incompatible est toujours plus long que celui des réponses en condition compatible (quelle que soit la condition de narcose). Mais la taille de cet effet de compatibilité n'était pas la même entre la condition non narcotique et la condition narcotique. La différence entre les tailles d'effet était significative : nous avons ici l'interaction entre les facteurs Narcose et Compatibilité que nous recherchions. D'après la logique des facteurs additifs que nous avons expliquée précédemment, puisque la compatibilité affecte l'étape décisionnelle (ce qui est reflété par le classique « effet de compatibilité ») et que la narcose interagit avec la compatibilité (l'effet de compatibilité est différent selon la condition de narcose), alors ces deux facteurs (Compatibilité et Narcose) affectent la même étape, c'est-à-dire l'étape décisionnelle. Ce résultat témoigne donc d'un effet de la narcose sur les mécanismes de prise de décision. Cet effet sur l'étape décisionnelle du traitement sensorimoteur de l'information n'avait jamais été décrit dans un contexte de narcose.

Conclusion et perspectives

Cette étude, qui simule une procédure de sauvetage par le NSRS, a permis de montrer que l'atmosphère hyperbare à laquelle sont soumis l'équipage du sous-marin en détresse et l'équipe médicale du véhicule de secours, a un impact sur les processus décisionnels, ce qui est susceptible d'altérer la sécurité du bon déroulement d'une telle mission.

Mais le traitement sensorimoteur peut également être altéré indirectement par un défaut de supervision. En effet, en parallèle de la chaîne d'étapes que nous avons décrite, notre équipe a montré qu'il existe un mécanisme de supervision de l'action qui tenterait d'empêcher qu'une erreur d'action ne soit commise (supervision « proactive », 22), de détecter très précocement qu'une erreur va être commise (supervision « réactive », 23), et parfois même de la rattraper avant qu'elle ne soit consommée. Nous avons pour cela recueilli l'activité électrique de certaines structures cérébrales (obtenue par potentiels évoqués) qui sous-tendent ces processus de supervision. Pour aller plus loin dans l'investigation et mettre en évidence une mise en défaut de cette supervision par la narcose, il faut recourir à ces indices physiologiques (électroencéphalographiques et électromyographiques de surface) comme outil d'exploration fonctionnelle. C'est pour cette raison que nous avons proposé, en collaboration avec le CNRS de Marseille et le Service d'anesthésie-réanimation de l'Hôpital d'Instruction des Armées Sainte-Anne de Toulon, une expérience en laboratoire, avec recueil électroencéphalographique et électromyographique, pour laquelle les sujets seront mis en condition de narcose par du protoxyde d'azote (en normobarie).

Pour se soustraire à l'effet de la narcose, une solution théorique consisterait en la substitution dans le NSRS, de l'azote par de l'hélium, non narcotique à ces pressions d'utilisation. Mais cette solution n'est pas réalisable car il existe un risque de contre-diffusion isobare (24) entre hélium et azote puisque le sous-marin lui, est sous atmosphère d'air.

Pour limiter l'effet narcotique d'un gaz, une solution pourrait être d'ordre cinétique, par la diminution de la vitesse de compression. En effet, Abraini et coll. (8) ont montré que le pouvoir narcotique d'un gaz dépend autant de la vitesse de compression que de la pression finale atteinte.

Par ailleurs, il apparaît essentiel d'essayer de contrôler l'atmosphère du sous-marin en détresse et de réguler celle du NSRS, puisque l'on sait qu'une augmentation du taux de CO_2 aggrave la narcose (9).

Enfin, l'utilisation d'agents chimiques pourrait être étudiée chez l'Homme, afin de prévenir les formes sévères de narcose. Il a en effet été montré, chez le rat, une action préventive de la narcose grâce à l'utilisation de détergents cationiques ou autres tensio-actifs (carbonate de lithium), stabilisateurs de membranes (9), l'utilisation du Frenquel, agent inhibiteur des effets hallucinogènes de la mescaline (3), et l'utilisation d'agents modifiant la neurotransmission gabaergique, glutamatergique et/ou dopaminergique (25, 26).

Ces pistes préventives soulignent l'importance des recherches menées sur la narcose afin de mieux en comprendre les mécanismes, et ainsi de pouvoir cibler les actions de compensation et de protection.

