

Calculs de décompression dans l'OSTC

Comment l'ordinateur de plongée OSTC calcule-t-il la durée limite sans palier et les paliers de décompression? Que sont les Facteurs de Gradient (GF) et comment affectent-ils ma décompression?



Copyright: heinrichs weikamp GmbH 2020
Text and Graphics: Ralph Lembcke and Matthias Heinrichs
Traduction française par Laurent Bardassier
Pictures: Heinrich Mattensen
Title: Jerzy Kowalczyk, www.underwaterpixel.com
Reproduction and duplication only with written permission from heinrichs weikamp

www.heinrichsweikamp.com

Les bases de la décompression

Que se passe-t-il pendant la plongée?

Commençons par une illustration simple (figure 1) : dans un grand récipient rempli d'eau se trouve un deuxième récipient plus petit avec une petite ouverture au fond. En raison d'une plus grande pression dans le grand récipient, l'eau coule du grand vers le petit récipient via le trou situé au fond de ce dernier. Plus la différence de pression est importante, plus la quantité d'eau passant par le trou sera importante par unité de temps. Le niveau de remplissage dans le petit récipient ressemblera à la figure 2 au fil du temps.

Plus le niveau de remplissage dans le petit récipient s'approche du niveau de remplissage du grand récipient, moins il y a de différence de pression et moins la quantité d'eau passant par le trou sera importante au fil du temps jusqu'à ce que le niveau soit finalement égal.

Si l'on soulève le petit récipient, une différence de pression se produit à nouveau, mais cette fois dans la direction opposée, puisque la colonne d'eau dans le petit récipient est maintenant plus élevée que le niveau d'eau dans le grand récipient. En conséquence, l'eau s'écoule du petit vers le grand récipient, au début rapidement quand la différence de pression est importante, puis de plus en plus lentement jusqu'à l'équilibre. Exactement comme dans le précédent exemple, mais de façon inversée (figure 3).

Quel est le rapport avec la plongée?

Le grand récipient correspond au milieu aquatique dans lequel nous plongeons. Le petit récipient correspond à notre corps. Le gaz que nous respirons dans le détent-

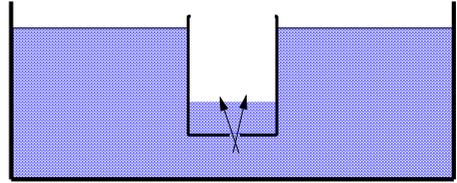


Figure 1

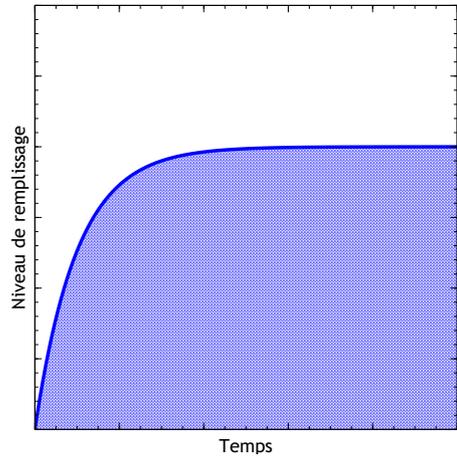


Figure 2

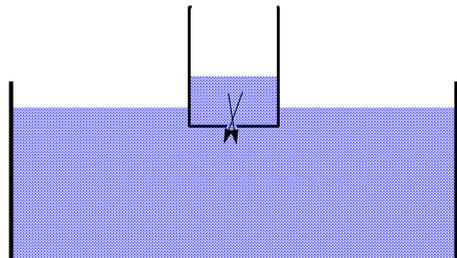


Figure 3

deur est à la même pression que l'eau qui nous entoure. Notre corps est constitué de liquide dans une large proportion, comme le petit récipient dans le modèle ci-dessus. Tout comme l'eau coule par l'ouverture du petit récipient, le gaz que nous respirons pendant la plongée coule dans nos poumons, passe dans la circulation sanguine et est distribué dans tous les tissus de notre corps.

