

Ordinateurs de plongée et absence de surpénalisation des plongées successives

Alain Foret* and Éric Frasquet†
Worldivers Research & Reports, Montpellier, France.
(Dated: 23 décembre 2023)

Certains ordinateurs de plongée n'appliquent pas de surpénalisation aux plongées successives, sans justification ni avertissement dans les notices d'instructions. La durée des paliers peut ainsi être divisée par deux ou trois par rapport à d'autres ordinateurs. Cela interroge sur la dangerosité de cette approche.

INTRODUCTION

La plongée se pratique dans le monde entier, que ce soit à titre de loisir, pour réaliser des travaux sous-marin ou dans un but militaire. La plongée de loisir, créée en Europe (France, Saint-Raphaël, Cdt Le Prieur, août 1933)[1], regrouperait 6,5 millions[2] d'adeptes dans le monde, dont 2,5 millions aux États-Unis. Elle peut être divisée en trois catégories : loisir "récréatif", loisir sportif et plongée technique.

La pratique en loisir "récréatif" se déroule en binômes autonomes qui suivent un "dive leader", sans paliers obligatoires, à une profondeur maximum de 30 m voire 40 m.

La plongée de loisir sportif se pratique en Europe et dans certains pays membres de la CMAS¹. Elle permet d'aller au-delà de la plongée "récréative", les plongeurs étant formés à plonger en autonomie complète ou en suivant un guide, jusqu'à 60 m de profondeur en respirant de l'air et en pouvant effectuer des paliers obligatoires.

La plongée technique permet de plonger plus profond qu'en respirant de l'air, en utilisant des mélanges respiratoires à base d'hélium.

Tous ces modes de pratique permettent de plonger plusieurs fois par jour. Ainsi, la gestion des plongées successives est un élément clef de la prévention des risques d'accidents de désaturation (ADD).

MISE EN PERSPECTIVE HISTORIQUE

John Scott Haldane, qui avait été engagé par la Royal Navy en 1905[3], publia le premier modèle de désaturation au monde en 1907[4], avant de rendre ses travaux publics en 1908[5][6].

Ce modèle est utilisé aujourd'hui dans quasiment 100% des ordinateurs de plongée via les jeux de paramètres de

A. A. Bühlmann, principalement le ZH-L 16 C conçu spécifiquement pour les ordinateurs de plongée et publié en 1986[8]. Même les algorithmes RGBM et VPM utilisent ce jeu de paramètres.².

Haldane n'a modélisé qu'une plongée par jour. Faire plusieurs plongées par jour, quel que soit le jeu de paramètres utilisé, n'a donc pas été prévu[7].

L'US Navy, qui très tôt avait adopté les tables de Haldane, souleva le problème dès 1916 : "Si un plongeur effectue une seconde descente avec un intervalle de moins de trois heures entre les deux plongées, son corps sera plus fortement saturé en azote à la fin de la seconde plongée, et une attention supplémentaire sera nécessaire pour le ramener à la surface. Une règle sûre consiste à prendre la durée totale combinée des deux plongées et à utiliser une table pour cette exposition, à la profondeur à laquelle le plongeur travaillait"[9]. Cette méthode, jugée trop pénalisante, a vite été abandonnée.

De plus, des recherches ont montré par la suite que l'intervalle de trois heures en surface n'était pas suffisant et qu'il fallait pénaliser les plongées successives même au-delà de trois heures[14].

Nous savons désormais que prendre en compte le gaz neutre (azote) de la précédente plongée n'est pas suffisant. Deux facteurs supplémentaires entrent en jeu, des bulles et des micronoyaux gazeux[10], créés lors de la remontée de la plongée précédente, restent présents lors de la plongée suivante.

2. Qu'il soit appelé ZH-L 16 C ADT, ZH-L 16 C GF ou autre (même ZH-L 6 ou ZH-L 8), il s'agit du même jeu de paramètres. À propos du RGBM, voir B. Wienke, *Reduced Gradient Bubble in depth*, Best Publishing, p. 34. À propos du VPM voir le code source du VPM-B en Fortran par Erik C. Baker : "Ce programme utilise les seize (16) compartiments du jeu de paramètres Bühlmann ZH-L16."

1. Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques, créée par Jacques-Yves Cousteau à Monaco en 1959.

