

<b>Titre</b>	Revue bibliographique O-Dive PRO
<b>Société</b>	AZOTH SYSTEMS
<b>Référence</b>	Biblio_PRO_site_fr_AM
<b>Statut</b>	En cours
<b>Version</b>	/

	<b>Nom</b>	<b>Fonction</b>	<b>Date</b>	<b>Visa</b>
<b>Rédigé par</b>	Asya METELKINA	IR	24/04/2020	/
<b>Révision</b>	Julien HUGON	IR	12/05/2020	/
<b>Approuvé par</b>	Axel BARBAUD	CEO	14/05/2020	/

## **Contexte**

L'activité industrielle se trouve historiquement en quête de deux objectifs complémentaires : la performance et la sécurité - et aujourd'hui plus que jamais, dans le respect de l'environnement.

Dans les domaines de la plongée industrielle et des constructions sous-marines ou sous-terraines, ces contraintes de sécurité sont particulièrement élevées car aux risques liés aux activités industrielles elles-mêmes s'ajoutent des risques supplémentaires liés à l'exposition hyperbare des travailleurs.

En effet, l'exposition hyperbare engendrée par la plongée ou par les travaux en atmosphère sous pression génère - lors puis après la décompression - une production de microbulles de gaz dans leur organisme. Ces microbulles qui grandissent alors et pénètrent dans la circulation sanguine, peuvent, dans certains cas, devenir pathogènes et mener à un accident de décompression (ADD).

Les bulles ne sont pas synonymes d'un accident car le corps humain dispose de nombreux mécanismes pour les éliminer : elles sont filtrées par le filtre pulmonaire et éliminées avec la respiration. Néanmoins une grande quantité de bulles augmente significativement le risque d'accident car les bulles peuvent alors forcer le filtre pulmonaire et pénétrer dans la circulation artérielle ou provoquer une obstruction des vaisseaux sanguins, alors que les bulles tissulaires peuvent croître suffisamment pour endommager des tissus et/ou provoquer les réactions inflammatoires.

## **Les microbulles dans l'évaluation des tables et des procédures de décompression**

Depuis plus d'une trentaine d'années, le Defence Research and Development Canada (DRDC, anciennement DCIEM), l'Institute of Environmental Medicine de l'Université de Pennsylvanie (IFEM) et le Health and Safety Executive Britannique (HSE) évaluent les niveaux de stress physiologiques associés à la décompression (validation des procédures et des tables) à l'aide des mesures de bulles circulantes détectées dans les vaisseaux sanguins après l'exposition [1-7].

Ces bulles veineuses (VGE - venous gas emboli) sont détectées avec un appareil Doppler à ultrasons (détection audio) ou un échographe (imagerie) et leur nombre est évalué sur une échelle non-linéaire quantifiée en grades de 0 (absence de bulles) à 4 (beaucoup de bulles) selon des systèmes de cotation standard (Kisman-Masurel [8] ou Spencer [9] pour l'audio, Eftedal-Brubakk [10] pour l'imagerie).

Les grades de bulles fournissent une indication de stress de décompression car ils reflètent, au moins partiellement, la quantité de bulles produites par l'organisme et leur élimination. De nombreuses études ont montré une forte association entre la quantité bulles et le risque d'ADD [9,11-21]. Même si les grades de bulles élevés restent de faibles prédicteurs de la survenue d'un accident [22], l'absence des VGE est un bon indicateur de sécurité. Par exemple, parmi les 3234 plongées Air, Nitrox et Heliox avec 73 ADD analysées dans [18], 66 cas d'ADD étaient associés avec les grades 3 ou 4 (taux 7.2%), alors qu'un seul ADD était enregistré pour le grade 0 (taux 0.07%).

