



La décompression personnalisée avec le système O'Dive



Contact : Didier Draguiev

didier.draguiev@azoth-systems.com

Mise à jour : le 28/10/2020

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



Le capteur O'Dive

Azoth Systems a développé une innovation qui pour la première fois au monde permet au plongeur de personnaliser ses procédures de plongée 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 recherche (voir références) [1] [2] [3] [4], à de nombreux articles scientifiques (dont [5] [6] [7]) et à plusieurs brevets.

Mise à jour : le 28/10/2020

Qu'apporte O'Dive à la plongée sous-marine ?

Un outil permettant au plongeur de mieux se connaître, de mesurer le niveau de qualité de sa décompression, l'efficacité de la procédure choisie et de faire progresser sa sécurité.

2. Le contexte : la survenue des accidents de décompression (ADD) en dépit du respect des paliers

Un modèle de décompression n'est qu'une représentation mathématique d'un phénomène physiologique

Quelle est l'adéquation entre les modèles de décompression et la physiologie des plongeurs sachant que 80% des accidents de décompression (ADD) surviennent en dépit du respect des protocoles de remontée ?

La plupart de ces accidents 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 ou ses tables de plongée.

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 de plongeurs. Dès lors se pose pour le pratiquant la question de la pertinence de la procédure qu'il utilise. Et face au nombre de réglages possibles des ordinateurs de plongée et des différents algorithmes de décompression, force est de constater que le plongeur ne dispose d'aucun critère tangible pour juger du niveau d'adéquation entre la procédure suivie et sa propre physiologie.

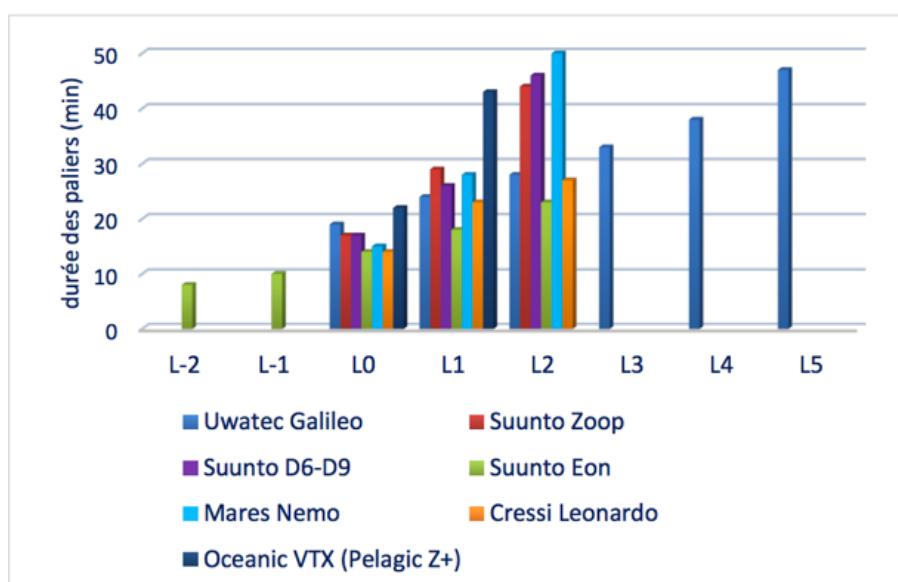


Figure 1 – Illustration de la variabilité des durées de décompression proposées par des ordinateurs du marché, avec divers réglages (Rapport de thèse pour le titre d'instructeur national – S. Le Maout, 2015)

La figure 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 conservatisme 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 conservatisme auxquels il a accès (niveaux de -2 à +5).

Dans un tel contexte, l'intérêt de O'Dive est de fournir au plongeur un critère d'appréciation du niveau de qualité de sa désaturation.

Dans le domaine de la plongée technique, la variabilité des procédures de décompression est encore plus marquée (voir Figure 2). Une majorité des pratiquants en plongée recycleur et/ou Trimix utilisent des algorithmes de type Bühlmann avec une gestion du profil de remontée par Gradient Factors.

