

Modélisation haldanienne de la désaturation : principes de calcul, demi-vie, Sc, M-Values et facteurs de gradient (GF)

Alain Foret*

Plongée Plaisir, Worldivers Research & Reports, Montpellier, France.

(Dated: 4 janvier 2023)

Cette publication présente le modèle de Haldane, en vigueur dans quasiment 100% des ordinateurs de plongée via les jeux de paramètres Bühlmann ou RGBM (souvent improprement appelés « modèle »). Après une présentation historique des travaux de Haldane, elle aborde le calcul du niveau de saturation (demi-vie, équation de Haldane, équation de Schreiner) et celui des conditions de la remontée (seuil critique, M-Values, facteurs de gradient). En particulier, elle démontre que l'équation de la remontée via les seuils critiques est la même que celle des M-Values de Workman, qui a l'avantage de faire apparaître deux variables au lieu d'une, ce qui en fait tout l'intérêt. En utilisant le facteur Q (PrT index), nous avons pu également mesurer l'incidence des M-Values en fonction de la sévérité de la désaturation. Les facteurs de gradient (GF), une astuce de calcul consistant à diminuer les M-Values, sont présentés à la suite.

INTRODUCTION

Au cours du XIX^e siècle, les travaux en respirant de l'air comprimé, pour construire des ponts¹ ou en opérations de plongée², provoquaient de nombreux accidents. Les causes étaient inconnues, on parlait d'un « mal des caissons » se produisant à la fin du travail, au moment du retour à la pression atmosphérique, d'où le dicton de l'époque : « On ne paye qu'en sortant »[1].

La procédure adoptée, une remontée « lente et uniforme »³ de l'ordre de 0,5 à 1 m/min, quels que soient la profondeur et le temps passé au fond, n'était pas satisfaisante car elle conduisait à des remontées interminables dès que les plongées étaient profondes, sans pour autant réduire suffisamment le nombre d'accidents.

C'est dans ce contexte que la Royal Navy, par une décision du 19 juillet 1905 et un courrier du 8 août, forme une commission sur la plongée profonde. Elle confie à un éminent chercheur, John Scott Haldane, physiologiste reconnu pour ses travaux sur la respiration, la tâche « d'améliorer les conditions de plongée jusqu'à 30 brasses (environ 60 mètres) afin de permettre aux plongeurs de réaliser une quantité normale de travail et d'assurer leur retour à la surface en sécurité ».

Aidé par son assistant Arthur E. Boycott et par un plongeur militaire récemment breveté en plongée, Guybon C. Damant, il se lance dans les travaux et mène à bien

sa tâche en publiant ses premières recommandations en juillet 1906, puis un rapport aux *Lords Commissioners of the Admiralty* en août 1907 et enfin un article complet en 1908 dans *The Journal of Hygiene*[2]. Il invente ainsi la remontée par paliers, crée le premier modèle de désaturation au monde et publie deux jeux de tables⁴ de 0 à 62 m, le premier pour des expositions « d'une durée normale »⁵, le second « au-delà d'une durée normale »⁶. Nous utilisons encore aujourd'hui, dans tous nos ordinateurs de plongée, le modèle de Haldane, que ce soit avec le jeu de paramètres de Bühlmann ou celui du RGBM.

MISE EN PERSPECTIVE HISTORIQUE

Le début des recherches sur la désaturation date de 1755, avec les travaux de Pieter Van Musschenbroeck⁷,

4. Haldane n'a pas publié de troisième table allant jusqu'à 100 m. Il s'agit d'une confusion faite par H. V. HEMPLEMAN dans *The Physician's Guide To Diving Medicine*, Plenum Press, New-York, 1984, p 237. L'extension des tables de Haldane a été faite par l'US-Navy, d'abord jusqu'à 76 m (*US-Navy Diving Manual*, 1916), puis jusqu'à 93 m (*US-Navy Diving Manual*, 1924).

5. Temps maximal de remontée : 32 min.

6. Temps maximal de remontée : 42 à 238 min.

7. Certains auteurs prétendent que Robert Boyle aurait mené les premières recherches de l'histoire sur la décompression en observant une bulle dans l'œil d'une vipère. Si l'on reprend le texte d'origine publié en 1670[5], Robert Boyle indique qu'il menait des expériences, à l'aide d'une machine pneumatique, sur les conséquences de la raréfaction de l'air sur les animaux (souris, oiseaux, grenouilles, vipères, ...), « dans le but de reconnaître ce qui, joint au défaut de respiration, pouvait contribuer à faire mourir les animaux dans le vide ». Il ne s'agissait donc pas de recherches sur les conséquences du retour à la surface après avoir subi une augmentation de la pression ambiante.

1. Appareil Triger, 1841, utilisé durant la révolution industrielle[9].

2. En scaphandre lourd : pêcheurs d'éponges ou de corail, militaires.

3. Directives données par Heller, Mager et von Schrötter ainsi que Paul Bert[19] et Auguste Denayrouze.

qui est le premier à avoir soumis des animaux à l'action de l'air comprimé. Mais ses conclusions ne sont pas satisfaisantes.

Puis, de nombreux auteurs, pendant plus d'un siècle, tentent d'apporter des explications : certains en appellent à la métaphysique[6], d'autres mettent en cause l'acide carbonique[7][12] ou bien en appellent aux tumeurs[8], ou encore au « refoulement centripète du sang »[1].

Plus visionnaires, d'autres auteurs envisagent le dégazage dans le sang[10][11] et des phénomènes emboliques[13][14][16].

Paul Bert indique à propos des accidents de décompression : « On les prévient, le bon sens l'indique et l'expérience le prouve, par une décompression suffisamment ralentie »[19]. Même si Paul Bert évoque un arrêt à demi-profondeur[20], les consignes sont alors d'adopter une vitesse de remontée « lente et uniforme », de l'ordre de 0,5 à 1 m/min, quelles que soient la durée et la profondeur de plongée⁸.

Finalement Paul Bert met en évidence le rôle de l'azote et fonde la théorie de l'embolie gazeuse[17], sans pour autant donner de mode opératoire satisfaisant. Mais il ouvre ainsi la voie à Haldane pour établir le premier modèle de désaturation au monde.

LES TRAVAUX DE HALDANE

La recherche sur la décompression en est là lorsque Haldane ouvre le dossier en 1905.

Dans un premier temps, il combat, sur le plan scientifique, le principe même des remontées lentes et uniformes : « Afin d'éviter le risque de formation de bulles lors de la décompression, il était recommandé jusqu'ici que celle-ci soit aussi lente et uniforme que possible. »

Il démontre que, pour les plongées profondes, une « décompression uniforme à ce rythme, déjà dangereuse pour les chèvres, serait sans doute extrêmement dangereuse pour les hommes, qui désaturent nettement plus lentement que les chèvres »[3].

Il tente ensuite de trouver une nouvelle méthode de décompression. Sa réflexion s'appuie sur un constat unanimement partagé à l'époque, y compris par Paul Bert. Il écrit : « Ceux qui ont l'expérience du travail dans de l'air comprimé le savent bien, il n'y a pas de risque de mal des caissons, même avec une remontée très rapide, pourvu que la pression atteinte ne dépasse pas une certaine valeur. Il semble parfaitement clair qu'aucun symptôme n'apparaît lorsque la pression relative est inférieure à une atmosphère [10 mètres de profondeur], quelle que soit la durée d'exposition. »[4] Dit autrement, Haldane

constate qu'il est possible de passer, sans risque, de 2 bars (10 m de profondeur) à 1 bar (niveau de la mer).

Il va alors étendre ce raisonnement à toutes les zones de profondeur : « Par conséquent, il semble probable que, si une décompression brusque de deux atmosphères de pression absolue à une est sans danger, il doit en être de même de quatre atmosphères absolues à deux, de six atmosphères absolues à trois, etc. Nos expériences, décrites en détail plus loin, ont montré que c'était le cas. Le processus de désaturation peut, par conséquent, être très fortement accéléré en réduisant rapidement la pression absolue de moitié, et en faisant en sorte que, pour le reste de la décompression, la saturation ne puisse jamais atteindre, dans aucune partie du corps, plus du double de la pression de l'air. Le principal avantage de cette méthode est que, dès le début de la décompression, l'élimination d'azote par les tissus se fait à la vitesse la plus élevée possible sans danger. » Haldane aboutit ainsi à la création de la remontée par paliers de 10 pieds en 10 pieds (3 m) avec la prise en compte de la pression et de la durée d'exposition pour déterminer la profondeur et le temps des paliers. Haldane s'exprime ainsi à propos de sa méthode : « Cette méthode simplifie grandement la question de la sécurité de la décompression et supprime de nombreuses difficultés pratiques, en particulier en ce qui concerne la plongée profonde. On peut la qualifier de méthode de décompression par paliers, et elle est décrite comme telle ci-après, bien que sa caractéristique essentielle ne réside pas dans le fait que la décompression est effectuée par paliers, mais en ce qu'elle est rapide⁹ jusqu'à ce que la pression absolue soit diminuée de moitié et poursuivie lentement ensuite. »

LES 10 HYPOTHÈSES DE HALDANE

Les numéros indiqués ci-dessous font référence au numéro de page de la publication de Haldane dans *The Journal of Hygiene* (1908)[2] :

1. Au niveau des poumons, l'excès d'azote est transmis instantanément au sang (p. 345).
2. Au niveau des poumons, lors de la décompression, à chaque cycle circulatoire, le sang transmet instantanément aux poumons la proportion d'azote en excès qu'il contient (p. 351).
3. Au niveau des tissus, l'excès d'azote est transmis instantanément (p. 345).

8. Heller, Mager et von Schrötter[18] ainsi que Paul Bert[19][20] et Auguste Denayrouze[15].

9. Cela a conduit certains auteurs à prétendre que Haldane avait proposé une vitesse de remontée rapide au sens où nous l'entendons aujourd'hui, ce qui est inexact. Le côté « rapide » de la vitesse de remontée doit s'analyser au regard des remontées lentes et uniformes, de l'ordre de 0,5 à 1 m/min, proposées à l'époque. Les tables de Haldane utilisent une vitesse de remontée moyenne de l'ordre de 10 m/min (5 à 14 m/min selon la profondeur).

4. La pression partielle d'azote dans l'air alvéolaire est la même que dans l'air inspiré (p. 345).
5. Les tissus ont tous une constitution similaire à celle du sang hormis la graisse (p. 346).
6. Un cycle circulatoire a lieu en 1 minute (p. 348).
7. La courbe de désaturation est miroir de la courbe de saturation (p. 350).
8. Les phénomènes de charge et de décharge en azote dans le corps humain peuvent se représenter par des compartiments (régions anatomiques factices) caractérisés par leur demi-vie et fonctionnant en parallèle, c'est à dire qu'ils ne communiquent pas entre eux (p. 360).
9. Le rapport de pression, qui dicte les conditions de la remontée, ne doit pas dépasser 2 : 1 (p. 357).
10. Le temps de descente est inclus dans le temps de plongée (p. 367). La durée d'exposition virtuelle considérée est la durée d'exposition fond réelle, augmentée de la moitié du temps de descente (p. 350). Cela justifie de devoir respecter, avec des tables, une certaine vitesse de descente.

AUTRES APPORTS DE HALDANE

Au-delà de la création de la décompression par paliers, Haldane se livre, tout au long de la publication, à différents constats fort intéressants :

- Il préconise de bouger les bras et les jambes aux paliers afin d'éviter que les conditions de la désaturation soient très différentes de celles de la saturation (p. 367).
- L'âge et embonpoint apparaissent comme favorisant les accidents (p. 368).
- À mesure que l'intervalle entre les plongées successives augmente, le danger cumulé face à la décompression diminue. Avec un intervalle d'une heure, les précautions supplémentaires peuvent être diminuées de moitié, et omises lorsque l'intervalle est de deux ou trois heures (p. 370).
- La vitesse de remontée est en moyenne de l'ordre de 10 m/min (elle varie selon la profondeur de 5 à 14 m/min - p. 370 et durée de remontée au premier palier affichée dans les tables).
- Il aborde la notion de facteurs spécifiques à chaque individu et variables d'un jour sur l'autre pouvant venir contredire le modèle de décompression [nous parlons aujourd'hui de facteurs favorisants] (p. 384).
- Il signale la présence de bulles sans symptômes (p. 411) [nous parlons aujourd'hui de « bulles silencieuses »].

