

BULLETIN de MEDECINE SUBAQUATIQUE et HYPERBARE

**2022. Tome 32.
Numéro 1**

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



REVUE SEMESTRIELLE

Date de publication : septembre 2022

**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)

Pr. A. APPAIX (1972-1976)

Dr. R. RISPE (1976-1979)

Dr. B. BROUSSOLLE (1979-1982)

Pr. J. CORRIOL (1982-1985)

Pr. Ph. OHRESSER (1985-1988)

Dr. Ph. CAVENEL (1988-1991)

Dr. J.C. ROSTAIN (1991-1994)

Pr. F. WATTEL (1994-1997)

Pr J.M. SAINTY (1997-2000)

Dr J.L. MELIET (2000-2003)

BUREAU DE LA SOCIETE EN 2022

Président: COULANGE, M

Vice Présidents : GEMPP, E.

LOUGE, P.

Secrétaire général : RIU POULENC, B

Secrétaire adjoint : JOFFRE, T

Trésorier : COURAUD, F.

Trésorier adjoint : PARMENTIER, E.

Administrateurs : ALBERTNI J-J.

BLATTEAU, J-E.

CARRARO, J-C.

D'ANDREA, C.

LACHAIZE, A.

LUIS, D.

PIGNEL, R.

POUSSARD, J.

CONSEIL SCIENTIFIQUE

Coordinateur : MELIET, J.L.

Conseillers : BOET, S.

CASTAGNA, O.

DUCASSE, J-L.

LETELLIER, P.

ROSTAIN, J.C.

WILLEM, C.

Membres de droit COULANGE, M.

Président

BLATTEAU, J-E.

DEMAISTRE, S.

GUERERO, F.

LUCIANI, M.

WENDLING, J.

REGNARD J.

Président sortant

Secrétariat : Dr. RIU POULENC, B.

secretaire@medsubhyp.fr

BULLETIN de MEDECINE SUBAQUATIQUE et HYPERBARE
2022. Tome 32 Numéro 1.

Dépôt légal : 28 avril 2022
3448 6781®

ISSN 1248 - 2846

Responsable de la rédaction
B. Riu

Directeur de la publication
J.C. Rostain

Imprimeur
Pronto Offset/Sud Graphic, 22 Chem. St Jean du Désert, 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 : octobre 2022

TABLE DE CONVERSION DES UNITES DE PRESSION

L'unité de mesure de la pression définie par le système international des unités de mesure est le Pascal (Pa). Cependant si le sujet de l'article rend l'utilisation du Pascal inappropriée, les unités telles que ATA, atm, bar, mmHg, mètres d'eau de mer sont acceptées à condition de mettre entre parenthèses la conversion en Pa, hPa, kPa ou MPa lors de la première apparition dans le texte.

1 atm = 1,013250 bar	1 bar = 100 000 Pa
1 atm = 10,13 m	1 bar = 100,000 kPa
1 atm = 101,3250 kPa	1 MPa = 10,000 bar
1 bar = 10 m	1 m = 75,01 torr
1 atm = 14,6959 psi	1 bar = 750,064 torr
1 m = 10,00 kPa	1 psi = 6 894,76 Pa
1 atm = 760,00 torr	1 torr = 133,322 Pa
1 m = 1,450 psi	1 bar = 760 mmHG

Extrait de : Standard Practice for Use of the International System of Units (SI). Doc. E380-89a. Phila., PA: Am. Soc. for Testing and Materials, 1989.

NOUVELLE PROCEDURE DE DECOMPRESSION POUR LES TRAVAUX HYPERBARES EN ALTITUDE

J-C. LE PECHON. JCLP Hyperbarie, 94, rue de Buzenval, 75020 Paris (France).

ABSTRACT

New decompression procedure for hyperbaric works at altitude. JC Le Péchon. Bull MEDSUBHYP 2022, (1) : 01 – 06. To carry out works at altitude, decompressions are often limited to a few pressures and a few working times to satisfy the site needs. Hyperbaric exposures to altitude imply correction of decompression profiles although gas load at the end of exposure at altitude is less than for the same exposure from sea level. Standard correction using the pressures ratio is not always exact and leads to too large increase in decompression times in particular when using Nitrox or Trimix for high pressures. A new method calculating all profiles in absolute pressures is explained that leads to deeper stops and an extra stop from 1 bar(a) to local atmospheric pressure without modification of the first part of standard decompression. Several works (diving and compressed air) have been performed on this basis with no decompression problems.

Lors de la réalisation de travaux hyperbares, subaquatiques ou en air comprimé, à une altitude significative, le besoin de procédures de décompression adaptées ne concerne souvent qu'une seule profondeur ou pression, et les quelques durées de travail nécessaires sont limitées à la durée sans palier et la durée la plus longue à mettre en œuvre. Aussi il n'y a pas besoin d'un jeu de tables exhaustif. Ces quelques procédures peuvent être établies spécifiquement.

RAPPEL SUR LA PLONGEE EN ALTITUDE

Notre courbe de référence pour la pression atmosphérique et l'altitude est celle de l'Agence Spatiale Européenne (ESA 1992), quelques valeurs remarquables sont présentées dans le Tableau 1.

Altitude en mètres	Pression en bar _(a)	Remarque
0	1,013	Niveau de la mer
2000	0,800	Cabine des avions
4517	0,580	Pression au Lac Chungara
5500	0,500	½ pression standard

La loi de Dalton, bien connue des plongeurs, précise que lorsque la pression totale diminue, les pressions partielles des constituants d'un mélange (ici l'air) diminuent. Il en résulte que la pression partielle de l'oxygène (PO₂) diminue avec l'altitude. Le poumon, zone d'échange entre l'oxygène de l'air et l'organisme voit donc aussi sa pression partielle d'oxygène alvéolaire (PAO₂) diminuer lorsque l'homme s'aventure en montagne. C'est l'air alvéolaire qui conditionne l'apport d'oxygène mais aussi

celui de l'azote lorsqu'il s'agit d'hyperbarie. Ces deux pressions partielles (PAO₂ et PAN₂) sont donc essentielles pour les interventions hyperbares en altitude.

GAZ ALVEOLAIRES EN ALTITUDE

Les gaz alvéolaires : oxygène, azote, gaz carbonique et vapeur d'eau se partagent le volume pulmonaire disponible selon la loi de Dalton. Parmi leurs pressions partielles deux sont constantes et ne dépendent pas de la pression totale ce qui a pour conséquences que l'hypoxie alvéolaire est beaucoup plus sévère que celle de l'air ambiant et la pression alvéolaire d'azote est aussi inférieure à celle de l'air ambiant :

- La pression partielle de vapeur d'eau (PAH₂O) est celle de la tension de vapeur saturante à 37 °C soit 62 hPa (0,062 bar)
- La pression partielle de gaz carbonique (PACO₂) correspond à l'élimination de ce gaz en remplacement de l'oxygène consommé par le métabolisme. Cette substitution se fait molécule pour molécule si le quotient respiratoire est de 1 et donc PACO₂ varie peu avec les conditions ambiantes et reste voisin de 53 hPa (0,053 bar), en respiration normale.

PARADOXE : LA PLONGEE EN ALTITUDE

Du fait de cette baisse des pressions partielles d'azote et d'oxygène notamment alvéolaires, après un séjour en altitude de plus de 24 heures, la quantité d'azote dissous est équilibrée avec la nouvelle pression partielle alvéolaire et donc la tension d'azote dissous dans le corps a diminué. En

ne prenant en compte que la pression d'azote ambiante la quantité d'azote absorbée dans un compartiment pour une plongée donnée de dépend pas de l'altitude.

En effet et à titre d'exemple, à 2000 m d'altitude

($P = 0,8 \text{ bar}_{(a)}$) la valeur d'azote initial est :

$$0,79 \times 0,8 = 0,63 \text{ bar}$$

et en plongée à 22 m (2,2 bars) P_{N_2} pression partielle d'azote inspirée est :

$$P_{N_2} (2000 \text{ m}) = (2,2 + 0,8) \times 0,79 = 2,37 \text{ bars}$$

Gradient d'azote à 2000 m :

$$2,37 - (0,63) = 1,74 \text{ bar}$$

Gradient au niveau de la mer :

$$(2,2 + 1) \times 0,79 - (0,79 \times 1) = 1,74 \text{ bar}$$

Cependant à la fin d'une plongée à la même profondeur et de même durée en altitude et en mer, la tension d'azote dissous est plus grande pour la plongée en mer du fait que la valeur initiale de tension d'azote est plus élevée (figure 1).

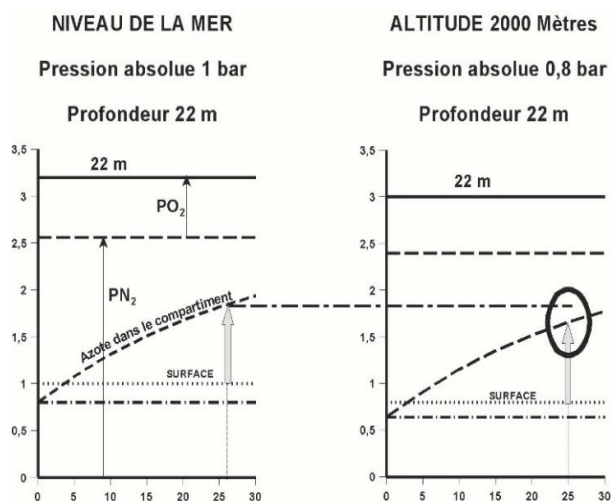


Figure 1 : Paradoxe de la plongée en altitude

Ceci est paradoxal car chacun sait que les décompressions après une plongée en altitude doivent être plus longues pour une même plongée qui aurait lieu au niveau de la mer. Cela provient du fait que si le plongeur d'altitude procède à la même décompression qu'en mer, lorsqu'il revient à la pression absolue de 1 bar_(a) (surface au niveau de la mer) il est encore en immersion, par exemple à 2 m si la plongée a eu lieu dans ce lac à 2000 m. Il lui reste donc un complément de décompression nécessaire avant de pouvoir rejoindre la surface du lac.

De plus, jusqu'à 1 bar_(a) il bénéficie d'un bonus de sécurité puisqu'il présente une quantité de gaz dissoute moindre que le plongeur en mer qui émergerait après une plongée à même profondeur et même durée et ce d'autant plus que

l'altitude est grande et que l'on tiendrait compte des pressions alvéolaires d'azote pour les calculs.

Il y a donc lieu d'adapter les procédures de décompression après des séjours hyperbares effectués en altitude. Plusieurs solutions ont été apportées à ce problème.

PROCEDURES DE PLONGEE EN ALTITUDE

Procédure de la Marine Nationale Française

La méthode de la Marine Nationale (Taillez et al. 1957), qui, publiée plus tard et indépendamment par Cross (Cross 1973), consiste à calculer une profondeur fictive supérieure à celle de la plongée en lac dans le rapport des pressions atmosphériques normale et locale :

Profondeur fictive =

Profondeur réelle x 1 bar_(a) / pression locale lac.

Exemple pour 2000 m d'altitude et une plongée à 22 m, la profondeur fictive d'entrée dans la table est :

Profondeur fictive : $22 \times 1/0,8 = 27,5 \text{ m}$ donc table 30 m MT92.

La profondeur des paliers est calculée à l'inverse afin qu'ils soient observés un peu moins profonds dans le lac... et tous les calculs d'intervention successive en conséquence...

Cette méthode est exacte seulement si les sursaturations maximum admissibles sont proportionnelles à la pression. C'est bien le cas des tables MN 90 (coefficient de saturation critique) mais pas des M values de type Workman ou Bühlmann (Workman 1965, Bühlmann 1983).

Ministère du travail MT 92

Pour les mêmes raisons de simplicité, mais sans que cela soit exact, le Ministère du Travail (Décret 1990) a adopté le rapport des pressions pour calculer une profondeur fictive bien que les valeurs de sursaturation utilisées pour les calculs, ne soient pas proportionnelles à la pression et sans toutes fois modifier les vitesses de remontée ni la profondeur des paliers.

Procédure selon Bühlmann

Bühlmann travaillait à Zurich pour les plongeurs suisses et donc était toujours concerné par l'altitude, il a calculé un jeu de table complet prenant en compte l'altitude par tranches successives, et en partant des pressions partielles alvéolaires d'azote (Bühlmann 1988).

Son découpage comporte 4 zones : 0-700m, 700-1500 m, 1500-2500 m et 2500-3500 m.

Il a organisé une expédition au Lac Titicaca (3800 m) pour valider la zone de haute altitude.

Les ordinateurs de plongée

Quelque soient les algorithmes implantés dans la majorité des ordinateurs, les capteurs de pression mesurent la pression ambiante absolue et donc les calculs tiennent automatiquement compte de la situation d'altitude et la décompression proposée est adaptée. L'affichage fournit des profondeurs de paliers multiples de 3 m. Pour les ascensions de courte durée, si l'ordinateur est en fonctionnement depuis le niveau de la mer, il peut aussi intégrer le temps d'équilibration de l'azote dissous à l'altitude.

LIMITES DE LA CORRECTION

Valeur limites de décompression

Les M values pour les pressions inférieures à 1 bar_(a) sont fixées par la même règle que pour les pressions supérieures à 1 bar_(a). Ces valeurs sont donc beaucoup plus tolérantes que celles qui résultent d'un coefficient de sursaturation type MN 90 et n'ont pas été validées pour les pressions inférieures à 1 bar_(a). La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre comment les sursaturations admissibles selon MN 90 (Méliet 1992) et Bühlmann (Bühlmann 1984) inversent leur facteur de sécurité en dessous de 1 bar_(a).

Le travail extensif de Egi et Brubakk (Egi et Brubakk 1995) adresse précisément cette question en comparant les valeurs de sursaturation admissibles aux pressions inférieures à 1 bar_(a). Valeurs linéaires type Workman, proportionnelles comme MN 90, ou autres qui tiendraient compte des volumes de gaz. Ils montrent en fait les limites de la correction standard qui est loin d'être satisfaisante pour la haute altitude. Ils insistent aussi sur les conditions particulières de la vie en altitude : azote résiduel à l'arrivée

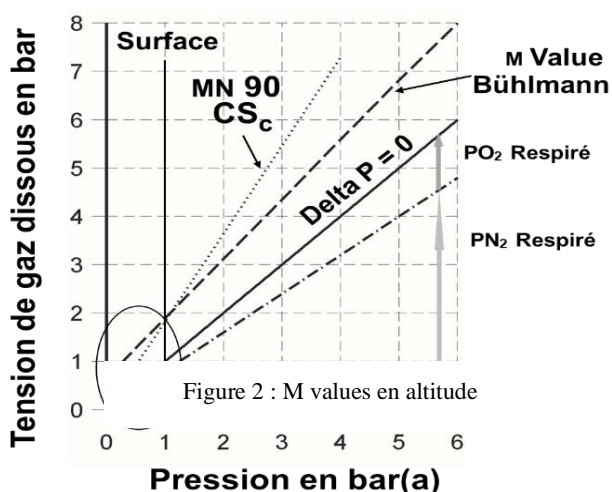


Figure 2 : M values en altitude

sur site, hypoxie, baisse de la fenêtre oxygène, adaptation.... qui sont des facteurs influençant

probablement la qualité des décompressions. Egi et Brubakk n'ont pas envisagé les mélanges suroxygénés ni les paliers à l'oxygène pourtant l'un et l'autre si recommandés pour ce type de plongée. Pour les interventions au sec en tunneliers les mélanges suroxygénés ne sont pas recommandés pour la période de travail du fait de devoir porter des masques et de l'augmentation du risque d'incendie qui pourrait résulter de fuites de masques dans l'environnement pressurisé.

Pour une expédition à 4919 m, Kot (Kot et al. 1995) a utilisé le calcul de la profondeur équivalente pour des plongées à 30 mètres au mélange sur-oxygéné (28%) avec palier à l'oxygène à $PO_2 = 1,6$ bar. Aucun symptôme de mauvaise décompression n'a été observé, mais avec plusieurs cas de niveau bullaire classé 3 chez un des 4 plongeurs. La durée des plongées en cause à 15 m et à 30 m n'est malheureusement pas indiquée !

Limites liées aux tables

De plus pour l'application de la correction dans le rapport des pressions, si la pression d'intervention est forte et en haute altitude, il n'existe pas de table à l'air validée pour les profondeurs équivalentes au-delà de 60 m. Pour des interventions à des pressions où l'air n'est plus utilisable (au-delà de 5 bars ou 50 m) des mélanges synthétiques s'imposent. Alors les pressions ou profondeurs équivalentes ne fonctionnent pas non plus car avec l'accroissement des profondeurs il faut parallèlement diminuer la teneur en oxygène des mélanges alors qu'en altitude c'est l'inverse, on peut utiliser des taux d'oxygène un peu plus élevés aux mêmes profondeurs.

TEMPS D'EQUILIBRATION EN ALTITUDE

Il est aussi nécessaire de prendre en compte depuis combien de temps l'hyperbariste est arrivé en altitude et le temps mis pour y parvenir, notamment pour les hautes altitudes. Pour ce faire l'US Navy (USN 2008) donne un tableau des « delta PN₂ » valeurs résiduelles d'azote selon l'altitude (pour une ascension instantanée comme un vol en hélicoptère amenant les plongeurs sur un site élevé !) à utiliser comme avec la procédure de plongée successive mais en prenant comme référence de profondeur la profondeur fictive équivalente ce qui est très pénalisant pour le calcul de la majoration et n'est pas justifié. En outre le processus d'équilibration ne se fait pas dans les conditions du niveau de la mer et dans un tel contexte la désaturation calculée comme pour une plongée successive classique n'est qu'approchée !

NOUVELLES CORRECTIONS

Principe directeur

Ces notions de profondeurs équivalentes ne sont donc pas une bonne solution, il est plus exact de se situer dans un champ de pressions absolues avec les vraies valeurs de pressions partielles si possibles alvéolaires. Du fait du bonus de la quantité moindre de gaz en fin d'intervention, on peut procéder à la décompression exactement comme en mer, mais en respectant les valeurs de pression absolue, donc en faisant des paliers s'ils sont requis à des pressions relatives supérieures aux valeurs habituelles. Lorsqu'il est permis de venir à 1 bar_(a), il reste à parcourir l'écart entre cette pression atmosphérique standard et la pression atmosphérique locale, ce qui implique de rallonger la décompression.

Cependant il est donc nécessaire de calculer la fin de la décompression entre 1 bar_(a) et la pression locale ou la surface. Cette nouvelle procédure n'est donc applicable que pour le cas de chantiers importants en altitude pour lesquels ce calcul supplémentaire s'intègre dans la préparation du projet (travaux subaquatiques ou en air comprimé...).

Pour la très haute altitude deux problèmes spécifiques sont liés, d'une part l'accroissement plus important du volume des bulles si elles se forment, et de l'hypoxie régnant à l'altitude du site et d'autre part au fait que les valeurs de sursaturation à appliquer en dessous de 1 bar_(a) ne sont pas connues et doivent donc être extrapolées à partir des données disponibles.

