

VPM - LA MECANIQUE INTERNE

D'après Marcin Kaluza (www.hlplanner.com) novembre 2005

Traduit par Jacques Meyriat (www.hlplanner.com) en mars 2006

INTRODUCTION

L'objectif premier de ce texte est d'expliquer en termes compréhensibles par le plus grand nombre les rouages internes du Modèle à Perméabilité Variable qui joue un rôle important dans notre compréhension de la décompression et jeta les bases pour d'autres modèles de décompression à bulle qui ont suivi. Les textes disponibles publiquement, sur Internet ou sur papier, se concentrent principalement sur l'aspect mathématique de l'algorithme, ignorant dans la plupart des cas les principes qui régissent ses bases. Ceci peut laisser le plongeur moyen face à une "boîte noire", dont les fonctionnements internes sont un mystère total. Ceci signifie également que la grande majorité des plongeurs sont exposés à une certaine désinformation et n'ont pas une connaissance suffisante des principes pour faire certains choix et prendre les décisions concernant leur propre sécurité.

Le texte qui suit tente d'expliquer et d'illustrer l'essentiel, sans trop approfondir l'aspect mathématique des choses : la plupart des textes cités dans la section de référence le font déjà, et malheureusement ne font guère plus. Cet article utilise le strict minimum de formules, et celles-ci ont été incluses uniquement pour permettre aux lecteurs intéressés par les calculs sous-jacents de pouvoir recréer les graphiques présentés dans ce document. Ceux qui ne se sentent pas passionnés par les montagnes de chiffres peuvent sans risque les ignorer. Les physiologistes peuvent continuer à discuter quel modèle aujourd'hui disponible est plus précis ou « meilleur », mais vu d'un plongeur seuls les principes importent, et pas les détails. De ce point de vue, l'importance des travaux du prof. David E. Yount ne doit pas être sous-estimée.

Il serait très difficile de faire entrer toute la théorie de la décompression dans un communiqué, et donc on s'attend à ce que le lecteur comprenne au moins les principes des modèles néo-Haldaniens. La documentation de référence peut être trouvée dans la section de référence du site Web de HL-Planner (www.hlplanner.com).

M POUR M-VALUE

Tous les modèles de décompression utilisés actuellement en plongée technique utilisent le même type de modèle pour calculer la saturation et la désaturation des tissus : le corps est représenté par un ensemble de « tissus » hypothétiques, qu'on désignera sous le nom de compartiments, caractérisés par des vitesses de saturation et de désaturation variables connus comme leur "Demi-durée" par les anglo-saxons, et période chez nous. Ce terme indique combien de temps il faudrait au compartiment pour voir réduire de moitié l'écart de sa charge en gaz avec la valeur attendue à saturation. Si la période du compartiment est de 4 minutes, et qu'il est complètement vide, il faudra 4 minutes pour qu'il soit à moitié saturé. Il faudra encore 4 minutes pour combler la moitié de l'autre moitié (c.-à-d. un quart) et ainsi de suite. En pratique un compartiment est considéré complètement chargé après 5-6 période, soit dans le cas de notre compartiment "4 minutes" 20 à 24 minutes, avec 97% à 98% de la charge possible. La plupart des modèles reposent sur un nombre (variable) de compartiments, avec le plus courant, ZHL16 de Buhlmann, utilisant 16 compartiments de périodes valant de 4 à 640 minutes.

Cette saturation en gaz basée sur des compartiments est commune à tous les modèles employés aujourd'hui, ou du moins l'auteur ne connaît aucun modèle aujourd'hui employé dans la plongée loisir ou technique qui ne l'utiliserait pas. Le nombre de compartiments et de leurs périodes peut changer ; le concept demeure cependant le même.

Le but du modèle de décompression est de contrôler la charge en gaz de chaque tissu afin d'éviter au plongeur de faire un accident de décompression (ADD). La pression du gaz qui équilibrerait le gaz dissous dans un tissu est souvent désignée sous le nom de tension, et c'est exactement ce que les modèles de décompression ont essayé de contrôler depuis le début du 20ème siècle. Dans le jargon technique, la limite supérieure de tension admissible d'un compartiment est connue comme sa M-Value, avec « M » pour maximum.

Tous les modèles néo-Haldaniens emploient un ensemble simple d'équations linéaires pour décrire la M-Value, qui prend généralement la forme :

$$M = M_0 + \Delta M \times d$$

où M_0 et ΔM sont 2 paramètres caractéristiques du compartiment, et d indique la profondeur.

L'équation ci-dessus représente la forme dite de Workman, par opposition à l'approche quelque peu différente adoptée par Buhlmann. Il faut noter que connaissant la M-Value il devient facile de calculer le gradient de sursaturation admissible d'un compartiment (P_{ss}), c'est-à-dire l'écart entre sa tension et la pression ambiante :

$$P_{ss} = M - d = M_0 + (\Delta M - 1) \times d$$

La figure 1 présente les gradients de sursaturation admissibles pour 2 compartiments, le plus lent et le plus rapide, du modèle Buhlmann ZHL16C

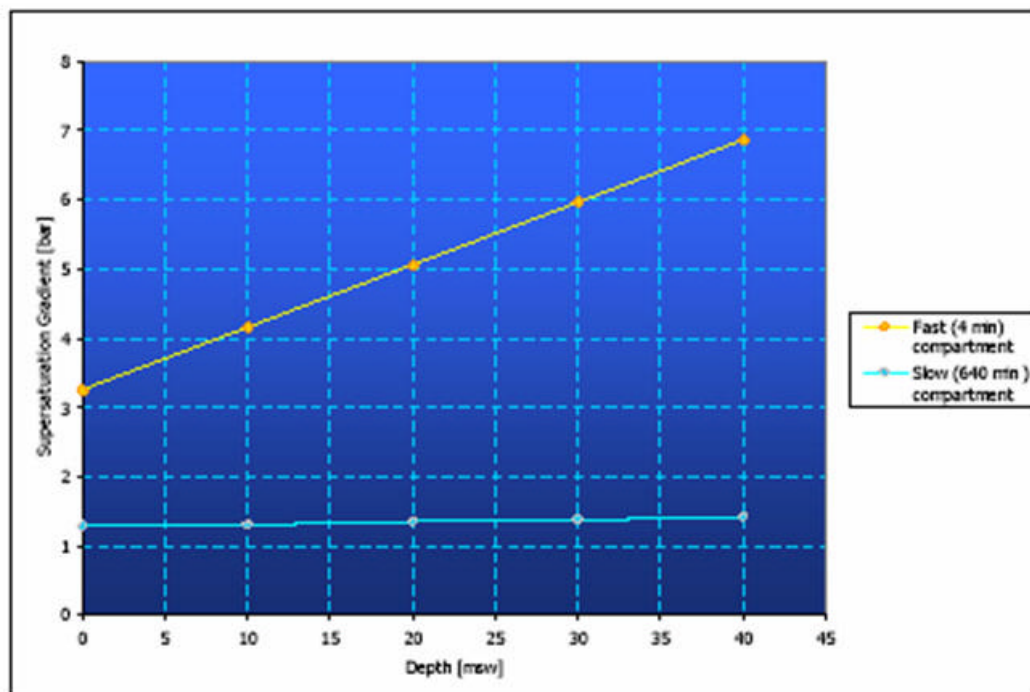


Figure 1 : Gradients maximum de sursaturation admissibles de ZHL16C en fonction de la profondeur.