Ces modèles offrent en effet un grand niveau d'adaptabilité mais, en l'absence d'informations tangibles sur la gestion et la planification des plongées, la dispersion des profils de remontée proposés peut être très importante.

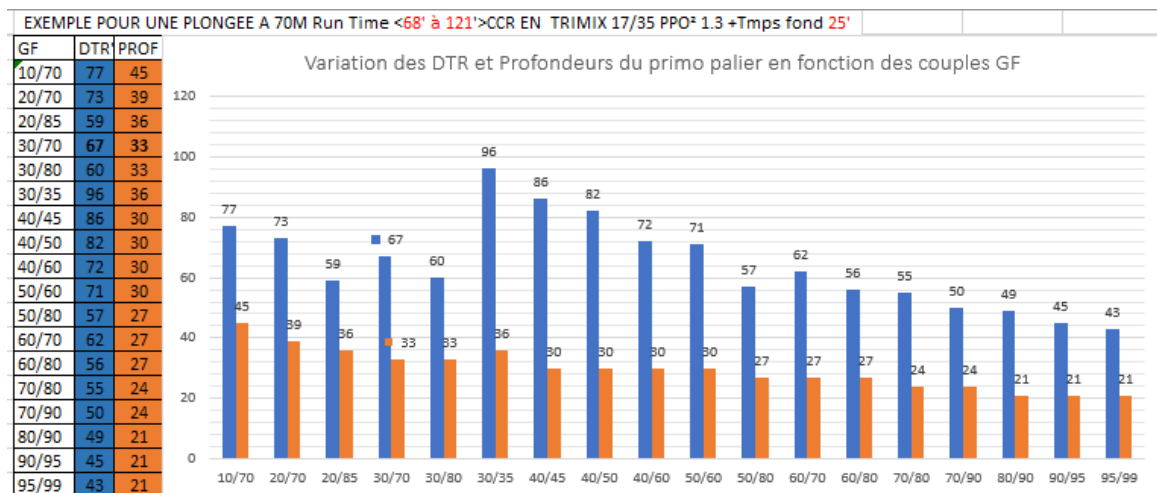


Figure 2 - Dispersion des profondeurs des premiers paliers et durée de la décompression en fonction des GF pour une plongée de 25' à 70m au Trimix

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 de manière consensuelle, 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 à des bulles pathogènes 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 : des modèles mathématiques mettent en scène des paramètres contribuant au risque – ou dont on peut au moins observer une corrélation au risque – et susceptibles d'être mesurés.

Fort de son expertise en matière de modélisation de la décompression [5], Azoth Systems a ainsi élaboré une série de modèles prédictifs dénommés BORA (pour Bubble Occurrence - Risk Attrition) afin de rendre compte des résultats observés dans de multiples bases de données. De grandes bases de données (Défense, Oil & Gas) collectées dans le cadre de collaborations et de prestations de service ont été exploitées durant près de 10 ans : les paramètres de centaines de milliers de plongées, les dynamiques de bulles (mesures Doppler) de milliers de plongées et les centaines d'accidents auxquels ces plongées ont donné lieu (air, nitrox, trimix, héliox, circuit ouvert et circuit fermé) ont été étudiés pour calibrer ces modèles [6] [7].

Quels grands résultats ces données mettent-elles en évidence ?

- Elles corroborent tout d'abord des résultats acquis antérieurement et permettent de mieux en préciser les contours. 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 dit de sévérité I_s représenté par la courbe ci-après (Figure 3). Ce résultat a été obtenu par une analyse statistique de type régression logistique à partir de trois bases de données Défense cumulant près d'un million de plongées et environ 300 cas d'accidents (Marine Nationale, US Navy, DRDC).

