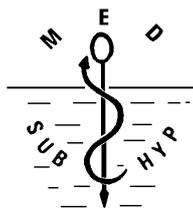


**BULLETIN de
MEDECINE
SUBAQUATIQUE
et HYPERBARE**

2005. Tome 15. Supplément.

REUNION
MEDSUBHYP - EUBS
AJACCIO 2004

**Société de physiologie et de médecine subaquatiques
et hyperbares de langue française**



REVUE SEMESTRIELLE

Date de publication : décembre 2006

**SOCIETE DE PHYSIOLOGIE ET DE MEDECINE
SUBAQUATIQUES ET HYPERBARES
DE LANGUE FRANCAISE**

Déclarée le 24 Décembre 1968

J.O. du 11 Janvier 1969

PRESIDENTS HONORAIRES

Pr. J.DOR (1969-1972)	Dr. Ph. CAVENEL (1988-1991)
Pr. A. APPAIX (1972-1976)	Dr. J.C. ROSTAIN (1991-1994)
Dr. R. RISPE (1976-1979)	Pr. F. WATTEL (1994-1997)
Dr. B. BROUSSOLLE (1979-1982)	Pr J.M. SAINTY (1997-2000)
Pr. J. CORRIOL (1982-1985)	Dr J.L. MELIET (2000-2003)
Pr. Ph. OHRESSER (1985-1988)	

BUREAU DE LA SOCIETE EN 2005

Président:	GRANDJEAN, B	Trésorier:	LOUGE, P.
Président adjoint:	BERGMANN, E.	Trésorier adjoint:	GALLAND, F.
Vice-Présidents:	AIMARD, A. AMOROS, J.F. MATHIEU, D. RISSO, J.J.	Archiviste: Administrateurs:	BERGMANN, E. BARTHELEMY, A. CANTAIS, E. HUGON, M.
Secrétaire général:	DELAFOSSE, B.		REGNARD, J.
Secrétaire adjoint:	QUERUEL, P.		SOUDAY, V.

Secrétariat: Dr. B. Delafosse, Hôpital Edouard Herriot, 69437 Lyon cedex 03

BULLETIN de MEDECINE SUBAQUATIQUE et HYPERBARE
2005. Tome 15. Supplément

Dépôt légal : 20 mars 2006

ISSN 1248 - 2846

Responsable de la rédaction
B. Delafosse,

Directeur de la publication
J.C. Rostain

Imprimeur
Pronto Offset, 22 Chem. St Jean du Desert, 13005 Marseille

Editeur
Société de physiologie et de médecine subaquatiques et hyperbares
de langue française
Centre Hyperbare, CHU de Sainte Marguerite
270 Bd de Ste Marguerite
13274 Marseille cedex 09

Date de publication : décembre 2006

RECHERCHE DE BULLES ARTERIELLES CEREBRALES APRES PLONGEE A L'AIR CHEZ L'HOMME. RELATION AVEC LE SHUNT DROITE- GAUCHE ET LA CHARGE EN BULLES VEINEUSES CIRCULANTES.

J-E. BLATTEAU¹, M. HUGON², F-M. GALLAND³. ¹CEMPP, ²CEPHISMER, BP 84, 83800 Toulon Armées, France. ³IMNSSA, BP 610, 83800 Toulon Armées, (France)

ABSTRACT

Search for cerebral arterial bubbles after human air diving. Relationship with right-to-left shunt and circulating venous bubbles. JE Blatteau, M Hugon, FM Galland. Bull. Medsubhyp, 2005, 15 (Suppl.) : 65 - 69. 10 military divers realised 60 dives in the wet part of a hyperbaric chamber. Pulsed Doppler carried out the detection of arterial and venous circulating bubbles every 30 minutes during 2 hours after the surfacing. Arterial bubbles were sought by transcranial Doppler in the cerebral middle artery at rest then after a sensitization manoeuvre. The venous bubbles were initially quantified on the precordial area according to Spencer scale. The search for right-to-left shunt was carried out by transcranial echo Doppler at rest and after sensitization manoeuvre. For 280 detections the presence of arterial bubbles after diving was observed only four times about three different divers, bubbles were some isolated HITS, always recorded after action of sensitization. In all the cases the venous bubble levels were high. Right-to-left shunt : 2 divers refused the examination, and out of the 8 other only one presented a significant shunt after operation of sensitization. Arterial bubbles related to the diver with a shunt, a diver without shunt and a last diver having refused the detection of the right-to-left shunt. Our work confirms the possibility of asymptomatic arterial circulating bubbles. We confirm also the arterial bubbles observation without proven shunt, posing the problem of the bubbles origin. The qualitative or quantitative criteria likely to make these bubbles pathogenic remain to be defined.

Keys words : Doppler, bubble detection, shunt, arterial gas embolism.

I INTRODUCTION

La recherche des bulles artérielles circulantes en décompression humaine est intéressante à plus d'un titre. En effet chez des plongeurs n'ayant aucun antécédent d'accident de plongée, certains auteurs considèrent que les bulles artérielles seraient à l'origine sur le long terme d'atteintes asymptomatiques du cerveau illustrées notamment par des images IRM de la substance blanche (Reul 1995), par des baisses de performance sur certains tests psychotechniques (Tezlaff 1999) et par des atteintes au niveau de la rétine (Macarez 2003). D'autre part chez les plongeurs victimes d'accident de désaturation, le débat sur la responsabilité d'un shunt droite-gauche dans la physiopathogénie fait rage et on oppose actuellement :

- les accidents par ischémie d'amont liés à un engorgement bullaire de la circulation pulmonaire responsable au niveau médullaire d'une stase veineuse à l'origine de lésions ischémiques
- aux accidents par ischémie d'aval liés à un aéroembolisme artériel via un shunt droite-gauche responsable des atteintes cérébrales, cochléo-

vestibulaires (Louge 1999) et peut-être médullaires cervicales (Germonpré 1999).

Le but de ce travail est d'objectiver au décours de plongée la présence de bulles circulantes artérielles au niveau cérébral et d'étudier la corrélation avec un shunt droite-gauche ainsi que la charge bullaire veineuse d'amont. 10 plongeurs de la Marine française ont réalisé 60 plongées en caisson humide. 280 détections appariées veineuses et artérielles ont été pratiquées par Doppler pulsé au décours de ces plongées.

MATERIELS ET METHODES

Plongeurs

10 plongeurs masculins aptes médicalement ont été retenus. Il s'agit de plongeurs professionnels militaires. Ils constituent un groupe homogène avec une moyenne d'âge de 37.5 ans, environ 10 ans d'ancienneté dans la plongée. Ils possèdent tous un bon niveau d'entraînement physique. 3 d'entre eux ont déjà été victimes d'accident de désaturation, mais il s'agissait d'accidents mineurs

avec récupération rapide de l'aptitude médicale à la plongée.

Procédure de plongée

L'échantillon de 10 plongeurs a réalisé un total de 60 plongées en eau dans le centre hyperbare de la Marine. Chaque binôme a réalisé deux profils de plongée à l'air : 60mètres / 20min et 2 fois 50mètres / 15min (en plongée successive avec un intervalle de 3 heures) avec deux tables de décompression différentes (table MN90 de la Marine française et un nouveau protocole). La température de l'eau était contrôlée à 15 degrés celsius.

Détection des bulles circulantes par Doppler pulsé

Nous avons utilisé un appareil d'échoDoppler transcrânien de marque Pioneer. Une sonde de 2 MHz a été utilisée pour le dépistage des bulles circulantes aussi bien artérielles que veineuses. Les bulles sont détectées à la fois visuellement sur écran par un accident hyperdense associé à un signal sonore caractéristique. Les données du monitoring (images et sons) sont enregistrées sur PC.

Détection des bulles veineuses

La sonde est placée le long du bord gauche du sternum au niveau du troisième espace intercostal en regard de l'infundibulum pulmonaire. L'analyse visuelle et acoustique des signaux de bulles est très caractéristique et ne prête pas à confusion avec les bruits du cœur ou des signaux d'artefact. L'appareil est réglé avec une puissance et un gain faibles (5%) et une profondeur de 50 à 70 mm. L'enregistrement est réalisé en décubitus dorsal pendant 3 minutes avec comme manœuvre de sensibilisation deux mouvements de flexion-extension des membres inférieurs.

Cotation du niveau de bulles veineuses (Spencer 1976)

La cotation des signaux est réalisée selon le code de Spencer :

degré 0 : absence totale de signaux de bulles

degré 1 : quelques signaux de bulles espacés, mais la majorité des cycles cardiaques en est dépourvue

degré 2 : signaux de bulles isolés ou en groupes dans moins de la moitié des cycles cardiaques

degré 3 : tous les cycles cardiaques contiennent des signaux de bulles, mais ils ne couvrent pas les bruits normaux du cœur

degré 4 : flux continu de signaux de bulles couvrant les bruits normaux du cœur.

La cotation retenue in fine correspond au niveau de bulles persistant et stable pendant au moins 10 systoles au décours de la manœuvre de sensibilisation.

Recherche de bulles artérielles circulantes

La recherche est effectuée avec le même appareil d'échoDoppler pulsé Pioneer au niveau transcrânien en regard de l'artère cérébrale moyenne. La profondeur de tir est réglé à 50 mm à partir de la fenêtre temporale. Elle est réalisée pendant 3 minutes d'abord au repos puis avec une manœuvre de sensibilisation qui consiste en une flexion-extension des membres inférieurs suivie d'un effort de toux et d'un effort de poussée abdominale (type défécation). Le nombre d'accidents hyperdenses ou HITS (high intensity transient signal) est compté.

Recherche de shunt droite-gauche (Boussuges 1999)

Elle a été réalisée à distance des plongées selon une méthode standardisée avec le même appareil d'échoDoppler transcrânien. L'examen consiste en l'enregistrement des flux dans une artère sylvienne, avant et pendant l'injection dans une veine périphérique de l'avant bras d'un produit de contraste ultrasonore (gélatine fluide agitée). L'examen est pratiqué d'abord au repos puis en cas de négativité au cours d'une manœuvre provocatrice consistant à souffler et maintenir dans une colonne de mercure entre 30 et 40 mmHg pendant 10 secondes. Au relâchement le produit de contraste est injecté. La présence d'un shunt se traduit par des HITS enregistrés moins de 20 secondes après leur injection périphérique. Le shunt est considéré comme significatif si au moins 5 HITS sont observés. Il est considéré comme important au-delà de 20 HITS.

Cinétique d'enregistrement

La première détection a lieu 30 minutes après la fin de la plongée.

Les plongeurs sont enregistrés alternativement toutes les 30 minutes pendant au moins deux heures : soit 4 détections par plongeur à T30, T60, T90 et T120 minutes. La surveillance peut excéder 3 heures notamment pour les plongées successives, elle est dans ce cas interrompue dès que la cotation de Spencer retombe à un niveau faible de bulles. Les détections sont doubles : recherche des bulles veineuses et cotation de Spencer dans un premier temps puis recherche de bulles artérielles dans un second temps.

RESULTATS (cf tableaux I et II)

Recherche de shunt droite-gauche par épreuve de contraste

La recherche a été réalisée sur la base d'un volontariat à distance des plongées.

2 plongeurs ont refusé l'examen, sur les 8 autres plongeurs, un seul présentait un shunt significatif uniquement après manœuvre de sensibilisation et de moyenne importance (10 à 15 HITS).

actuellement analyser les bulles à la fois sur le versant veineux et artériel (au niveau transcrânien notamment), il permet par ailleurs la recherche à distance d'un shunt droite-gauche après épreuve de contraste.

Powell en 1995 (Powell 1995) rapporte le cas d'un sujet avec un foramen ovale perméable identifié par échographie transoesophagienne. Pour mettre en évidence des bulles artérielles l'artère sylvienne a été monitorée pendant toute la durée d'une exposition hypobare de 3 heures à 21000 pieds. Malgré la présence d'un niveau très élevé de bulles

Plongeurs	Plongées réalisées	Temps de détection en minutes après sortie de l'eau
Plongeur 1	60 m / 20 min	30 et 60 min
Plongeur 2	60 m / 20 min	90 min
Plongeur 3	Successive (n°2) 50 m / 15 min	30 min

Tableau I : Détection de bulles artérielles pour 3 plongeurs sur 10. Caractéristiques des plongées avec temps de détection après la sortie de l'eau.

Recherche de bulles artérielles

Sur un total de 280 détections, la présence de bulles artérielles après plongée n'a été observée que quatre fois chez trois plongeurs différents. Il s'agissait de quelques HITS isolés (< 5 HITS), toujours constatés après manœuvre de sensibilisation. Ils concernaient le plongeur avec shunt, un plongeur sans shunt et un dernier plongeur ayant refusé la détection du shunt droite-gauche. Dans tous les cas les niveaux de bulles veineuses étaient élevés.

veineuses circulantes recherchées au niveau précordial (niveau 4 de Spencer) et la présence avérée du foramen ovale perméable aucune bulle artérielle ne fut détectée. Les auteurs concluaient que la charge en bulles veineuses n'était pas suffisante par elle-même pour inverser le flux et provoquer un shunt droite-gauche.

Glen en 1995 (Glen 1995) a étudié une population de 17 plongeurs dont 4 seulement présentaient un shunt droite-gauche. 73 enregistrements ont été pratiqués dont 23 pour les 4 plongeurs avec le shunt. Les plongées réalisées en eau froide (6°C) étaient saturantes avec des profils entre 45 et 50 mètres pour 20 minutes de durée de travail en moyenne. Aucune bulle artérielles ne fut détectées au décours malgré des manœuvres de Valsalva et des efforts de toux répétés. A noter que la recherche de bulles veineuses n'a pas été entreprise.

DISCUSSION

La présence des bulles artérielles circulantes chez l'homme au décours des plongées a très peu été étudiée. Grâce à l'apport du Doppler pulsé on peut

Tableau II. 4 détections de bulles artérielles sur 280 enregistrements, avec niveau de bulles veineuses correspondant et relation avec le shunt droite-gauche.

Plongeurs	Nombre de bulles artérielles	Manœuvre de sensibilisation	Niveau de bulles veineuses (Spencer)	Présence de shunt droit-gauche
Plongeur 1	<5 HITS	oui	3	10-15 HITS après sensibilisation
Plongeur 1	<5	oui	3	10-15 HITS après sensibilisation
Plongeur 2	<5	oui	3	Refus
Plongeur 3	<5	oui	2	Non

Ries en 1999 (Ries 1999) étudie 6 plongeurs en caisson sec réalisant des plongées de 21 à 24 mètres pour 55 à 66 minutes. 4 d'entre eux présentaient un shunt droite-gauche dont 2 avec un haut grade. Des bulles artérielles ne sont observées que deux fois pour un plongeur avec un shunt de haut grade et l'autre avec un shunt de bas grade. Dans les deux cas on notait une présence faible de bulles veineuses. Par contre les bulles artérielles étaient plus nombreuses pour le plongeur avec le shunt de haut grade.

Geriets en 2000 (Geriets 2000) a étudié 40 plongeurs réalisant 53 plongées en eau froide (8°C). 11 d'entre eux présentaient des bulles veineuses détectables après plongées. Les plongées étaient comprises entre 27 et 45 mètres pour 10 à 21 minutes de durée de travail. Des bulles artérielles ont été constatées pour 6 de ces 11 plongeurs. Quatre d'entre eux présentaient un shunt droite-gauche (dont 2 spontanés) alors que les 2 autres n'en avait pas. Ces deux plongeurs sans shunt avaient un débit de bulles artérielles supérieur au débit de bulles veineuses.