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

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Rostain JC, Abraini JH, Risso JJ. La narcose aux gaz inertes. In Broussolle B, Meliet JL, Coulange M eds. Physiologie et Médecine de la plongée. Paris : Ellipse ; 2006. 313-29.
2. Honoré-Castellin V. L'ivresse des profondeurs ou la narcose à l'azote. Marseille : Université de la Méditerranée ; 1987 : 99p.
3. Edmonds C, Lawry C, Pennefather J. Nitrogen narcosis. In Edmonds C ed. Diving and subaquatic medicine. Mosman, Australia : Diving medical center publication ; 1981:197-208.
4. Behnke AR, Thomson RM, Motley EP. The psychologic effects from breathing air at 4 atmospheres pressure. Am J Physiol 1935 ; 112 : 554-8.
5. Lawrence JH, Loomis WF, Tobias CA, Turpin FH. Preliminary observation on the narcotic effects of xenon with a review of values for solubilities of gases in water and oil. J Physiol 1946 ; 105 : 197-204.
6. Brauer RW, Way RO. Relative narcotic potencies of hydrogen, helium, nitrogen and their mixtures. J Appl Physiol 1970 ; 29 : 23-31.
7. Miller KW. Inert gas narcosis, the high pressure neurological syndrome and the critical volume hypothesis. Science 1974 ; 185 : 184-6.
8. Abraini JH, Rostain JC, Kriem B. Sigmoidal compression rate-dependence of the narcotic potency of inert gases in rats : implication for lipid vs protein theories of inert gas action in the central nervous system. Brain Res 1998 ; 808 : 300-4.
9. Bennett PB, Rostain JC. Inert gas narcosis. In Brubakk AO, Neuman TS eds. Physiology and medicine of diving. Edinburgh, Saunders Elsevier ; 2007:300-22.
10. Fowler B, Granger S, Ackles KN, Holness DE, Wright GR. The effects of inert gas narcosis on certain aspects of serial response time. Ergonomics 1983 ; 26 : 1125-38.
11. Fowler B, Hofer K, Lipitikas J. The exhaustive additivity displayed by nitrous oxide has implications for cognitive energetical theory. Biological Psychology 2000 ; 52 : 161-80.
12. Courtière A, Hardouin J, Vidal F, Possamaï C, Hasbroucq T. An additive factor analysis of the effect of sub-anaesthetic doses of nitrous oxide on information processing : Evidence for an impairment of the motor adjustment stage. Psychopharmacology 2003 ; 165 : 321-8.
13. Meckler C, Blatteau JE, Hasbroucq T, Schmid B, Risso JJ, Vidal F. Effects of hyperbaric nitrogen-induced narcosis on response-selection processes. Ergonomics 2014 ; 57 : 210-8.
14. Anderson, JR. Cognitive psychology and its implications. San Francisco : Freeman ; 1980.
15. Sternberg, S. Discovering mental processing stages : The method of additive factors. In Scarborough, D, Sternberg, S eds. An invitation to cognitive science : Methods, models, and conceptual issues, vol. 4. Cambridge : MIT Press ; 1998: 703-863.
16. Rosenbaum DA. Human movement initiation : Specification of arm direction and extent. Journal of Experimental Psychology : General 1980 ; 109 : 444-74.
17. Fitts PM, Deininger RL. S-R compatibility : correspondance among paired elements within stimulus and response code. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance 1954 ; 48 : 483-92.
18. Hasbroucq T, Guiard Y. Stimulus-response compatibility and the Simon effect : Towards a conceptual clarification. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance 1991 ; 17 : 246-66.
19. Kornblum S, T Hasbroucq, Osman A. Dimensional overlap : Cognitive basis for stimulus-response compatibility — A model and taxonomy. Psychological Review 1990 ; 97 : 253-70.
20. Sternberg S. Separate modifiability mental modules and the use of pure and composite measures to reveal them. Acta Psychologica 2001 ; 106 : 147-246.
21. Fowler B, Hamilton H, Porlier G. Interactions between ethanol, amphetamine and inert gas narcosis on the performance of a memory scanning task. In : Bachrach A, Bove A, Greenbaum L. eds. Underwater Physiology IX : Proceedings of the Ninth Symposium on Underwater and Hyperbaric Physiology. Bethesda, MD : Undersea and Hyperbaric Medical Society ; 1987.
22. Meckler C, Allain S, Carbonnell L, Hasbroucq T, Burle B, Vidal F. Motor inhibition and response expectancy : A Laplacian ERP study. Biological Psychology 2010 ; 85 : 386-92.
23. Meckler C, Allain S, Carbonnell L, Hasbroucq T, Burle B, Vidal F. Executive control and response expectancy : A Laplacian ERP study. Psychophysiology 2011 ; 48 : 303-11.
24. Lambertsen CJ. Relations of isobaric gas counterdiffusion and decompression gas lesion disease. In Vann RD ed. The physiological basis of decompression. Bethesda, MD : Undersea and Hyperbaric Medical Society ; 1989.
25. Abraini JH, Kriem B, Balon N, Rostain JC, Risso JJ. Gaba neuropharmacological investigations on narcosis produced by nitrogen, argon or nitrous oxide. Anesth Analg 2003 ; 96 : 37-40.
26. Rostain JC, Lavoute C, Risso JJ, Valle N, Weiss M. A review of recent neurochemical data on inert gas narcosis. Undesea Hyperb Med 2011 ; 38 : 49-59.