Utilisation du Nitrox en altitude

En altitude la plongée au Nitrox doit systématiquement être envisagée, elle permet pour un mélange donné d'accéder à une plus grande profondeur et permet une réduction importante des durées de décompression. Il est préférable de calculer une procédure de décompression sur le fondement des pressions absolues et de la valeur de la pression partielle effective d'azote pour éviter les effets de seuil qu'entraînent l'usage des tableaux précalculés et l'inexactitude des pressions ou profondeurs équivalentes. S'il s'agit de travaux subaquatiques (Mention A) la plongée au mélange sur-oxygéné au narguilé s'impose comme une évidence. Pour des plongées relevant de la Mention B en scaphandre autonome cela devrait se faire au recycleur pour éviter le transport et le transfert des stocks de mélanges.

Enfin les paliers à l'oxygène sont recommandés pour les plongées longues, et ils doivent être conduits aux profondeurs donnant PO₂ = 1,6 bar, donc plus profonds qu'en mer. Exemple dans un lac situé à 2000 m c'est à 8 m et non à 6 m comme en mer !

Exemples concrets

Expédition au Chili.

Les calculs ont été faits par Le Péchon (Le Péchon et al. 1994) pour une expédition conduite au lac Chungara

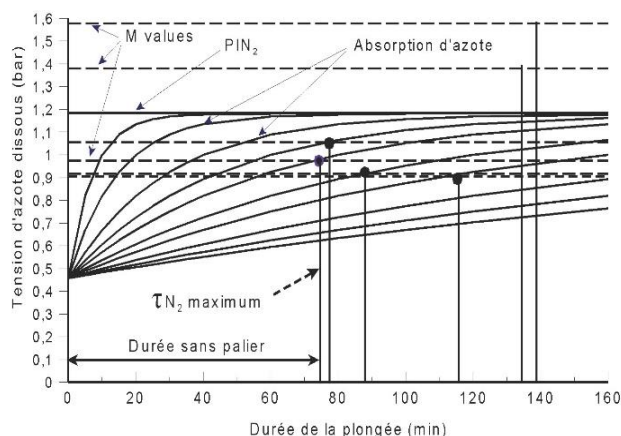


Figure 3 : Calcul d'une plongée sans palier

(Chili) à 4517 m d'altitude.

Pour chaque profondeur (20 m sur la figure 3) en utilisant la pression absolue réelle, la pression partielle d'azote exacte et la valeur initiale d'azote dissous, la charge de gaz est calculée pour chaque compartiment selon la profondeur et le temps (courbes exponentielles sur la figure 3). Pour cette expédition il s'agit de plongées Nitrox (PO₂ = 1,4 bar) avec un scaphandre semi-fermé SCANUBA (Le Péchon et Le Masson 1991). On recherche le temps de plongée pour atteindre dans chaque compartiment la valeur maximale d'azote dissous (M value référencée à la pression locale) pour revenir à la surface du lac (points circulaires sur la figure 3). Les valeurs de quantités maximales de gaz acceptables dans chaque compartiment permettant de revenir à la surface du lac (lignes horizontales figure 3) sont obtenues à partir des coefficients de sursaturation critiques de la Marine Nationale, choisis parce qu'ils sont plus restrictifs que les M values de Bühlmann pour les pressions inférieures à 1 bar_(a).

Le temps le plus court trouvé est de 78 minutes qui est le temps sans palier dans ces conditions.

Pour une plongée prévoyant un unique palier de 10 min. à 10 m et donc à PO₂ 1,58 bar, un calcul à rebours du temps le plus court pour pouvoir venir à 1,58 bar_(a) fixe la durée de cette plongée qui sera donc suivie d'un palier de 10 minutes à 10 m.

On dispose ainsi pour chaque profondeur réelle de deux procédures :

- Temps de plongée sans palier
- Temps de plongée avec un unique palier à l'oxygène pur à 10 mètres soit P = 1,58 bar_(a)

La comparaison de ce temps sans palier à celui obtenu par le calcul classique par profondeurs équivalentes :

Profondeur équivalente pour le Nitrox (PO₂ 1,4 b) à 20 mètres : $(3 - 1,4) / 0,79 = 2,02$ bars soit 10,2 m

Correction standard pour 4500 m : $10,2 \times 1 / 0,58 = 28$ m

Donc table MN 90 ou MT 92 pour 30 mètres, temps sans palier : 10 minutes !

Alors que le calcul en pression absolue donne 78 minutes ! Pour tenir compte des conditions de haute altitude, dont l'hypoxie après la sortie de l'eau, un facteur de sécurité a été prévu en réduisant ces durées de plongées sans palier de 10 %.

On comprend facilement que les calculs par profondeurs équivalentes, aussi bien pour l'aspect mélange sur-oxygéné que pour l'altitude, sont très loin d'être applicables dans ces conditions. Les résultats de ces plongées ont été publiés par ailleurs (Le Péchon et al 1994, Duvallet et al 1995).

Travaux en air comprimé et altitude

Un chantier de construction de tunnel à Johannesburg (Afrique du Sud) a eu recours à des travaux en air comprimé à des pressions jusqu'à 1,87 bar alors que l'altitude de la ville est de 1600 m ($P = 0,84$ bar_(a)).

Une procédure de décompression spéciale a été établie, à partir de la table « Tubiste MT 92 » mais transformée en pression absolue, donc avec une profondeur d'entrée diminuée et des paliers à des pressions plus élevées que si c'était au niveau de la mer et un unique palier à 1,3 bar_(a) pour les décompressions à l'air ou à 1,6 bar_(a) pour les décompressions à l'oxygène et rallongés pour tenir compte du supplément de décompression nécessaire.

De 0,8 bar à 1,87 bar : 174 décompressions ont été conduites, la durée d'intervention la plus longue à 1,8 bar a été de 3 heures. Une majorité des interventions a été réalisée avec les paliers à l'oxygène à PO₂ = 1,6 bar. Aucun cas de désaturation inadéquate n'a été observé.

Intervention au mélange ternaire - Projet pour un tunnel à Mexico

A Mexico dont l'altitude est de 2300 m ($P = 0,77$ bar_(a)), des travaux en air comprimé ont été envisagés jusqu'à une pression de 6 bars à effectuer au mélange héliox ou ternaire O₂-N₂-He.

Le calcul d'une correction standard donnerait une pression fictive d'entrée dans la table de 7,7 bars, or les tables tubistes MT 92 à l'air n'ont pas de table au-delà de 4,2 bars et ne fournissent pas de tables au mélange ternaire. Aussi il a été proposé une procédure calculée à partir des tables tubistes mélange ternaire de JCLP hyperbarie, recalculées en pressions absolues comme proposé ci-dessus. Ces procédures n'ont pas été retenues par le chantier et n'ont donc pas été validées par la pratique.

La très haute altitude

En très haute altitude s'ajoute la question du mal des montagnes qui, bien que l'immersion corrige immédiatement les symptômes par la suppression de la

cause hypoxique, doit être pris au sérieux en prévoyant le temps d'approche nécessaire à une acclimatation correcte (Böni 1976, Berney 2002, Buziaux 2019).

Après la plongée ou l'intervention, l'hypoxie d'altitude est un facteur potentiellement aggravant de l'accident de décompression éventuel. En outre il est probable que les secours pour une recompression précoce soient peu disponibles les structures souples prévues pour soulager le mal des montagnes ne sont évidemment pas adaptées. Ces deux facteurs exigent des précautions complémentaires.

OHB en altitude

Plusieurs villes (Denver Colorado (1600 m), Salt Lake City (1300 m) à Muray Utha (1300 m)) disposent d'un centre de médecine hyperbare aussi la question s'est posée de la transposition de procédures pour le personnel et pour les traitements dans ces conditions à (Bell et al. 2014).

Cela pose deux questions distinctes :

- Quelles pressions utiliser pour les traitements et assurer les PO₂ requises ? Il suffit donc d'accroître la pression barométrique des traitements pour obtenir la valeur de PO₂ souhaitée. Cette augmentation est égale à la différence entre la pression locale et 1 bar_(a).
- Quelles procédures de décompression pour le personnel accompagnant ? L'accroissement de pression relative, et la pression réduite en fin de décompression impliquent un risque significativement accru de problème de décompression. L'analyse de Bell et al. (2014) a abouti, après des considérations sur les pressions équivalentes, à simplement inclure des sessions de respiration d'oxygène pur pour les accompagnants vers la fin des traitements et de conserver cette respiration d'oxygène jusqu'au retour à la pression locale. Ceci à la satisfaction générale.

CONCLUSION

La méthode originale de correction des procédures de décompression après intervention hyperbare, que ce soit en plongée ou en air comprimé que nous avons imaginée et développée n'a pas pour vocation de faire changer les habitudes de la plongée occasionnelle en lac de montagne, mais de permettre aux entrepreneurs de travaux en situation d'altitude de calculer des procédures nouvelles permettant une productivité sauvegardée et une bonne approche en sécurité de ces décompressions particulières.

Souvent de telles opérations n'ont pas besoin de « tables » complexes avec des durées de 5 minutes en 5 minutes, car le temps de travail peut être choisi pour optimiser la production, ni non plus d'un échantillonnage de profondeurs ou de pressions échelonné par sauts de 3 m ou de 0,15 bar car la profondeur ou la pression du chantier est

souvent constante. Donc quelques calculs de durées d'intervention sans palier ou avec un seul palier fixe à

l'oxygène peut couvrir tous les besoins.

RÉFÉRENCES

- Bell J., Thoms P.A., Davidson W.J., Weaver L.K., (2014). Decompression tables for inside chamber attendants working at altitude. *Undersea Hyp. Med.* 41(6): p 505-513
- Berney J. Y., (2002) Plongée et très haute altitude, Mémoire DIU de Médecine Subaquatique et Hyperbare, 25 octobre 2002.
- Böni M., Schibli R., Nussberger P., Bühlmann A.A., (1976). Diving at diminished atmospheric pressure: Air decompression tables for different altitudes. *Undersea Biomed. Research* 3 (3) p 189-204.
- Bühlmann A.A. Decompression, Decompression sickness, Springer-Verlag, Berlin. 1984, 87 p.
- Buziaux L. (2019) Mémoire DESIU Médecine Hyperbare et Plongée, Marseille.
- Cross E.R. (1967). Decompression for high-altitude diving. *Skin Diver*. 16 (12): 60.
- Décret 90-277 du 28 Mars 1990 et arrêtés d'application*, Brochure 1636, Travaux en milieu hyperbare - Mesures particulières de prévention, Journal Officiel République Française, Edition Juin 1992. <http://www.sneti.fr/pdf/tables-ministere-du-travail.pdf>
- Duvallet A., Le Péchon J.Cl., Février A. (1995) Medical and physiological problems presented by dives with nitrox in high altitude (4517 m), IVth International Symposium on High Pressure Biology, La Seyne sur Mer; June 1995.
- Egi S.M., And Brubakk A.O., (1995) Diving at altitude: a review of decompression strategies. *Undersea Hyp. Med.* 22(3), p 281-300.
- ESA. *Atmosphere Quality Standard in Manned Space Vehicles*, ESA PSS 03 401. Issue 1, ESA Publications Division, ESTEC Noordwijk. 1992.
- Kot J., Sicko Z., Zyskowski M., Brajta M., (2014) Doppler recordings after diving to depth of 30 meters at high altitude of 4919 meters during Tilicho Lake Expedition 2007. *Undersea Hyp. Med.* 41(6). p 515-519.
- Le Pechon J.Cl. And Le Masson Y., (1991) New semi-closed Circuit UBA for Surface Supplied Dives, EUBS XVIIth Annual Meeting Proceedings, p. 521-526
- Le Péchon J.Cl., Duvallet A. Et Le Masson Y. (1994) High Altitude (4517 m) Nitrox Diving with semi-closed UBA (SCANUBA) EUBS XXth Scientific Annual Meeting, Proceedings, pp. 258-264
- Meliet J.L., (1991) Les tables de décompression pour plongées à l'air de la Marine Nationale en 1990 (Tables MN 90) Commission Médicale FFESSM, INFOMED n° 2 p. 1-16
- Taillez P., Dumas F., Alinat J., Perrimond-Touchet R., Cabarrou P., (1957). La Plongée. Editions Arthaud.
- U.S. Navy Diving Manual*, Revision 6. NAVSEA 0910-LP-106-0957. Naval Sea Systems Command: Washington, D.C., 2008. www.supsalv.org/00c3_publications.asp.)
- Workman R.D. (1965) Calculation of Decompression Schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives. Research report 6-65 US Navy Experimental Diving Unit Washington D.C.

RESUME

Nouvelle procédure de décompression pour les travaux hyperbares en altitude. JC Le Péchon. Bull MEDSUBHYP 2022, 22 (1) : 01 - 06. Pour conduire des travaux hyperbares (plongée ou air comprimé) en altitude le besoin de tables de décompression est souvent limité à quelques profondeurs et durées de travail. Ces expositions hyperbares en altitude requièrent une adaptation de la décompression bien que la charge de gaz en fin d'exposition soit moins élevée après celle effectuée en altitude. La correction standard dans le rapport inverse des pressions atmosphériques n'est pas toujours exacte et conduit à une augmentation des temps de décompression injustifié en particulier lorsque le mélange suroxygéné et les paliers à l'oxygène sont utilisés ou encore pour les pressions supérieures à 5 bars avec respiration de mélange ternaire. Une méthode nouvelle de calcul des décompressions fondée sur les pressions absolues et la pression partielle d'azote induit des paliers plus profonds qu'en mer et l'ajout de temps de palier pour aller de 1 bar(a) à la surface ou à la pression atmosphérique locale sans modification de la première partie de la table standard. Plusieurs opérations en plongée et en air comprimé ont été réalisées avec ces nouvelles procédures sans aucun signe de mauvaise désaturation.

EFFET DE L'EXPOSITION HYPERBARE SUR LES PARAMETRES MECANQUES ET ELECTRONIQUES DES DEFIBRILLATEURS AUTOMATIQUES IMPLANTABLES (DAI)

R. GUENNEUGUES^{1-2*}, A. HENCKES¹, V. MANSOURATI³, J. MANSOURATI³.
¹Service de Médecine Hyperbare et Subaquatique, Centre Hospitalier Universitaire de Brest, boulevard Tanguy Prigent, 29200 Brest, France. ²Département de Médecine d'Urgence, Centre Hospitalier Universitaire de Brest, boulevard Tanguy Prigent, 29200 Brest, France. ³Département de Cardiologie, Centre Hospitalier Universitaire de Brest, boulevard Tanguy Prigent, 29200 Brest, France

ABSTRACT

Effects of hyperbaric exposure on mechanical and electronic parameters of implantable cardioverter-defibrillators (ICDs). R Guenneugues, A Henckes, V Mansourati, J Mansourati. Bull. MEDSUBHYP, 2022, 32 (1): 07- 12.

Aims: There is currently no adequate assessment of the mechanical and electronic alterations of implantable cardioverter-defibrillators (ICD) in hyperbaric conditions. As a result, many patients eligible for hyperbaric oxygen therapy cannot benefit from this treatment if they are carrying an ICD, even in emergency situations. Hyperbaric oxygen therapy (HBOT) is the standard adjuvant treatment for life-threatening or disabling pathologies.

Methods: Twenty-two explanted ICDs of various brands and models were randomized into 2 groups: single hyperbaric exposure at an absolute pressure of 4,000 hPa and 30 iterative hyperbaric exposures at an absolute pressure of 4,000 hPa. Mechanical and electronic parameters of these ICDs were blindly assessed before, during and after hyperbaric exposures.

Results: None of the hyperbaric exposure caused any mechanical distortion, inappropriate occurrence of tachytherapies, dysfunction of tachyarrhythmias therapeutic programming, or dysfunction of programmed parameters.

Conclusion: Dry hyperbaric exposure appears harmless to ICDs tested ex-vivo. This result may lead to a reassessment of the absolute contraindication of emergency HBOT to patients carrying an ICD. A real-life study in patients with ICD receiving HBOT should be performed to assess their clinical and technical tolerance of the devices.

INTRODUCTION

Il existe différentes contre-indications relatives ou absolues à l'oxygénothérapie hyperbare (OHB). Les patients porteurs de dispositifs implantables non homologués pour l'utilisation en hyperbarie (hyperbaric device) sont généralement récusés pour l'accès à l'OHB en raison de l'absence de données satisfaisantes quant au risque de dysfonctionnement du dispositif sous l'effet de la pression ce qui serait alors préjudiciable pour le patient.

Certaines indications de l'OHB concernent des pathologies aiguës engageant le pronostic vital ou fonctionnel, notamment l'intoxication au monoxyde de carbone, la fasciite nécrosante et l'embolie gazeuse iatrogène. D'autres indications concernent des pathologies chroniques comme les ulcères artériels ou les lésions de pied diabétique et donc particulièrement des patients avec facteurs de risque cardiovasculaire et des cardiopathies sous-jacentes (Mathieu et coll. 2017).

En rythmologie cardiaque et notamment pour les

cardiopathies ischémiques ou rythmiques à haut risque de trouble de conduction ou de trouble du rythme pouvant engager le pronostic vital, les patients peuvent bénéficier de dispositifs implantables à type de Pacemaker (PM) ou Défibrillateur Automatique Implantable (DAI).

A ce jour, des études évaluant les effets de l'hyperbarie sur les dispositifs implantables cardiaques n'ont été publiées que pour les PM (Kratz et coll. 1983, Wonhas et Wonhas-Thiele. 1999). Les travaux réalisés par Lafay et Trigano avaient évalué les altérations fonctionnelles électroniques et les déformations des boîtiers de PM au décours de compressions à 4000 et 7000 hPa. Ils décrivaient une absence de déformation après exposition à 4000 hPa et une déformation minimale à 7000 hPa. Aucune dysfonction de stimulation des PM n'avait été observée après exposition à 4000 ou 7000 hPa. Par ailleurs, aucune altération des sondes, ni du connecteur de sonde n'était observée (Lafay et Coll. 2008, Trigano et coll. 2006).

Pour les DAI il n'existe que très peu de données

publiées à propos des effets de l'exposition hyperbare, particulièrement si elle est répétée. Les manuels de « procédure médicale et précautions » des DAI MEDTRONIC® de modèles VIVA, VIRTUOSO, PROTECTA et SECURA mentionnent la possibilité de réaliser des soins hyperbares jusqu'à 4000 hPa sans pour autant citer des travaux indépendants qui justifient cette pratique.

Le constructeur BIOTRONIK déclare avoir lui-même éprouvé son DAI PHYLAX jusqu'à 6000 hPa sans objectiver d'altération mécanique, ni électronique (Wonhas et coll. 2000).

En l'absence d'étude publiée indépendante, le principe de précaution impose actuellement de ne pas exposer les patients porteurs de DAI à l'OHB.

Nous avons donc étudié les paramètres mécaniques et électroniques de différents DAI avant et après exposition unique et itérative à 4000 hPa en caisson hyperbare thérapeutique.

MATERIELS ET METHODES

De février 2021 à mai 2021, vingt-deux DAI ont été éprouvés dans le caisson hyperbare thérapeutique du CHRU de Brest, un modèle HAUX-STARMED 2500. Les DAI utilisés étaient des dispositifs explantés par le service de cardiologie interventionnelle du CHRU de Brest, de façon programmée pour changement de batterie et sans dysfonction préalable (figure 1).

Expositions hyperbares réalisées

Le protocole d'exposition hyperbare à l'air comprenait une compression de 1000 à 4000 hPa en cinq minutes, puis un séjour de trente minutes à 4000 hPa, et enfin une décompression en cinq minutes jusqu'à 1000 hPa.