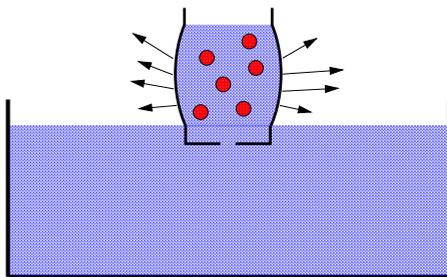


Figure 4

Tant que la pression de l'eau environnante, et donc la pression de gaz dans nos poumons, est supérieure à la pression dans nos tissus, le gaz dissous dans notre sang vient charger nos tissus. La pression dans nos tissus augmente, d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement, jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

Maintenant, si nous remontons vers la surface, la pression de l'environnement diminue. Elle est alors plus faible que la pression dans nos tissus corporels. Dès lors, le transport des gaz s'inverse : les tissus se déchargent des gaz dissous vers la circulation sanguine, les gaz reviennent à leur état gazeux dans les poumons pour être ensuite expirés.

Malheureusement, notre corps ne peut résister infiniment à la pression : si la pression dans nos tissus est trop élevée par rapport à la pression de l'environnement, les gaz stockés dans les tissus corporels ne restent plus sous forme dissoute et commencent à former des bulles de gaz sur place, ce qui peut conduire à un accident de décompression.

L'accident de décompression

Afin d'éviter un tel accident, nous devons nous assurer que la différence de pression entre nos tissus corporels et l'environnement ne devienne pas trop importante.

L'ampleur de cette différence de pression est étudiée depuis plus de 100 ans et de nombreux modèles de décompression ont été développés au fil du temps.

Ces modèles, qui ne sont que des formules mathématiques, déterminent la quantité de pression accumulée dans les tissus corporels en fonction de la profondeur et du temps d'immersion et tentent de calculer comment revenir vers la surface sans que le différentiel (gradient) de pression devienne trop important. C'est le « Temps sans décompression ».

Si nous restons immergés au fond plus longtemps que ce Temps sans décompression, nous pouvons utiliser ces modèles pour calculer la profondeur à laquelle nous devons nous arrêter en remontant pour éviter un différentiel de pression trop important. Durant cet arrêt, le « palier de décompression », le gaz dissous dans les tissus est continuellement éliminé de notre corps via la circulation sanguine, les poumons et nos expirations. Après un certain temps, une partie du gaz étant éliminé, la pression dans nos tissus baisse suffisamment pour que la remontée puisse continuer vers la surface ou vers un autre palier de décompression à une profondeur moindre.



Le modèle de décompression Bühlmann ZH-L16

L'ordinateur de plongée OSTC utilise le modèle conçu par le professeur suisse Albert A. Bühlmann, et plus précisément son modèle, le ZH-L16. C'est un modèle très largement utilisé. ZH correspond à Zurich, son lieu de travail, et 16 correspond au nombre de tissus calculés par le modèle.

16 Tissus

Contrairement à notre modèle simple avec un seul récipient qui représente notre corps (voir figure 1-3), Bühlmann a découvert que notre corps est en réalité plus complexe : au lieu d'une seule « ouverture » qui représente la quantité de gaz qui s'écoule dans le corps en fonction de la différence de pression, le modèle Bühlmann utilise jusqu'à 16 récipients pour reproduire ce qui se passe dans notre corps. Chacun de ces 16 récipients, appelés « tissus », possède une ouverture de taille différente, de sorte que pour un même écart de pression, différentes quantités de gaz entrent ou sortent de chaque tissu. Le tissu numéro 1 est le plus rapide pour égaliser sa pression avec la pression ambiante, le tissu numéro 16 est le plus lent (figure 5).

Les Demi-vies

Dans le modèle, ces différentes durées né-

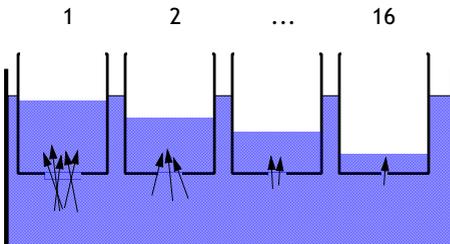


Figure 5

cessaires pour égaliser la pression sont appelées « demi-vies ». Au bout d'une demi-vie, la différence de pression est réduite de moitié entre le tissu et le milieu ambiant. Après deux demi-vies, la différence a de nouveau diminué de moitié, à un quart, et ainsi de suite. Ceci s'applique de la même

