

La décompression personnalisée : présentation
du système O'Dive Tek (air/nitrox/trimix)



Toulon, le 21 décembre 2018

Axel Barbaud, président-fondateur d'Azoth Systems
Dr. Julien Hugon, directeur scientifique d'Azoth Systems

1. L'innovation technologique O'Dive : le chaînon manquant de la décompression

Azoth Systems a développé une innovation qui – pour la première fois au monde – permet au plongeur de personnaliser sa pratique de la plongée sous-marine en tenant compte des microbulles de gaz détectées dans son système veineux après la plongée.



Technologie Doppler connectée O'Dive

Cette innovation est le fruit de connaissances développées au cours de 10 années de recherche-développement par Azoth Systems en collaboration avec des laboratoires de recherche, des médecins de la plongée, des physiologistes et des professionnels de la sécurité en plongée sous-marine.

Au total, une trentaine d'experts d'horizons divers ont contribué à ces connaissances. Elles sont fondées sur l'analyse de centaines de milliers de plongées et le développement d'une technologie façonnée par des années d'essais au contact des utilisateurs.

Cette dynamique a notamment donné lieu à 4 thèses de recherche¹²³⁴, à de nombreux articles scientifiques et à plusieurs brevets.

Qu'apporte l'innovation O'Dive à la plongée sous-marine et en particulier à la plongée Tek? Un outil permettant au plongeur de mieux se connaître, de mesurer le niveau de qualité de sa pratique et de faire progresser sa sécurité.

Cet article présente les fondements et la démarche qui sous-tendent cette innovation ; il en précise l'intérêt, les limites et en ouvre les perspectives.

¹ **Vers une modélisation biophysique de la décompression** J. Hugon (2010) - Thèse de doctorat. Université de la Méditerranée, UMR - Physiologie et Physiopathologie en Conditions d'Oxygénation Extrêmes - Institut de Neurosciences J. Roche, Faculté de Médecine Nord, Marseille.

² **Détection et caractérisation d'embolies gazeuses ; application à la prévention des accidents de décompression** D. Fouan (2013) - Thèse de doctorat. Université Aix-Marseille, ED 353, 25nov. 2013.

³ **Détection et localisation de microbulles par méthodes ultrasonores** Y. Desailly (2016) - Thèse de doctorat. Université de Paris Diderot - Paris VII.

⁴ **Caractérisation de la diversité d'une population à partir des mesures quantifiées d'un modèle non-linéaire. Application à la plongée sous-marine.** Y Bennani (2015) - Thèse de doctorat. ED STIC Nice - I3S Sophia-Antipolis

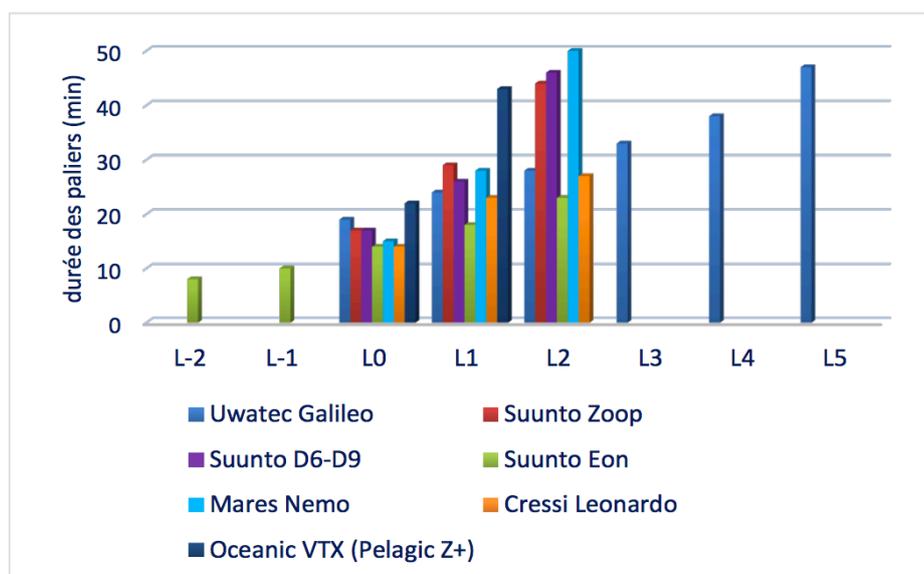
2. Le contexte : la limitation des tables et des modèles de décompression ; la survenue d'accidents de décompression (ADD) en dépit du respect des paliers

Les accidents de décompression représentent la première cause des accidents en plongée sous-marine (sources : rapports annuels de la FFESSM, rapports annuels du DAN) en général devant les œdèmes pulmonaires d'immersion et les barotraumatismes.