Les DAI ont été randomisés en deux groupes :

- ceux du groupe « exposition unique » (UN-EX) a subi une seule exposition hyperbare à 4000 hPa ;
- ceux du groupe « expositions itératives » (IT-EX) ont subi trente expositions hyperbares à 4000 hPa.

Mesure des paramètres mécaniques et électroniques

Les paramètres électroniques et mécaniques de chaque DAI ont été mesurés avant la première et après la dernière exposition hyperbare. Chaque mesure était réalisée dans l'ignorance du groupe auquel était affecté chaque DAI. Certains DAI du groupe IT-EX

ont aussi bénéficié d'une mesure des paramètres électroniques pendant le séjour à 4000 hPa.

Un cardiologue rythmologue recueillait les paramètres électroniques en utilisant les interfaces conçues par les fabricants de chaque DAI et certaines permettaient des mesures à travers la paroi du caisson hyperbare.

Les paramètres électroniques testés étaient :

1. La survenue inappropriée d'intervention « thérapeutique » du DAI vis-à-vis des tachyarythmies ;
2. Les dysfonctions des paramètres thérapeutiques vis-à-vis des tachyarythmies ou de la stimulation des bradycardies : l'algorithme thérapeutique des tachyarythmies, la programmation en stimulation du DAI et le seuil de bradycardie traitée.

Les paramètres mécaniques mesurés étaient les longueur, largeur et épaisseur des boîtiers et des connecteurs de sondes des DAI. L'extérieur des boîtiers en titane et des connecteurs de sondes en tecothane™ a été inspecté visuellement en utilisant une loupe grossissante pour rechercher les stigmates de déformation macroscopique.

Critère de Jugement principal

L'exposition hyperbare devait être considérée comme inoffensive pour l'appareil si elle n'en n'avait pas modifié les paramètres électroniques et mécaniques.

RESULTATS

Nous avons testé vingt-deux DAI de marques, de modèles et de programmations électroniques différents. Nous disposions de neuf DAI de marque SORIN®, cinq de marque BIOTRONIK® et huit de marque MEDTRONIC®. Sept des vingt-deux DAI avaient une capacité de resynchronisation interventriculaire (tableau I).

L'ensemble des DAI étaient programmés soit :

1. En VVI c'est-à-dire détection et stimulation ventriculaire, en prévention des bradycardies ;
2. En DDD c'est à-dire détection et stimulation atriale et ventriculaire, en cas de trouble de conduction de haut grade ;



Figure 1

Photographie d'un défibrillateur automatique implantable

DAI de marque ST. JUDE MEDICAL® de modèle ELLIPSE DR avec son boîtier en titane (comportant les inscriptions de marque, modèle et capacité de programmation) et son connecteur de sondes en Tecothane™ (permettant la visualisation des composants électroniques)

3. En *AAI* ↔ *DDD* c'est-à-dire détection et stimulation atriale avec commutation automatique en *DDD*, en cas de survenue de trouble de conduction de haut grade. Cette programmation est utilisée en prévention de troubles de conduction de haut grade chez le patient atteint de dysfonction sinusale dans le but de préserver la conduction cardiaque intrinsèque.

Exposition hyperbare

Après randomisation quatorze des vingt-deux DAI ont été inclus dans le groupe UN-EX et les huit autres dans le groupe IT-EX. L'ensemble des DAI a bénéficié des procédures prévues.

Paramètres mécaniques

L'évaluation comparative pré et post-test des paramètres mécaniques n'a objectivé aucune déformation mécanique d'aucun des vingt-deux DAI. Il n'y avait aucune différence de longueur, largeur ou épaisseur des boîtiers ni des connecteurs de sonde, ni aucun stigmate macroscopique de déformation des DAI.

Les résultats étaient identiques dans les deux groupes (tableau I).

Paramètres électroniques

La comparaison des paramètres électroniques évalués avant et après test n'a mis en évidence aucune altération, c'est-à-dire aucune survenue inappropriée d'intervention thérapeutique vis-à-vis des tachyrythmies, aucune dysfonction des paramètres de l'algorithme thérapeutique des tachyrythmies ni de la stimulation des bradycardies.

Les réglages thérapeutiques destinés aux bradycardies ont pu être analysés pour tous les DAI.

Les huit DAI de marque MEDTRONIC® avaient été partiellement désactivés : pour ces DAI, l'interrogation de la survenue inappropriée d'intervention thérapeutique des tachyrythmies et celle des paramètres de l'algorithme thérapeutique des tachyrythmies n'a pas pu être effectuée.

L'interrogation en cours d'épreuve hyperbare a pu être réalisée pour sept des huit DAI du groupe IT-EX et elle n'a mis en évidence aucune dysfonction des paramètres électroniques. Un DAI SORIN® n'a pas pu être interrogé dans le caisson hyperbare pour des raisons techniques.

	Marque	Modèle	Prog	Pré-test			Post-test			Per-test		Exposition
				Dys	Intv	DM	Dys	Intv	DM	Dys	Intv	
1	Sorin	Paradym DR	VVI	0	0	OK	0	0	OK	-	-	UN-EX
2	Sorin	Paradym CRT	DDD	0	0	OK	0	0	OK	-	-	UN-EX
3	Sorin	Paradym VR	VVI	0	0	OK	0	0	OK	-	-	UN-EX
4	Sorin	Paradym CRT	VVI	0	0	OK	0	0	OK	-	-	UN-EX
5	Sorin	Paradym CRT	VVI	0	0	OK	0	0	OK	-	-	UN-EX
6	Sorin	Paradym DR	VVI	0	0	OK	0	0	OK	-	-	UN-EX
7	Biotronic	Lumax VR	VVI	0	0	OK	0	0	OK	-	-	UN-EX
8	Biotronic	Lumax VR	VVI	0	0	OK	0	0	OK	-	-	UN-EX
9	Medtronic	Secura VR	VVI	0*	F	OK	0*	F	OK	-	-	UN-EX
10	Medtronic	Protecta VR	VVI	0*	F	OK	0*	F	OK	-	-	UN-EX
11	Medtronic	Secura VR	VVI	0*	F	OK	0*	F	OK	-	-	UN-EX
12	Medtronic	Virtuoso VR	VVI	0*	F	OK	0*	F	OK	-	-	UN-EX
13	Medtronic	Virtuoso VR	VVI	0*	F	OK	0*	F	OK	-	-	UN-EX
14	Medtronic	Viva Quad CRT	DDD	0*	F	OK	0*	F	OK	-	-	UN-EX
15	Sorin	Paradym CRT	VVI	0	0	OK	0	0	OK	0	0	IT-EX
16	Sorin	Paradym DR	DDD*	0	0	OK	0	0	OK	0	0	IT-EX
17	Sorin	Paradym CRT	VVI	0	0	OK	0	0	OK	-	-	IT-EX
18	Biotronic	Lumax VR	VVI	0	0	OK	0	0	OK	0	0	IT-EX
19	Biotronic	Lumax VR	VVI	0	0	OK	0	0	OK	0	0	IT-EX
20	Biotronic	Ilivia VR	VVI	0	0	OK	0	0	OK	0	0	IT-EX
21	Medtronic	Virtuoso VR	VVI	0*	F	OK	0*	F	OK	0*	F	IT-EX
22	Medtronic	Viva XT CRT	VVI	0*	F	OK	0*	F	OK	0*	F	IT-EX

Tableau I

Paramètres électroniques et mécaniques avant et après exposition hyperbare unique à 4000 hPa. Prog, programmation du DAI; Dys, dysfonctions des paramètres de l'algorithme thérapeutique des tachyarythmies et de la stimulation des bradycardies; Intv, survenue inappropriée d'événement thérapeutique des tachyarythmies; DM, déformation macroscopique; DDD*, détection et stimulation atriale et ventriculaire, en cas de trouble de conduction de haut grade; DDD, détection et stimulation atriale avec commutation automatique en DDD, en cas de survenue de trouble de conduction de haut grade; AAI < > DDD; 0, pas d'anomalie détectée; 0*, pas d'anomalie détectée concernant les paramètres de stimulation des bradycardies; F, échec de récupération des données; OK, pas de déformation; UN-EX: exposition unique; IT-EX: expositions itératives..

DISCUSSION

A notre connaissance, ce travail est le premier à évaluer l'impact de l'exposition hyperbare sur plusieurs modèles de DAI de marques différentes, alors que chaque année en France plus de 15 000 patients bénéficient d'une implantation de DAI.

On pouvait redouter une déformation des boîtiers en titane ou des connecteurs de sondes en thecothane, qui aurait été susceptible d'induire une altération des composants électroniques avec risque de dysfonction de la stimulation cardiaque, de la délivrance inappropriée d'intervention thérapeutique pour les tachyarythmies ou de dysfonction des paramètres de l'algorithme thérapeutique des tachyarythmies. Cependant les résultats de cette étude indiquent l'innocuité ex-vivo de l'hyperbarie sèche sur les DAI après exposition unique ou itérative à 4000 hPa.

L'absence de survenue inappropriée d'intervention thérapeutique du DAI est rassurante vis-à-vis du

risque de déclenchement d'activité de défibrillation par l'hyperbarie thérapeutique. Lorsqu'il survient, un choc approprié est de faible énergie (40-42 Joules) et ne peut s'accompagner que de peu de courant de fuite car la défibrillation est interne à l'organisme, et donc sans induire de surrisque d'incendie au cours d'une séance d'OHB.

Ces résultats sont cohérents avec l'absence de déformation et de dysfonction durant le processus ISO-compatible de stérilisation standard par oxyde d'éthylène et avec étape de mise sous pression à 2500 hPa (Wonhas et Whonhas-Thiele, 1998). Mais il n'y a pas de compression itérative au cours de cette procédure.

Le fabricant BIOTRONIK® a éprouvé un DAI BIOTRONIK® PHYLAX quarante-six fois à 2500 hPa pendant cent trente-cinq minutes, et quatre fois à 6000 hPa. Il n'y avait aucune différence dans les

paramètres mécaniques et électroniques évalués avant et après exposition hyperbare. Le fabricant concluait qu'après évaluation individuelle les patients porteurs de ce DAI pourraient être traités par OHB (Wonhas et coll. 2000). Les résultats de notre étude sont donc en accord avec la rare littérature existante sur le sujet.

Pour huit des vingt-deux DAI étudiés (les DAI de marque MEDTRONIC® qui avaient été désactivés à l'explantation) nous n'avons pas pu rechercher la survenue inappropriée d'intervention thérapeutique pour les tachyarythmies ni les paramètres thérapeutiques des tachyarythmies.

L'ensemble de nos résultats concerne des DAI explantés. On peut faire l'hypothèse que leur comportement lors de l'exposition hyperbare est transposable à celui d'un DAI implanté. Une évaluation de la tolérance de l'OHB chez des patients porteurs de DAI permettrait néanmoins de confirmer l'absence de survenue d'événement indésirable.

L'absence d'altération mécanique ou de dysfonction électronique est rassurante quant à la prise en charge par l'OHB de patients porteurs de DAI, mais elle ne doit pas occulter les questions spécifiques posées par les cardiopathies ischémiques ou rythmiques sévères sous-jacentes et qui ont justifié la pose du DAI. L'absence de contre-indication aux soins hyperbares doit donc être établie en fonction des comorbidités du patient et des risques encourus pour les soins hyperbares. Au cours des soins hyperbares la surveillance par moniteur cardiaque permet d'assurer une sécurité satisfaisante au patient.

En outre, l'absence de contre-indication absolue concernant le port d'un DAI en caisson hyperbare ne permet pas de conclure à l'absence de contre-indication à la plongée sous-marine.

Chez le patient porteur de DAI donc atteint d'une cardiopathie sévère à haut risque de troubles du rythme ou de conduction, l'immersion, le froid et l'effort physique de la plongée sous-marine induit une augmentation du travail cardiaque, qui peut l'exposer à une majoration des complications rythmiques, entre autres.

La contre-indication absolue à la pratique de la plongée sous-marine doit ainsi être prononcée pour les patients porteurs de DAI, compte tenu de la méconnaissance du comportement des DAI et des cardiopathies sévères sous-jacentes durant la plongée sous-marine.

CONCLUSION

L'exposition unique ou itérative à 4000 hPa effectuée en caisson hyperbare thérapeutique n'a induit aucune modification des paramètres mécaniques ou électroniques des défibrillateurs automatiques implantables (DAI) testés, des marques SORIN®, MEDTRONIC® et BIOTRONIK®.

L'hyperbarie sèche semble donc sans effet délétère sur les DAI testés ex-vivo, et ces résultats devraient faire rediscuter l'actuelle contre-indication absolue des soins hyperbares urgents aux patients porteurs de ces DAI.

Une étude de tolérance de l'OHB par les patients porteurs de DAI, permettrait d'objectiver l'absence de survenue d'événement indésirable significatif.

RÉFÉRENCES

Kratz JM, Blackburn JG, Leman RB, Crawford FA. Cardiac Pacing under Hyperbaric Conditions. *Ann Thorac Surg* 1983, 36: 66–68.

Lafay, V, Trigano, JA, Gardette B, Micoli C, Carre F. Effects of hyperbaric exposures on cardiac pacemakers. *Br. J. Sports Med.* 2008, 42: 212–216.

Mathieu D, Marroni A, Kot J. Tenth European Consensus Conference on Hyperbaric Medicine: recommendations for accepted and non-accepted clinical indications and practice of hyperbaric oxygen treatment. *Diving Hyperb. Med.* 2017, 47: 24–32.

Trigano A, Lafay V, Blandeau O, Levy S, Gardette B, Micoli C.J Activity-based rate-adaptive pacemakers under hyperbaric conditions. *J. Interv. Card. Electrophysiol. Int. J. Arrhythm. Pacing.* 2006, 15, 179–183. doi: 10.1007/s10840-006-9004-x. Epub 2006 Aug 10. PMID: 16900412.

Wonhas C, Wonhas-Thiele H. Safety in hyperbaric oxygen therapy (HBO) also for patients with implanted pacemakers (PM)? *Undersea Hyperb. Med.* 1998, 25 (suppl):15.

Wonhas C, Wonhas-Thiele H. Cardiac pacemakers (PM) and hyperbaric Oxygen Therapy (HBO) – IS-1-Connector and Biotronik INOS CLS pacemaker. *Undersea Hyperb. Med.* 1999, 26 (suppl) :54.

Wonhas C, Wonhas-Thiele H, Mueller A. Implanted cardiac defibrillator (ICD) and pacemaker (PM) after longtime hyperbaric oxygen therapy (HBO) – Biotronik Phylax AV (ICD) and INOS PLUS CLS (PM). *Undersea Hyperb. Med.* 2000, 27 (suppl), 32.

RESUME

Effet de l'exposition hyperbare sur les paramètres mécaniques et électroniques des défibrillateurs automatiques implantables (DAI). R Guennegues, A Henckes, V Mansourati, J Mansourati. Bull. MEDSUBHYP, 2022, 32 (1) : 07

- 12. Contexte : Les patients éligibles aux soins hyperbares pour une indication urgente ou non, sont récusés s'ils sont porteurs de dispositifs défibrillateurs automatiques implantables (DAI), du fait de l'absence de données satisfaisantes concernant le risque d'altération mécanique et/ou électronique des DAI en milieu hyperbare. L'oxygénothérapie hyperbare (OHB) est le traitement adjuvant de référence pour des pathologies engageant le pronostic vital ou fonctionnel.

Méthode : Vingt-deux DAI de marques et modèles variés tous explantés ont subi une exposition à 4000 hPa en 2 groupes randomisés : l'un pour une exposition unique et l'autre pour trente expositions itératives. Les paramètres mécaniques et électroniques des DAI ont été évalués à l'aveugle des expositions hyperbares réalisées, avant, après et pour certains DAI pendant les expositions hyperbares.

Résultats : Quelle que soit la modalité d'exposition hyperbare réalisée il n'a été observé aucune déformation mécanique, aucune survenue de stimulation thérapeutique pour tachyarythmie, aucune anomalie fonctionnelle des réponses thérapeutiques aux tachyarythmies ou de stimulation programmée en cas de bradycardie.

Conclusion : L'hyperbarie sèche n'affecte ni la morphologie ni les performances des DAI testés ex-vivo. Ces résultats incitent à discuter le caractère absolu de la contre-indication des soins hyperbares urgents aux patients porteurs de ces DAI. Une étude de tolérance de l'OHB chez les patients porteurs de DAI permettrait d'objectiver l'absence de survenue d'événement indésirable.

Correspondance :

R. Guennegues

Tél : +33 2 98 34 70 98

Fax : +33 2 98 14 50 31

Courriel : guennegues.romain@gmail.com

SCANNER THORACIQUE POUR LE DÉPISTAGE D'ANOMALIES AÉRIQUES À RISQUE DE BAROTRAUMATISME PULMONAIRE DANS LE CADRE DE LA DETERMINATION DE L'APTITUDE MÉDICALE INITIALE A LA PRATIQUE DE LA PLONGEE MILITAIRE

B. BONNEMAISON, J-E. BLATTEAU. Service de médecine hyperbare et d'expertise plongée (SMHEP), Hôpital d'Instruction des Armées Sainte-Anne, 83800 Toulon (France).

ABSTRACT

Chest CT scan for the screening of air anomalies at risk of pulmonary barotrauma for the initial medical fitness of military divers. B Bonnemaison, J-E Blatteau. Bull. MEDSUBHYP, 2022, 22 (1): 13 – 28.

Introduction

The presence of intra-pulmonary air lesions such as cysts, blebs and emphysema bullae, predisposes to the occurrence of pulmonary barotrauma during pressure variations, especially during underwater diving activities. These rare accidents can have dramatic consequences. There is little data on the prevalence of these lung abnormalities in the general population without respiratory pathology. Chest radiography has long been the baseline examination for the detection of respiratory pathologies in occupational medicine. In the context of the medical follow-up of military divers, it was performed at the initial visit and then annually. It has been replaced since October 2018 by the thoracic CT scan, which has become the baseline exam for respiratory pathologies. The objective of this work was to evaluate the prevalence of the various pulmonary abnormalities noted since the realization of the thoracic scanner, and to relate them to the characteristics of this population and the results of pulmonary function tests.

Methods

330 records of military diving candidates who underwent an initial assessment between October 2018 and March 2021 were analyzed in a single-center retrospective analysis. Subjects who withdrew their application or had incomplete records were discarded. The following data were collected: sex, age, BMI, presence of a history of respiratory pathologies, history of active or weaned smoking, use of treatments, presence of allergies, diving practice, whether regular or anecdotal, results of pulmonary function tests, reports of thoracic CT scans, as well as fitness decision.

Results

The study included 307 military diver candidates, mostly male, with a median age of 25 years. 6.5 % had a history of respiratory disease and 10.5 % were active smokers. 19 % of the subjects had abnormal respiratory function tests, but only 5 % of these subjects were disqualified for this reason. We identified 25 % of divers with CT scan abnormalities (76 subjects for a total of 86 abnormalities found), but only 9 % of these subjects were disqualified as a result of the CT scan. 76 % of the abnormal scans were benign nodules, 26 % of which measured six millimeters or more in long axis. Abnormalities with an aerial component accounted for 13 % of the abnormal scans with six emphysema bullae, three bronchial dilatations and one cystic lesion. In subgroup analyses, no association was found between the presence of nodules and the general characteristics of the population, whereas in six subjects emphysema bullae were found statistically associated with active smoking or abnormal pulmonary function tests.