PLONGÉES SUCCESSIVES

Alors que le modèle du DCIEM[12] gère de manière native les plongées successives, ce n'est pas le cas du modèle de Haldane.

Comme nous l'avons dit, les plongées successives doivent non seulement prendre en compte le gaz neutre (azote) résiduel de la précédente plongée mais également les bulles et les micronoyaux gazeux qui ont été générés et qui vont favoriser la création de bulles lors d'une plongée successive, ce qui constitue un facteur de risque supplémentaire d'ADD.

La notion de formation de micronoyaux gazeux n'est pas nouvelle, elle existe depuis longtemps en physique sous le nom de théorie de la nucléation. Le livre de la Marine nationale *La Plongée* envisageait dès 1967 son implication dans la création de bulles en plongée.

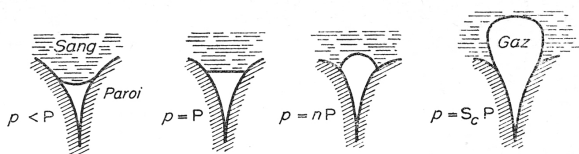


FIGURE 1. Théorie de la nucléation dans *La Plongée*, Marine nationale, Arthaud, 1967, p. 125.

De nombreux auteurs ont écrit sur les plongées successives[11], en particulier :

- "La plupart des méthodes disponibles, y compris dans les ordinateurs de plongée, utilisent la charge de gaz de la plongée précédente, ajustée pour tenir compte de l'intervalle de surface, et ne tiennent pas ou peu compte de la génération ou de la destruction possible de bulles et de micronoyaux gazeux." Peter Bennett [13]
- "La désaturation complète peut prendre plus de 24, voire 48 heures. Cela pose des problèmes lors d'une deuxième plongée qui a lieu après un intervalle de surface relativement court après la première plongée. Cela peut également poser des problèmes pendant les vacances de plongée où vous effectuez plusieurs plongées par jour pendant plusieurs jours d'affilée. Lors de la deuxième journée de plongée et des suivantes, les tissus plus lents peuvent encore contenir de l'azote résiduel au début de la journée suivante, qui peut s'accumuler au cours des vacances. Des recherches menées par le Divers Alert Network (DAN) ont montré que les plongeurs qui effectuent plusieurs plongées par jour ont un risque d'accident de désaturation plus élevé que la moyenne." Mark Powell [14]

Comme le modèle ne prend pas en compte les bulles et les micronoyaux gazeux de la précédente plongée, la seule solution trouvée a consisté à surpénaliser la plongée

suivante en augmentant artificiellement le taux de gaz neutre résiduel (azote).

Cela a conduit au développement de calculs spécifiques pour les tables de plongée, en dehors du modèle de Haldane, sous le nom de Groupe de Plongée Successive (GPS).

TABLES DE PLONGÉE : GROUPE DE PLONGÉE SUCCESSIVE (GPS)

Avec le modèle de Haldane, après une plongée, il n'est pas suffisant de prendre en compte le gaz neutre (azote) résiduel dans les différents compartiments pour assurer la sécurité d'une plongée successive. Cela tient au fait que, dans la plupart des cas, le compartiment directeur a une demi-vie relativement courte (ex. 12,5 ou 18,5 min pour ZH-L 16 C). Comme la désaturation totale a lieu au bout de 6 fois la demi-vie, très vite il y a peu ou pas du tout de pénalisation (ex. respectivement, après 75 ou 111 min).

Il a donc été choisi de prendre en compte un compartiment avec une demi-vie relativement importante afin de calculer une majoration de la durée réelle de plongée (durée fictive) appliquée à tous les autres compartiments. Cette approche a été adoptée par toutes les tables de plongée au monde. Dans cette logique, Bühlmann a pris en compte successivement 80 puis 90 min et 365 min (Bühlmann-Hahn). L'US Navy et la Marine nationale française ont utilisé le compartiment de 120 min. Les tables RDP-PADI (issues des tables US Navy) ont pris en compte le compartiment 60 min (limité aux plongées récréatives).