La plupart de ces accidents (environ 80%) survient alors que les procédures de plongée sont respectées, c'est-à-dire que le plongeur a correctement suivi les indications fournies par son ordinateur.

Cette situation bien connue des plongeurs expérimentés est révélatrice du fait que toutes les procédures de plongée (durées des paliers, vitesse de remontée, gaz respirés) ne se trouvent pas nécessairement adaptées à tous les types plongeurs.

Dès lors se pose pour le plongeur la question de la pertinence de la procédure qu'il utilise. Et face au nombre de réglages possibles des algorithmes de décompression, force est de constater que le plongeur ne dispose d'aucun critère tangible – autre que la survenue éventuelle de l'ADD que précisément on souhaite éviter – pour juger du niveau d'adéquation de ses tables à sa propre personne.



***Dispersion des durées de paliers observée pour une plongée à l'air de 30' à 30 m pour sept modèles d'ordinateurs, en fonction du niveau de durcissement
(Source : mémoire pour le titre d'instructeur national – S. Le Maout, 2015)***

Le tableau ci-dessus illustre le fait que pour une plongée identique de 30 minutes à 30 mètres à l'air – et sur la base d'un même niveau de durcissement à « 0 » de son ordinateur, le plongeur se verra proposer de 12 à 21 minutes de paliers selon le modèle d'ordinateur. Notons qu'il s'agit là d'une plage minimum. En pratique, le plongeur peut se voir proposer de 8 à 50 minutes de paliers si l'on prend en considération la fourchette complète des niveaux de durcissement auxquels il a accès (niveaux de durcissement de -2 à +5).

Pour le plongeur Tek, cette dispersion est encore plus marquée. En effet, la plupart des modèles d'ordinateurs Tek font appel à un algorithme de décompression de type Bühlmann (ZHL-16) qui offre des possibilités de réglages à la fois plus fins et plus larges encore (*Gradient Factors* ou GF).

Dans un tel contexte, l'intérêt de O'Dive est de fournir au plongeur un critère d'appréciation du niveau de qualité de sa pratique, lui offrant ainsi la possibilité de mieux la rationaliser.

3. La démarche sous-jacente à O'Dive : appréhender le risque d'ADD afin de mieux les prévenir

Pour mémoire, dans le contexte présenté précédemment, la survenue d'un ADD ne répond pas à une logique qui peut être appréhendée de façon déterministe, à savoir « telle cause engendre un ADD et cette cause peut être identifiée de manière précise ».

En effet, si la formation d'une ou de plusieurs bulles constitue le *primum movens* de l'ADD, il existe au sein de notre organisme des mécanismes qui la plupart du temps permettent d'évacuer ces bulles sans dommage.

Les causes susceptibles d'aboutir au fait que des bulles soient produites dans un organisme et qu'elles ne puissent pas en être éliminées – aboutissant alors à un ADD – sont difficilement dénombrables ; elles sont souvent peu quantifiables, la plupart sont interdépendantes et nombre d'entre elles – notamment celles intervenant à une échelle microscopique – restent méconnues.