Ces travaux ainsi que notre étude confirment donc la possibilité de bulles artérielles circulantes asymptomatiques mais leur détection apparaît très inconstante malgré la présence avérée d'un shunt ou d'une charge importante en bulles veineuses. Dans certaines observations on observe même un débit de bulles artérielles plus important que le débit de bulles veineuses en l'absence de shunt droite-gauche ce qui suggère une formation de novo des bulles au niveau artériel.

CONCLUSION

Les bulles circulantes artérielles n'ont été observées qu'à quatre reprises chez trois plongeurs différents présentant ou non un shunt droite-gauche. Ces résultats sont à intégrer dans les travaux sur les effets à long terme de la plongée sur le cerveau imputables pour certains au passage silencieux de bulles artérielles. Notre travail n'éclaire pas la physiopathogénie des accidents de désaturation par aéroembolisme artériel, il confirme seulement la possibilité de bulles artérielles circulantes asymptomatiques. Les

critères qualitatifs ou quantitatifs susceptibles de rendre ces bulles pathogènes restent à définir par des études sur l'animal.

REFERENCES

Boussuges A. Détection des shunts droite-gauche par Doppler transcrânien. *Bull. Medsubhyp.*, 1999, 9 : 61-66.

Geriets T. Tetzlaff K. Liceni T. et coll. Arteriovenous bubbles following cold water sport dives : relation to right-to-left shunting. *Neurology*, 2000, 55 : 1741-1743.

Germonpré P. Le foramen ovale perméable dans l'accident neurologique de décompression. *Revue de la littérature. Bull. Medsubhyp.*, 1999, 9 : 11-16.

Glen S.K. Georgiadis D. Grosset D.G. et coll. Transcranial Doppler ultrasound in commercial air divers : a field study including cases with right-to-left shunting. *Undersea and Hyperbaric Med.*, 1995, 22: 129-135.

Louge P., Cantais E. Shunts droite-gauche et accidents de décompression : étude cas-témoins sur 202 Dopplers transcrâniens. *Bull. Medsubhyp.*, 1999, 9 : 81-85.

Macarez R., Dordain Y., Hugon M., et coll. Etude rétrospective du champ visuel, de la vision des couleurs, de la sensibilité au contraste chez 21 plongeurs. *Med. et Armées*, 2003, 31 : 23-28.

Reul J., Weis J., Jung A., Willmes K., Thron A. Central nervous system lesions and cervical disc herniations in amateur divers. *Lancet*. 1995, 345: 1403-5

Ries S. Knauth M., Kern R. et coll. Arterial gas embolism after decompression : correlation with right-to-left shunting. *Neurology* , 1999, 52: 401-404.

Spencer M.P. Decompression limits for compressed air determined by ultrasonically detected blood bubbles. *J. Appl. Physiol.*, 1976, 40: 229-235.

Tetzlaff K., Friege L., Hutzelmann A. et coll. Magnetic resonance signal abnormalities and neuropsychological deficits in elderly compressed-air divers. *Eur. Neurol.* , 1999, 42: 194-199.

RESUME

Recherche de bulles artérielles cérébrales après plongée à l'air chez l'homme. Relation avec le shunt droite-gauche et la charge en bulles veineuses circulantes. JE Blatteau, M Hugon, FM Galland. *Bull. Medsubhyp*, 2005, 15 (Suppl) : 65- 69. 10

Bulles artérielles cérébrales

plongeurs de la Marine française ont réalisé 60 plongées en caisson humide. 280 détections simultanées veineuses et artérielles ont été pratiquées par Doppler pulsé au décours de ces plongées. Les bulles circulantes artérielles ont été recherchées au niveau de l'artère sylvienne avant et après une manœuvre de sensibilisation. Elles n'ont été observées qu'à quatre reprises chez trois plongeurs différents présentant ou non un shunt droite-gauche. La charge en bulle veineuse était toujours importante. Notre travail confirme la possibilité de bulles artérielles circulantes asymptomatiques mais leur détection apparaît très inconstante malgré la présence avérée d'un shunt ou d'une charge bullaire veineuse.

Mots clés : Doppler, détection de bulles, shunt, bulles artérielles circulantes

SUPERIORITE DU DOPPLER PULSE PAR RAPPORT AU DOPPLER CONTINU DUG POUR LA RECHERCHE DE BULLES CIRCULANTES EN DECOMPRESSION HUMAINE; ETUDE DOPPLER COMPARATIVE DE 240 DETECTIONS PRECORDIALES APPARIEES A L'OCCASION DE 60 PLONGEES.

J-E BLATTEAU¹, M. HUGON², F-M. GALLAND³. ¹CEMP, ²CEPHISMER BP 84
83800 Toulon Armées, ³IMNSSA, BP 610, 83800 Toulon Armées (France).

ABSTRACT

Superiority of pulsed Doppler for venous gas embolism research in precordial detection after human diving. Comparative study after 60 dives about 240 continuous and pulsed Doppler paired detections. JE Blatteau, M Hugon, FM Galland. Bull. Medsubhyp. 2005, 15 (Suppl.) : 71 -75.

The aim of this study is to define the best Doppler detection technique for the circulating venous bubbles after human diving. Continuous Doppler DUG was compared with pulsed Doppler (more recent) in precordial detection. Ten divers carried out 60 air dives in a wet part of a hyperbaric chamber. Two procedures of decompression were realized : 60 meters/20 minutes and twice 50 meters/15 minutes with a 3 hours interval. 240 paired recordings were compared. The differences in quotation are significant with higher levels of bubbles for the pulsed Doppler. The latter allows an unambiguous analysis of the bubbles noises. Pulsed Doppler is less "dependent operator", his sensitivity seems better, adjustments are possible and finally it allows also an arterial bubbles detection. Pulsed Doppler thus seems to us the best technique to study human decompression.

Keys words : ultrasonic scanning, pulsed and continuous Doppler, bubble detection

INTRODUCTION

Le Doppler continu DUG, technique développée depuis les années 70, est utilisé dans le domaine de la décompression pour rechercher les bulles veineuses circulantes aussi bien chez l'homme que chez l'animal. La quantification du passage des bulles est un exercice particulièrement difficile et subjectif qui nécessite une grande expérience pour être reproductible. D'apparition plus récente le Doppler pulsé est une technique de choix pour explorer des axes artériels profonds mais il peut être aussi utilisé en détection veineuse et être ajusté pour l'étude des bulles circulantes au niveau de l'infundibulum pulmonaire. Nous avons voulu comparer ces deux méthodes de détection Doppler en utilisant comme classification commune le code de Spencer. 10 plongeurs ont réalisé 60 plongées en caisson humide et au décours de celles-ci 240 enregistrements selon chaque technique ont été confrontés. La facilité d'emploi et la qualité du signal sont nettement en faveur du Doppler pulsé.

MATERIELS ET METHODES

1) Plongeurs

10 plongeurs masculins aptes médicalement ont été retenus. Il s'agit de plongeurs professionnels militaires. Ils constituent un groupe homogène avec une moyenne d'âge de 37.5 ans et environ 10 ans d'ancienneté dans la plongée. Ils possèdent tous un bon niveau d'entraînement physique. 3 d'entre eux ont déjà été victimes d'accident de désaturation, mais il s'agissait d'accidents mineurs avec récupération rapide de l'aptitude médicale à la plongée.

2) Procédure de plongée

L'échantillon de 10 plongeurs a réalisé un total de 60 plongées en eau dans le centre hyperbare de la Marine. Celui-ci permet un contrôle parfait des paramètres de plongée et une intervention thérapeutique immédiate en cas d'accident de plongée ; il est composé d'une partie « tourelle » reliée par une échelle à une cuve humide où évoluent les plongeurs en activité de palmage. Chaque binôme doit réaliser deux profils de plongée à l'air : 60mètres / 20min et 2 fois

50mètres / 15min (en plongée successive avec intervalle de 3 heures) avec deux tables de décompression différentes (table MN90 de la Marine française et un nouveau protocole). La température de l'eau est contrôlée à 15 degré celsius.

3) Détection de bulles veineuses

A / Le Doppler continu

Développée depuis les années 70, il s'agissait alors de la seule méthode de détection utilisable dans ce type de dépistage (Gardette 1979). L'utilisation de deux transducteurs indépendants permet l'émission et la réception des ultrasons en continu. L'appareil utilisé est le DUG ou détecteur ultrasonore Guillaud Guillerme (Guillerme 1975), composé d'une sonde de 5 MHz, d'un détecteur et d'un système d'écoute et d'enregistrement sur cassettes audio. Le positionnement de la sonde est effectué de façon systématique le long du bord gauche du sternum au niveau du troisième espace intercostal. Le DUG ne permet pas de s'adapter à la variabilité anatomique car la sonde est toujours positionnée « à priori » sur le même repère, en outre l'appareil ne dispose pas de réglage pour améliorer le signal des sujets peu échogènes. Enfin la cotation du signal acoustique est très dépendante de l'expérience et des « oreilles » de l'opérateur. Plusieurs écoutes avec comparaison aux enregistrements de référence (avant plongée) ont été nécessaires pour aboutir à une cotation définitive. L'enregistrement est réalisé en position debout pendant 3 minutes avec deux mouvements de flexion-extension des membres inférieurs comme manœuvre de sensibilisation

B / Le Doppler pulsé (Aaslid 1992)

Nous avons utilisé un appareil d'écho Doppler transcrânien de marque Pioneer qui a aussi permis la recherche de bulles artérielles circulantes au niveau de l'artère cérébrale moyenne. Une sonde de 2 MHz a été utilisée pour le dépistage des bulles circulantes aussi bien artérielles que veineuses. Dans le Doppler pulsé l'émission et la réception des ultrasons sont obtenues par le même transducteur selon une ligne de tir. De nombreux réglages sont possibles notamment pour la profondeur du tir Doppler. Les bulles sont détectées à la fois visuellement sur écran par un accident hyperdense associé à un signal sonore caractéristique. Les données du monitoring (images et sons) sont enregistrées sur PC. La sonde est placée initialement au même endroit que pour le DUG mais un repositionnement est la plupart du

temps nécessaire afin de se placer sur la zone la plus riche en échos de bulles. L'analyse visuelle et acoustique des signaux de bulles est très caractéristique et ne prête pas à confusion avec les bruits du cœur ou des signaux d'artefact. L'appareil est réglé avec une puissance et un gain faibles (5%) et une profondeur de 50 à 70 mm. L'enregistrement est réalisé en décubitus dorsal pendant 3 minutes avec comme manœuvre de sensibilisation deux mouvements de flexion-extension des membres inférieurs.

C / Cotation du niveau de bulles veineuses (Spencer 1976)

La cotation des signaux est réalisée selon le code de Spencer pour les deux méthodes Doppler :

degré 0 : absence totale de signaux de bulles

degré 1 : quelques signaux de bulles espacés, mais

la majorité des cycles cardiaques en est dépourvue

degré 2 : signaux de bulles isolés ou en groupes dans moins de la moitié des cycles cardiaques

degré 3 : tous les cycles cardiaques contiennent des signaux de bulles, mais ils ne couvrent pas les bruits normaux du cœur

degré 4 : flux continu de signaux de bulles couvrant les bruits normaux du cœur.

La cotation retenue in fine correspond au niveau de bulles persistant et stable pendant au moins 10 systoles au décours de la manœuvre de sensibilisation.

NB : les deux techniques d'enregistrement Doppler sont réalisées par des opérateurs indépendants.

Concernant le Doppler continu :

Une première cotation appelée « DUG 1 » a été réalisée directement au décours de l'enregistrement par 2 opérateurs en appliquant strictement le code de Spencer. Une deuxième cotation appelée « DUG 2 » correspond à la réécoute des bandes d'enregistrement. Elle a été définie de concert par les premiers opérateurs et deux « écouteurs » indépendants qui ont l'expérience de cette technique. Cette cotation finale prend en compte un paramètre supplémentaire qui n'est pas décrit dans la cotation de Spencer : il s'agit de l'intensité du signal de bulles après la flexion. Pour comparer les méthodes Doppler, nous avons utilisé strictement le code de Spencer c'est à dire que les comparaisons pertinentes concernent la cotation DUG 1 avec celle du Doppler pulsé.

4) Cinétique d'enregistrement

La première détection a lieu 30 minutes après la fin de la plongée.

Les plongeurs sont enregistrés alternativement avec les deux méthodes Doppler toutes les 30 minutes pendant au moins deux heures : soit 4 détections par plongeur et par méthode Doppler à T30, T60, T90 et T120 minutes. La surveillance peut excéder 3 heures notamment pour les plongées successives, elle est dans ce cas interrompue dès que la cotation de Spencer retombe à un niveau faible de bulles (inférieur à 2) avec les deux méthodes Doppler.

5) Analyse statistique

Comparaison du Doppler continu et du Doppler pulsé :

240 détections appariées (Doppler continu et pulsé) ont été comparées selon un test non paramétrique de Wilcoxon. Le seuil de significativité retenu est < 0.05 .

Le coefficient Kappa a été appliqué pour évaluer l'accord entre les techniques. La valeur de l'accord peut être comprise entre -1 et $+1$. L'accord est considéré satisfaisant si le test est supérieur à 0.40. L'accord est mauvais pour un résultat inférieur à 0.20 (Altman, 1995).

obtenues avec le Doppler continu (quel que soit le mode de cotation DUG 1 ou DUG 2). Le test Kappa ne montre pas une bonne corrélation entre les deux méthodes avec un résultat de 0.24 qui correspond à un accord médiocre. Les deux techniques sont cohérentes uniquement pour les niveaux 0, tandis que les niveaux de bulles 1, 2 et 3 sont nettement sous-évalués avec le Doppler continu (DUG 1). En effet 54% des niveaux 1 constatés avec le DUG correspondent à des niveaux 2 (34%) et des niveaux 3 (20%) avec le Doppler pulsé. Il en va de même pour 60% des niveaux 2 du DUG qui sont des niveaux 3 pour le Doppler pulsé. Finalement le Doppler continu ne retrouve que 18% des niveaux 3 du Doppler pulsé.

DISCUSSION

1) Comparaison des méthodes Doppler pour la recherche des bulles veineuses :

Pour pallier les difficultés d'interprétation du signal avec le Doppler continu, deux cotations DUG 1 et DUG 2 ont été nécessaires. La

comparaison des méthodes Doppler	DUG 1 et pulsé	DUG 2 et pulsé	DUG 1 et DUG 2
test de wilcoxon (valeur de p)	$< 0,0001$	$< 0,0001$	0,0094

Tableau I : comparaison des méthodes de détection : Analyse de 240 cotations appariées selon la méthode de détection Doppler : continu ou pulsé.

NB : pour le Doppler continu, DUG 1 correspond à la cotation initiale réalisée avec le code de Spencer et DUG 2 à la cotation finale après réécoute des enregistrements

RESULTATS

Comparaison des méthodes Doppler pour la recherche des bulles veineuses : (cf tableaux I et II)

Pour 240 enregistrements appariés, les cotations du Doppler pulsé sont très différentes de celles

comparaison avec l'enregistrement de référence, réalisé avant la plongée, a souvent été utile pour discriminer les bruits de bulles. Pour la cotation finale DUG 2, un paramètre supplémentaire non décrit dans la cotation de Spencer a été pris en compte : l'intensité du signal de bulles après la flexion. Ceci rend l'analyse difficile et subjective avec un système de cotation proche de celui de Kisman et Masurel : le code K.M qui intègre les

DOPPLER		CONTINU				
	spencer	0	1	2	3	total
PULSE	0	16	8	0	0	24
	1	6	46	6	0	58
	2	4	40	25	1	70
	3	3	23	46	16	88
	total	29	117	77	17	240

Tableau II : Comparaison de 240 cotations appariées de signaux de bulles (utilisant le même code de Spencer) selon la méthode de détection Doppler : continu (DUG 1) et pulsé.

paramètres de fréquence, pourcentage et amplitude des signaux de bulles (Masurel 1987). Cette différence d'approche dans le système de cotation explique la différence constatée entre les 2 cotations DUG réalisées pour les mêmes enregistrements (cf tableau 1).