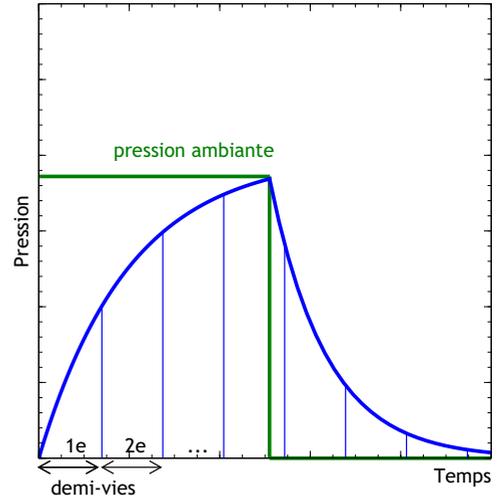


Figure 6

manière lorsque le gaz pénètre dans les tissus que lorsqu'il les quitte (figure 6).

Les Tissus rapides et lents

Dans le modèle Bühlmann ZH-L16, le tissu le plus rapide a une demi-vie de 4 minutes, le tissu le plus lent de 635 minutes, soit plus de 10 heures. Comme nous ne plongeons généralement pas pendant plusieurs heures, les tissus à longue demi-vie, dits « lents », absorberont peu de gaz, et de toute manière, pas plus de la moitié de la différence pour s'équilibrer avec la pression de l'eau à la profondeur de fond. D'autre part,

le tissu le plus rapide avec une demi-vie de 4 minutes et le deuxième tissu le plus rapide avec 8 minutes, atteignent souvent l'équi-

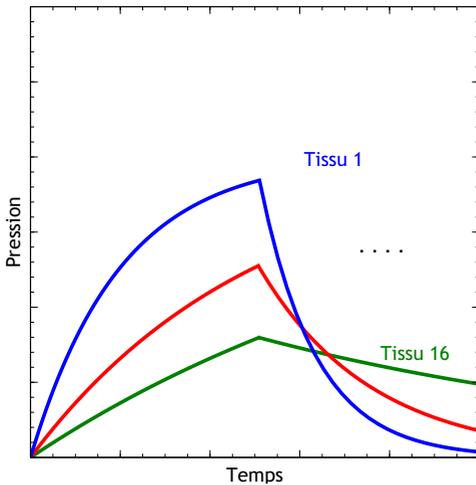


Figure 7

libre de pression avant que la remontée débute. Ainsi, la pression dans les tissus durant la plongée s'approchera de la figure 7.

Le Graphe des tissus sur l'OSTC

Les ordinateurs de plongée mesurent la pression de l'eau et calculent en continu les pressions dans les tissus en fonction des demi-vies. L'OSTC le fait toutes les deux secondes, vous pouvez suivre le résultat sur l'écran de plongée (figure 8).

Les barres sont disposées de haut en bas depuis les tissus rapides vers les tissus lents. Plus la barre est longue, plus la pression dans chaque tissu est élevée. La couleur des barres indique si un tissu est en train de d'augmenter sa saturation ou – lors de la remontée – de la réduire : les barres orange indiquent que la pression dans le tissu augmente, les barres turquoise indiquent que la pression diminue.

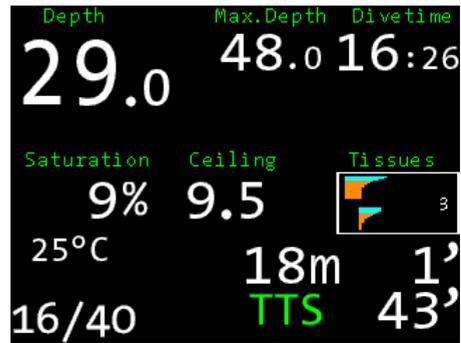


Figure 8

Temps sans décompression et palier de décompression

Comment le temps sans décompression ou la profondeur d'un palier de décompression sont-ils déterminés ? À l'aide de nombreuses expériences et études de terrain, Bühlmann a déterminé une « Surpression maximale admissible » pour chacun des 16 tissus modèles. Comme le médecin Robert D. Workman l'avait déjà découvert, cette Surpression maximale admissible n'est pas constante, mais dépend de la pression ambiante : plus on plonge profond (plus la pression de l'eau environnante est élevée), plus les tissus supportent de pression au-delà de la pression de l'eau environnante avant que les gaz dissous commencent à bouillonner sous forme de bulles.