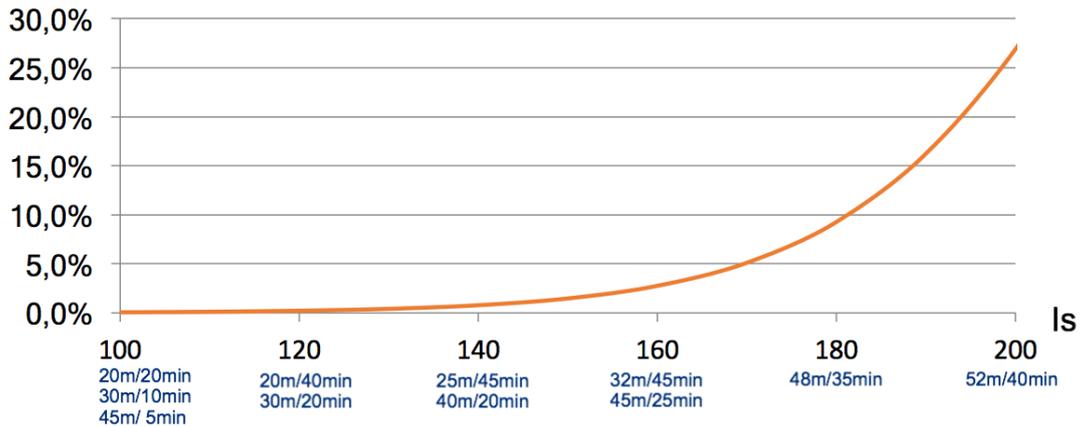
Pour répondre à la question de la prédiction du risque d'ADD, les techniques scientifiques modernes font appel à une démarche probabiliste faisant intervenir des modèles mathématiques qui mettent en scène des paramètres contribuant au risque – ou dont on peut au moins observer une corrélation au risque – et susceptibles d'être mesurés.

Azoth Systems a ainsi élaboré une série de modèles prédictifs dénommés BORA⁵ (pour Bubble Occurrence - Risk Attrition) afin de rendre compte des résultats observés dans de multiples bases de données. Les paramètres de centaines de milliers de plongées (air, nitrox, trimix, héliox en circuit-ouvert et en circuit-fermé), les dynamiques de bulles (mesures Doppler) de plusieurs milliers de ces plongées et les centaines d'accidents auxquels elles ont donné lieu ont été étudiés pour calibrer ces modèles.

Quels grands résultats ces données mettent-elles en évidence ?

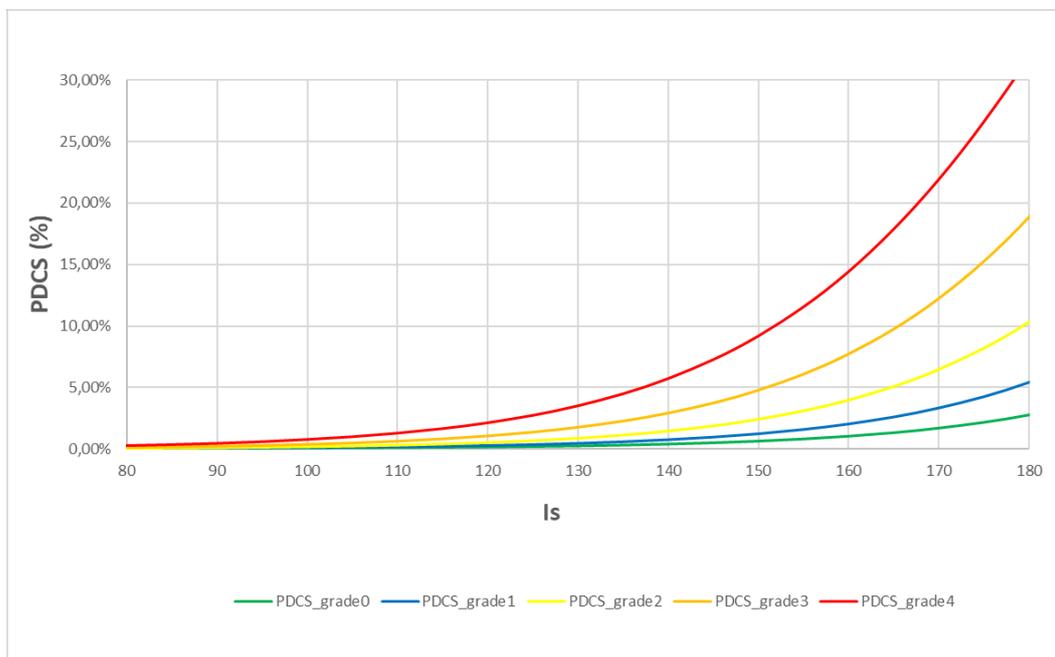
- Pour la plongée à l'air, le risque augmente avec la profondeur et la durée de la plongée et il décroît lorsque la durée totale de décompression (paliers) s'allonge selon un indice de sévérité *I_s* représenté par la courbe ci-après.