Conclusion

The systematic performance of a thoracic CT scan in a young population free of pulmonary pathology revealed a majority of benign nodules. Abnormalities with an aerial component are much less frequent, but their presence generally leads to a decision of inaptitude in the context of the practice of military diving. These results argue in favor of a systematic screening of aeric pleuro-pulmonary lesions during the initial visit for professional divers and, for recreational divers, according to the clinical elements and the results of the pulmonary function tests

Key words

Pulmonary barotrauma, air anomaly, bullae, blebs, cyst, nodule, thoracic CT scan, pulmonary function test, diving medicine, occupational medicine.

INTRODUCTION

La plongée sous-marine est une pratique à fortes contraintes sur l'organisme, liées notamment à l'immersion dans un milieu irrespirable froid et à l'augmentation de la pression ambiante. Ces conditions peuvent être responsables de pathologies et d'accidents spécifiques avec en particulier la possibilité d'accidents barotraumatiques pulmonaires particulièrement redoutés en raison de complications graves souvent associées.

Ces accidents barotraumatiques sont liés aux variations de volume des gaz au sein des alvéoles pulmonaires en fonction de la pression, selon la loi de Boyle-Mariotte. Lorsque l'équilibration de la pression des voies aériennes n'est plus possible avec celle du milieu extérieur, le risque est celui d'une surpression pulmonaire causant des lésions alvéolaires. L'air sous pression franchit alors les parois alvéolaires, diffuse dans les espaces voisins, à savoir la plèvre et le médiastin, et peut pénétrer dans la circulation

pulmonaire. Les symptômes d'un barotraumatisme pulmonaire (BTP) peuvent être respiratoires, neurologiques et mener au décès (Lippmann et coll. 2011, Neuman et coll. 1998, Bralow et Piehl 2018).

Épidémiologiquement, les accidents barotraumatiques pulmonaires sont peu fréquents, soit 5 % des accidents de plongée admis en centre hyperbare (Coulange et coll. 2008). Néanmoins, les formes graves avec aéroembolisme cérébral s'observent dans 18 % des cas avec parfois mise en jeu du pronostic vital (Lippmann et coll. 2011, Neuman et coll. 1998). La majorité survient lors de plongées d'exercice et notamment dans un contexte de remontée avec blocage expiratoire (Lafère et coll. 2009, Coulange et coll. 2008).

Si les BTP surviennent le plus souvent hors contexte de pathologie pulmonaire préexistante, la présence de certaines anomalies à composante aérique telles que des kystes pulmonaires, des blebs (collections aériques infracentimétriques sous-pleurales) ou des bulles d'emphysème prédisposent à ce type d'accidents (Reuter et coll. 1997, Tetzlaff et coll. 1997). La proportion de formations aériques donnant lieu à une surpression pulmonaire en population générale est méconnue. Une étude rétrospective menée au sein des armées sur quinze cas de BTP survenus au sein de l'école de plongée (compte-rendu de réunion sur les accidents barotraumatiques survenant dans le contexte de la plongée militaire de formation, SMHEP/Blatteau 2016) retrouvait des formations aériques scannographiques dans deux cas (13,3 %). Ces épisodes de BTP étaient dus dans 73 % des cas à un exercice de remontée sur expiration, justifiant la modification des modalités de réalisation de cet exercice en 2017.

Les armées rassemblent environ 2200 plongeurs professionnels. La prévention des accidents de plongée militaire repose sur une surveillance médicale renforcée avec la réalisation de visites médicales initiales et périodiques. Lors de la visite médicale initiale des candidats plongeurs militaires, sont recherchés les différents éléments qui pourraient contre-indiquer la pratique de la plongée professionnelle. Les épreuves fonctionnelles respiratoires (EFR) décèlent les troubles ventilatoires obstructifs (BPCO, asthme). Depuis octobre 2018, la prescription d'un scanner pulmonaire à faible dose en visite initiale a remplacé la radiographie pulmonaire auparavant réalisée annuellement. Le scanner pulmonaire possède en effet une bonne sensibilité (entre 84 et 88 %) et spécificité (proche de 100 %) pour détecter des *blebs* et bulles d'emphysème dans le

cadre de pneumothorax spontanés primaires (PSP)(Almajid et coll. 2019, Kawaguchi et coll. 2013, Chou et coll. 2003, Hatz et coll. 2000, Margolis et coll. 2003, Sihoe et coll. 2000) ou de BPCO (Newell 2002). Il est plus performant que la radiographie thoracique dans la recherche de ces anomalies (Coulange et coll. 2008, Sihoe et coll. 2000, Newell 2002). De plus, le scanner pulmonaire à faible dose est un examen peu coûteux et moins irradiant qu'un scanner habituellement en usage, pour des performances de dépistage de lésions pulmonaires équivalentes (Ferretti et coll. 2010, Corneloup et coll. 2003). De nombreuses études ont évalué la proportion d'anomalies pulmonaires préexistantes chez des sujets ayant été victime d'un PSP (Grundy et coll. 2012, Casali et coll. 2013, Haynes et Baumann 2011, Casha et coll. 2014, Smit et coll. 2000, Lyra 2016), majoritairement des blebs et bulles d'emphysème. Cependant, il n'existe que peu de données sur la présence d'anomalies aériques intrapulmonaires dans la population générale (Smit et coll. 2000).

L'objectif principal de cette étude était de quantifier les anomalies pulmonaires au scanner thoracique de dépistage dans une population de candidats plongeurs militaires exempts de pathologie pulmonaire connue. Il s'agissait aussi de préciser la prévalence de formations aériques pulmonaires susceptibles de contre-indiquer la pratique de la plongée sous-marine.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Population étudiée

Il s'agit d'une étude rétrospective observationnelle par analyse de dossiers. Les dossiers analysés étaient ceux des candidats à la plongée professionnelle militaire dont la visite initiale a été réalisée entre octobre 2018 et mars 2021, soit une période d'inclusion de trente mois. Ont été exclus les dossiers des candidats n'ayant pas bénéficié d'examen tomodensitométrique pulmonaire, ainsi que ceux des candidats ayant retiré leur candidature. Ainsi, 23 sujets ont été exclus de l'étude parmi les 330 qui avaient été admis en visite initiale (figure 1). Les dossiers sont tous issus du service de médecine hyperbare et d'expertise de plongée (SMHEP) de l'Hôpital d'Instruction des Armées Sainte-Anne à Toulon, centre référent pour l'expertise des plongeurs militaires en France.

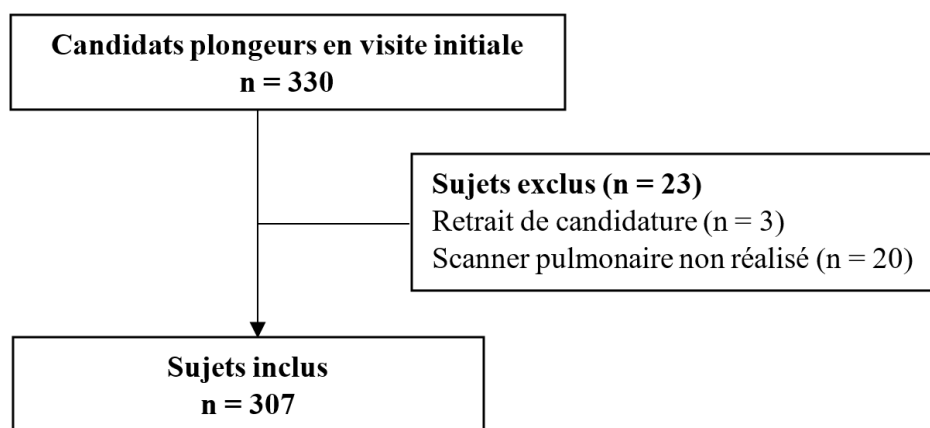


Figure 1 – Diagramme de flux

Recueil de données

Les données recueillies à partir des dossiers médicaux étaient les suivantes : le sexe, l'âge, le poids, la taille, l'IMC (calculé selon la formule : $IMC = \text{poids}/\text{taille}^2$ en kg.m^{-2}), la présence d'antécédents de pathologies respiratoires, l'antécédent de tabagisme sévère ou non, la prise de traitements, la présence d'allergies, la pratique de la plongée, qu'elle soit régulière ou anecdotique, les résultats des EFR et plus précisément la valeur du rapport du VEMS (volume expiratoire maximal seconde) mesuré au VEMS théorique (en %), du rapport du DEM50 (débit expiratoire maximal à 50 % de la ou capacité vitale forcée, ou CVF) mesuré au DEM50 théorique et du coefficient de Tiffeneau, soit le rapport du VEMS mesuré à la CVF mesurée (en %). Les valeurs étaient considérées anormales pour un $VEMS_{\text{mesuré}}/VEMS_{\text{théorique}}$ inférieur à 0,9, un $DEM50_{\text{mesuré}}/DEM50_{\text{théorique}}$ inférieur à 0,75, et un $VEMS/CVF$ inférieur à 0,75. Un résultat de scanner pulmonaire pathologique était aussi recherché avec, le cas échéant, l'analyse des lésions observées. Enfin, la décision finale d'aptitude à la plongée était relevée.

Techniques d'imagerie

Les images ont été obtenues à l'aide d'un scanner multi-barrettes REVOLUTION CT GE, à basse dose. Les résultats anormaux ont été analysés en termes d'anomalies emphysémateuses, kystiques, bronchiques (dilatation des bronches, syndrome bronchique, épaissement bronchique) et parenchymateuses (nodules avec distinction concernant les nodules de plus de six millimètres, granulomes, atélectasies, anomalies en verre dépoli,

troubles ventilatoires).

Analyses statistiques

L'analyse principale a consisté à recenser les différentes anomalies d'imagerie et à en établir la prévalence. Une analyse secondaire a recherché une association entre un résultat anormal d'imagerie, quelle que soit l'anomalie, et les résultats d'EFR de la population d'étude. Deux analyses complémentaires ont été effectuées pour rechercher d'éventuelles relations entre d'une part des caractéristiques individuelles des sujets ou les données d'EFR, et d'autre part la présence de nodules scannographiques ou de lésions emphysémateuses. La distribution des variables étant hétérogène et ne répondant pas forcément à une loi normale, des tests non paramétriques ont été privilégiés. Les données sont exprimées en médianes et écarts interquartiles (Q1-Q3) pour les variables continues, et en fréquences (%) pour les variables discrètes. Le test de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer les variables continues. Le test du chi-deux a été utilisé pour les variables discrètes. Une valeur $p < 0,05$ était considérée comme significative, et une « tendance statistique » était notée pour des valeurs comprises entre 0,05 et 0,10. Les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant l'application GraphPad Prism 9.

RÉSULTATS

Description de la population

Le tableau I décrit les caractéristiques de la population étudiée. Il s'agit en grande majorité d'hommes (96,1

Sexe	
Hommes (n, %)	295 (96,1 %)
Femmes (n, %)	12 (3,9 %)
Âge (médiane, Q1 - Q3)	25 ans (23 - 28)
IMC (médiane, Q1 - Q3)	23,8 kg.m ⁻² (22,2 - 25,1)
Antécédents respiratoires (n,%)	20 (6,5 %)
Antécédents tabagiques (n,%)	69 (22,5 %)
Dont tabagisme non sevré (n,%)	32 (10,5 %)
Prise médicamenteuse (n,%)	6 (2 %)
Allergies (n,%)	52 (17 %)
Plongées antérieures (n,%)	207 (67,4 %)
Résultats d'EFR	
VEMS/CVF (médiane, Q1 - Q3)	83,3 % (78,8 – 88,7)
VEMS/VEMS _{théorique} (médiane, Q1 - Q3)	103 % (98 - 109)
DEM50/DEM50 _{théorique} (médiane, Q1 - Q3)	94 % (81,2 - 109)

Tableau I – Caractéristiques de la population étudiée.

%), l'âge médian était de 25 ans. Peu d'entre eux ont des antécédents respiratoires (6,5 %), des allergies (17 %) ou une prise médicamenteuse (2 %). 22,5 % des sujets ont des antécédents de consommation tabagique et 10,5 % sont des fumeurs actifs.

Un total de 58 résultats d'EFR anormaux a été recensé, parmi lesquels trois seulement ont donné lieu à une décision d'inaptitude. Le rapport VEMS/CVF médian en population générale était de 83,3 (78,8 – 88,7), le VEMS médian de 103 % de la valeur théorique (98 - 109) et le DEM50 de 94 % de la valeur théorique (81,2 - 109).

Résultats des scanners thoraciques

76 scanners (24,8 %) comportaient au total 86 anomalies, recensées dans le tableau II. Ces anomalies sont largement dominées par les nodules (n = 58, 76,3 % des scanners anormaux), tous de consistance solide et d'aspect bénin. Parmi ceux-ci, 15 nodules (25,9 %) mesuraient six millimètres de grand axe ou plus. Sur six scanners, on observait des lésions emphysémateuses, exclusivement des bulles. Quatre intéressaient les régions périphériques apicales, les deux autres étaient péri-hilaires ou latéro-basales. Une seule était unique. Toutes étaient infracentimétriques. Un seul scanner comportant une image d'emphysème n'a pas donné lieu à une décision d'inaptitude. Un kyste sous-pleural existait sur un scanner (figure 2), et a fait prononcer une inaptitude. Des dilatations des bronches ont été observées sur trois scanners (figure 3), et ont motivé une décision d'inaptitude pour ces trois cas.



Figure 2 – Scanner thoracique mettant en évidence un kyste sous-pleural basal droit.

Analyse secondaire : comparaison d'un résultat de scanner anormal avec les différentes caractéristiques et les résultats de l'EFR

Les résultats de la comparaison entre un résultat de scanner anormal, quelle que soit l'anomalie, et les caractéristiques de la population ou un résultat d'EFR anormal sont retranscrits dans le tableau III. Il n'y a pas d'association significative, malgré une tendance statistique entre un résultat de scanner anormal et un résultat d'EFR anormal ($p = 0,10$) ou avec le rapport VEMS/CVF ($p = 0,10$).

	Nombre d'anomalies	% d'anomalies présentes sur les scanners pathologiques (n = 76)	% d'anomalies sur la population étudiée (n = 307)
Bulles d'emphysème	6	7,9	2,0
Kyste	1	1,3	0,3
Anomalies bronchiques			
Dilatation des bronches	3	3,9	1,0
Syndrome bronchique	2	2,6	0,7
Epaississement bronchique	2	2,6	0,7
Anomalies parenchymateuses			
Nodules (dont ≥ 6 mm)	58 (15)	76,3	18,9
Granulomes	7	9,2	2,3
Atélectasie	2	2,6	0,7
Verre dépoli	2	2,6	0,7
Troubles ventilatoires	2	2,6	0,7
Irrégularité des apex	1	1,3	0,3
Total	86		28

Tableau II – Fréquence des anomalies observées au scanner.

	Scanner normal	Scanner anormal	Valeur p
Sexe			$> 0,99$
Hommes (n, %)	222 (96,1 %)	73 (96,1 %)	
Femmes (n, %)	9 (3,9 %)	3 (3,9 %)	
Âge (médiane, Q1 - Q3)	25 (23 - 28)	25 (22,5 - 28)	0,81
IMC (médiane, Q1 - Q3)	23,7 (22,3 - 25)	24 (22 - 25)	0,57
Antécédents respiratoires (n, %)	15 (6,5 %)	3 (4 %)	0,43
Antécédents tabagiques (n, %)	49 (21,2 %)	20 (26,7 %)	0,33
Dont tabagisme non sevré (n, %)	22 (9,5 %)	10 (13,3 %)	0,35
Prise médicamenteuse (n, %)	5 (2,2 %)	1 (1,3 %)	$> 0,99$
Allergies (n, %)	42 (18,2 %)	10 (13,3 %)	0,43
Plongées antérieures (n, %)	152 (65,8 %)	54 (0,7 %)	0,32
EFR anormale (n, %)	39 (17 %)	19 (25,3 %)	0,10
VEMS/CVF (médiane, Q1 - Q3)	83,6 (80 - 89)	82 (77 - 88,3)	0,10
VEMS/VEMS _{théorique} (médiane, Q1 - Q3)	103 (98 - 109)	102 (95 - 110)	0,37
DEM50/DEM50 _{théorique} (médiane, Q1 - Q3)	94 (82 - 109)	95 (78 - 109)	0,50

Tableau III – Caractéristiques des sujets selon un résultat de scanner normal ou présentant une anomalie.

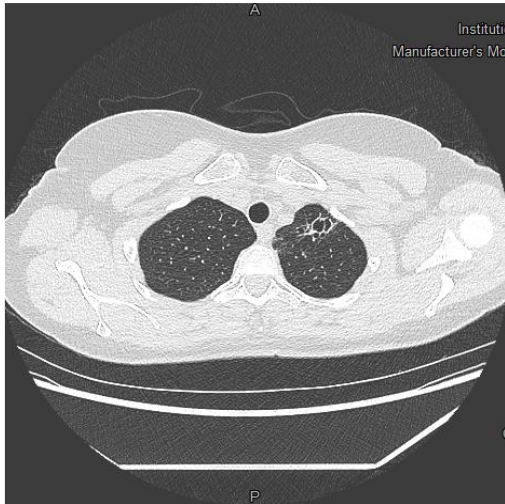


Figure 3 – Scanner thoracique mettant en évidence des bronchectasies apicales.

Analyses complémentaires

Analyse sur les nodules

Aucune association significative n'a été observée entre la présence de nodules et d'un résultat d'EFR anormal ($p = 0,46$), ni entre la présence de nodules et d'un tabagisme ($p = 0,23$). Aucune association n'a été retrouvée non plus en dissociant les différentes valeurs d'EFR, ni en considérant isolément les nodules mesurant six millimètres de grand axe ou plus.

Analyse sur les bulles d'emphysème

La présence d'un emphysème scannographique est significativement associée à un tabagisme actif (OR = 9,3 ; $p = 0,0014$) (tableau IV), ainsi qu'à un résultat d'EFR anormal (OR = 9,1 ; $p = 0,0026$).

L'analyse séparée des trois paramètres d'EFR étudiés ne montre pas d'association significative, mais des valeurs p proches de la tendance statistique allant vers une diminution du rapport VEMS/CVF ($p = 0,11$) et du DEM50 ($p = 0,12$) chez les sujets atteints d'emphysème par rapport aux sujets non atteints (figure 4).

DISCUSSION

Problématique des nodules

Dans notre étude, les anomalies scannographiques sont très largement dominées par les nodules intra-

pulmonaires. Un ou plusieurs nodules étaient présents dans 76 % des scanners considérés comme anormaux, soit 19 % de la population étudiée. Si la présence de nodules n'est pas associée à un risque accru de BTP en plongée, il est important d'identifier les critères de malignité et de surveillance qui pourraient avoir des conséquences médicales avec impact sur la pratique de la plongée professionnelle.

Données sur la prévalence de nodules de découverte fortuite en population générale

Plusieurs revues de littérature menées aux Etats-Unis font état lors de dépistages de prévalences de nodules très variables, allant de 3 à 51 % selon les études et les populations étudiées, avec une moyenne globale de l'ordre de 20 % (Wahidi et coll. 2007, Bach et coll. 2012). L'augmentation constante de la détection de ces anomalies s'explique tant par l'accès facilité au scanner pulmonaire qu'à leur sensibilité croissante (Gould et coll. 2015).

