

Eléments de calcul pour l'élaboration d'un logiciel de décompression

Par Jean-Marc Belin

A mon fils Fabien, 17 ans et niveau I, qui a calculé les équations et réalisé les graphiques

Note : Les bases de cet article proviennent essentiellement des travaux publiés par Erik Baker auxquels j'ai ajouté quelques explications supplémentaires. Cet article est donc la suite logique des deux précédentes traductions '*comprendre les M_values*' et '*Clarifier la confusion régnant autour des 'paliers profonds'*'.

Il ne s'agit donc pas de remettre en cause les travaux réalisés par les physiologistes comme Haldane, Workman ou Buhlmann, mais plutôt de s'appuyer sur leurs résultats pour construire une synthèse utilisable pour l'élaboration d'algorithmes informatiques.

Préambules (par Erik Baker)	2
Charge et décharge d'un gaz inerte	5
❖ équation 'Haldane' ou équation instantanée	5
❖ équation de Schreiner ou solution globale	5
❖ Unités employées	6
❖ Composition du gaz alvéolaire	8
❖ Exemple d'application chiffré :	9
Limites de remontée	13
❖ Les M_values	13
❖ Cas des MN90	15
❖ Conservatisme	20
❖ Cas particulier de la remontée sans palier	21
❖ Cas particulier du 'Do not fly'	23
Etablir le profil de décompression avec palier	24
Toxicité de l'oxygène	26
❖ Calculs de la toxicité pulmonaire de l'oxygène	28
❖ Calculs de la toxicité sur le système nerveux central (CNS)	30
Annexe : Coefficients Buhlmann	34

Préambules (par Erik Baker)

Avant tout, je crois que quiconque souhaitant s'engager dans la programmation d'un modèle de décompression, doit faire un minimum de recherche sur les notions fondamentales qui se cachent derrière ce modèle. Habituellement ceci signifie : le modèle de dissolution des gaz (Haldane) et ses variantes (Buhlmann et autres ...). Malheureusement, l'information nécessaire ne se trouve pas à un seul endroit, elle n'a été ni compilée ni regroupée de façon pratique. L'ouvrage publié par Buhlmann a été ce qui s'est le plus rapproché d'une référence universelle. Mais l'information reste incomplète, surtout si vous souhaitez programmer le modèle.

Les travaux de Buhlmann doivent être replacés dans le contexte historique d'où ils sont issus. Buhlmann n'a pas 'inventé' la plupart des concepts présentés dans son livre. Il reprit les travaux effectués par d'autres avant lui et affina le modèle (légèrement). Les éléments majeurs du modèle de dissolution des gaz furent développés par John S. Haldane, Robert D. Workman (U.S. Navy) et Heinz R. Schreiner (chercheur américain). Buhlmann s'appuya largement sur les travaux de Robert Workman et communiqua fréquemment avec Schreiner, en tant que collègue, à la fin des années 60 et aux début des années 70. Dans les premières années Bill Hamilton était un collaborateur de Schreiner.

Workman, Schreiner et Buhlmann sont aujourd'hui décédés.

Bill Hamilton est encore très actif dans ce domaine et il est sans doute une des meilleures sources actuelle pour tout ce qui touche à la décompression. Cependant, les éléments clés des modèles actuels de dissolution des gaz consistent en une poignée de documents de recherche, publiés il y a de nombreuses années. Ces documents recèlent le cœur fondamental du modèle et la manière de s'en servir. Ce sont ces informations que tout programmeur doit lire et connaître. Voir références ci-dessous :

1. Boycott, A.E., Damant, G.C.C., & Haldane, J.S. 'The prevention of compressed air illness' journal of Hygiene, Volume 8, (1908), pp. 342-443. (c'est l'ouvrage classique de Haldane et associés qui est à l'origine de la science de la décompression. Haldane nous amena de nombreux éléments (qui allèrent bien au-delà de son époque) ainsi que quelques suppositions erronées. Il y aurait beaucoup à dire sur la décompression des chèvres ! Cet article vaut toujours la peine d'être lu. De plus, c'est encore applicable aujourd'hui. Une ancienne copie du 'journal of Hygiene' Volume 8 de 1908 peut être dégotée dans la plupart des bibliothèques des principales universités, spécialement celles impliquées dans le domaine des sciences médicales).
2. Workman, Robert D. 'Calculation of Decompression Schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives,' Rapport de recherche 6-65, U.S. Navy Experimental Diving Unit, Washington, D.C, (26 mai 1965). Service (NTIS) ou une photocopie peut être demandée au Undersea & Hyperbaric Medical Society (UHMS)).
3. Shreiner, H.R., et Kelley, P.L. 'A pragmatic View of decompression,' Underwater Physiology : Relevant du quatrième congrès sur la physiologie sous-marine, éditée par C.J. Lambertsen. Academic Press, New York, (1971) pp. 205-219. (On peut se procurer cet article en trouvant le livre dans la plupart des bibliothèques des principales universités ou une photocopie peut être commandée à (UHMS).

La raison pour laquelle vous devriez lire les ouvrages cités ci-dessus, est qu'ils permettent la compréhension du contexte historique et du développement du modèle de gaz dissous, ce qui est nécessaire pour comprendre les outils développés par Buhlmann pour rendre le modèle effectif. Les points essentiels sont les suivants :

- ❖ Haldane établit le concept des différents 'tissus' compartiments à l'intérieur du corps dans lesquels la charge de gaz se comporte selon une loi exponentielle présente partout dans la nature. Haldane établit également le concept de critère limite de remontée. Dans son cas, c'était à travers les ratios de sursaturation.

- ❖ Workman utilisait les données issues de la recherche de l'U.S. Navy pour établir le concept des M_{values} comme critère limite de remontée. Elles sont exprimées sous la forme d'une relation linéaire entre la sursaturation tolérée dans les 'tissus' compartiments et la pression ambiante. Les M_{values} de Workman sont basées sur la pression partielle du gaz inerte en question, pas sur la pression totale du gaz respiré. Workman explique comment les compartiments ayant une période courte tolèrent une sursaturation plus importante que ceux ayant une période longue. Workman développa également une procédure de calcul détaillée qui est la fondation de celles employées aujourd'hui. Un peu plus tard, un collègue de Workman, William R. Braithwaite, modifia la procédure de Workman pour inclure le calcul 'de la pression ambiante tolérée', c'était le moyen de déterminer une 'tentative de premier palier'.

- ❖ Schreiner expliqua le modèle de décompression avec des termes d'éléments de physiologie actuels comme le transport des gaz du sang vers les tissus, solubilité des gaz dans les fluides du corps, pourcentage de graisse et composition des 'tissus' compartiments, et pressions partielles alvéolaires des gaz. Il établit un concept très important : la pression partielle totale des gaz inertes d'un compartiment est égale à la somme des pressions partielles de chaque gaz inerte présent dans le compartiment, même si ceux-ci ont des périodes différentes. Une autre contribution majeure que fit Schreiner est d'avoir résolu l'équation différentielle décrivant l'échange des gaz lorsque la pression ambiante varie de façon constante. C'est la solution générale de l'équation différentielle, dont l'équation instantanée n'est qu'une solution particulière. La solution générale permet de calculer directement la pression partielle en gaz inerte d'un compartiment, en fonction du temps (à condition que le taux de variation soit constant). Dans ce livre, il y a beaucoup d'autres éléments concernant la physiologie de la décompression y compris une méthode pour calculer la constante de la période, k .

Comme vous pouvez le voir, nombre des éléments clés utilisés dans les 'algorithmes Buhlmann' furent en réalité développés par d'autres et intégrés par Buhlmann. Bien sûr, Buhlmann apporta également nombres de contributions à la science et aux pratiques des calculs de décompression. Sa plus grande contribution fut la publication de son livre, en quatre éditions de 1983 à 1995. C'est parce qu'il fut le seul ouvrage disponible traitant de l'intégralité des problèmes de décompression, qu'il devint la référence mondiale sur laquelle s'appuyèrent les ordinateurs de plongée ainsi que les programmes 'maison'. Les concepts clés de Buhlmann, largement expliqués dans la quatrième édition (1995) de son livre, sont les suivants :

- ❖ La variation des périodes entre deux gaz est inversement proportionnelle à la racine carrée de leur masse moléculaire.
Ceci est une relation bien connue des chimistes, qui s'appelle 'la loi de Graham'. Elle s'applique particulièrement bien lorsque les gaz traversent une fine membrane poreuse, un processus appelé effusion qui est un dérivé de la diffusion.

- ❖ La tolérance à la sursaturation, ou super-saturation, dans un compartiment est basée sur le volume excédentaire du gaz toléré par l'organisme dans ce compartiment. La pression partielle tolérée entre deux gaz différents d'un même compartiment variera selon leur solubilité dans le moyen de transport qui amène ces gaz au compartiment (plasma sanguin, dans le cas qui nous intéresse).

Ces deux concepts clés peuvent être utilisés pour établir un jeu complet de périodes et M_{values} pour d'autres gaz comme l'argon ou le néon (bien qu'à cause de leur plus grande solubilité, comparés respectivement à l'azote et à l'hélium, ils n'offrent pas d'avantages substantiels pour la décompression, du moins dans la plupart des scénarios).

- ❖ La M_{value} globale pour un compartiment multigaz, chaque gaz ayant une M_{value} propre, variera selon la proportion de chacun des gaz présent dans le compartiment.

Une explication des M_values Buhlmann est nécessaire. Tout d'abord, ce sont des M_values traditionnelles ressemblant à celles qu'avaient définies Workman. Buhlmann a simplement modifié l'équation linéaire afin qu'elle s'adapte à son application. Il partit de l'équation traditionnelle de la M_value, de la forme $y = mx + b$ et il isola x . Ce qui donne $x = (y - b) / m$. Pour se débarrasser de m , la pente, au dénominateur, il prit juste l'inverse et l'appela 'coefficient b'.

La forme traditionnelle d'une M_value est : $P = m(P_{amb}) + M_0$ [forme générale $y = mx + b$]

- P = pression tolérée en gaz inerte
- m = pente
- P_{amb} = pression ambiante
- M_0 = décalage à l'origine (l'origine étant la pression de surface de 1,013 bar)

Buhlmann exprima la même chose, mais en pression absolue

- coefficient a = décalage à l'origine (pour la pression absolue zéro)
- coefficient b = inverse de la pente

Il est facile de convertir les M_values Buhlmann en M_value traditionnelle (style Workman) et inversement. C'est quelque chose, je crois, que de nombreuses personnes ne comprennent pas.

Dans son édition de 1995, Tauchmedizin ou 'Diving medicine', Buhlmann donne un grand nombre d'informations concernant la physiologie en plongée et il parle beaucoup de ses expériences faites au fil du temps. Il présente de nombreux résultats issus de recherches expérimentales. De la même façon, il fait ressortir quelques infos intéressantes du modèle. Par exemple, il donne les calculs des pressions partielles de chaque compartiment à la fin d'une série de plongées et les exprime sous la forme de pourcentages des valeurs théoriques. Une chose ressort de ces données : c'est que pour chaque série de test où des symptômes de MDD apparaissent, les plongeurs affectés ressortent en surface avec un pourcentage inférieur au seuil théorique des M_values en terme de charge en gaz des compartiments. Ceci se situe habituellement dans la gamme des 90% à 97%. Buhlmann avoua que la situation empirait lors de plongées successives et il conseilla d'appliquer un facteur de réduction dans les calculs pour la décompression des plongées successives.

Une interprétation des données Buhlmann est que ses M_values ne représentent pas une limite fiable entre PAS DE SYMPTÔME et SYMPTÔMES MASSIFS. Ceci est cohérent avec l'expérience de la plupart des autres modèles de décompression qui stipulent qu'une M_value n'est qu'une ligne tracée à travers une zone grise et floue.

Ce type d'information devrait encourager les concepteurs de logiciels de décompression utilisant les M_values Buhlmann, à inclure un mécanisme de réduction des M_values qui serait efficace à travers toute la gamme des pressions ambiantes. Un tel mécanisme s'obtient par réduction du gradient de M_value. Ceci est simplement la différence entre la M_value et la pression ambiante.

Une autre bonne référence sur la décompression, que je n'avais pas encore mentionné, est le Dr. Bruce Wienke. Il a publié plusieurs ouvrages qui sont disponibles dans les meilleurs sociétés d'édition. Il est l'auteur de 'Reduce Gradient Bubble Model' (RGBM). Cette excellente présentation des gradients est principalement axée sur le modèle des bulles, mais il est parfaitement applicable au modèle des gaz dissous.