LA MODÉLISATION DE HALDANE

Selon la modélisation de Haldane, le processus de saturation et de désaturation du corps humain pourrait être représenté par des régions anatomiques factices appelées « compartiments », indépendantes les unes des autres et caractérisées par :

1. Leur demi-vie ou « période », durée qui caractérise la rapidité du processus de saturation/désaturation en gaz neutre ;
2. Leur seuil limite de tolérance à la sursaturation sans causer d'accident.

Sur un plan pratique :

- La demi-vie permet de calculer le niveau de saturation ;
- Le seuil de tolérance à la sursaturation (S_c ou M-Value) dicte les conditions de la remontée.

La notion de demi-vie et l'équation de Haldane

La demi-vie ou « période » est la durée mise par une substance pour perdre la moitié de sa concentration. C'est une notion d'usage courant en pharmacologie, en physiologie, en chimie et, de manière générale, en sciences.

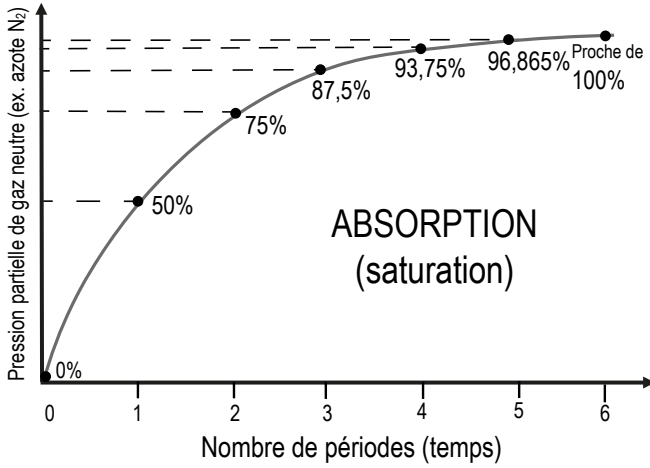
Par exemple, si la demi-vie d'un médicament est de 2 h, cela signifie qu'il aura diffusé la moitié (50%) de son principe actif au bout de 2 h puis la moitié de la moitié restante (25% supplémentaires) dans les deux heures suivantes et ainsi de suite. On considère généralement que la réaction est terminée au bout de 6 périodes (98,437%), soit $2 \times 6 = 12$ h.

Haldane a défini 5 compartiments dont les périodes ou demi-vie sont : 5, 10, 20, 40 et 75 minutes (p 363). Il justifie ainsi le choix de 75 minutes pour le compartiment le plus long : « Les parties du corps les plus lentes à désaturer mettront [...] 75 minutes pour perdre la moitié de l'azote en excès qu'elles peuvent contenir à une pression d'air donnée » (p. 309).

Compartiments	1	2	3	4	5
Demi-vie (min)	5	10	20	40	75

TABLE I. Demi-vies ($t_{1/2}$) des compartiments de Haldane

La théorie applicable est celle des phénomènes de « transport », d'une utilisation ancienne et généralisée dans de nombreux domaines des sciences (diffusion de matière, de chaleur, etc.). Les grandeurs qui obéissent à ce phénomène suivent une loi exponentielle. Haldane a

FIGURE 1. Absorption du gaz neutre : $T_f > T_0$

considéré que les gaz neutres¹⁰ suivaient cette loi exponentielle pour être accumulés (descente, séjour au fond) comme pour être éliminés (remontée, durée du palier, séjour en surface après une plongée).

Soit $T_{gn}(t)$, la tension de gaz neutre à un instant t dans un compartiment C à une profondeur p supposée constante.

Soit T_f , la tension finale de gaz neutre pour ce compartiment. La loi de transport suppose que le taux de variation de la tension de gaz neutre $\frac{dT_{gn}}{dt}$ varie linéairement avec le gradient de tension de gaz neutre ($T_{gn} - T_f$) :

$$\frac{dT_{gn}(t)}{dt} = -k(T_{gn}(t) - T_f) \quad (1)$$

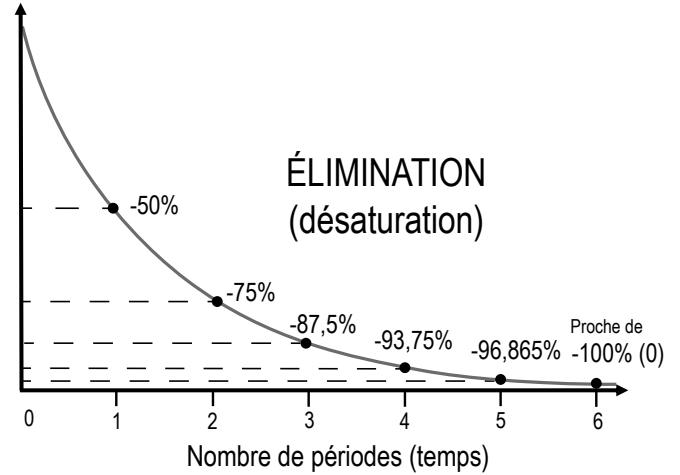
où k est un coefficient caractéristique du compartiment. On obtient alors la tension de gaz neutre à t par intégration entre un instant initial t_0 et l'instant t :

$$T_{gn}(t) = T_f + (T_0 - T_f)e^{-k\Delta t} \quad (2)$$

où T_0 est la tension de gaz neutre au temps initial $T_0 = T_{gn}(t_0)$ et $\Delta t = t - t_0$. Cette équation montre que la tension de gaz neutre évolue exponentiellement de T_0 à T_f . On appelle demi-vie, notée $t_{1/2}$, la durée nécessaire pour que la tension de gaz neutre atteigne $T_0 + \frac{1}{2}(T_f - T_0)$. La demi-vie est caractéristique du compartiment et s'écrit $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$. L'équation (2) peut alors se réécrire sous la forme de l'équation dite « de Haldane » :

$$T_{gn}(t) = T_0 + (T_f - T_0)(1 - (0,5)^{\frac{\Delta t}{t_{1/2}}}). \quad (3)$$

10. Un « gaz neutre » est un gaz qui ne réagit pas (ou très peu) chimiquement dans le contexte de son utilisation. En plongée, l'azote, l'hélium ou l'hydrogène peuvent être utilisés comme diluant de l'oxygène. Historiquement, le terme « gaz inerte » reflète la même notion mais pour les gaz nobles dont l'azote ne fait pas partie. Aujourd'hui, les deux termes sont souvent considérés comme synonymes.

FIGURE 2. Élimination de gaz neutre : $T_f < T_0$

Pour un nombre entier de périodes 1, 2, 3, ... le terme $(1 - 0,5^{\frac{\Delta t}{t_{1/2}}})$ prend les valeurs 50%, 75%, 87,5%, ...

L'équation de Haldane est utilisée quelle que soit la nature du gaz respiré

L'équation de Haldane (Eq. 3) est utilisée quelle que soit la nature du gaz respiré. La prise en compte de la nature de ce gaz se fait :

- Soit par le paramètre qui indique le pourcentage de gaz neutre (ex. 79 ou 80% pour l'air ; 60% s'il s'agit d'une plongée au nitrox 40/60). C'est ce qui se passe dans votre ordinateur de plongée si vous choisissez l'option « nitrox » : le pourcentage d'azote est modifié, sans autre incidence.

- Soit par une modification du jeu de paramètres des compartiments (couples demi-vie et seuil de tolérance à la désaturation) lorsqu'il s'agit de plongée avec de l'hélium. Il y a donc des jeux de paramètres différents pour les plongées à l'azote (air, nitrox) et pour les plongées avec de l'hélium (hélio, trimix). Dans les deux cas, la formule est inchangée, seuls les paramètres sont modifiés.

L'équation de Haldane ne prend pas en compte la consommation d'air

Les seuils de tolérance à la sursaturation (voir ci-après) sont définis dans le jeu de paramètres du modèle en faisant une hypothèse de consommation d'air, reflet de l'activité physique. Généralement, les valeurs retenues sont de 20 l/min en loisir et de 30 l/min au travail. Si la consommation d'air est supérieure à celle qui a été retenue pour définir le jeu de paramètres, le plongeur se situe

hors modèle. C'est ce qui explique pourquoi effort, froid (qui augmente le métabolisme) et stress sont considérés comme des facteurs favorisant les accidents de désaturation.

L'équation de Haldane ne prend pas en compte spécifiquement les notions de perfusion et de diffusion

Les échanges gazeux se produisent en trois phases¹¹ :

- Une phase alvéolaire (poumons), où les échanges se font par diffusion ;
- Une phase de transport par le sang (appelée parfois « perfusion ») ;
- Une phase tissulaire, où les échanges se font par diffusion.

Lorsque certains auteurs parlent de « modèle à perfusion » ou de « modèle à diffusion », à quoi font-ils référence ?

Un modèle est dit « à perfusion » ou « à diffusion » selon qu'il ne considère, dans ses hypothèses, que l'une des deux phases d'échanges gazeux. Par exemple, le modèle développé à la demande du British Sub-Aqua Club (BSAC) par le Dr Tom Hennessy comprend 4 compartiments avec une approche revendiquant la prise en compte des phénomènes de perfusion et de diffusion. Il est donc considéré comme un modèle à « perfusion/diffusion ».

En lui-même, le modèle de Haldane ne prend pas en compte ces notions dans ses équations. Il nous semble donc impropre de parler de modèle « à perfusion » ou « à diffusion » dans le cadre de l'approche haldanienne.

En revanche, les différents jeux de paramètres peuvent avoir été déterminés en tenant compte de l'une des deux phases ou des deux. Dans une approche haldanienne, un jeu de paramètres est donc dit « à perfusion » ou « à diffusion » selon la phase prise en compte dans la détermination des valeurs des seuils de tolérance à la sursaturation (S_c , M-Values) des différents compartiments. Le jeu de paramètres de Haldane est considéré comme étant « à perfusion », tout comme celui de l'US-Navy ou des MN90. Bühlmann revendique une approche par « perfusion/diffusion ».

Avec les ordinateurs de plongée, l'équation de Haldane est légèrement modifiée (équation de Schreiner)

L'équation de Haldane (Eq. 3) ne fonctionne qu'à profondeur constante (ex. 30 m, 30 min). Avec ce handicap, le calcul de la désaturation à la remontée se faisait,

11. Plus qu'un phénomène physique (dissolution des gaz dans un liquide, loi de Henry), il s'agit d'un phénomène physiologique. Un corps humain n'est pas une éprouvette.

avec les tables, en considérant que tout le temps de la remontée jusqu'au premier palier s'était passé à mi-chemin entre la profondeur de départ et la profondeur du premier palier.

Par exemple, entre 30 m et 6 m, la profondeur moyenne est de $\frac{(30+6)}{2} = 18$ m. Pour passer de 30 à 6 m, il faut parcourir 24 mètres. Si l'on remonte à 10 m/min, il faut 2 minutes et 24 secondes. Les tables considèrent que ces 2 minutes et 24 secondes se sont déroulées à 18 m et calculent ainsi la désaturation des compartiments durant la remontée.

Ce type de calcul ne pouvait être maintenu avec les ordinateurs de plongée qui découpent la plongée en segments de quelques secondes.

C'est là que les travaux de Schreiner[21] ont tout leur intérêt. Il a ajouté une variable dans l'équation de Haldane (Eq. 3) qui permet de prendre en compte automatiquement une variation de profondeur (à une vitesse paramétrable) entre le point de départ et le point d'arrivée. Tous les ordinateurs de plongée utilisent l'équation de Haldane modifiée par Schreiner :

$$T_{gn}(t) = T_f + R(\Delta t - \frac{t_{1/2}}{\ln 2}) - (T_f - T_0 - R \times \frac{t_{1/2}}{\ln 2}) \times (0,5)^{\frac{\Delta t}{t_{1/2}}} \quad (4)$$

Si $R=0$, revient à l'équation de Haldane (profondeur constante).