ORDINATEURS DE PLONGÉE

Plongées successives

L'avènement des ordinateurs de plongée a conduit à l'abandon de la méthode du GPS par impossibilité de la mettre en oeuvre dans un calcul en temps réel. D'autres solutions ont été trouvées, généralement protégées par le droit de la propriété intellectuelle et n'ont donc pas été dévoilées : Uwatec Aladin Pro, Aladin AIR X, Scubapro, Suunto Companion, Suunto Solution, Suunto RGBM, Mares, Aqualung, etc.

Par exemple, pour ZH-L8 ADT³, dérivé de ZH-L 16 C avec moins de compartiments, un algorithme a été développé pour Uwatec par Ernst Völm de Dynatron AG en collaboration avec le Professeur Albert Bühlmann.

3. Pour les premiers ordinateurs Aladin, le jeu de paramètres ZH-L 16 C a été simplifié en réduisant le nombre de compartiments (ZH-L 6 en 1989, ZH-L 8 en 1994) du fait des capacités des ordinateurs de l'époque. Dans les faits, cette simplification n'a eu aucune conséquence sur le calcul des paliers.

De son côté, Max Hahn a développé au début des années 1990 un autre algorithme, appelé *Delayed Surface Desaturation (DSD)*, "à l'issue d'une expérimentation sur des plongées humaines successives. Son algorithme est légèrement plus conservateur que celui de Bühlmann."⁴

Par ailleurs, Erik C. Baker indique dans le code source du VPM-B : "Ce programme étend l'algorithme VPM de 1986 (Yount and Hoffman) afin d'intégrer (...) les plongées (...) successives."

Tous ces travaux se sont retrouvés dans les différents ordinateurs de plongée du marché, dans le but de surpénaliser les plongées successives.

En plus du modèle de Haldane, un autre modèle a été créé. Basé sur les travaux de D.J. Kidd et R.A. Stubbs en 1962, Ronald Y. Nishi a développé une nouvelle approche à partir de 1971, connue sous la nom de DCIEM⁵[12], implémentée récemment, en option, dans certains modèles d'ordinateurs de Shearwater. Cette modélisation, avec des compartiments en série plutôt qu'en parallèle comme chez Haldane, gère de manière native les plongées successives. Avec ce modèle, il n'est pas nécessaire d'ajouter un algorithme spécifique pour prendre en compte ces plongées.

Les résultats obtenus avec le DCIEM ou avec l'algorithme de surpénalisation développé par Uwatec, Scubapro ou Suunto sont comparables (voir Table I).

Les jeux de paramètres Bühlmann ZH-L 16 C (1986) ont de nombreux avantages pour un fabricant d'ordinateur de plongée. Ils sont publics, gratuits et prennent en compte l'azote (air, nitrox) comme l'hélium (héliox, trimix). À la suite des fabricants historiques, de nouveaux entrants sur le marché les ont utilisés, d'abord en plongée technique, puis en plongée récréative et sportive. La particularité de ces ordinateurs est que l'utilisateur peut entrer ses propres facteurs de gradient (GF). Pour des raisons de marketing, le jeu de paramètres a été appelé ZH-L 16 C "GF". Il s'agit en fait du jeu de paramètres original de Bühlmann avec réglage manuel des GF. Dans cette catégorie, on trouve Shearwater, Garmin, OSTC, certains nouveaux modèles de Scubapro ou Mares, etc.

Premières alertes sur le fonctionnement de certains ordinateurs de plongée

Des plongées sportives, avec paliers de décompression obligatoires, tant pour l'enseignement que pour l'exploration, réalisées en mer Méditerranée entre mars et octobre 2023, nous ont amenés à nous interroger sur la gestion des plongées successives par les ordinateurs proposant le

ZH-L 16 C avec réglage manuel des GF. Ce questionnement a été partagé par des moniteurs de plongée, tant en France qu'en Espagne. Certains utilisaient même deux ordinateurs de plongée, conscients de la faible pénalisation des plongées successives avec certaines machines. L'un avec réglage manuel des GF pour connaître les indications lues par leurs clients sur ce type d'appareil. L'autre, avec une véritable gestion des plongées successives, afin de connaître précisément le temps restant sans palier ou la durée des paliers. À la fin de l'été 2023, nous avons donc décidé d'effectuer des tests systématiques pour analyser les différences de gestion des plongées successives entre les différents modèles d'ordinateurs de plongée.