HSE Britannique a organisé deux conférences scientifiques accompagnées de groupes de réflexion portant sur la sécurité dans la plongée industrielle [6] et dans les travaux à l'air comprimé [7]. Ces deux conférences ont confirmé l'intérêt de mesures de VGE avec un Doppler à ultrasons dans l'évaluation de la qualité des procédures en laboratoire et sur le terrain. Elles ont conclu que l'évaluation doit se baser sur des statistiques de production de bulles, tout particulièrement en chaque début de projet ou lors de changements de procédure ou de conditions de travail [7].

En utilisant des données historiques des mesures de bulles et des cas d'ADD pour différentes expositions, et en s'appuyant sur les outils de modélisation mathématique (bubble growth model [23] et modèle de V.Flook [24,25]), des critères d'acceptabilité de procédures en termes de VGE ont été proposés :

Pour la plongée non à saturation : le DRDC a fixé expérimentalement le seuil de 50% de grades 2 ou plus pour distinguer les procédures acceptables des procédures à risque [4]. Dans [26] il a été estimé qu'un seuil de moins de 50% des grades 3 ou 4 sur une exposition assure de niveau de risque inférieur à 5%.

Pour les travaux à l'air comprimé : un critère de 20% de grade 3 ou 4 observés sur l'ensemble des travailleurs a été proposé comme un indicateur d'une procédure qui nécessite une analyse détaillée ou une révision éventuelle [7]. Il a été toutefois souligné dans [7] que même les procédures avec de bonnes statistiques historiques d'ADD (avec peu ou pas d'accidents enregistrés) peuvent générer jusqu'à 60% de grades 1 ou 2 et parfois jusqu'à 10 % de grades 3.

### **Exemples d'utilisation de détection de VGE pour évaluer les procédures**

Ces critères ont été appliqués, par exemple, dans [27] pour montrer qu'une procédure de décompression surface (SurDO2) pour une plongée à 39.4m à 30 min avec un travail modéré au fond produisait un niveau de bulles et de risque assez élevé : à partir des mesures réalisées, les auteurs ont estimé qu'avec 95% de probabilité on s'attend à plus de 50% de plongeurs avec le grade 3 ou plus sur cette exposition. Il a été suggéré de rallonger la décompression pour s'assurer de l'élimination suffisante des bulles musculaires pour cette exposition.

En tunneling, la décompression à l'air était remplacée par une décompression à l'oxygène (séquences de 20 min d'oxygène et 5 minutes d'air) pour la table Blackpool suite à des mesures de bulles faites par HSE qui ont montré un niveau de risque élevé en cas de décompression à l'air (grade médian 3) et une réduction significative de ce risque pour une décompression à l'oxygène (grade médian 0) [28]. Les techniques Doppler ultrasonores ont été déjà utilisées en conditions opérationnelles pour s'assurer de la sécurité suite à un changement opérationnel imposé par une panne de TBM lors de Western Scheldt Tunneling Project au Pays-Bas (passage d'expositions non-saturantes à des expositions saturantes, avec une utilisation de trimix dans les deux cas) [29].

### **Approche Bayésienne à la relation entre VGE et ADD**

Dans [31] les auteurs proposent une approche Bayésienne pour prédire le risque d'ADD à partir des mesures de bulles, présentant pour avantage de combiner les connaissances préalables avec les résultats des mesures de bulles :

*« We present a method for estimating DCS risk of a decompression procedure based on observation of intravascular gas bubbles in test subjects and the correspondence between gas bubbles and DCS risk that has been established previously. The method makes use of Bayesian statistics to combine test observations with previous knowledge and assumptions. »*