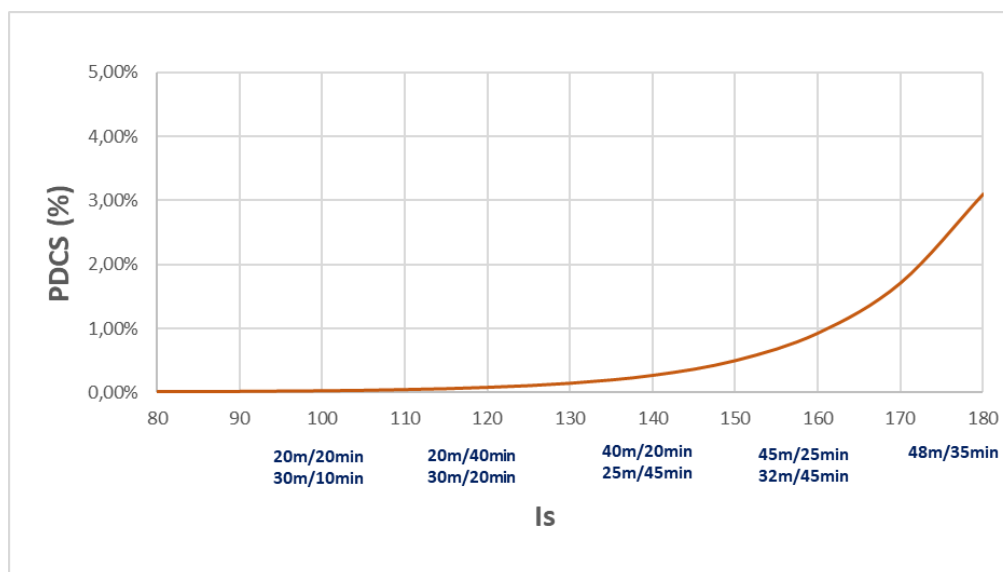


Figure 3 - Loi de probabilité d'ADD (PDCS) en fonction d'un indice de sévérité I_s prenant en compte la profondeur, la durée de la plongée et la durée totale de décompression. Les exemples de paramètres sont exprimés en temps fond/Profondeur maximale pour des profils carrés air.

- Les mêmes tendances sont mises en évidence pour la plongée plus profonde (base de données DRDC et héritage COMEX entre 80 et 120 mètres) permettant de prolonger la construction de l'indice I_s pour le multi-gaz, avec comme observation par ailleurs :

- Un intérêt majeur à l'introduction d'Hélium dans le gaz respiré par le plongeur
 - L'intérêt d'un enrichissement en oxygène du gaz respiré lors de la phase de décompression bien caractérisés vis-à-vis du risque d'accident (régression logistique).
- Le pic de microbulles vasculaires, observable au niveau précordial et au niveau sous-clavière après la plongée, est une donnée incontournable pour la prédiction de risque : sa prise en compte permet obtenir des courbes de probabilité affinées (Figure 4). En l'occurrence, la présence de microbulles agit comme un amplificateur du risque associé à la sévérité de la plongée [7]. Dans les tranches de profondeur-durée correspondant aux plongées nécessitant la réalisation de paliers (i.e. plongées sur et au-delà de la courbe de plongée sans palier) **le rapport de risque observé entre une plongée ne générant pas ou peu de microbulles vasculaires d'une part et la même plongée générant un grade de bulles élevé d'autre part est de l'ordre de 10**. Ce résultat s'appuie sur l'exploitation d'une base de données DRDC incluant profils de plongée, mesures de bulle en précordial et en sous-clavière et cas d'accidents (plus de 8000 expositions en chambre hyperbare ayant généré plus de 100 ADD).