Si $R=1$, vitesse de descente à 10 m/min (+1 bar par min).

Si $R=-1$, vitesse de remontée à 10 m (-1 bar par min).

Le seuil de tolérance à la sursaturation fixe les conditions de la remontée (S_c et M-Values)

La réflexion de Haldane s'appuie sur un constat unanimement partagé à l'époque y compris par Paul Bert : une diminution de la pression par 2 est tolérable, sans causer d'accident. Haldane définit ainsi un seuil critique S_c ¹² égal à 2 et fixe la relation entre la tension en gaz neutre du compartiment T_{gn} , le S_c et la pression absolue P_{abs} jusqu'à laquelle il peut remonter.

La tolérance à la sursaturation dicte les conditions de la remontée en fixant la profondeur jusqu'à laquelle chacun des compartiments peut théoriquement remonter. Le compartiment nécessitant l'arrêt le plus profond impose

12. La notion de seuil critique a été formulée ultérieurement. Nous l'abordons tout de même ici dans un souci de simplification. Workman[22] écrit à ce propos : « Ce rapport des pressions de 2 à 1 prend en compte la pression absolue à la profondeur maximale, plutôt que la pression partielle de l'azote. La pression absolue à profondeur maximale est divisée par deux pour déterminer le premier palier de décompression. L'air est un cas particulier car sa teneur en azote est de 79%, ce qui suppose que le rapport réel de la pression partielle d'azote soit $\frac{2 \times 0,79}{1} = \frac{1,58}{1}$ au lieu de $\frac{2}{1}$ ».

ses conditions à tous les autres. Il est appelé compartiment directeur.

Compartiments	1	2	3	4	5
Demi-vie (min)	5	10	20	40	75
S_c	2	2	2	2	2

TABLE II. Jeu de paramètres de Haldane

Équation fixant la remontée avec des S_c :

$$P_{abs} = \frac{T_{gn}}{S_c} \quad (5)$$

Si nous prenons comme exemple une plongée de 30 min à 30 m au niveau de la mer ($P_{atm} = 1$ bar) en respirant un air contenant 80% d'azote (N_2), la tension de départ est de 0,8 bar ($T_0 = 0,8$). Et la tension finale (T_f) d'équilibre à 30 m (4 bars) est de : $T_f = 4 \times 0,8 = 3,2$ bars. En utilisant l'équation de Haldane, on peut alors calculer la tension d'azote (T_{N_2}) dans chacun des compartiments au bout de 30 min. Puis, en appliquant $S_c = 2$, il est possible de déterminer la profondeur maximale jusqu'à laquelle les compartiments peuvent remonter.

Compartiments	1	2	3	4	5
Demi-vie (min)	5	10	20	40	75
S_c	2	2	2	2	2
T_{N_2} (bar)	3,16	2,90	2,35	1,77	1,38
$P_{abs} = \frac{T_{N_2}}{S_c}$ (bar)	1,58	1,45	1,18	0,89	0,69
Arrêt (m)	5,8	4,5	1,8	surf.	surf.

TABLE III. Illustration pour 30 min à 30 m

Le compartiment directeur est celui de 5 min, il impose un palier à 6 m (5,8 m arrondis à 6 m¹³) à tous les compartiments. Le compartiment directeur peut changer à chaque étape de la désaturation.

Il est possible de présenter différemment l'équation (5) afin de ne pas rechercher la pression absolue (P_{abs}) mais la tension maximale de gaz neutre (T_{gnmax}) acceptable à différentes profondeurs.

$$T_{gnmax} = S_c \times P_{abs} \quad (6)$$

La pression absolue étant égale à 1 bar (surface au niveau de la mer) plus 1 bar tous les 10 mètres d'eau¹⁴, si p est la profondeur en mètres :

$$T_{gnmax} = S_c(P_{atm} + \frac{1}{10} \times p). \quad (7)$$

Ce qui revient à :

$$T_{gnmax} = S_c \times P_{atm} + \frac{1}{10} S_c \times p. \quad (8)$$

En introduisant les variables $T_{gnmax} = M_p$, $M_0 = S_c \times P_{atm}$ et $\Delta M = \frac{1}{10} S_c$ on obtient l'équation des M-Values de Workman[22], publiée en 1965 :

$$M_p = M_0 + \Delta M \times p. \quad (9)$$

La valeur maximale (M-Value) de gaz neutre acceptable à la profondeur p (M_p) est égale à la valeur maximale acceptable en surface (M_0) augmentée de ΔM multiplié par la profondeur p . Tout jeu de paramètres avec S_c peut ainsi se transformer en jeu de paramètres avec M-Values : M_0 correspond à S_c et ΔM à 10% de S_c .

Compartiments	1	2	3	4	5
Demi-vie (min)	5	10	20	40	75
$S_c(M_0)$	2	2	2	2	2
$\Delta M(10\% \text{ de } M_0)$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

TABLE IV. Jeu de S_c de Haldane transformé en jeu de M-Values

En calculant les M-Values à 3, 6 et 9 m, nous obtenons :

Compartiments	1	2	3	4	5
Demi-vie (min)	5	10	20	40	75
$S_c(M_0)$	2	2	2	2	2
$\Delta M(10\% \text{ de } M_0)$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
M_3	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
M_6	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
M_9	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8

TABLE V. Jeu de paramètres de Haldane transformé ($\Delta M = 10\% \text{ de } M_0$), calcul des M-values à 3, 6 et 9 m.

Si nous reprenons notre exemple (Table III), la T_{N_2} la plus élevée est celle du compartiment 5 min avec une valeur de 3,16 bars qui impose un arrêt à 6 m, condition permettant de ne violer aucune M-Value ($M_6 = 3,2$ bars).

Nous retrouvons, bien évidemment, les mêmes résultats en passant par les S_c ou les M-values puisqu'il s'agit de la même équation.

Cependant, l'intérêt principal de ce développement est de disposer de deux variables (M_0 et ΔM) au lieu d'une (S_c). C'est ce qui intéressait Workman qui cherchait à sécuriser les plongées saturantes (longues, profondes, répétitives) sans pour autant modifier les conditions de la remontée pour les plongées peu saturantes. Avec cette approche, il est ainsi possible de :

- Conserver la valeur des M_0 (S_c) qui dictent les conditions du retour en surface, ce qui ne conduit à aucune modification pour les plongées sans palier et à peu de changements pour les plongées avec peu de paliers.
- Prendre une valeur de ΔM inférieure à 10% de M_0 , ce qui a pour effet de réduire la tension maximale de gaz neutre (M-Value) acceptée dans chaque compartiment lors de la remontée. La désaturation est

13. Arrondis de 3 m en 3 m.

14. Arrondi de la masse volumique de l'eau

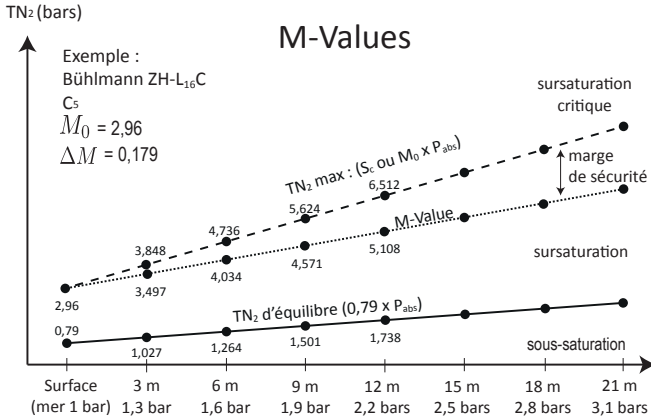


FIGURE 3. Présentation schématique des M-Values. Plus le niveau de saturation est élevé, plus la droite des M-Values s'écarte de celle des S_c . M_0 n'est pas modifié par les M-Values. Cette représentation concerne un seul compartiment à titre d'illustration. La droite de la TN_2 d'équilibre représente l'état de saturation. Quand nous plongeons, nous sommes d'abord en état de sous-saturation. Cela signifie que nous accumulons de l'azote. Puis, quand nous remontons (lire le graphique de droite à gauche), la pression baisse, nous passons en sursaturation. Si les compartiments ont tous une TN_2 inférieure à M_0 , il n'y a pas de paliers obligatoires à effectuer, les plongeurs peuvent rejoindre la surface. Si la TN_2 est supérieure à la M-Value à la profondeur p (ex. 3 m, 6 m, 9 m, ...), cela impose un palier. Par rapport aux seuls S_c (droite de la TN_2 max), les M-Values réduisent la tension maximale d'azote acceptée. Elles apportent donc une marge de sécurité d'autant plus importante que le niveau de saturation est élevé (plongées longues, profondes, répétitives). Dit autrement, les M-values s'éloignent de la zone de sursaturation critique induite par les S_c lorsque le niveau de saturation est élevé.

d'autant plus durcie (temps et profondeur des paliers) que la tension en gaz neutre (T_{gn}) est élevée (temps et profondeur de la plongée). C'est tout l'intérêt des M-Values.

Appliquons cela au jeu de paramètres de Haldane en prenant, 7% de M_0 comme valeur de ΔM .

Compartiments	1	2	3	4	5
Demi-vie (min)	5	10	20	40	75
$S_c(M_0)$	2	2	2	2	2
$\Delta M(7\% \text{ de } M_0)$	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
M_3	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42
M_6	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84
M_9	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26

TABLE VI. Jeu de paramètres de Haldane transformé ($\Delta M = 7\%$ de M_0), calcul des M-values à 3, 6 et 9 m

Dans notre exemple (Table III) avec une TN_2 la plus élevée de 3,16 bars, cela impose désormais un palier à 9 m et non plus à 6 m. Selon les cas, par rapport aux S_c , avec un $\Delta M < 10\%$ de M_0 , les M-Values peuvent :

- Ne rien modifier, par exemple pour les plongées sans

ou avec peu de paliers (M_0 non modifié) ;

- Modifier la profondeur des paliers sans modifier leur durée totale (profil de désaturation modifié) ;
- Modifier la durée des paliers ;
- Modifier la profondeur et la durée des paliers.

À la suite de Haldane, les principales modifications des jeux de paramètres haldaniens (US-Navy et variantes de type RDP-PADI, NAUI, SSI, Bassett, Huggins, etc. ainsi que Bühlmann, Hahn, RGBM, COMEX, MN90, ...) ont consisté à :

- Attribuer des seuils de sursaturation (S_c ou M_0 et ΔM) différents selon les compartiments avec des seuils de tolérance plus élevées pour les compartiments ayant des demi-vies courtes ;
- Ajouter des compartiments (120, 240, ... 635 min).

À l'exemple du jeu de paramètres de Workman (1965), pour l'US-Navy.

Compartiment	Demi-vie $t_{1/2}$	M_0 (bar)	ΔM (bar/m)	$\frac{\Delta M}{M_0}$
1	5	3,17	0,18	5,68%
2	10	2,68	0,16	5,97%
3	20	2,19	0,15	6,85%
4	40	1,70	0,14	8,24%
5	80	1,64	0,13	7,93%
6	120	1,58	0,12	7,59%
7	160	1,55	0,12	7,42%
8	200	1,55	0,11	7,10%
9	240	1,52	0,11	7,24%

TABLE VII. Jeu de paramètres de Workman (1965)

De nombreux jeux de paramètres ont été édités par la suite. En voici quelques exemples.