Ils utilisent les données de 1726 plongées expérimentales à l'air et au nitrox [18] pour estimer le risque d'ADD en fonction de grades de bulles. Les auteurs appliquent un calcul Bayésien pour en déduire la

probabilité d'un ADD sur une exposition donnée à partir des mesures de bulles sur un groupe de plongeurs sur cette exposition et d'un a priori sur la production de bulles tiré de 274 plongées de [5]. L'avantage majeur de cette méthode est ce qu'avec un nombre d'essais assez petit (7-15) sans ADD on peut déjà comparer deux procédures et obtenir une première estimation de risque d'ADD. Par exemple, avec cette méthode les auteurs estiment à 4.6% (95%IC : 1.5%-7.9%) le risque d'ADD sur une procédure après 7 expositions sans aucun ADD, mais avec 4 plongées sur 7 accompagnées de grade 3 ou 4. Le point faible est l'hypothèse d'indépendance conditionnelle de risque d'ADD de l'exposition étant donné des grades. En autres termes, ici on suppose que deux expositions avec les mêmes statistiques de VGE ont exactement le même risque d'ADD.

### **VGE, ADD et paramètres d'exposition**

[31] ont analysé des données des plongées à l'air et au Nitrox de la base de données du DRDC sous un angle différent : les auteurs ont montré que pour une prédiction de risque d'ADD, il est nécessaire de tenir compte à la fois des grades de bulles, mais aussi de la sévérité d'exposition [32], mesurée en termes de profondeur et de durée de la plongée. De plus, les auteurs ont comparé les mesures sous-clavières aux précordiales non pas uniquement du point de vue de cohérence des deux mesures, mais aussi comme des indicateurs de risque d'ADD, en concluant que les VGE sous-clavières sont un bon indicateur de risque au même terme que les VGE précordiales. Ce résultat est en accord avec les observations de [18], même si les mesures sous-clavières ont été généralement considérées comme supplémentaires pour améliorer la sensibilité des mesures précordiales [33].

### **Conclusion**

La littérature révisée ci-dessous montre l'intérêt des mesures de bulles par Doppler pour l'évaluation et l'amélioration de la sécurité dans les domaines de la plongée industrielle et des travaux à l'air comprimé. Elles constituent pour l'heure les seules mesures objectives et quantifiables de stress de décompression susceptibles de donner une indication sur la qualité des procédures et ce bien avant l'occurrence d'un premier ADD. Depuis plus de 30 ans, des instances de réglementation directes ou indirectes (DRDC, HSE, IFEM) ont travaillé à l'émission de recommandations fondées sur l'exploitation de mesures de bulles dans l'évaluation des procédures, avec plusieurs critères proposés pour s'assurer d'un niveau sécurité convenable. Ces critères sont très empiriques, et leur défaut principal est d'être basé sur des statistiques de VGE uniquement, en faisant abstraction du risque intrinsèque lié à l'exposition elle-même (risque induit par la charge en gaz à évacuer par l'organisme du plongeur et la procédure employée). Azoth Systems a intégré l'ensemble de ces connaissances en couple avec l'analyse de milliers d'expositions pour développer une approche combinée tenant compte en synthèse du risque intrinsèque associé à la charge en gaz et à la procédure elles-mêmes, ainsi que des statistiques de bulles détectées par appareil Doppler ultrasonore (spécifiquement développé pour cet usage dans le cadre d'Azoth Systems).