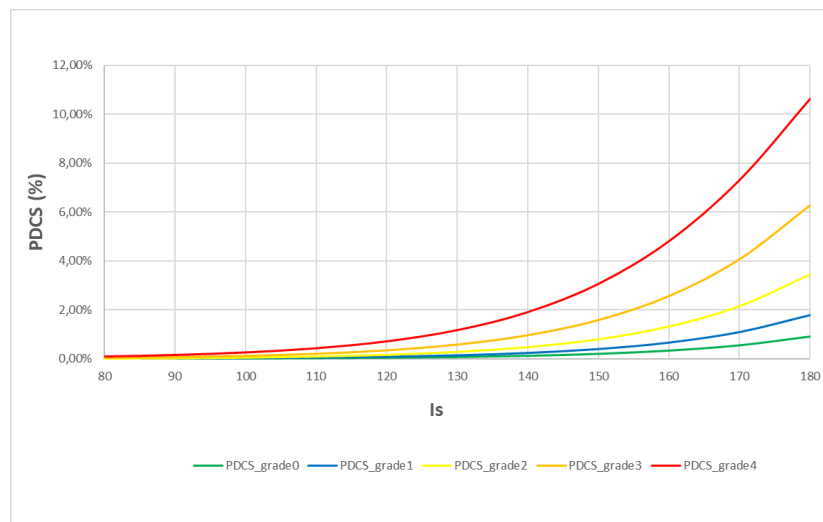


Figure 4 - Lois de probabilité d'ADD en fonction de la sévérité (**Is**) de la plongée pour 5 niveaux de production de microbulles post plongée (mesures réalisées à partir de H+30' surface)

- Les mesures de bulle réalisées par Doppler au niveau sous-clavière sont plus signifiantes que les mesures de bulle réalisées par Doppler au niveau précordial pour caractériser cette amplification du risque [7]
- La profondeur du premier palier et la vitesse de remontée jusqu'au premier palier dépendent de la nature des gaz respirés (plus ou moins riche en hélium) et de la sévérité de l'expositions (héritage COMEX) ; l'introduction de paliers profonds trouve ici sa limite : Azoth Systems ne peut s'engager à évaluer la plus-value de paliers trop profonds si ceux-ci sortent de l'héritage disponible.

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 désaturation. Ces mesures sont réalisées idéalement en deux séries, la première 30' après la sortie de l'eau et la deuxième 1h00 après, fenêtres temporelles permettant de relever au mieux le pic de bulles.

Cette indication est exprimée au moyen d'un **Indice de Qualité « IQ »** dont la valeur est comprise entre 0 et 100 %. Il reflète un risque relatif.

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.

La valeur de 100% correspond à un niveau de risque de référence (<5/10.000) : elle est représentative du niveau de stress physiologique subi par l'organisme d'un plongeur suite à une plongée à l'air réalisée sur la courbe de plongée sans palier, lorsque celle-ci ne génère aucune microbulle vasculaire détectable.

L'indice IQ peut être exprimé avec une formule simple :

$$IQ=100-(Cs+Cb)$$

- Cs représente la composante sévérité propre à la plongée du sujet (exposition, procédure de décompression, gaz respirés), reflet de l'indice Is (valeur entre 0% et 100%)
- Cb représente la composante bulles propre à la réponse du sujet à cette plongée (valeur entre 0% et 40%)

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

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

A titre indicatif, l'analyse statistique montre avec un bon niveau de confiance que pour un indice inférieur à 75%, le risque est supérieur à 2/1000 ; pour un indice inférieur à 50 %, il est supérieur à 1% (bornes minima du risque).