Compartiment	Demi-vie $t_{1/2}$	M_0 (bar)	ΔM (bar/m)	$\frac{\Delta M}{M_0}$
1	5	3,19	0,13	4,08%
2	10	2,47	0,11	4,26%
3	25	1,91	0,11	5,66%
4	55	1,49	0,11	7,12%
5	95	1,39	0,10	7,48%
6	145	1,37	0,10	7,45%
7	200	1,35	0,10	7,47%
8	285	1,35	0,10	7,42%
9	385	1,35	0,10	7,42%
10	520	1,35	0,10	7,42%
11	670	1,33	0,10	7,50%

TABLE VIII. Jeu de paramètres DCAP MM11F6 de Kenyon et Hamilton (1975)

LES JEUX DE PARAMÈTRES DE BÜHLMANN

Le livre de Bühlmann[23] est le premier à dévoiler tous ses choix et tous ses calculs. Rapidement des algorithmes

Compartiment	Demi-vie $t_{1/2}$	S_c
1	5	2,72
2	7	2,54
3	10	2,38
4	15	2,2
5	20	2,04
6	30	1,82
7	40	1,68
8	50	1,61
9	60	1,58
10	80	1,56
11	100	1,55
12	120	1,54

TABLE IX. Jeu de paramètres MN90 (1990)

Compartiment	Demi-vie $t_{1/2}$	M_0 (bar)	ΔM (bar/m)	$\frac{\Delta M}{M_0}$
1	5	3,64	0,26	7,14%
2	7	3,00	0,21	7,14%
3	10	2,52	0,18	7,14%
4	15	2,15	0,15	7,14%
5	20	1,96	0,14	7,14%
6	30	1,77	0,13	7,14%
7	40	1,68	0,12	7,14%
8	50	1,62	0,12	7,14%
9	60	1,59	0,11	7,14%
10	80	1,54	0,11	7,14%
11	100	1,51	0,11	7,14%
12	120	1,49	0,11	7,15%

TABLE X. Jeu de paramètres Comex

Compartiment	Demi-vie $t_{1/2}$	M_0 (bar)	ΔM (bar/m)	$\frac{\Delta M}{M_0}$
1	5	3,17	0,18	5,68%
2	10	2,68	0,16	5,97%
3	20	2,19	0,15	6,85%
4	40	1,7	0,14	8,24%
5	80	1,64	0,13	7,93%
6	120	1,58	0,12	7,59%
7	160	1,55	0,115	7,42%
8	200	1,55	0,11	7,10%
9	240	1,52	0,11	7,24%

TABLE XI. Jeu de paramètres US-Navy (1993)

libres de droits sont apparus et, bien évidemment, les fabricants d'ordinateurs s'en sont emparés. C'est aujourd'hui le jeu de paramètres du modèle de Haldane le plus utilisé au monde, implémenté dans de très nombreux ordinateurs de plongée, pour la plongée de loisir comme pour la plongée technique. Parmi ses apports, citons :

- Une augmentation du nombre de compartiments qu'il porte à 16, alors que Workman se limitait à 9 et Haldane à 5.
- Le compartiment le plus long est fixé 635 min pour les plongées à l'air et à 240 min pour les plongées à l'hélium.

Compartiment	Demi-vie $t_{1/2}$	M_0 (bar)	ΔM (bar/m)	$\frac{\Delta M}{M_0}$
1	5	3,04	0,18	6,06%
2	10	2,39	0,15	6,08%
3	20	1,99	0,13	6,33%
4	40	1,65	0,12	6,99%
5	65	1,56	0,11	7,27%
6	90	1,51	0,11	7,38%
7	120	1,47	0,11	7,47%
8	150	1,43	0,11	7,56%
9	180	1,41	0,11	7,63%
10	220	1,38	0,11	7,70%
11	280	1,35	0,11	7,82%
12	350	1,32	0,10	7,94%
13	450	1,30	0,10	8,04%
14	635	1,27	0,10	8,14%

TABLE XII. Jeu de paramètres RGBM (Bruce Wienke, 2003)

- La fraction d'azote retenue dans l'air respiré est de 79% (et non de 80%).
- La pression atmosphérique au-dessus de la mer est fixée à 0,95 bar, ce qui fait qu'avant une plongée unitaire, l'azote dans le corps est de 0,75 bar (0,95 x 0,79) et non de 0,8 bar.
- Une prise en compte de l'air alvéolaire, en retirant 0,063 bar à la pression absolue du mélange respiré afin de prendre en compte le CO₂ et la vapeur d'eau.
- L'intégration des plongées en altitude.
- La prise en compte d'une marge de sécurité sur la profondeur retenue en ajoutant 0,2 bar pour les plongées à l'air et 0,1 bar pour les plongées à l'hélium. Cela signifie que dans ses tables pour la plongée à l'air, quand on lit 30 m, les calculs ont été effectués avec 32 m.
- Bühlmann a prévu la possibilité, lors du dernier palier, de faire surface durant 1 minute pour s'orienter puis de poursuivre sa désaturation : « Si la décompression s'effectue dans l'eau, il est possible, avant d'effectuer le dernier palier, d'émerger en toute sécurité pour s'orienter pendant 1 minute, puis de revenir au niveau de décompression. »

Bühlmann a choisi de noter ses paramètres selon la norme suivante :

- ZH pour Zürich ;
- L pour Limits ;
- En indice, le nombre de paires de coefficients a et b différents (M-Values) et non le nombre de compartiments comme il est souvent écrit (tous les jeux de paramètres de Bühlmann ont 16 compartiments) ;
- Éventuellement une lettre (A, B, C) pour identifier différentes versions d'un jeu de paramètres.

Jeux de paramètres publiés par Bühlmann :

- ZH-L₁₂, version originale de 1983 ;
- ZH-L₁₆A version ultérieure (1990) qui a servi d'essai (version bêta ou version « théorique ») ;
- ZH-L₁₆B utilisé pour publier les tables de plongée

imprimées ;

- ZH-L₁₆C pour une utilisation dans les ordinateurs de plongée ;
- ZH-L₈ avec 8 paires de coefficients a et b (M-Values) afin de limiter le temps de calcul par des ordinateurs (ce n'est plus utile aujourd'hui, du fait des améliorations technologiques).

Le jeu de paramètres ZH-L₁₆C est d'un usage généralisé dans bon nombre d'ordinateurs de plongée.

Bühlmann a repris le principe des M-Values de Workman en modifiant la notation de la M-Value et en définissant des paramètres a et b en lieu et place de M_0 et ΔM .

$$P_{t.tol.i.g.} = \frac{P_{amb.}}{b} + a \quad (10)$$

où :

$P_{t.tol.i.g.}$ est la tension maximale de gaz neutre dans le compartiment à la pression ambiante P_{amb} (ex. surface, 3 m, 6 m, ...). Cela correspond à M_p chez Workman.

Pour le jeu de paramètres ZH-L₁₆A, les coefficients a et b sont calculés en fonction de la demi-vie ($t_{1/2}$) des compartiments. Bühlmann intègre la pression atmosphérique (atm) qui vaut 1 bar au niveau de la mer.

$$a = \frac{2 atm}{\sqrt[3]{t_{1/2}}}; \quad (11)$$

$$b = 1,005 - \frac{1}{\sqrt[2]{t_{1/2}}}. \quad (12)$$

À partir de ce jeu de paramètres calculés, Bühlmann a réduit manuellement les valeurs de a pour les compartiments 38,3, 54,3 et 77 min : jeu de paramètres ZH-L₁₆B. Il a ensuite réduit, toujours manuellement, les valeurs de a pour les compartiments de 27 à 498 min : jeu de paramètres ZH-L₁₆C.

Ces coefficients a et b de Bühlmann peuvent être convertis en paramètres M_0 et ΔM de Workman :

$$M_0 = a + \frac{atm}{b}; \quad (13)$$

$$\Delta M = \frac{1}{b \times 10}. \quad (14)$$

Par exemple, pour le jeu de paramètres ZH-L₁₆A (voir Table XIII) et le compartiment 1b (5 min), M_0 se calcule ainsi :

- Au niveau de la mer ($atm = 1$),
 $M_0 = 1,170 + \frac{1}{0,558} = 2,962$ bars.
- Si la pression atmosphérique est de 0,8 bar ($atm = 0,8$), comme par exemple vers 2 000 m d'altitude ou en avion pressurisé,
 $M_0 = 1,170 + \frac{0,8}{0,558} = 2,603$ bars.

Les jeux de paramètres Bühlmann permettent ainsi, en définissant la valeur de la pression atmosphérique comme une variable, d'intégrer de manière native les calculs de désaturation pour les plongées en lacs d'altitude.

Cpt	Demi-vie $t_{1/2}$	a	b	M_0 (bar)	ΔM (bar/m)	$\frac{\Delta M}{M_0}$
1a	4	1,260	0,505	3,240	0,198	6,11%
1b	5	1,170	0,558	2,962	0,179	6,05%
2	8	1,000	0,651	2,535	0,154	6,06%
3	12,5	0,862	0,722	2,247	0,138	6,16%
4	18,5	0,756	0,783	2,034	0,128	6,28%
5	27	0,667	0,813	1,897	0,123	6,49%
6	38,3	0,593	0,843	1,779	0,119	6,66%
7	54,3	0,528	0,869	1,679	0,115	6,85%
8	77	0,470	0,891	1,592	0,112	7,05%
9	109	0,419	0,909	1,519	0,110	7,24%
10	146	0,380	0,922	1,464	0,108	7,41%
11	187	0,350	0,932	1,423	0,107	7,54%
12	239	0,322	0,940	1,386	0,106	7,67%
13	305	0,297	0,948	1,352	0,106	7,80%
14	390	0,274	0,954	1,322	0,105	7,93%
15	498	0,252	0,960	1,294	0,104	8,05%
16	635	0,233	0,965	1,269	0,104	8,17%

TABLE XIII. Jeu de paramètres Bühlmann ZH-L₁₆A (air, $atm = 1$). Bühlmann a publié un compartiment 1a et 1b, selon que les utilisateurs veuillent utiliser une demi-vie de 4 ou de 5 minutes. Il justifie la création du compartiment 1b en indiquant que cela facilite la comparaison avec d'autres jeux de paramètres, qui utilisent généralement le compartiment de 5 min. Les coefficients a et b sont calculés à partir des demi-vies avec les équations (Eq. 11) et (Eq. 12).

Cpt	Demi-vie $t_{1/2}$	a	b	M_0 (bar)	ΔM (bar/m)	$\frac{\Delta M}{M_0}$
1a	4	1,2599	0,5050	3,240	0,1980	6,11%
1b	5	1,1696	0,5578	2,962	0,1793	6,05%
2	8	1,0000	0,6514	2,535	0,1535	6,06%
3	12,5	0,8618	0,7222	2,247	0,1385	6,16%
4	18,5	0,7562	0,7825	2,034	0,1278	6,28%
5	27	0,6667	0,8126	1,897	0,1231	6,49%
6	38,3	0,5600	0,8434	1,746	0,1186	6,79%
7	54,3	0,4947	0,8693	1,645	0,1150	6,99%
8	77	0,4500	0,8910	1,572	0,1122	7,14%
9	109	0,4187	0,9092	1,519	0,1100	7,24%
10	146	0,3798	0,9222	1,464	0,1084	7,41%
11	187	0,3497	0,9319	1,423	0,1073	7,54%
12	239	0,3223	0,9403	1,386	0,1063	7,67%
13	305	0,2850	0,9477	1,340	0,1055	7,87%
14	390	0,2737	0,9544	1,322	0,1048	7,93%
15	498	0,2523	0,9602	1,294	0,1041	8,05%
16	635	0,2327	0,9653	1,269	0,1036	8,17%

TABLE XIV. Jeu de paramètres Bühlmann ZH-L₁₆B (air, $atm = 1$). Par rapport au jeu de paramètres A, les coefficients a ont été modifiés manuellement pour les compartiments 38,3, 54,3 et 77 min.