Mais quelle que soit la cotation DUG retenue nous constatons une différence significative avec la cotation du Doppler pulsé. Celle-ci a été pratiquée facilement en temps réel sans nécessité d'un enregistrement de référence ni de réécoute. Les bruits de bulles sont très reconnaissables et se discriminent facilement des bruits du cœur, il semble que le Doppler pulsé soit plus sensible que le Doppler continu en objectivant des niveaux de bulles plus élevés. Nos résultats ne sont pas corroborés par ceux de Carturan (Carturan 1999) qui a réalisé sur 26 plongeurs 26 détections comparatives selon les deux techniques Doppler. Il n'observe pas de différence significative entre les deux séries de mesure mais retient finalement que le Doppler pulsé permet une détection plus précise que le Doppler continu dans le cas de sujets qui, en raison de caractéristiques anatomiques particulières ou de masses grasses importantes, ont un mauvais signal cardiaque au Doppler continu. Son étude a cependant exclu les sujets dont les signaux Doppler ne permettaient pas une interprétation satisfaisante pour ne retenir que des sujets avec une bonne « échogénicité ». Sur nos 10 plongeurs au moins 2 d'entre eux présentent un signal Doppler au DUG de mauvaise qualité contrairement au Doppler pulsé ou le signal est toujours interprétable même par quelqu'un non formé à la technique.

Par ailleurs Boussuges (Boussuges 1997) associe le Doppler pulsé à l'échographie cardiaque bidimensionnelle (2D), l'objectif étant de sélectionner le site précis de la mesure. Sur les 240 détections réalisées avec le Doppler pulsé nous n'avons jamais rencontré de difficulté pour localiser le site adéquat. En effet la sonde placée initialement au même endroit que pour le DUG était très rapidement repositionnée sur la zone la plus riche en échos de bulles. L'intérêt de l'adjonction de l'échographie cardiaque 2D ne nous semble donc pas évident d'autant que sa mise en œuvre et son interprétation ne sont pas facilement accessibles en dehors du cadre de la cardiologie. Enfin pour Boussuges (Boussuges 1997) l'échographie cardiaque 2D utilisée seule est moins sensible que le Doppler pulsé pour la

détection de bulles circulantes.

Grâce à la qualité du monitoring par Doppler pulsé, il est facile d'établir une cotation précise en fonction des systoles. La cotation de Spencer habituellement utilisée pourrait être affinée pour le Doppler pulsé avec un mode de classification proche de celui de Brubbak qui utilise aussi le Doppler pulsé (Brubbak 2001) :

Degré 0 : absence totale de signaux de bulles même après manœuvre de sensibilisation

Degré 1 : quelques signaux de bulles occasionnels

Degré 2 : signaux de bulles au moins un cycle cardiaque sur deux mais pas tous les cycles cardiaques.

Degré 3 : signaux de bulles à tous les cycles, mais densité de bulles faible (< 4 signaux)

Degré 4 : signaux de bulles à tous les cycles, mais densité de bulles forte (> 5 signaux)

Degré 5 : « tracé blanc », les bruits et tracés du cœur sont couverts par les signaux de bulles.

Cette classification peut elle-même se simplifier pour l'analyse statistique en 2 niveaux :

Niveaux faibles de bulles : niveaux 0, 1, 2.

Niveaux élevés de bulles : niveaux 3, 4, 5.

Il nous semble important de réaliser deux classifications distinctes, au repos et après manœuvre de sensibilisation. Les comparaisons de cotation sont plus pertinentes si l'on utilise les cotations de repos car elles sont moins sujettes aux variations inhérentes à la manœuvre de sensibilisation (absence de quantification possible) comme l'a montré Brubbak (Brubbak 2001).

CONCLUSIONS

L'objectif de ce travail était de définir la meilleure technique pour détecter les bulles veineuses circulantes entre le Doppler continu (technique historique) et le Doppler pulsé (d'apparition plus récente). En l'absence de critère absolu de validation et de « gold standard » nous nous bornerons à constater que :

Le Doppler continu DUG possède un avantage historique car la plupart des travaux en décompression ont été réalisés avec cette technique mais il possède quelques inconvénients majeurs liés à la subjectivité de son analyse avec un manque de reproductibilité inter opérateur ce qui nécessite des écoutes répétées avec à chaque fois prise en compte d'un enregistrement de référence. Par ailleurs, il existe des limitations d'ordre

Doppler pulsé et continu

technique avec l'impossibilité de réaliser des réglages ce qui l'empêche de s'adapter à la variabilité anatomique. Le Doppler pulsé permet quant à lui une analyse directe sans équivoque des bruits de bulles ce qui le rend beaucoup moins opérateur-dépendant. Sa sensibilité semble supérieure au Doppler continu car l'on observe un plus grand nombre de niveaux élevés de bulles. Le tracé informatisé associe sons et images, des réglages sont possibles pour s'adapter aux sujets les moins échogènes. Enfin cette technique permet la détection des bulles circulantes artérielles ce qui est particulièrement intéressant en physiologie de la plongée. Le Doppler pulsé nous semble donc la technique de choix pour étudier la décompression humaine, seul son coût pourrait être un facteur limitant. Des études complémentaires comparant un Doppler continu de conception plus récente avec le Doppler pulsé permettraient peut-être de trancher définitivement le débat.

REFERENCES

Aaslid R, Newell DW. Transcranial Doppler, Raven Press, Ltd., New York. 1992.

Altman DG. Practical statistics for medical research. London : Chapman et Hall. 1995.

Boussuges A, Carturan D, Ambrosi P, Habib G, Sainty JM, Luccioni R. Decompression induced venous gas

emboli in sport diving : detection with 2D echocardiography and pulsed Doppler. *Int. J. Sports Med.* 1997, 18:1-5.

Brubbak AO, Eftedal O. Comparison of the three different ultrasonic methods for quantification of intravascular gas bubbles. *Undersea Hyperb. Med.* 2001, 28: 131-136.

Carturan D. Etude de la décompression des plongeurs sportifs : influence de la vitesse de remontée, de l'âge, de l'aptitude aérobie et de la surcharge pondérale sur la production de bulles intravasculaires circulantes. Thèse de Sciences du sport, Université de la Méditerranée. 1999.

Gardette B. Correlation between decompression sickness and circulating bubbles in 232 divers. *Undersea Biomed. Res.* 1979, 6: 99-107.

Guillerm R, Masurel G, Guillaud C, Monjaret JL. Détection ultrasonore (effet Doppler) par voie transcutanée de bulles circulantes chez l'homme. *Bull. Medsubhyp.*, 1975, 12 : 95-101.

Masurel G. Contribution à l'étude du rôle physiopathologique des bulles générées chez l'animal et chez l'homme par un séjour en atmosphère hyperbare. Thèse de Sciences, Université Claude-Bernard, Lyon I. 1987.

Spencer MP. Decompression limits for compressed air determined by ultrasonically detected blood bubbles. *J. Appl. Physiol.*, 1976, 40: 229-235.

RESUME

Supériorité du Doppler pulsé par rapport au Doppler continu DUG pour la recherche de bulles circulantes en décompression humaine; étude Doppler comparative de 240 détections précordiales appariées à l'occasion de 60 plongées. J-E Blatteau, M Hugon, FM Galland. Bull. Medsubhyp. 2005, 15 (Suppl.) : 71 - 75.

L'objectif de ce travail est de définir la meilleure technique de détection Doppler des bulles veineuses circulantes apparaissant aux décours de plongée chez l'homme. Le Doppler continu DUG (technique historique) a été comparé au Doppler pulsé (d'apparition plus récente). Dix plongeurs ont réalisé un total 60 plongées à l'air dans un caisson humide. Les plongées ont été réalisées selon deux procédures de décompression à 60 mètres/20 minutes et 50 mètres/15 minutes en successive avec un intervalle de 3 heures. 240 enregistrements appariés ont été comparés. Les différences de cotation sont significatives avec des niveaux de bulles plus élevés au Doppler pulsé. Ce dernier permet une analyse directe sans équivoque des bruits de bulles, il n'est pas opérateur dépendant, sa sensibilité semble meilleure, des réglages sont possibles et enfin il permet aussi la détection des bulles artérielles. Le Doppler pulsé nous semble donc la technique de choix pour étudier la décompression humaine.

Mots clés : ultrasonic scanning, pulsed and continuous Doppler, bubble detection

BILAN DE 12 ANNEES D'UTILISATION DE LA TABLE DE DECOMPRESSION MN 90 PAR LA MARINE FRANÇAISE : ANALYSE RETROSPECTIVE DE 61 ACCIDENTS DE DESATURATION.

J-E BLATTEAU¹, J-M GUIGUES¹, M HUGON², F-M GALLAND⁴ ¹CEMPP
²CEPHISMER BP 84 83800 Toulon Armées, ³IMNSSA, BP 610, 83800 Toulon Armées
(France).

ABSTRACT

Decompression table MN 90 : 12 years of use by the French Navy. A retrospective study about 61 decompression sicknesses. JE Blatteau, JM Guigues, M Hugon, FM Galland. Bull. Medsubhyp. 2005, 15 (Suppl.) : 77 – 84. The decompression table MN 90 has been used for 12 years by the French Navy. We observed 61 decompression sicknesses (DCS) of which no death and only 2 persistent deficits. 100% of these DCS respected the MN90 procedure. Each year 1800 divers carry out 150000 dives \pm 10%. The total risk of DCS is estimated at 1/30000 dives. We found spinal decompression sickness : 66%, cerebral 23%, inner ear 8% and joint bends 3%. Neurological accidents are purely sensitive for 65%. The evolution was favourable for 97% of DCS after early hyperbaric recompression at 4 ATA. Water temperature, age, effort during diving, repetitive dives were not found as a risk factor. A right-to-left shunt was present for only 24% of type II DCS. The main result of the study is that 54% of DCS concerned only the 250 mine clearance divers (MCD). For MCD, DCS incidence increased between 45-60 meters-under-water for a risk estimated at 1/3000 dives.

INTRODUCTION

La table de décompression MN 90 actuellement en vigueur dans la Marine française a été adoptée en 1990 pour remplacer la table précédente GERS 65. L'analyse des accidents de désaturation de 1966 à 1987 objectivait en effet un surcroît d'accidents entre 28 et 42 mètres de profondeur malgré un respect de la procédure avec un taux global d'accident de 1/15000 plongées. Cette analyse aboutit à la modélisation d'une nouvelle table, la MN 90 basée sur un mode de calcul haldanien. La MN 90 est caractérisée par une vitesse de remontée comprise entre 15 et 17 mètres / minute, 12 compartiments sont définis (au lieu de quatre pour la GERS 65) avec des périodes de 5 à 120 minutes et des coefficients de sursaturation critique variant de 2.72 à 1.54. Ces paramètres ont été déterminés par analogie avec ceux de la table du Ministère du travail de 1974 qui donnait satisfaction dans la zone de profondeur incriminée. Après douze années d'utilisation, il paraît licite de dresser un bilan de la MN 90 par l'analyse des 61 accidents de désaturation survenus dans la période 1990-2002.

MATERIEL ET METHODE

La population étudiée est celle des plongeurs de la Marine française. 150 000 plongées \pm 10% sont réalisées chaque année pour un effectif de 1850 plongeurs environ (soit environ 50 à 100 plongées par personne et par an). On distingue 2 sous-populations :

- les plongeurs de bord (effectif = 1600) sont autorisés à plonger à l'air jusqu'à la profondeur de 35 mètres
- les plongeurs d'Armes peuvent plonger à l'air jusqu'à la profondeur de 60 mètres. Il s'agit presque exclusivement dans notre étude de plongeurs démineurs (effectif = 250).

Chaque accident de plongée fait l'objet d'une double déclaration réglementaire : un compte-rendu d'accident établi par le commandant de l'unité et une fiche médicale émanant du médecin responsable de la prise en charge médicale. Les informations sont centralisées sur une base de données informatiques des accidents de plongée.

RESULTATS

61 accidents de désaturation ont été recensés de 1990 à 2002, il s'agit à priori exclusivement d'accidents avec respect de la table MN90.

A / ANALYSE EPIDEMIOLOGIQUE

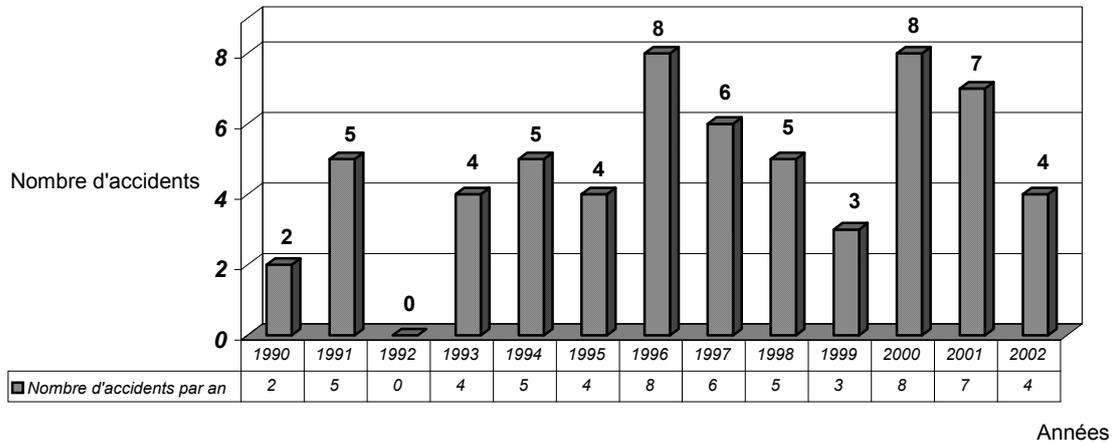


Figure 1. Répartition des accidents par année

On observe une moyenne de 5 accidents par an.

1) Répartition des accidents par catégorie de plongeurs (Figure 2)

La population cible est celle des plongeurs démineurs puisqu'ils représentent 54% des accidentés (33/61) pour un effectif de seulement 250 ; les plongeurs de bord, pourtant les plus nombreux (1600), ne représentent que 43% des accidents (26/61) mais nous savons qu'il sont limités à des plongées en-deçà de 35 mètres. Enfin 2 accidents sont notés chez des nageurs de combat (autorisés à plonger jusqu'à 60 mètres).

Les plongeurs démineurs sont plus exposés au risque d'accident de désaturation : en effet si l'on considère que leur effectif est de 250, qu'ils réalisent 25 à 50 plongées à l'air par an, le risque revient à environ un accident pour 3000 plongées ce qui est beaucoup plus que le risque global de 1/30000.