Il y a plusieurs observations importantes à déduire de ce graphique, qui ont des conséquences très importantes sur la forme de la courbe de décompression produite par un algorithme néo-Haldanien:

- On permet aux compartiments les plus rapides (ceux qui imposent les paliers profonds de décompression initiale) d'être plus sursaturés que les autres ;
- De plus grandes profondeurs permettent une sursaturation plus élevée
- La sursaturation permise à un compartiment donné dépend uniquement de la profondeur.

Ces trois caractéristiques des modèles néo-Haldanien ont des conséquences directes sur les profils de décompression : puisque l'on permet aux compartiments rapides d'être fortement sursaturés, et d'autant plus que la profondeur est importante, les premiers paliers de décompression contrôlés par ces compartiments ne sont pas très profonds car il n'y a aucun besoin de s'arrêter en profondeur. Les compartiments lents dont la sursaturation autorisée est moins élevée et qui désaturent lentement imposeront des paliers peu profonds mais longs.

Une telle approche de la décompression, comme nous le savons aujourd'hui, est loin d'être optimale : on a observé depuis des années que « les paliers profonds » non imposés par le modèle permettent au plongeur de sortir de plongée en bien meilleure forme.

L'ADD, LES BULLES ET LEUR MECANIQUE

Comme nous l'avons déjà dit, tout les modèles actuels de décompression utilisent le concept des compartiments pour calculer les transferts de gaz pendant la plongée. Ils diffèrent dans la manière dont la tension maximum des compartiments est calculée. Dans le cas des modèles néo-Haldaniens, un ensemble d'équations linéaires est employé, tandis que pour VPM, ou plus généralement les modèles à bulle, la situation est bien plus complexe, mais les principes sont relativement simples et nous les aborderons un par un.

Commençons par le plus important : l'ADD est provoqué par le gaz libéré par la décompression dans notre corps ([4]). Tant que le gaz reste dissous, il ne pose pas de problème, dès qu'il forme des bulles, il peut causer toutes sortes de problèmes : obstruction de la circulation sanguine, formation de caillots, dommages mécaniques aux tissus environnants, etc... Ceux-ci, selon l'ampleur des dommages, peuvent avoir comme conséquence de la fatigue, une douleur, une paralysie ou même la mort. Un fait indiscutable demeure cependant : quand le volume du gaz libre dans le corps dépasse certaines limites, nous risquons l'apparition d'un ADD. La question est alors : où est la limite et comment la calculons nous? Avant d'y arriver, nous devons cependant parler de la mécanique des bulles, ou du moins de leur croissance.

COMMENT LES BULLES SE DÉVELOPPENT-ELLES ?

VPM suppose que notre corps est plein de bulles minuscules appelées des noyaux gazeux ou nuclei, qui en phase de sursaturation agiront comme foyer pour la création de bulles proprement dites, plus grosses, qui causent toutes sortes de problèmes connus globalement sous le nom d'ADD. Le point intéressant est que au cours de la décompression seuls certains de ces noyaux se développeront en bulles. Pour bien comprendre ce paradoxe imaginez ce qui suit : emportez sous l'eau un ensemble de ballons de différentes tailles, dès que vous commencerez à remonter vers la surface, certains d'entre eux grossiront du fait de la variation de la pression ambiante, mais certains d'entre eux... s'effondreront. Voilà, c'est

ainsi que les bulles se comportent. En répétant cette expérience à une échelle microscopique sur des cuves de gelée, ce qu'on fait à l'origine les inventeurs de VPM, nous pourrions observer que la croissance des noyaux de gaz dépend de deux facteurs :

- la taille des noyaux – seules les bulles plus grandes qu'une certaine taille se développent
- le niveau de sursaturation – pour une même plongée, le nombre de bulles grossissantes dépendra de la sursaturation maximum atteinte pendant la décompression.

Ces deux faits ont des conséquences primordiales pour tous les modèles à bulle : en changeant le niveau permis de sursaturation des compartiments, nous pouvons contrôler le nombre de bulles grossissantes. En principe pour conserver un faible nombre de bulles, nous devons maintenir des niveaux de sursaturation bas et vice-versa. Il est également très important de noter le rapport entre le gradient de sursaturation et les tailles de bulles et c'est ce que permet la « formule de Laplace ». Etant donné le gradient de sursaturation P_{ss} , nous pouvons calculer quelles bulles se développeront, ou en d'autres termes il est possible de calculer le Rayon critique (R_c) qui sépare les noyaux appelés à croître de ceux qui s'effondreront :

$$R_c = 2 \times \text{Gamma} / P_{ss}$$

dans lequel P_{ss} désigne le gradient de sursaturation et Gamma est la tension de surface du fluide environnant. Encore plus intéressant, nous pouvons inverser la question et demander : étant donné un Rayon critique, quel est le gradient de sursaturation limite qui empêchera les bulles plus petites de croître ? Pouvoir répondre à cette question est fondamental, comme nous le verrons clairement plus loin.

À LA RECHERCHE DES M-VALUE

Au bon vieux temps, les M-Values et plus généralement les modèles de décompression étaient basés sur l'expérimentation. Les plongeurs et les chercheurs ont observé que notre corps peut facilement supporter une certaine quantité de gaz inerte dans les tissus. J.S. Haldane, il y a près d'un siècle, a observé que l'on pouvait laisser un plongeur à 10m « sans limite de temps » et lui laisser regagner la surface à tout instant sans aucun effet néfaste. La même constatation s'applique à une plongée à 6 bars et une remontée à 3 bars. De là Haldane a tiré son fameux coefficient 2 entre tension de gaz dans les compartiments et pression ambiante, qui plus tard fut affiné par Workman comme valant 1.58 mais appliqué cette fois-ci aux gaz inertes, seuls responsables de l'apparition d'un ADD. Le modèle a été affiné plus tard, par l'introduction des gradients dépendants de la profondeur, et de différentes M-Values pour différents compartiments. Au total, les limites ont été vérifiées empiriquement et il n'y avait aucune vraie « science » derrière elles. Puis tout a changé avec l'arrivée de VPM.