ÉQUATION DE HALDANE ET CALCUL DE LA DURÉE DES PALIERS

L'équation de Haldane (Eq. 3) permet de calculer la durée des paliers qui correspond à Δt ($\Delta t(p)$ à la profondeur p) lorsque tous les autres paramètres sont connus :

Cpt	Demi-vie $t_{1/2}$	a	b	M_0 (bar)	ΔM (bar/m)	$\frac{\Delta M}{M_0}$
1a	4	1,2599	0,5050	3,240	0,1980	6,11%
1b	5	1,1696	0,5578	2,962	0,1793	6,05%
2	8	1,0000	0,6514	2,535	0,1535	6,06%
3	12,5	0,8618	0,7222	2,247	0,1385	6,16%
4	18,5	0,7562	0,7825	2,034	0,1278	6,28%
5	27	0,6200	0,8126	1,851	0,1231	6,65%
6	38,3	0,5043	0,8434	1,690	0,1186	7,02%
7	54,3	0,4410	0,8693	1,591	0,1150	7,23%
8	77	0,4000	0,8910	1,522	0,1122	7,37%
9	109	0,3750	0,9092	1,475	0,1100	7,46%
10	146	0,3500	0,9222	1,434	0,1084	7,56%
11	187	0,3295	0,9319	1,403	0,1073	7,65%
12	239	0,3065	0,9403	1,370	0,1063	7,76%
13	305	0,2835	0,9477	1,339	0,1055	7,88%
14	390	0,2610	0,9544	1,309	0,1048	8,01%
15	498	0,2480	0,9602	1,289	0,1041	8,08%
16	635	0,2327	0,9653	1,269	0,1036	8,17%

TABLE XV. Jeu de paramètres Bühlmann ZH-L₁₆C (air, $atm = 1$). Par rapport au jeu de paramètres A, les coefficients a ont été modifiés manuellement pour les compartiments de 27 à 498 min.

$$\Delta t(p) = t_{1/2} \times \ln 2 \times \ln \left(\frac{M_{ps} - T_f}{T_0 - T_f} \right). \quad (15)$$

où M_{ps} est la M-Value du palier suivant (ou de la surface (M_0) pour le dernier palier).

T_0 est la tension de gaz neutre dans le compartiment à l'arrivée au palier.

T_f est la tension finale d'équilibre au palier (cela correspond à la pression partielle de gaz neutre, P_{pgn}).

Ce calcul est effectué pour tous les compartiments. Le compartiment nécessitant la durée la plus longue l'impose à tous les autres.

Au palier, lorsque $T_f < T_0$, le compartiment désature. Sinon, il continue à saturer (c'est ce qui se produit pour certains compartiments, ceux qui ont une demi-vie longue, lorsque les paliers sont trop profonds).

ÉQUATION DE HALDANE ET CALCUL LA DURÉE RESTANTE SANS PALIER OBLIGATOIRE

Le calcul de la durée restante sans palier obligatoire utilise la même équation que celle de la durée des paliers dans laquelle on considère la M-Value de surface (M_0) en lieu et place de la M-Value au palier suivant. Le calcul est fait pour chaque compartiment, la durée la plus faible étant retenue, c'est celle qui est affichée sur les ordinateurs.

$$\Delta t(p) = t_{1/2} \times \ln 2 \times \ln \left(\frac{M_0 - T_f}{T_0 - T_f} \right). \quad (16)$$

ÉQUATION DE HALDANE ET CALCUL DE LA DURÉE AVANT MONTÉE EN ALTITUDE OU EN AVION

Le calcul de la durée avant envol¹⁵ ou montée en altitude utilise également cette équation en calculant, pour chaque compartiment, la durée nécessaire pour que sa tension en gaz neutre (T_{gn}) ne dépasse pas M_0 à une altitude donnée (M_{0alt}). La durée la plus longue est celle retenue.

$$\Delta t(p) = t_{1/2} \times \ln 2 \times \ln \left(\frac{M_{0alt} - T_f}{T_0 - T_f} \right) \quad (17)$$

FACTEUR Q OU PrT index ET SÉVÉRITÉ DE LA DÉSATURATION

En 1952, Hempleman[24] est à l'origine du facteur Q ou PrT index, une approximation, avec un compartiment unique, de la charge en gaz neutre (azote) en fonction du temps (Δt) en minutes et de la profondeur (p) en mètres :

$$PrT = p\sqrt{\Delta t} \quad (18)$$

Par exemple, pour une plongée de 40 min à 30 m, $PrT = 30\sqrt{40} = 190$. Cela permet, pour une plongée donnée, d'avoir rapidement une idée de la charge en azote (et plus généralement en gaz neutre).

Le fait d'utiliser la racine carrée du temps est commun en sciences dans les phénomènes de diffusion, comme c'est le cas ici.

Dès les premières années d'utilisation des tables de Haldane, dans la Royal Navy comme dans l'US-Navy et ailleurs, la question des plongées saturantes (longues, profondes, répétitives) s'était posée. L'idée communément admise était que plus la charge en gaz neutre (azote) augmentait, plus le risque d'ADD était important. C'est ce que certains auteurs ont appelé par la suite la sévérité de la désaturation. Dans cette logique, dans un rapport connu sous le nom de DOE Report publié en 1989[25], Shields a fait correspondre une probabilité théorique de risque d'ADD en fonction du facteur Q ou PrT index.

Bernard Gardette de la Comex[26] confirme cela en 2012 : « On sait depuis quelques années, grâce aux statistiques Comex que toutes les plongées ne comportent pas le même risque de produire un ADD. Cette probabilité de faire un accident augmente avec la charge en gaz contenue dans l'organisme, en fonction de la profondeur de la plongée et du temps passé au fond. À une charge en gaz Q (profondeur, en mètres, multipliée par la racine carrée du temps au fond, en minutes), va correspondre un risque d'ADD. »

Nous pouvons en tirer les enseignements suivants :

15. Les cabines des avions de ligne sont pressurisées à environ 0,8 bar.

- La sévérité de la désaturation augmente avec le couple temps/profondeur et pas uniquement avec la profondeur.
- Les M-Values sont une réponse à l'augmentation du risque d'ADD lorsque la charge en gaz neutre est élevée.

Facteur Q	Risque théorique
130	1/1 000 000
180	1/100 000
240	1/10 000
320	1/1 000
420	1/100
560	1/10
750	1/1

TABLE XVI. Facteur Q et risque théorique d'ADD pour des plongées à l'air d'après Comex. Les valeurs sont différentes lorsqu'il s'agit de plongées au nitrox ou à l'hélium.

LES JEUX DE PARAMÈTRES POUR LES PLONGÉES À L'HÉLIUM

Comme déjà indiqué, lors de plongées à l'hélium (trimix, héliox), les formules sont inchangées, seuls les paramètres sont modifiés. Il y a donc des jeux de paramètre azote (N_2) valables pour les plongées à l'air et au nitrox, et des jeux de paramètres hélium (He).

Par exemple, les recherches de Bühlmann l'ayant amené à déterminer que le corps se saturait en azote en 63,5 heures (6 x 635 min) soit 2,645 jours contre 1 jour pour l'hélium, il a divisé toutes les périodes des compartiments pour les plongées à l'air (azote) par 2,645 pour obtenir un jeu de paramètres spécifique à l'hélium¹⁶ avec le compartiment le plus long fixé à $\frac{635}{2,645} = 240$ minutes. Les paramètres des M-Values (coefficients a et b) ont été déterminés spécifiquement.

Comex a procédé de même.

MESURE DE L'INCIDENCE DES M-VALUES SUR LES PROFILS DE DÉSATURATION EN PLONGÉE

Nous avons utilisé le fait que le M_0 des M-Values correspond au S_c . Bien que les S_c ait été présentés comme une grandeur sans unité et les M_0 comme mesurées en

16. D'après la loi de Graham, la vitesse de diffusion (ou d'effusion) de deux gaz aux mêmes conditions de température et de pression est inversement proportionnelle à la racine carrée de leur masse molaire (28,0184 g/mol pour N_2 et 4,0026 g/mol pour He, soit $\sqrt{\frac{28,0184}{4,0026}} = 2,645$, ce qui signifie que les molécules de He diffusent 2,645 fois plus vite que celles de N_2).

Compartiment	Demi-vie $t_{1/2}$	Coefficient a	Coefficient b
1a	1,51	4,10	0,23557
1b	1,88	3,72	0,20964
2	3,02	3,12	0,17400
3	4,72	2,72	0,15321
4	6,99	2,43	0,13845
5	10,21	2,24	0,13189
6	14,48	2,08	0,12568
7	20,53	1,94	0,12079
8	29,11	1,82	0,11692
9	41,20	1,74	0,11419
10	55,19	1,68	0,11232
11	70,69	1,64	0,11115
12	90,34	1,62	0,11022
13	115,29	1,61	0,10963
14	147,42	1,61	0,10904
15	188,24	1,60	0,10850
16	240,03	1,59	0,10791

TABLE XVII. Jeu de paramètres Bühlmann ZH-L₁₆A (hélium).

bar, il s'agit d'une seule et même représentation, celle de la tension maximale de gaz neutre admissible pour rejoindre la surface.

En conséquence, tout jeu de paramètres haldaniens avec S_c peut se transformer, sans qu'il soit modifié, en considérant M_0 équivalent au S_c et ΔM valant 10% du S_c .

Inversement, dans un jeu de paramètres avec M-Values, ΔM peut être neutralisé en considérant qu'il vaut 10% du M_0 . Ce qui équivaut à neutraliser l'impact des M-values et à revenir à un jeu de paramètres avec S_c . Cette approche offre l'intérêt de montrer, pour un jeu de paramètres avec M-values, les résultats que l'on obtiendrait sans l'apport des M-Values.

Nous avons ainsi établi une comparaison « sans M-Value » et « avec M-Value » pour le jeu de paramètres de Workman (1965) et pour celui de Bühlmann (ZH-L₁₆C). Les 15 mêmes couples temps/profondeur ont été utilisés et le facteur Q correspondant a été calculé ainsi que les paliers et la durée totale d'immersion (DTI). Il s'agit d'une simulation pour des plongées unitaires (une seule plongée dans la journée), par conséquent sans prise en compte de l'accumulation des plongées sur un ou plusieurs jours.

Nos conclusions sur ce point sont les suivantes :

1. Les M-Values n'ont pas d'influence sur les plongées sans palier obligatoire (facteur $Q < 130$ en général), comme par exemple 35 ou 40 min à 20 m (voir les plongées 01 à 05). Ce qui est une évidence puisque M_0 n'est pas modifié par les M-Values.
2. Les M-Values ont peu d'influence lorsque le niveau de saturation est moyen ($130 < Q < 200$), ce qui correspond tout de même à 80 min à 20 m ou 20 min à 40 m pour une plongée unitaire (voir les plongées

06, 08, 09 et 11).

3. Plus le niveau de saturation est élevé ($Q > 200$), plus l'influence des M-Values se fait sentir et conduit à modifier le profil de la remontée en débutant les paliers plus en profondeur ou en augmentant la durée des paliers les plus profonds. Il s'agit donc plus d'une modification de la répartition des durées de palier entre les différentes zones de paliers (15, 12, 9, 6, 3 m) que d'une augmentation de leur durée. Au final, la durée totale d'immersion est peu modifiée. Cela concerne, essentiellement les plongées professionnelles ou techniques de loisir avec un profil « carré » comme pour les plongées profondes sur épaves (voir dans les tableaux les plongées 07, 10 et 12 à 15).

De manière générale, les M-Values (Workman, 1965) répondent à l'interrogation émise historiquement sur la sécurisation des plongées saturantes (longues, profondes, répétitives).

CLASSIFICATION : MODÈLES ET JEUX DE PARAMÈTRES

Le modèle de Haldane se caractérise par des compartiments en parallèle, indépendants les uns des autres, dont la charge et la décharge en gaz neutre sont exponentielles (loi de transport). Les conditions de la remontée dépendent d'un seuil de tolérance à la sursaturation (Sc ou M-Value).

En conséquence, tout jeu de paramètres correspondant à cette définition nous semble devoir être qualifié de modèle haldanien : US-Navy et ensemble des variantes (RDP-PADI, PDIC, PADUA, Jeppensen, Bassett, Huggins, NAUI-1990, SSL...), Bühlmann, Hahn, MN90...

Les jeux de paramètres diphasiques (RGBM, VPM, COMEX) qui, en plus de l'azote dissous, tentent d'intégrer la phase gazeuse lors de la remontée, nous semblent devoir également être classés dans cette catégorie car ils reprennent tous les éléments fondamentaux du modèle de Haldane.