Bien, j'espère que je vous ai suffisamment donné l'envie de poursuivre dans la lecture des fondamentaux des modèles de décompression. Concevoir un logiciel de décompression est plus que programmer un simple jeu d'équations issus d'un livre. Il y a des considérations nombreuses et complexes à prendre en compte. Je n'ai pas toutes les réponses, mais collectivement, nous (la communauté du monde de la plongée) pouvons apporter un grand nombre de réponses en échangeant nos informations.

Charge et décharge d'un gaz inerte

L'évolution dans le temps de la charge en gaz inerte en fonction de la pression ambiante, est donnée par une équation différentielle :

❖ équation 'Haldane' ou équation instantanée

à condition que la pression ambiante ne varie pas (cas d'une plongée à profondeur constante !)

$$dP/dt = k(P_i - P)$$

- P_i = pression du gaz inerte respiré
- P = pression initial du gaz inerte dans le compartiment

La solution nécessite de passer par le calcul intégral :

$$P = P_0 + (P_i - P_0) (1 - e^{-kt})$$

$$P = P_0 + (P_i - P_0) (1 - e^{(-\ln 2 t / \text{période})})$$

$$P = P_0 + (P_i - P_0) (1 - e^{(-0,693 t / \text{période})})$$

$$P = P_0 + (P_i - P_0) (1 - 2^{(-t/\text{période})}) \quad \text{cette équation apparaît dans le livre de Buhlmann (Tauchmedizin)}$$

- P = pression finale du gaz inerte dans le compartiment
- P_0 = pression initiale du gaz inerte dans le compartiment
- P_i = pression du gaz inerte respirée dans le compartiment
- t = temps d'exposition (ou intervalle)
- k = constante dépendant de la période
- e = base du logarithme naturel
- $\ln 2$ = logarithme naturel de 2

❖ équation de Schreiner ou solution globale

à condition que la variation de pression (vitesse de descente ou remontée) soit constante

$$P = P_{i0} + R(t - 1/k) - [P_{i0} - P_0 - (R/k)]e^{-kt}$$

- P_{i0} = pression initiale du gaz inerte respiré (alvéolaire) moins la vapeur d'eau
- P_0 = pression du gaz inerte présente au départ dans le compartiment
- R (ou c) variation de la pression du gaz respiré en fonction de la variation de la pression ambiante
c'est simplement le taux de descente ou remontée multiplié par le pourcentage de gaz inerte
- t = temps d'exposition (ou intervalle)
- k = constante liée à la période du compartiment = $\ln 2 / \text{période}$ (idem équation instantanée)

remarque : quand R (ou c) vaut zéro, l'équation ci-dessus revient à l'équation instantanée familière de la forme : $P = P_0 + (P_i - P_0) (1 - e^{-kt})$

❖ Unités employées

En plongée, les unités employées pour décrire la profondeur sont des unités de pression et non des unités de longueur. Ceci est une source de confusion habituelle et de mauvaise compréhension. Et la conversion entre ces deux systèmes d'unité est souvent mal effectuée.

En plongée, deux systèmes d'unité de pression coexistent. Le système en vigueur aux USA et le système Européen. Aucun des deux systèmes n'est parfaitement correct et aucun des deux n'est totalement conforme aux standards SI en vigueur.

Dans les deux systèmes, les unités de pression utilisées pour les profondeurs sont définies de façon arbitraires et indépendantes.

Système américain : le pied d'eau de mer (fsw)

$$1 \text{ fsw} = 1/33 \text{ atmosphère} = 3,0705 \times 10^3 \text{ pascals (Newton/m}^2\text{) avec densité eau de mer} = 1,020$$

Système européen : le mètre d'eau de mer (msw)

$$1 \text{ msw} = 1/10 \text{ bar} = 10 \text{ kPa} = 10^4 \text{ Pascals (Newton/m}^2\text{) avec densité eau de mer} = 1,027$$

Remarque : les unités fsw et msw ressemblent à des unités de longueur, mais ce n'est pas le cas ! ici, ce sont des unités de pression.

Conversion entre les pieds et les mètres (en tant qu'unité de pression)

- 1 msw = 3,2568 fsw
- 1 fsw = 0,30705 msw

Conversion entre les pieds et les mètres (en tant qu'unité de longueur)

- 1 mètre = 3,2808 pieds
- 1 pied = 0,3048 mètre

La densité de l'eau de mer varie entre 1,020 et 1,030. C'est pourquoi les unités des deux systèmes, américain et européen, furent choisies pour rester dans ces limites. La densité de l'eau (ou l'équivalent profondeur dans notre cas) n'influe pas tant que la pression que subit le plongeur est mesurée et utilisée pour déterminer la bonne décompression. En clair, ceci signifie qu'il n'y a pas de correction à apporter entre la plongée en eau douce ou la plongée en eau de mer tant que la pression du plongeur est mesurée avec le même référentiel que celui employé pour le calcul de la décompression.

Conventions en usage

1. Le système américain considère que la pression atmosphérique au niveau de la mer vaut :
 $101,325 \text{ Kpa} = 1,01325 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$
2. cependant, certains utilisateurs de ce système y compris l'U.S. Navy et le 'Journal of Undersea and Hyperbaric Medicine' utilisent des valeurs approchées pour le pied d'eau de mer (fsw). Au lieu d'utiliser $1 \text{ fsw} = 1/33,08 \text{ atmosphère}$, ils ont arrondi à $1 \text{ fsw} = 1/33 \text{ atm}$.
3. Le système européen considère que la pression atmosphérique au niveau de la mer vaut 1,0 bar, au lieu de 1,01325 bar. Ceci signifie que le système européen diffère du système américain à raison de 13,25 mb, soit 1,3%.

Important : Tous les calculs et mesures doivent être faits dans un système ou dans l'autre. Il ne faut pas chercher à convertir un système vers l'autre ou vice et versa. Pour être cohérent, tous les calculs doivent être faits dans le même système d'unité.

Un autre point qui vaut la peine d'être mentionné, est que ni le système d'unité américain (fsw), ni celui européen (bar) ne sont conformes à la norme SI. (Pascal), mais les pratiques sont si profondément enracinées que les choses ne sont pas près de changer.

Pour le paramétrage de logiciel destiné à fonctionner dans les deux systèmes, les programmeurs doivent garder à l'esprit les conventions suivantes :

Système américain : 1 atm = 33 fsw

Système européen : 1 bar = 10 msw

De plus les programmeurs devraient faire tous leurs calculs avec les unités de pression utilisées pour la profondeur. Par exemple, dans le système américain, les charges en gaz ainsi que les M_values seront exprimées en fsw, tandis que dans le système européen, elles seront exprimées en msw. Ceci signifie, que si on utilise les M_values Buhlmann par exemple, les coefficients 'a' devront être convertis de bar en fsw ou msw comme la base de données. Dans le cas d'une conversion en msw, c'est facile, il suffit de multiplier par 10.

Une alternative : Le système standard SI.

Une autre possibilité est d'utiliser le système SI. L'unité de pression est le Pascal (c'est une masse de 1 kg soumise à l'accélération de la Terre ($g = 9,81\text{ms}^{-2}$, en moyenne), soient 9,81 Newtons exerçant sa force sur une surface de 1m^2).

1 Pascal = $9,81\text{N/m}^2$.

Cette unité étant très petite, on utilise plus fréquemment l'hecto-Pascal (100 Pa)

Or l'hecto-Pascal vaut exactement 1 millibar. Donc 1 bar = 100 000 Pascals.

Il sera donc possible d'utiliser le Pascal (ou le bar) à condition de toujours conserver la même unité pour exprimer les pression et même les vitesses de remontée ou de descente.

Ex : descente de 40m en 2min → 2bar / min ou 200 000 Pa / min

Remontée de 40m en 4min → -1bar / min ou -100 000 Pa / min (vitesse négative)

Définitions :

Un MSW est défini comme étant 1/10 bar

Un FSW est défini comme étant 1/33 atm

Conversions en SI :

1 bar = 100KPa = 1000 HPa = 1000mb

1 atm = $1,01325\text{E}+05$ Pa (valeur standard de la pression atmosphérique)

1 atm = 1,01325 bar

Conversions entre unités :

$$1 \text{ MSW} = (0,1 \text{ bar}) + \frac{(1 \text{ atm})}{(1,01325 \text{ bar})} \times \frac{(33 \text{ FSW})}{(1 \text{ atm})} = 3,25684678 \text{ FSW}$$

❖ Composition du gaz alvéolaire

Le gaz alvéolaire ne possède pas la même composition que le gaz respiré. Il y a plusieurs raisons pour expliquer ces différences :

- Lors de chaque respiration, le gaz alvéolaire n'est que partiellement remplacé par le gaz respiré.
- L'oxygène est constamment en train d'être absorbée de l'alvéole.
- Le gaz carbonique est constamment en train de diffuser du sang pulmonaire vers l'alvéole.
- Les gaz respirés asséchés qui entrent dans les conduits respiratoires, sont humidifiés avant même d'atteindre les alvéoles

Normalement, les gaz respirés ne contiennent pas de gaz carbonique et peu de vapeur d'eau. Cependant, dès que les gaz respirés passent par les conduits respiratoires, ils entrent en contact avec les fluides qui couvrent la surface des conduits. Avant même que les gaz n'atteignent les alvéoles, ils sont totalement humidifiés. La pression partielle en vapeur d'eau dans un corps à 37 deg C. est de 47 mmHg, ce qui, d'ailleurs, est la pression partielle en vapeur d'eau régnant dans l'alvéole. Comme la pression totale régnant dans l'alvéole ne peut être supérieur à la pression ambiante (sauf cas de surpression pulmonaire), cette vapeur d'eau occupe donc une partie du volume de gaz et, par là même, dilue les autres gaz du mélange respiratoire.

Le corps maintient dans l'alvéole, une pression de vapeur d'eau constante de 47mmHg pour une température corporelle normale. En plongée, les gaz asséchés que nous respirons contribuent à la déshydratation, c'est pourquoi l'organisme doit fournir de l'eau pour maintenir cette pression de vapeur.

✓ Quotient respiratoire (alvéolaire)

Le rapport de production du gaz carbonique sur la consommation d'oxygène est appelé quotient respiratoire. Les valeurs s'échelonnent de 0,7 à 1,0, dépendant de la forme et de la condition physique. Le manuel de plongée de L'U.S. Navy préconise 0,9, ces valeurs sont une bonne approximation pour établir ses calculs.

Bennett & Elliott (4^{ème} édition).

La ventilation alvéolaire : la pression totale des gaz secs présents dans l'alvéole, y compris la vapeur d'eau, sera à peu près égale à la pression ambiante (ou barométrique). La vapeur d'eau doit donc être soustraite de celle-ci. Elle dépend de la température de l'alvéole et vaut 47mmHg (6,25Kpa) à 37 deg C.

Buhlmann (1995 Diving Medicine).

Pour le calcul de la pression partielle d'un gaz respiratoire, la pression de vapeur d'eau doit être déduite de la pression ambiante totale.

$$P_i (\text{gaz inerte}) = (P_{\text{amb}} - 0,627 \text{ bar}) \times \% \text{ de gaz inerte}$$

Si on ne tient pas compte de la pression de la vapeur d'eau, on va calculer une pression partielle plus élevée pour l'O₂, N₂, He, etc. En recherche expérimentale sur la décompression, si on ne tient pas compte des éléments de la physiologie respiratoire, le stricte calcul de la pression partielle des gaz respirés, donne pour la surpression acceptable des gaz inertes, un résultat plus élevé qu'il ne devrait.

Hamilton, manuel DCAP.

Gaz alvéolaire : Le mode opérationnel de DCAP s'appuie sur les valeurs des gaz respirés, mais Tonawanda II (modèle de gaz dissout) utilise les valeurs alvéolaires pour ses calculs. Ceci est la principale différence qu'il y a entre DCAP et certains autres logiciels de décompression.

Ajustement raisonnable des gaz alvéolaires : le gaz respiré est dilué dans les poumons par le CO₂ et la vapeur d'eau. Ce n'est pas très important pour les pression habituellement utilisées en plongée, mais ça peut devenir significatif lors des plongées en altitude où ces gaz représentent une plus grande part de la pression totale. Avec un quotient respiratoire supposé de 0,8, l'équation de la ventilation alvéolaire donne la pression alvéolaire du gaz inerte. (voir Schreiner et Kelley, 1971).