4) Répartition en fonction des paramètres de plongée (Figures 3 et 4)

Il n'est actuellement pas possible de connaître précisément le nombre total de plongées réalisées par tranche de profondeur, néanmoins 3 groupes sont identifiables :

groupe 1 : 20 accidents ont été recensés en-deçà de 28 mètres pour des **plongées sans palier**. Il s'agit essentiellement de la population des plongeurs de bord (limités aux plongées inférieures à 35 mètres).

groupe 2 : 20 accidents ont été observés dans la tranche des 28-42 mètres. Les plongeurs de bord

sont autant concernés que les plongeurs d'Armes. La majorité de ces plongées comportait des paliers à 3 mètres mais pas de palier à 6 mètres.

groupe 3 : 21 accidents sont survenus dans la tranche 43-60 mètres, ils concernent exclusivement des plongeurs d'Armes. La majorité de ces plongées comportait des paliers à 6 et 3 mètres mais pas à 9 mètres.

B / ANALYSE CLINIQUE

Aucun décès n'est à déplorer en plongée à l'air dans notre étude.

1) Répartition selon la forme clinique (Fig 5) :

On constate 97% d'accidents de type II avec 89% d'accidents neurologiques.

Nous observons 66% d'accidents neurologiques médullaires (40/61), 23% d'accidents neurologiques cérébraux (14/61), 8% d'accidents vestibulaires (5/61) et 3% de bends (2/61). Les accidents neurologiques de la MN90 se manifestent plus souvent par des signes sensitifs (65%) que moteurs (35%). Les accidents médullaires se répartissent de façon homogène dans toutes les tranches de profondeur tandis que les formes cérébrales sont plus fréquentes en plongée profonde (45-60 mètres). Pour préciser le diagnostic étiologique, 21 accidentés ont bénéficié d'une IRM au décours du bilan initial. 80% des IRM (17/21) pratiquées sont normales. Quand l'IRM est anormale, on observe des séquelles dans 50% des cas (soit 2 accidentés).

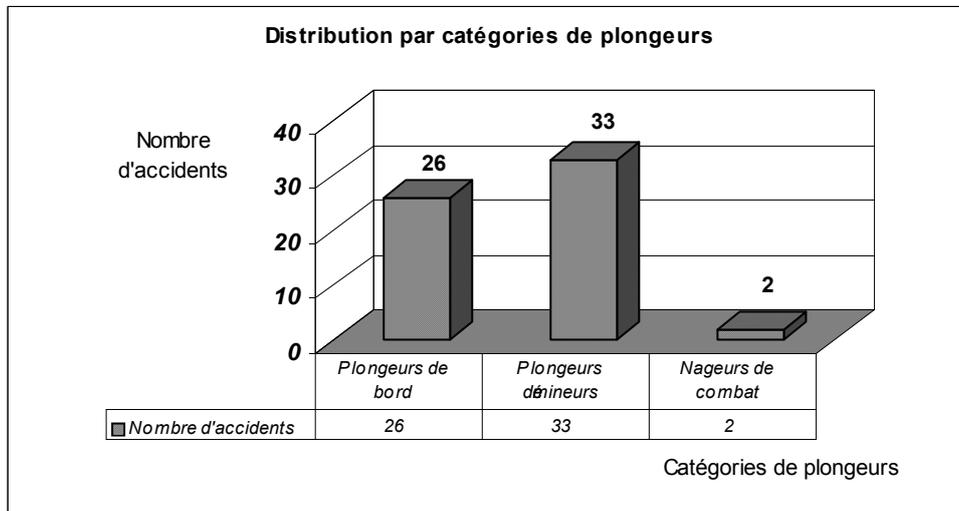


Figure 2 : Distribution des accidents par catégorie de plongeurs

2) Type de traitement : (Figure 6)

Les tables de recompression à 4 ATA ont été le plus souvent utilisées : table BP 94 (utilisable en caisson biplace) et les tables du GERS A, B et C (en caisson multiplace); les autres traitements correspondaient à un traitement hyperbare à 2,8 ATA et/ou un traitement médical associé à une oxygénothérapie normobare.

3) Evolution :

La très grande majorité des accidents neurologiques (97%) est d'évolution favorable après une recompression précoce à 30 mètres. Ce traitement hyperbare est réalisé le plus souvent sur le site même de la plongée (caisson de transport biplace ou caisson multiplace du bâtiment support) ; la prise en charge est réglementaire avec cette recompression à 30 mètres obligatoire dans les minutes qui suivent l'apparition des signes. 50% des accidentés ont bénéficié de séances complémentaires d'OHB. On ne déplore finalement sur 12 ans que 2 accidents d'évolution défavorable malgré cette prise en charge. Il s'agissait de deux accidents médullaires avec signes moteurs et sphinctériens s'aggravant pendant la recompression et dont la récupération motrice ne fut à terme que partielle. Les paramètres

de plongée étaient de 15 minutes à 27 mètres pour l'un et 15 minutes à 55 mètres pour l'autre.

4) Facteurs favorisants :

Procédure : aucune faute de procédure n'a été enregistrée au vu des compte-rendus. Il s'agit donc à priori de 100% d'accidents avec respect des tables.

La température de l'eau n'influence pas la distribution des accidents de plongée. On observe autant d'accidents en Méditerranée (29 accidents) qu'en Atlantique ou Manche (28 accidents). Les accidents outre-mer sont exceptionnels (4 au total).

L'âge moyen des accidentés est de 30 ans : 28.5 ans pour les plongeurs de bord et 32.5 ans pour les plongeurs d'armes. La condition physique de tous les plongeurs est bonne. Aucune pathologie ou traitement intercurrent ne sont relevés.

La notion d'effort pendant la plongée n'est établie que pour 8 cas sur 61 (13%), essentiellement des plongeurs d'armes.

Les plongées précédentes : dans 60% des cas aucune plongée n'a été réalisée dans les 24 heures précédant l'accident ce qui est un résultat proche de celui de Arness 1997 (51 % de plongée unique). 36% ont effectué une plongée et seulement 3 accidentés ont réalisé 2 plongées dans les 24 heures qui précédaient.

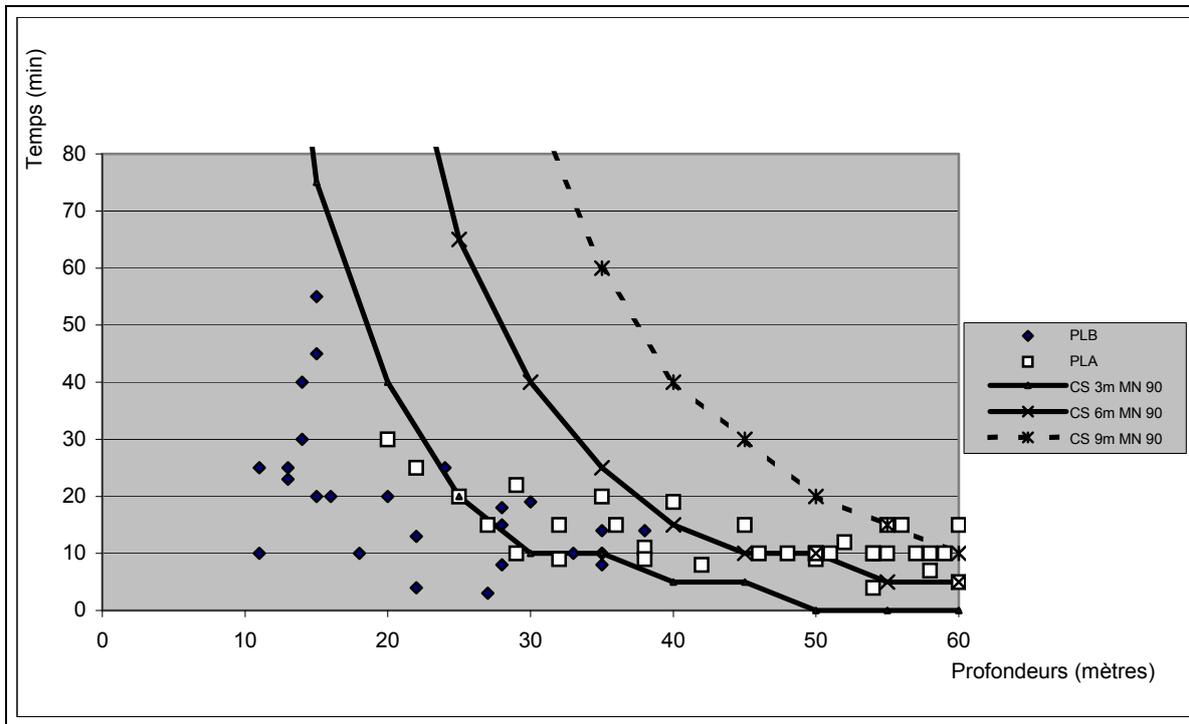


Figure 3 : Distribution des accidents de désaturation de la table MN90 par rapport aux courbes de remontée sans palier : à 3 mètres (CS 3m), à 6 mètres (CS 6m) et à 9 mètres (CS 9m)
 PLB : plongeur de bord et PLA : plongeur d'armes

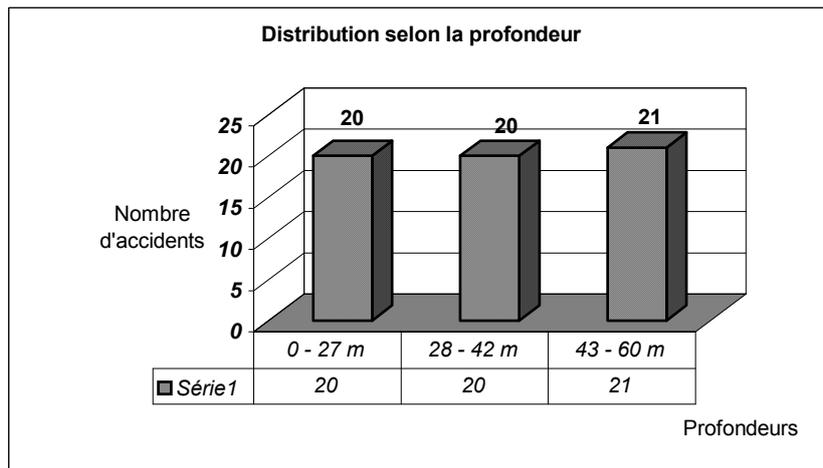


Figure 4: Distribution des accidents par tranche de profondeur

Présence d'un shunt droite-gauche :

Sur l'ensemble de la période 1990-2002, on recense 16 shunts pour 41 recherches ce qui correspond à la présence d'un shunt droite-gauche pour 40% des accidentés investigués. Sur la période 1998-2002, où la recherche de shunt est réalisée de façon systématique par échodoppler transcrânien pour la majorité des accidents de type II, on ne constate que 30% de shunts (5 shunts sur 17 recherches).

DISCUSSION

1) ANALYSE EPIDEMIOLOGIQUE

Comparaison avec la période précédente (table GERS 65) :

L'étude de Méliet en 1988 recense 50 accidents de désaturation en plongée à l'air de 1966 à 1987. Le risque global d'accident est estimé sur cette période à 1 sur 15000 plongées. Ce risque est évalué à 1 accident pour 30000 plongées pour la période 1990-2002 qui concerne la MN90. L'analyse du nombre de nouveaux cas d'accidents par année permet de constater que l'incidence reste stable sur les deux périodes. Il semblerait en effet que l'effectif global des plongeurs reste inchangé avec un nombre de plongées annuelles en augmentation pour 1990-2002, mais le recueil de ces données est impossible à établir avec précision actuellement.

66% (33/50) des accidentés ont respecté la procédure sur la période 1966-1987. Ce chiffre semble passer à 100% de respect de la procédure pour la période 1990-2002. Ce résultat remarquable pourrait s'expliquer par la montée en puissance d'une politique de sécurisation des plongées pour le suivi et le contrôle du matériel ainsi que la formation et l'entraînement des plongeurs.

Analyse selon les paramètres :

groupe 1 : La majorité des plongées réalisées par an se produit dans cette tranche de profondeur ; par rapport la période 1966 à 1987 (Méliet 1988), on y observe une augmentation du nombre d'accidents. On peut constater comme facteurs favorisant de longues durées de plongées et/ou des plongées de type « yoyo ».

groupe 2 : On ne constate pas de surcroît d'accident dans cette tranche de profondeur par rapport aux autres contrairement à l'étude de Méliet de 1988 qui objectivait que 2/3 des

accidents avec respect des tables se produisaient entre 28 et 42 mètres dans la courbe de sécurité.

groupe 3 : Il existe un surcroît d'accidents dans cette tranche de profondeur d'autant plus qu'elle ne concerne presque que des plongeurs démineurs dont l'effectif est inférieur à celui des plongeurs de bord (250 versus 1600). Le nombre total de plongées par an réalisées dans cette tranche de profondeur est donc bien moindre que dans les deux autres tranches précédemment décrites alors que l'on constate un nombre d'accidents identique. Dans son étude de 1987, Méliet évalue le nombre de plongées réalisées entre 41 et 60 mètres à seulement 16 % de l'ensemble des plongées effectuées au cours de l'année 1986. Par ailleurs il rapporte sur la période 1966-1987 un nombre inférieur d'accidents dans cette tranche de profondeur, et il s'agissait en majorité de plongées avec faute de procédure. Par rapport à la période précédente, il semble exister une évolution des habitudes de plongée concernant les plongeurs démineurs : la plongée à l'air s'effectuait beaucoup plus dans cette tranche de profondeur 45-60 mètres.

Finalement nous pouvons observer un risque d'accident comparable de l'ordre de 1 / 30000 plongées dans les deux premières tranches de profondeur tandis que la tranche la plus profonde 45-60 mètres apparaît plus délétère avec un risque augmenté de l'ordre de 1 accident pour 3000 plongées.

Perspectives :

In fine, la question est de savoir si l'on peut améliorer encore la sécurité des tables de plongée. Les premières conclusions de notre travail sont les suivantes :

L'utilisation manuelle de la table de plongée est sûre dans nos conditions militaires (100% de respect de la procédure chez nos accidentés). Il n'y a pas lieu d'envisager un remplacement par un ordinateur de plongée sur le motif d'un meilleur respect de la procédure.

Les résultats globaux de la MN90 sont satisfaisants : l'incidence annuelle des accidents de désaturation varie de zéro à huit pour environ 150 000 plongées par an ; le rapport peut donc être estimé à 1 accident pour 30000 plongées ce qui semble meilleur que pour la table GERS 65.

La MN90 a atteint son objectif initial qui était de réduire le surcroît d'accidents dans la tranche de profondeur 28-42 mètres.