LE MODÈLE A PERMÉABILITÉ VARIABLE

VPM suppose en effet qu'il y a un certain volume de gaz libre que notre corps peut supporter, et que ce volume est lié au nombre de bulles excitées jusqu'à croissance pendant la décompression, toutefois au lieu de chercher à chiffrer la valeur limite du nombre de bulles autorisées à se développer (1372 par litre ?), il emploie un concept appelé la distribution. La distribution décrit le rapport entre la taille des bulles et le nombre de bulles présentes dans la population :

$$N (R) = N_0 \times \exp (-k \times R)$$

Dans lequel N_0 est le nombre total de bulles, R est le rayon de celles-ci et k est une constante. La forme générale de la courbe de distribution est illustrée dans la figure 2.

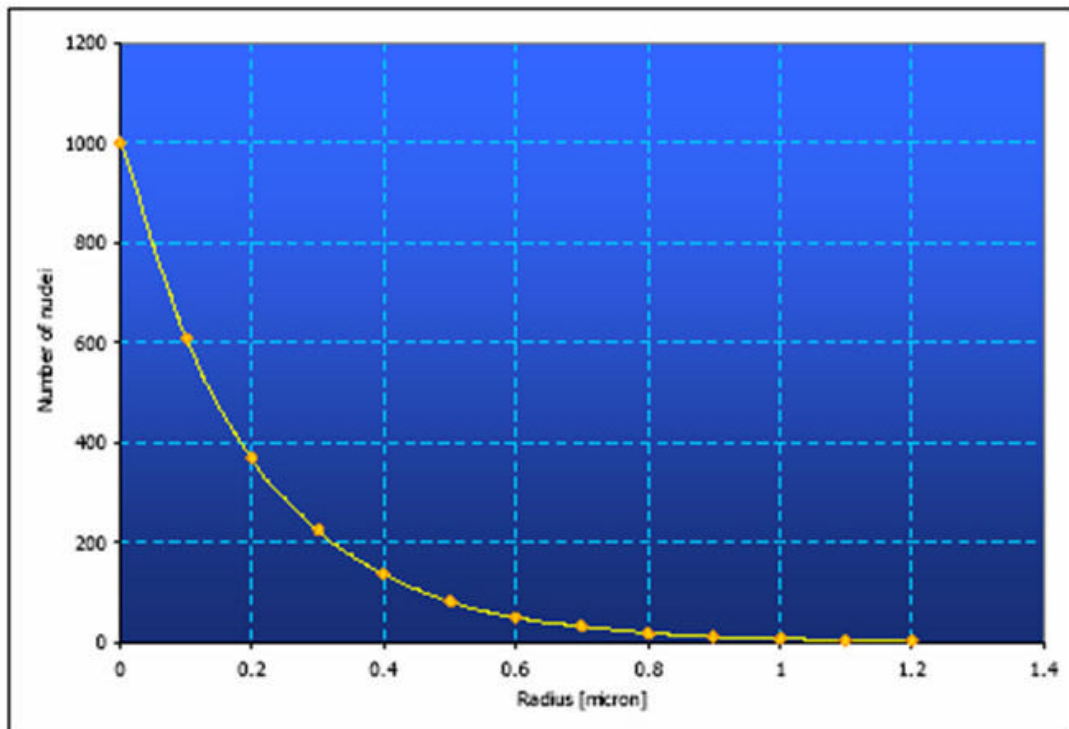


Figure 2 : exemple de distribution des noyaux de gaz en fonction de leur taille.

Etant donné cette distribution hypothétique nous pouvons dire qu'il y a approximativement 7 bulles plus grosses que $1\mu\text{m}$, 600 bulles plus grosses que $0.1\mu\text{m}$ et 1.000 au total (R variant de 0 à l'infini ...soit quelques mm.)

Par conséquent au lieu de dire « les 600 plus grosses bulles » nous pouvons dire « toutes les bulles plus grosses que $0.1\mu\text{m}$ ». Cette manière d'exprimer des nombres de bulles peut sembler alambiquée au début mais c'est celle que les physiologistes recherchent, et ce pour une excellente raison.

Récapitulons ce que nous savons pour le moment :

- 1) L'ADD est provoqué par le gaz libéré sous forme de bulles.
- 2) Il y a un certain volume de gaz libre que notre corps peut supporter, et ce volume est lié au nombre de bulles autorisées à se développer pendant la décompression.
- 3) On peut exprimer le nombre de bulles en employant une distribution et la taille des bulles.
- 4) A partir de la mécanique des bulles (la formule de Laplace) nous savons que nous pouvons calculer un gradient de sursaturation (et par conséquent une stratégie de décompression) tel que seules les bulles plus grosses qu'une certaine limite se développeront.
- 5) La combinaison de 3 et de 4 nous donne une recette pour une décompression sûre, et c'est la base de VPM (ou de tout autre modèle à bulle).

Pour reformuler cette explication verbeuse et longue, nous pouvons simplement dire que **le principe de VPM est d'empêcher un nombre excessif de bulles de croître**, et « excessif » se traduit par « aucune bulle plus petite que X ». Dans ce but, le programme doit calculer pour chaque compartiment un gradient de sursaturation tel que seules les bulles plus grosses que X se développeront. Le paramètre magique X est trouvé expérimentalement et c'est l'un des paramètres fondamentaux de VPM - il s'appelle Rayon critique initial et deux valeurs (une pour l'hélium et une pour l'azote) sont utilisées par tous les programmes basés sur VPM.

Si jusqu'à ce point vous avez suivi ce qui a été présenté, vous n'aurez aucun problème pour comprendre le reste. Il reste quelques détails importants à expliquer mais dorénavant, tout est relativement simple.

POURQUOI « PERMÉABILITÉ VARIABLE » ?

Jusqu'ici nous avons seulement traité la phase de décompression de la plongée, et nous savons déjà comment les gradients de sursaturation sont calculés. Ce que nous devons voir maintenant c'est la « compression » ou phase de descente. Avant d'y arriver cependant, il y a encore une particularité de VPM qui doit être mentionnée : l'hypothèse d'ordre.