P alvéolaire (gaz inerte) = (Pamb – 37mmHg) x pourcentage (gaz inerte)

- 37 mmHg = 0,0493 bar = 0,493 msw
- 37 mmHg = 0,0487 atm = 1,607 fsw

La valeur appropriée est soustraite de la pression ambiante durant les calculs de gaz alvéolaire de DCAP.

Synthèse pour les calculs de programmes de décompression

Comme on a pu le voir avant, pour calculer la pression initiale des gaz respiratoires inspirés (alvéolaires), la question de soustraire la pression de vapeur d'eau ne se pose même plus. La seule question qui demeure est de savoir quelle est la valeur à soustraire. Cette question est à replacer dans l'utilisation de l'équation de la ventilation alvéolaire :

P alvéolaire = [((PCO₂ x (1 – Rq) / Rq) + Pamb – PH₂O] x pourcentage (gaz inerte)

- Rq = quotient respiratoire
- PCO₂ = pression du gaz carbonique
- Pamb = pression ambiante
- PH₂O = pression de la vapeur d'eau

Si on utilise les valeurs standards pour le CO₂ = 40mmHg et PH₂O = 47mmHg, alors, pour les quotients respiratoires suivants, on obtient :

Rq	0,8	0,9	1,0
	Pamb - 37 mm Hg Pamb – 0,0493 bar Pamb – 0,493 msw Pamb – 1,607 fsw (valeur Schreiner)	Pamb – 42,55 mmHg Pamb – 0,0567 bar Pamb – 0,567 msw Pamb – 1,848 fsw (valeurs U.S. Navy)	Pamb – 47 mmHg Pamb – 0,0627 bar Pamb – 0,627 msw Pamb – 2,041 fsw (valeurs Buhlmann)

Aussi le concepteur du logiciel devra choisir entre ces valeurs ; les valeurs Buhlmann qui sont les plus permissives, les valeurs Schreiner sont les plus contraignantes et les valeurs U.S. Navy qui sont au milieu.

❖ **Exemple d'application chiffré :**

Je voudrais tout de suite vous donner un conseil sur la façon de programmer vos calculs concernant des portions de descente ou remontée de votre profil de plongée. Il semblerait que vous, comme tant d'autres, utilisiez l'équation instantanée pour calculer la charge de gaz. Afin d'obtenir une résolution satisfaisante, vous forcez l'ordinateur à calculer le profil de descente ou de remontée en divisant le segment en des incréments de plus en plus petits. **Ceci n'est pas la meilleure façon de calculer un profil de descente ou de remontée.**

L'équation $P = P_0 + (P_i - P_0) (1 - e^{-kt})$ ne s'applique que pour des profils où la profondeur est constante. C'est un des points que Buhlmann n'explique malheureusement pas dans son livre. L'utilisation de cette équation familière vous oblige à segmenter l'intervalle en de très petits incréments qui n'amènent aucune précision et qui oblige à de nombreuses itérations.

Le calcul direct et correct pour obtenir la charge en gaz durant la descente ou la remontée (à vitesse constante), est donnée par l'équation de Schreiner : $P = P_{io} + R(t - 1/k) - [P_{io} - P_o - (R/k)]e^{-kt}$ (voir ci dessus)

L'équation de Schreiner sert à calculer la pression partielle de chaque gaz pris séparément lors de la descente ou de la remontée. La somme sera donc la totalité des charges en gaz des compartiments.

Note : dans l'exemple qui suit, la vitesse de remontée doit être exprimée sous la forme d'un chiffre négatif.

Données :

Pour le système américain : descente à 120 fsw en 2 min avec un trimix 15% O₂, 45% He et 40% N₂

Pour le système européen : descente à 40 msw en 2 min avec un trimix 15% O₂, 45% He et 40% N₂

Pour le système S.I. : descente à 40 mètres en 2 min avec un trimix 15% O₂, 45% He et 40% N₂

première plongée de la journée, altitude niveau de la mer

il faut considérer que ces 3 exemples sont des plongées distinctes, il n'y a pas stricte égalité entre 120 fsw et 40 msw et 40 mètres.

Système américain	Système européen	S.I.
Prof. = Profondeur (équivalent profondeur exprimé en terme de pression)		
Prof. = 120 fsw	Prof = 40 msw	Prof. = 4000 Hpa Prof. = 4 bar
Pression ambiante		
Pamb ₀ = 33 fsw	Pamb ₀ = 10 msw	Pamb ₀ = 1013 Hpa Pamb ₀ = 1,013 bar
Pression de la vapeur d'eau		
PH ₂ O = 2,042 fsw	PH ₂ O = 0,627 msw	PH ₂ O = 0,0627 bar
PiHe₀ = pression partielle respirée pour l'hélium (celle qu'on va utiliser au départ de la plongée) égal pression ambiante initiale (Pamb ₀) – pression partielle de la vapeur d'eau multiplié par le pourcentage de l'hélium dans le mélange		
PiHe ₀ = 13,93 fsw	PiHe ₀ = 4,22 msw	PiHe ₀ = 0,427 bar
PiN₂₀ = pression partielle respirée pour l'azote (celle qu'on va utiliser au départ de la plongée) égal pression ambiante initiale (Pamb ₀) – pression partielle de la vapeur d'eau multiplié par le pourcentage de l'azote dans le mélange		
PiN ₂₀ = 12,38 fsw	PiN ₂₀ = 3,75 msw	PiN ₂₀ = 0,38 bar
V = taux de variation de la pression lors de la descente (exprimé en variation de pression par min)		
V = 60 fsw / min	V = 20 msw /min	V = 2 bar / min
VHe = taux de variation de pression de l'hélium lors de la descente (= V x pourcentage de l'hélium dans le mélange)		
VHe = 27 fsw / min	VHe = 9 msw / min	VHe = 0,9 bar / min
VN₂ = taux de variation de pression de l'azote lors de la descente (= V x pourcentage de l'azote dans le mélange)		
VN ₂ = 24 fsw / min	VN ₂ = 8 msw / min	VN ₂ = 0,8 bar / min
PHe₀ = pression partielle initiale de l'hélium (celle qu'il y avait juste avant la plongée)		
PHe ₀ = 0 fsw	PHe ₀ = 0 msw	PHe ₀ = 0 bar
PN₂₀ = pression partielle initiale de l'azote (celle qu'il y avait juste avant la plongée) = (Pamb – PH ₂ O) x pourcentage azote dans l'air (0,79)		
PN ₂₀ = 24,46 fsw	PN ₂₀ = 7,40 msw	PN ₂₀ = 0,75 bar

Pour cet exemple, nous n'allons regarder que les compartiments Buhlmann n°1 pour l'azote et pour l'hélium. Il est certain que pour un calcul complet, il faudrait effectuer les même opérations pour les 16 compartiments.

Remarque : Buhlmann a publié son modèle de décompression ZH-L16 avec 16 périodes pour 16 compartiments. En réalité, il y a deux jeux de valeur pour le compartiment n°1. Buhlmann les appelait 1 et 1b. Le compartiment n°1 a une période de 4 min pour l'azote et 1,51 min pour l'hélium, tandis que le compartiment n°1b a une période de 5 min pour l'azote et 1,88 min pour l'hélium. Ce ne sont pas deux compartiments différents. Vous devez choisir entre l'un ou l'autre. La raison pour laquelle Buhlmann procéda ainsi est que la plupart des autres concepteurs en décompression considèrent 5 min comme étant la période la plus rapide pour l'azote, et en choisissant le compartiment n°1b, vous serez cohérent avec les autres modèles. Pour la plupart des applications, la période de 4 min pour N2 et 1,51 pour He, est trop rapide. Elle ne serait seulement utilisable que pour des plongées où le caractère 'coup de vent' serait extrêmement prononcé. De toute façon, la plupart des profils de plongées techniques ne sont pas impliqués par les compartiments les plus courts.

Période du compartiment n°1 pour l'hélium : 1,51 min.
Période du compartiment n°1 pour l'azote : 4 min.

Les constantes $k = \log 2$ divisé par la période :

- $k_{He} = \ln 2 / 1,51 = 0,459$
- $K_{N_2} = \ln 2 / 4 = 0,173$

Ces données sont indépendantes des unités choisies.

Calculons les charges en hélium et en azote accumulées dans le compartiment n°1, lorsqu'on arrive au fond :

Utilisons l'équation de Schreiner pour l'hélium :		
$P_{He} = P_{iHe_0} + V_{He}(t - 1/k_{He}) - [P_{iHe_0} - P_{He_0} - (V_{He} / k_{He})]e^{-k_{He}t}$		
$P_{iHe_0} = 13,93$	$P_{iHe_0} = 4,22$	$P_{iHe_0} = 0,427$
$V_{He} = 27$	$V_{He} = 9$	$V_{He} = 0,9$
$t = 2$	$t = 2$	$t = 2$
$K_{He} = 0,459$	$K_{He} = 0,459$	$K_{He} = 0,459$
$P_{He_0} = 0$	$P_{He_0} = 0$	$P_{He_0} = 0$
$P_{He} = 27,03$ fsw (absolu)	$P_{He} = 8,77$ msw (absolu)	$P_{He} = 0,88$ bar
Utilisons l'équation de Schreiner pour l'azote :		
$P_{N_2} = P_{iN_{20}} + V_{N_2}(t - 1/k_{N_2}) - [P_{iN_{20}} - P_{N_{20}} - (V_{N_2} / k_{N_2})]e^{-k_{N_2}t}$		
$P_{iN_{20}} = 12,38$	$P_{iN_{20}} = 3,75$	$P_{iN_{20}} = 0,38$
$V_{N_2} = 24$	$V_{N_2} = 8$	$V_{N_2} = 0,8$
$t = 2$	$t = 2$	$t = 2$
$K_{N_2e} = 0,173$	$K_{N_2e} = 0,173$	$K_{N_2e} = 0,173$
$P_{N_{20}} = 24,46$	$P_{N_{20}} = 7,40$	$P_{N_{20}} = 0,75$
$P_{N_2} = 28,36$ fsw (absolu)	$P_{N_2} = 8,81$ msw (absolu)	$P_{N_2} = 0,89$ bar (absolu)
Dans le compartiment n°1, la pression total en gaz inerte sera égale à la somme des pressions partielles des deux gaz (hélium et azote)		
$P_{p\ Cpt\ n^{\circ}1} = 27,03 + 28,36 = 55,39$ fsw	$P_{p\ Cpt\ n^{\circ}1} = 8,77 + 8,81 = 17,58$ msw	$P_{p\ Cpt\ n^{\circ}1} = 0,88 + 0,89 = 1,77$ bar Ou 1770 Hpa

Remarque : maintenant comparez la méthode de cet exemple avec celle qui utiliserait l'équation instantanée :

$$P = P_0 + (P_i - P_0) (1 - e^{-kt})$$

Si vous divisez l'intervalle de 0 à 120 fsw en tranche de 3 secondes chacune, il vous faudra calculer 40 itérations pour arriver au même résultat. (2 minutes = 120 secondes divisées par 3 = 40 itérations). Ceci signifie que pour 16 compartiments et 2 gaz, l'ordinateur devra effectuer $40 * 16 * 2 = 1280$ calculs. De plus vous n'obtiendrez qu'une approximation de la vraie charge en gaz. Si vous utilisez l'équation de Schreiner, il ne vous faudra que 32 itérations et vous aurez un calcul juste.

Version V01 de juin 2001

Si vous ne me croyez pas, essayez d'écrire une paire de petits programmes pour tester chaque méthode et voyez le résultat.

Attention : Vous ne pouvez calculer la charge en gaz des compartiments que pour un segment de plongée où la vitesse est constante (que ce soit la descente ou la remontée, pour la partie à profondeur constante, l'équation de Schreiner est ramenée à l'équation instantanée). Il faudra donc découper la plongée en autant de segment qu'il y aura de changement de vitesse et de changement de gaz.

Limites de remontée

Jusqu'ici, nous avons calculé pour chaque compartiment sa charge en gaz inerte. Pour ce faire, nous avons segmenté notre plongée en autant de portions qu'il y avait de modifications dans au moins un des paramètres de l'équation (instantanée ou globale) :

- Dans le changement de la vitesse de descente ou de remontée.
- Dans le changement du gaz respiré.

Pour chaque segment de plongée et pour chaque compartiment, nous avons donc calculé la pression partielle absolue des gaz. Maintenant, il faut remonter.

C'est là que les choses se compliquent !

Les Physiologistes sont à peu près tous d'accord sur la façon de calculer la charge en gaz d'un compartiment en fonction du temps et de la pression qu'il subit. Les grandes variantes consistent à prendre ou à ne pas prendre en compte certains gaz présents dans l'alvéole, comme la vapeur d'eau.