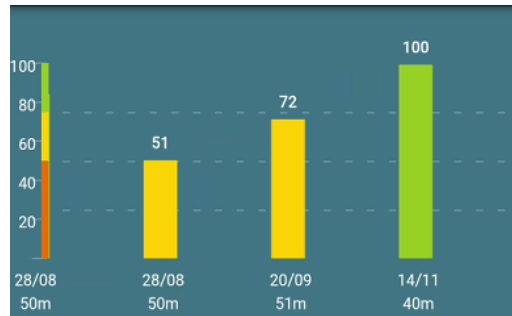
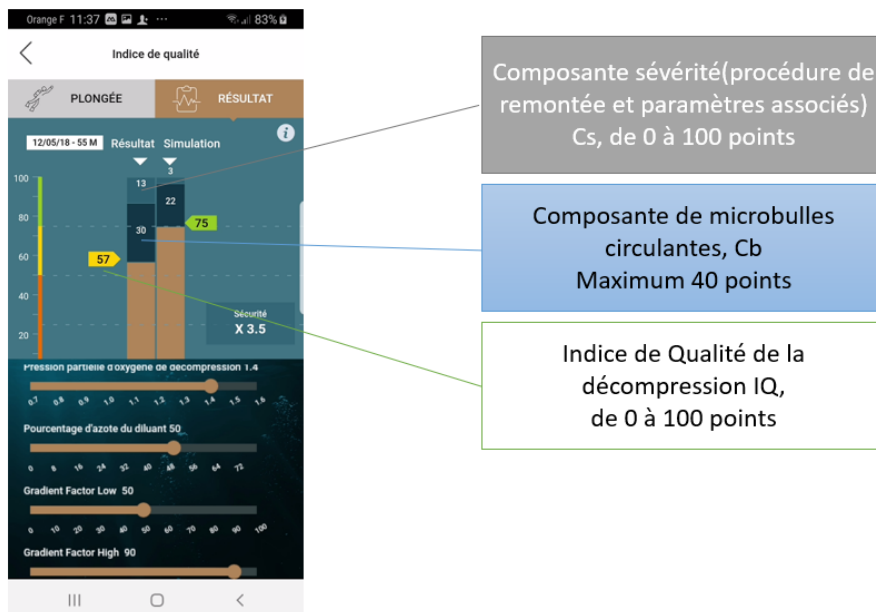


Figure 5 - Exemples d'Indice de qualité (IQ) déterminés pour trois plongées (50m, 51m et 40m).

Lorsque l'indice 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 de plongée → composante sévérité) et quelle part est attribuable au niveau des microbulles vasculaires détectées (composante bulles).

DETAILS DES COMPOSANTES D'UN BARREGRAPHE



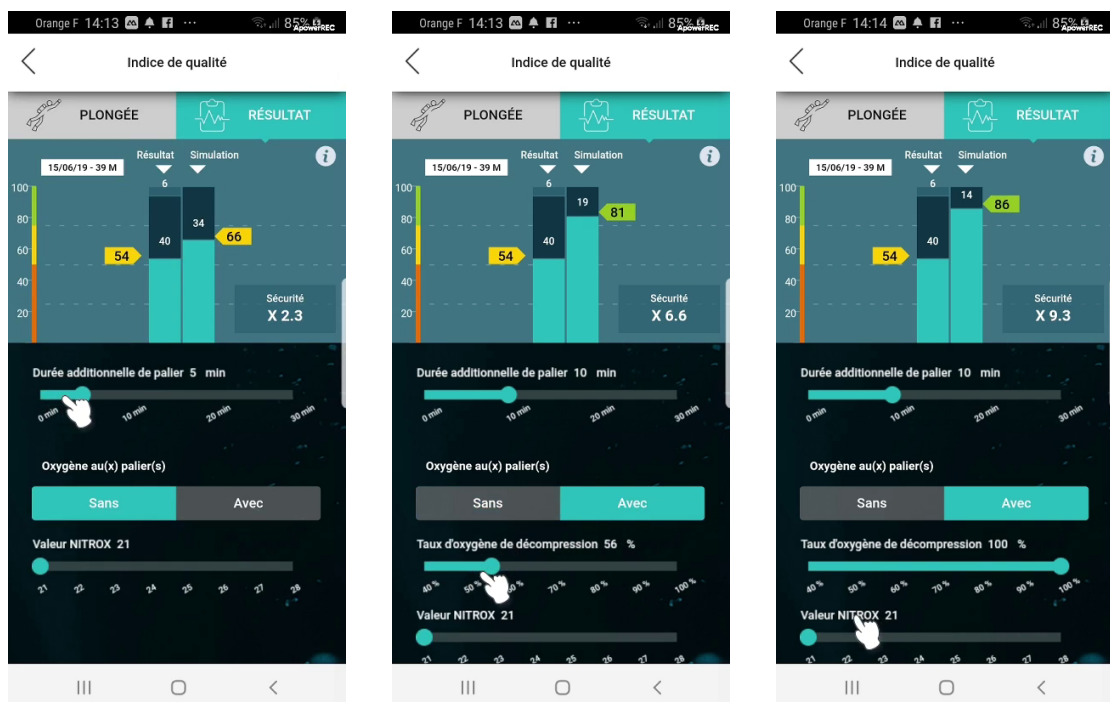
La marge d'amélioration de la décompression (i.e. le complément de l'index IQ pour aller jusqu'à 100%) peut être visualisée selon deux composantes : la sévérité du profil de plongée et la production de microbulles vasculaires. Il faut noter que deux plongées différentes produisant des niveaux de bulle très différents chez un même sujet peuvent conduire à une valeur de IQ similaire (ex : plongée avec valeur de I_s modérée ayant produit beaucoup de bulles et plongée à forte valeur de I_s ayant produit peu de bulles).