LIMITES DE LA MODÉLISATION, ÉLÉMENTS NON PRIS EN COMPTE

Nombre de plongées

Le modèle de Haldane a été conçu pour une seule plongée par 24 h. Les travaux menés par la suite, en particulier par l'US-Navy, ont conduit à considérer qu'il suffisait de prendre en compte l'azote résiduel de la précédente plongée pour sécuriser une plongée successive ou additive. Or, cela ne tient compte ni de la production de bulles ni

Paramètres				Sans M-Values					Avec M-Values						
N°	p (m)	Δt (min)	Q	Paliers (m)					DTI	Paliers (m)					DTI
				15	12	9	6	3		15	9	6	3		
01	15	60	116					-	61					-	61
02	15	90	142					4	95					4	95
03	15	120	164					12	133					12	133
04	20	40	126					-	42					-	42
05	20	60	155					11	72					11	72
06	20	90	190					26	117					26	117
07	20	120	219					33	154			5		29	155
08	30	30	164					7	39					7	39
09	30	40	190					22	64					22	64
10	30	60	232				9	33	104			14		29	105
11	40	20	179					6	28					6	28
12	40	30	219				1	28	61			5		25	62
13	40	60	310			7	25	44	138		1	16	23	41	143
14	50	30	274				14	33	80		1	4	16	29	83
15	60	20	268				7	31	61		1	3	8	28	63

Workman 1965

Paramètres				Sans M-Values					Avec M-Values						
N°	p (m)	Δt (min)	Q	Paliers (m)					DTI	Paliers (m)					DTI
				15	12	9	6	3		15	9	6	3		
01	15	60	116					-	62					-	62
02	15	90	142					7	99					7	99
03	15	120	164					20	142					20	142
04	20	40	126					1	43					1	43
05	20	60	155					13	75					13	75
06	20	90	190					33	125			4		32	128
07	20	120	219				3	58	183			14		50	186
08	30	30	164					10	43			1		10	44
09	30	40	190					24	67			5		20	68
10	30	60	232				10	43	116			3	19	37	122
11	40	20	179					11	35					3	9
12	40	30	219					5	26	65			3	9	21
13	40	60	310			9	28	69	170		1	9	18	31	65
14	50	30	274				3	14	39	91		1	5	8	17
15	60	20	268				3	9	32	70		1	4	6	12

Bühlmann ZH-L₁₆C

TABLE XVIII. Influence des M-Values sur la désaturation pour différents couples profondeur (p) et durée (Δt) avec calcul du facteur Q et de la durée totale d'immersion (DTI).

de la formation de micro-noyaux (germes)¹⁷ gazeux[33] à l'issue d'une plongée.

Comme le souligne Peter Bennett : « Aucun algorithme unique et universellement accepté n'a été produit pour calculer une plongée successive. (...) La plupart des techniques disponibles, y compris dans les ordinateurs de plongée, utilisent la charge de gaz de la plongée précédente (...) et ne tiennent que peu ou pas compte de la création de nouveaux micro-noyaux, eux-mêmes générateurs de bulles. » Ainsi, « les données sur les accidents de plongée montrent qu'il y a plus d'accidents lors des plongées successives que lors des plongées unitaires »[32].

En conséquence, trois éléments sont à considérer lors

17. En physique, théorie de la germination ou de la nucléation.

d'une plongée réalisée sous l'influence d'une précédente, dont seul le premier est pris en compte dans la modélisation :

- le niveau de gaz neutre résiduel ;
- la création de bulles du fait de la désaturation, qu'elles soient ou non détectables par effet Doppler ;
- la création de micro-noyaux servant d'amorce potentielle à la création de bulles supplémentaires lors de la plongée suivante.

Le nombre de plongées par jour doit donc être considéré comme un facteur de risque supplémentaire, à la fois par le nombre d'accidents constatés et par une modélisation partielle¹⁸. La pratique de plongées rapprochées (two-tank dive[34]) ou multiples sur une journée ou un séjour doit donc en tenir compte, en particulier en limitant la charge en gaz neutre (faible profondeur, durée limitée, utilisation de nitrox).

À cet égard, il ne faut pas opposer tables et ordinateurs de plongée. Les consignes indiquant de ne pas faire plus de 2 plongées par jour sont issues du mode d'emploi des tables. Le fait que les manuels des ordinateurs de plongée n'aient pas repris ces consignes n'y change rien. Ainsi, que vous utilisiez des tables Bühlmann ou un ordinateur avec un algorithme Bühlmann, il s'agit du même jeu de paramètres haldaniens qui induit les mêmes limitations.

Vitesse de remontée

La vitesse de remontée est partie intégrante du modèle ou du jeu de paramètres. En conséquence, une vitesse de remontée rapide ne fait pas partie de la modélisation. Il en est de même pour une remontée lente. La seule différence à ce jour est qu'une remontée lente ne semble pas constituer un facteur de risque (mais peu d'études ont été menées sur le sujet, en particulier lors d'une remontée excessivement lente) alors que c'est le cas pour une remontée rapide.

Profils atypiques

Les remontées rapides, les plongées yo-yo et celles en dents de scie ne sont pas modélisées. En conséquence, les ordinateurs de plongée ne peuvent pas proposer de conduite à tenir validée scientifiquement. Ces profils ne devraient pas être effectués.

Il en est de même pour les interruptions de palier (à la tolérance près d'une interruption d'une minute au dernier palier indiquée par Bühlmann).

DÉTECTION DE BULLES PAR EFFET DOPPLER

Les travaux de Christian Doppler, connus depuis 1842, ont montré que la fréquence, et donc la longueur d'onde de certains sons, était modifiée lorsque le récepteur qui les recevait était en mouvement. Entre 1968 et 1974, Merrill Spencer[35] s'empare du sujet et utilise cette particularité acoustique afin de détecter, à l'aide d'ultrasons, des bulles circulant dans l'organisme et les classer par « grade », de 0 à 4 par ordre de gravité (échelle de Spencer, améliorée par la suite par certains auteurs).

Ce procédé a permis d'améliorer certaines tables de plongée ou algorithmes et a été utilisé afin de vérifier la dangerosité des paliers profonds[27][28][29][30], au moins lors des plongées à l'air.

S'il s'avère qu'un grade de bulles élevé traduit un risque important d'accident de désaturation, nous n'avons pas trouvé de publication scientifique prouvant l'inverse. Dit autrement, faut-il rechercher une désaturation à grade zéro, c'est à dire sans bulles détectables¹⁹? Ou bien le prix à payer pour assurer une désaturation correcte par la méthode des paliers est-il d'avoir un niveau de bulles maîtrisé, ni trop élevé ni trop faible? La question est ouverte.

LES FACTEURS DE GRADIENT (GF)

Présentation

Les facteurs de gradient (*GF* pour *Gradient Factors*) sont une astuce de calcul proposée par Erik C. Baker, sans mode d'emploi.

Le gradient à la profondeur p (G_p) est la différence, pour un compartiment donné, entre la M-Value à la profondeur p (M_p) et la pression absolue (P_{abs}).

$$G_p = M_p - P_{abs} \quad (19)$$

Cette astuce de calcul consiste à prendre un pourcentage de ce gradient (facteurs de gradient) afin de diminuer les M-Values et ainsi accroître la durée des paliers et/ou leur profondeur. Cela permet de jouer sur les M-Values sans avoir à publier un nouveau jeu de paramètres. Lorsque les *GF* sont à 100%, cela revient à ne pas modifier les M-Values.

Les *GF* ne sont pas spécifiques à un jeu de paramètres, ils peuvent s'appliquer dès que des M-Values sont calculées (Workman, Bühlmann, RGBM, Comex...).

$$M_{p(gf)} = (M_p - P_{abs}) \times GF\% + P_{abs} \quad (20)$$

18. Le modèle BSAC'88 semble avoir une approche intéressante à ce propos.

19. Ce qui ne signifie pas qu'il n'y a pas de bulles mais qu'elles sont trop petites pour être détectées.

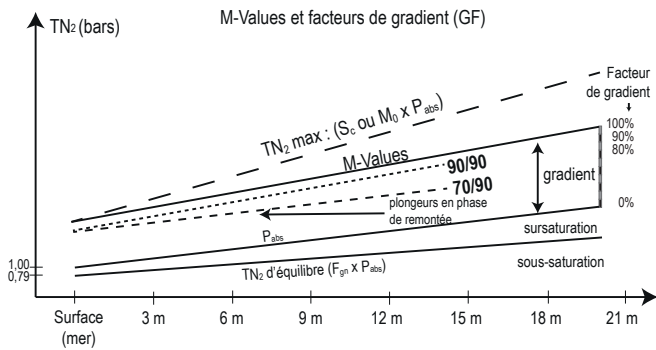


FIGURE 4. Représentation schématique de l'influence des GF par rapport aux M -Values. Lecture du graphique (de droite à gauche) : les plongeurs, en remontant, franchissent la droite de la TN_2 d'équilibre et se trouvent en état de sursaturation (ils désaturent). Des paliers s'imposent lorsqu'ils rencontrent la droite de la TN_2max , celle des M -Values ou celle des GF . Il apparaît que la droite des GF se rencontre avant celle des M -Values, qui elle-même se rencontre avant celle de la TN_2max . M -Value et GF imposent donc des paliers plus restrictifs (plus longs et/ou plus profonds).

Lecture de la formule : La M -Value à la profondeur p affectée du GF ($M_{p(gf)}$) est égale à la M -Value à la même profondeur sans GF (M_p) à laquelle on retire la pression absolue (P_{abs}). Ce résultat est multiplié par le pourcentage de GF ($GF\%$). On rajoute enfin la pression absolue (P_{abs}).

Il faut retirer (P_{abs}) avant d'affecter un pourcentage puis remettre cette valeur car elle ne peut pas être réduite. Elle ne fait pas partie du gradient, on ne peut donc pas lui appliquer un pourcentage.

GF_{low} et GF_{high}

Les GF peuvent être utilisés pour définir :

- La M -Value lors du premier palier, le plus profond (GF_{low}) ;
- La M -Value lors du dernier palier, le plus proche de la surface GF_{high} .

Dans ce cas, GF_{low} doit être inférieur ou égal à GF_{high} . Si GF_{low} et GF_{high} sont égaux (ex. 90/90), on parle de GF jumeaux, ce qui revient à n'avoir qu'un GF .

L'intérêt de définir un GF_{low} inférieur au GF_{high} (ex. 60/90) est de forcer la réalisation de paliers plus profonds que ce que propose le jeu de paramètres en standard pour débiter la désaturation, comme par exemple pour les plongées profondes avec de l'hélium (pour les plongées à l'air, les paliers profonds sont aujourd'hui invalidés[27][28][29][30]).

Passer de GF_{low} à GF_{high}

Imaginons, en guise d'illustration, que les GF soient paramétrés à 60/90 et que le premier palier soit à 9 m. La M -value à 9 m sera calculée avec GF_{low} (M_{9gf}) et celle permettant de remonter en surface avec GF_{high} (M_{0gf}). Les 2 autres M -Values (M_{6gf} et M_{3gf}) seront calculées avec une répartition égale de l'intervalle entre 60% et 90% (interpolation linéaire), soit : 70% et 80%.

La formule générale est la suivante :

$$GF_{(p)} = GF_{high} + \frac{GF_{high} - GF_{low}}{p_{GF_{high}} - p_{GF_{low}}} \times p \quad (21)$$

où :

$GF_{(p)}$: valeur du GF à la profondeur p

GF_{high} : valeur du GF_{high}

GF_{low} : valeur du GF_{low}

$p_{GF_{high}}$: profondeur du GF_{high}

$p_{GF_{low}}$: profondeur du GF_{low}

p : profondeur du palier

Exemple

Si : $GF_{low} = 60\%$ et $p_{GF_{low}} = 9$ m

$GF_{high} = 90\%$ et $p_{GF_{high}} = 0$ m (surface)²⁰

Si nous recherchons la valeur du GF à la profondeur $p = 6$ m, alors :

$$GF_{(6)} = 90 + \frac{90-60}{0-9} \times 6 = 90 + \frac{30}{-9} \times 6 = 90 - 20 = 70$$

Imaginons le calcul des M -Values pour les compartiments suivants, extraits des paramètres de Bühlmann ZH-L16 C.