Cela peut être illustré graphiquement dans un diagramme (figure 9). La ligne noire représente le point d'équilibre entre la pression d'un tissu et la pression ambiante. C'est la « Droite des pressions ambiantes ». En dessous de cette ligne, la pression dans le tissu est inférieure à la pression ambiante, le tissu se remplira et sa pression augmentera. Au-dessus de la ligne noire, la pression dans le tissu est supérieure à la pression de

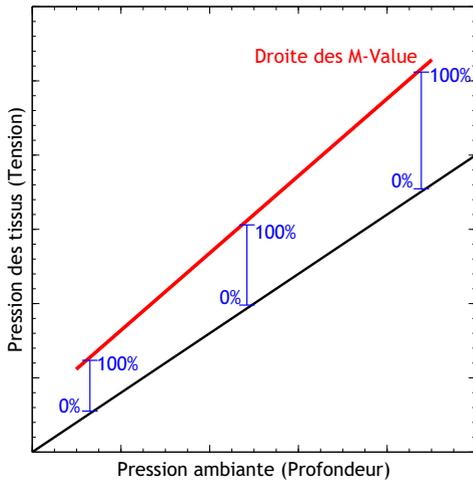


Figure 9

l'eau environnante, le tissu est dit « sursaturé ». Dans cet état, le tissu libère du gaz et sa pression diminue avec le temps en fonction de la demi-vie.

La Droite des M-Value

La ligne rouge indique la surpression maximale que le tissu peut supporter. Les échelles bleues mesurent la quantité de surpression dans le tissu. Comme on peut le voir, les échelles sont plus importantes quand la pression ambiante augmente, donc quand la profondeur augmente : le tissu tolère une plus grande surpression dans les grandes profondeurs que dans les faibles. Afin d'éviter un accident de décompression, la pression tissulaire doit toujours être inférieure ou égale à la ligne rouge, la « Droite des Valeurs Maximales » ou « Droite des M-Value ». Concrètement, la surpression tissulaire peut être indiquée par les échelles bleues en tant que valeur de pression (via l'échelle des unités) et en pourcentage entre la ligne noire (égale à 0%) et la ligne rouge (égale à 100%). S'il se situe au-delà de la ligne rouge, le résultat

est une valeur supérieure à 100%. S'il se situe en dessous de la ligne noire, la valeur de pourcentage n'est pas définie à proprement parler, mais est fixée à 0% par souci de simplification. Ce pourcentage mesure la sursaturation (relative) du tissu, c'est le « Taux de sursaturation ».

Toutefois, dans le modèle Bühlmann ZH-L16, il n'y a pas un mais 16 tissus. Chaque tissu possède sa propre Droite de M-Value

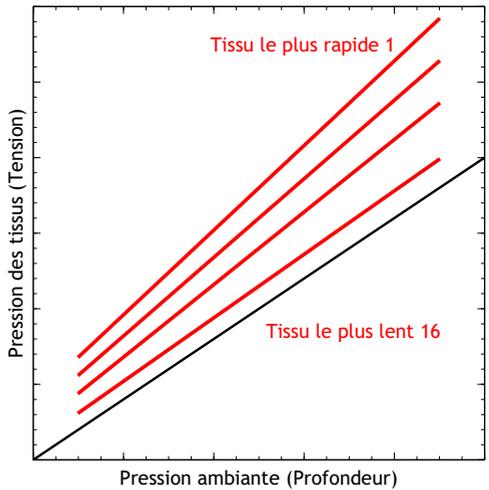


Figure 10

lue. Selon le modèle, les tissus « rapides » à demi-vie courte tolèrent nettement plus de surpression que les tissus « lents » à demi-vie plus longues. Par conséquent, les Droites de M-Value des tissus rapides sont plus élevées que les Droites de M-Value des tissus lents.

En raison des demi-vies différentes pendant la plongée, chaque tissu accumule une pression à sa propre vitesse et comme chaque tissu a des valeurs maximales différentes, qui dépendent de la profondeur, chaque tissu a son propre Taux de sursaturation à tout moment.

Le Tissu directeur

Puisque tous les tissus doivent rester en dessous de leurs Droites de M-Value respectives, le tissu qui a le Taux de sursaturation le plus élevé est le tissu qui détermine la limite sans palier ou la profondeur du palier de décompression. C'est ce qu'on appelle le « Tissu directeur ». Lorsque l'OSTC calcule les pressions dans les 16 tissus, il détermine également les Taux de sursaturation respectifs et affiche le Taux de sursaturation le plus élevé (saturation, figure 11).