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

L'application O'Dive est divisée en 4 versions : *Sport*, *Advanced*, *CCR* et *Technical*. Celles-ci permettent de gérer des plongées allant du circuit ouvert à l'air au circuit fermé (recycleur) avec diluant Trimix jusqu'à 125 mètres (détails disponibles ici : <https://o-dive.com/offres-commerciales/>). Au-delà des résultats dynamiques obtenus à chaque plongée, c'est aussi la possibilité de **visualiser l'effet respectif de différents choix de simulation** autour des plongées réalisées qui présente un intérêt.

Dans les versions *Sport* et *Advanced*, le plongeur peut ainsi mesurer de façon quantifiée quelle est la valeur ajoutée des options suivantes, conformément aux prédictions qu'offrent les indices Is et IQ mis en place suite à une exploitation des bases de données :

- Ajouter une durée additionnelle au dernier palier réalisé
- Planifier l'usage d'un gaz suroxygéné en décompression avec la possibilité de régler la valeur jusqu'à 100%O₂
- Planifier l'usage d'un Nitrox en gaz fond en réglant la valeur de %O₂ dans la limite de 1.4 bar de PpO₂
- Régler les GF Low et High en étant guidé par l'application vers les choix les plus adaptés (lorsque GF déclarés), reflétant les choix du premier palier et de la durée totale de décompression