⁵ **Decompression models: review, relevance and validation capabilities** Hugon J. (Vol 41, No 6) Undersea Hyperb. Med. (2014)



Loi de probabilité d'ADD (plongée à l'air) en fonction d'un indice de sévérité I_s prenant en compte la profondeur, la durée de la plongée et la durée totale de décompression

- Elles montrent par ailleurs que le niveau de microbulles vasculaires observable après la plongée est une information importante pour la prédiction de risque et ce, pour tous les types de plongées mentionnés précédemment. En l'occurrence, la présence de microbulles agit comme un amplificateur du risque associé à la sévérité de la plongée. En moyenne observée, une plongée à l'air réalisée au-delà de la courbe de sécurité et ne générant pas ou peu de microbulles vasculaires (grade 0-1) présente dix fois moins de risque que cette même plongée lorsqu'elle génère beaucoup de bulles (grade 4)⁶.



Lois de probabilité d'ADD en fonction de la sévérité (I_s) de la plongée pour 5 niveaux de production de microbulles post plongée (plongée à l'air)

⁶ Reliability of venous gas embolism detection in the subclavian area for deco. stress assessment following scuba diving Hugon, Metelkina, Barbaud, Nishi, Bouak, Gempp, Blatteau - Diving and Hyperb. Medicine Journal, Vol. 48 No. 3 Sept. 2018

- Pour la plongée au mélange, les lois de risque répondent à un schéma proche de celui de la plongée à l'air/nitrox, à la différence que l'indice de sévérité (Is) – et donc le risque – décroît lorsque la fraction d'hélium contenue dans le mélange augmente⁷.

4. Comment fonctionne l'application O'Dive ? Quelles informations sont délivrées au plongeur ?

Après chaque plongée suivie d'une mesure de microbulles et sur la base des paramètres de plongée renseignés via l'application, O'Dive délivre au plongeur une indication relative à la qualité de sa pratique. Cette indication est exprimée au moyen d'un indice de qualité « IQ » dont la valeur est comprise entre 0 et 100 %.

Comment l'indice de qualité est-il calculé ?

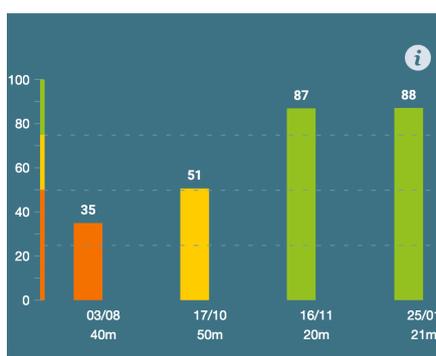
L'IQ prend en compte d'une part la sévérité « Is » de la plongée effectuée par le plongeur (Is reflète un stress physiologique lié aux paramètres eux-mêmes de la plongée) et d'autre part, du niveau de microbulles mesuré après la plongée au moyen du capteur Doppler vasculaire.

Pour la plongée mélange, l'indice de sévérité « Is » est calculé sur la base du profil exact de la plongée, des pourcentages de gaz respirés au fil de la plongée et des réglages de pression partielle d'oxygène⁸ (plongée en circuit fermé).

La valeur de 100% correspond à un niveau de référence. Elle est représentative du niveau de stress physiologique subi par l'organisme d'un plongeur à l'occasion d'une plongée à l'air réalisée sur la courbe de plongée sans palier, lorsque celle-ci ne génère aucune microbulle vasculaire.