L'hypothèse d'ordre déclare simplement que si la bulle A est plus petite que la bulle B, cet ordre persistera même si nous soumettons les 2 bulles à n'importe quel cycle de compression-décompression. Ainsi, avec la condition de décompression « éviter aux bulles plus petites que X de croître », alors que toutes les bulles, même de taille X, changent de volume pendant la plongée, le nombre de bulles plus petites que X demeure constant quand la valeur de X change. Et c'est là une autre base de VPM.

Pour un scénario de plongée simple, tout programme basé sur VPM doit prévoir ce qui arrive aux noyaux de gaz dans chaque tissu. Pour simplifier le travail il suffit de s'intéresser aux bulles d'une taille égale au Rayon critique initial, car nous savons que tout noyau plus petit s'effondrera, et que toute bulle plus grosse se développera. La croissance ou l'effondrement des bulles est guidé par la différence entre la tension du tissu et la pression ambiante - le gradient de pression. Puisque la tension d'un tissu dépend entre autres de sa période, des Rayons critiques sont déterminés séparément pour chaque compartiment. A la remontée, connaissant les Rayons critiques, un gradient de sursaturation est calculé pour chaque compartiment et c'est ce qui pilote la phase de décompression. Cependant la compression des bulles pendant la phase de descente a des conséquences importantes pour le modèle et c'est pourquoi il faut s'y intéresser.

Comme dit plus tôt, la compression des bulles déterminera leur taille à la fin de la plongée.

VPM définit deux zones différentes de gradient dans lesquelles les bulles se comportent différemment : les zones perméable et imperméable. Selon VPM, les bulles sont entourées par des molécules d'agent tensio-actif (surfactant) formant une « peau ». A l'état normal cette peau est perméable, c.-à-d. que le gaz peut librement passer entre la bulle et le tissu environnant. Une fois comprimée à un certain point, la peau devient imperméable et les bulles se comportent comme les ballons gonflés à l'air, c.-à-d. que leur compression est régie par la loi de Boyle-Mariotte et déterminée par la pression ambiante. Cette différence dans le comportement (perméable/imperméable) a donné son nom à VPM. Comme vous pouvez l'imaginer, selon la manière dont on descend à une profondeur donnée, les bulles seront plus ou moins comprimées, selon la vitesse de descente. C'est l'une des raisons pour lesquelles VPM n'accepte pas de descente « instantanée ». La vitesse de descente est importante parce que les bulles sont écrasées, non par la pression ambiante, mais par la différence entre la pression ambiante et la tension dans les tissus (gradient de réduction). Si

la descente est lente, la tension des tissus au fond sera plus élevée que dans le cas d'une descente rapide où les tissus n'auront pas le temps de se charger en gaz et le gradient de réduction, ou pression d'écrasement, sera plus élevée. La figure 3 illustre ce phénomène.

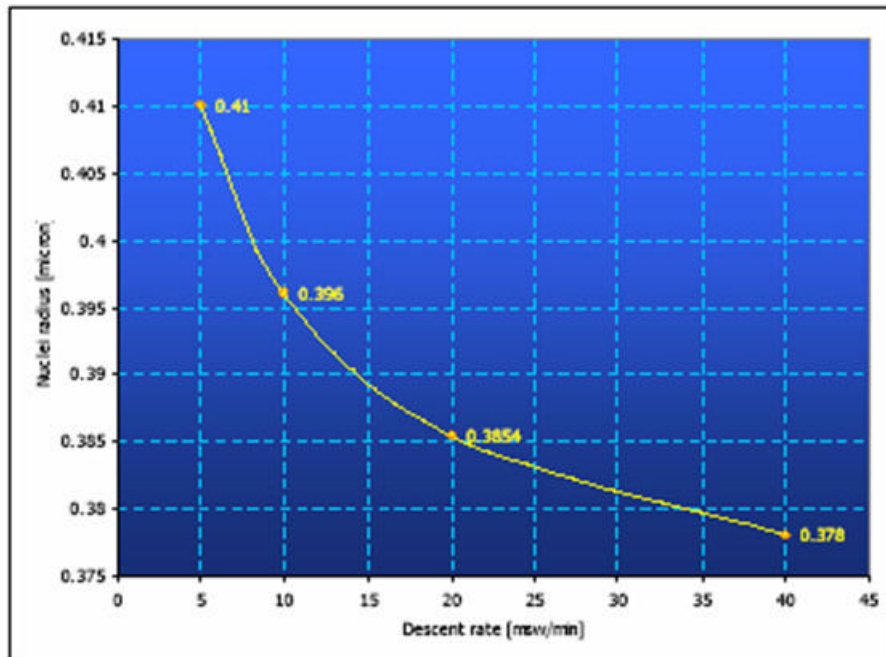


Figure 3 : Rayon des noyaux écrasés en fonction de la vitesse de descente pour un compartiment 5' (plongée air à 40 m, Rayon initial de 0.55 micron)

Puisque de plus petits noyaux exigent, pour les inciter à la croissance, des gradients plus élevés de sursaturation, de cette figure 3 nous pouvons déduire que les gradients initiaux de sursaturation seront plus élevés pour des vitesse de descente plus élevées.

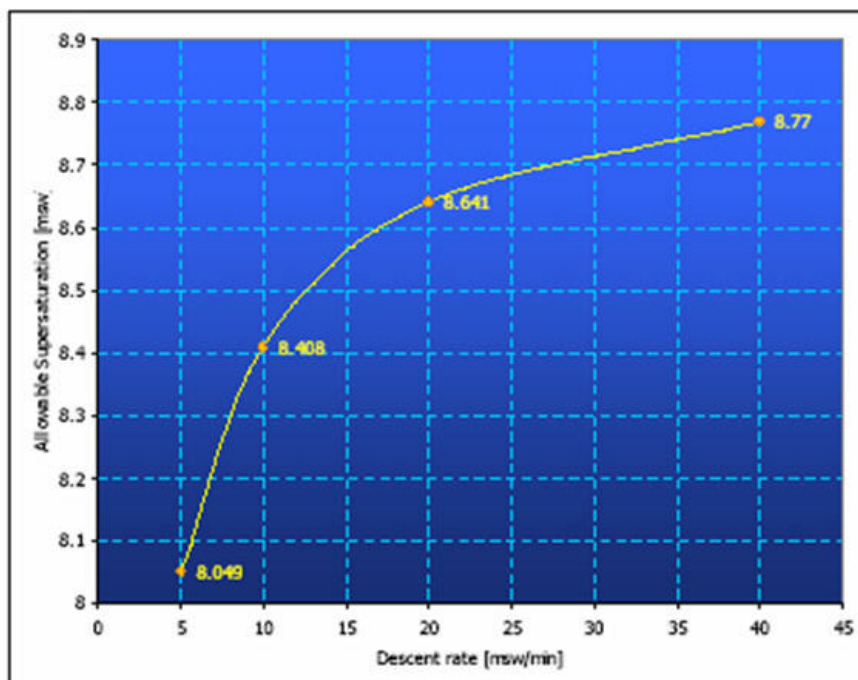


Figure 4 : Gradient de sursaturation en fonction de la vitesse de descente pour un compartiment 5' (plongée air à 40 m)