Par contre, il y a plusieurs modèles permettant de fixer les limites de sursaturation qu'un tissu peut supporter sans dommage lors de la remontée. (modèle Haldaniens ou néo-Haldanien, VPM basé sur les phénomènes qui régissent l'apparition et le développement de la bulle, les différences anatomiques des individus, la persistance du foramen ovalé, ...)

De nombreux physiologistes ont travaillé et travaillent encore pour déterminer les facteurs à prendre en compte dans une décompression. Les données présentées ci-après sont issues des travaux de Haldane, Workman, Buhlmann et bien d'autres. Elles sont déjà anciennes et seront certainement remises en cause un jour. En attendant, nous allons nous appuyer sur leurs fondements pour proposer une mécanique de calcul.

❖ **Les M values**

Dès le départ, on le voit bien, il y a des choix à faire. Limites basées sur des ratios Haldaniens (MN90, ...) ou sur des M_values (Workman, Buhlmann, DCAP, ...)

Les ratios de surpression ont donnés de nombreuses tables encore en vigueur actuellement. Mais leurs valeurs ont été remises en cause et leur manque de flexibilité ont conduit les concepteurs à les abandonner au profit des M_values. (voir chapitre MN90). Les M_values sont les surpressions maximales que peuvent tolérer les compartiments sans présenter de symptômes apparents de MDD. ([voir article précédent 'comprendre les M_values'](#)).

Pour les explications qui vont suivre, ce sont les M_values Buhlmann qui seront utilisées.

Table 1 : Comparaison des M-values de l'azote pour les différents algorithmes de décompression Haldaniens Système d'unité de pression européen – mètre of sea water (msw) – style Workman																				
Workman M-values (1965)				Bulmann ZH-L12 M-values (1983)				DSAT RDP M-values (1987)			DCAP MF11F6 M-value (1986)				Bulmann ZH-L16 M-values (1990)					
Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. Min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ mw	Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	A M ₀ msw	B M ₀ msw	C M ₀ msw	ΔM pente
1	5	31,7	1,8	1	2,65	34,2	1,2195	1	5	30,42	1	5	31,90	1,30	1	4,0	32,4	32,4	32,4	1,9082
2	10	26,8	1,6	2	7,94	27,2	1,2195	2	10	25,37	2	10	14,65	1,05	1b	5,0	29,6	29,6	29,6	1,7928
3	20	21,9	1,5	3	12,2	22,9	1,2121	3	20	20,54	3	25	19,04	1,08	2	8,0	25,4	25,4	25,4	1,5352
4	40	17,0	1,4	4	18,5	21,0	1,1976	4	30	18,34	4	55	14,78	1,06	3	12,5	22,5	22,5	22,5	1,3847
5	80	16,4	1,3	5	26,5	19,3	1,1834	5	40	17,11	5	95	13,92	1,04	4	18,5	20,3	20,3	20,3	1,2780
6	120	15,8	1,2	6	37	17,4	1,1628	6	60	15,79	6	145	13,66	1,02	5	27,0	19,0	19,0	18,5	1,2306
7	160	15,5	1,15	7	53	16,2	1,1494	7	80	15,11	7	200	13,53	1,01	6	38,3	17,8	17,5	16,9	1,1857
8	200	15,5	1,1	8	79	15,8	1,1236	8	100	14,69	8	285	13,50	1,0	7	54,3	16,8	16,5	15,9	1,1504
9	240	15,2	1,1	9	114	15,8	1,1236	9	120	14,41	9	385	13,50	1,0	8	77,0	15,9	15,7	15,2	1,1223
				10	146	15,3	1,0707	10	160	14,06	10	520	13,40	1,0	9	109	15,2	15,2	14,7	1,0999
				11	185	15,3	1,0707	11	200	13,84	11	670	13,30	1,0	10	146	14,6	14,6	14,3	1,0844
				12	238	14,4	1,0593	12	240	13,69	12				11	187	14,2	14,2	14,0	1,0731
				13	304	12,9	1,0395	13	360	13,45	13				12	239	13,9	13,9	13,7	1,0635
				14	397	12,9	1,0395	14	480	13,33	14				13	305	13,5	13,4	13,4	1,0552
				15	503	12,9	1,0395	15			15				14	390	13,2	13,2	13,1	1,0478
				16	635	12,9	1,0395	16			16				15	498	12,9	12,9	12,9	1,0414
															16	635	12,7	12,7	12,7	1,0359

Cpt : Compartiment Per. : Période M₀ : M-value en surface (niveau de la mer = 10msw = 1,0bar) ΔM : pente de la droite des M-values

Les tableaux présentent les M_values de l'azote et de l'hélium établies par différents concepteurs. On portera une attention toute particulière aux unités employées (ici le msw au format Workman, c'est à dire que M₀ est exprimé pour une pression de 1 bar (valeur de surface)).

Table 2 : Comparaison des M-values de l'hélium pour les différents algorithmes de décompression Haldaniens Système d'unité de pression européen – mètre of sea water (msw)											
Workman M-values (1965)				Bulmann ZH-L12 M-values (1983)				Bulmann ZH-L16A M-values (1990)			
Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ msw	ΔM pente
1	5	26,2	1,5	1	1,0	34,2	1,2195	1	1,51	41,0	2,3557
2	10	22,5	1,4	2	3,0	27,2	1,2195	1b	1,88	37,2	2,0964
3	20	20,1	1,3	3	4,6	22,9	1,2121	2	3,02	31,2	1,7400
4	40	18,3	1,2	4	7,0	21,0	1,1976	3	4,72	27,2	1,5221
5	80	17,0	1,2	5	10	19,3	1,1834	4	6,99	24,3	1,3845
6	120	16,4	1,2	6	14	17,4	1,1628	5	10,21	22,4	1,3189
7	160	16,4	1,1	7	20	16,2	1,1494	6	14,48	20,8	1,2568
8	200	16,1	1,0	8	30	15,8	1,1236	7	20,53	19,4	1,2079
9	240	16,1	1,0	9	43	15,8	1,1236	8	29,11	18,2	1,1692
				10	55	15,9	1,0799	9	41,20	17,4	1,1419
				11	70	15,9	1,0799	10	55,19	16,8	1,1232
				12	90	15,9	1,0799	11	70,69	16,4	1,1115
				13	115	15,9	1,0799	12	90,34	16,2	1,1022
				14	150	15,9	1,0799	13	115,29	16,1	1,0963
				15	190	15,9	1,0799	14	147,42	16,1	1,0904
				16	240	15,9	1,0799	15	188,24	16,0	1,0850
								16	240,03	15,9	1,0791

Cpt : Compartiment Per. : Période M₀ : M-value en surface (niveau de la mer = 10msw = 1,0 bars) ΔM : pente de la droite M-values

❖ **Cas des MN90**

Je ne peux pas passer sous silence nos tables nationales MN90 sur lesquelles ont planchées tant de candidats FFESSM. Je ne vais pas en refaire une nième explication, mais je vais les présenter sous un jour inhabituel afin que chacun puisse en faire une comparaison 'mathématique' avec les modèles présentés précédemment.

Les tables MN90 son issues d'un modèle Haldanien basé sur des ratios fixes. Ceci signifie que les limites sont exprimées sous forme de coefficients (rapports de la pression partielle d'azote sur la pression ambiante) qu'il ne faut pas dépasser. Elles comportent 12 compartiments de période distincte dont voici les limites établies pour l'azote :

Périodes (min)	Tissus											
	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
Coefficients	2,72	2,54	2,38	2,20	2,04	1,82	1,68	1,61	1,58	1,56	1,55	1,54

Il est possible de transformer ces coefficients afin de les présenter sous forme d'équation de droite, comme les M_values : $y = ax + b$.

Prenons l'exemple du compartiment 5' :

- à la surface (1 bar), la limite autorisée vaut $2,72 = X/1 \rightarrow 2,72$ bar
- à 10m (2 bar), la limite autorisée vaut $2,72 = X/2 \rightarrow 5,44$ bar

Deux points suffisent à tracer une droite. On s'aperçoit que la droite passe par l'origine (0,0), comme les 11 autres d'ailleurs. L'équation générale devient donc :

- Style Buhlmann $y = ax$ (pas de décalage à l'origine (0,0)). Avec $a =$ pente = coeff.
- Style Workman $y = ax + a$ (ou $y = a(x+1)$). Avec la pente = le décalage à l'origine (1,1)

Comparaisons : la différence essentielle entre des ratios (ou coefficients) et des M_values est que les ratios sont indépendants de la pression ambiante. Quelle que soient les profondeurs, le ratio reste fixe, alors que les M_values dépendent de la profondeur ; plus la profondeur augmente, plus le 'ratio' tolérable diminue.

Table 3 : Comparaison des M-values de l'azote pour les algorithmes de décompression Buhlmann et MN90							
MN90				Buhlmann ZH-L16C M-values (1990)			
Cpt N°	Per. min	M ₀ bar	ΔM pente	Cpt N°	Per. min	M ₀ bar	ΔM pente
1	5	-	2,72	1	4,0	1,2599	1,9082
2	7	-	2,54	1b	5,0	1,1696	1,7928
3	10	-	2,38	2	8,0	1,0000	1,5352
4	15	-	2,20	3	12,5	0,8618	1,3847
5	20	-	2,04	4	18,5	0,7562	1,2780
6	30	-	1,82	5	27,0	0,6200	1,2306
7	40	-	1,68	6	38,3	0,5043	1,1857
8	50	-	1,61	7	54,3	0,4410	1,1504
9	60	-	1,58				
10	80	-	1,56	8	77,0	0,3750	1,1223
11	100	-	1,55	9	109	0,3500	1,0999
12	120	-	1,54				
				10	146	0,3295	1,0844
				11	187	0,3065	1,0731
				12	239	0,2835	1,0635
				13	305	0,2850	1,0552
				14	390	0,2610	1,0478
				15	498	0,2480	1,0414
				16	635	0,2327	1,0359

Cpt : Compartiment Per. : Période
M₀ : M-value en surface (niveau de la mer = 1,013 bar)
ΔM : pente de la droite des M-values

Dans le tableau ci-contre, La pente est exprimée de manière traditionnelle et non sous la forme du coefficient $1/b$. le décalage est donné pour l'origine en pression absolu zéro.

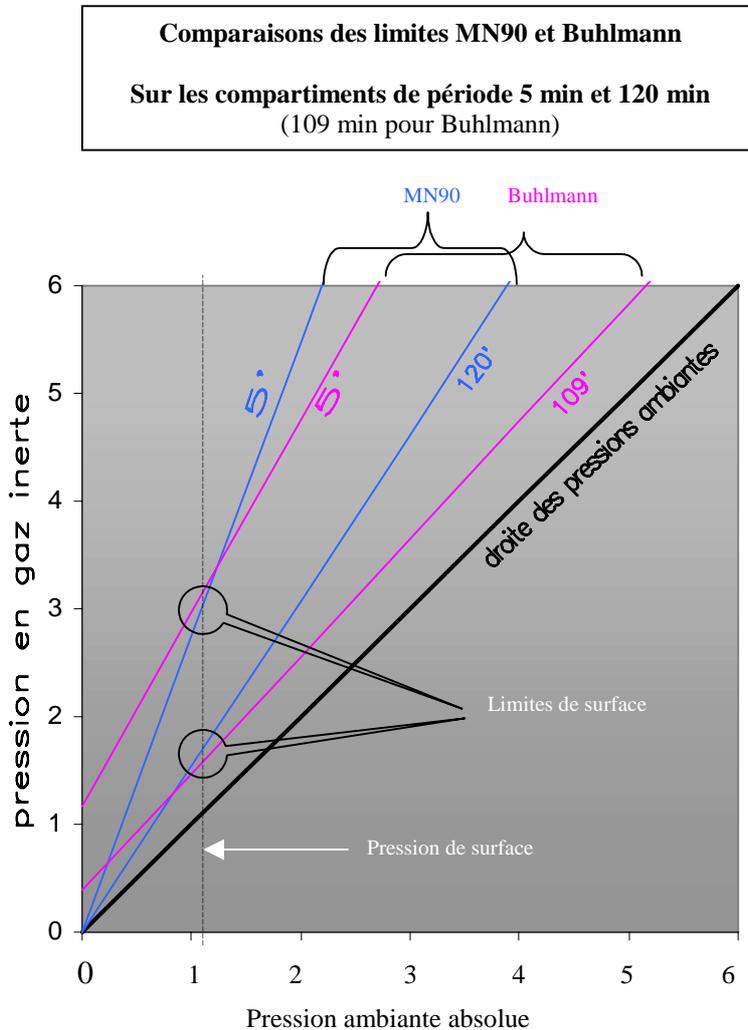
Le graphique ci-dessous ne montre que les compartiments extrêmes, les autres compartiments seraient compris entre les deux droite.

