

# Clarifier la confusion régnant autour des 'paliers profonds'

Par Erik C. Baker

(traduit de l'anglais par Jean-Marc Belin: [jmbelin@ifrance.com](mailto:jmbelin@ifrance.com))

Le vieil adage 'mieux vaut prévenir que guérir' est certainement applicable aux divers symptômes de la maladie de la décompression (MDD). Pour toutes ces maladies, le meilleur des traitements est tout d'abord d'adopter un profil de décompression suffisant. Les plongeurs Tek ont observé que de nombreux troubles peuvent être évités en incluant des 'paliers profonds' dans leurs profils. En examinant les modèles de décompression de plus près, on s'aperçoit que cette pratique sert à réduire ou éliminer les gradients de surpression excessifs. Sachant cela, le modèle peut être modifié pour permettre un contrôle précis de ces gradients. Ainsi, des paliers profonds peuvent être calculés pour rentrer dans la zone de décompression à la profondeur correspondant au palier de décompression le plus profond possible.

**Note** : *pour plus d'information sur les concepts de décompression ainsi que sur la terminologie employée ici, les lecteurs se référeront à un article précédent du même auteur, 'comprendre les M-values,' Immersed, vol. 3, n°3, automne 1998.*

De nombreux plongeurs Tek ont constaté une certaine fatigue, malaise ou somnolence au retour de certains types de plongées avec décompression. La plongée 'rebond' qui est caractérisée par une profondeur relativement importante et un temps passé au fond assez court, produit souvent de tels symptômes. Pour ce type de plongée, les modèles conventionnels de décompression des gaz dissous génèrent un premier palier qui est à une profondeur bien inférieure à la profondeur fond. Plusieurs plongeurs ont rapporté que s'ils ajoutaient des 'paliers profonds' dans leur profils (plus profonds que ce que les calculs conventionnels appellent paliers profonds), alors les symptômes post-plongée sont énormément réduits, voir éliminés. Source de confusion et de controverse au sein des plongeurs tek, reste la question de savoir à quelle profondeur devraient se situer ces paliers profonds et combien de ces paliers devrait-on faire.

Les observations empiriques des plongeurs ont amené au développement de méthodes arbitraires d'introduction des paliers profonds. Beaucoup de ces méthodes s'appuient sur un jugement individuel laissé à la discrétion de chacun plutôt que sur les bases de calcul de la décompression. Une

analyse complète des profils de décompression qui utilisent des paliers profonds arbitraires, révèle qu'ils sont source de problèmes potentiels. Ceci inclus les arrêts effectués trop profonds ainsi qu'un allongement inapproprié des derniers paliers pour compenser l'accroissement de la saturation causée par les paliers profonds.

## Calculs conventionnels

Dans le domaine de la décompression, que ce soit en théorie ou en pratique, il y a un compromis à trouver entre une décompression suffisante (pas de symptôme de MDD) et une décompression économique (minimum de temps au palier, de consommation de gaz, d'exposition, etc.). Les algorithmes conventionnels de gaz dissous, comme ceux développés par Robert D. Workman et Albert A. Bühlmann, cherchent à optimiser la décompression en permettant au plongeur de remonter jusqu'à la plus faible profondeur possible, ou plafond, basée sur la M-value qui limite la remontée pour ce compartiment (tissu). Il y a deux aspects économiques dans cette procédure : On accélère l'élimination des gaz des compartiments courts tandis qu'on minimise la charge qui continue de s'accumuler dans les gaz inertes des compartiments plus longs. Dans la pratique, nos plongeurs reçoivent une formation traditionnelle qui précise la manière de prendre en compte le facteur temps lorsqu'ils quittent le fond et remontent jusqu'au premier palier. Pour une plongée typique 'rebond', les calculs conventionnels

autorisent une remontée relativement longue à partir du fond jusqu'au premier palier. Dans ce scénario, les gaz inertes des compartiments courts arrivent ou s'approchent de la saturation lorsqu'on est au fond tandis que les compartiments longs ne sont que partiellement chargés. Ceci signifie que les compartiments courts contrôleront le début de la remontée car leur charge en gaz inerte sera proche de la M-value et ceci bien avant les compartiments plus lents. Le premier palier s'impose lorsque la charge en gaz inerte est égale ou proche de sa M-value.