Ainsi, lorsque l'IQ diminue, le risque⁹ de développer un ADD augmente. 3 zones ont été identifiées afin de guider l'utilisateur :

75% à 100%	Procédure de bonne qualité, une optimisation reste possible
50% à 75%	Procédure de qualité intermédiaire, marge significative d'amélioration
0 à 50%	Procédure et/ou pratique à faire évoluer (préconisation)



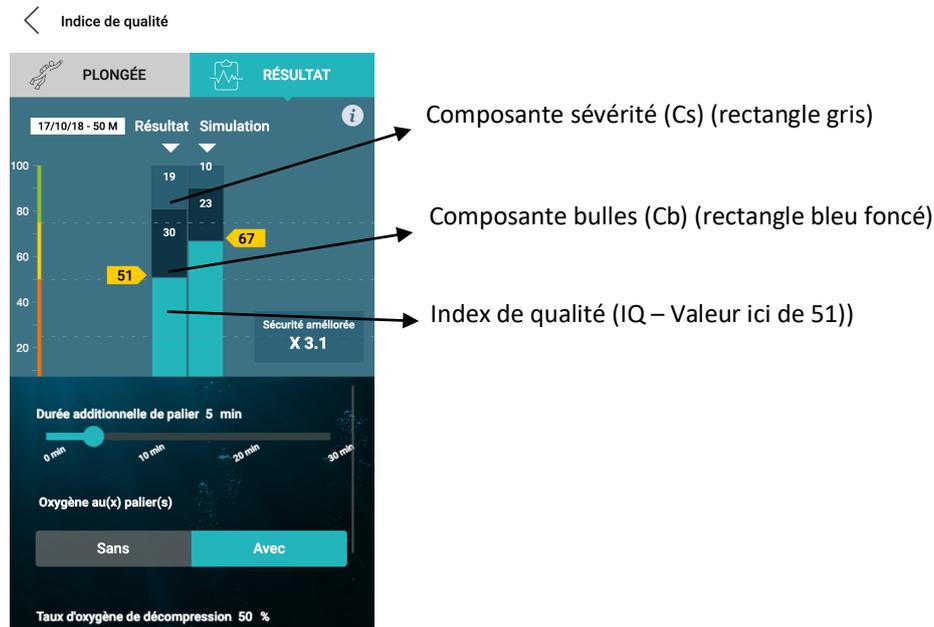
Indice de qualité (IQ) déterminé pour deux plongées réalisées à 30 m.

⁷ Dès lors que l'étagement vertical des paliers tient compte des règles imposées par la présence d'hélium

⁸ Ordinateurs compatibles avec le logiciel *Subsurface*

⁹ A titre indicatif, pour un indice de 100%, le risque observé est **inférieur** à 5/10000 ; pour un indice de 75%, il est inférieur à 2/1000 ; pour un indice de 50 %, il est inférieur à 1% (bornes minima du risque).

Lorsque l'index de qualité n'atteint pas 100%, le plongeur peut accéder à une information détaillée qui précise quelle part de ce résultat est attribuable à la sévérité même de la plongée (paramètres) et quelle part complémentaire est éventuellement attribuable au niveau des microbulles vasculaires détectées.



La marge d'optimisation de la décompression (i.e. le complément de l'index OD à 100%) peut être visualisée selon deux composantes : la sévérité du profil de plongée et la production de microbulles vasculaires.

Pour la plongée Tek, la composante de sévérité (Cs) tient en plus compte de la fraction d'hélium contenue dans le gaz (affichage non représenté ici).

5. Quelles autres fonctionnalités sont proposées par O'Dive Tek ?

Donner au plongeur la possibilité de mieux se connaître, de situer plongée après plongée de manière individuelle le niveau de qualité de sa pratique et d'observer l'évolution de cette dernière dans le temps sont les premières fonctionnalités innovantes du système O'Dive.

Au-delà des résultats dynamiques obtenus après chaque plongée, c'est aussi la possibilité de visualiser l'effet respectif de différentes options sur sa pratique de la plongée qui présente un intérêt.