En surface (1,013 bar), les limites des compartiments courts et longs sont proches.

En deçà de 1 bar (en altitude, on voit que les limites établies par les MN90 sont incohérentes. Manifestement, elles n'ont pas été étudiées pour cela (même si un artifice de calcul est sensé le permettre) ; et d'autre part on sait que Buhlmann a beaucoup étudié les plongées en altitude (prise en compte de la vapeur d'eau dans la composition du gaz alvéolaire).

Au delà de 2 bars, les écarts deviennent très significatifs. Les M_values Buhlmann sont plus contraignantes que les coefficients MN90 (et que dire si on avait ajouté du conservatisme !). Mais il est vrai que les unes sont conçues pour être modélisées dans un ordinateur qui calcule en temps réel (comme l'aladin) et les autres sont faits pour construire des tables (qui ne prennent en compte que la prof. Max atteinte au cours de la plongée, ce qui offre une marge de sécurité dans la plupart des cas).

Le graphique suivant présente les coefficients MN90 et les M_values Buhlmann ZH-L16C pour les compartiments 5 min et 120 min. (109' pour Buhlmann)



Plus la profondeur augmente, plus la différence est importante.

Toutefois, ceci ne reste qu'un exercice purement théorique :

Il ne faut pas oublier que les tables MN90 ont fait l'objet de validations basées sur un grand nombre de plongées et que les paliers indiqués sur les tables peuvent ne pas correspondre à la limite théorique calculée avec le coefficient (durcissement).

Les tables doivent être utilisées avec les consignes qui vont avec (vitesse de remontée, profil de plongée, nombre de plongées par jour, ...)

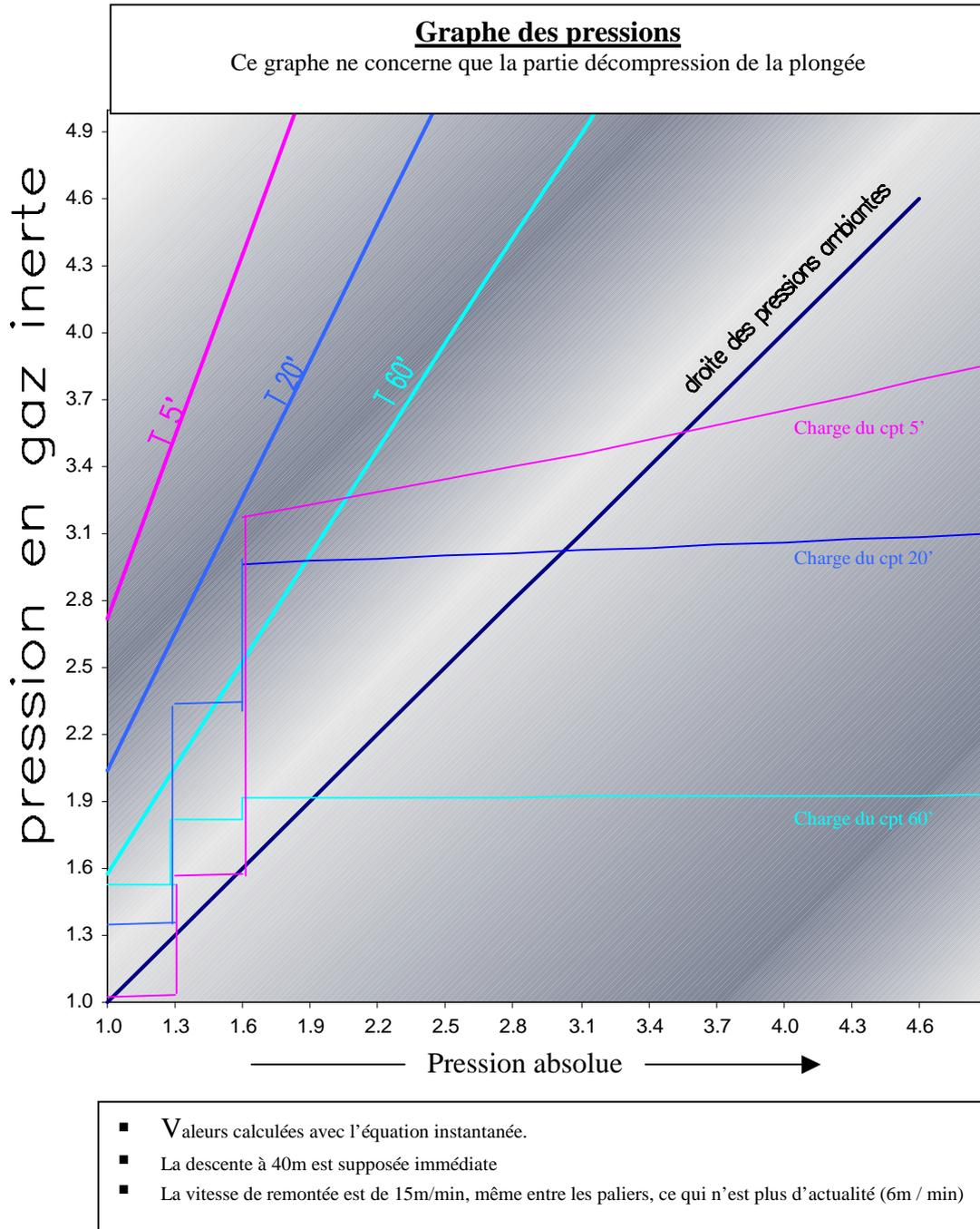
De plus, ces tables ont été faites pour des plongées à l'air dans la limite de 60m. Il est évident qu'aucune extrapolation n'est possible pour des profondeurs plus importantes, des temps supérieurs à ceux indiqués ou des mélanges autre que l'air.

En conclusion, il faut utiliser les outils pour ce à quoi ils sont destinés et ne pas mélanger les genres.

Exemple d'une plongée à 40m pendant 40 minutes.

- Palier de 13 minutes à 6m
- Palier de 40 minutes à 6m

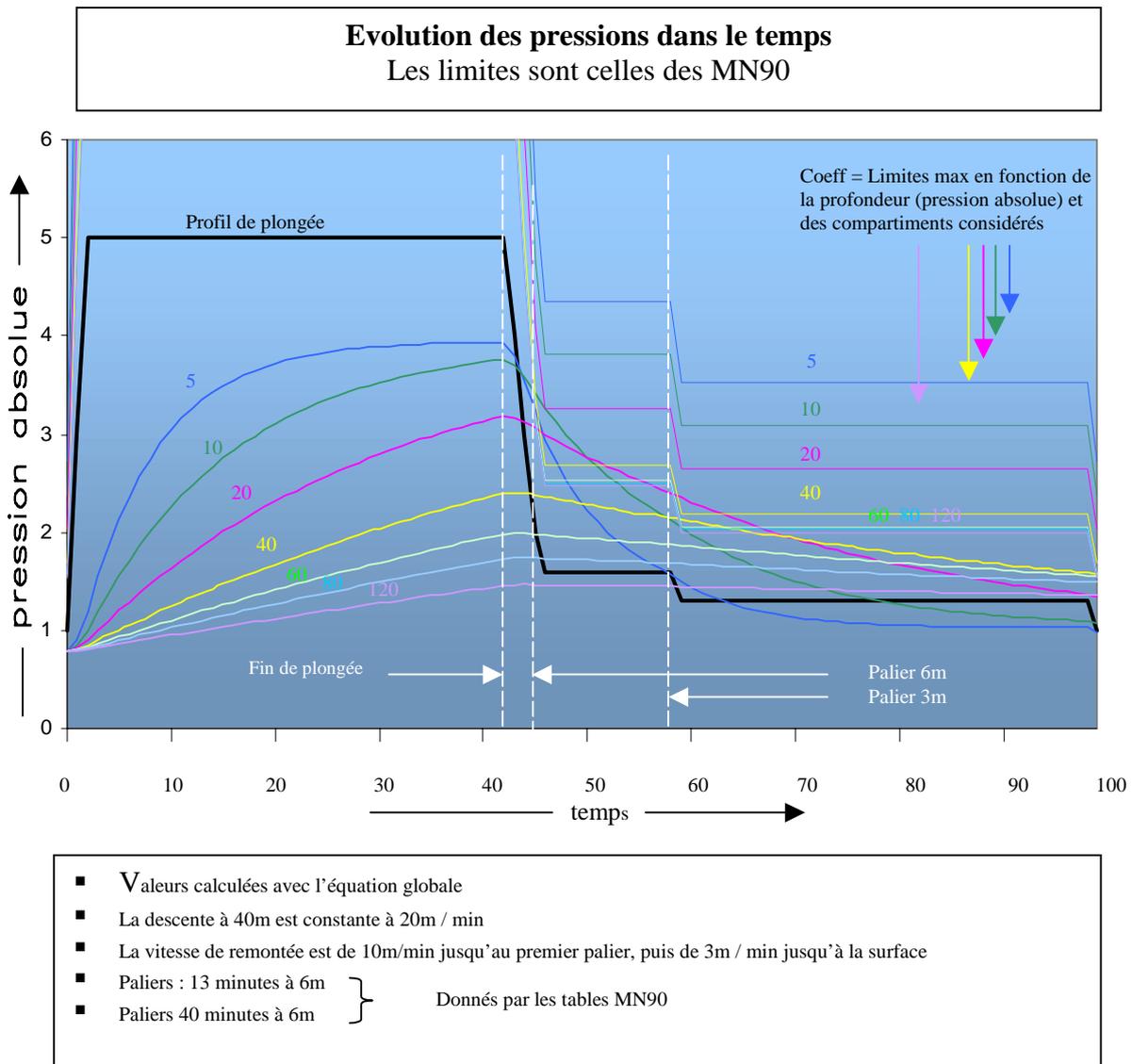
Seul les compartiments de période 5, 20 et 60 minutes des MN90 ont été considérés.



Comme dans les profils de décompression traditionnels, on retrouve un pic de sursaturation important en arrivant au premier palier (voir conservatisme et paliers profonds). Dans cet exemple, le premier palier de 6m a été déclenché par le compartiment de période 20 minutes, tandis que le palier de 3m a été imposé par le compartiment de période 60 minutes. On remarquera, que pour le compartiment de période 60 minutes, on termine la plongée très proche de la valeur maximale autorisée.

On constate également que les premiers paliers sont imposés par les compartiment courts, alors que les derniers paliers sont dus aux compartiment plus lents.

Reprenons maintenant le même exemple mais représenté sous une forme plus habituelle 'évolution des pression en fonction du temps'. Il s'agit toujours d'une plongée de 40 minutes à 40m concernant les compartiments MN90 de période 5, 10, 20, 40, 60, 80 et 120 minutes.



Le premier palier de 6m est toujours imposé par le compartiment de période 20 minutes, mais le palier de 3m est imposé par le compartiment de période 40 minutes (la différence avec le graphe précédent, provient du fait que nous avons introduit plus de compartiments et que nous avons donc une précision plus grande).

Plusieurs compartiments (lents) sont très proches de leur maximum lors du retour en surface.

Il s'agit toujours d'une plongée à l'air de 40 minutes à 40m.