## Bulles et gradients

Lorsque le concept de M-values fut présenté pour la première fois par le chercheur en décompression Robert D. Workman, on présumait que les gaz inertes ne sortaient pas de la solution sous forme de bulle, à moins qu'une M-value ne soit dépassée. Cette théorie a été depuis très controversée. Cependant, on reconnaissait que les technologies futures seraient capables de donner plus de précision sur la présence et le comportement des bulles dans le corps des plongeurs. Workmann savait que les méthodes de détection de bulles aux ultrasons, in vivo et in vitro, qu'on était en train d'explorer, allaient permettre une meilleure compréhension de la décompression, mais nous n'en étions qu'au début. Depuis, les technologies Doppler à ultrasons se sont développées et ont été massivement utilisées dans le monde, pour la recherche sur la décompression. Cette même recherche a montré qu'il y a présence de bulles dans la circulation sanguine, pendant et durant de nombreuses plongées de toute sorte, y compris celles ne présentant aucun symptôme de MDD. En d'autres termes, un plongeur n'a pas besoin de dépasser une M-value pour générer des bulles. Ce fait a été constaté dans l'étude de la décompression, mais le mécanisme de formation et d'évolution des bulles n'est toujours pas très bien compris ni défini précisément. Les lois physiques, ainsi que de nombreux modèles, prédisent qu'on peut s'attendre à avoir des bulles de plus en plus nombreuses et de plus en plus grosses avec l'augmentation du gradient de surpression. Dans le modèle de dissolution des gaz, ceci

signifie qu'il faut s'attendre à avoir plus de bulles lorsque la charge du compartiment en gaz inerte pointe plus loin au-dessus de la droite des pressions ambiantes, sur le graphe des pressions.

## Illustration du problème

Sur la figure 1, le graphe des pressions montre un profil de décompression complet, calculé avec une méthode conventionnelle. Dans ce profil, ce sont les compartiments courts qui sont le plus chargés au début de la remontée, ils sont donc directeurs. Les M-values associées à ces compartiments courts permettent un large écart de surpression par rapport aux compartiments plus lents. Par conséquent, il se crée un large et rapide gradient de surpression durant la remontée jusqu'au premier palier. Ceci est hors de proportion avec les gradients de surpression plus petits, autorisés durant le reste de la décompression, lorsque ce sont les compartiments plus longs qui assurent le contrôle. Il est vraisemblable que de nombreuses bulles soient générées durant l'ascension initiale jusqu'au premier palier. Dans notre cas, l'écart calculé correspond à 22,4 mètres d'eau de mer (msw) ou 73 pieds d'eau de mer (fsw). A titre de comparaison, lorsqu'on ouvre une boîte de soda, l'écart (gradient) de pression entre le gaz carbonique dissout et l'air ambiant est de l'ordre de 3,1 à 3,4 atmosphères. Dans le profil de décompression de la figure 1, bien qu'aucune M-value n'ait été dépassée, le plongeur pourrait ressentir des symptômes de fatigue, malaise ou somnolence après cette plongée. Les explications font appel à la théorie migratoire des bulles ainsi qu'au retard du dégazage causé par l'accumulation des bulles dans les capillaires pulmonaires. En tout cas, il est possible d'établir un lien de cause à effet entre un gradient de surpression important et des symptômes post plongée. Des symptômes vagues ou bénins comme la fatigue ou les malaises, qui normalement ne nécessitent aucun traitement médical, peuvent tomber dans la catégorie du stress de la décompression, une variante moins grave que la MDD.