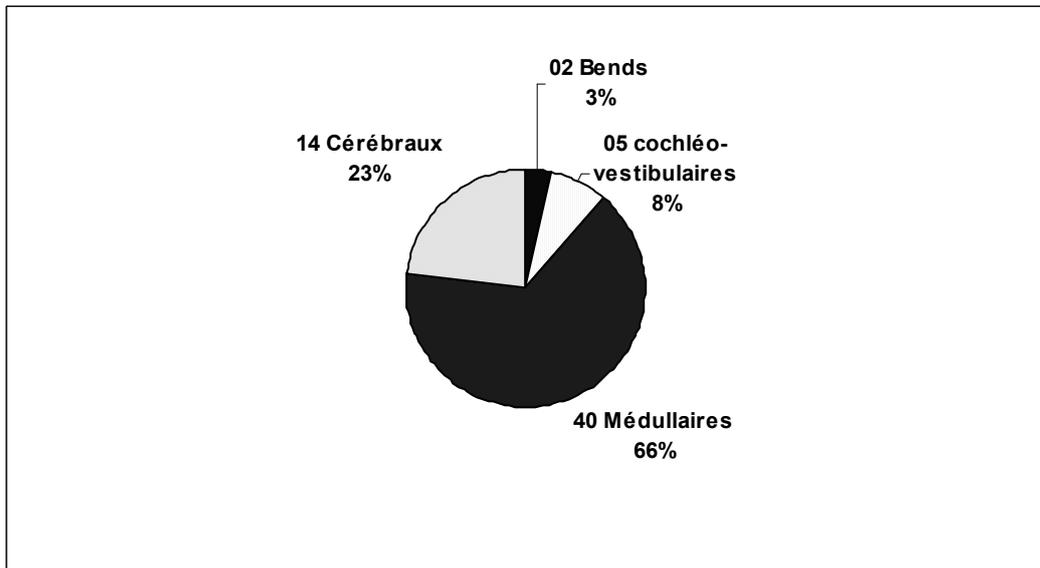


Figure 5: Distribution par type d'accident

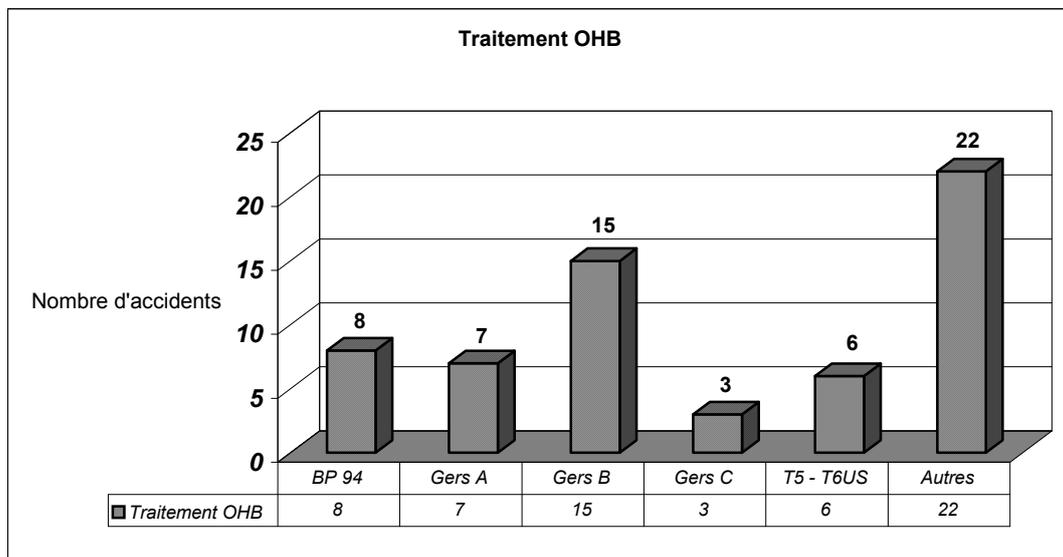


Figure 6 : Traitement des accidents

L'analyse des différents facteurs de risque ne retient pas de rôle prépondérant pour l'un d'entre eux.

Cependant on peut objectiver un risque d'accident nettement augmenté dans la tranche de profondeur 45-60 mètres. Il nous semble donc judicieux de tenter d'améliorer la sécurité dans cette tranche de profondeur.

L'abandon pur et simple de la MN90 ne semble pas justifié car les résultats sont satisfaisants jusqu'à 45 mètres. Par contre un réajustement de la table pour les profondeurs supérieures nous semble indiqué.

Une alternative pourrait être l'élaboration d'un nouveau modèle de décompression : le mode de calcul haldanien adopté par la majorité des tables actuelles est mis en cause par certains auteurs (Giry et coll. 1981). En effet il a été montré expérimentalement chez l'animal que les variations de pression partielle des gaz inertes dissous dans le sang ne pouvaient être décrites par de simples exponentielles mais se rapprocheraient plutôt d'un modèle sigmoïdal.

2) ANALYSE CLINIQUE

La comparaison avec la période précédente (1966-1987) permet d'observer une franche augmentation des accidents médullaires et des formes cérébrales mais une diminution des bends et des accidents vestibulaires. La période 1990-2002 présente donc plus d'accidents à forme neurologique et surtout médullaire (au détriment des autres formes cliniques) que la période précédente. Ces résultats sont à l'inverse de ce que l'on peut observer en plongée de loisir puisque d'après Cantais et Blatteau (2002) la généralisation de l'ordinateur de plongée conduit leurs utilisateurs à plonger plus profond et plus longtemps avec une augmentation des accidents vestibulaires et des bends au détriment des accidents médullaires.

La répartition des accidents neurologiques en forme médullaire ou cérébrale repose sur la clinique : les signes déficitaires unilatéraux sont généralement considérés comme d'origine cérébrale tandis que les signes bilatéraux comme d'origine médullaire. Mais cette classification reste arbitraire et parfois remise en question par l'imagerie ou la recherche d'un shunt droite-gauche. Il existe en effet une corrélation établie entre la présence d'un shunt et les accidents cérébraux, vestibulaires, et peut-être médullaires cervicaux. En définitive c'est l'IRM cérébrale et médullaire qui permet un diagnostic topographique de certitude. Mais la présence d'image

pathologique est inconstante. Sur 13 patients victimes d'accidents neurologiques, Colineau (1998) ne constate des anomalies qu'une fois sur deux et préconise de respecter un délai de deux à quatre jours entre l'accident et l'IRM initiale afin d'optimiser la détection des signaux. Dans notre étude, 21 patients ont bénéficié d'une IRM dans le bilan initial. Lorsque celle-ci est normale (17/21 soit 80%) et quel que soit le type d'accident ou la présence ou non d'un shunt droite-gauche, le patient ne présente aucune séquelle clinique ou paraclinique. Par contre lorsque l'IRM est pathologique (4/21 soit 20%), nous avons observé des séquelles neurologiques dans 50% des cas, il s'agissait des deux accidents médullaires avec signes moteurs précédemment cités.

Sur l'ensemble de la période 1990-2002, on recense 16 shunts sur 41 recherches ce qui correspond à la présence d'un shunt droite-gauche pour 40% des accidentés investigués. Cette proportion est supérieure à celle de la population générale (environ 25% de shunts). Mais ce résultat est nettement inférieur à la plupart des études qui recherchent un shunt dans la population des plongeurs accidentés (Germonpré 1999). Une première explication est liée au fait que les accidents sur la période 1990-1998 n'ont bénéficié que d'un dépistage occasionnel mais si l'on analyse la période 1998-2002, où la recherche de shunt est réalisée de façon presque systématique par échodoppler transcrânien chez tous les accidents de type II, on ne constate que 30% de shunts (5 shunts sur 17 recherches). L'explication est probablement en rapport avec la répartition clinique des accidents et la prépondérance de l'atteinte médullaire. Or cette dernière n'est pas réputée être reliée à la présence d'un shunt, tout au moins en ce qui concerne les formes médullaires dorso-lombaires (Louge et Cantais 1999). Finalement ce résultat global de 30 à 40% de shunts dans notre population d'accidentés avec seulement 10 accidents reliés au shunt de façon indubitable nous a incité à entreprendre une étude prospective qui devrait préciser les choses : le shunt est recherché chez des candidats plongeurs volontaires, l'analyse des accidents à venir devrait permettre une évaluation précise du risque (Pény 2000).

CONCLUSION

Après douze années d'utilisation de la table de décompression MN 90, la Marine Nationale ne

déplore que 61 accidents de désaturation dont aucun décès et seulement 2 accidents avec séquelles motrices persistantes. Les accidents médullaires avec signes sensitifs isolés sont les plus fréquents. La très grande majorité des accidents répond favorablement au traitement hyperbare qui consiste en une recompression à 30 mètres instaurée précocement dès l'apparition des signes. L'analyse des différents facteurs de risque ne retient pas de rôle prépondérant pour l'un d'entre eux. Une étude prospective est actuellement en cours pour préciser le risque d'accident pour les sujets porteurs d'un shunt droite-gauche.

Le risque global d'accident est évalué à un pour 30000 plongées. La table MN 90 a atteint son objectif initial qui était de réduire l'incidence des accidents dans la tranche de profondeur 28-42 mètres. Cependant notre analyse permet d'objectiver un surcroît d'accidents entre 45 et 60 mètres avec un risque d'accident plus élevé, estimé à un accident pour 3000 plongées. Une réflexion est engagée pour améliorer la sécurité dans cette tranche de profondeur.

REFERENCES

Arness M K. Scuba decompression illness and diving fatalities in overseas military community. *Aviat. Space Environ. Med.* 1997 ; 68 : 325-33.

Cantais E, Blatteau JE, Colombier O, Kaiser E, Palmier B. Respect de la procédure de décompression au cours des accidents de plongée de loisir. *Bull. Medsubhyp*, 2003, 13 (Suppl) : 97-101

Carturan D. Etude de la décompression des plongeurs sportifs : influence de la vitesse de

remontée, de l'âge, de l'aptitude aérobie et de la surcharge pondérale sur la production de bulles intravasculaires circulantes. Thèse de Sciences. Université Aix-Marseille II. 14/10/99.

Colineau X. et coll. Accidents neurologiques de décompression. Mise en évidence par IRM. *Médecine et Armées*, 1998, 26, 5, p371-379.

Germonpré P. Le foramen ovale dans l'accident neurologique de décompression. *Revue de la littérature. Bulletin de MEDSUBHYP* 1999. Tome 9. Supplément. P111-116.

Giry P, Broussolle B, Meliet JL, Monti M. Variation de la somme des pressions partielles des gaz inertes au cours de changements de composition des gaz inhalés sans variation de pression ambiante en atmosphère hyperbare. *C R Acad Sc Paris* 1981;292(3) [III]: 335-8.

Louge P, Cantais E. Shunts droite-gauche et accidents de décompression : étude cas-témoins sur 202 dopplers transcraniens. *Bull. Medsubhyp* 1999, 9. (Suppl) : p81-85.

Mélie J-L. Les accidents de décompression avec respect des tables GERS 65. *MEDSUBHYP*, 1988, vol.7, N°3 : 83-95.

Mélie J-L. Les tables de plongée à l'air de la Marine Nationale : Historique - Nouveaux développements. Extrait du Broussolle : *Physiologie et médecine de la plongée*. Edition Ellipses 1992. Chap 45 p565-587.

Pény C. Le foramen ovale perméable chez le plongeur. Incidence sur les accidents neurologiques de désaturation. Intérêt de la recherche d'un shunt droite-gauche en visite médicale initiale d'aptitude à la plongée sous-marine. Mémoire de spécialité du service de santé des armées 2000.

RESUME

Bilan de 12 années d'utilisation de la table de décompression MN 90 par la Marine Nationale : analyse rétrospective de 61 accidents de désaturation. JE Blatteau, JM Guigues, M Hugon, FM Galland. Bull. Medsubhyp. 2005, 15 (Suppl.) : 77 – 84. La table de décompression MN 90 est utilisée depuis 12 ans par la Marine française. On ne déplore que 61 accidents de décompression dont aucun décès et seulement 2 accidents avec séquelles motrices importantes. Chaque année 150 000 plongées \pm 10% sont réalisées pour un effectif de 1850 plongeurs. Le risque global d'accident est estimé à 1/30 000 plongées. On observe 66% d'accidents médullaires, 23% de cérébraux, 8% de vestibulaires et 3% de bends. 65% des accidents neurologiques sont sensitifs. L'évolution est favorable après recompression précoce à 30 mètres dans 97% des cas. 100% des accidents sont avec respect de la procédure. La température de l'eau, l'âge, l'effort en plongée et les plongées répétitives n'ont pas été retrouvés comme facteurs favorisants. Un shunt droite-gauche est présent chez seulement 24% des accidents de décompression de type II. Une étude prospective est actuellement en cours pour préciser le risque d'accident pour les sujets porteurs d'un shunt droite-gauche. Le résultat principal de l'étude est que 54% des accidents concernent des plongeurs démineurs dont l'effectif n'est que de 250. On observe chez ces plongeurs un taux élevé d'accidents dans la tranche de profondeur 45-60 mètres avec un risque d'accident estimé à 1/3000 plongées. Une réflexion est engagée pour améliorer la sécurité dans cette tranche de profondeur.

PROTOCOLES DE DECOMPRESSION POUR LA PLONGEE A L'AIR INTEGRANT DES PALIERS PROFONDS ; ETUDE DOPPLER COMPARATIVE AVEC LES PROCEDURES DE LA MARINE FRANÇAISE.

J-E BLATTEAU¹, M. HUGON², B. GARDETTE³, F-M. GALLAND⁴. ¹CEMPP.
²CEPHISMER, BP 84, 83800 Toulon Armées. ³Comex SA., 36 Bd des Océans, 13009
Marseille. ⁴IMNSSA, BP 610, 83800 Toulon Armées (France).

ABSTRACT

Decompression protocols with deep stops : comparative Doppler study with the procedures of the French Navy. JE Blatteau, M Hugon, B Gardette, FM Galland. Bull. Medsubhyp. 2005, 15 (Suppl.): 85 - 91. French Navy uses since 1990 the decompression table MN90 for air diving up to 60 meters. This table is developed according to a model of haldanian calculation, validated for the epidemiologic aspect with a total risk of accident of about 1 for 30000 dives. However this risk is not homogeneous and increases in the part of depth between 45 and 60 meters with 1 accident for 3000 dives. With an aim of optimizing the safety of these deepest incursions, French Navy evaluated two new protocols of decompression (protocols n° 1 and n° 2) with deep stops also calculated on a haldanian type of calculation. Methods : The protocol n°1 uses a slowed rate of ascent : 12 meters / minute instead of 15 meters / minute with the MN 90, with deep stops beginning around the half depth. From the first stop the rate of ascent is slowed down and passes to 3 meters / minute (instead of 6 meter / minutes with the MN 90). The total decompression time is longer than with the MN 90. The protocol n°2 corresponds to the profile of the MN90 with integration of a two minutes stop at the half-pressure, then again the decompression according to the MN 90 table. The evaluation consisted on the detection of the venous circulating bubbles on the precordial area by two different Doppler methods : continuous Doppler and pulsed Doppler carried out by independent operators. The quotation of the bubbles level according to the model of Spencer was carried out every 30 minutes after the surfacing, during at least 2 hours. The levels of bubbles of the new procedures have been each time compared with those of the procedure of reference : the MN 90 table.

For the study of the protocol n°1, 8 divers performed in the wet part of the hyperbaric chamber the following dives : 60 meters/20 minutes and 2 successive dives 50 meters/15 minutes with a 3 hours interval. These dives were carried out twice by each diver by applying the procedure of the MN 90 then protocol n°1. For the study of the protocol n°2, 8 other divers tested only one profile of dive : 60 meters / 15 minutes according to same methods as the protocol n°1. **Results** The protocol n°1 does not reduce the levels of bubbles compared to the table of reference MN90, on the contrary the appearance of high and prolonged levels of bubbles during several hours for the successive dives, as well as the occurrence of a desaturation sickness of arthrolgical bend type led us to affirm the dangerousness of this procedure. So it was decided to stop it. The protocol n°2, very close to MN90 table, does not improve either to a significant degree the levels of bubbles. **Conclusion** This study confirmed the validity of MN90 table in term of bubble scale. Two procedures of decompression integrating deep stops didn't prove a benefit compared to the MN 90 table, "traditional" table of haldanian model. The concept of deep stops in human decompression is worth to be confirmed for air diving.