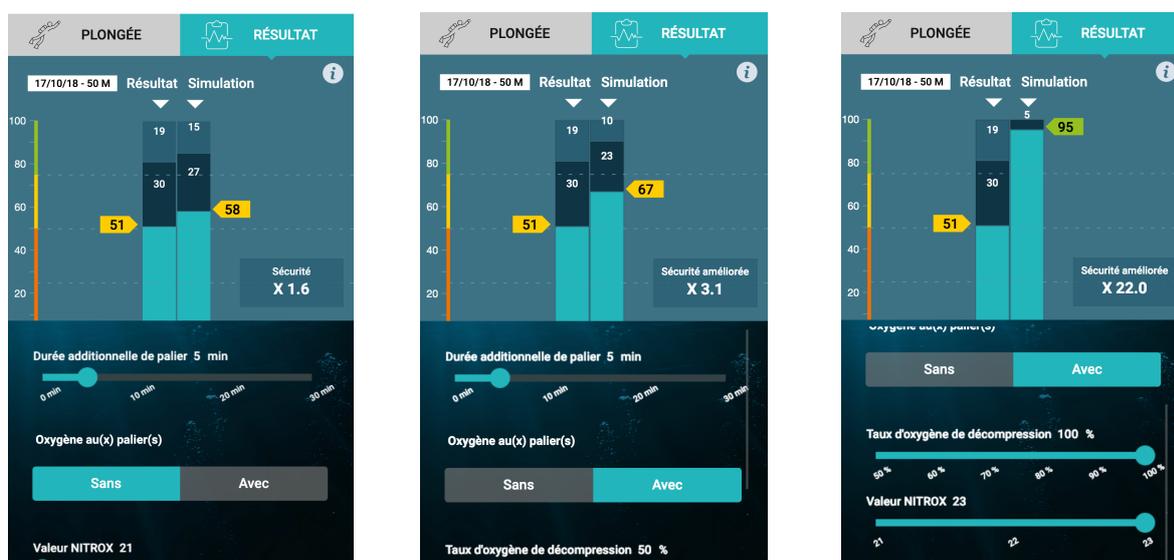
Au moyen d'une simulation qui lui est entièrement propre, le plongeur peut ainsi mesurer de façon quantifiée quelle est la valeur ajoutée des options suivantes (seules ou combinées) :

- Plongée Air en circuit-ouvert :
 - rallonger la durée du dernier palier ;
 - respirer un nitrox plus riche en oxygène ;
 - plonger au nitrox ;
 - modifier les *gradient factors* GF.

- Option supplémentaire pour la plongée Trimix en circuit-ouvert : changer son mélange fond.
- Options autres pour la plongée Trimix en circuit-fermé, en incluant le cas spécifique d'un diluant air : changer son diluant et modifier la pression partielle d'oxygène aux paliers.

Plongée après plongée, un modèle personnalisé qui est propre à chaque plongeur s'affine afin de rendre le plus précisément compte de la valeur ajoutée de chacune des options précédentes sur sa sécurité.

En l'occurrence, l'indice de qualité IQ a été élaboré de telle sorte que lorsque qu'il augmente de 33%, le niveau de sécurité du plongeur est multiplié par 10.



Options de simulation individuelles présentant le gain relatif en sécurité pour le plongeur

6. Quelles sont les limites des informations délivrées par le système ?

Il convient de bien délimiter ici quel est le domaine d'utilisation du produit qui, notons-le, n'entre pas dans la catégorie des dispositifs médicaux. Certaines informations, notamment des informations de niveau médical ne sont volontairement pas prises en compte par le système.

La prise en considération des informations ou des observations médicales qui relèvent des parcours de visites réglementaires restent incontournables et elles sont à dissocier de l'usage du produit.

L'objectif du système O'Dive est, rappelons-le, d'apprécier le niveau de qualité d'une pratique au regard d'un index de qualité IQ prenant en compte :

- le degré de sévérité des expositions réalisées « Is », facteur géométrique de risque directement lié aux paramètres de plongée ;
- le niveau de microbulles vasculaires détectées après la plongée, celui-ci s'apparentant à un facteur d'amplification du risque.

Des études réalisées au moyen de bases de données comptant parmi les mieux documentées (voir article en note 6) illustrent toute la pertinence et le sens de cette approche en matière de prévention¹⁰.