## Les solutions du problème

La génération d'un large et/ou rapide gradient de surpression dans un profil de décompression, produira probablement plus de bulles qui mèneront à un stress de la décompression ou à une MDD. La solution de ce problème est évidente; Il s'agit de limiter l'amplitude des gradients de surpression. Les informations déjà contenues dans le modèle de décompression des gaz dissous peuvent être utilisées pour atteindre ce but. Tout d'abord, il y a une limite à la profondeur à laquelle un palier profond peut être fait. Le palier de décompression, associé à la charge en gaz du compartiment directeur, ne devrait pas être fait en dessous de la zone de décompression. Généralement, un gradient de surpression d'une certaine amplitude est nécessaire pour que se produise un dégazage effectif. Il est également important de minimiser la charge en gaz qui continue de s'accumuler dans les compartiments plus lents, pendant la décompression. Dans le contexte du modèle des gaz dissous et pour un profil donné, le palier de décompression le plus profond possible peut être défini comme étant la profondeur du prochain palier standard où la charge en gaz du compartiment directeur traverse la droite des pressions ambiantes (voir figure 1 à 3). Le palier le plus profond possible peut être facilement calculé dans un programme de décompression et il variera en fonction de la vitesse de remontée et du mélange utilisé. Un profil de décompression ne doit pas forcément inclure un palier à la plus grande profondeur possible. Cette profondeur représente simplement le point où au moins un compartiment se trouvera dans la zone de décompression. Dans de nombreux profils de décompression, un premier palier commençant quelques paliers standards au dessus du palier le plus profond possible, serait approprié pour contrôler les gradients de surpression excessifs. Cependant, le palier le plus profond possible est une information intéressante le plongeur car il représente le début de la zone de décompression. Lorsque au cours de sa remontée du fond, le plongeur atteindra ce point, il devrait ralentir sa vitesse de remontée dans la zone de décompression à 10m/mn ou moins. Cette pratique amoindrira

les changements rapides des gradients de surpression qui sont soupçonnés de provoquer l'apparition des bulles. Enfin, voici la façon pour introduire les paliers profonds. Une méthode de paliers profonds, déduite empiriquement, fut publiée par le biologiste marin et plongeur Richard L. Pyle. Elle est utilisée en concomitance avec un programme de décompression paramétrable fonctionnant sur ordinateur personnel. Un profil complet de décompression, utilisant la méthode Richard Pyle pour les paliers profonds, est décrit sur le graphe des pressions de la figure 2. Comparé aux profils calculés conventionnellement, le graphe indique que cette méthode est efficace lorsqu'il s'agit de réduire ou d'éliminer les gradients de surpression excessifs. Cependant, cette approche soulève des difficultés potentielles. Selon le programme de décompression utilisé et ses méthodes de conservatismes, la charge en gaz des compartiments longs peut s'approcher très près des M-values sur les derniers paliers, ceci est dû à l'accroissement de la charge causée par les paliers profonds. Le programme compensera pour les paliers profonds mais, à moins d'augmenter les facteurs de conservatisme, le programme n'assurera pas la même marge de sécurité pour les derniers paliers, contrairement à un profil conventionnel. Une bonne façon d'évaluer cela est de calculer le pourcentage maximum de M-value et le pourcentage de gradient des M-values pour chaque compartiment et pour chaque palier. Le graphe des pressions de la figure 3 montre un profil complet de décompression calculé en utilisant les facteurs de gradient pour contrôler les gradients de surpression tout au long du profil. Les facteurs de gradient proposent une approche logique du conservatisme dans les calculs de décompression. Ils peuvent être utilisés pour générer des paliers profonds à l'intérieur de la zone de décompression, contrôler les gradients de surpression et assurer une marge de sécurité prédéfinie à partir des M-values, tout au long du profil de décompression. Un facteur de gradient est simplement une fraction décimale de pourcentage de gradient de M-value (voir figure 4). La programmation de paliers profonds dans un profil, augmentera généralement la durée des derniers paliers