Key words : Doppler, bubble detection, venous gas embolism, decompression, deep stops

INTRODUCTION

La Marine française utilise depuis 1990 la table de décompression MN90 pour la plongée à l'air jusqu'à 60 mètres. Il s'agit d'une table élaborée selon un modèle de calcul haldanien, validée au plan épidémiologique avec un risque global d'accident faible de l'ordre de 1 / 30000 plongées. Cependant ce risque n'est pas homogène et augmente dans la tranche de profondeur 45 – 60 mètres à 1 accident pour 3000 plongées (Blatteau et coll. 2004). Dans le but d'optimiser la sécurité de ces incursions les plus profondes, la Marine française a évalué deux nouveaux protocoles de décompression (protocoles n° 1 et n° 2) avec paliers profonds calculés également sur un type de calcul haldanien (Gardette 2001).

MATERIELS ET METHODES

1) Plongeurs

12 plongeurs militaires aptes médicalement ont été retenus, constituant un groupe homogène avec une moyenne d'âge de 37.5 ans et environ 10 ans d'ancienneté dans la plongée. Ils possédaient tous un bon niveau d'entraînement physique. 3 d'entre eux ont déjà été victimes d'accident de désaturation, mais il s'agissait d'accidents mineurs avec récupération rapide de l'aptitude médicale à la plongée. Les plongeurs ont été répartis en binômes pour réaliser des plongées en eau dans le centre hyperbare de la Marine. Celui-ci permet un contrôle parfait des paramètres de plongée et une intervention thérapeutique immédiate en cas d'accident de plongée, il est composé de 3

Tableau I

60 m / 20 min	MN 90	Protocole n°1
vitesse de remontée	15 m.min ⁻¹	12 m.min ⁻¹
changement de palier	6 m.min ⁻¹	3 m.min ⁻¹
PALIERS (en mètres)	PALIERS (en minutes)	PALIERS (en minutes)
27		3 m.min ⁻¹
24		1 minute
21		1
18		2
15		2
12		4
9	3 minutes	6
6	8	9
3	32	22

Tableau II

2 fois 50 m / 15 min	PLONGEES SUCCESSIVES : intervalle de 3 heures			
	MN 90	MN 90	Protocole n°1	Protocole n°1
vitesse de remontée	15 m.min ⁻¹		12 m.min ⁻¹	
changement de palier	6 m.min ⁻¹		3 m.min ⁻¹	
PALIERS (en m)	plongée 1	plongée 2	plongée 1	plongée 2
18			3 m.min ⁻¹	3 m.min ⁻¹
15			3 m.min ⁻¹	1min
12			1min	1
9		1min	2	2
6	2 min	8	3	5
3	9	32	7	13

Tableau III

60 m / 15 min	MN 90	Protocole n°2
vitesse de remontée	15 m.min ⁻¹	15 m.min ⁻¹
changement de palier	6 m.min ⁻¹	6 m.min ⁻¹
PALIERS (en mètres)	PALIERS (en minutes)	PALIERS (en minutes)
25		2
9	1	1
6	4	4
3	19	19

enceintes distinctes avec une partie « séjour », une partie « tourelle » reliée par une échelle à une cuve humide où évoluent les plongeurs. Les plongeurs ont réalisé une activité de palmage modérée et contrôlée. Aucune plongée ni aucune activité physique n'ont été pratiquées dans les 48 heures précédant les plongées. La température de l'eau était maintenue à 15°C.

2) Procédure de plongée

Le protocole n°1 utilise une vitesse de remontée ralentie : 12 mètres par minute au lieu de 15 mètres par minute pour la MN 90, avec des paliers profonds qui débutent aux environs de la demi-profondeur. A partir du premier palier la vitesse de remontée est ralentie et passe à 3 mètres par minute (au lieu de 6 mètres par minutes pour la MN 90). Le temps global de décompression est supérieur à celui de la MN 90. Pour le protocole n°1, 8 plongeurs ont réalisé en caisson humide les plongées suivantes : 60 mètres / 20 minutes (tableau I) et une plongée successive à 50 mètres / 15 minutes (deux fois) avec un intervalle de 3 heures (tableau II). Ces plongées ont été réalisées deux fois par chaque plongeur en appliquant la procédure de la MN 90 puis celle du protocole n°1.

Le protocole n°2 correspond au profil de la MN90 avec intégration d'un arrêt de quelques minutes à la demi-pression puis reprise de la décompression selon la table MN 90.

Pour l'étude du protocole n°2, 8 plongeurs ont testé un seul profil de plongée : 60 mètres / 15 minutes selon les mêmes modalités que le protocole n°1 (tableau III).

3) Détection de bulles veineuses

Le Doppler continu

Développé depuis les années 70, il s'agissait alors de la seule méthode de détection utilisable dans ce type de dépistage (Masurel 1987). L'utilisation de deux transducteurs indépendants permet l'émission et la réception des ultrasons en continu. L'appareil utilisé est le DUG (détecteur ultrasonore Guillaud, Guillermin et coll. 1975) mis au point par l'INSA Lyon. Il est composé d'une sonde de 5 MHz, d'un détecteur et d'un système d'écoute et d'enregistrement sur cassettes audio. Le positionnement de la sonde est effectué de façon systématique le long du bord gauche du sternum au niveau du troisième espace intercostal. Plusieurs écoutes avec comparaison aux enregistrements de référence (avant plongée) ont

été nécessaires pour aboutir à une cotation définitive. L'enregistrement est réalisé en position debout pendant 3 minutes avec deux mouvements de flexion-extension des membres inférieurs comme manœuvre de sensibilisation

Le Doppler pulsé

Nous avons utilisé un appareil d'échoDoppler transcrânien de marque Pioneer avec une sonde de 2 MHz. Dans le Doppler pulsé l'émission et la réception des ultrasons sont obtenues par le même transducteur selon une ligne de tir. Les bulles sont détectées à la fois visuellement sur écran par un accident hyperdense associé à un signal sonore caractéristique (Brubakk 2001). Les données du monitoring (images et sons) sont enregistrées sur PC. La sonde est placée initialement au même endroit que pour le DUG mais un repositionnement est la plupart du temps nécessaire afin de se placer sur la zone la plus riche en échos de bulles.

Cotation du niveau de bulles veineuses (Spencer 1976)

La cotation des signaux est réalisée selon le code de Spencer pour les deux méthodes Doppler :

degré 0 : absence totale de signaux de bulles

degré 1 : quelques signaux de bulles espacés, mais la majorité des cycles cardiaques en est dépourvue

degré 2 : signaux de bulles isolés ou en groupes dans moins de la moitié des cycles cardiaques

degré 3 : tous les cycles cardiaques contiennent des signaux de bulles, mais ils ne couvrent pas les bruits normaux du cœur

degré 4 : flux continu de signaux de bulles couvrant les bruits normaux du cœur.

La cotation retenue in fine correspond au niveau de bulles persistant et stable pendant au moins 10 systoles au décours de la manœuvre de sensibilisation (deux flexions successives des membres inférieurs).

NB : les deux techniques d'enregistrement Doppler sont réalisés par des opérateurs indépendants.

4) Cinétique d'enregistrement (Nishi et coll. 1989)

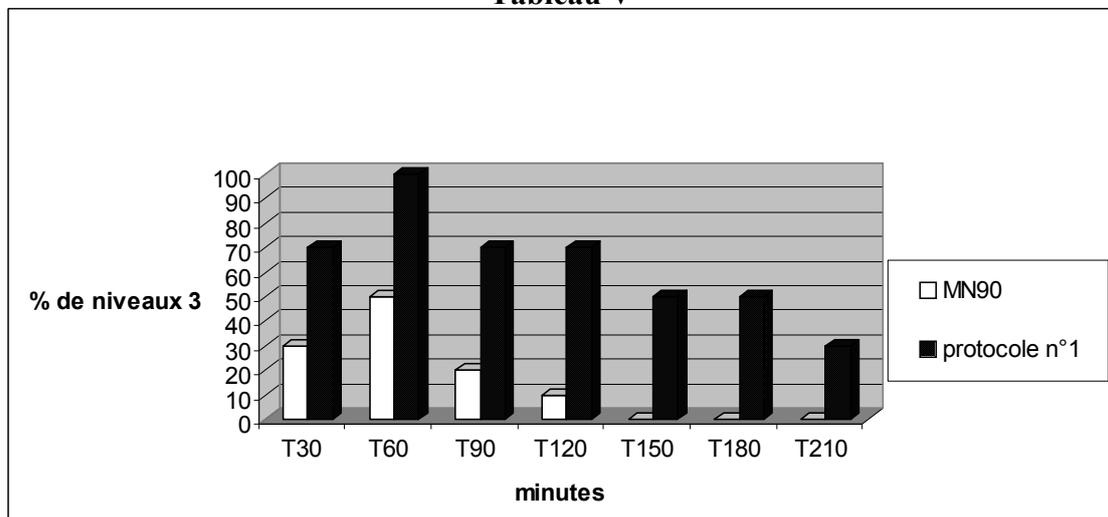
La première détection a lieu 30 minutes après la fin de la plongée. Les plongeurs sont enregistrés alternativement avec les deux méthodes Doppler toutes les 30 minutes pendant au moins deux heures : soit 4 détections par plongeur et par méthode Doppler à T30, T60, T90 et T120 minutes. La surveillance peut excéder 3 heures notamment pour les plongées successives, elle est dans ce cas interrompue dès que la cotation de

Tableau IV

Plongée 60 m/ 20min Pic de bulles à T60	MN90	MN90	Protocole n°1	Protocole n°1
Doppler	DUG	PULSE	DUG	PULSE
Plongeur n°1	2	3	2	2
Plongeur n°2	2	2	1	1
Plongeur n°3	1	2	3	3
Plongeur n°4	1	3	2	3
Plongeur n°5	2	3	2	1
Plongeur n°6	3	2	3	1
Plongeur n°7	2	3	3	3
Plongeur n°8	2	3	3	3
Nombre de niveaux	DUG	PULSE	DUG	PULSE
niveau 0	0	0	0	0
niveau 1	2	0	1	3
niveau 2	5	3	3	1
niveau 3	1	5	4	4

Pas de différence significative (tests de Wilcoxon) entre les niveaux de bulles de la MN90 et du protocole n°1, quelle que soit la méthode de détection Doppler.

Tableau V



Plongée successive 50 m / 15 min (2° plongée) :

comparaison des procédures MN90 et protocole n°1.

Pourcentage de niveaux 3 au Doppler pulsé selon le temps d'enregistrement (en minutes) après la sortie de l'eau.

Spencer retombe à un niveau faible de bulles (inférieur à 2) avec les deux méthodes Doppler.

5) Analyse statistique

Comparaison des protocoles avec la table de référence MN90 par tests de Wilcoxon appliqués aux cotations Doppler correspondant au pic de bulles (observé habituellement à T60) et selon chaque technique Doppler. Le seuil de significativité retenu est $p < 0.05$.

RESULTATS

Pour toutes les plongées, quelle que soit la technique Doppler de détection, le maximum de bulles (pic de bulles) est observé une heure après la sortie de l'eau. Le protocole n°1 ne réduit pas les niveaux de bulles par rapport à la table de référence MN90, au contraire l'apparition de niveaux de bulles élevés et prolongés plusieurs heures lors des plongées successives ainsi que la survenue d'un accident de désaturation de type bend nous ont conduits à affirmer la dangerosité de cette procédure. Elle a été interrompue. Le protocole n°2, très proche de la table MN90, n'améliore pas non plus de façon significative les niveaux de bulles.

DISCUSSION

Quel que soit la technique Doppler utilisée, il existe une cohérence des résultats pour la comparaison des procédures. Le protocole n°1 n'apporte aucun bénéfice par rapport à la table MN90 en ce qui concerne les niveaux de bulles pour la plongée à 60 mètres / 20 minutes. On déplore même un accident de désaturation (bend osseux). Pour les plongées successives, des niveaux de bulles prolongés (supérieurs à 3 heures) ont été observés, concomitants d'états asthéniques marqués. Ces constatations ont conduit à l'arrêt du protocole n°1.

Le concept de palier profond reste séduisant sur le plan théorique car il suppose de neutraliser les bulles à leur stade débutant (Yount et Hoffmann 1986). Mais le ralentissement trop important de la vitesse de remontée et la stagnation à des profondeurs trop importantes après des plongées « pénalisantes » contribuent à prolonger la

saturation, il n'est alors pas étonnant de constater des niveaux de bulles prolongés.

Le juste équilibre n'a pas été trouvé avec ce protocole, peut-être intègre-t-il des vitesses de remontée trop lentes ou alors une distribution inadéquate favorisant à l'excès les paliers les plus profonds au détriment des moins profonds.

Afin de prendre en compte ces résultats un deuxième protocole avait été élaboré : le protocole n°2 très proche de la table MN90 intégrait en effet un palier profond unique de courte durée (2 minutes) réalisé à demi-pression, le reste du profil de la plongée n'étant pas modifié. Cette approche, non plus, n'a pas de donné de résultat avec des niveaux de bulles comparables à la table de référence MN90.

CONCLUSION

Cette étude a confirmé la validité de la table MN90 en terme de niveau de bulle.

Deux procédures de décompression intégrant des paliers profonds n'ont pas montré de bénéfice par rapport à la table MN 90, table « classique » de modèle haldanien validée au plan épidémiologique. Il s'agissait de plongées particulièrement saturantes. Le concept de paliers profonds en décompression humaine mérite confirmation pour la plongée profonde à l'air (Marroni 2003).

REFERENCES

Blatteau JE, Guigues JM, Hugon M, Galland FM. Bilan de 12 années d'utilisation de la table de plongée à l'air MN 90 par la Marine française : analyse rétrospective de 61 accidents de désaturation. Bull. Medsubhyp ; 2004, à paraître.

Brubakk AO, Eftedal O. Comparison of three different ultrasonic methods for quantification of intravascular gas bubbles. Undersea Hypebaric Med. 2001, 28 : 131-136.

Gardette B. Amélioration des tables de décompression en plongée et prévention du risque hyperoxique. Rapport de synthèse finale, contrat Délégation Générale pour l'Armement ; 2001.

Guillerm R, Masurel G, Guillaud C, Monjaret JL. Détection ultrasonore (effet Doppler) par voie transcutanée de bulles circulantes chez l'homme. Bull. Medsubhyp ; 1975, 12 : 95-101.

Tableau VI

Plongée 60M/15minn Pic de bulles à T60	MN90	MN90	Protocole n°2	Protocole n°2
Doppler	DUG	PULSE	DUG	PULSE
Plongeur n°1	1	1	1	1
Plongeur n°2	2	3	3	3
Plongeur n°3	1	1	1	1
Plongeur n°4	2	3	2	2
Plongeur n°5	1	2	1	2
Plongeur n°6	2	3	3	3
Plongeur n°7	3	3	3	3
Plongeur n°8	2	3	3	3
Nombre de niveaux	DUG	PULSE	DUG	PULSE
niveau 0	0	0	0	0
niveau 1	3	2	3	2
niveau 2	4	1	1	2
niveau 3	1	5	4	4

Pas de différence significative (tests de Wilcoxon) entre les niveaux de bulles de la MN90 et du protocole n°2, quelle que soit la méthode de détection Doppler.

Marroni A, Bennett PB, Crojé FJ, Balestra C, Cali-Corleo R, Germonpre P, Pieri M, Bonuccelli C. The effect of deep stops on precordial Doppler bubble production after recreational diving. EUBS 2003 Abstr. & Proc. 2003 : 75-80.

Masurel G. Contribution à l'étude du rôle physiopathologique des bulles générées chez l'animal et chez l'homme par un séjour en atmosphère hyperbare. Thèse de Sciences, Université Claude-Bernard, Lyon I ; 1987.