N°	1	2	3	4	5
Demi-vie ($t_{1/2}$)	5	8	12,5	18,5	27
M_0	2,96	2,54	2,25	2,03	1,85
ΔM	0,179	0,154	0,138	0,128	0,123

TABLE XIX. Extrait du jeu de paramètres ZH-L16 C.

Calcul des M -Values sans GF (ce qui revient à des GF à 100%).

GF	P_{abs} (bar)	Prof (m)	M-Values					
100%	1	Surface	M_0	2,96	2,54	2,25	2,03	1,85
100%	1,3	3	M_3	3,50	3,00	2,66	2,41	2,22
100%	1,6	6	M_6	4,03	3,46	3,08	2,80	2,59
100%	1,9	9	M_9	4,57	3,93	3,49	3,18	2,96

TABLE XX. M-values de 0 à 9 m avec GF 100%

Avec les GF , si nous reprenons l'exemple précédent (60/90), nous obtenons :

20. Notez que tous les calculs à un palier donné se font en fonction du palier suivant. Ainsi, la sortie du palier de 3 m dépend de la valeur des M -Values de surface (M_0).

GF	P_{abs} (bar)	Prof (m)	M-Values
90%	1	Surf.	$M_{0,gf90}$ 2,76 2,39 2,13 1,93 1,77
80%	1,3	3	$M_{3,gf80}$ 3,06 2,66 2,39 2,19 2,04
70%	1,6	6	$M_{6,gf70}$ 3,30 2,90 2,64 2,44 2,29
60%	1,9	9	$M_{9,gf60}$ 3,50 3,12 2,85 2,67 2,54

TABLE XXI. M-values de 0 à 9 m avec interpolation linéaire des GF 60/90.

Nous voyons l'abaissement des M-Values du fait des GF. Notez que les GF modifient les M_0 , contrairement aux M-Values qui ne les modifient pas.

Avec l'ensemble des compartiments du jeu de paramètres Bühlmann ZH-L₁₆ C, si nous prenons l'exemple d'une plongée de 30 min à 30 m (nous intégrons la marge de sécurité de +0,2 bar de Bühlmann et l'ensemble de ses paramètres), nous obtenons les paliers suivants :

Paliers (min)	6 m	3 m
GF 100%	1	10
GF 90/90	2	12
GF 60/90	5	10

TABLE XXII. Incidence des GF sur les paliers. Exemple pour 30 min à 30 m.

Implémentation des GF dans les ordinateurs de plongée

Il y a trois façons d'appliquer des GF dans des ordinateurs de plongée :

- des zones précalculées ;
- un ajustement des GF en temps réel ;
- un paramétrage manuel.

Dans tous les cas, les mêmes questions se posent car, comme déjà indiqué, les GF sont une astuce de calcul livrée sans mode d'emploi.

Il n'existe à ce jour aucune publication scientifique permettant de définir comment paramétrer les GF. En conséquence, ce paramétrage est effectué de manière arbitraire ou à la suite d'échanges entre plongeurs d'une même communauté (ce qui ne retire pas forcément le côté arbitraire des choix).

Le côté « arbitraire » est justifié par le fait « d'aller dans le sens de la sécurité » en abaissant les GF. À savoir que cela augmente la durée et/ou la profondeur des paliers, ce qui irait tout le temps dans le sens de la sécurité en abaissant le niveau de bulles.

Il y a bien évidemment une limite à cette logique : des paliers trop profonds ou trop longs ne sont pas toujours de bons choix, que ce soit au regard des risques d'accident ou de degré d'acceptabilité par les autres plongeurs de la palanquée. Dans tous les cas, il est essentiel de connaître et de respecter le cadre de validité et de ne pas utiliser,

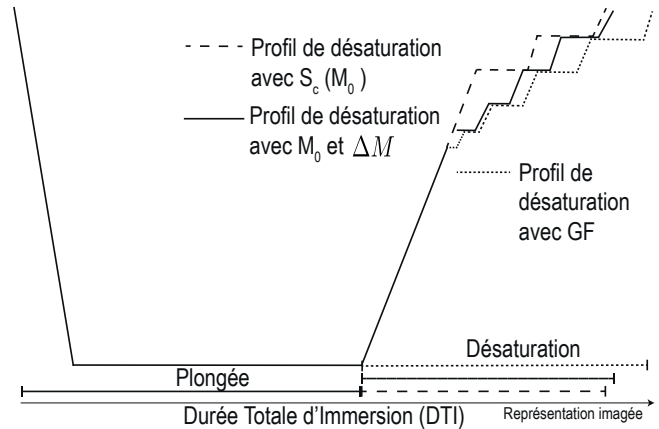


FIGURE 5. Représentation schématique de l'influence des M-Values et des GF sur le profil de la désaturation. Les GF accentuent le mouvement de décalage du profil de désaturation (plus profond, plus long) déjà amorcé par les M-Values.

pour les plongées à l'air, des paramétrages issus de plongées à l'hélium (trimix, héliox). Ce ne sont pas du tout les mêmes modes de désaturation.

Cas n° 1 : Des zones précalculées (ex. P0, P1, ... ou L0, L1, ...). De nombreux ordinateurs grand public procèdent de la sorte. Selon les modèles, cette possibilité peut s'appeler : facteur de sécurité, safety factor, facteur de prudence, paramètres personnels, PFactors, réglage du conservatisme, faible niveau de bulles, ...

Mode	GF_{low}/GF_{high}	DTI (min)
0	90/90	40
1	85/85	44
2	80/80	50
3	75/75	56
4	70/70	63
5	65/65	73
6	60/60	87

TABLE XXIII. À titre d'exemple, paramétrage arbitraire des GF (mode à sélectionner via le menu de l'ordinateur) et calcul de la durée totale d'immersion (DTI) pour une plongée de 25 min à 42 m (ZH-L₁₆C).

Cas n° 2 : Une modification des GF via une analyse en temps réel. Cela peut consister à définir une variable initialisée à 1 (ex. « bubble factor » ou « facteur ξ » du RGBM) et à faire varier la valeur de cette variable en fonction de certains indicateurs jugés clefs (intervalle court, profondeur, ...). En fonction de la valeur de cette variable lors de la remontée, les GF sont ajustés, de manière arbitraire, en l'absence de modélisation.

Cas n° 3 : Laisser l'utilisateur libre du choix des GF, en veillant à ce que la saisie des paramètres reste cohérente. Par exemple : plafonnement des GF à 95% ou impossibilité de fixer un GF_{low} plus grand qu'un GF_{high} .

DISCUSSION SUR LE DOMAINE DE VALIDITÉ DES GF ET LES VALEURS À RETENIR

Cadre d'analyse

L'intérêt des GF est de permettre la création automatique, par simple ajustement de GF_{low} et de GF_{high} , d'une infinité de jeux de M-Values. Dit autrement, cela évite de publier de nouveaux jeux de paramètres afin d'abaisser les M-values. Ce qui correspond à un travail de spécialiste en désaturation, au cas par cas, particulièrement dans le cadre de plongées saturantes dont le public, le profil et les paramètres sont connus d'avance : chantiers offshore, plongées souterraines, plongées profondes aux mélanges autres que l'air.

Le fait d'avoir ouvert au grand public l'accès à ce paramétrage dans certains ordinateurs de plongée, sans consignes particulières et sans publications scientifiques validées, induit une utilisation sans compréhension du réel impact sur la désaturation. Ce qui pose à la fois le problème du domaine de validité des GF et celui des valeurs à retenir.

Domaine de validité

En toute logique, le paramétrage par défaut des GF devrait être fixé à 100% (100/100), afin de correspondre strictement aux choix du concepteur du jeu de paramètres (M-values). Il n'y a, en effet, aucune raison de contester, dans des conditions qui ne s'écartent pas des hypothèses du modèle, la validité du jeu de paramètres. Par exemple, comme déjà indiqué, Albert A. Bühlmann a établi plusieurs jeux de paramètres ZH-L₁₆, dont la version C, spécifiquement conçue pour les ordinateurs de plongée et qui peut donc être utilisée sans ajustements.

Cependant, certaines situations peuvent être jugées significativement « hors modèle » :

1. Quantité de gaz neutre accumulée supérieure aux hypothèses du jeu de paramètres : effort, courant, froid, stress... ;
2. Plongées successives ou multiples, intervalle court en surface ;
3. Facteurs individuels de risque : âge, fatigue, mauvaise hygiène de vie... ;
4. Profils à risque : remontées rapides, yo-yo, dents de scie ;
5. Comportements à risque : effort à glotte fermé ou Valsalva en état de sursaturation, sport intensif, pratique de l'apnée, montée en altitude ou en avion après une plongée.

L'utilisation des GF peut être une réponse dans les situations 1, 2 et 3 parmi un ensemble d'autres actions possibles :

- Reprise progressive de la plongée ;
- Surveillance médicale (détection des facteurs de risque, traitements compatibles avec la pratique de la plongée...);
- Pratique régulière d'une activité physique, hygiène de vie, hydratation ;
- Plongées au nitrox (mélange fond) ;
- Lors des plongées saturantes (longues, profondes), désaturation isobare en utilisant de l'oxygène pur ou un nitrox fortement enrichi en oxygène, ce qui a pour effet de réduire le niveau de bulles lors de la désaturation et d'éliminer une grande partie des noyaux gazeux pouvant servir d'amorce à la création de bulles lors d'une plongée successive ou répétitive ;
- Entre deux plongées, respect d'un intervalle en surface d'au moins 2 à 3 h permettant d'éliminer suffisamment de gaz neutre ainsi que les plus grosses bulles liées à la désaturation (à défaut se limiter à des plongées peu profondes et d'une durée raisonnable) ;
- Lors des séjours plongée, faire une pause tous les 5 à 6 jours ;
- Limitation du nombre de plongées par jour (deux, voire une) ;
- Dans certains cas, accepter de renoncer à plonger ce jour-là ;
- etc.

Les GF constituent donc une action possible parmi d'autres, sans qu'il s'agisse une solution universelle à la prise en compte de facteurs de risque.

Fixation de la valeur des GF

Il y a deux façons d'utiliser les GF :

- soit en attribuant la même valeur à GF_{low} et GF_{high} , on parle alors de « GF jumeaux » ;
- soit en définissant un GF_{low} plus petit que GF_{high} (ex. 70/90).

GF jumeaux

Ceux qui ont utilisé des tables de plongée le savent, dans les situations 1, 2 et 3 citées précédemment, il était conseillé d'augmenter la durée et/ou la profondeur des paliers en prenant dans la table une ou deux cases au-dessus de la durée réelle (ex. 35 min au lieu de 30 min). Pourquoi une case, deux cases ou plus ? Le choix était bien évidemment arbitraire, mais jugé comme allant dans le sens de la sécurité²¹. Dans certaines situations, mieux

21. La même logique avait procédé à la publication de tables adaptées à partir de celles de l'US-Navy, en réduisant la limite des

Prof. m	Durée min	GF %	Durée Diff.		GF %	Paliers (min)			
			min	min		12 m	9 m	6 m	3 m
20	40	100/100							1
20	40	95/95	43	+3	100/100				2
20	40	90/90	45	+5	100/100				3
20	40	85/85	47	+7	100/100				4
20	40	80/80	49	+9	100/100				5
30	30	100/100							1 10
30	30	95/95	31	+1	100/100				1 11
30	30	90/90	32,5	+2,5	100/100				2 12
30	30	85/85	33,5*	+3,5	100/100				3 13
30	30	80/80	35*	+5	100/100				4 14
40	20	100/100							3 9
40	20	95/95	21	+1	100/100				4 10
40	20	90/90	22	+2	100/100				5 11
40	20	85/85	23*	+3	100/100	1			5 12
40	20	80/80	23,5*	+3,5	100/100	1			6 12
50	15	100/100							1 4 9
50	15	95/95	16	+1	100/100				1 5 10
50	15	90/90	16,7	+1,7	100/100				2 5 11
50	15	85/85	17,2*	+2,2	100/100				2 6 12
50	15	80/80	18*	+3	100/100				4 6 13

TABLE XXIV. Comparaison, pour différents couples profondeur/durée, entre des GF jumeaux et une augmentation fictive de la durée de plongée (ZH-L₁₆C 1b, air, atm = 1) aboutissant aux mêmes paliers.