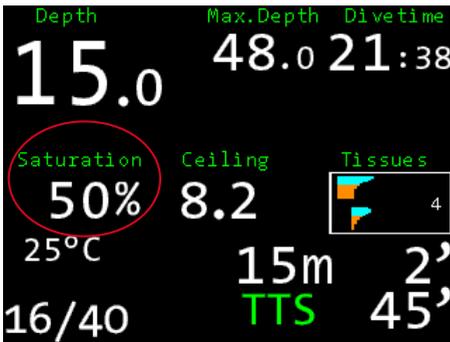


Figure 11

turation le plus élevé (saturation, figure 11).

Evolution du Tissu directeur

Le Tissu directeur évolue en cours de plongée. Au début, le Tissu directeur sera l'un des tissus rapides car ces derniers accumulent rapidement la pression. Cependant, comme ils relâchent la pression tout aussi rapidement et tolèrent également beaucoup de surpression, les tissus de plus en plus lents assumeront progressivement le rôle de Tissu directeur. Bien qu'ils aient accumulé peu de pression, ils ne pourront pas la libérer rapidement et toléreront également moins de surpression. L'OSTC indique le numéro du « Tissu directeur » via le chiffre indiqué dans le graphe de saturation des tissus (figure 12).

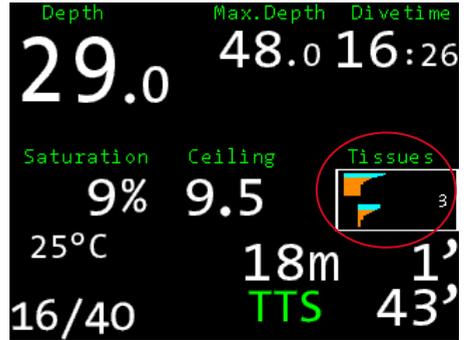


Figure 12

Le Plafond

Une autre valeur que l'OSTC calcule en permanence est le « plafond ». Le plafond est la profondeur à laquelle le premier tissu atteindra 100% de sursaturation. Tant que le plafond est à 0, vous pouvez retourner directement à la surface, vous êtes dans la limite sans décompression.

Si le plafond est supérieur à zéro, il indique la profondeur à laquelle vous devez vous arrêter pour laisser aux tissus le temps de libérer la pression, ce qui permet de diminuer la profondeur du prochain plafond vers lequel vous pouvez ensuite remonter. Jusqu'à ce que le plafond devienne finalement nul et vous permette de revenir en surface.

A partir de ces éléments de connaissance, vous n'avez rien d'autre à faire que de plonger de telle manière que le Taux de sursaturation affiché ne soit pas supérieur à 100% ou que vous soyez toujours plus profond que le plafond indiqué et que vous ne remontiez jamais à plus de 10 mètres par minute (c'est une des données de base du modèle). Ainsi, vous plongez dans les bornes du modèle de décompression de Bühlmann, c'est-à-dire dans la zone où, selon le modèle, la probabilité de subir un accident de décompression est très faible.

Les Facteurs de risques personnels

Pourquoi « très faible » seulement ? En fait, le modèle Bühlmann ZH-L16 est « seulement » un modèle de calculs, testé sur un large échantillon et pendant de nombreuses années, mais en fin de compte il ne sait rien de votre constitution physique personnelle, de la façon dont vous plongez et de nombreux autres facteurs. Il est, pour ainsi dire, calibré pour un plongeur « moyen ». Ainsi, même les Droites de M-Value décrites ci-dessus ne peuvent pas être considérées comme des frontières nettes entre les zones de surpressions trop élevées et celles de surpressions inoffensives. Il faut plutôt les considérer comme des zones de risque croissant de survenance d'un accident de décompression.