Nishi RY, Eatock BC. The role of ultrasonic bubble detection in table validation. UHMS publication 74 (VAL) 1-1-88 ; 1989, may 15 : 133-137.

Spencer M.P. Decompression limits for compressed air determined by ultrasonically detected blood bubbles. J. Appl. Physiol.; 1976. 40 (2) : 229-235.

Yount D.E., Hoffmann D.C. On the use of a bubble formation model to calculate diving tables. Aviat. Space Environ. Med. 1986, 52: 149-156.

RESUME

Protocoles de décompression pour la plongée à l'air intégrant des paliers profonds ; étude Doppler comparative avec les procédures de la Marine française. JE Blatteau, M Hugon, B Gardette, FM Galland. Bull. Medsubhyp 2005, 15 (Suppl.) : 85 - 91.

La Marine française utilise depuis 1990 la table de décompression MN90 pour la plongée à l'air jusqu'à 60 mètres. Il s'agit d'une table élaborée selon un modèle de calcul haldanien, validée au plan épidémiologique avec un risque global d'accident faible de l'ordre de 1 / 30000 plongées. Cependant ce risque n'est pas homogène et augmente dans la tranche de profondeur 45 – 60 mètres à 1 accident pour 3000 plongées. Dans le but d'optimiser la sécurité de ces incursions les plus profondes, la Marine française a évalué deux nouveaux protocoles de décompression (protocoles n° 1 et n° 2) avec paliers profonds calculés également sur un type de calcul haldanien. **Méthode :** le protocole n°1 utilise une vitesse de remontée ralentie : 12 mètres / minute au lieu de 15 mètres / minute pour la MN 90, avec des paliers profonds qui débutent aux environs de la demi profondeur. A partir du premier palier la vitesse de remontée est ralentie et passe à 3 mètres / minute (au lieu de 6 mètre / minutes pour la MN 90). Le temps global de décompression est supérieur à celui de la MN 90. Le protocole n°2 correspond au profil de la MN90 avec intégration d'un arrêt de quelques minutes à la demi-pression puis reprise de la décompression selon la table MN 90. L'évaluation a reposé sur la détection des bulles veineuses circulantes au niveau précordial par deux méthodes Doppler différentes : le Doppler continu et le Doppler pulsé réalisés

Décompression et paliers profonds

par des opérateurs indépendants. La cotation du niveau de bulles selon le modèle de spencer a été pratiquée toutes les 30 minutes après la sortie de l'eau pendant au moins 2 heures. Les niveaux de bulles des nouvelles procédures ont chaque fois été comparés avec ceux de la procédure de référence : la table MN 90. Pour l'étude du protocole n°1, 8 plongeurs ont réalisé en caisson humide les plongées suivantes : 60 mètres/20 minutes et une successive à 50 mètres/15 minutes avec un intervalle de 3 heures. Ces plongées ont été réalisées deux fois par chaque plongeur en appliquant la procédure de la MN 90 puis du protocole n°1. Pour l'étude du protocole n°2, 8 autres plongeurs ont testé un seul profil de plongée : 60 mètres / 15 minutes selon les mêmes modalités que le protocole n°1. **Résultats** : le protocole n°1 ne réduit pas les niveaux de bulles par rapport à la table de référence MN90, au contraire l'apparition de niveaux de bulles élevés et prolongés plusieurs heures lors des plongées successives ainsi que la survenue d'un accident de désaturation de type bend nous ont conduits à affirmer la dangerosité de cette procédure. Elle a été interrompue. Le protocole n°2 très proche de la table MN90, n'améliore pas non plus de façon significative les niveaux de bulles. **Conclusion** : cette étude a confirmé la validité de la table MN90 en terme de niveau de bulle. 2 procédures de décompression intégrant des paliers profonds n'ont pas montré de bénéfice par rapport à la table MN 90, table « classique » de modèle haldanien. Le concept de paliers profonds en décompression humaine mérite confirmation pour la plongée profonde à l'air.

Mots clés : Doppler, détection de bulles, bulles veineuses circulantes, décompression, paliers profonds.

POUR UNE DECOMPRESSION SECURISEE EN PLONGEE AUTONOME PROFONDE

B. GARDETTE¹, M. HUGON², F.M. GALLAND³ ¹COMEX S.A. 36 Bd des Océans, 13009 Marseille. ²CEPHISMER, BP 84, 83800 Toulon Armées. ³IMNSSA, BP 610, 83800 Toulon Armées (France).

ABSTRACT

For safety decompression in deep autonomous diving. B Gardette, M Hugon, FM Galland. Bull. Medsubhyp. 2005, 15 (Suppl.): 93 - 100. The « Tek-recreational » diving practice increases in the world and also in France. To dive deeper than 40 msw, Trimix (O₂/N₂/He) gas mixture is used.

In Trimix, nitrogen is partly replaced by helium to control nitrogen narcosis (PN₂ ≤ 5b). Due to extreme depth (40-90 msw) the recreational diver must be specially trained as a professional diver and a specific diving method must be used. A large choice of decompression procedures exist but to dive safe, we recommend to use only the validated tables : NOAA, French Navy (MN78) or COMEX (CX04) issue from a large up-to-date validation study conducted by the French Navy on deep air and trimix dives (DGA study : 1999-2003). Deeper than 90 msw or for bottom time over 20 min, Trimix must be replaced by heliox gas mixture and autonomous diving by professional technical support (wet bell). Moreover, the deep diver will identify his own individual risk factors and also the environmental risks. The ultrasound Doppler bubble detection after deep dive can help him do this evaluation.

INTRODUCTION

Au-delà de la zone de plongée à l'air courante (0-40 m.), la plongée autonome profonde à l'air (40-60 m.) puis la plongée TRIMIX, nécessite du matériel, une organisation, une aptitude individuelle et un entraînement très spécifique ; ce qui en fait une plongée technique (plongée TEK) plus près de la plongée professionnelle (Journal Officiel 1992, NOAA 2004) que de la plongée loisirs (Juvspan et Thomas 1992, Vettier 2004). Le principal danger reste l'autonomie du plongeur. Il doit gérer seul (même s'il plonge en binôme) l'ensemble des décisions qu'il aura à prendre au cours de sa plongée et ceci jusqu'à 80 m. de profondeur ! Voir plus !!

CHOIX DU MELANGE GAZEUX

La plongée aux mélanges gazeux TRIMIX (encore appelée TERNAIRE) se caractérise par le remplacement d'une partie de l'azote par de l'hélium pour aboutir à un mélange gazeux à trois composants : oxygène, hélium, azote (O₂ / He / Ne). Le but essentiel est de diminuer les effets de la « narcose à l'azote » au-delà de 50 m de profondeur, en limitant le risque hyperoxique avec un PO₂ ≤ 1,4 b. La proportion d'hélium dans le mélange respiratoire TRIMIX sera augmentée en fonction de la profondeur atteinte, de façon à avoir une PN₂ comprise entre 3 et 5b (correspondant à

une profondeur de 30 et 50 m. à l'air) ce qui donne 30 % à 50 % d'hélium pour des profondeurs comprises entre 60 et 80 m. (PHe de 2 à 5 b). Certains plongeurs utilisent des TRIMIX faiblement dosés en He (15 % à 30 %) comme les corailleurs par souci d'économie, au risque d'être narcosés au fond. Le remplacement de l'azote par de l'hélium, en plus du surcoût financier, va aussi augmenter le stress thermique du plongeur dû à une déperdition calorifique respiratoire accrue. De plus, la plongée TRIMIX nécessite l'utilisation de matériel et procédures spécifiques.

ASPECTS LOGISTIQUES

Il ne sera fait ici que la liste des points techniques importants en plongée TRIMIX ; il est recommandé au plongeur de prendre contact avec des organismes spécifiques qui gèrent l'enseignement de ce type de plongée en France comme la FFESSM, CMAS, IANTD et TDI (Vettier 2004).

LA FABRICATION DES MELANGES GAZEUX

Il est conseillé à l'utilisateur d'acheter les mélanges fabriqués et garantis par un fabricant professionnel spécialisé. Celui-ci prendra en compte la pureté des gaz constitutifs du mélange (qualité plongée) et d'éventuels problèmes liés à la stratification du mélange. Le contrôle de la

TRIMIX : 70 mètres / 25 min

Mélange Fond (MF) = % O₂ / % He / % N₂

	NOAA ⁽¹⁾ MF = 18/50/32	CX 04 ⁽²⁾ MF = 18/41/41	Corailleurs ⁽³⁾ MF = 18/15/67
Remontée (MF)	2 min (V = 18 m/min)	5 min (V = 10 m/min)	6 min (V = 8 m/min)
Paliers			
33 m	1 (nitrox 36/64)	-	-
30	2	-	-
27	2	-	-
24	2	2 (nitrox 40/60)	-
21	2	2	8 (MF/Air)
18	2	4	8
15	5	5	9
12	6	6	12 (O ₂)
9	16	12	12
6	13 (O ₂)	15 (O ₂)	21
3	25	33	34
Total décomp.	78 min (1 h 18)	84 min (1 h 24)	110 min (1 h 50)

Tableau I. Comparaison des tables de décompression

⁽¹⁾ National Oceanic and Atmospheric Administration – U.S. Department of Commerce (1998)

⁽²⁾ COMEX 2004 / Contrat DGA 98.383

⁽³⁾ Décret Ministère des Pêches et de l'Agriculture (22/12/1995) et Doris 1977

TRIMIX : 80 mètres / 10 min

Mélange Fond (MF) = % O₂ / % He / % N₂

	Decoplander MF = 18/38/44 ⁽¹⁾	MN 78 MF = 18/41/41 ⁽²⁾	CX 04 MF = 18/41/41 ⁽³⁾	Corailleurs MF = 15/30/55 ⁽⁴⁾
Remontée (MF)	5 min (V = 10 m/min)	5 min (V = 15 m/min)	6 min (V = 10 m/min)	7 min (V = 9 m/min)
Paliers				
33 m	1 min	-	-	-
30	1 (nitrox 40/60)	-	-	-
27	1	-	-	-
24	1	-	-	-
21	1	-	-	-
18	1	-	2 (nitrox 40/60)	4 (MF/Air)
15	1	-	2	5
12	2	4 min (O ₂)	3	8 (O ₂)
9	4	4	5	8
6	13 (O ₂)	4	6 (O ₂)	11
3	-	13	11	18
Total décomp.	31 min	30 min	35 min	61 min

Tableau II. Comparaison des tables de décompression

⁽¹⁾ Décompression planner (source internet)

⁽²⁾ Marine Nationale française MN78 (1978)

⁽³⁾ COMEX 2004 / Contrat DGA 98.383

⁽⁴⁾ Décret Ministère des Pêches et de l'Agriculture (22/12/1995) et Doris 1977.

composition exacte du TRIMIX devra cependant être refait avant utilisation.

L'ORGANISATION DE LA PLONGEE

C'est un point capital de la sécurité en plongée profonde :

- organisation des palanquées par équipe de deux plongeurs de même niveau ayant les certificats requis pour ce type de plongée (y compris l'aptitude médicale)
- disposition d'un pendeur, indispensable pour les longs paliers de décompression où sont fixées les réserves de gaz nécessaires à la décompression (voir tables de décompression)
- définition d'un planning très précis du déroulement de la plongée afin d'éviter toute improvisation
- mise en place d'une équipe de plongeurs secours et d'une procédure d'évacuation rapide vers le caisson hyperbare de recompression thérapeutique le plus proche.

CHOIX DE LA DECOMPRESSION

Pour la plongée TRIMIX profonde, les plongeurs disposent d'un choix très important de tables de décompression. Ils peuvent utiliser, soit les tables dont la provenance est bien identifiée et la sécurité vérifiée : Marine Nationale (MN 78), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Ministère des Pêches (Corailleurs 95) et COMEX (CX 04), soit les tables disponibles sur internet sans aucune garantie de sécurité : Decoplanner, ABYSS 150, ABYSS RGBM, ZHL-16, VPM, RGBM « full ».

Une étude comparative des profils de décompression donnés par ces différentes tables (tableaux I, II, III et IV) permet de tirer les commentaires suivants :

LA DUREE TOTALE DE LA DECOMPRESSION

Les décompressions les plus courtes sont celles données par les logiciels VPM, RGBM « full » et dans une moindre mesure par ZHL-16 et ABYSS RGBM (tableaux III et IV). Les durées moyennes sont celles des tables MN 78, NOAA, CX 04, Decoplanner et ABYSS 150 (tableaux I, II, III et

IV). Les tables Corailleurs / Doris sont les plus longues (tableaux I et II).

LE PROFIL DE LA DECOMPRESSION

Les vitesses de décompression les plus lentes jusqu'au premier palier (5 à 6 m/min) et/ou les paliers les plus profonds sont donnés par les tables VPM, ABYSS RGBM et RGBM « full » (tableaux III et IV). Or, ce sont aussi les décompressions les plus courtes. Ce type de profil « extrême » présente le risque d'une surcharge des « tissus » lents de l'organisme lors de la phase profonde de la décompression et ainsi d'augmenter fortement la production de bulles d'azote dans les heures qui suivent le retour en surface (contrat DGA 98.383). Une vitesse comprise entre 8 et 12 m/min semble plus appropriée (ou une vitesse plus rapide avec paliers profonds).

En fait, le profil de la décompression va dépendre du pourcentage d'hélium utilisé au fond et en décompression. Si celui-ci est supérieur à 40 %, le profil devra se rapprocher d'une table de décompression HELIOX (avec paliers profonds) mais sans raccourcissement exagéré des paliers près de la surface. L'azote, dans ce cas, ne dépassera pas les 30 %. De plus, le pourcentage d'azote utilisé dans les mélanges NITROX ou TRIMIX en décompression ne devra pas être supérieur à celui du mélange fond (risque de contre diffusion).

On sait, depuis les années 70, que les décompressions hélium sont plus sécurisantes que celles à l'azote. En effet, les bulles d'hélium produites lors de la remontée s'élimineraient mieux que les bulles d'azote et seraient moins pathogènes (Bennett et Elliott, 1993).

L'OXYGENE

L'oxygène utilisé au fond sera adapté en fonction de la profondeur maximale atteinte en limitant la PO₂ à 1,4 b (soit 16 % à 80 m.). Pour optimiser le temps de décompression, on utilisera un ou deux mélanges suroxygénés, répartis judicieusement en limitant la PO₂ à 1,6 b maximum (tableaux I, II et IV). On évitera les variations brutales de PO₂ au cours de la décompression pour s'orienter vers des décompressions à PO₂ constante (1, 3b).