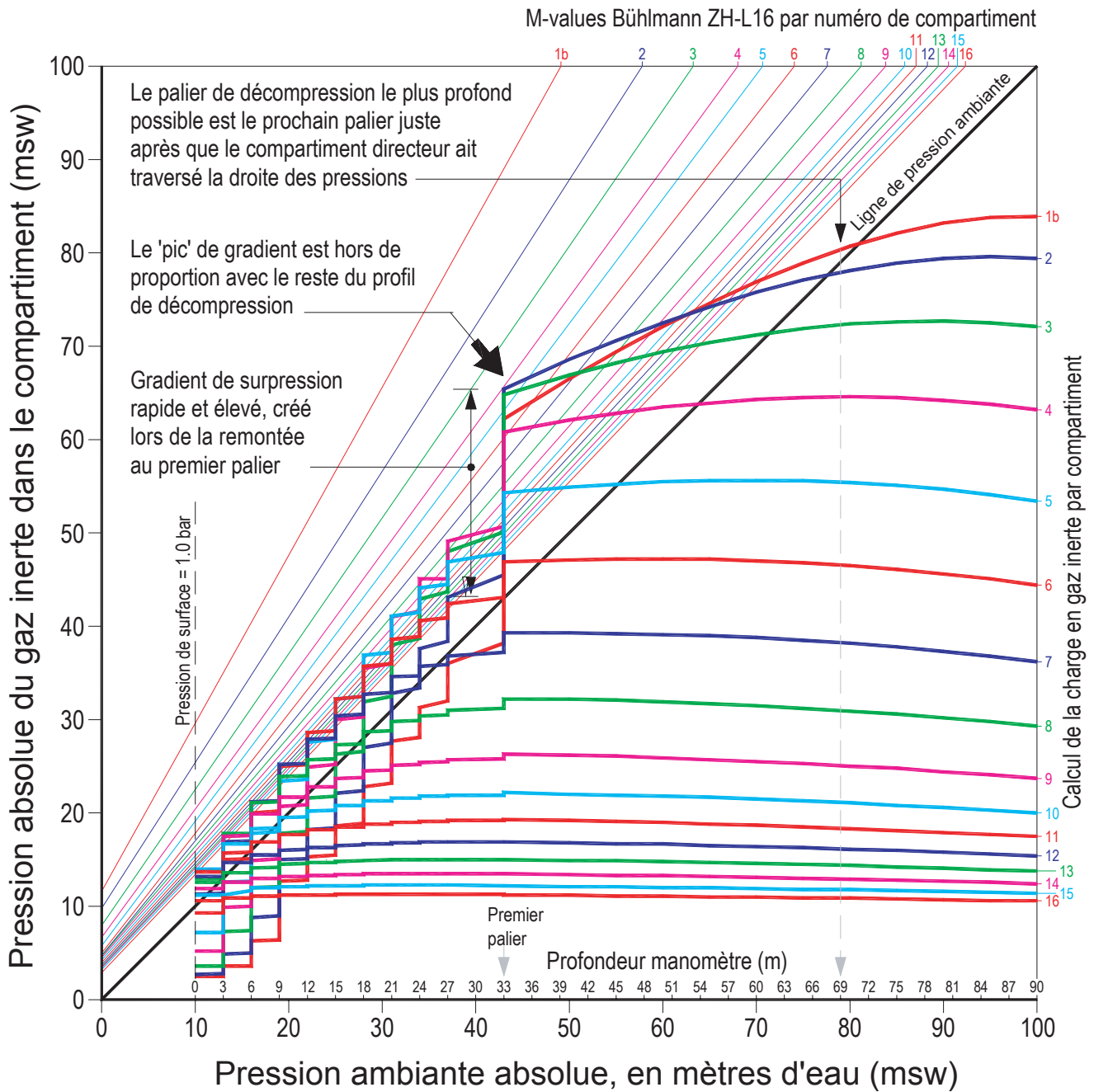
ainsi que le temps total de la décompression. Cependant, si le résultat est une décompression réellement efficace, le concept de décompression économique n'en est pas compromis pour autant. Le graphe des pressions est un excellent outil pour le plongeur qui veut évaluer son profil de décompression. Même un rapide coup d'œil permet d'identifier des zones de problèmes potentiels comme un large gradient de surpression. Les concepteurs et programmeurs sont vivement encouragés à introduire ces caractéristiques dans leurs logiciels. Pour terminer, notons que les exemples de profils de décompression utilisés dans cet article pour les graphes de pression, ont été calculés avec un conservatisme minimum et n'ont été établis que pour en faire des comparaisons.