En plongeant de manière à rester en dessous des Droites de M-Value, c'est-à-dire en dessous d'un Taux de sursaturation de 100% ou en restant toujours légèrement inférieure à la profondeur du plafond calculée selon le modèle, vous pouvez encore réduire le risque d'accident de décompression - au moins dans la mesure où les Facteurs de risque sont dans la sphère d'influence du modèle. Les ordinateurs de plongée vous accompagnent en vous permettant d'inclure des facteurs de sécurisation pour le calcul du Temps sans décompression et pour les profondeurs et durées des paliers de décompression. L'ordinateur de plongée OSTC offre la possibilité de définir deux types de facteurs de sécurisation, que vous pouvez activer individuellement ou ensemble : les Facteurs de saturation et les Facteurs de Gradient (GF)

Les Facteurs de saturation

Avec les Facteurs de saturation, sous forme de deux pourcentages, vous influencez

les demi-vies du modèle. Le couple 100% / 100% correspond au modèle original de Bühlmann ZH-L16. Si le Facteur de saturation est défini avec un taux supérieur à 100%, le modèle calculera une augmentation plus rapide des tissus. Pour un Facteur de saturation de 110%, par exemple, les pressions tissulaires calculées augmenteront de 10% plus rapidement qu'avec le modèle originel.

Cela signifie que toutes les autres valeurs calculées et déterminées à partir des pressions tissulaires sont « en avance sur le temps », c'est-à-dire que les pressions tissulaires sont artificiellement augmentées, les valeurs de sursaturation sont surestimées et le temps sans décompression est raccourci. Avec un Facteur de saturation supérieur à 100%, vous pouvez par exemple prendre en compte des plongées intenses au cours desquelles une activité physique accrue entraîne une augmentation du flux sanguin et donc un transfert de gaz plus important vers l'organisme.

La contrepartie du Facteur de saturation est le Facteur de désaturation. Ce Facteur a aussi un effet sur le calcul des demi-vies des tissus, mais contrairement au Facteur de saturation, l'effet intervient quand un tissu désature, c'est-à-dire réduit sa pression. Avec le Facteur de désaturation, vous pouvez ralentir artificiellement par calcul la réduction de pression, ce qui, de fait, augmente la sécurisation pendant la phase de remontée et la rend ainsi plus sécurisée. Par exemple, pour un réglage de 90%, les pressions tissulaires calculées diminueront 10% plus lentement par rapport au modèle originel. Ce Facteur peut être utilisé pour prendre en compte les conditions qui peuvent ralentir le transport des gaz à partir

des tissus, comme le froid ou un IMC (indice de masse corporelle) défavorable.

Les Facteurs de Gradient (GF)

Les Facteurs de Gradient conçus par Erik C. Baker sont un autre moyen de sécuriser les calculs d'un ordinateur de plongée, dans le but d'obtenir des valeurs plus sécurisées pour le calcul du Temps sans décompression, la profondeur du plafond et tous les paliers de décompression. Ici aussi, la valeur est de 100% / 100% correspond au modèle original de Bühlmann ZH-L16. Les deux pourcentages sont appelés « GF Bas » et « GF Haut », le GF Bas est spécifié en premier, puis le GF Haut (par exemple : 50/85).

Le GF Haut

En fixant une valeur de GF Haut inférieure à 100%, nous réduisons la valeur maximale de surpression autorisée dans les tissus que l'OSTC utilise pour le calcul de la profondeur du plafond et de la limite sans décompression.

En termes simples : si vous définissez un GF Haut à 80%, la profondeur du plafond correspond à la profondeur à laquelle le Tissu directeur a une sursaturation de 80% de la valeur maximale prévue par le modèle Bühlman. De même, le temps sans décompression est calculé de telle manière qu'en atteignant la surface exactement à la fin du temps sans décompression, aucun tissu n'aura une sursaturation supérieure à 80%. Sans Facteur de Gradient, la sursaturation serait à 100%.

Le GF Bas

Si le temps sans décompression est dépassé, alors le GF Bas entre en jeu : la profondeur des premiers paliers de décompression est calculée de telle manière que, pour un palier donné, aucun tissu n'a un Taux de

sursaturation supérieur à la valeur du GF Bas. De plus, la profondeur du palier de décompression est arrondie au multiple de 3 mètres dans le sens de la plus grande profondeur - conformément à la tradition.

Le GF Haut

Limite le Taux de sursaturation maximale autorisé en atteignant la surface

Le GF Bas

Limite le Taux de sursaturation maximale autorisé à l'atteinte du premier palier de décompression

Décalage de la Droite de M-Value

Les Facteurs de Gradient agissent sur la Droite des M-Value de tous les tissus. Les Facteurs permettent de modifier la pente de la Droite des M-Value et de la rapprocher de la Droite des pressions ambiantes (ligne noire). Les Facteurs de Gradient permettent de réduire à la fois l'excès de surpression admissible aux grandes profondeurs et la surpression totale admissible.