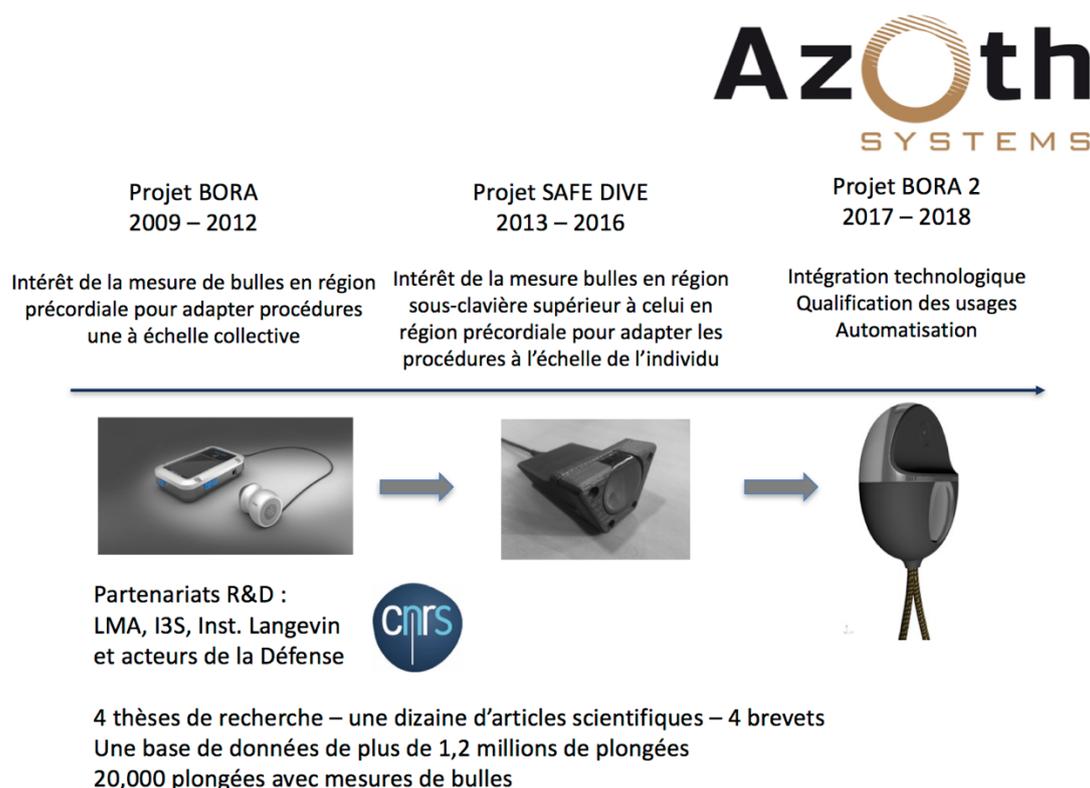
O'Dive présente donc tout son intérêt dans le pouvoir de mieux se connaître et de faire progresser sa pratique vis-à-vis du risque d'accident de décompression.

Si par exemple un plongeur suspecte ou connaît la présence d'un FOP¹¹ ou bien d'autres facteurs de risque, il aura tout à fait intérêt à pratiquer une plongée qui tend à minimiser sa production de microbulles et le système O'Dive lui sera une aide en cela.

Si à l'inverse il ne fait l'objet d'aucun facteur de risque connu, minimiser sa production de bulles l'amènera alors à disposer d'une marge de sécurité accrue.

7. Une technologie issue de la recherche-développement et façonnée par le terrain

La technologie O'Dive est issue d'un programme de recherche-développement pluridisciplinaire ; elle a connu de nombreuses étapes de maturations avant de parvenir au niveau de performance actuel ; elle fait l'objet de plusieurs brevets.



Conclusion & perspectives

¹⁰ Une partie non publiée des logiques sous-jacentes à l'application O'Dive TeK résulte d'une expérience issue de la plongée professionnelle internationale (dont celle de l'entreprise COMEX) sur plusieurs décennies.

¹¹ Foramen ovale perméable

O'Dive est une innovation ouvrant des perspectives entièrement inédites au plongeur.

Avoir connaissance du niveau de qualité de sa pratique, mesurer l'adéquation de sa procédure de plongée à sa personne sous l'angle de sa propre production de microbulles vasculaires et calculer à partir d'un modèle personnel l'apport en sécurité de différentes options de pratique sont autant de possibilités nouvelles auxquelles le plongeur peut avoir désormais accès grâce au système O'Dive.

O'Dive constitue le chaînon qui manquait aux ordinateurs de plongée pour franchir le pas d'une décompression personnalisée et plusieurs marques de référence collaborent aujourd'hui avec Azoth Systems afin de pousser plus loin encore l'expérience utilisateur.