Relation entre l'EFR et la présence de nodules pulmonaires

Notre étude n'a objectivé aucune relation entre la présence de nodules pulmonaires et les caractéristiques des sujets, notamment avec l'antécédent tabagique ($p = 0,17$). Il n'y avait pas non plus de relation significative entre la présence de nodules et un résultat d'EFR anormal ($p = 0,46$), qu'il s'agisse du rapport VEMS/CVF, du VEMS ou du DEM50 ($p = 0,24$, $p = 0,41$, $p = 0,48$, respectivement).

Conduite à tenir après la détection de nodules

Le protocole de surveillance radiologique lors de la découverte d'un nodule scannographique répond habituellement aux recommandations du consensus de la Société de Fleischner de 2017 (MacMahon et coll. 2017, figure 5). Elles ne sont applicables qu'à une population d'âge supérieur ou égal à 35 ans et préconisent de distinguer les nodules solides de ceux en verre dépoli ou avec composante solide, avant de raisonner selon leur taille et leur nombre. L'algorithme de prise en charge diffère selon le niveau de risque de malignité du ou des nodules. La taille et la morphologie sont fortement liées au risque de malignité (Wahidi et coll. 2007, Austin 2011). Nous proposons un arbre décisionnel récapitulant ces recommandations (figure 6).

Dans notre étude, la majorité des nodules étaient inférieurs à trois millimètres, d'aspect bénin.

Scanner thoracique et barotraumatisme pulmonaire

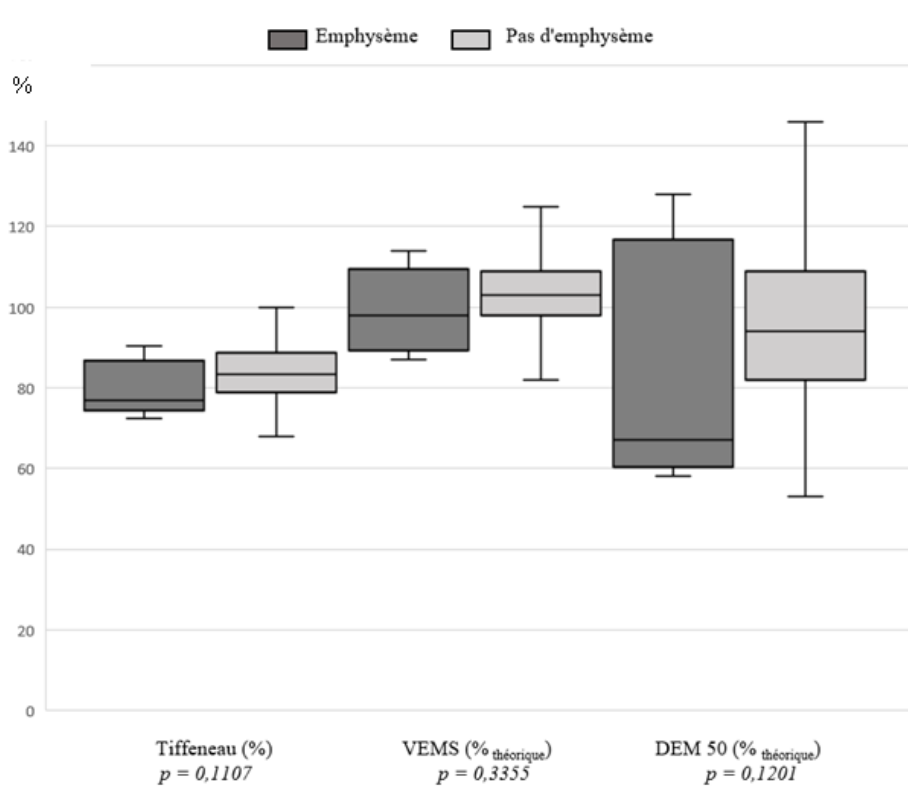


Figure 4 – Représentation graphique de la comparaison entre un résultat d'emphysème scannographique et les trois critères d'EFR étudiés.

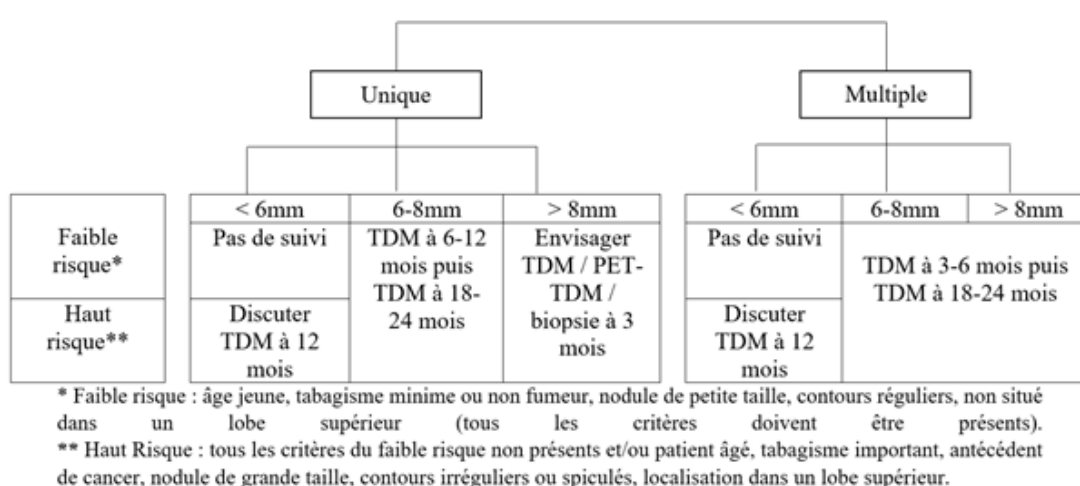


Figure 5 - Proposition d'arbre décisionnel concernant la conduite à tenir devant la découverte fortuite d'un nodule pulmonaire solide, selon les recommandations de la Société de Fleischner de 2017.

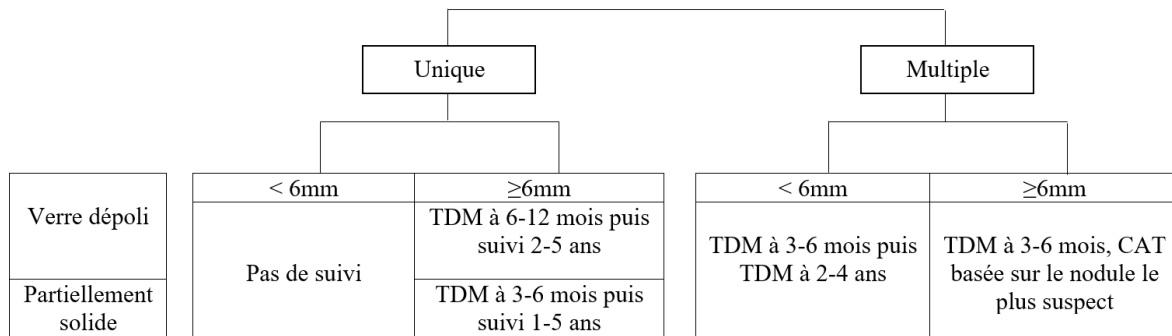


Figure 6 - Proposition d'arbre décisionnel concernant la conduite à tenir devant la découverte fortuite d'un nodule pulmonaire en verre dépoli ou à composante solide, selon les recommandations de la Société de Fleischner de 2017.

Seulement 26 % des scanners objectivaient un ou plusieurs nodules de six millimètres ou plus. Le tabagisme n'était pas statistiquement lié à la présence de nodules ($p = 0,17$). Parmi les scanners pathologiques ayant donné lieu à un contrôle à distance, aucun cas suspect n'a été décelé et aucune inaptitude n'a été prononcée par progression des lésions nodulaires.

Problématique des bulles d'emphysème

Données sur la prévalence de lésions d'emphysème lors d'épisodes de PSP

Il existe un lien significatif entre la présence d'anomalies pleurales et la survenue de PSP. Ces anomalies, majoritairement des bulles et blebs sous-pleuraux, seraient présentes à l'examen scannographique dans 56 % des cas de PSP et dans 60,8 à 68,1 % des récurrences, avec une incidence proportionnelle au degré d'atteinte dystrophique (Casali et coll. 2013, Smit et coll. 2000, Riveiro-Blanco et coll. 2020). D'autres études décrivent une prévalence d'emphysème entre 76 et 100 % lors de thoroscopies effectuées après un épisode de PSP (Grundy et coll. 2012, Casha et coll. 2014). Il a également été décrit des lésions de porosité pleurale, où une couche fibro-élastique inflammatoire remplace les cellules mésothéliales de la plèvre viscérale, favorisant le passage d'air de l'alvéole vers la plèvre (Haynes et Baumann 2011).

Données sur la prévalence de lésions d'emphysème de découverte fortuite dans la population générale

En population générale, les lésions emphysemateuses viennent en deuxième position des incidentalomes pulmonaires les plus fréquents, derrière les nodules non calcifiés. Les prévalences observées vont de 11 %

à 16 % (Hussien et coll. 2016, Boldeanu et coll. 2018, Priola et coll. 2013) et même jusqu'à 50,6 % (Morgan et coll. 2017). Cependant ces études concernent des sujets âgés d'environ 70 ans, avec pour la plupart un tabagisme majeur à plus de vingt paquets-années. Une étude a recensé une prévalence de 6 % d'anomalies à type de bulles ou blebs lors de chirurgies par thoracotomie menées chez des patients de 15 à 51 ans exempts de toute pathologie pulmonaire, prévalence que l'on peut penser sous-estimée (Amjadi et coll. 2007). Le tabagisme semble jouer un rôle majeur dans la formation de lésions emphysemateuses, a fortiori en association avec d'autres substances toxiques telles que le cannabis ou la cocaïne (Almeida et coll. 2015, Underner et coll. 2018). Une étude néerlandaise menée post-mortem chez 130 adultes de 21 à 70 ans et toutes causes de décès confondues, a trouvé une prévalence au scanner de 34 % de blebs et de bulles d'emphysème, croissant avec l'âge (de Bakker et coll. 2020).

Une étude menée au centre médical de plongée de la marine royale néerlandaise a comparé la sensibilité du scanner pulmonaire à celle de la radiographie thoracique pour des sujets militaires masculins asymptomatiques (Wingelaar et coll. 2021). Les caractéristiques de la population étudiée se rapprochaient de celles de notre étude, avec des sujets d'âge moyen 36,4 ans, contre 25 ans dans notre étude. Parmi les 101 scanners réalisés, sept incidentalomes (7 %) à type de blebs ou bulles d'emphysème ont été détectés, contre 2 % dans notre étude. Cinq des sept sujets présentant des lésions emphysemateuses ont été déclarés inaptes, donc sensiblement la même proportion que dans notre étude. Dans cette étude le scanner s'est montré significativement plus performant que la radiographie thoracique pour

détecter des lésions emphysémateuses chez des sujets asymptomatiques ($p = 0,023$).

Une étude sud-coréenne menée chez 536 hommes entre 45 et 51 ans, candidats pour devenir pilotes civils, décrit des résultats proches (Bang et coll. 2012). Le dépistage systématique par scanner thoracique basse dose a permis d'établir une prévalence de 6,1 % de formations aériques, dont 5,8 % de lésions emphysémateuses à type de blebs ou bulles.

Relation entre l'EFR et la présence d'emphysème

Les lésions d'emphysème résultent d'une inflammation et d'une destruction du parenchyme pulmonaire (Egger et coll. 2005). La destruction parenchymateuse ampute la surface d'échange entre le sang capillaire alvéolaire et le gaz alvéolaire. Cette altération des échanges alvéolo-capillaire déterminante pour le pronostic de l'emphysème s'exprime en EFR par une diminution du transfert du monoxyde de carbone (DLCO) (Bates 2000, Bodlet et coll. 2013, Cottin 2013, Amariei et coll. 2019). L'anomalie ventilatoire obstructive résulte de la raréfaction des fibres parenchymateuses qui haubanent les parois bronchiques et facilitent leur affaissement notamment lors des efforts expiratoires. Plusieurs études mettent en évidence la détérioration du VEMS et du rapport VEMS/CVF du fait de l'emphysème (Bodlet et coll. 2013, Amariei et coll. 2019), association d'autant plus marquée que l'atteinte est sévère (Kitaguchi et coll. 2014, Crossley et coll. 2018, Sanders et coll. 1988).

Pour déceler les lésions emphysémateuses, la sensibilité des EFR est bien moindre que celle de l'examen scannographique (Sanders et coll. 1988, Madani et coll. 2001). Une étude menée chez des sujets ayant présenté un BTP retrouvait dans cinq cas sur quinze (33 %) des blebs d'emphysème sous-pleural (Tetzlaff et coll. 1997). Dans la même étude les débits expiratoires maximaux à 25 et 50 % de la capacité vitale mesurés lors des EFR étaient inférieurs chez les sujets victimes de BTP à ceux des sujets non accidentés (respectivement $p < 0,05$ et $p < 0,02$). Néanmoins, le nombre restreint de sujets inclus dans cette étude ne permettait pas d'accorder une valeur générale à cette baisse des débits périphériques. Les anomalies de l'EFR peuvent varier non seulement avec le degré d'atteinte, mais également avec le type d'atteinte. Le VEMS et le volume résiduel semblent préférentiellement impactés lors de lésions emphysémateuses des lobes inférieurs, alors que la DLCO le serait davantage si les lésions intéressent les lobes supérieurs (Haraguchi et coll. 1998). De plus,

une atteinte centrale du poumon serait plus à même d'entraîner une altération de l'EFR, comparée à une atteinte périphérique (Nakano et coll. 1999).

Dans notre étude la présence de lésions d'emphysème était significativement associée à des altérations des EFR (OR = 9,1 ; $p = 0,0026$). Il n'y avait pas d'association significative entre la présence d'emphysème et le rapport VEMS / CVF ($p = 0,11$), le VEMS ($p = 0,34$) ou le DEM 50 ($p = 0,12$). Dans notre étude, sur les six lésions emphysémateuses, quatre étaient apicales, deux péri-hilaires et latérobasales. Elles étaient toutes minimales. Cette faible sévérité et leur localisation pourraient expliquer l'absence d'altération significative des variables d'EFR analysées. Toutefois, le faible effectif (six sujets avec des bulles d'emphysème) ne permet de tirer aucune conclusion sur les anomalies spirométriques observées.

Autres anomalies aériques pulmonaires

Données sur la prévalence de lésions kystiques pulmonaires

Les kystes pulmonaires se définissent comme des lésions intra-parenchymateuses rondes, habituellement à parois fines, avec une interface bien définie avec le poumon sain. Ils sont également pourvoyeurs de BTP, et pourraient être une conséquence du vieillissement pulmonaire. L'existence de ces kystes pulmonaires peut être lourde de conséquences, comme le cas d'une patiente de 19 ans prise en charge au sein de l'HIA Sainte Anne, récemment décrit par Dufresne et coll. (2020)

Une étude menée aux Etats-Unis parmi une large cohorte de 2 633 sujets asymptomatiques âgés de 34 à 92 ans a permis d'en estimer la prévalence à 7,6 % (Araki et coll. 2013). L'âge y joue un rôle significatif. En effet, la moyenne d'âge des sujets présentant au moins un kyste était de 63 ans contre 58,9 ans chez les sujets n'en présentant pas ($p < 0,001$), et aucun kyste n'a été retrouvé chez les sujets de moins de 40 ans. Si la prévalence des lésions kystiques en population générale est peu décrite dans la littérature, elle l'est nettement plus en ce qui concerne certains cas particuliers (Gupta et coll. 2013, Gupta et coll. 2015, Johannesma et coll. 2016). Certains syndromes génétiques y prédisposent, tels que le syndrome de Birtt-Hogg-Dubé, dans lequel ces lésions seraient présentes chez plus de 80 % des sujets, ou encore la néurofibromatose, l'histiocytose langerhansienne et la lymphangioliéiomyomatose. Le syndrome de Gougerot-Sjögren serait associé à la présence de kystes dans 12 à 46 % des cas.

Données sur la prévalence de dilatations des bronches
 Une étude sud-coréenne a observé une prévalence de bronchectasies asymptomatiques à 2 300 cas pour 100 000 (Kim et coll. 2021). Leur présence semblait statistiquement liée au sexe féminin, à un âge élevé, à une comorbidité hépatique, à un antécédent de tuberculose ou de BPCO, ou encore un VEMS diminué. Dans une étude britannique, la prévalence était moindre mais augmentait au fil des années, particulièrement dans les groupes les plus âgés (Quint et coll. 2016).

Les anomalies histologiques de dilatation des bronches sont une maladie inflammatoire chronique qui comporte une altération de la clairance facilitant les surinfections pulmonaires et l'inflammation chronique. La sévérité de ces bronchectasies augmente avec l'avancée de l'âge. D'autres facteurs de risque de sévérité sont un VEMS diminué, un IMC bas, une hospitalisation récente, ou encore des troubles cognitifs et une cardiopathie ischémique (Quinn et Hill 2018). Les BTP en rapport avec des bronchectasies sont peu décrits, mais les anomalies aériques constituent un point faible histologique lors de variations pressionnelles.

Problématique liée au scanner thoracique de dépistage

Performances du scanner à basse dose et ultra basse dose pour dépister des lésions bulleuses

La tomodensitométrie à haute résolution détecte bien les blebs et bulles d'emphysème. Avec une sensibilité par rapport à la chirurgie allant de 84 à 96 % (Almajid et coll. 2019, Sihoe et coll. 2000, Kawaguchi et coll. 2013).

Concernant le scanner à basse dose, il est déjà couramment utilisé pour dépister les sujets fumeurs à risque de cancer pulmonaire. Dans ces cohortes âgées et tabagiques, les prévalences sont de 44 à 50 % pour les lésions emphysemateuses, et de 14 % pour les bronchectasies (Morgan et coll. 2017, Regan et coll. 2019). La prévalence des lésions emphysemateuses chez des patients atteints de BPCO suivis par scanner basse dose était de 27 % dans l'étude de Smith et coll. (2014) et de 78 % dans celle d'Alcaide et coll. (2017) en population générale fumeuse. Pour le dépistage de l'emphysème, les qualités diagnostiques du scanner à basse dose semblent équivalentes à celles du scanner classique avec une différence de sensibilité inférieure à 3 % (Gierada et coll. 2007, Zaporozhan et coll. 2006, Ohno et coll. 2016).

Depuis cinq ans se multiplient les études concernant le scanner à « ultra basse dose », dont les irradiations sont comprises entre celles d'une radiographie

thoracique et d'un scanner à basse dose (Svahn et coll. 2019, Messerli et coll. 2017). Les capacités de quantification de l'emphysème par le scanner à ultra basse dose semblent concordantes avec celles d'un scanner standard, malgré une possible légère sous-estimation, pour une irradiation réduite de 84 % (Messerli et coll. 2017, Wisselink et coll. 2021). Les comparaisons des résultats de scanners à basse dose avec ceux des scanners à ultra basse dose semblent démontrer des performances similaires pour la détection d'anomalies pulmonaires telles que les nodules, bronchectasies et les lésions emphysemateuses, avec pour ces dernières une sensibilité supérieures à 65 % (Kim et coll. 2015, Tækker et coll. 2021, Wang et coll. 2015).