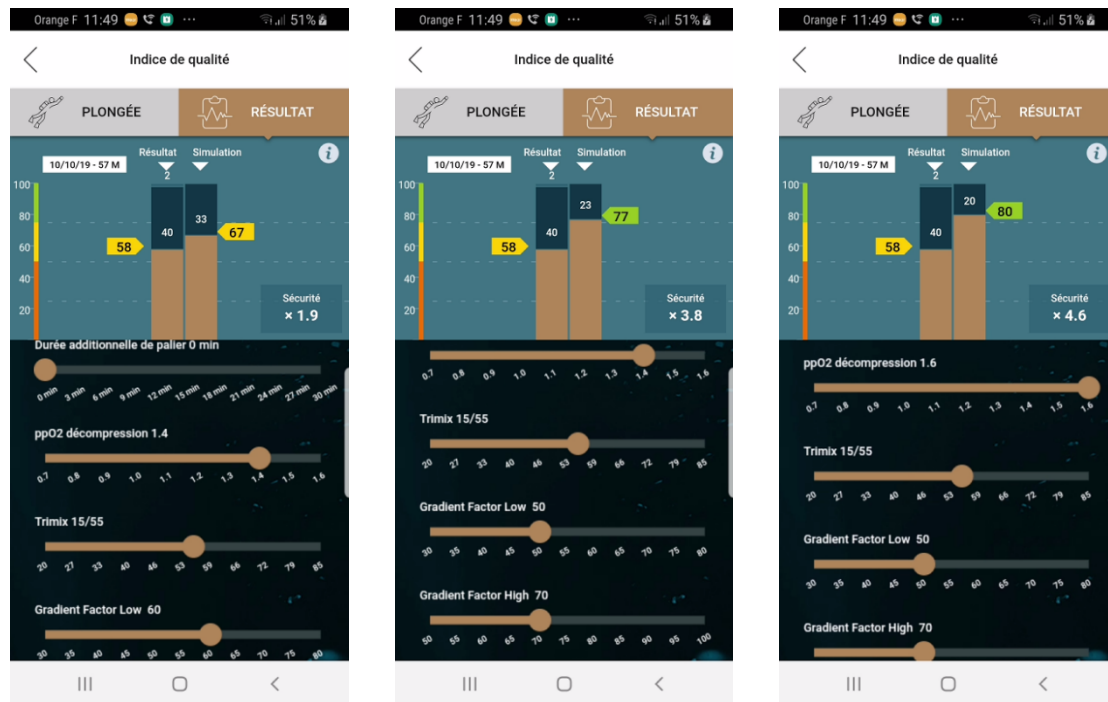


Exemple de simulations pour une plongée à 39m à l'air

Les applications *CCR* et *Technical* proposent des fonctionnalités plus étendues, là encore conformément aux prédictions qu'offrent les indices Is et IQ mis en place suite à une exploitation des bases de données, comme évoqué plus haut :

- Ajouter une durée additionnelle au dernier palier réalisé
- Régler la PpO₂ du Set Point haut (décompression en usage circuit-fermé CCR)

- Planifier l'usage d'un gaz suroxygéné en décompression avec la possibilité de régler la valeur jusqu'à 100% O₂ en circuit ouvert OCR
- Pour les plongées air, planifier l'usage d'un Trimix en gaz fond en réglant la valeur du %He et en ayant des valeurs idéales de O₂ prédéfinies en fonction du mode de plongée CCR ou OCR.
- Modifier la valeur du Trimix utilisé en modifiant le %He en mode CCR ou OCR
- Régler les GF Low et High en étant guidé par l'application vers les choix les plus adaptés, reflétant les choix du premier palier et de la durée totale de décompression



Exemple de simulations pour une plongée à 57m au Trimix en circuit fermé

Plongée après plongée, un modèle personnalisé qui est propre à plongeur s'affine au fil du temps afin de rendre le plus précisément compte de la valeur ajoutée de chacune des options précédentes sur 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. Ce gain sur la sécurité est affiché dans la fenêtre de simulation.

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 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 illustrent toute la pertinence et le sens de cette approche en matière de prévention. **O'Dive présente donc tout son intérêt dans le fait de pouvoir de mieux se connaître et de faire progresser sa pratique vis-à-vis du risque d'accident de décompression.**

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 des nombreuses étapes de maturations avant de parvenir au système actuel, qui fait l'objet d'un processus d'amélioration continu.

Références

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, 25 nov. 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
5. Hugon, J. 2014. *Decompression models: review, relevance and validation capabilities.* *Undersea and Hyperbaric Medicine* 41(6), 531-556
6. Hugon J, Nishi R, Bouak F, Blatteau J-E, Gempp E. *A stress index to enhance DCS risk assessment for both air and mixed gas exposures ; UHMS Annual Scientific Meeting 2015 – Montreal - June 17th-20th*
7. Hugon J, Metelkina A, Barbaud A, Nishi R, Bouak F, Gempp E, Blatteau J-E. *Reliability of venous gas embolism detection in the subclavian area for deco. stress assessment following scuba diving - Diving and Hyperbaric Medicine Journal, Vol. 48 No. 3 Sept. 2018*