En d'autres termes une vitesse de descente plus rapide induit (potentiellement) une décompression plus courte comme illustré Figure 4. Inversement, une vitesse de descente plus lente peut imposer de plus longs paliers de décompression. Ceci peut devenir très gênant dans les cas où la véritable vitesse de descente diffère des prévisions. Une vitesse de descente plus lente signifie cependant habituellement moins de temps sur le fond (par exemple atteinte de la limite en Run Time de plongée avant de devoir remonter) et donc une saturation inférieure des tissus. Le bilan est alors que, bien que le gradient permis de sursaturation soit inférieur, les tissus contiennent moins de gaz et les différences sur les durées totales de décompression sont habituellement mineures. Par ailleurs les tissus plus lents, qui contrôlent les paliers peu profonds, sont assez lents pour ne pas dépendre des variations de la vitesse de descente.

Jusqu'ici nous avons discuté le comportement des noyaux écrasés dans la phase perméable. Par souci d'exhaustivité, il faut aussi regarder ce qui se passe en phase imperméable. Dans cette phase comme nous l'avons dit précédemment, les noyaux sont soumis à une compression selon la loi de Boyle-Marriotte et donc la réduction de leur taille est plus lente, donnant de plus gros noyaux de gaz à la fin de la phase de descente. La figure 5 illustre ce phénomène : la première série de points a été calculée en supposant que les noyaux de gaz sont toujours perméables, alors que la seconde a été calculée en posant qu'une fois atteint un gradient centripète de gaz (pression de compression) équivalent à 37 m les noyaux deviennent imperméables.

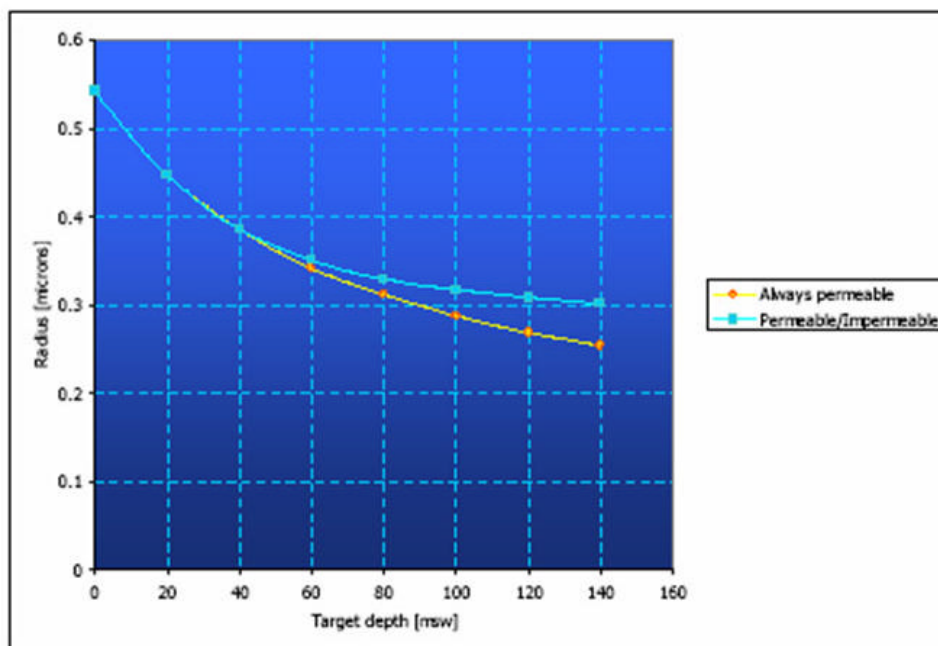


Figure 5 : Compression de noyaux de gaz pendant la descente (compartiment 5min, plongée air, descente 20 m/min) pour peaux «toujours perméables» et «perméables/imperméables».

Sur la figure 5 ci-dessus nous pouvons clairement voir la différence entre les Rayons obtenus. Comme discuté plus haut, le gradient de sursaturation pendant la décompression est déduit de la taille des bulles et la figure 6 illustre des gradients initiaux de sursaturation calculés pour le même exemple.

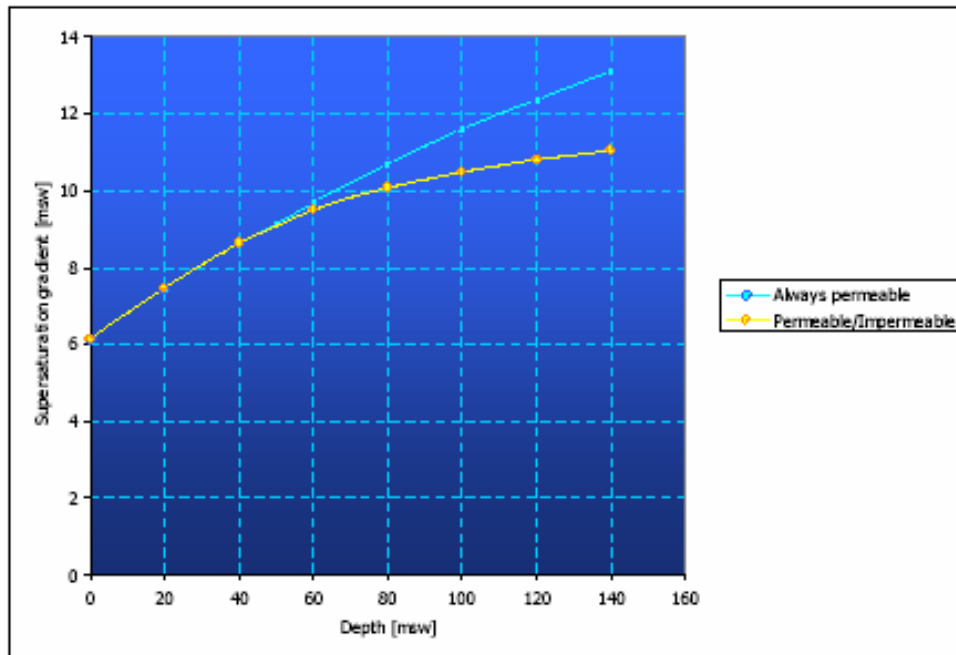


Figure 6 : Gradient initial de sursaturation pour noyaux «toujours perméables» et «perméables/imperméables»

Comme nous pouvons voir d'après la figure 6, l'introduction de l'imperméabilité réduit le gradient de sursaturation autorisé. Mais quelles sont les conséquences pratiques de tout ceci ? Ce qui est important est que les bulles se font comprimer pendant la descente. Plus la compression est rapide, mieux cela vaut, car les noyaux de gaz de taille réduits supporteront une sursaturation plus élevée avant de croître, ce qui en pratique donne plus de marge avant de développer des « bulles à problème ».