Impacts de ces examens d'imagerie en termes d'irradiation et de finances

Pour des résultats diagnostiques comparables, l'irradiation moyenne pour un scanner thoracique standard est de 9,0 mSv, contre 1,8 mSv pour un scanner à basse dose (Leitão et coll. 2021). Le scanner thoracique à ultra basse dose aurait des irradiations moyennes comprises entre 0,07 et 0,22 mSv, soit entre celle d'une radiographie classique et celle d'un scanner à basse dose (Messerli et coll. 2017, Kim et coll. 2015, Wang et coll. 2015, Rampinelli et coll. 2017, Mettler et coll. 2008, Leitão et coll. 2021, Larke et coll. 2011, Azadbakht et coll. 2021, Kroft et coll. 2019).

En termes financiers, le coût du scanner thoracique (standard ou à basse dose) est légèrement supérieur à celui de la radiographie pulmonaire : 25,27 € contre 21,82 € pour la tarification de l'acte à laquelle s'ajoute le forfait technique, de 32 à 93,03 € (au 1^{er} janvier 2019) selon le type d'appareil et son activité.

Problématiques liées aux normes d'EFR

Les valeurs de référence en spirométrie en vigueur dans les textes d'aptitudes des armées sont celles du couple CECA-1993 / Zapletal. Elles sont basées sur les équations de la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier, validées pour les personnes âgées entre 18 et 70 ans, et extrapolées au-delà de 70 ans. Au-dessous de 18 ans, les équations de Zapletal sont le plus souvent utilisées (de Broucker et coll. 2019). Ce modèle semble avoir quelques limites, mises en lumière par l'article de de Broucker et coll. (2019), préconisant l'utilisation des valeurs du groupe *Global Lung Initiative* (GLI-2012), plus fiables dans les populations de plus de 40 ans, notamment féminines. Elles permettent également d'apporter une correction selon l'ethnie.

L'utilisation des valeurs de la CECA-1993 au détriment des valeurs du GLI-2012 semble sans grande conséquence sur la qualité de notre étude. Les valeurs de la CECA-1993 restent en effet valables chez les sujets de 18 à 40 ans (de Brouker et coll. 2019), ce qui représente la majorité de notre population d'étude. De plus, la correction par l'ethnie apportée par les valeurs du GLI-2012 n'a pas lieu d'être dans notre population d'étude très majoritairement caucasienne. Enfin, la fiabilité du modèle GLI-2012 par rapport à l'ancien modèle a été étudié pour les valeurs de VEMS, de CVF et de VEMS/CVF, mais n'intègre pas actuellement le DEM50, que nous avons exploité dans notre étude.

Forces et limitations de l'étude

Il s'agit d'une des premières études rétrospectives qui recherche la prévalence d'incidentalomes pulmonaires et leurs liens éventuels avec les résultats d'EFR dans une population jeune et en bonne santé. Les anomalies aériques détectées par l'examen tomodensitométrique, notamment des lésions d'emphysème à risque de BTP, n'auraient probablement pas été décelées en radiographie thoracique habituelle. Dans cette population jeune et en bonne santé, les facteurs confondants sont peu nombreux.

Cette étude a quelques limites. Tout d'abord, puisqu'il s'agit d'un travail rétrospectif, le niveau de preuve qu'on peut en attendre est moindre que celui d'une étude prospective. Ensuite, la population étudiée est très sélective, composée de sujets militaires jeunes, sportifs et en bonne santé. En effet, les candidats plongeurs militaires ne sont pas représentatifs de la population générale de plongeurs civils professionnels ou de loisir. Une étude réalisée dans une population moins étroitement sélectionnée devrait selon toute vraisemblance renforcer les associations trouvées notamment entre les anomalies scannographiques et l'EFR. Il pourrait également être intéressant de la comparer à une population témoin, par exemple de sujets militaires du même âge ne pratiquant pas la plongée. Qui plus est, la tranche d'âge étroite ne permet pas d'observer les conséquences à plus long terme du tabagisme sur le parenchyme pulmonaire. La mesure complémentaire du DLCO pourrait peut-être sensibiliser la détection d'un emphysème asymptomatique. De même, l'expression des résultats d'EFR selon la norme GLI-2012 pourrait avoir un retentissement sur les relations recherchées. Enfin, une étude à plus grande échelle gagnerait en puissance.

CONCLUSION

La réalisation systématique d'un scanner thoracique à l'aptitude des candidats à la plongée professionnelle militaire a mis en évidence l'existence de lésions nodulaires, toutes bénignes et sans association significative avec les caractéristiques de la population d'étude. Un deuxième type d'anomalies moins fréquentes était des formations aériques telles que les kystes, les bulles d'emphysème, et la dilatation des bronches. Lors d'une analyse en sous-groupe, une association significative a été observée entre la présence d'un emphysème et celle d'un tabagisme non sévère, ainsi qu'avec un résultat anormal en EFR. Ces résultats doivent cependant être considérés à la lumière de l'effectif limité de l'échantillon étudié et de l'absence de confirmation actuelle dans la littérature. Par ailleurs, il n'y a pas dans la littérature de description d'association pour les autres anomalies aériques potentiellement à risque de BTP comme les kystes pulmonaires ou les bronchectasies. La prévalence non négligeable de ces anomalies dans la population générale notamment au-delà de 40 ans et l'absence de point d'appel clinique plaident en faveur de la réalisation du scanner thoracique pour leur dépistage.

Compte tenu du développement croissant de la pratique du scanner à basse dose et des résultats présentés dans ce travail, la réalisation d'un scanner thoracique initial à titre systématique chez les plongeurs civils professionnels, qui peuvent être amenés à réaliser des remontées en situation d'urgence, semble pertinente. Dans le domaine de la plongée de loisir, en attendant l'émergence des scanners à ultra basse dose, la réalisation d'un scanner thoracique pourrait être envisagée en fonction de l'âge et/ou en cas de points d'appel, tels que la présence de symptômes ou d'antécédents respiratoires, d'un tabagisme non sévère ou important, ou de résultats anormaux en EFR. L'ajout de la mesure de la DLCO à la mesure des volumes et débits pourrait être contributif dans certains cas, mais nécessiterait une plus grande accessibilité à cette mesure. Ainsi, le dépistage de lésions pulmonaires semble dorénavant devoir reposer sur la généralisation de l'imagerie scannographique. L'accès progressif aux scanners pulmonaires à ultra basse dose devrait encore faciliter cet usage.

ABRÉVIATIONS UTILISÉES

BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive
BTP : barotraumatisme pulmonaire
CVF : capacité vitale forcée
DEM50 : débit expiratoire maximal pour un volume de 50 % de la capacité vitale forcée
DLCO : capacité de diffusion pulmonaire du monoxyde de carbone
EFR : épreuves fonctionnelles respiratoires
IMC : indice de masse corporelle
PSP : pneumothorax spontané primaire
SMHEP : service de médecine hyperbare et expertise de plongée
VEMS : volume expiratoire maximal seconde

RÉFÉRENCES

- Alcaide AB, Sanchez-Salcedo P, Bastarrika G, Campo A, Berto J, Ocon MDM, Fernandez-Montero A, Celli BR, Zulueta J, de-Torres JP. Clinical features of smokers with radiological emphysema but without airway limitation. *Chest* 2017, 151 : 358-365.
- Almajid FM, Aljehani YM, Alabkary S, Alsaif HS. The accuracy of computed tomography in detecting surgically resectable blebs or bullae in primary spontaneous pneumothorax. *Radiol Med* 2019, 124: 833-837.
- Almeida RR, Zanetti G, Souza AS, Souza LS, Silva JLPE, Escuissato DL, Irion KL, Mançano AD, Nobre LF, Hochhegger B, Marchiori E. Cocaine-induced pulmonary changes: HRCT findings. *Pneumol*. 2015, 41: 323-330.
- Amariei DE, Dodia N, Deepak J, Hines SE, Galvin JR, Atamas SP, Todd NW. Combined pulmonary fibrosis and emphysema: pulmonary function testing and a pathophysiology perspective. *Medicina* 2019, 55: 580.
- Amjadi K, Alvarez GG, Vanderhelst E, Velkeniers B, Lam M, Noppen M. The prevalence of blebs or bullae among young healthy adults : a thoroscopic investigation. *Chest* 2007, 132: 1140-1145.
- Araki T, Nishino M, Gao W, Dupuis J, Putman RK, Washko GR, Hunninghake GM, O'Connor GT, Hatabu H. Pulmonary cysts identified on chest CT: Are they part of aging change or of clinical significance? *Thorax* 2015, 70: 1156-1162.
- Austin JHM. The incidental small pulmonary nodule and the Fleischner criteria 5 years later : have we learned anything more? *Journal of Thoracic Imaging* 2011, 26: 88-89.
- Azadbakht J, Khoramian D, Lajevardi ZS, Elikaii F, Aflatoonian AH, Farhood B, Najafi M, Bagheri H. A review on chest CT scanning parameters implemented in COVID-19 patients: bringing low-dose CT protocols into play. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine* 2021, 52: 13.
- Bach PB, Mirkin JN, Oliver TK, Azzoli CG, Berry D, Brawley OW, Byers T, Colditz GA, Gould MK, Jett JR, Sabichi AL, Smith-Bindman R, Wood DE, Qaseem A, Detterbeck FC. Benefits and harms of CT screening for lung cancer: a systematic review. *JAMA* 2012, 307: 2418-2429.
- Bang D-H, Lim D, Jeong O-M, Hwang W-S, Jung J-Y, Lim J. Low-dose chest computed tomography as a screening tool: findings in 536 aircrews. *Aviat Space Environ Med* 2012, 83: 896-898.
- Bates DV. Revisiting « respiratory function in emphysema in relation to prognosis ». *Can Respir J*. 2000, 7: 271-279.
- Bodlet A, Maury G, Jamart J, Dahlqvist C. Influence of radiological emphysema on lung function test in idiopathic pulmonary fibrosis. *Respiratory Medicine* 2013, 107: 1781-1788.
- Boldeanu I, Perreault Bishop J, Nepveu S, Stevens LM, Soulez G, Kieser TM, Lamy A, Noiseux N, Chartrand-Lefebvre C. Incidental findings in CT imaging of coronary artery bypass grafts: results from a Canadian multicenter prospective cohort. *BMC Res Notes* 2018, 11: 72.
- Bralow LM, Piehl M. Barotrauma and arterial gas embolism: a diving emergencies simulation case for emergency medicine residents. *MedEdPORTAL* 2018, 14: 10788.
- Casali C, Stefani A, Ligabue G, Natali P, Aramini B, Torricelli P, Morandi U. Role of blebs and bullae detected by high-resolution CT and recurrent spontaneous pneumothorax. *Ann Thorac Surg*. 2013, 95: 249-255.
- Casha AR, Manché A, Gatt R, Wolak W, Dudek K, Gauci M, Schembri-Wismayer P, Camilleri-Podest M, Grima JN. Is there a biomechanical cause for spontaneous pneumothorax? *Eur J Cardiothorac Surg* 2014, 45: 1011-1016.
- Chou SH, Cheng Y-J, Kao EL. Is video-assisted thoracic surgery indicated in the first episode primary spontaneous pneumothorax? *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery* 2003, 2: 552-554.
- Corneloup O, Delval O, Laurent F, Morin M, Vandermarcq P. Low-dose chest CT with millimetric thin slices: myth or reality? *J Radiol* 2003, 84: 305-310.

- Cottin V. Clinical case: combined pulmonary fibrosis and emphysema with pulmonary hypertension – clinical management. *BMC Res Notes* 2013, 6: S2.
- Crossley D, Renton M, Khan M, Low EV, Turner AM. CT densitometry in emphysema: a systematic review of its clinical utility. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis* 2018, 13: 547-563.
- de Bakker HM, Tijsterman M, de Bakker-Teunissen OJG, Soerdjbalie-Maikoe V, van Hulst RA, de Bakker BS. Prevalence of pulmonary bullae and blebs in postmortem CT imaging with potential implications for diving medicine. *Chest* 2020, 157: 916-923.
- de Broucker V, Edmé JL, Plantier L, Hulo S. Les valeurs de référence GLI-2012 pour la spirométrie forcée décrivent fidèlement la population européenne et française. *Rev Mal Respir* 2019, 36: 287-90. <https://doi.org/10.1016/j.rmr.2018.12.005>
- Dufresne PL, Morin J, Druelle A, Roffi R, Lehot H, Blatteau JE. Troubles de conscience et tétraparésies au décours d'une plongée subaquatique de loisir, à propos d'un cas. *Bull. MEDSUBHYP* 2020, 30: 37-46.
- Egger B, Aubert JD. Emphysème pulmonaire: mécanismes et nouvelles perspectives thérapeutiques. *Rev Med Suisse* 2005, 1: 2665-2672.
- Ferretti G, Jankowski A. Doses d'exposition des examens radiologiques thoraciques. *Revue des Maladies Respiratoires* 2010, 27: 644-650.
- Gierada DS, Pilgram TK, Whiting BR, Hong C, Bierhals AJ, Kim JH, Bae KT. Comparison of standard- and low-radiation-dose CT for quantification of emphysema. *AJR Am J Roentgenol* 2007, 188: 42-47.
- Gould MK, Tang T, Liu ILA, Lee J, Zheng C, Danforth KN, Kosco AE, Di Fiore JL, Suh DE. Recent trends in the identification of incidental pulmonary nodules. *Am J Respir Crit Care Med* 2015, 192: 1208-1214.
- Grundy S, Bentley A, Tschopp JM. Primary spontaneous pneumothorax: a diffuse disease of the pleura. *Respiration* 2012, 83: 185-189.
- Gupta N, Seyama K, McCormack FX. Pulmonary manifestations of Birt-Hogg-Dubé syndrome. *Fam Cancer* 2013, 12: 387-396.
- Gupta N, Vassallo R, Wikenheiser-Brokamp KA, McCormack FX. Diffuse cystic lung disease. Part II. *Am J Respir Crit Care Med* 2015, 192: 17-29.
- Haraguchi M, Shimura S, Hida W, Shirato K. Pulmonary function and regional distribution of emphysema as determined by high-resolution CT. *Respiration* 1998, 65: 125-129.
- Hatz RA, Kaps MF, Meimarakis G, Loehe F, Müller C, Fürst H. Long-term results after video-assisted thoracoscopic surgery for first-time and recurrent spontaneous pneumothorax. *The Annals of Thoracic Surgery* 2000, 70: 253-257.
- Haynes D, Baumann MH. Pleural controversy: aetiology of pneumothorax. *Respirology* 2011, 16: 604-10.
- Hussien AF, Jeudy J, Kligerman SJ, White CS. Thoracic incidental findings in preoperative computed tomography evaluation for transcatheter aortic valve implantation (TAVI). *Journal of Thoracic Imaging* 2016, 31: 183-188.
- Johannesma PC, van de Beek I, van der Wel JWT, Paul MA, Houweling AC, Jonker MA, van Waesberghe JHTM, Reinhard R, Starink TM, van Morselaar RJA, Menko FH, Postmus PE. Risk of spontaneous pneumothorax due to air travel and diving in patients with Birt-Hogg-Dubé syndrome. *Springerplus* 2016, 5: 1506.
- Kawaguchi T, Kushibe K, Yasukawa M, Kawai N. Can preoperative imaging studies accurately predict the occurrence of bullae or blebs? Correlation between preoperative radiological and intraoperative findings. *Respiratory Investigation* 2013, 51: 224-228.
- Kim J, Kim K, Shim YM, Chang WI, Park KH, Jun TG, Park PW, Chae H, Lee KS. Video-assisted thoracic surgery as a primary therapy for primary spontaneous pneumothorax. *Surg Endosc* 1998, 12: 1290-1293.
- Kim SH, Jung YJ, Ko MS, Lee SW, Lee JS, Oh YM. Prevalence of asymptomatic bronchiectasis and associations among the health screening population in South Korea. *ERJ Open Res* 2021, 7: 00188-2021.
- Kim Y, Kim YK, Lee BE, Lee SJ, Ryu YJ, Lee JH, Chang JH. Ultra-low-dose CT of the thorax using iterative reconstruction: evaluation of image quality and radiation dose reduction. *AJR* 2015, 204: 1197-202.
- Kitaguchi Y, Fujimoto K, Hanaoka M, Honda T, Hotta J, Hirayama J. Pulmonary function impairment in patients with combined pulmonary fibrosis and emphysema with and without airflow obstruction. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis* 2014, 9: 805-811.
- Kroft LJM, van der Velden L, Girón IH, Roelofs JH, de Roos A, Geleijns J. Added value of ultra-low-dose CT, dose equivalent to chest X-ray radiography, for diagnosing chest pathology. *J Thorac Imaging* 2019, 34: 179-186.
- Lafère P, Germonpré P, Balestra C. Pulmonary barotrauma in divers during emergency free ascent training: review of 124 cases. *Aviat Space Environ Med* 2009, 80: 371-375.