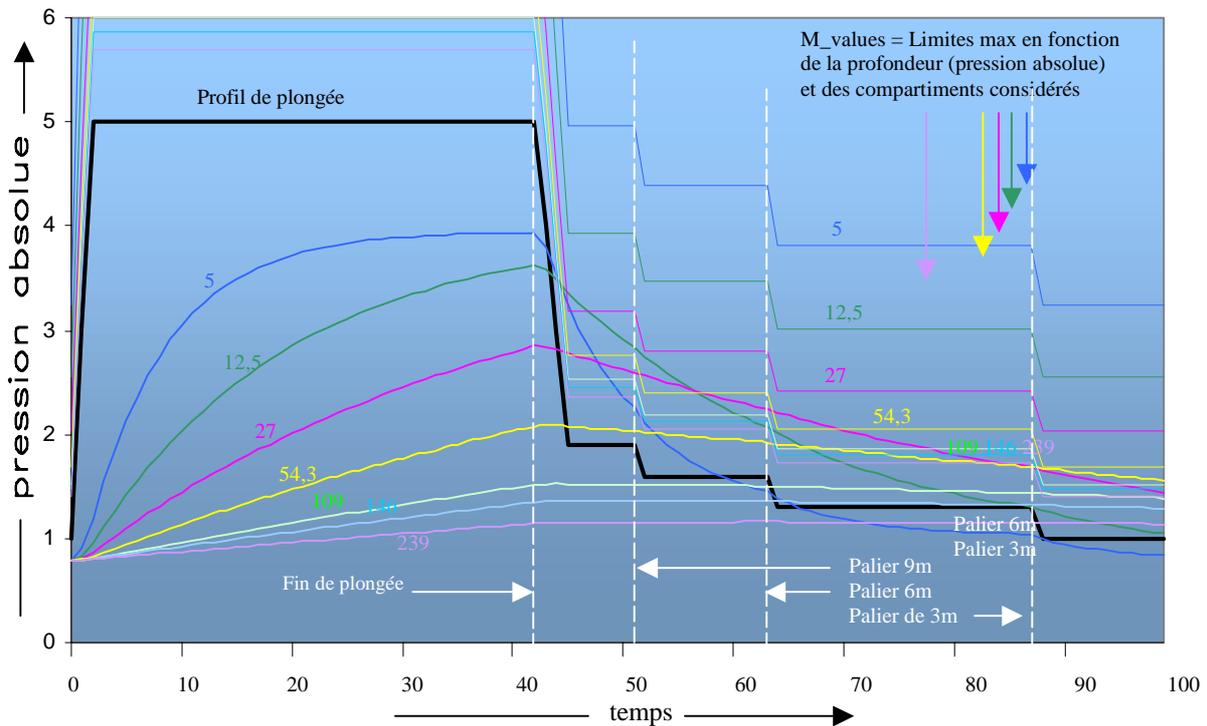
Les éléments dessinés sont basés sur les M_values Buhlmann pour les périodes 5, 12.5, 27, 54.3, 109, 146 et 239 minutes.

Les paliers ont été déterminés avec ZPLAN et GAP qui donnent des résultats similaires (aucun conservatisme, jeu de M_values ZH-L16B)

- Palier de 7 minutes à 9m.
- Palier de 12 minutes à 6m.
- Palier de 25 minutes à 3m.

Evolution des pressions dans le temps

Les limites sont les M_values Buhlmann



- Valeurs calculées avec l'équation globale
- La pression de vapeur d'eau n'a pas été prise en compte
- La descente à 40m est constante à 20m / min
- La vitesse de remontée est de 10m/min jusqu'au premier palier, puis de 3m / min jusqu'à la surface

Remarques :

Le temps total des paliers est de 44 minutes, à comparer aux 53 minutes de la même plongée calculées avec les coefficients MN90. Ceci peut paraître paradoxal mais nous comparons des paliers calculés théoriques (Buhlmann), avec des paliers que l'expérience a permis d'ajuster (MN90).

Bien qu'il y ait un palier de plus à 9m, la sortie se fait avec des valeurs proches des limites pour les compartiments plus lents (T54,3) .

❖ Conservatisme

Tout programme doit pouvoir proposer une méthode de conservatisme pour tenir compte des différences physiologiques de l'individu ainsi que ses tolérances devant la décompression. Ceci signifie que les limites établies par les physiologistes sont parfois trop 'larges' au vu des paramètres pris en compte pour la plongée (quelles soient dues au plongeur lui-même ou aux conditions particulières du profil envisagé). En général, les personnes ayant une surcharge pondérale ou une petite condition physique auront besoin d'appliquer un facteur de conservatisme substantiel. *Parce que nous sommes tous différents et que tous les jours ne sont pas faits pareils, nous avons besoin de pouvoir personnaliser notre profil.*

Méthode de conservatisme habituelle :

- Augmenter le pourcentage de gaz inerte du mélange dans les calculs.
- Appliquer un facteur de sécurité basé sur la profondeur en calculant le profil avec une profondeur supérieur à la réalité. C'est la méthode préconisée par Buhlmann dans son livre.
- Calculer le profil de décompression pour un temps de plongée supérieur au temps réel.
- Faire en sorte que les périodes des compartiments soient asymétriques (plus lentes) durant le processus de décharge.

Au cours de mes recherches et analyses sur la décompression, j'ai remarqué que dans certains cas il y avait des méthodes qui posaient problème, notamment en donnant des résultats incohérents (au vu du pourcentage de M_values), entre des plongées courtes à faible profondeur et des plongées longues et profondes. Bien plus, ces méthodes ne prennent pas en compte les dernières connaissances sur la mécanique des bulles. C'est pourquoi j'ai développé une méthode de conservatisme basée sur les facteurs de gradient.

Le principe est de pouvoir figer de combien on s'autorise à entrer dans la zone de décompression (zone comprise entre la pression ambiante et la M_value).

Deux chiffres suffiront à augmenter la distance de sécurité comprise entre la valeur de la pression partielle et la limite autorisée par la M_value, ceci quel que soit le compartiment (directeur à ce moment) et quelle que soit la pression ambiante (à ce moment de la plongée).

Voir l'article *'clarifier la confusion régnant autour des paliers profonds'* dans lequel on trouvera les informations nécessaires pour mettre en équation cette réduction des M_values.

❖ **Ces particulier de la remontée sans palier**
(par Erik Baker)

Commençons avec l'équation de base de Haldane (gardez à l'esprit que cette équation ne s'applique qu'à des profils à profondeur constante, pas pour des descentes ou des remontées) :

$$P = P_o + (P_i - P_o)(1 - e^{-kt})$$

qui stipule que P, la pression partielle finale d'un compartiment donné (en fonction du temps), sera égale à P_o, plus (ou moins) la charge de gaz qui aura augmentée de façon exponentielle. L'accroissement exponentiel de la charge de gaz, est donné par la seconde partie de l'équation : (P_i - P_o)(1 - e^{-kt}).

Remarquez que P_i - P_o est le gradient de pression entre la pression du gaz inspiré et la pression initiale du compartiment. C'est la force motrice de l'absorption 'ou du 'dégazage'.

On peut transformer l'équation d'Haldane afin de la résoudre pour le temps, t :

$$\begin{aligned} (P - P_o)/(P_i - P_o) &= 1 - e^{-kt} \\ e^{-kt} &= 1 - (P - P_o)/(P_i - P_o) \end{aligned}$$

avant d'introduire le logarithme népérien des deux cotés, vous devez simplifier l'équation :

$$\begin{aligned} e^{-kt} &= (P_i - P_o)/(P_i - P_o) - (P - P_o)/(P_i - P_o) \\ e^{-kt} &= [(P_i - P_o) - (P - P_o)]/(P_i - P_o) \\ e^{-kt} &= (P_i - P_o - P + P_o)/(P_i - P_o) \\ e^{-kt} &= (P_i - P)/(P_i - P_o) \end{aligned}$$

Maintenant vous pouvez introduire le logarithme :

$$\begin{aligned} \ln[e^{-kt}] &= \ln[(P_i - P)/(P_i - P_o)] \\ -kt &= \ln[(P_i - P)/(P_i - P_o)] \\ t &= (-1/k) * \ln[(P_i - P)/(P_i - P_o)] \end{aligned}$$

Ce coup-ci, t est le temps qu'il faudra au compartiment pour se charger en gaz à partir de la pression initiale P_i, jusqu'à la pression finale P_o.

Vous pouvez remplacer la pression finale P, par la valeur M_o de la M_value de surface :

$$t = (-1/k) * \ln[(P_i - M_o)/(P_i - P_o)]$$

Dans ce cas, le temps t, est le 'temps restant sans palier' ou 'la limite sans décompression' basée sur la charge en gaz actuelle P_o, et sur la pression du gaz inspiré P_i.

Exemple :

Un plongeur commence une plongée à l'air en descendant très rapidement jusqu'à une profondeur de 30 mètres (msw). Supposons que sa descente soit instantanée. Maintenant, il est sur le fond à 30 msw. Quel est 'le temps sans palier' ou 'la limite sans décompression' pour cette plongée ?

Remarque : toutes les pressions sont exprimées en pressions absolues

Si la plongée commence au niveau de la mer, la pression ambiante à 30 msw est de 30 msw plus la pression atmosphérique, soit 30msw + 10msw = 40msw.

La pression inspirée est la pression ambiante moins la pression de la vapeur d'eau.(valeur Buhlmann) multiplié par le pourcentage du gaz inerte, soit :

$$P_i = (P_{amb} - P_{H_2O}) * FN_2 = (40msw - 0,627msw) * 0,79 = 31,1msw.$$

La pression initiale du compartiment est due à la respiration de l'air atmosphérique depuis une longue période (nous sommes à saturation) :

$$P_o = (P_{amb} - P_{H_2O}) * FN_2 = (10msw - 0,627msw) * 0,79 = 7,4msw.$$

La M_{value} de surface dépend du compartiment. Voir table 2 dans le document '*comprendre les M_{values}* '.
Exemple : pour le compartiment n°2, basé sur le jeu de M_{values} Buhlmann ZH-L16B, $M_o = 25,4\text{msw}$.

La constante de temps k , du compartiment n°2, est le logarithme népérien de 2 divisé par la période :

$$K(\text{Cptn}^\circ 2) = \ln 2 / \text{période} = 0,693 / 8 \text{ min} = 0,086625$$

Maintenant on peut calculer le temps 'sans palier' ou 'No décompression Limit' pour ce compartiment.

$$t = (-1/k) * \ln[(P_i - P) / (P_i - P_o)]$$
$$t(\text{CptN}^\circ 2) = (-1,0 / 0,086625) * \ln[(31,1 - 25,4) / (31,1 - 7,4)] = 16,45 \text{ minutes.}$$

Ce processus est répété pour chaque compartiment, et la plus petite des durées calculées pour les compartiments, sera le 'temps sans palier' du profil.

Attention : L'équation donnant le temps de plongée 'sans palier', $t = (-1/k) * \ln[(P_i - P) / (P_i - P_o)]$, ne peut pas être appliquée si :

1. Si la quantité du logarithme figurant entre crochet, est un nombre négatif. Ceci parce que le logarithme d'un nombre négatif est un nombre complexe ($a + ib$) ce qui n'est pas une situation réelle pour la plongée.

La quantité du logarithme figurant entre crochet, sera négative si :

$$M_o > P_i > P_o$$

$$M_o < P_i < P_o$$

2. Si $P_i = P_o$, alors il y aura division par zéro, ce qui n'est pas possible.
3. Si la quantité du logarithme figurant entre crochet est un nombre positif supérieur à 1., alors le temps calculé par l'équation serait négatif, ce qui n'est pas non plus une situation réelle pour la plongée.

La quantité du logarithme figurant entre crochet, sera positive et supérieure à 1 si :

$$M_o < P_i > P_o$$

$$M_o > P_i < P_o$$

Il s'ensuit que l'équation $t = (-1/k) * \ln[(P_i - P) / (P_i - P_o)]$ donnant le temps de plongée 'sans palier' ne sera applicable que si :

$$P_i > M_o > P_o \text{ (phase de charge)}$$

$$P_i < M_o < P_o \text{ (phase de décharge)}$$

En d'autres termes, la valeur M_o doit être comprise entre P_i et P_o .

Pour une application typique de plongée loisir, l'équation 'sans palier' ne sera applicable que dans le cas où

$$P_i > M_o > P_o \text{ (phase de charge)}$$

Le programme doit être prévu pour prendre cette caractéristique en compte. Voici un exemple :

```
NOSTOP = 0,0
DO 100 I = 1,16
IF ((PIN2.GE.MVALUE(I)) .AND.(MVALUE(I) .GT. PN2O(I)) THEN
    TIME(I) = -1.0/KN2(I)*ALOG((PIN2 - MVALUE(I))/(PIN2 - PN2O(I)))
    NOSTOP = MIN(NOSTOP, TIME(I))
ENDIF
100 CONTINUE
```

Au cours de la plongée, les calculs de 'plongée sans palier' seront effectués après chaque modification de la profondeur (si le calcul a lieu en temps réel). Bien évidemment, l'ordinateur de plongée aura également toujours besoin de conserver séparément la valeur de la charge de gaz durant la plongée.

❖ Cas particulier du 'Do not fly'

Lorsqu'on prend l'avion, on est confronté à une baisse rapide de la pression ambiante dès que l'avion décolle. Si, à cause de cette dépression, un des tissus présente une sursaturation excessive, des symptômes de MDD sont à prévoir.