Enfin il faut se rappeler qu'à la différence des modèles néo-Haldanien, les gradients de sursaturation de VPM (et donc les M-Values) dépendent de la compression initiale des bulles. Cette relation est négligeable dans le cas des plongées normales, mais deviendra importante pour planifier des plongées multi niveaux. Effectuer la partie « profonde » d'un plongée multi niveaux en début de plongée donnera une plus forte compression initiale des noyaux et donc raccourcira la décompression, ou la rendra plus sûre si on conserve le même profil.

Pour VPM (et les modèles dérivés) le paramètre qui contrôle le début de la phase imperméable s'appelle (et quoi d'autre ?) « gradient de début d'imperméabilité ». Une réduction de sa valeur donne des programmes de décompression plus conservateurs pour les plongées profondes, bien que les différences ne soient pas très importantes, vu que les compartiments lents contrôlant les paliers peu profonds (et prolongés) sont relativement insensibles aux variations de ce paramètre.

La relation entre la pression de réduction appliquée aux noyaux de gaz et les gradients permis de sursaturation postulés par VPM a beaucoup d'implications pratiques. D'abord il explique dans une certaine mesure la théorie de Haldane sur le rapport de pression. Puisque les noyaux sont plus écrasés pendant des plongées profondes, les sursaturations initiales permises sont aussi plus élevées et donc un plongeur peut remonter à une profondeur relativement faible après une plongée profond ([2]).

Une autre observation intéressante est que dans VPM, à la différence des modèles néo-Haldanien, les niveaux de sursaturation permis pour les compartiments rapides sont

inférieurs à ceux permis aux compartiments lents. Ceci a des conséquences importantes sur la courbe de décompression : les premiers paliers de décompression sont nécessairement profonds et les paliers peu profonds seront moins longs. Les paliers profonds que l'on a dû introduire par des facteurs de correction dans le cas de l'algorithme de Buhlmann, viennent naturellement dans VPM.

Ceci explique également pourquoi les plongées profondes au trimix ont des programmes de décompression plus courts en utilisant VPM (ou VPM-B en l'occurrence) qu'avec Buhlmann, même modifié avec des facteurs de gradient. La compression des noyaux de gaz pendant la descente augmente la sursaturation permise pendant la décompression et les paliers peu profonds, de longue durée selon ZHL16, sont ainsi plus courts sous VPM.

HYPOTHÈSE DU VOLUME CRITIQUE

On note que les décompressions calculées en utilisant la méthode décrite jusqu'ici tendent à être trop conservatrices pour des plongées courtes et peu profondes. Pour surmonter ce problème le professeur Yount a adopté l'hypothèse du volume critique développée par Hempleman et Hennessy. Cette hypothèse postule qu'un critère fondamental limitant la décompression est le produit du gradient et du temps de décompression. En termes mathématiques elle est exprimée comme l'intégrale dans le temps du gradient de sursaturation, ce qui en pratique signifie que des décompressions « courtes » peuvent être exécuté plus agressivement.

Pour illustrer comment agit l'algorithme de volume critiques (CVA), la figure 7 illustre deux profils différents de décompression pour le même plongée, calculés avec et sans CVA. Les programmes de décompression utilisant le CVA initialisent leurs calculs avec un premier profil de décompression conservateur et par itération calculent une série de profils plus agressifs jusqu'à ce qu'ils ne se raccourcissent plus, ou pour un théoricien, jusqu'à ce que le « volume de phase » converge.

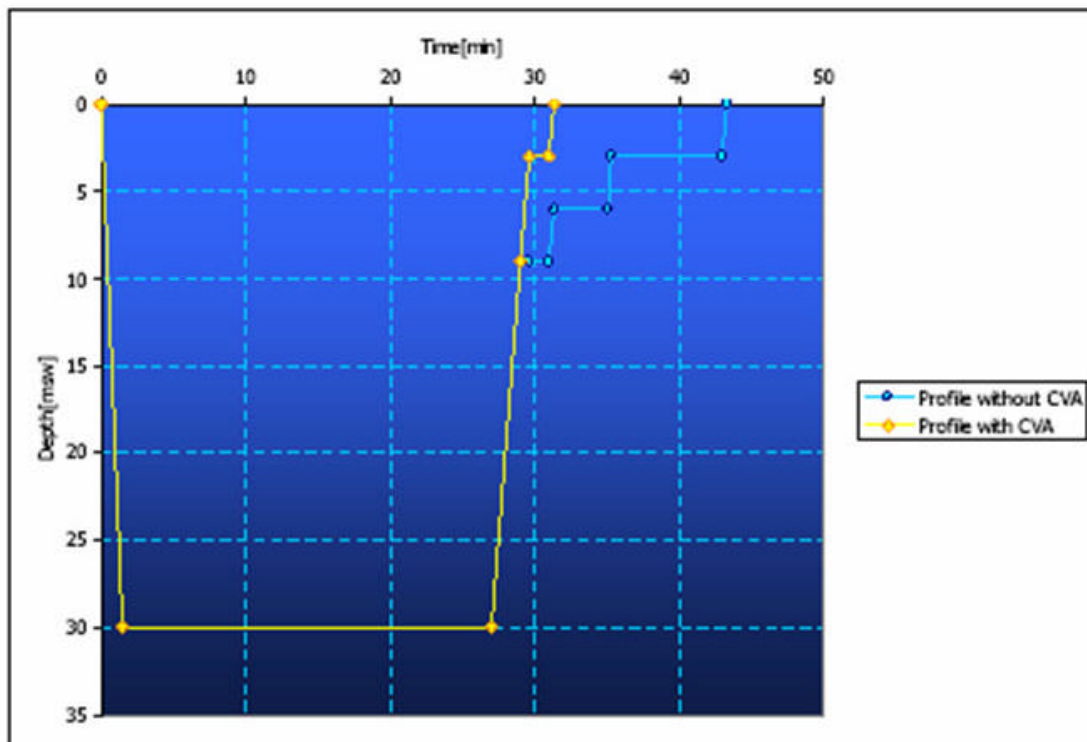


Figure 7 : profils de Décompression pour 27 min à 30 m au Nitrox EAN35

Dans la plupart des programmes basés sur VPM vous pouvez observer les différences entre des profils de décompression calculés avec et sans CVA en sélectionnant, ou pas, cette option. Bien que l'algorithme du volume critique joue principalement pour des plongées (relativement) courtes et/ou peu profondes, il y a des cas cependant où il est aussi bien approprié à des plongées TEK.