## **Bibliographie**

- [1] Lauckner GR, Nishi RY, Eatock BC. Evaluation of the DCIEM 1983 decompression model for compressed air diving (series A-F). DCIEM Report n 84-R-72. Downsview, Ontario, Canada: Defence and Civil Institute of Environmental Medicine; 1984. – [FULL TEXT](#)
- [2] Lauckner GR, Nishi RY, Eatock BC. Evaluation of the DCIEM 1983 decompression model for compressed air diving (series G-K). DCIEM Report n 84-R-73. Downsview, Ontario, Canada: Defence and Civil Institute of Environmental Medicine; 1984. – [FULL TEXT](#)
- [3] Lauckner GR, Nishi RY, Eatock BC. Evaluation of the DCIEM 1983 decompression model for compressed air diving (series L-Q). DCIEM Report n° 85-R-18. Downsview, Ontario, Canada: Defence and Civil Institute of Environmental Medicine; 1985. – [FULL TEXT](#)
- [4] Nishi R.Y., Eatock B.C., The role of ultrasonic bubble detection in table validation. In: Schreiner H.R., Hamilton R.W., editors. Validation of decompression tables. Proceedings of the 37th Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop, UHMS Publication 74(VAL)1-1-88. Bethesda, MA: Undersea and Hyperbaric Medical Society; 1989. p. 133–7. – [ABSTRACT](#)
- [5] Lambertsen C. J., Nishi R. Y., Hopkin E. J., Relationships of Doppler venous gas embolism to decompression sickness. Environmental Biomedical Research Data Center, Institute for Environmental Medicine, University of Pennsylvania Medical Center ; 1997, Report No 7-10-1997. – [FULL TEXT](#)
- [6] Simpson ME. , HSE Workshop on decompression safety. November 1998 London: Health and Safety Executive ; 1999, HSE Research Report OTO 1999 007. – [FULL TEXT](#)
- [7] Jones A.D., Miller B.G., Colvin A.P. , Evaluation of Doppler monitoring for the control of hyperbaric exposure in tunnelling ; 2007, HSE Research Report OTO 2007 0598. – [FULL TEXT](#)
- [8] Kisman K. E., Masurel G., Guillerm R., *Bubble evaluation code for Doppler ultrasonic decompression data*, Undersea Biomedica Research, 1978, vol. 5(1),pp. 28 .
- [9] Spencer M.P., Johanson D.C., *Investigation of new principles for human decompression schedules using the Doppler ultrasonic blood bubble detector*, Technical Report to ONR on Contract N00014-73-C-0094. Seattle, WA: Institute for Environmental Medicine and Physiology, 1974. – [FULL TEXT](#)
- [10] Eftedal O., Brubakk A. O., *Agreement between trained and untrained observers in grading intravascular bubble signals in ultrasonic images*, Undersea and Hyperbaric Medicine, 1997, vol. 24(4), pp. 293-299. [FULL TEXT](#)
- [11] Nashimoto I, Gotoh Y. Ultrasonic Doppler detection of blood bubbles in caisson work. In: Pearson R, editor. Early diagnosis of decompressions. Proceedings of the Twelfth Undersea Medical Society Workshosp. UMS 7-30-77. Bethesda MD: Undersea Medical Society; 1977. p. 171–83.
- [12] Nashimoto I, Gotoh Y. Relationship between precordial Doppler ultrasound records and decompression sickness. In: Shilling CW, Beckett MW, editors. Underwater physiology VI: Proceedings of the Sixth Symposium on Underwater Physiology. Bethesda, Maryland: Federation of American Societies for Experimental Biology; 1978. p. 497–501.