Pour éviter cette situation, il faut observer une période d'attente 'Do Not Fly'. La plupart des ordinateurs de plongée indiquent une durée à respecter avant de prendre l'avion. Cette période devrait correspondre à une désaturation totale. Cependant, il existe de telles différences entre les indications fournies par les différents ordinateurs du marché, qu'on peut se poser des questions.

D'après Buhlmann, la période 'Do not fly' doit permettre à tous les compartiments, même le plus long, de suffisamment désaturer pour supporter une chute brutale de pression (jusqu'à une certaine valeur) sans qu'aucune tolérance de sursaturation ne soit dépassée. La 'certaine valeur en question' est la pression habituelle régnant dans un avion commercial. Elle est à peu près équivalente à la pression atmosphérique régnant à 6000 pieds (1800m). Cependant, en cas d'urgence, la pression peut se retrouver à la pression ambiante régnant à l'altitude de vol. Aussi, par mesure de prudence, est-il plus prudent de tabler sur une altitude de 13000 pieds (3900m). l'ordinateur Aladin va même plus loin en prenant 15000 pieds, soit 4500m.

Pour vous embrouiller encore un peu plus (ou vous faire réfléchir), voici un petit exemple :

Après une même plongée, l'Aladin Air X indique un 'do not fly' de 9h, alors que le scubapro Buddy indique 24h. Tausim (un logiciel allemand présent sur le site <http://www.achim-und-kai.de/kai/>, sur lequel on trouvera également cet article), calcule quant à lui, une durée de 17h (mais avec une pression cabine de 1800m). où est la bonne réponse ?

D'ailleurs, pour ajouter à la confusion, il faut préciser que Tausim n'est pas plus précis car il arrive qu'avec une plongée profonde ou longue, les simulations de calcul faisant intervenir les compartiments lents, tombent sur une valeur négative du logarithme à cause des limites du modèle Buhlmann. Dans ce cas, on doit utiliser un compartiment un peu moins long, ce qui fausse le calcul. Ainsi, si on se sert de moins de 16 compartiments pour effectuer le calcul, on trouve une durée sous-évaluée.

Nous avons précisé que l'Aladin, par mesure de sécurité, se basait sur une pression cabine équivalente à 15000 pieds. Comment, dans ce cas, expliquer que l'Aladin indique une durée de 9h, ce qui est bien inférieur à ce qu'indiquent les calculs basés sur 13000 pieds ?

C'est parce que l'Aladin se base sur les compartiments de période moyenne au lieu d'utiliser le plus lent.

L'expérience a montrée que les symptômes d'ADD produit lors d'un vol effectué trop tôt, affectent (principalement ou uniquement ???) les compartiment de période intermédiaire.

Alors que l'Aladin s'appuie sur le modèle ZH-L8ADT qui est plus conservateur (spécialement lors des plongées successives), et non sur le ZH-L16, on pourrait être amené à penser que le temps indiqué avant de pouvoir prendre l'avion, est un peu maigre. Malheureusement, il n'y a rien dans la notice qui précise les compartiments utilisés pour le calcul.

Comment fait le scubapro ? Il indique simplement le temps nécessaire pour terminer la désaturation.

En utilisant le modèle ZH-L16, les quatre compartiment les plus longs ne sont pratiquement jamais impliqués dans les profils de plongée, aussi le temps 'do not fly' est toujours plus long que celui indiqué par Tausim. Le fait d'utiliser le temps nécessaire pour terminer la désaturation va toujours dans le sens de la sécurité. Cependant, cela signifie également que le 'do not fly' issu de deux ou trois plongées par jour, et quelque fois plus, pendant plusieurs jours, peut allègrement dépasser les 24h. Combien de plongeurs accepteraient de ne pas plonger les deux derniers jours de leur séjour plongée ?

Comment font les autres fabricants d'ordinateur ? A ce propos, ils invoquent 'le secret de fabrication'. Ou donnent des informations floues et inutilisables.

C'est le côté obscur des ordinateurs de plongée qui constitue un risque potentiel pour le plongeur.

Bref, avant de prendre l'avion vous devez être 'Nitrogen clean'. Ce qui signifie qu'il est plus prudent d'avoir complètement désaturé.

Etablir le profil de décompression avec palier

Rappels : Nous avons donc découpé notre profil de plongée en segments homogènes. Un segment homogène est une 'portion' de la plongée qui présente les mêmes caractéristiques en terme de composition de gaz respiré et en terme de vitesse de descente ou de remontée (ou de plongée à profondeur constante). Pour chaque segment de plongée, nous sommes donc capable de calculer la charge en gaz inerte de chaque compartiment

Il s'agit maintenant d'autoriser la remontée en s'appuyant sur une des théories en vigueur. Nous utiliserons ici les travaux de Buhlmann et ses M_values .

Le problème est le suivant :

A partir du fond, il s'agit de calculer jusqu'où on peut remonter sans que la charge en gaz inerte de chacun des compartiments n'excède sa M_value respective. Mathématiquement, la vitesse de remontée étant fixée, cela revient à trouver le point d'intersection entre l'équation de droite de la M_value et l'équation de Shreiner. Erik Baker dit que la résolution est impossible (infinité de solution), aussi faut-il procéder par petits incréments. Ces incréments ont été fixés à 3m (ou 10 fsw).

La décompression idéale serait une décompression continue où la vitesse serait suffisamment lente pour qu'à aucun moment un compartiment n'excède sa M_value . Dans la pratique, ceci n'est pas réalisable et c'est pourquoi on associe une vitesse de remontée préconisée avec des arrêts indispensables qui laissent le temps aux compartiments de suffisamment dégazer pour rejoindre le palier suivant sans risque.

Méthode de calcul :

- Recherche de la profondeur plafond par tâtonnement

à partir de la profondeur fond actuelle, déterminer la profondeur du **prochain palier standard**.
ex : si on se trouve à 30m, le prochain palier standard est à 27m, si on se trouve à 32m, le prochain palier standard se situe à 30m. vérifier si la profondeur n'est pas inférieure à zéro, sinon la ramener à zéro. En d'autres termes, comme on souhaite terminer par les paliers habituels (9m, 6m, 3m), cela oblige à 'bricoler' le premier palier fond qui pourra faire moins de 3m par rapport à la profondeur fond. Il ne sera pas forcément égal à la profondeur fond moins 3m.

Erik Baker préconise de comparer la valeur de charge en gaz des compartiment (au fond) avec la M_value correspondant à la profondeur du prochain palier standard. Si c'est ok, alors on calcule la charge en gaz des compartiments à la profondeur de ce palier standard et on recompare aux M_values car dans certaines circonstances, les compartiment longs peuvent continuer à se charger lors de la remontée (cas des plongées 'coup de vent', profondes et très courtes). Et la profondeur du palier standard qui était acceptable, ne l'est plus.

Je pense qu'il est préférable de d'abord calculer la charge en gaz qu'auront les compartiments à la profondeur du prochain palier standard (avec l'équation de Schreiner) et de comparer cette valeur avec les M_values . Ainsi, si la comparaison permet de remonter jusqu'à ce palier standard, nous sommes certain de ne pas avoir de surprise.

Pour les calculs de charge en gaz, ainsi que le calcul des M_values respectives, attention de vérifier qu'on se situe toujours dans le même segment de plongée. Sinon il faudra faire un premier calcul jusqu'à la limite supérieur du segment précédent, puis repartir avec les données du segment suivant jusqu'à notre palier.

Tant que la comparaison Charge en gaz et M_values est favorable (pour tous les compartiments), on recommence le processus afin de remonter jusqu'à ce qu'on soit obligé de faire un palier.

- Calcul de la durée du palier de décompression

Lorsque pour un compartiment, la charge en gaz est supérieure à sa M_value calculée pour un prochain palier standard, ceci signifie qu'on doit rester à la profondeur où l'on est, le temps de suffisamment dégazer pour reprendre le processus de remontée. Encore une fois, nous allons segmenter la durée en intervalles d'une minute au cours de laquelle on calcule la nouvelle charge en gaz (on peut prendre l'équation instantanée car la profondeur est constante). Au terme de cette minute, on effectue à nouveau la comparaison de la charge avec les M_values du prochain palier standard. Tant que la comparaison est

défavorable, on ajoute une minute et on recommence les calculs. Quand la comparaison devient favorable, on reprend la remontée comme indiquée dans le paragraphe précédent.

- Graphisme et éditions

Il s'agit de proposer les informations nécessaires au plongeur pour qu'il puisse juger du profil de sa décompression et qu'il ait les documents indispensables à sa plongée.

Attention :

- on vérifiera toujours qu'il n'y a pas de changement de segment.
- Tous les calculs s'appliquent aux 16 compartiments.
- Pour la détermination du run-time, le programmeur devra faire un choix concernant les durées nécessaires pour remonter d'un palier à l'autre (les incorporer au palier suivant ?).
- les M_values pourront subir une modification liée à un éventuel conservatisme.
- si on le souhaite, on calculera la toxicité de l'oxygène et la consommation des gaz respirés

Outils :

- On a besoin des M_values Buhlmann qu'on trouvera en annexe
- On utilisera les équations de droite basées sur les coefficients Buhlmann pour le calcul des M_values. On calculera une M_value intermédiaire dans le cas des plongées aux mélanges.
- On utilisera l'équation de Schreiner pour le calcul de la charge de gaz pour tous les segments présentant une vitesse de descente ou de remontée non nulle :
- On utilisera l'équation de Haldane pour le calcul de la charge en gaz des segments présentant une profondeur constante.

Il existe un exemple de programme écrit en Fortran, sur le site <ftp://ftp.decompression.org/pub/>
Et plus particulièrement sur la partie occupée par Erik Baker : '*dissolved gas deco program*'

Toxicité de l'oxygène

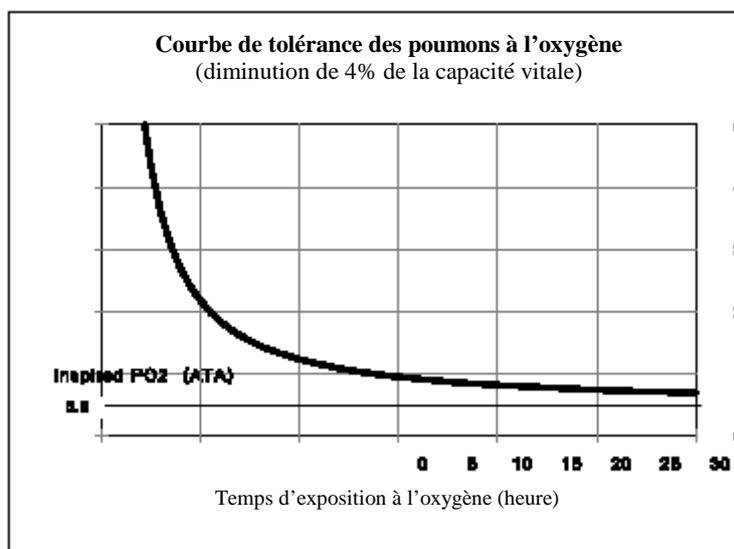
(par Erik Baker)

La gestion de l'exposition à la toxicité de l'oxygène est un élément important de la plongée technique. La plupart du temps, elle est prise en compte durant la préparation du planning de plongée en utilisant un programme informatique de planification de la plongée/décompression. Ayant moi-même développé un tel programme, en utilisant le bon langage Fortran/OLE, j'ai trouvé qu'incorporer des calculs de toxicité d'oxygène m'impliquait davantage que d'appliquer strictement des équation déjà établies. Le principal défi était d'obtenir les calculs 'exacts' d'un profil de plongée durant les segments de descente ou de remontée. Aussi, je dépoussiérais mes livres de maths, effectuais quelques recherches complémentaires et aboutis à une méthode de calcul que je souhaite partager avec la communauté des plongeurs techniques. L'information présentée ici prétend seulement à être une présentation ou un rappel pour certains et à offrir une suggestion de programmation pour d'autres.

Retour arrière

Habituellement, on 'piste' deux types de paramètre de toxicité de l'oxygène à travers les calculs de la plongée technique. Le premier est la toxicité pulmonaire de l'oxygène qui concerne essentiellement les effets sur les poumons, d'une exposition prolongée d'oxygène à une pression partielle élevée. Le second est la toxicité de l'oxygène sur le système nerveux central (CNS) qui concerne essentiellement les effets sur le cerveau, d'une pression partielle d'oxygène élevée, pendant une exposition courte à moyenne. Les deux paramètres de toxicité de l'oxygène sont fonction de la pression partielle de l'oxygène respiré dans le mélange gazeux, ainsi que du temps d'exposition. Le CNS (toxicité de l'oxygène sur le système nerveux central) est le paramètre qui a le plus d'impact, et qui concerne le plus la plongée technique, cependant, certaines 'méga-plongée' entreprise dans un passé récent (Bushmansgat, Zacaton, etc.) ont atteintes les limites de la toxicité pulmonaires de l'oxygène également.