*Erik C. Baker est ingénieur en électricité et possède une entreprise d'architecture / engineering en Pennsylvanie. Il a développé plusieurs logiciels informatiques pour améliorer sa sécurité lors des plongées mélanges et souterraines.*

## Références :

- Baker EC. 1998 Understanding M-values. Immersed. Vol. 3, N°3.
- Bennett PB, Elliott DH, eds. 1993. The Physiology and Medicine of diving. London: WB Saunders.
- Bühlmann, AA. 1984. Decompression-Decompression Sickness. Berlin: Springer-Verlag
- Bühlmann, AA. 1995. Tauchmedizin. Berlin: Springer-Verlag
- Hamilton RW, Roger RE, Powell MR, Vann RD. 194. Development and validation of no-stop decompression procedures for recreational diving: The DSAT Recreational Dive Planner. Santa Ana, CA. Diving Science and Technology Corp.
- Schreiner HR, 1968. Safe ascent after deep dives. Rev. Subaquat. Physiol. Hyperbar. Med. 1:28-37.
- Schreiner HR, Kelley PL. 1971. A pragmatic view of decompression. In: Lamberstsen CJ, ed. Underwater physiology IV. New York: Academic Press.
- Wienke BR. 1991. Basic decompression theory and applications. Flagstaff, AZ: Best.
- Wienke BR. 1994. Basic diving physics and applications. Flagstaff, AZ: Best.
- Workman RD. 1965. Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives. Research report 6-65. Washington: Navy Experimental Diving Unit.

# Graphe des pressions : profil d'une décompression complète utilisant une méthode de calcul conventionnelle



Notes:

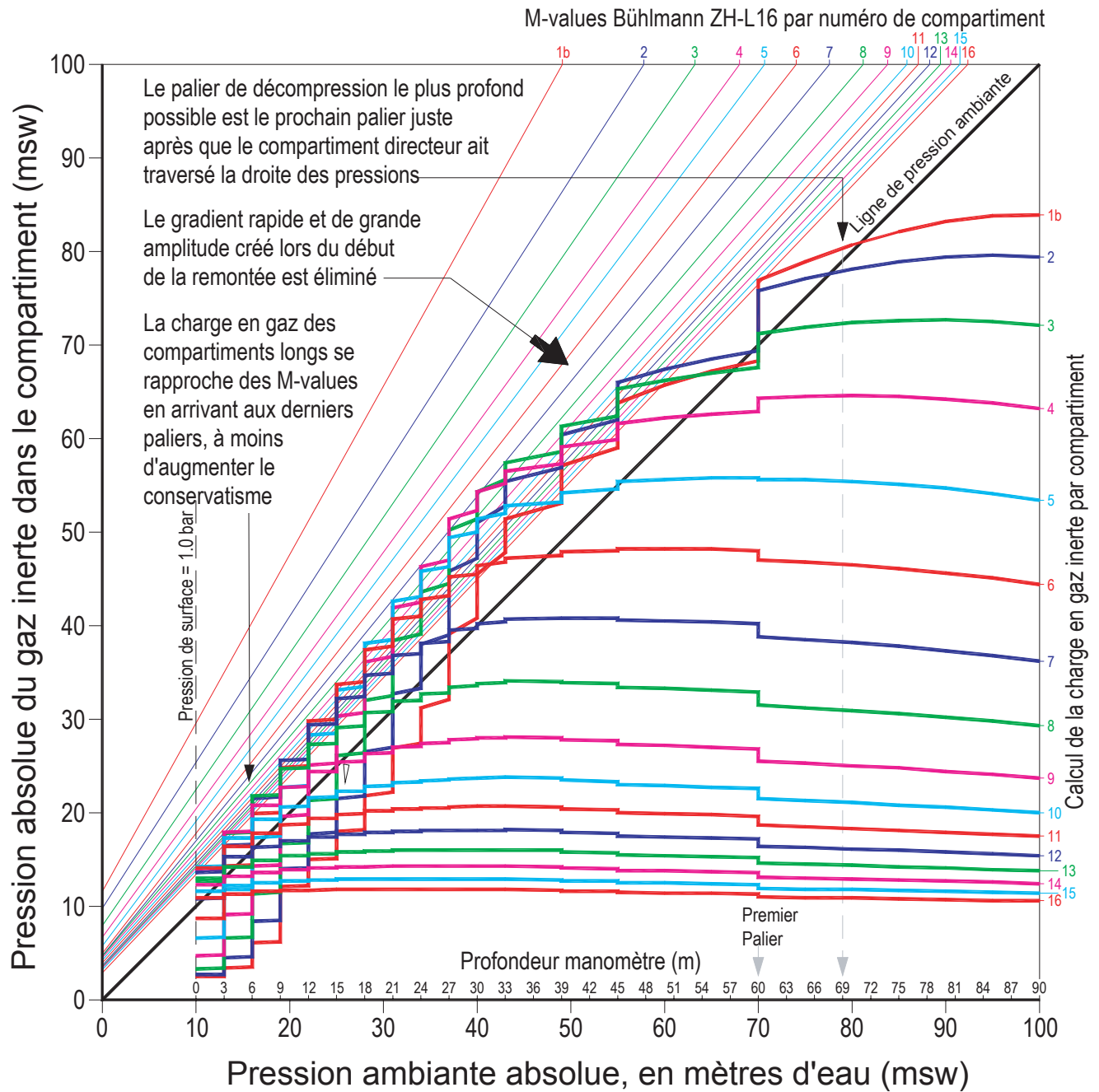
1. Plongée au Trimix 13/50 à 90m pour 20 minutes de fond.
2. Décompression aux mélanges :  
Nitrox 36% à partir de 33m  
Nitrox 50% à partir de 21m  
Nitrox 80% à partir de 9m
3. Facteur de conservatisme minimum (15%)
4. Vitesse de remontée à 10 m/min
5. Les courbes commencent lorsqu'on quitte le fond après 20 minutes de plongée
6. Le temps d'exécution est pris en fin de palier
7. Décompression type d'une plongée en 'rebond'