Les Droites de M-Value du modèle original de Bühlmann correspondent à des Facteurs de Gradient de 100%. La Droite des pressions ambiantes correspond à des Facteurs de Gradient de 0%, ce qui n'autorise aucune sursaturation possible et donc aucune réduction de pression dans les tissus. Etant donné qu'avec un GF à 0%, les remontées sont pratiquement impossibles, un GF à 0% ne peut pas être choisi. Dans la plage de valeurs de 1 à 99%, les Droites des M-Value, utilisées par les calculs de l'OSTC, sont placées proportionnellement, selon la valeur des GF, entre la Droite des M-Value du modèle d'origine et la Droite des pressions ambiantes (figure 13).

Plus vous abaissez la Droite des M-Value, plus vous sécurisez le Tissu directeur. Tandis

que vous maintenez le Tissu directeur bien en dessous de sa sursaturation maximale possible, les tissus les plus lents n'ont sou-

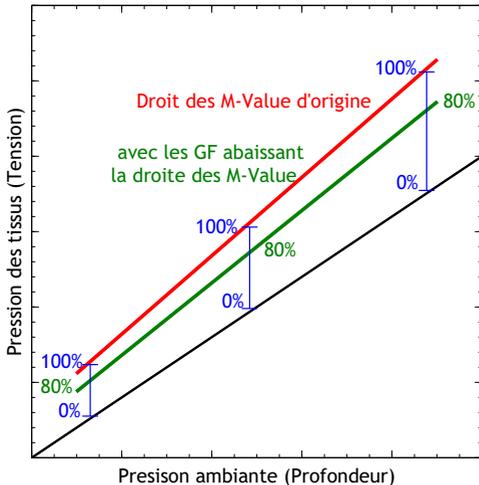


Figure 13

vent pas encore atteint l'équilibre de pression et continuent en réalité à saturer. Ainsi, pendant que vous protégez les tissus les plus rapides, les tissus les plus lents, qui tolèrent moins de surpression, continuent à saturer. Cela engendre inévitablement que les derniers paliers à faible profondeur, là où les tissus les plus lents commencent à peine à saturer, deviendront de plus en plus longs.

Si le GF Bas détermine la profondeur du premier palier de déco et le GF Haut l'accès à la surface, que se passe-t-il lors des paliers intermédiaires ? Il existe deux possibilités :

- Les valeurs du GF Bas et du GF Haut sont identiques : la durée des paliers est alors calculée de telle sorte qu'à la fin de chaque palier, la remontée jusqu'au palier suivant n'amènera aucun tissu au-dessus de la valeur de GF choisie pour la sursaturation.

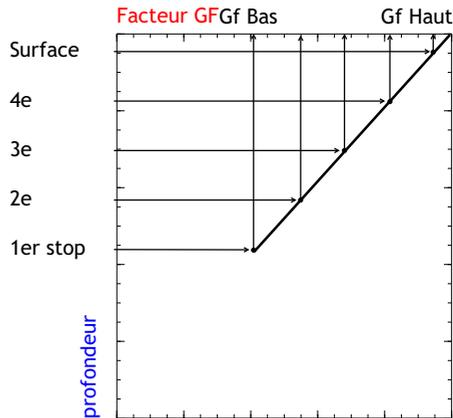


Figure 14

- Les valeurs de GF Bas et du GF Haut sont différentes : dans ce cas, différentes valeurs de sursaturation maximale sont appliquées pour chaque profondeur de palier, moyennées linéairement entre GF Bas / GF Haut et la profondeur des paliers.

La règle suivante doit toujours être appliquée : $GF\ Bas \leq GF\ Haut$ (figure 14).

Pourquoi et quand laisser un ordinateur de plongée calculer un Facteur de Gradient légèrement différent à chaque palier de décompression ?