Quand la décompression est planifiée avec un ou plusieurs mélanges de décompression, la perte d'un mélange demandera de plus longs paliers et ceci à son tour peut mener (à cause de CVA) à des gradients de sursaturation limite moins élevés. Ces gradients moins élevés à leur tour peuvent faire commencer la décompression plus bas et allonger les paliers profonds. Ceci est particulièrement gênant dans le calcul de tables de secours : un plongeur qui découvre à 6m/20ft que son Oxygène de décompression n'est pas disponible (pour quelque raison que ce soit) risque de découvrir également que dans ce cas de figure il aurait dû commencer sa décompression à 9m/30ft et qu'il a déjà sauté un certain temps de palier. Heureusement dans la majorité de cas les écarts sont mineurs, et le plan de secours peut être laissé à l'initiative du plongeur.

VPM ET PLONGÉE REPETITIVES

Tous les modèles néo-Haldaniens de décompression calculent l'azote résiduel (et/ou autres gaz inertes) entre les plongées et, à partir de l'intervalle, calculent la tension initiale des compartiments pour les plongées répétitives. Généralement ces tensions seront supérieures à celles d'une première plongée, et donc les profils de décompression des plongées suivantes seront plus conservateurs que pour la première plongée de la série.

Dans le cas de VPM cependant, nous devons tenir compte d'un paramètre supplémentaire de décompression : la taille des noyaux de gaz. Tout le concept de VPM est le contrôle de la croissance des bulles de gaz, pour que seules celles plus grosses que le rayon critique se développent. Malheureusement le CVA, comme décrit plus haut, permettra souvent des gradients plus élevés que ceux calculés en utilisant des critères de croissance de bulle. Ceci mène à plus de bulles grossissantes, et donc le rayon critique pour des plongées répétitives doit être recalculé quand l'application du CVA mène à des gradients de sursaturation plus élevés. En pratique cela signifie que les plannings de décompression basés sur VPM pour des plongées répétitives seront plus conservateurs non seulement en raison des gaz inertes résiduels, mais également en raison d'une réduction des rayons critiques initiaux.

Il faut noter ici que la physique des plongées répétitives est l'un des plus grands mystères de la plongée. Comme l'a observé Wienke dans [3], on peut remarquer un certain degré d'adaptation à la décompression venant avec l'expérience chez les ouvriers travaillant en caisson : ceux qui sont nouveaux dans le métier sont plus exposés à un ADD. Ce phénomène pourrait être expliqué par la disparition d'une partie des noyaux de gaz, écrasés ou au contraire éliminés comme bulles pendant la décompression, des corps de ceux qui travaillent depuis un certain temps. Les expositions suivantes produisent moins de bulles et donc le volume de gaz libre, susceptible de causer un ADD, est réduit.

A contrario dans la plongée sportive on sait généralement que les plongeurs sont plus exposés aux ADD en participant à des séjours plongée sur plusieurs jours. La différence notable entre les deux est la longueur des intervalles et le nombre de plongées par jour.

Pour conclure il est impossible pour le moment de prévoir avec certitude le comportement de la population des noyaux de gaz après décompression. Le calcul de plannings de décompression sûrs pour des plongées répétitives reste donc un défi important.

VPM AVEC COMPENSATION DE LA LOI DE BOYLE-MARIOTTE (VPM-B)

VPM comme décrit jusqu'ici a révolutionné la plongée : d'abord directement en fournissant un modèle physique pour une panoplie de phénomènes observés empiriquement, il sert également de base pour le développement d'autres modèles (RGBM). Les profils de décompression produits par VPM ont été cependant perçus comme agressifs et dans quelques cas ont mené à un accident avec MDD. Pour cette raison Erik C. Baker en 2002 a modifié l'algorithme original VPM et a présenté une version utilisée aujourd'hui sous le nom de VPM-B. L'idée générale derrière cette modification était de limiter les gradients de surpression limite près la surface. Erik aurait pu employer son approche du facteur de gradient (GF) mais il a plutôt décidé de suivre la voie « scientifique » d'une réduction des gradients par « expansion » des noyaux de gaz selon la loi de Boyle-Mariotte.

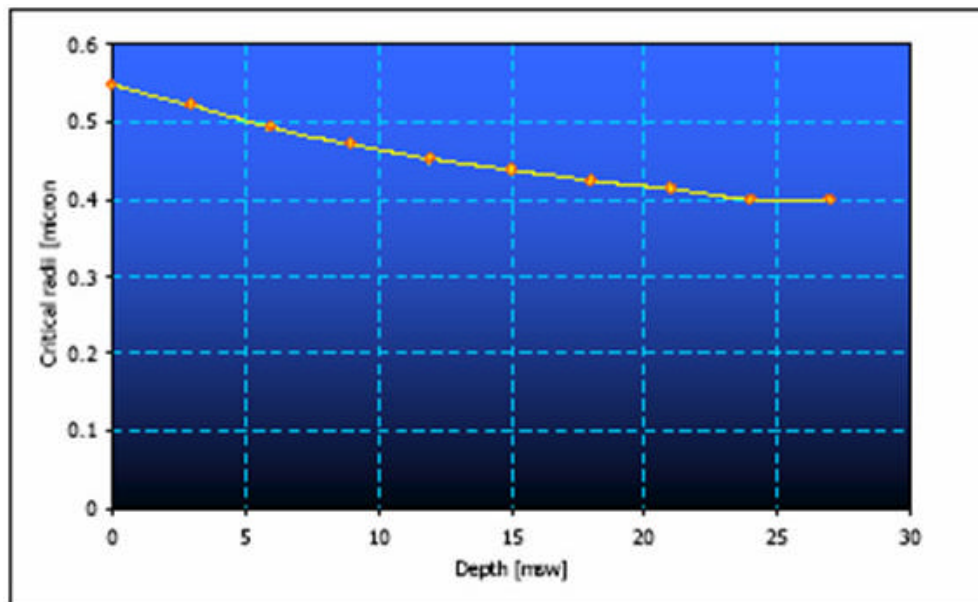


Figure 8 : Expansion des noyaux de gaz pendant la décompression (compartiment 5min, plongée 40 m à l'air) **NdT** : attention, cette courbe se lit de droite à gauche ...