Table de décompression

Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)
33	29	15	45	0	100		
27	31	12	51				
24	33	9	60				
21	36	6	73				
18	40	3	99				

Figure 1

# Graphe des pressions : profil d'une décompression complète utilisant la méthode Richard Pyle pour les paliers profonds



Notes:

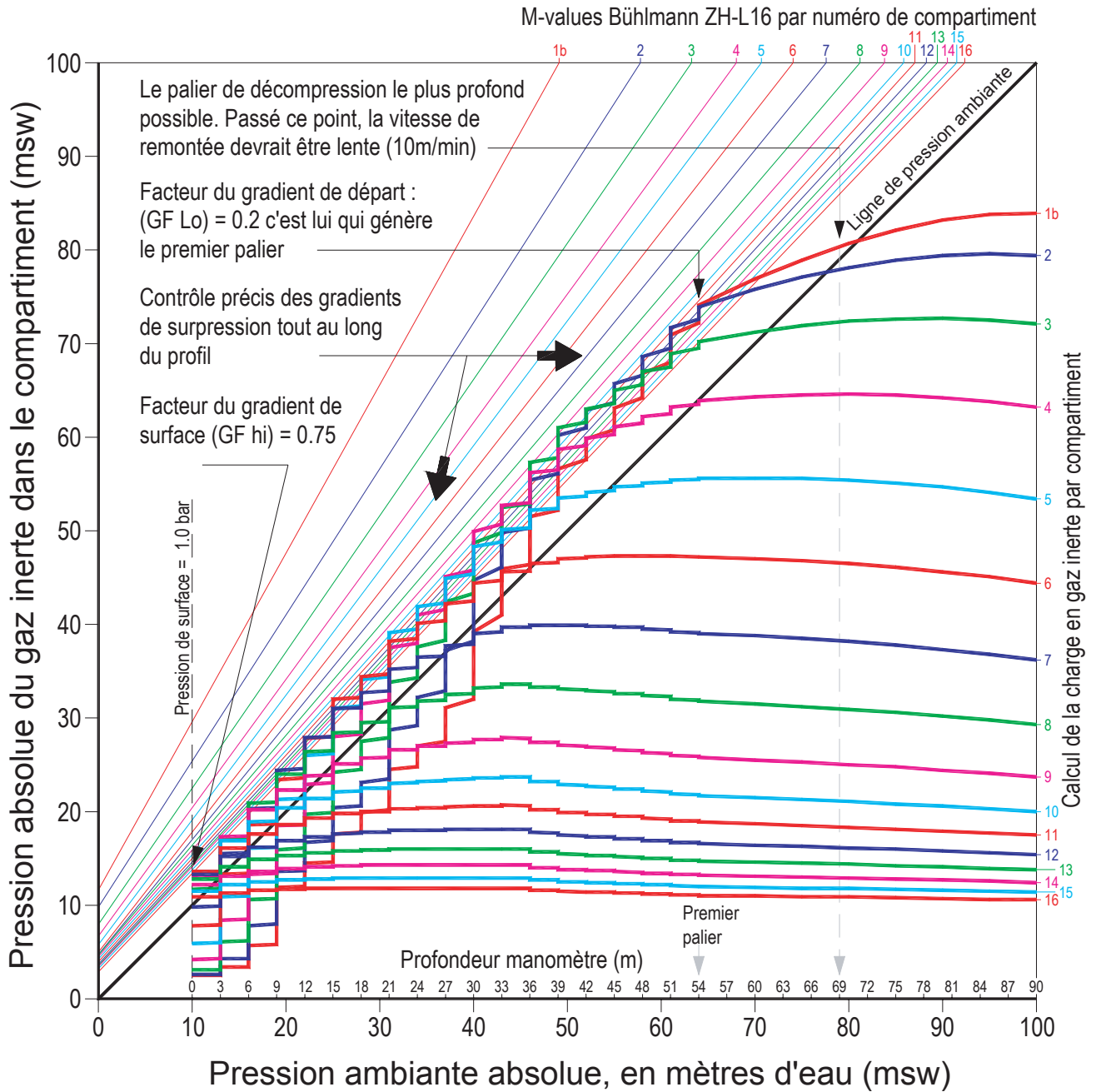
1. Plongée au Trimix 13/50 à 90m pour 20 minutes de fond.
2. Décompression aux mélanges : Nitrox 36% à partir de 33m Nitrox 50% à partir de 21m Nitrox 80% à partir de 9m
3. Facteur de conservatisme minimum (15%)
4. Vitesse de remontée de 10m/min
5. Les courbes commencent lorsqu'on quitte le fond après 20 minutes de plongée
6. Le temps d'exécution est pris en fin de palier
7. Les paliers profonds provoquent une surcharge des compartiments longs lorsqu'on arrive aux derniers paliers

Table de décompression

Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)
60	26	27	35	12	57		
45	29	24	37	9	66		
39	31	21	40	6	81		
33	32	18	44	3	109		
30	33	15	49	0	110		

Figure 2

# Graphe des pressions : profil d'une décompression complète utilisant les facteurs de gradient pour contrôler tout le profil



**Notes:**

1. Plongée au Trimix 13/50 à 90m pour 20 minutes de fond
2. Décompression aux mélanges : Nitrox 36% à partir de 33m Nitrox 50% à partir de 21m Nitrox 80% à partir de 9m
3. Facteur de conservatisme défini par les facteurs de gradient
4. Vitesse de remontée 10m/min
5. Les courbes commencent lorsqu'on quitte le fond après 20 minutes de plongée
6. Le temps d'exécution est pris en fin de palier
7. La proximité des charges de gaz avec les M-values est contrôlée par les facteurs de gradient