Matériel utilisé pour les tests et méthodologie

L'équipement utilisé est un caisson Uwatec alimenté par une bouteille d'air comprimé, permettant d'effectuer des tests jusqu'à 10 bars.

Une des difficultés rencontrées avec ce type de test est la nécessité d'une reproductibilité identique entre chaque test, afin que les résultats soient comparables. Nous avons donc ajouté un pilotage par logiciel afin de garantir cette reproductibilité.

En ce qui concerne la mesure de la profondeur, nous sommes bien conscients qu'il ne s'agit pas d'une information fiable car, en fonction des facteurs de conversion (pression atmosphérique, eau douce, eau salée), elle peut varier de manière significative d'un ordinateur à l'autre. Nous avons donc choisi de paramétrer le logiciel à une pression donnée, ce qui permet de s'assurer que tous les tests ont été effectués à la même pression.

En ce qui concerne les réglages de l'ordinateur de plongée, nous avons utilisé pour toutes les machines soit le mode par défaut (L0, MBL0, P0, R0, SF0, etc.), soit GF 90/90 lorsque les réglages étaient manuels. Le fait que le mode par défaut utilisé dans la plupart des ordinateurs de plongée corresponde au GF 90/90 a été indiqué en 2021⁶. Nous avons vérifié cela avant de poursuivre les tests (voir Plongée 1, Table I). Cela permet une comparaison fiable.

En ce qui concerne le couple durée-profondeur à tester, l'objectif était de trouver des valeurs permettant de mettre en évidence d'éventuelles différences dans la gestion des plongées successives. Nous avons utilisé la profondeur de 30 m, déjà testée par A. A. Bühlmann. Pour la durée, nous avons utilisé celle, historique, des tables US-Navy à 30 m : 30 min. Quant à l'intervalle en surface de 90 min, il nous a semblé suffisant pour permettre une certaine désaturation des compartiments, tout en nécessitant une surpénalisation pour les plongées successives.

4. See www.apdiving.com

5. Defense and Civil Institute of Environmental Medicine, Canada

6. Rosenblat, Miri & Vered, Nurit & Salm, Albi (2021). *On the reliability of dive computer generated run-times*, Part I. 10.13140/RG.2.2.16260.65929.

Au jour de cette publication, nous avons testé les ordinateurs listés dans la Table I.

Bien que non exhaustifs, ces tests sont suffisamment significatifs pour autoriser une analyse et en tirer des conclusions.

Ainsi, nos tests peuvent être aisément vérifiés en utilisant le même protocole.

Résultats

L'analyse des résultats montre que l'on peut distinguer plusieurs groupes d'ordinateurs :

- Ceux qui se situent entre + et - 3 minutes des résultats du DCIEM.
- Ceux qui sont bien au-dessus du DCIEM et qui sont probablement trop conservateurs.
- Ceux qui se situent bien en dessous du DCIEM.
- Ceux qui sont encore plus en dessous du DCIEM et qui n'appliquent pas de surpénéalisation (moins de 20 minutes de paliers lors de la deuxième plongée).
- Il faut également noter une grande différence dans la durée des paliers entre les différents modèles d'une même marque d'ordinateur, voire même au sein d'un même modèle selon l'algorithme choisi.

Conclusion

A l'exception de l'implémentation dans le LUNA 2 de Scubapro, aucun des ordinateurs utilisant le ZH-L 16 C GF n'applique de surpénéalisation aux plongées successives. Toutes les marques testées ont été contactées. Nous leur avons demandé les raisons de cette absence de surpénéalisation. A ce jour, nous n'avons reçu aucune réponse.

Quelle qu'en soit la cause, les durées de désaturation sont divisés par 2 ou 3 pour les ordinateurs de plongée qui ne surpénalisent pas.