- [13] Powell MR, Johanson DC. Ultrasound monitoring and decompression sickness. In: Shilling CW, Beckett MW, editors. Underwater physiology VI: Proceedings of the Sixth Symposium on Underwater Physiology. Bethesda, Maryland: Federation of American Societies for Experimental Biology; 1978. p. 503–10.
- [14] Gardette B. Correlation between decompression sickness and circulating bubbles in 232 divers. Undersea Biomedical Research. 1979; 6:99–107. – [ABSTRACT](#)
- [15] Vann RD, Dick AP, Barry PD. Doppler bubble measurements and decompression sickness. Undersea Biomed Res. 1982; 9(Suppl 1): S24. – [ABSTRACT](#)
- [16] Eatock BC. Correspondence between intravascular bubbles and symptoms of decompression sickness. Undersea Biomedical Research. 1984; 11:326-9.
- [17] Masurel G. Contribution à l'étude du rôle physiopathologique des bulles générées chez l'animal et chez l'homme par un séjour en atmosphère hyperbare. PhD Thesis, Lyon, Claude Bernard-Lyon I University; 1987. (in french) .
- [18] Sawatzky KD. The relationship between intravascular Doppler-detected gas bubbles and decompression sickness after bounce diving in humans. M.Sc. Thesis, York University, Toronto; 1991.
- [19] Sawatzky KD, Nishi RD. Intravascular Doppler-detected bubbles and decompression sickness. Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc. Joint Annual Scientific Meeting with the International Congress for Hyperbaric Medicine and the European Undersea Biomedical Society held 11-18 August 1990. Okura Hotel, Amsterdam, The Netherlands. – [ABSTRACT](#)
- [20] Conkin J, Powell MR, Foster PP, Waligora JM. Information about venous gas emboli improves prediction of hypobaric decompression sickness. Aviation, Space and Environmental Medicine. 1998; 69:8–16. – [ABSTRACT](#)
- [21] Pilmanis AA, Kannan N, Krause KM, Webb JT. Relating venous gas emboli (VGE) scores to altitude decompression sickness (DCS) symptoms. [Abstract]. Aviation, Space and Environmental Medicine. 1999; pp. 70-364.
- [22] Doolette D.J. Venous gas emboli detected by two-dimensional echocardiography are an imperfect surrogate endpoint for decompression sickness. Diving and Hyperbaric Medicine. 2016; 46(1): pp. 4–10. – [FULL TEXT](#)
- [23] Gernhardt M.L. Development and Evaluation of a Decompression Stress Index Based on Tissue Bubble Dynamics. Ph.D Thesis, University of Pennsylvania ; 1991, UMI #9211935. – [FULL TEXT](#)
- [24] Flook V., Brubakk A.O. Validation of a mathematical model of decompression gas phase. SINTEF Unimed UK. STF78 F96104 1996.
- [25] Flook V. Application of an advanced physiological model of decompression in the evaluation of decompression stress. Health and Safety Executive ; 1998, Report OTO 98 090 1998. – [FULL TEXT](#)
- [26] Eftedal OS, Lydersen S, Brubakk AO. The relationship between venous gas bubbles and adverse effects of decompression after air dives. Undersea and Hyperbaric Medicine. 2007; 34:99–105. – [FULL TEXT](#)

- [27] Flook V., Decompression Trials in National Hyperbaric Center ; 1999, London : Offshore Technology Report -OTO 1999 053. – [FULL TEXT](#)
- [28] Flook V., Trials of a Blackpool table decompression with oxygen as the breathing gas. Prepared by UNIMED Scientific Limited for the Health and Safety Executive ; 2001, Contract Research Report 369/2001. – [FULL TEXT](#)
- [29] Vellinga, T. P., Sterk, W., de Boer, A. G., van der Beek, A. J., Verhoeven, A. C., van Dijk, F. J., Doppler ultrasound surveillance in deep tunneling compressed-air work with Trimix breathing: bounce dive technique compared to saturation-excursion technique. Undersea and Hyperbaric Medicine ; 2008, vol. 35(6), pp. 407-416.- [FULL TEXT](#)
- [30] Eftedal, O. S., Tjelmeland, H., & Brubakk, A. O., Validation of decompression procedures based on detection of venous gas bubbles: a Bayesian approach. Aviation, Space, and Environmental Medicine; 2007, vol. 78(2), pp. 94-99.
- [31] Hugon J., Metelkina A., Barbaud A., Nishi R., Bouak F., Blatteau J. E., Gempp, E., Reliability of venous gas embolism detection in the subclavian area for decompression stress assessment following scuba diving. Diving and Hyperbaric Medicine; 2018, vol. 48(3), pp 132-140. – [FULL TEXT](#)
- [32] Shannon, J. S. The relationship of inert gas and venous gas emboli to decompression sickness. M.Sc. Thesis, Duke University; 2003. – [FULL TEXT](#)
- [33] Møllerlækken, A., Blogg, S. L., Doolette, D. J., Nishi, R. Y., & Pollock, N. W., Consensus guidelines for the use of ultrasound for diving research. Diving and hyperbaric medicine ; 2016, vol. 46(1), pp.26-32. – [FULL TEXT](#)