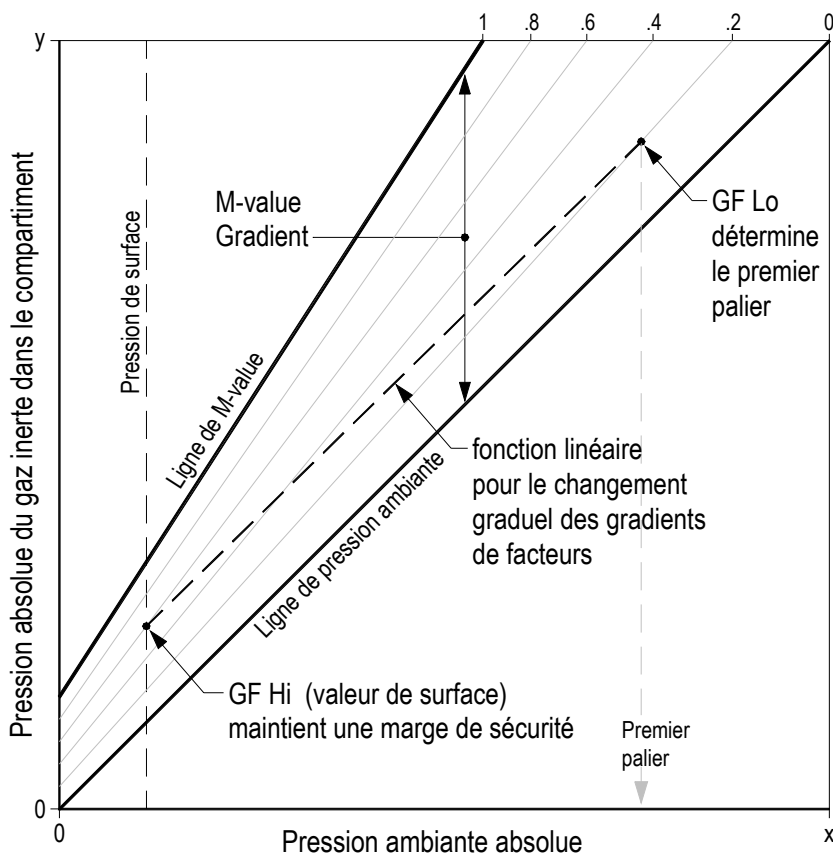
**Table de décompression**

Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)
54	24	39	30	24	40	9	71
51	25	36	33	21	44	6	87
48	26	33	34	18	47	3	119
45	27	30	36	15	53	0	120
42	28	27	38	12	61		

Figure 3



## Graphe des pressions : facteurs de gradient



Un facteur de gradient est simplement une fraction décimale (ou pourcentage) du gradient de M-value.

Les facteurs de gradient (GF) sont compris entre zéro et un.

Un facteur de gradient de zéro représente la droite des pressions ambiantes.

Un facteur de gradient de un représente la droite des M-values.

Les facteurs de gradient modifient l'équation initiale des M-values pour inclure le conservatisme à l'intérieur de la zone de décompression

La valeur du facteur de gradient le plus bas (GF Lo) détermine la profondeur du premier palier.

Il est prévu pour créer des paliers profonds à la profondeur des paliers les plus profonds possibles.

Les équations de M-values adaptées pour l'utilisation de facteurs de gradient (GF)

Equations de Workman :

$$M = \text{Prof.} \cdot (\Delta M \cdot GF - GF + 1) + (P_{sb} + GF \cdot (M_o - P_{sb}))$$

$$\text{Tol. Prof.} = [P - (P_{sb} + GF \cdot (M_o - P_{sb}))] / (\Delta M \cdot GF - GF + 1)$$

Equations de Bühlmann :

$$P_{t.\text{tol. i.g.}} = P_{\text{amb.}} \cdot (GF/b - GF + 1) + GF \cdot a$$

$$P_{\text{amb.tol.}} = (P_{t.\text{i.g.}} - GF \cdot a) / (GF/b - GF + 1)$$

Les facteurs de gradient peuvent être appliqués manuellement à chaque palier ou de manière automatique. Une simple fonction linéaire permet un changement graduel du facteur de gradient de la valeur de GF Lo jusqu'à celle de GF Hi.

$$GF \text{ pente} = \frac{GF \text{ Hi} - GF \text{ Lo}}{\text{Prof. Dernier Palier} - \text{Premier Palier}}$$

$$GF = GF \text{ pente} \cdot \text{Prof. Palier en Cours} + GF \text{ Hi}$$

### Avantages de la méthode des facteurs de gradient pour le conservatisme

- Peut-être utilisée pour créer des paliers profonds à la profondeur du "palier de décompression le plus profond possible"
- Les paliers de décompression, y compris les paliers profonds, seront toujours dans la zone de décompression
- Permet un contrôle précis des gradients de sursaturation, incluant un changement graduel des gradients du premier palier jusqu'à la surface.
- Modification mineure du modèle haldanien de décompression - facile à comprendre et appliquer
- Flexible - Les facteurs de gradient peuvent être appliqués à des individus différents et des profils de plongée variés.

Figure 4