Nous pensons que :

- Les fabricants concernés devraient justifier cette pratique par des publications scientifiques et insérer un avertissement dans les notices d'instructions.
- D'autres études devraient être menées sur le terrain afin d'analyser les accidents de plongée en fonction des ordinateurs de plongée utilisés et des réglages associés, tant pour la plongée récréative que pour la plongée sportive et technique.

| Ordinateur | Paramètres | Plg 1 | Plg 2 |
|----------------------|--------------------|-----------|-----------|
| Suunto Vyper | RGBM | 13 | 42 |
| Aqualung i300C | ZH-L | 24 | 41 |
| Suunto D4i | RGBM | 18 | 41 |
| Suunto Favor | Spencer (US-Navy) | 15 | 40 |
| Scubapro A1 | ZH-L16C ADT (L0) | 17 | 39 |
| Suunto Companion | Spencer (US-Navy) | 14 | 39 |
| Aqualung i100 | ZH-L | 20 | 38 |
| Scubapro G2 | ZH-L16C ADT (L0) | 16 | 38 |
| Scubapro Pro I | ZH-L6 | 14 | 38 |
| Scubapro Luna 2 | ZH-L16C ADT (L0) | 16 | 37 |
| Mares M1 RGBM | RGBM | 13 | 36 |
| Mares M1 | Rogers Powel (USN) | 11 | 36 |
| Shearwater Peregrine | DCIEM | 13 | 35 |
| Scubapro Sol | ZH-L8 ADT (L0) | 16 | 34 |
| Scubapro Pro II | ZH-L8 ADT | 16 | 34 |
| Suunto Octopus 2 | Spencer (USN) | 12 | 34 |
| Mares Guardian | RGBM | 9 | 34 |
| Scubapro HUD | ZH-L16C ADT (L0) | 14 | 33 |
| Suunto Alpha | Spencer (US-Navy) | 13 | 33 |
| Scubapro Pro Ultra | ZH-L16C ADT (L0) | 15 | 32 |
| Scubapro Square | ZH-L16C ADT (L0) | 14 | 32 |
| Scubapro Luna 2 | ZH-L16C GF 90/90 | 13 | 26 |
| OSTC OSTC 2 | ZH-L16C GF 90/90 | 11 | 20 |
| Shearwater Teric | ZH-L16C GF 90/90 | 13 | 17 |
| Shearwater Peregrine | ZH-L16C GF 90/90 | 13 | 17 |
| Scubapro HUD | ZH-L16C GF 90/90 | 11 | 16 |
| Shearwater Petrel 3 | ZH-L16C GF 90/90 | 11 | 16 |
| Garmin MK2 | ZH-L16C GF 90/90 | 11 | 15 |

TABLE I. Ordinateurs de plongée : Durée totale des paliers (min). Première plongée de 30 min à 30 m avec un intervalle en surface de 90 min, suivie d'une deuxième plongée de 30 min à 30 m.

- [2] DEMA, *Diving Fast Facts*, 2023.
- [3] Admiralty, S.W., *C.N. 11713/19049, 8th August 1905*.
- [4] Royal Navy, *Report of a Committee Appointed by Lords Commissioners of The Admiralty, Deep Water Diving*, 1907.
- [5] Haldane J.-S. et coll., *The prevention of decompression air illness*, J. Hyg., 1908.
- [6] Haldane J.-S. et coll., Translation in French by Foret A., *Prévention de la maladie de décompression*, Téthys, 2008, By permission of Cambridge University Press.
- [7] Hamilton R. W., *The effectiveness of dive computers in repetitive diving*, Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc, 1995.
- [8] Bühmann A. A., Völlm E.B., Nussberger P., *Tauchmedizin*, Springer-Verlag, 2002.
- [9] US Navy *Diving Manual*, 1916, Chapter X, p.84.
- [10] Arieli R., Marmur A., *Decompression sickness bubbles : are gas micronuclei formed on a flat hydrophobic surface ?* Respir Physiol Neurobiol. 2011 Jun 30 ;177(1) :19-23.
- [11] Lang M. A. et Vann R. D., *Proceedings of Repetitive Diving Workshop*, American University of Underwater Sciences, Duke University, 1991.
- [12] Ronald Y. Nishi et al, *Digital Computation of Decompression Profiles*, DCIEM-NTIS, 1973.
- [13] Bennet and Elliott's, *Physiology and Medicine of Diving*, Saunders, 2003, pp. 471-473.
- [14] Powell M., *Deco for divers*, Aquapress, 2021, p. 62..

* Corresponding author : alain.foret@worlddivers.com

† Corresponding author : eric@aventurebleue.com

[1] Foret A. & Pierre Martin-Razi, *Une histoire de la plongée et des sports subaquatiques*, Subaqua, 2007, p. 64.