Dans la description des Droites de M-Value, il a été écrit que les tissus tolèrent une surpression plus élevée à une pression ambiante plus élevée. La pression dans les tissus est causée par le gaz dissous en eux. Tant que vous plongez avec de l'Air ou du Nitrox, ce gaz est de l'azote. Bien que l'Air et surtout le Nitrox contiennent non seulement de l'azote mais aussi de l'oxygène, qui bien sûr est également transporté dans les tissus de votre corps, l'oxygène ne s'y accumule pas car il est constamment consommé.

mé par le métabolisme de votre corps. Ainsi, le modèle classique de Bühlmann calcule les saturations et les pressions tissulaires maximales admissibles avec les demi-vies et les Droites de M-Value de l'azote.

Calcul avec un mélange Trimix

Aujourd'hui, de plus en plus de plongeurs utilisent non seulement les gaz Air et Nitrox, mais aussi le « Trimix », mélange d'oxygène, d'azote et d'hélium. Tout comme l'azote, l'hélium n'est pas consommé par le corps humain, il s'accumule donc dans les tissus en plus de l'azote et contribue à l'augmentation de la pression dans ces tissus.

L'hélium est un gaz très léger, dont les molécules sont beaucoup plus petites que celles de l'azote, et le rapport entre la quantité de gaz dissous dans le tissu et l'augmentation de pression qui en résulte est différent de celui de l'azote. Par conséquent, les demi-vies et les Droites de M-Value de l'azote ne s'appliquent pas à l'hélium. En fait, pour l'hélium, il existe un deuxième jeu de demi-vies et un deuxième jeu de Droites de M-Value avec lesquels l'ordinateur de plongée calcule le comportement de l'hélium dans les tissus et combine les résultats avec ceux de l'azote.

Contrairement aux demi-vies et aux Droites de M-Value de l'azote, celles de l'hélium n'ont pas été testées de manière aussi approfondie - en fait, elles sont plutôt dérivées mathématiquement de celles de l'azote en proportionnant les propriétés physiques.

Les plongeurs techniques actuels montrent qu'actuellement, l'hypothèse selon laquelle les tissus pouvaient tolérer une sursaturation plus élevée à une pression ambiante plus élevée n'est pas aussi vraie pour l'hélium que pour l'azote, de sorte que les

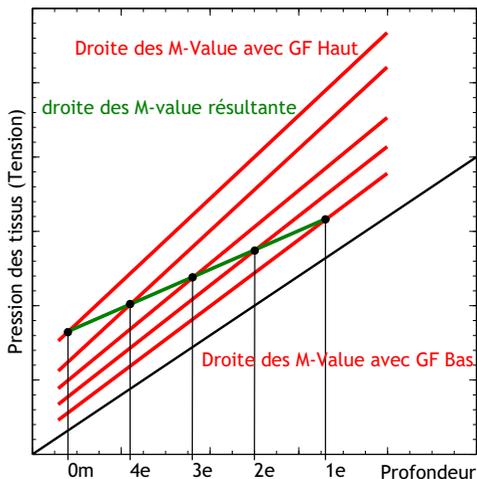


Figure 15

Droites de M-Value pour l'hélium sont devenues trop excessives dans la modélisation mathématique. Précisément, cela est compensé dans les plongées techniques utilisant des gaz respiratoires Trimix, dans lesquelles la surpression autorisée est réduite pour le premier palier via le GF Bas et est ensuite régulièrement augmentée étape par étape dans la direction du GF Haut (figure 15).



Une requête pour conclure

Les ordinateurs de plongée OSTC n'ont pas de « Mode Erreur », ils ne s'éteignent pas même en cas de violations flagrantes du modèle Bühlmann et n'ont pas d'extensions secrètes du modèle qui impactent les calculs de manière inexplicée. Si les limites du modèle Bühlmann sont dépassées, cela sera affiché, mais l'OSTC continuera à calculer le modèle uniquement de la manière décrite ici afin de vous fournir des données supplémentaires de manière compréhensible.

Cependant, un ordinateur de plongée n'est qu'un appareil technique suivant des règles programmées. En tant que tel, il ne peut et ne doit être qu'un outil qui vous aide à prendre des décisions. Ne faites jamais confiance aveuglément aux chiffres et aux indications qu'il peut afficher. Vous devez comprendre ce qui se passe pendant votre plongée afin de pouvoir sortir de votre plongée en toute sécurité, même en cas de dysfonctionnements ou de pannes qui ne peuvent jamais être complètement exclus.



www.heinrichsweikamp.com