* Par rapport aux GF, décalage d'une minute avec même durée cumulée (ex. 4 et 16 min au lieu de 5 et 15 min).

valait faire ce choix plutôt que de ne rien faire. Certains scaphandriers parlaient alors du « *Jesus Factor* » [31].

Les GF permettent de procéder de même avec les ordinateurs de plongée, tout aussi arbitrairement.

Par exemple (voir Table XXIV), pour une plongée 30 min à 30 m, avec le jeu de paramètres Bühlmann ZH-L₁₆ C (1b)²², la durée des paliers est de 1 min à 6 m et 10 min à 3 m. Elle passe à 4 min à 6 m et 14 min à 3 m pour 35 min à 30 m. Et si l'on revient à 30 min à 30 m mais avec des GF 80/80, on retrouve les mêmes valeurs, 4 min à 6 m et 14 min à 3 m.

En conclusion :

1. Les GF jumeaux reviennent à appliquer, avec des ordinateurs, la même procédure que celle utilisée historiquement avec des tables en cas de facteurs favorisant les risques : prendre une durée fictive supérieure à la durée réelle, ce qui conduit à augmenter la durée des paliers (voire la profondeur du premier palier).
2. Cela devient significatif et sans doute suffisant dès

plongées sans paliers de quelques minutes ou bien d'une, deux ou trois cases (Huggins, RDP-PADI, Bassett, Jeppesen...).

22. Nous avons utilisé les paramètres indiqués par Bühlmann dans ses ouvrages déjà cités avec, en particulier, une marge de sécurité de 0,2 bar sur la profondeur considérée (ex. des calculs affichés pour 30 m sont donc effectués à 32 m).

90/90 ou 85/85 pour la plupart des situations rencontrées en plongée de loisir.

3. Idéalement, il faudrait pouvoir activer l'ajustement des GF en immersion (et pas uniquement en surface avant la plongée), afin de prendre en compte des situations imprévues : effort, froid, courant...

$$GF_{low} \text{ plus bas que } GF_{high}$$

Une autre utilisation des GF, issue de la pratique des plongées profondes avec des mélanges à base d'hélium, consiste à définir un GF_{low} plus bas que GF_{high} (ex. 60/90; 45/80; 30/70). Cela conduit, comme déjà indiqué, à modifier le profil de la désaturation en réalisant des paliers significativement plus profonds et plus longs que ceux prévus par le jeu de paramètres utilisé. La justification serait une sécurisation de la désaturation.

À notre connaissance, aucune publication scientifique n'a confirmé, à ce jour, ni le bien-fondé de cette approche ni les valeurs à retenir pour GF_{low} et GF_{high} . Elle reste largement pratiquée dans certaines communautés de plongeurs profonds utilisant de l'hélium. Les écarts conséquents avec le jeu de paramètres du modèle d'origine (voir Table XXV) ne peut que nous interroger.

Prof. m	Durée min	GF %	Paliers (min)						
			21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m
30	30	100/100							1 10
30	30	90/90							2 12
30	30	60/90							5 10
30	30	45/80						3 5	13
30	30	30/70				1 3		7 17	
50	15	100/100						1 4	9
50	15	90/90						2 5	11
50	15	60/90				2 2		5 10	
50	15	45/80			1 2	4 6		13	
50	15	30/70	1 2	2 4	7 17				

TABLE XXV. Comparaison des profils de désaturation (ZH-L₁₆C 1b, air, atm = 1) avec différents jeux de GF.

CONCLUSION

Tous les ordinateurs de plongée de loisir²³ utilisent le modèle de Haldane, avec un jeu de paramètres Bühlmann ou RGBM (qui est proche de celui de Bühlmann). Les deux mêmes équations sont utilisées, l'une pour connaître le niveau de saturation, l'autre pour dicter les conditions

23. L'implémentation du modèle DCIEM reste une exception dans l'offre mondiale concernant les ordinateurs de plongée. Quant au jeu de paramètres VPM, il est anecdotique pour ne pas dire inexistant, dans la pratique de loisir.

de la remontée (avec une condition ajoutée pour les approches diphasiques), via les M-Values, éventuellement ajustées des GF .

Les GF étant une simple astuce mathématique sans mode d'emploi, les plongeurs sont le plus souvent démunis quant à leur utilisation. Le paramétrage arbitraire des GF avec des couples jumeaux proches de 90/90 ou 85/85 se comprend aisément comme étant une précaution supplémentaire en présence de facteurs de risques. En revanche, des GF jumeaux significativement plus bas (ex. 60/60) ou des GF_{low} et GF_{high} très éloignés les uns des autres (ex. 30/70 ou 45/80) conduisent à de tels écarts avec le jeu de paramètres d'origine qu'ils nous interrogent soit sur la pertinence du jeu de paramètres soit sur celle des valeurs choisies pour les GF . Ce point mériterait des prolongements, en prenant soin de distinguer les plongées de loisir des plongées professionnelles et les plongées à l'air des plongées en respirant un mélange à base d'hélium.

* Corresponding author : alain.foret@plongee-plaisir.com

- [1] B. Pol et T.-J.-J. Watelle, *Mémoire sur les effets de la compression de l'air appliquée au creusement des puits à houille*, 1854.
- [2] Haldane J.-S. et coll., *The prevention of decompression air illness*, J. Hyg., 1908, pp. 342-443.
- [3] Haldane J.-S. et coll., *The prevention of decompression air illness*, J. Hyg., 1908, p. 353.
- [4] Haldane J.-S. et coll., *The prevention of decompression air illness*, J. Hyg., 1908, p. 355.
- [5] Robert Boyle, *New Pneumatical experiments about Respiration*, *Philosophical Transactions*, t. V, 8 août 1670, pp. 2011-2058. Extrait et traduit : Collection académique, partie étrangère, t. VI, pp. 23-59 ; 1761.
- [6] C.-Antoine Brizé-Fradin, *La chimie pneumatique appliquée aux travaux sous l'eau, dans les puits, les mines, les fosses, etc. Moyens de se préserver de l'acide carbonique, de l'azote, et de pénétrer au milieu des gaz irrespirables. Secours divers*, Paris, 1808.
- [7] Paul Hervier, *Note sur la carbométrie pulmonaire dans l'air comprimé*, *Gazette médicale de Lyon*, publication du 31 juillet 1849, dans tome 1, année 1849, pp. 168-169.
- [8] Charles-Gabriel Pravaz, *Essai sur l'emploi médical de l'air comprimé*, Lyon et Paris, 1850.
- [9] Jacques Triger, *Mémoire sur un appareil à air comprimé, pour le percement des puits de mine et autres travaux, sous les eaux et dans les sables submergés*, dans *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, 2 novembre 1841, pp. 884-896 ou *Annales de chimie et de physique*, t. 3, 1841, pp. 234-251.
- [10] Félix Hoppe, *Über den ein fluss, welchen den Wechsel des Luftdruckes auf das Blut ausübt*, *Arch. Ana. Physiol.* Lpz, 1857, cité par Paul Bert.
- [11] Eugène Bucquoy, *Action de l'air comprimé sur l'économie humaine*, Thèse de Strasbourg, 1861.
- [12] E. Hermel, *Des accidents produits par l'usage des saisons dans les travaux sous-terrains et sous-marins*, *Art. médical*, t. XVI, p. 428-452, 1862 ; t. XVII, p. 27-48, 105-124 et 194-213, 1863.
- [13] Cité par Paul Bert, *La Pression Barométrique*, Masson, 1878, p. 500.
- [14] Alfred Leroy de Méricourt, *Considérations sur l'hygiène des pêcheurs d'éponges*, dans *Annales d'hygiène publique et de Médecine légale*, Paris, 2e série, t. XXXI, 1869, pp. 274-286.
- [15] Alfred Leroy de Méricourt, *Considérations sur l'hygiène des pêcheurs d'éponges*, dans *Annales d'hygiène publique et de Médecine légale*, Paris, 2e série, t. XXXI, 1869, p. 284 (à propos de la procédure proposée par Denayrouze).
- [16] Alphonse Gal, *Des dangers du travail dans l'air comprimé et des moyens de les prévenir*, Thèse de Montpellier, 1872.
- [17] Paul Bert, *La Pression barométrique*, Masson, 1878, p. 974.
- [18] Heller R., Mager W., von Schrötter H., *Experimentelle Untersuchungen über die Wirkung rascher Weranderungen des Luftdruckes auf den organismus*, *Pflug. Arch. Ges. Physiol.*, 1897.
- [19] Paul Bert, *La Pression barométrique*, Masson, 1878.
- [20] Paul Bert, *La Pression barométrique*, Masson, 1878, pp. 1149-1150.
- [21] H. R. Schreiner et P. L. Kelley, *A Pragmatic View of Decompression*, *Underwater Physiology : Proceedings of the Fourth Symposium on Underwater Physiology*, Academic Press New York, 1971, pp. 205-219.
- [22] Robert D. Workman, *Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives*, *Res Rep 6-65*. Rep US Navy Exp Diving Unit, 1965.
- [23] Bühmann A. A., *Decompression, Decompression Sickness*, Springer-Verlag, 1984 (traduction en anglais de la version originale publiée en allemand en 1983 : *Dekompression - Dekompressionskrankheit*).
- [24] Hempleman H. V., Crocker W. E. and Taylor H. J., *Investigation into the decompression tables*, Report III, Part A : A New Theoretical Basis for the Calculation of Decompression Tables, Part B : A method of calculation decompression stages and the formulation of new diving tables, Great Britain, Medical Research Council, Royal Naval Personnel Research Committee, UPS, Rept. R.N.P 52/708, U.P.S 131, June 1952, 30 pp..
- [25] Shields, T.G., P.M. Duff, and S.E. Wilcox, *Decompression Sickness from Commercial Offshore Air-Diving Operations on the U.K. Continental Shelf During 1982 to 1988*, Report produced for Department of Energy (DoE) under Contract TA/93/22/249. Aberdeen : Robert Gordon's Institute of Technology, 1989.
- [26] Collectif, *Comex 50 ans de recherches et d'innovations*, 2012, pp. 140-141.
- [27] Blatteau J.-E., Hugon M., Gardette B., Galland F.-M., *Protocoles de décompression pour la plongée à l'air intégrant des paliers profonds*, *Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare*, 2005, pp 85-91.
- [28] Doolette D.J., Gerth W.A., Gault K.A. *Redistribution of decompression stop time from shallow to deep stops increases incidence of decompression sickness in air decompression dives*, *Navy Experimental Diving Unit (NEDU)*, 2011.
- [29] Nico A.M. Schellart, Jan-Jaap Brandt Corstius, Peter Germonpré, and Wouter Sterk, *Bubble Formation After a 20-m Dive : Deep-Stop vs. Shallow-Stop Decompression Profiles*, *Aviation, Space, and Environmental Medicine x Vol. 79, No. 5 x May 2008*.

- [30] PADI *Training bulletin*, Fourth Quarter, 2016 et John Adsit, *PADI Master Scuba Diver Trainer and Tec Trimix Instructor Evolving, Thought on Deep Decompression Stops*, <https://tecrec.wordpress.com>, 22 avril 2019, Reviewed by : Simon Mitchell.
- [31] Shields T. G. et Lee W. B., *The incidence of decompression sickness arising from commercial offshore air-diving operations in the UK sector of the North Sea during 1982/83*, United Kingdom, 1998, p.25.
- [32] Bennet and Elliott's, *Physiology and Medicine of Diving*, Saunders, 2003, pp. 471-473..
- [33] 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..
- [34] Lang M. A. et Vann R. D., *Proceedings of Repetitive Diving Workshop*, American University of Underwater Sciences, Duke University, 1991..
- [35] Spencer, Merrill P. et Johanson, David C., *Investigation of New Principles for Human Decompression Schedules Using Doppler Ultrasonic Blood Bubble Detection*, The Office of Naval Research Department of the Navy, 23 juillet 1974..