- Larke FJ, Kruger RL, Cagnon CH, Flynn MJ, McNitt-Gray MM, Wu X, Judy PF, Cody DD. Estimated radiation dose associated with low-dose chest CT of average-size participants in the National Lung Screening Trial. *AJR* 2011, 197: 1165-1169.
- Leitão CA, Salvador GL de O, Tazoniero P, Warszawiak D, Saievicz C, Jakubiak RR, Escuissato DL. Dosimetry and comparison between different CT protocols (low dose, ultralow dose, and conventional CT) for lung nodules' detection in a phantom. *Radiol Res Pract* 2021, 2021: 6667779.
- Lippmann J, Fock A, Arulanandam S. Cerebral arterial gas embolism with delayed treatment and a fatal outcome in a 14-year-old diver. *Diving Hyperb Med* 2011, 41: 31-34.
- Lyra R de M. Etiology of primary spontaneous pneumothorax. *J Bras Pneumol* 2016, 42: 222-226.
- Coulanges M, Gourbeix J, Grenaud J, D'Andrea C, Henckès A, Harms J. La RSE en 2008 : bénéfiques / risques ? Analyse rétrospective des barotraumatismes thoraciques. *Bull. MEDSUBHYP* 2008, 18: 9-14.
- MacMahon H, Naidich DP, Goo JM, Lee KS, Leung ANC, Mayo JR, Mehta A, Ohno Y, Powell C, Prokop M, Rubin G, Schaefer-Prokop CM, Travis W, Van Schil PE, Bankier A. Guidelines for management of incidental pulmonary nodules detected on CT images: from the Fleischner society 2017. *Radiology* 2017, 284: 228-243.
- Madani A, Keyzer C, Gevenois PA. Quantitative computed tomography assessment of lung structure and function in pulmonary emphysema. *European Respiratory Journal* 2001, 18: 720-730.
- Margolis M, Gharagozloo F, Tempesta B, Trachiotis GD, Katz NM, Alexander EP. Video-assisted thoracic surgical treatment of initial spontaneous pneumothorax in young patients. *The Annals of Thoracic Surgery* 2003, 76: 1661-1664.
- Messerli M, Ottilinger T, Warschkow R, Leschka S, Alkadhi H, Wildermuth S, Bauer RW. Emphysema quantification and lung volumetry in chest X-ray equivalent ultralow dose CT - Intra-individual comparison with standard dose CT. *Eur J Radiol* 2017, 91: 1-9.
- Mettler FA, Huda W, Yoshizumi TT, Mahesh M. Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: a catalog. *Radiology* 2008, 248: 254-263.
- Morgan L, Choi H, Reid M, Khawaja A, Mazzone PJ. Frequency of incidental findings and subsequent evaluation in low-dose computed tomographic scans for lung cancer screening. *Annals ATS* 2017, 14: 1450-1456.
- Nakano Y, Sakai H, Muro S, Hirai T, Oku Y, Nishimura K, Mishima M. Comparison of low attenuation areas on computed tomographic scans between inner and outer segments of the lung in patients with chronic obstructive pulmonary disease: incidence and contribution to lung function. *Thorax* 1999, 54: 384-389.
- Neuman TS, Jacoby I, Bove AA. Fatal pulmonary barotrauma due to obstruction of the central circulation with air. *J Emerg Med* 1998, 16: 413-417.
- Newell JD. CT of emphysema. *Radiologic Clinics of North America* 2002, 40: 31-42.
- Ohno Y, Koyama H, Yoshikawa T, Seki S, Takenaka D, Yui M, Lu A, Miyazaki M, Sugimura K. Pulmonary high-resolution ultrashort TE MR imaging: Comparison with thin-section standard- and low-dose computed tomography for the assessment of pulmonary parenchyma diseases. *J Magn Reson Imaging* 2016, 43: 512-532.
- Priola AM, Priola SM, Giaj-Levra M, Basso E, Veltri A, Fava C, Cardinale L. Clinical implications and added costs of incidental findings in an early detection study of lung cancer by using low-dose spiral CT. *Clinical Lung Cancer* 2013, 14: 139-148.
- Quinn TM, Hill AT. Non-cystic fibrosis bronchiectasis in the elderly: current perspectives. *Clin Interv Aging* 2018, 13: 1649-1656.
- Quint JK, Millett ERC, Joshi M, Navaratnam V, Thomas SL, Hurst JR, Smeeth L, Brown JS. Changes in the incidence, prevalence and mortality of bronchiectasis in the UK from 2004-2013: a population based cohort study. *Eur Respir J* 2016, 47: 186-193.
- Rampinelli C, De Marco P, Origgi D, Maisonneuve P, Casiraghi M, Veronesi G, Spaggiari L, Bellomi M. Exposure to low dose computed tomography for lung cancer screening and risk of cancer: secondary analysis of trial data and risk-benefit analysis. *BMJ* 2017, 356: 347.
- Regan EA, Lowe KE, Make BJ, Lynch DA, Kinney GL, Budoff MJ, Mao SS, Dyer D, Curtis JL, Bowler RP, Han MLK, Beaty TH, Hokanson JE, Kern E, Humphries S, Curran-Everett D, van Beek EJR, Silverman EK, Crapo JD, Finigan JH. Identifying smoking-related disease on lung cancer screening CT scans: increasing the value. *Chronic Obstr Pulm Dis* 2019, 6: 233-245.
- Reuter M, Tetzlaff K, Warninghoff V, Steffens JC, Bettinghausen E, Heller M. Computed tomography of the chest in diving-related pulmonary barotrauma. *Br J Radiol* 1997, 70: 440-445.

- Riveiro-Blanco V, Pou-Álvarez C, Ferreiro L, Toubes ME, Quiroga-Martínez J, Suárez-Antelo J, García-Prim JM, Rivo-Vázquez JE, Castro-Calvo R, González-Barcala FJ, Gude F, Valdés L. Recurrence of primary spontaneous pneumothorax: associated factors. *Pulmonology* <https://doi.org/10.1016/j.pulmoe.2020.06.003>. [cité 20 nov 2021].
- Sanders C, Nath PH, Bailey WC. Detection of emphysema with CT: correlation with pulmonary function tests and chest radiography. *Investigative Radiology* 1988, 23: 262-266.
- Sihoe AD, Yim AP, Lee TW, Wan S, Yuen EH, Wan IY, Arifi AA. Can CT scanning be used to select patients with unilateral primary spontaneous pneumothorax for bilateral surgery? *Chest* 2000, 118: 380-383.
- Smit HJ, Wienk MA, Schreurs AJ, Schramel FM, Postmus PE. Do bullae indicate a predisposition to recurrent pneumothorax? *Br J Radiol* 2000, 73: 356-359.
- Smith BM, Austin JHM, Newell JD, D'Souza BM, Rozenshtein A, Hoffman EA, Amed F, Barr RG. Pulmonary emphysema subtypes on computed tomography: the MESA COPD study. *Am J Med* 2014, 127: 7-23.
- Svahn TM, Sjöberg T, Ast JC. Dose estimation of ultra-low-dose chest CT to different sized adult patients. *Eur Radiol* 2019, 29: 4315-4323.
- Tækker M, Kristjánssdóttir B, Graumann O, Laursen CB, Pietersen PI. Diagnostic accuracy of low-dose and ultra-low-dose CT in detection of chest pathology: a systematic review. *Clin Imaging* 2021, 74: 139-148.
- Tetzlaff K, Reuter M, Leplow B, Heller M, Bettinghausen E. Risk factors for pulmonary barotrauma in divers. *Chest* 1997, 112: 654-659.
- Underner M, Urban T, Perriot J, Peiffer G, Harika-Germanceau G, Jaafari N. Spontaneous pneumothorax and lung emphysema in cannabis users. *Pneumol Clin* 2018, 74: 400-415.
- Wahidi MM, Govert JA, Goudar RK, Gould MK, McCrory DC. Evidence for the treatment of patients with pulmonary nodules: when is it lung cancer? : ACCP evidence-based clinical practice guidelines (2nd Edition). *Chest* 2007, 132: 94S-107S.
- Wang R, Sui X, Schoepf UJ, Song W, Xue H, Jin Z, Schmidt B, Flohr TG, Canstein C, Spearman JV, Chen J, Meinel FG. Ultralow-radiation-dose chest CT: accuracy for lung densitometry and emphysema detection. *AJR* 2015, 204: 743-749.
- Wingelaar T, Bakker L, Nap F, Van Ooij PJ, Endert E, van Hulst R. Routine chest X-Rays are inaccurate in detecting relevant intrapulmonary anomalies during medical assessments of fitness to dive. *Frontiers in Physiology* 2021, 11: 613398.
- Wisselink HJ, Pelgrim GJ, Rook M, Imkamp K, van Ooijen PMA, van den Berge M, de Bock GH, Vliegenthart R. Ultra-low-dose CT combined with noise reduction techniques for quantification of emphysema in COPD patients: an individual comparison study with standard-dose CT. *Eur J Radiol* 2021, 138: 109646.
- Zaporozhan J, Ley S, Weinheimer O, Eberhardt R, Tsakiris I, Noshi Y, Herth F, Kauczor HU. Multi-detector CT of the chest: influence of dose onto quantitative evaluation of severe emphysema: a simulation study. *J Comput Assist Tomogr* 2006, 30: 460-468.

RÉSUMÉ

Scanner thoracique pour le dépistage d'anomalies aériques à risque de barotraumatisme pulmonaire pour l'aptitude médicale initiale des plongeurs militaires. B Bonnemaison, J-E Blatteau. Bull. MEDSUBHYP, 2022, 22 (1) : 13 - 28.

Introduction

La présence de lésions aériques intra-pulmonaires telles que les kystes, les blebs et les bulles d'emphysème prédispose aux barotraumatismes pulmonaires qui peuvent survenir lors de variations de pression, notamment lors des activités de plongée subaquatique. Ces accidents, bien que rares, peuvent toutefois avoir des conséquences dramatiques. Il existe peu de données sur la prévalence de ces anomalies dans la population générale indemne de pathologie respiratoire. La radiographie thoracique a longtemps été l'examen de référence pour le dépistage des pathologies respiratoires en médecine du travail. Dans le cadre du suivi médical des plongeurs militaires, elle était réalisée en visite initiale puis annuellement, avant d'être remplacée depuis octobre 2018 par le scanner thoracique, qui est devenu l'examen de référence des pathologies respiratoires. L'objectif de ce travail était d'évaluer la prévalence des différentes anomalies pulmonaires relevées depuis la réalisation du scanner thoracique, et les mettre en lien avec les caractéristiques de cette population et les résultats d'EFR.

Matériels et méthodes

330 dossiers de candidats à la pratique de la plongée militaire ayant réalisé une visite initiale entre octobre 2018 et mars 2021 ont été analysés dans le cadre d'une analyse rétrospective monocentrique. Les sujets ayant retiré leur candidature et les dossiers incomplets ont été exclus. Les données recueillies ont été : le sexe, l'âge, l'IMC, la présence d'antécédents de pathologies respiratoires, l'antécédent de tabagisme actif ou sevré, la prise de traitements, la présence d'allergies, la pratique de plongée, qu'elle soit régulière ou anecdotique, les résultats des EFR, les compte-rendu radiologiques des scanners thoraciques, ainsi que la décision d'aptitude.

Résultats

Cette étude a inclus 307 candidats plongeurs militaires, majoritairement masculins, de 25 ans d'âge médian. 6,5 % présentaient un antécédent respiratoire et 10,5 % un tabagisme actif. 19 % des sujets présentaient des EFR anormales, mais seulement 5 % de ces sujets ont été mis inaptes pour ce motif. Nous avons identifié 25 % de plongeurs présentant des anomalies scannographiques (76 sujets pour un total de 86

anomalies relevées), mais seuls 9 % de ces sujets ont été mis inapte à la suite du résultat du scanner. 76 % des scanners anormaux étaient des nodules bénins, dont 26 % mesuraient six millimètres ou plus de grand axe. Les anomalies à composante aérique représentaient 13 % des scanners anormaux avec six bulles d'emphysème, trois dilatations des bronches et une lésion kystique. Lors d'analyses en sous-groupe, aucune association n'a été retrouvée entre la présence de nodules et les caractéristiques générales de la population, tandis qu'une association statistique était mise en évidence sur les 6 sujets présentant des bulles d'emphysème avec un tabagisme actif ou une EFR anormale.

Conclusion

La réalisation systématique d'un scanner thoracique dans une population jeune exempte de pathologie pulmonaire a permis de mettre en évidence une majorité de nodules bénins. Les anomalies à composante aérique sont nettement moins fréquentes, mais leur présence impose pour la plupart une décision d'inaptitude dans le cadre de la pratique de la plongée militaire. Ces résultats plaident en faveur d'un dépistage des lésions pleuro-pulmonaires aériques systématique en visite initiale chez les plongeurs professionnels et, chez les plongeurs de loisir, en fonction des éléments cliniques et des résultats de l'EFR.

Mots-clés

Barotraumatisme pulmonaire, lésion aérique, bulle, blebs, kyste, nodule, scanner thoracique, épreuve fonctionnelle respiratoire, médecine de plongée, médecine de prévention

2ÈME CONGRÈS COMMUN
Médecine
Subaquatique
Hyperbare et
Aérospatiale

POUR INFO ET INSCRIPTION :
SCANNER LE QR CODE

TOULOUSE, LE 17 JUIN 2022

RESUMES

2^{ème} Congrès Médecine subaquatique, hyperbare et aérospatiale

du 17 juin 2022.

RESUMES

L'IMMERSION SECHE : UN MODELE DE SIMULATION DES EFFETS DE LA MICROGRAVITE.

A Pavy-Le Traon. Service de neurologie CHU Toulouse et Medes, Institut de Médecine et Physiologie Spatiales, Toulouse. (France).

Des moyens de simulation sont utilisés au sol pour simuler les effets de la microgravité afin de mieux évaluer les phénomènes d'adaptation à ce nouvel environnement et mettre au point les moyens préventifs utilisés en vol appelés contre-mesures. A côté de l'alitement anti-orthostatique ou Head-down bed rest, l'immersion sèche est un autre modèle qui permet de reproduire rapidement les modifications observées en vol spatial. Ce modèle consiste à immerger le sujet dans de l'eau à une température constante d'environ 33-34°C et dont il est isolé par un tissu élastique imperméable. La durée de l'immersion sèche est en général de quelques jours. Cette situation va entraîner comme au cours du vol spatial une redistribution des fluides corporels vers la région thoraco-céphalique, une hypokinésie et une décharge des appuis mécaniques. Nous verrons que ceci conduit à des modifications cardio-vasculaires, musculo-squelettiques, métaboliques et sensori-motrices et l'intérêt que cela a en médecine spatiale. Un focus sera fait sur les modifications neuro-ophtalmologiques induites par ce modèle.

DECOMPRESSION DU SCAPHANDRIER SATURE ; DECOMPRESSION DE L'ASTRONAUTE ET SORTIE EXTRAVEHICULAIRE JC Le Péchon. JCLP Hyperbarie – hyperbar@club-internet.fr

1 – INTRODUCTION Quels sont les conditions des confinements de ces deux professionnels Pressions, gaz inertes, pressions partielles d'oxygène... durées de séjour

2 – OBJECTIFS DES DECOMPRESSIONS Retour à la pression atmosphérique ou accès à la pression du scaphandre EVA Exemples : de « 150 m » ou 16 bars(a) à 1 bar(a) ou de 1 bar(a) à 0,3 bar(a) Dans les deux cas il s'agit de décompressions de saturation

3 - PROCEDURES Scaphandrier : Décompression lente à PO₂ constant permettant un gradient de sursaturation faible et décroissant jusqu'à la pression atmosphérique Astronaute : Dénitrogénéation à pression constante sous oxygène pur puis baisse de pression

4 - DIFFERENCES Scaphandrier : décompression après la fin du travail à réaliser, et au repos Astronaute : décompression avant le travail à réaliser, activité physique intense en phase d'élimination de gaz...

5 – DISCUSSION ET RESULTATS PRATIQUES Scaphandrier : procédure très sûre Astronaute : validation au sol taux de DCS environ 5 %, en apesanteur aucun cas de DCS déclaré

L'EXPERIENCE MARSEILLAISE APRES 15 ANS DE RECHERCHE EN PHYSIOLOGIE

INTEGREE A L'AERONAUTIQUE. M Coulange^{1,2}, J-C Reynier², A Oppenheim-Delauze³, A Oskian³, M Giret³, H Marotte⁴. ¹ Service de médecine hyperbare, subaquatique et maritime, CHU Sainte-Marguerite, APHM, 270, boulevard de Sainte-Marguerite, 13009 Marseille, France. ² INSERM 1263 – INRA 1260, TEAM V : Adenosinergic system and cardiovascular disease, Faculté de médecine, Aix-Marseille Université, 51, boulevard Pierre-Dramard, 13015 Marseille, France. ³ COMEX, 36 Bd de l'Océan, 13009 Marseille, France. ⁴ Université de Paris-Cité, centre universitaire des Saints-Pères, 45 rue des Saints-Pères 75270 Paris Cedex 06, France.

Depuis plus de 50 ans, l'Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille (APHM) dispose d'une chambre

hypobare. Tout d'abord utilisée de façon très sporadique dans le cadre de préparations à des sauts de très haute altitude dans le domaine civil, son activité s'accélère à partir de 2008 suite à des demandes multiples dans le domaine de la recherche et du développement en aéronautique que ce soit pour des dispositifs de protection contre les fumées ou encore des systèmes d'oxygénation en cas de dépressurisation. L'École du Personnel Navigant d'Essais et de Réception (EPNER), basée au Centre d'Essais en Vol d'Istres (CEV) sollicite également à cette époque les auteurs pour rendre plus réalistes et plus accessibles les tests de sensibilisation au risque hypoxique tout en optimisant la sécurité. En 2016, l'augmentation d'activité devient incompatible avec l'activité hospitalière du centre hyperbare de l'APHM. Elle est donc transférée au centre d'essai hypobare de la Compagnie Maritime d'Expertise (COMEX). Cette étape permet d'intégrer cette démarche dans un processus industriel et ainsi de garantir un très haut niveau d'adaptabilité, de réactivité, de technicité et de sécurité. L'objectif de ce travail est de faire le bilan d'activité sur 15 ans de tests.

Méthode : les auteurs ont donc recueilli le nombre total de sessions. Pour chaque session, ils ont précisé le type d'exposition, le nombre de sujets exposés, l'altitude maximale, les paramètres physiologiques (symptomatologie, fréquence cardiaque, saturation en oxygène, fréquence ventilatoire) et d'éventuels événements indésirables graves de 2008 à 2022.

Résultats : Les auteurs ont effectué 39 sessions de tests avec en moyenne 8 sujets exposés à chaque session [1 à 25] soit un total de 294 sujets. L'altitude maximale avec supplémentation en oxygène pur a été de 40 000 pieds (12 000 m). Aucun événement indésirable grave n'a été constaté. Aucun barotraumatisme ORL n'a été signalé. Aucun accident de désaturation n'est survenu. Lors des tests de sensibilisation au risque hypoxique, les auteurs mentionnent un seul malaise d'origine vagale sans conséquence, sur plus de 140 personnels navigants testés. Aucun incident n'a été enregistré lors des tests de dispositifs de protections contre les fumées d'incendies. Trois syncopes hypoxiques ont toutefois été déclarées à une altitude supérieure à 36 000 pieds (11 000 m) lors de tests d'évaluation des systèmes d'oxygénation, malgré le respect des critères d'arrêt. Il n'y a eu aucune conséquence grave grâce à l'intervention immédiate de l'équipe médicale.

Conclusion : Même si le Département de Médecine Aéronautique Opérationnel (DMAO) à Mont-de-Marsan reste le centre de référence français, Marseille a su développer à l'APHM puis à la COMEX un centre d'essai hypobare qui permet actuellement de réaliser des tests de sensibilisation au risque hypoxique à une altitude simulée de 20 000 pieds (6 000 m) en faisant respirer 12 % d'oxygène à une pression ambiante de 715 hPa sur simulateur de vol ainsi que des protocoles de recherche et de certification sur le sujet sain jusqu'à une altitude de 40 000 pieds avec un niveau de sécurité élevé. L'expertise bienveillante du Pr Marotte, la haute technicité historique de COMEX, la présence d'une équipe médicale de l'APHM spécialisée en médecine d'urgence et en physiologie intégrée en milieu extrême, l'utilisation de mélange hypoxique en hypobarie pour contrôler le risque de barotraumatisme, la dénitrogénéation systématique dès 25 000 pieds (7 600 m) pour prévenir le risque d'accident de désaturation et l'arrêt de l'exposition au moindre signe clinique de gravité ou à l'expression d'un inconfort majeur, à une fréquence cardiaque supérieure à 140/min et/ou à une saturation en oxygène inférieure à 60 % peuvent expliquer l'absence d'événements indésirables graves malgré des conditions environnementales extrêmes. La présence de trois syncopes hypoxiques à partir de 36 000 pieds (11 000 m), malgré le respect des critères d'arrêt, incitent toutefois les auteurs à rediscuter de l'intérêt de tests de système d'oxygénation à une altitude supérieure à 35 000 pieds (10 600 m).

FACTEURS HUMAINS ET ACCIDENTOLOGIE EN AVIATION. A Vacher^{1,2}, D Delaitre¹. ¹ BEA, ²IRBA. (France).