RECOMMANDATIONS

TRIMIX : 85 mètres / 15 min

Mélange Fond (MF) = % O₂ / % He / % N₂

	RGBM « full » MF = 16/42/42 ⁽¹⁾	ZHL – 16 MF = 16/42/42 ⁽²⁾	CX 04 MF = 16/42/42 ⁽³⁾	ABYSS 150 MF = 16/42/42 ⁽⁴⁾	Corailleurs MF = 15/30/55 ⁽⁵⁾
Remontée (MF)	7,5 min V = 6 m/min	3 min V = 18 m/min	6 min V = 10 m/min	2 min V = 20 m/min	5 min V = 10 m/min
42 m	-	-	-	1	-
39	1 min (air)	- (air)	- (air)	1 (air)	-
36	0,5	-	-	1	1
33	0,5	-	-	1	1
30	1	1	-	2	4
27	1,5	2	1	2	6
24	1,5	1	2	3	6
21	2	3	3	4	7
18	2	4	4	6	12
15	3	5	5	7	18
12	4	8	9	12	12 (O ₂)
9	6	13	14	18	17
6	4,5 (O ₂)	13 (O ₂)	13 (O ₂)	18 (O ₂)	27
3	8	24	31	36	33
Total décomp.	43 min	77 min (1 h 17)	88 min (1 h 28)	114 min (1 h 54)	149 min (2 h 29)

Tableau III. Comparaison des tables de décompression

⁽¹⁾ Reduce Gradient Bubble Model (RGBM – internet)

⁽²⁾ ZHL-16 (BUHLMAN)

⁽³⁾ COMEX 2004 / Contrat DGA 98.383

⁽⁴⁾ ABYSS 150 (internet)

⁽⁵⁾ Décret Ministère des Pêches et de l'Agriculture (22/12/1995) et Doris 1977

TRIMIX : 90 mètres / 20 min

Mélange Fond (MF) = % O₂ / % He / % N₂

	VPM MF=14/50/36 (1)	ABYSS RGBM MF=14/50/36 (2)	ZHL-16 MF=14/50/36 (3)	CX 04 MF=14/50/36 (4)	ABYSS 150 MF=14/50/36 (5)
Remontée (MF)	5 min V = 5 m/min	5 min V = 5 m/min	5 min V = 8 m/min	6 min V = 10 m/min	5 min V = 10 m/min
66 (MF)	1	0,5	-	-	-
63	1	0,5	-	-	-
60	1	0,5	-	-	-
57	1	1	-	-	-
54	1	1	-	-	-
51	1	1	-	-	-
48	2	1,5	2	-	-
45	2	2	2	-	-
42	2	2,5	2	-	1
39	3	3	2	-	2
36	3	3,5	2	-	3
33	4	3,5	2	1	4
30 (nitrox 40/60)	5	1,5	2	2	3
27	1	2,5	2	2	3
24	1	2,5	2	3	4
21	3	3	4	3	6
18	4	3	4	5	8
15	5	7,5	6	6	10
12	6	8,5	9	10	15
9	10	13	12	16	23
6 (O ₂)	22	35	44	67	76
3	-	-	-	-	-
Total	84 min	102 min	102 min	121 min	160 min
Décomp.	(1 h 24)	(1 h 42)	(1 h 42)	(2 h 01)	(2 h 40)

Tableau IV. Comparaison des tables de décompression

(1) Varying Permeability Model VPM (internet)

(2) ABYSS – Reduced Gradient Bubble Model (RGBM-internet)

(3) ZHL-16 (BUHLMAN)

(4) COMEX 2004 / contrat DGA 98.383

(5) ABYSS 150 (internet)

FACTEURS DE RISQUES D'ACCIDENTS DE DECOMPRESSION (ADD)

FACTEURS INDIVIDUELS	FACTEURS LIES A LA PLONGEE
① Age (> 40 ans)	① Profondeur / durée trop importante (plongée saturante)
② Poids – masse grasse excessive	② Répétitivité excessive (+ de 2 plongées/jour), profil « yoyo », altitude
③ Mauvaise forme physique	③ Vitesse de remontée > 15 m/min (sans palier intermédiaire)
④ Antécédents de traumatismes, de maladie grave, ADD, présence d'un FOP	④ Fatigue avant la plongée (voyage, stress psychologique, déshydratation, hypoglycémie etc...)
⑤ Longue pratique de la plongée (> 10 ans)	⑤ Effort / froid / stress psy pendant la plongée
⑥ Mauvaise hygiène de vie, prise de médicament, alcool, tabac, alimentation trop riche en protéines	⑥ Effort / fatigue après la plongée (apnée, déshydratation, hypoglycémie, choc thermique etc...)
⑦ Perte du conditionnement due à la non répétition des plongées (plongée précédente depuis plus de 3 jours)	

Tableau V

Il existe une très grande dispersion dans les tables de décompression TRIMIX (plus de 100 % du temps). Il est donc nécessaire d'observer une très grande prudence vis-à-vis de l'utilisation des tables les plus courtes (VPM, RGBM « full » et ABYSS RGBM) surtout que celles-ci ne présentent pas le meilleur profil (trop lent au départ de la remontée et trop rapide près de la surface).

Les tables de décompression qui semblent présenter le meilleur compromis entre la sécurité et la durée sont à recommander : MN 78, NOAA, CX 04, Decoplaner, ZHL-16.

Dans tous les cas, on limitera la plongée loisirs TRIMIX courante à 70 m/20 min - 80 m/15 min et à 90 m/20 min exceptionnellement (les tables des tableaux I, III et IV ne sont données ici qu'à titre indicatif).

Au-delà, on sort de la plongée TRIMIX loisirs, pratiquée par des amateurs, pour rentrer dans la plongée HELIOX professionnelle soumise à la Réglementation du Travail de 1992 (Journal Officiel 1992).

PREVENTION DES RISQUES INDIVIDUELS DES ACCIDENTS DE DECOMPRESSION (ADD)

La plongée profonde nécessite, pour être pratiquée en toute sécurité, non seulement du bon matériel, une bonne organisation, de bonnes procédures de décompression, mais aussi l'application de règles simples de prévention du risque. En plongée, il existe plusieurs facteurs de risques liés à l'individu et aux conditions de plongée (environnement). Sur le tableau V, les facteurs de risques les mieux identifiés jusqu'à présent ont été listés (7 facteurs

individuels et 6 facteurs environnementaux).

Il conviendra au plongeur d'identifier ses propres facteurs de risques et ceux liés à la plongée qu'il désire réaliser. On peut considérer que le plongeur loisirs restera en sécurité s'il n'en cumule pas plus de 6 au total. Si avant la plongée il cumule déjà 3 à 5 facteurs de risques individuels, il devra être d'autant plus prudent pour réaliser sa plongée. Cette présentation synthétique permet de faire prendre conscience au plongeur des risques d'ADD encourus avant d'aborder la plongée profonde. De plus, il peut agir sur sa condition physique et sur sa manière de plonger afin de limiter ces risques. En outre, le plongeur TEK, à sa sortie de l'eau, pourra évaluer sa marge de sécurité par l'analyse des bulles circulantes au moyen de la détection ultrasonore doppler.

REFERENCES

Bennett PB, Elliott DH. The physiology and medicine of diving. WB Saunders Company Ltd Editor, Fourth Edition, 1993.

Journal Officiel de la République Française. Travaux en milieu hyperbare. Mesures particulières de Prévention. Editions Direction des Journaux Officiels, Paris, juin 1992.

Juvenspan H, Thomas C. Plonger aux mélanges. Editions « Eau noire », 1992.

NOAA Diving Manual. Diving for Science and Technology. US Department of Commerce. JT Joiner Editor, fourth Edition, 2001.

Vettier J. Plongée technique, Nitrox, Trimix. Editions Eugen ULMER, 2004.

RESUME

Pour une décompression sécurisée en plongée autonome profonde. B Gardette, M Hugon, FM Galland. Bull. Medsubhyp. 2005, 15 (Suppl.): 93 - 100. La plongée « Tek-loisirs » est de plus en plus pratiquée à l'étranger et en France. Elle concerne la zone de profondeur au-delà des 40 mètres. Le mélange gazeux respiratoire est composé d'oxygène, d'azote et d'hélium (Trimix) dont la composition va varier en fonction de la profondeur. Plus la profondeur augmente, plus le pourcentage d'oxygène dans le mélange va diminuer pour limiter le risque hyperoxique ($PO_2 \leq 1,3 - 1,4$ b) et plus l'azote est remplacé par de l'hélium en vue de limiter la narcose (PN_2 compris entre 3 et 5b). La plongée autonome profonde nécessite des compétences techniques spécifiques qui doivent être acquises par le plongeur au cours de stages organisés dans des structures qualifiées. La difficulté est dans le choix des procédures de décompression, compte tenu de la grande variabilité des tables actuellement disponibles via internet. COMEX, suite à une étude de validation menée par la Marine Nationale sur les tables Air profondes MN90 et Trimix MN78 (1999-2003) dispose désormais de tables Trimix pour la zone 50-90 m (maxi 20 min). Celles-ci répondent aux critères de sécurité réactualisés : absence de symptôme et moins de 50 % des plongeurs présentant un degré 3 de bulle au mouvement. Au-delà de 90 mètres et pour des durées au fond dépassant 20 min, la plongée HélioX est fortement recommandée suivant la réglementation du Ministère du Travail (MT92). De plus, le plongeur profond doit pouvoir identifier non seulement les facteurs de risque liés à la plongée mais également ses propres facteurs de risque en décompression. La détection Doppler des bulles circulantes après plongées profondes permet facilement une telle évaluation.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

MANUSCRIT:

Le manuscrit soumis pour publication sera adressé, au Secrétaire de la Société (Dr. B. DELAFOSSE, Hôpital Edouard Herriot, 69437 Lyon cedex 03 - medsubhyp@wanadoo.fr) ou à l'Editeur du Bulletin (Dr JC ROSTAIN - Physiopathologie et Action Thérapeutique des Gaz Sous Pression - UPRES - EA 3280 - Faculté de Médecine Nord - 13916 Marseille Cedex 20 - rostain.jc@jean-roche.univ-mrs.fr), en triple exemplaire, y compris les tableaux, figures, annexes et résumés (total de 9 pages maximum, sauf accord préalable). Il est demandé d'utiliser des imprimantes à jet d'encre ou laser et enregistré sur une disquette au format Word (.doc) pour PC. L'envoi par courrier électronique en document joint au format Word PC est à privilégier.

Le texte sera écrit en français, en Times New Roman 12, simple interligne, texte justifié, début de paragraphe sans retrait, saut d'une ligne entre chaque paragraphe. Les pages seront numérotées de 1 à 9 dès la page de titre (pagination automatique Word). Les titres seront précédés et suivis d'un saut de ligne. Pas de ponctuation en fin de titre.

Eviter les caractères italiques et les soulèvements. Seules les abréviations internationales connues peuvent être utilisées. En ce qui concerne les signes peu courants, il faudra signaler leur justification, entre parenthèses, la première fois qu'ils apparaîtront dans le texte.

Un bref résumé de l'article en français et en anglais avec son titre sera joint au manuscrit (150 mots ou 1000 caractères espaces compris pour chacun des résumés).

Chaque manuscrit devra comporter :

- les noms exacts et les prénoms des auteurs, ainsi que leurs adresses complètes avec l'e-mail du premier auteur
- le nom et l'adresse de l'hôpital, du centre ou de l'institut où a été réalisé le travail, une introduction, les matériels et méthodes, les résultats, une discussion, une conclusion et les références.

REFERENCES:

Les citations dans le texte se feront entre parenthèses de la façon suivante :

- 1 auteur : (Bennett 1975)
- 2 auteurs : (Rostain et Naquet 1974)
- 3 auteurs et plus : (Brauer et coll. 1974)

Les références bibliographiques seront présentées par ordre alphabétique :

- pour un mémoire : 1/ le nom des auteurs et les initiales de leurs prénoms ; 2/ le titre intégral du mémoire dans la langue originale ; 3/ le nom du journal (abrégé selon les normes internationales) ; 4/ l'année de parution ; 5/ le tome ; 6/ la première et la dernière page
- pour un livre : 1/ le nom des auteurs et les initiales de leurs prénoms ; 2/ le titre de l'ouvrage ; 3/ le numéro d'édition à partir de la seconde édition ; 4/ le nom de la maison d'édition ; 5/ la ville ; 6/ l'année de parution ; 7/ le nombre de pages
- pour un article dans un livre : 1/ le nom des auteurs et les initiales de leurs prénoms ; 2/ le titre intégral de l'article ; 3/ le nom de l'éditeur ; 4/ le titre de l'ouvrage ; 5/ le numéro d'édition à partir de la seconde édition ; 6/ le nom de la maison d'édition ; 7/ la ville ; 8/ l'année de parution ; 9/ le nombre de pages

Exemples

REVUE :

Rostain JC, Gardette B, Naquet R. Effects of exponential compression curves with nitrogen injection in man. *J. Appl. Physiol.* 1987, 63 : 421-425.

LIVRE :

Jannasch HW, Marquis RE, Zimmerman AM, **editors**. Current perspectives in High Pressure Biology. Academic Press, London. 1987, 341 p.

ARTICLE DANS UN LIVRE :

Rostain JC, Lemaire C, Naquet R. Deep diving, neurological problems. *In* : P. Dejours, **editor**. Comparative physiology of environmental adaptations. Karger, Basel. 1987, p 38-47.

ILLUSTRATIONS:

Ne fournir que des photographies sur papier, des figures et schémas aux dimensions prévues pour la publication. Tenir compte du degré de réduction avant de fixer la dimension des lettres figurant sur le dessin.

Les schémas et illustrations seront numérotés en chiffres arabes. Les tableaux seront notés en chiffres romains. En ce qui concerne la radiologie, ne fournir que d'excellents tirages sur papier.

Dactylographier sur une feuille à part les légendes des figures.

TIRES-A-PART:

Les tirés-à-part sont à la charge des auteurs et doivent être impérativement commandés au moment de la remise du bon à tirer des épreuves.

SOMMAIRE

- RECHERCHE DE BULLES ARTERIELLES CEREBRALES APRES PLONGEE A L' AIR CHEZ L' HOMME. RELATION AVEC LE SHUNT DROITE-GAUCHE ET LA CHARGE EN BULLES VEINEUSES CIRCULANTES.
JE BLATTEAU, M HUGON, FM GALLAND. 65- 69.
- SUPERIORITE DU DOPPLER PULSE PAR RAPPORT AU DOPPLER CONTINU DUG POUR LA RECHERCHE DE BULLES CIRCULANTES EN DECOMPRESSION HUMAINE;
ETUDE DOPPLER COMPARATIVE DE 240 DETECTIONS PRECORDIALES APPARIEES A L' OCCASION DE 60 PLONGEES.
J-E BLATTEAU, M HUGON, FM GALLAND. 71 - 75.
- BILAN DE 12 ANNEES D' UTILISATION DE LA TABLE DE DECOMPRESSION MN 90 PAR LA MARINE NATIONALE : ANALYSE RETROSPECTIVE DE 61 ACCIDENTS DE DESATURATION.
JE BLATTEAU, JM GUIGUES, M HUGON, FM GALLAND. 77 – 84.
- PROTOCOLES DE DECOMPRESSION POUR LA PLONGEE A L' AIR INTEGRANT DES PALIERS PROFONDS ; ETUDE DOPPLER COMPARATIVE AVEC LES PROCEDURES DE LA MARINE FRANÇAISE.
JE BLATTEAU, M HUGON, B GARDETTE, FM GALLAND. 85 - 91.
- POUR UNE DECOMPRESSION SECURISEE EN PLONGEE AUTONOME PROFONDE.
B GARDETTE, M HUGON, FM GALLAND. 93 - 100.

BULLETIN de MEDECINE SUBAQUATIQUE et HYPERBARE
2005. Tome 15. Supplément

Dépôt légal : 20 mars 2006

ISSN 1248 - 2846

Responsable de la rédaction
B. Delafosse,

Directeur de la publication
J.C. Rostain

Imprimeur
Pronto Offset, 22 Chem. St Jean du Desert, 13005 Marseille

Editeur
Société de physiologie et de médecine subaquatiques et hyperbares
de langue française
Centre Hyperbare, CHU de Sainte Marguerite
270 Bd de Ste Marguerite
13274 Marseille cedex 09

Date de publication : décembre 2006