Grâce à cet outil et aux compréhensions nouvelles auxquelles il permet d'ores et déjà d'accéder, la première ambition des membres d'Azoth Systems est de réduire significativement le nombre d'accidents de décompression au cours des années à venir.

Références scientifiques et techniques d'Azoth Systems

- « Reliability of venous gas embolism detection in subclavian area for decompression stress assessment following scuba diving » Hugon, Metelkina, Barbaud, Nishi, Bouak, Gempp, Blatteau, Diving and Hyperb. Medicine Journal, Vol. 48 No. 3 - Sept. 2018.
- « A stress index to enhance DCS risk assessment for both air and mixed gas exposures » Hugon J.& al. (conf. abstract - an. sc. meeting UHMS 2015, Montréal) June 2015
- « Microbubble dynamics monitoring using a dual modulation method », D. Fouan et al, J. Acoust.Soc. Am. 137(2), February 2015
- « Decompression models: review, relevance and validation capabilities » Hugon J, (Vol 41, No 6) Undersea Hyperb. Med., Hugon J. 2014.
- « Improvement of micro-bubble sizing using multi-harmonic excitations under the transducer bandwidth constraint » : Fouan D, Mensah S, Applied Physics Letters (Vol.104, Issue 11) 17 March 2014.
- « Gas emboli detection and characterization; application to the prevention of decompression sickness » - PhD thesis (confidential): D. Fouan; Aix Marseille University ED 353 - Sciences pour l'ingénieur, France (Nov 2013).
- « Submarine Rescue Decompression Procedure from Hyperbaric Exposures up to 6 Bar of Absolute Pressure in Man: Effects on Bubble Formation and Pulmonary Function » Blatteau J-E, Hugon J, Castagna O, et al. PlosOne 2013 <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0067681>.
- « Multifrequency excitation for a wide range of bubble detection » D. Fouan, S. Mensah International Congress on Ultrasonics, May 2013, Singapour.
- « Towards a customized management of decompression » A.Barbaud, J. Hugon, C. Quinsac. Conf. Underwater Intervention, January (2013), New Orleans, Louisiana.
- « Manned underwater operations and decompression sickness outlooks » P. Fiévet, S.Mac Leod, R. Masseron, A. Barbaud TOTAL Technoscoop (2012) 60: 72-79
- « Calibration of a new biophysical model dedicated to prevention of decompression sickness » J. Hugon, Y.Bennani, L. Pronzato, J. Rendas, Undersea and Hyperbaric Medical Society, 45th scientific annual meeting, June 2012 Phoenix, Arizona.
- « Pulsed Bi-Frequency Method for Characterization of Microbubbles in the Context of Decompression Sickness » D. Fouan, T. Goursolle, P. Lasaygues and S. Mensah Acoustics 2012, Nantes, France 23 to 27 apr (2012)
- « Oxygen breathing or recompression during decompression from nitro dives with a rebreather: effects on intravascular bubble burden and ramifications for decompression profiles » Blatteau, J. Hugon, et al. France European Journal of Applied Physiology, (2012) 112:2257-2265
- « Free single bubble ultrasonic characterization: chirp excitations applied to nonlinear mixing method » Goursolle T, Fouan D, Pottier B, Mensah S., Undersea and Hyperbaric Medical Society, 44th annual scientific meeting, june 2011:UHMS 2011, Fort Worth, Texas.
- « Biophysical models of decompression: review and perspectives » J. Hugon, JE. Blatteau. European Undersea Baromedical Society, 37 th annual scientific meeting, august 2011, Gdansk, Poland.
- « Release and characterization of a single bubble » D. Fouan, T.Goursolle, B. Potier, P. Lasaygues and S. Mensah. Leeds Microbubble symposium, 2nd to 6th July 2011.
- « Vers une modélisation biophysique de la décompression » J. Hugon, (2010), PhD thesis, Université de la Méditerranée, UMR - Physiologie et Physiopathologie en Conditions d'Oxygénation Extrêmes - Institut de Neurosciences J. Roche, Faculté de Médecine Nord, Marseille.