Bien avant les débuts de l'aviation moderne, les accidents étaient déjà intimement associés à l'inadaptation de l'être humain aux contraintes du milieu aérien dont l'exploration est toute récente à l'échelle de l'évolution de notre espèce. L'ingénierie a contribué aux progrès de la sécurité de l'aviation au travers d'une approche analytique des défaillances, en particulier par des modélisations physiques pour la construction des aéronefs et organisationnelles pour la gestion des opérations. Cette approche analytique soutient une démarche qualité

d'amélioration continue de la fiabilité technique et organisationnelle. Toutefois, les accidents de l'aviation moderne, civile et militaire, questionnent cette approche. D'un côté, par l'analyse des défaillances multiples, les enquêtes permettent un réexamen des conditions de validité des modèles de fonctionnement définis a priori. D'un autre côté, par l'analyse des ressources mobilisées par les acteurs lorsque la situation leur échappe, ils révèlent les lacunes de l'approche analytique qui se focalise sur l'identification de défaillances de chaque élément du système pris isolément au profit d'une approche plus globale, dite systémique, focalisée sur l'étude des interactions dynamiques entre l'ensemble des éléments du système aérien. L'ensemble de ces procédés permet de développer des systèmes aériens toujours plus sûrs et performants cherchant à optimiser les interactions humain-système. Cette « vitalité », dans les activités de hautes performances, ne doit pas faire oublier que le rapport du pilote au milieu aérien est loin d'être inné comme nous le rappelle en particulier les accidents qui surviennent dans l'aviation de loisir et certaines activités opérationnelles militaires extrêmes.

CHOIX DE L'ATMOSPHERE DES HABITATS PLANETAIRES, DES VEHICULES PLANETAIRES PRESSURISES ET DES SCAPHANDRES D'EXPLORATION PLANETAIRE. B COMET. MEDES, Toulouse. (France).

Dans le cadre du programme ARTEMIS auquel participe l'Agence Spatiale Européenne, les américains ont fait durant les dernières années les grands choix qui permettront de réaliser des activités hors habitat lors des missions lunaires et ensuite martiennes. Le choix de l'atmosphère du scaphandre, des habitats et du véhicule pressurisé (« rover ») aura un fort retentissement sur la complexité des opérations d'exploration planétaire. L'auteur décrit et explique les raisons de ces choix tels qu'ils sont connus en 2022.

ELEMENTS DE PHYSIOPATHOLOGIE DES ŒDEMES PULMONAIRES EN IMMERSION ET EN HAUTE ALTITUDE. J Regnard¹, P Louge², M-A Magnan², O Castagna³, E Gempp⁴, A.Henckes⁵.

¹Physiologie, CHU de Besançon et Université de Franche Comté, Besançon. ²Hôpitaux universitaires de Genève. ³ERRSO – Institut de Recherches Biomédicales de Armées, Toulon. ⁴Médecine subaquatique et hyperbare, HIA Sainte Anne, Toulon. ⁵Unité de médecine hyperbare, CHU de Brest. (France).

L'œdème pulmonaire résulte de l'accumulation d'eau plasmatique dans l'interstitium pulmonaire. Progressive, cette infiltration commence dans les cloisons interlobulaires et les gaines péribronchiques où la texture tissulaire interstitielle est lâche et donc très compliant. Les images tomодensitométriques en nids d'abeille traduisent la surcharge hydrique des espaces interlobulaires (cloisons interlobulaires épaissies) et les l'images aériques bronchiolaires l'infiltration de gaines péribronchiques. Les images échographiques en « queue de comète » résultent aussi de l'infiltration interstitielle. Moins compliant l'interstitium péri-alvéolaire est infiltré plus lentement et l'entrée d'eau dans l'espace alvéolaire est encore plus tardive (protection par le surfactant) mais ensuite brutale (Staub 1967). C'est le stade des images de « verre dépoli » et, au delà, de « zone blanche ». Ces événements ne nécessitent ni rupture capillaire ni hémorragie. L'extravasation est mécanique, par augmentation de la pression transmurale dans les vaisseaux à paroi fine : capillaires et surtout veinules post-capillaires où les jonctions entre cellules endothéliales sont lâches et peuvent s'ouvrir en cas de forte pression. Les veinules pulmonaires cheminent dans les espaces interlobulaires avant de se rassembler en veines pulmonaires et de gagner l'atrium gauche. Les veinules pulmonaires reçoivent aussi les veinules bronchiques dont le débit sanguin a perfusé les parois bronchiques et la plèvre. Toute augmentation de pression dans l'atrium gauche reflue vers les veines pulmonaires et bronchiques (en cas d'augmentation du débit cardiaque lors de l'exercice, ou lorsque la post-charge ventriculaire gauche est majorée par de fortes résistances artériolaires –froid, HTA- ou par la compression abdominale...) et tend à forcer l'extravasation vers l'interstitium lâche.

Des causes diverses participent ainsi à l'augmentation de pression sanguine veineuse et capillaire qui conduit à l'extravasation. Pour l'œdème pulmonaire de haute altitude (OPHA), la vasoconstriction pulmonaire hypoxique est dispersée, non homogène et dérouté le débit sanguin vers les régions où elle ne s'exerce pas, ce qui y cause l'augmentation de pression. La vasoconstriction hypoxique se développe lentement (en 2 à 8 h d'exposition à l'hypoxie). L'inhalation prolongée d'air sec (en particulier froid et en altitude) crée une inflammation de la muqueuse bronchique où le débit sanguin et la perméabilité capillaire sont alors augmentés. En immersion, la

redistribution sanguine de la périphérie vers le thorax éventuellement majorée par le froid est immédiate et toujours présente. Elle cause une « congestion » pulmonaire consubstantielle à l'immersion. Dans la survenue de œdèmes pulmonaires d'immersion et de plongée (OPI) la ventilation avec charge inspiratoire imposée par le déséquilibre hydrostatique transthoracique positionnel ou/et en rapport avec l'appareillage ventilatoire majore la précharge cardiaque et les pressions dans la circulation pulmonaire. La gravité influence sensiblement la répartition de la perfusion et de la ventilation (volume sanguin maximum et tendance à la fermeture des espaces aériques dans les régions déclives). Le développement de l'œdème pulmonaire d'immersion est beaucoup plus rapide que celui de l'œdème hypoxique d'altitude. Quand elle a lieu, la vasoconstriction artérielle pulmonaire n'est pas hypoxique mais plutôt en rapport avec une réactivité pulmonaire plus grande chez certaines personnes, et volontiers déclenchée par le froid : son rôle semble moins déterminant que pour l'OPHA. Le développement de l'œdème pulmonaire d'immersion est beaucoup plus rapide que celui de l'œdème hypoxique d'altitude (minute ou dizaines de minutes).

En altitude comme en immersion, l'activité physique majore sensiblement la précharge cardiaque, les volumes sanguins et les pressions dans les cavités cardiaques et dans la circulation pulmonaire. Mais l'activité physique détermine aussi largement le déclenchement des OPHA et OPI en augmentant le travail ventilatoire. En effet, pour assurer les grands débits de ventilation, il faut créer de grandes amplitudes de pressions pleurales et alvéolaires. Ces pressions fortement négatives pour l'inspiration s'imposent aussi dans les espaces interstitiels thoraciques compliants (à trame tissulaire lâche) et donc sur l'adventice des veines pulmonaires et bronchiques. De même toute augmentation des résistances ventilatoires (bronchoconstriction due au froid, déséquilibre hydrostatique, espace mort –tuba, gaz dense...) augmente le travail ventilatoire et majore ainsi une dépression interstitielle à chaque inspiration. La combinaison de fortes pressions intra-vasculaires et de pression interstitielles négatives conduit à une extravasation accélérée qui déborde la capacité de résorption lymphatique bien diminuée puisque les fortes pressions dans ses espaces veineux grèvent le débit lymphatique. La collecte lymphatique pulmonaire est aussi inhibée par les grandes concentrations de peptide natriurétique atrial libéré au cours des exercices intenses ou prolongés, ce qui contribue à précipiter l'expansion de l'œdème pulmonaire.

L'activité physique est depuis longtemps documentée comme un facteur déterminant ou précipitant de la survenue des OPHA et OPI et leur prévention fait largement appel à la modération de l'intensité de l'exercice.

OPHA et OPI partagent donc les deux composantes d'une extravasation, une pression sanguine fortement augmentée dans les circulations bronchique et pulmonaire et une traction vers l'interstitium pulmonaire par fort abaissement des pressions pleurale et dans les voies aériennes.

Remerciements : Alain Boussuges, Mathieu Coulange, et ceux dont les discussions, écrits et questions ont poussé/tiré le mûrissement des idées.

REFERENCE

Staub NC, Nagano H, Pearce ML. Pulmonary edema in dogs : especially the sequence of fluid accumulation in the lungs. *J Appl Physiol*, 22 : 227-240, 1967.

Correspondance : < jacregnard@free.fr >

SCANNER THORACIQUE POUR LE DEPISTAGE D'ANOMALIES AERIQUES A RISQUE DE BAROTRAUMATISME PULMONAIRE POUR L'APTITUDE MEDICALE INITIALE DES PLONGEURS MILITAIRES. B Bonnemaïson, J-E Blatteau. Institut de Recherches Biomédicales de Armées, Toulon. ⁴Médecine subaquatique et hyperbare, HIA Sainte Anne, Toulon (France).

Introduction

La présence de lésions aériques intra-pulmonaires telles que les kystes, les blebs et les bulles d'emphysème prédispose aux barotraumatismes pulmonaires qui peuvent survenir lors de variations de pression, notamment lors des activités de plongée subaquatique. Ces accidents, bien que rares, peuvent toutefois avoir des conséquences dramatiques. Il existe peu de données sur la prévalence de ces anomalies dans la population

générale indemne de pathologie respiratoire. La radiographie thoracique a longtemps été l'examen de référence pour le dépistage des pathologies respiratoires en médecine du travail. Dans le cadre du suivi médical des plongeurs militaires, elle était réalisée en visite initiale puis annuellement, avant d'être remplacée depuis octobre 2018 par le scanner thoracique, qui est devenu l'examen de référence des pathologies respiratoires. L'objectif de ce travail était d'évaluer la prévalence des différentes anomalies pulmonaires relevées depuis la réalisation du scanner thoracique, et les mettre en lien avec les caractéristiques de cette population et les résultats d'EFR.

Matériels et méthodes

330 dossiers de candidats à la pratique de la plongée militaire ayant réalisé une visite initiale entre octobre 2018 et mars 2021 ont été analysés dans le cadre d'une analyse rétrospective monocentrique. Les sujets ayant retiré leur candidature et les dossiers incomplets ont été exclus. Les données recueillies ont été : le sexe, l'âge, l'IMC, la présence d'antécédents de pathologies respiratoires, l'antécédent de tabagisme actif ou sevré, la prise de traitements, la présence d'allergies, la pratique de plongée, qu'elle soit régulière ou anecdotique, les résultats des EFR, les compte-rendu radiologiques des scanners thoraciques, ainsi que la décision d'aptitude.

Résultats

Cette étude a inclus 307 candidats plongeurs militaires, majoritairement masculins, de 25 ans d'âge médian. 6,5 % présentaient un antécédent respiratoire et 10,5 % un tabagisme actif. 19 % des sujets présentaient des EFR anormales, mais seulement 5 % de ces sujets ont été mis inaptes pour ce motif. Nous avons identifié 25 % de plongeurs présentant des anomalies scanographiques (76 sujets pour un total de 86 anomalies relevées), mais seuls 9 % de ces sujets ont été mis inapte à la suite du résultat du scanner. 76 % des scanners anormaux étaient des nodules bénins, dont 26 % mesuraient six millimètres ou plus de grand axe. Les anomalies à composante aérienne représentaient 13 % des scanners anormaux avec six bulles d'emphysème, trois dilatations des bronches et une lésion kystique. Lors d'analyses en sous-groupe, aucune association n'a été retrouvée entre la présence de nodules et les caractéristiques générales de la population, tandis qu'une association statistique était mise en évidence sur les 6 sujets présentant des bulles d'emphysème avec un tabagisme actif ou une EFR anormale.

Conclusion

La réalisation systématique d'un scanner thoracique dans une population jeune exempte de pathologie pulmonaire a permis de mettre en évidence une majorité de nodules bénins. Les anomalies à composante aérienne sont nettement moins fréquentes, mais leur présence impose pour la plupart une décision d'inaptitude dans le cadre de la pratique de la plongée militaire. Ces résultats plaident en faveur d'un dépistage des lésions pleuropulmonaires aériennes systématique en visite initiale chez les plongeurs professionnels et, chez les plongeurs de loisir, en fonction des éléments cliniques et des résultats de l'EFR.

PORTEUR D'UNE CARDIOPATHIE CONGÉNITALE, PUIS-JE PLONGER ? PUIS-JE PILOTER ? J-M Schleich. Cardiologue spécialisé dans les cardiopathies congénitales de l'adulte et les enfants, CHU Rennes (France).

Le nombre d'adeptes aspirant à la pratique en loisir de la plongée sous-marine en scaphandre s'accroît. Dans les dernières recommandations de la Fédération française d'études et de sports sous-marins, les cardiopathies congénitales font parties des contre-indications définitives à la pratique de cette activité dans la liste éditée par la Commission médicale et de prévention nationale. Parallèlement, en raison des progrès dans leur prise en charge, le pronostic des cardiopathies congénitales a considérablement été amélioré. La cohorte de patients ne cesse d'augmenter. Leur qualité de vie a aussi été améliorée, leur permettant de prétendre et d'accéder aux activités physiques et sportives dont on connaît les effets bénéfiques. La question de l'aptitude à la plongée se pose donc de plus en plus souvent. Nous revoyons les différents types de plongée, les performances physiques nécessaires à leur pratique, leurs effets sur les fonctions cardiovasculaires et les éléments médicaux devant être pris en compte pour autoriser sa pratique à différents niveaux de difficulté. En raison de leur diversité et d'une importante hétérogénéité au sein même d'un groupe de cardiopathies congénitales, nous proposons pour chaque patient une évaluation précise de son aptitude à partir de critères cliniques et paracliniques communs à l'ensemble des

cardiopathies congénitales.

A partir de cette évaluation, nous pourrions proposer et discuter de ces critères afin d'évaluer l'aptitude aéronautique des pilotes ayant une cardiopathie congénitale.

LE BIEN-ETRE DES PATIENTS EN CENTRE HYPERBARE N Laurente¹, M Larcher². ¹Coordinatrice de la Commission des Techniciens et Paramédicaux Hyperbaristes, Centre de médecine hyperbare Hôpitaux Sud, AP-HM. ²Membre de la CTPH, Centre de médecine hyperbare Hôpitaux Sud, AP-HM. Marseille (France).

Comment peut-on améliorer la qualité de vie des patients soignés dans nos centres hyperbares ?

Aujourd'hui, le « bien-être » est un élément essentiel de la prise en charge thérapeutique globale et pluridisciplinaire des patients. La CTPH a décidé de s'interroger sur ce sujet qui préoccupe également de plus en plus l'ARS lors des accréditations.

Un groupe de travail a élaboré un questionnaire pour établir un état des lieux de ce qui existe pour accueillir les patients dans les différents centres hyperbares francophones. Celui-ci a été envoyé à 80 hyperbaristes. Nous avons reçu 22 réponses de 12 centres hyperbares différents.

L'analyse nous permet de nous rendre compte que peu d'outils existent pour la représentation de nos différents centres hyperbares excepté le livret d'accueil. Peut-être pourrions-nous perfectionner nos outils de communication afin d'obtenir une meilleure visibilité de nos pratiques hyperbares.

De plus, les patients font en général deux séances par jour, la moitié prennent leur repas sur place mais seulement 41 % ont un espace dédié qui est la plupart des temps assez exigü. Le déroulé de séance reste pénible (peu de divertissement). Une amélioration de leurs conditions environnementales, la création d'espaces de détente et de relaxation permettrait une meilleure qualité de vie de nos patients.

70 % des médecins prescrivent des d'anxiolytiques aux patients stressés (notamment lors des premières séances). Les soins relationnels : Hypnose, RESC (Résonance Énergétique par Stimulation Cutanée) , sophrologie, musicothérapie, psychologie, réflexologie, sont peu développés et peu de personnel sont formés à ces pratiques (formation longue, manque d'effectif,...). Afin d'améliorer le bien-être physique et psychique des patients, nous pourrions accentuer l'importance de ces approches complémentaires.

Une parenthèse de douceur et de bien-être, les soins de confort permettent aux patients de se concentrer sur eux même, autrement que par le prisme de la maladie. Un véritable outil thérapeutique qui permettrait d'abaisser le seuil de la douleur et les doses de médicaments prescrits.

Sensibiliser les équipes à ces axes d'amélioration apporterait aux patients un renforcement de l'estime de soi, une amélioration de leur bien-être, une diminution de leur anxiété et donc une meilleure tolérance et adhésion au traitement hyperbare.

Les associations de patients, de plus en plus présentes au sein des centres hyperbares, vont dans ce sens. Des bénéfices physiques, psychologiques et émotionnels ont été mesuré de façon objective. La prise en compte du bien-être du patient dépend de l'existence d'une culture partagée par tous les membres de l'équipe et nécessite une collaboration réelle entre médecins, infirmiers et patients volontaires.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

MANUSCRIT:

Le manuscrit soumis pour publication sera adressé, à l'Editeur du Bulletin (Dr JC ROSTAIN – C2VN Section 5, Faculté de Pharmacie, Campus Timone, 27 Bd J. Moulin - Marseille 13005 Marseille), avec les tableaux, figures, annexes et résumés (total de 10 pages maximum, sauf accord préalable) de préférence par courriel à jean-claude.rostain@univ-amu.fr

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 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, les soulignements et les notes de bas de page. 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 un titre en anglais, 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,
- le titre et le résumé en anglais, l'introduction, les matériels et méthode, les résultats, la discussion, les références, le résumé en français et un titre courant.

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 dans une revue scientifique : 1/ le nom de tous les 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, le doi, Epub et le PMID s'ils existent.
- pour un livre : 1/ le nom de tous les 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 de tous les 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. doi: 10.1152/jappl.1987.63.1.421.PMID: 3624144

Blatteau JE, David HN, Vallée N, Meckler C, Demaistre S, Risso JJ, Abraini JH. Cost-efficient method and device for the study of stationary tissular gas bubble formation in the mechanisms of decompression sickness. *J Neurosci Methods*. 2014, 236: 40-43. doi: 10.1016/j.jneumeth.2014.07.010. Epub 2014 Jul 23. PMID: 25064190

LIVRE :

Jannasch HW, Marquis RE, Zimmerman AM, (eds). *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, (ed). *Comparative physiology of environmental adaptations*. Karger, Basel. 1987, p 38-47.

ILLUSTRATIONS:

Ne fournir que des photographies, des figures et schémas aux dimensions prévues pour la publication ou des reproductions de bonne qualité sur ordinateur. Envoyer les figures au format JPEG.

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.

Dactylographier sur une feuille à part les légendes des figures. Légendes et figures sont a envoyés séparées du texte. séparées du texte.

SOMMAIRE

- Nouvelle procédure de décompression pour les travaux hyperbares en altitude.
JC Le Péchon. 01 - 06.
- Effet de l'exposition hyperbare sur les paramètres mécaniques et électroniques des
défibrillateurs automatiques implantables (DAI).
R Guenneugues, A Henckes, V Mansourati, J. Mansourati. 07 – 12.
- Scanner thoracique pour le dépistage d'anomalies aériques à risque de barotraumatisme
pulmonaire pour l'aptitude médicale initiale des plongeurs militaires.
B Bonnemaïson, J-E Blatteau. 13 - 28.
- 2eme congrès médecine subaquatique, hyperbare et aérospatiale du 17 juin 2022.
Résumés 29 – 35.