L'idée générale était que les noyaux de gaz, comme des ballons remplis d'air, grossiront quand la pression ambiante (profondeur) diminue. Puisque les gradients de sursaturation limite sont liés à la taille de ces noyaux, ils diminueront aussi et les profils demanderont généralement des paliers plus longs près de la surface. Les graphiques suivants illustrent la réduction de la taille des noyaux de gaz (Figure 8), et la réduction correspondante du gradient de sursaturation (Figure 9).

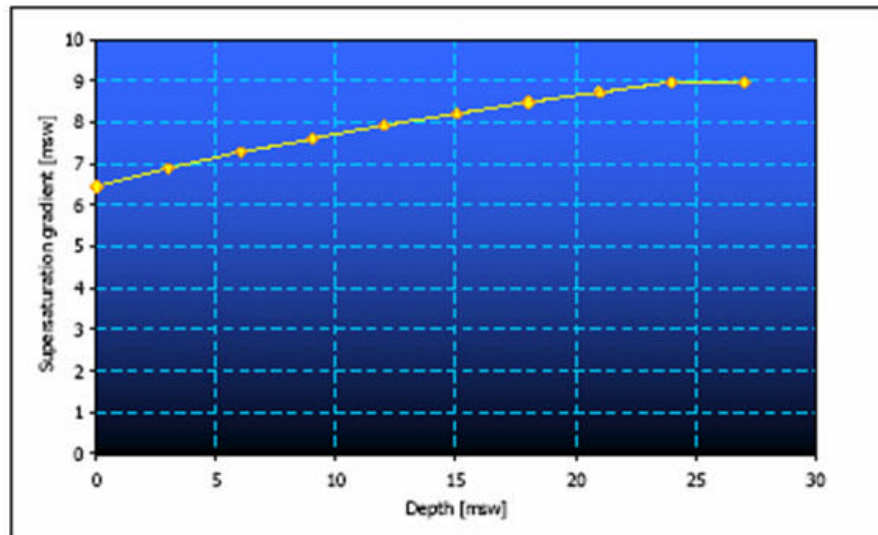


Figure 9 : Réduction du gradient de sursaturation limite pendant la décompression (compartiment 5min, plongée 40m à l'air) **NdT** : attention, cette courbe aussi se lit de droite à gauche ...

RÉSUMÉ

Actuellement VPM-B, dérivé de VPM, est l'un des algorithmes de décompression les plus populaires ; d'une part grâce à la disponibilité de logiciels à prix modiques et de l'autre parce qu'il produit des profils de décompression raisonnables. Mais la véritable importance de VPM ne tient pas tant à sa popularité, qu'au fait qu'il a enfin fourni un modèle théorique pour un grand nombre des phénomènes observés en décompression. Le modèle est peut-être imprécis, ou même insatisfaisant diront certains, mais c'est assurément une étape importante dans l'histoire des modèles de décompression.

PARAMÈTRES DE VPM-B

VPM et VPM-B sont régis par une poignée de paramètres décrits brièvement dans la table suivante :

Table 1 : paramètres VPM(B)

Nom du paramètre	Description	Tendance : si le paramètre augmente ...
Rayon critique initial	Le Rayon critique initial contrôle la taille des bulles et donc le niveau de sursaturation limite des compartiments. Comme on en utilise deux (un pour l'hélium et un pour l'azote) il est possible de permettre des sursaturations plus élevées pour les mélanges riches en hélium.	Décompression plus longue
Paramètre critique lambda de volume	Contrôle l' « algorithme de volume critique ». Essentiellement, il contrôle la « sévérité » de la décompression requise pour commencer l'abaissement des gradients de sursaturation.	Décompression plus longue
Pression des autres gaz	VPM tient compte de la présence des gaz métaboliques (CO ₂ , vapeur d'eau, etc.) qui contribuent à la croissance des bulles. Ce paramètre (disponible dans quelques programmes) contrôle la teneur des gaz métaboliques	Décompression plus longue

	dans le sang veineux.	
Constante de régénération	Contrôle le temps nécessaire aux noyaux écrasés pour retrouver leurs dimensions originales. Pertinent uniquement pour des plongées à saturation longues de plusieurs jours. En cas de plongées répétitives, contrôle à quelle vitesse les noyaux reprennent leur taille.	Décompression plus courte
Tensions superficielles (gamma et gamma c)	Contrôle le comportement des noyaux de gaz sous pression (contraction et croissance).	Décompression plus longue
Gradient pour le début de l'imperméabilité	Contrôle la profondeur à laquelle la peau des noyaux gazeux deviennent imperméables. Agit principalement pour les plongées profondes	Décompression plus courte

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier Joe Hesketh et Joao Delgado du groupe de bêta-testeurs de HL-Planner pour leur aide et les commentaires de valeur inestimable qui ont aidé à mettre en forme ce document.

Et le traducteur remercie chaleureusement Marcin Kaluza, qui non content de fournir un logiciel de décompression librement utilisable, le documente et soutient ses utilisateurs, ainsi que les relecteurs, en particulier Bertrand Laplace, Pierre Fages et Christian Monasse.

RÉFÉRENCES

- [1] E.C. Maiken (1995) Bubble Decompression Strategies {stratégies de décompression à bulles}
- [2] D.E. Yount (1988) Theoretical Considerations of safe decompression. {considérations théoriques sur une décompression sûre} Dans Y. Lin, d'A. Niu. eds Hyperbaric Medicine and Physiology. San Pedro, CA : Best Publishing Co. 1988
- [3] B. Wienke (2001) Technical Diving in Depth {plongées techniques profondes}, Flagstaff AZ : Best Publishing Co.
- [4]] C. Edmonds, C. Lowry, J. Pennefather, R. Walker (2005 Diving and Subaquatic Medicine) {médecine subaquatique et de plongée } 4^{ème} édition. Londres : Hodder Arnold.
- [5] E.B. Baker (2000) Derivation with Explanation of the VPM Dynamic Critical Volume Algorithm by Yount & Hoffman {dérivations et explication de VPM dynamique et l'algorithme de volume critique de Yount et Hoffman} (1986).
- [6] D.E. Yount, E.C. Maiken, E.B. Baker (1999) Implications of the Varying Permeability Model for Reverse Dive Profiles. {Implications du modèle de perméabilité variable pour des plongée à profils inversés}