L'équation utilisée pour calculer la toxicité pulmonaire de l'oxygène fut développée à partir des courbes de tolérance des poumons à l'oxygène, comme représenté en figure 1. Les courbes furent construites en mesurant la diminution de la capacité vitale 'd'hommes normaux' respirant une pression partielle élevée d'oxygène. La capacité vitale est le volume maximal qu'une personne peut expirer après avoir préalablement rempli ses poumons au maximum de ses possibilités d'extension puis avoir expiré au maximum de ses possibilités de contraction.



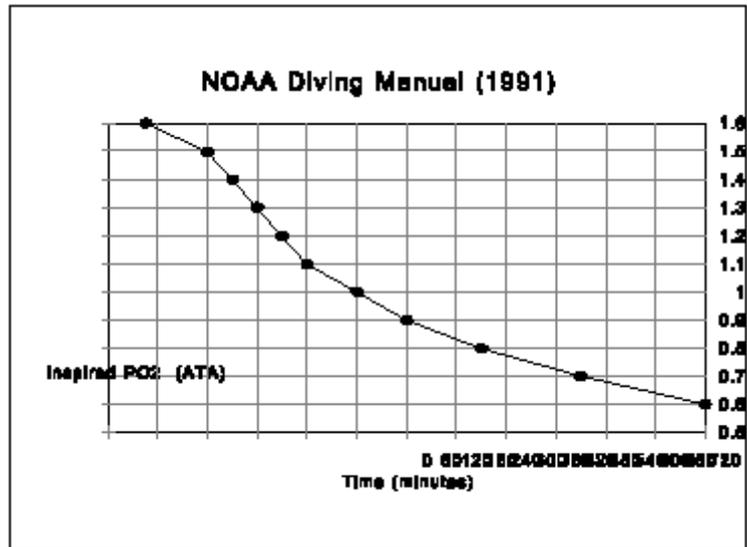
Les courbes de tolérance sont hyperboliques avec des asymptotes en zéro (pour le temps) et pour la pression PO₂ = 0,5 ce qui est le seuil approximatif de détection des effets pulmonaires. La courbe, qui représente une décroissance de 4% dans la capacité vitale, était utilisée pour établir les limites de la toxicité pulmonaire de l'oxygène en plongée technique.

S'appuyant sur ces courbes de tolérance, le Dr. Christian J. Lambertsen et ses collègues du 'Institute for Environmental Medicine, University of Pennsylvania', développèrent la méthode du 'calcul permanent' pour présenter la toxicité pulmonaire de l'oxygène sous la forme d'unité de dose toxique pour les poumons (UPDT = Unit Pulmonary Toxic Dose) et de cumul de doses toxiques (CPDT = Cumulative Pulmonary Dose Toxic). Dans le monde de la plongée technique, l'UPDT est plus connue sous le terme de OTU (Oxygen Toxicity Unit). Une UPDT (ou OTU) est le degré de toxicité produit par l'oxygène sur les poumons, lorsqu'on respire de l'oxygène pur (100%) à la pression de 1 atm pendant 1 minute. Le calcul du CPDT (voir équation 1 ci-dessous) convertit

toutes les expositions continues à l'oxygène (PO_2 supérieur à 0,5 bar) et les combinaisons de durée pour les exprimer sous la forme de UPDT (ou OTU). Le CPDT est calculé pour chaque segment du profil de plongée et les résultats (exprimés en OTU) sont additionnés pour donner le nombre total d'OTU de la plongée. Ce nombre peut alors être comparé avec les limites quotidiennes et sur plusieurs jours établies par le Dr. Bill Hamilton et ses collègues dans le (NOAA Repetitive Excursions (REPEX) Procedures Report). Après publication, ces limites ont été largement adoptées par la communauté des plongeurs techniques.

Ndl : ces textes sont consultables sur <ftp://ftp.decompression.org/pub/>

Les limites de la toxicité de l'oxygène (CNS) établies par le NOAA, sont représentées en figure 2. Ces limites s'appuient sur les recherches des Dr. F.K. Butler et Edward D. Thalmann, U.S. Navy Experimental Diving Unit, et les Dr. Christian J. Lambertsen et Russell E. Peterson du 'Institute for Environmental Medicine, University of Pennsylvania'. Ces limites prennent la sécurité en considération et ont été largement adoptées par la communauté des plongeurs techniques.



La méthode habituelle en vigueur pour 'traquer' le CNS, est de calculer une fraction de CNS pour chaque segment du profil de plongée, puis d'additionner les résultats pour produire une fraction totale du CNS de la plongée. Ces fractions sont souvent multipliées par 100 pour être exprimées en pourcentage (CNS %). La fraction de CNS est calculée en prenant le temps passé à une PO_2 donnée et en le divisant par la limite de temps donnée par la table NOAA pour cette PO_2 . Quand l'addition de toutes les fractions de CNS calculés pour le profil de plongée atteignent 1 (ou 100%) alors les limites de la toxicité de l'oxygène CNS sont atteintes pour cette plongée.

Comme les limites du CNS sont données par le NOAA sous forme de points discrets (valeurs discontinues), et non sous la forme d'une fonction mathématique continue, il est pratique de relier ces points par des lignes droites comme représenté dans la figure 2. De cette manière, il est possible de créer une série d'équations de droite qui décrivent les limites du CNS en fonction du temps, pour différentes gammes de PO_2 . Comme démontré plus loin dans cet article, cette manipulation facilite le processus de calcul, spécialement dans les programmes informatiques.

Pour les calculs qui nous intéressent, la toxicité de l'oxygène n'est pas définie lorsque la PO_2 est inférieure ou égale à 0,5. Quel que soit le moment où la PO_2 dépasse 0,5 durant un profil de plongée, que ce soit à profondeur constante ou durant une descente ou une remontée à vitesse constante, les deux paramètres de toxicité de l'oxygène pourront être calculés.

Il est un domaine concernant la toxicité de l'oxygène, que cet article n'aborde pas, c'est celui de 'l'extention de la tolérance à l'oxygène'. Il y a de rares articles dans la littérature académique, qui indiquent qu'une pratique de respiration alternée de l'oxygène (par exemple 20 minutes d' O_2 , puis 5 minute de rinçage à l'air) augmente les limites de tolérance à la toxicité pulmonaire de l'oxygène d'un facteur 2. Il est possible que le CNS puisse également être repoussé d'autant. Le problème est, qu'à ma connaissance, aucune méthode fiable n'a encore été développée pour calculer le taux de récupération à partir d'expositions à l'oxygène durant ces périodes intermittentes de rinçage. Ceci est un sujet de recherche futur pour nos spécialistes. Cependant, il est une pratique commune en plongée qui consiste à calculer une diminution de la fraction de CNS durant les intervalles de surface, en utilisant une équation exponentielle décroissante basée sur une période de 90 minutes.

❖ Calculs de la toxicité pulmonaire de l'oxygène

Profil à profondeur constante :

Pour un profil à profondeur constante (pour lequel la PO_2 reste constante (même mélange)), le cumul des doses de toxicité pulmonaires (CPTD), exprimées sous forme d'unité de toxicité de l'oxygène (OTU), sont calculées par l'équation 1 :

$$OTU = t_x \cdot \left(\frac{0,5}{PO_2 - 0,5} \right)^{-5} \quad (\text{Eq. 1})$$

où t_x est le temps d'exposition, PO_2 est constante et $\frac{-5}{6}$ est un exposant $-0,8333$.

Profils de descente ou remontée à taux constant :

Pour un profil où la descente ou la remontée, s'effectue à un taux constant (pour lequel la PO_2 varie à un taux constant), le CPTD, exprimé en OTU, peut être calculé avec l'équation 2 :

L'équation 1 peut être exprimée sous la forme d'une différentielle avec PO_2 étant une fonction du temps.

$$\frac{dOTU}{dt_x} = \left(\frac{0,5}{PO_{2o} + kt \cdot 0,5} \right)^{\frac{5}{6}}$$

L'équation 2 est obtenue par intégration :

$$OTU = \frac{\frac{3}{11} \cdot t_x}{PO_{2f} - PO_{2i}} \cdot \left[\left(\frac{PO_{2f} - 0,5}{0,5} \right)^{\frac{11}{6}} - \left(\frac{PO_{2i} - 0,5}{0,5} \right)^{\frac{11}{6}} \right] \quad (\text{Eq. 2})$$

où t_x est le temps d'exposition sur l'intervalle, PO_{2i} est la PO_2 initiale sur l'intervalle,

PO_{2f} est la PO_2 finale sur l'intervalle et $\frac{11}{6}$ est l'exposant 1,8333.

Quelques étapes de calcul avant de pouvoir utiliser l'équation 2.

Encore quelques étapes avant que l'on ne puisse appliquer l'équation 2 pour les calculs. Dans l'exemple qui suit, les calculs sont basés sur une plongée au niveau de la mer et sont exprimés dans les unités américaines.

1. Détermination des périodes pour lesquelles le profil de descente ou de remontée présente un taux constant.

Temps sur le segment = (profondeur finale – profondeur initiale) / taux* de descente ou de remontée

*Note : la descente sera exprimée avec un nombre positif (ex : +60fsw / min), tandis que la remontée sera exprimée avec un nombre négatif (ex : -30fsw / min)

2. Détermination des pressions initiales et finales du profil, en atmosphères absolues (ATM) :

Pression initiale (Atm) = (profondeur de départ + 33) / 33

Pression finale (Atm) = (profondeur finale + 33) / 33

3. Des pressions initiales et finales (Atm), déterminons laquelle est minimale et laquelle est maximale :

Pression maximale (Atm) = Max(pression initiale, pression finale)

Pression minimale (Atm) = Min(pression initiale, pression finale)

4. Déterminons la PO₂ max et la PO₂ min du profil !

PO₂ maximale = Pression maximale (Atm) x fraction de O₂ du mélange respiratoire

PO₂ minimale = pression minimale (Atm) x fraction de O₂ dans le mélange respiratoire

5. Déterminons si les PO₂ minimales et maximales entrent bien dans la gamme de toxicité de l'oxygène (supérieure à 0,5) et déclarons une nouvelle variable (Low PO₂) pour décrire la plus petite PO₂ du profile qui entre dans la gamme de toxicité de l'oxygène

Si la PO₂ maximale ≤ 0,5, alors [le calcul ne s'applique pas]

Si PO₂ minimale ≤ 0,5, alors initialiser Low PO₂ à 0,5, sinon initialiser Low PO₂ avec la PO₂ minimale

6. Déterminons le temps d'exposition dans la gamme des toxicité de l'oxygène :

$$\text{Temps d'exposition} = \text{Période} \cdot \left(\frac{\text{PO}_2 \text{ maximale} - \text{Low PO}_2}{\text{PO}_2 \text{ maximale} - \text{PO}_2 \text{ minimale}} \right)$$

Exemple de calcul :

Considérons le profil suivant : utilisation d'un nitrox 32% (en dehors de toute considération de décompression).

Période 1 descente de 0 à 120fsw à 40fsw / min
 Période 2 profondeur constant à 120fsw pendant 22 minutes.
 Période 3 longue et lente remontée de 120fsw à 0 fsw à -4fsw / min

Combien cumulera-t-on d'OTU pour cette plongée ? la solution des équation sera exprimée dans un format informatique.

```
For Segment 1 SGTIME = (120.0 - 0.0)/40.0 = 3.0 min
IPATA = (0.0 + 33.0)/33.0 = 1.0 ATA
FPATA = (120.0 + 33.0)/33.0 = 4.636 ATA
MAXATA = MAX(1.0, 4.636) = 4.636 ATA
MINATA = MIN(1.0, 4.636) = 1.0 ATA
MAXPO2 = 4.636*0.32 = 1.484 ATA
MINPO2 = 1.0*0.32 = 0.32 ATA
IF (1.484 .LE. 0.5) GOTO 000 [false, therefore continue]
IF (0.32 .LT. 0.5) THEN [true]
    LOWPO2 = 0.5
O2TIME = 3.0*(1.484 - 0.5)/(1.484 - 0.32) = 2.536 min
(using Equation 2)
OTU = 3.0/11.0*2.536/((1.484 - 0.5)*((1.484 - 0.5)/0.5)
    **((11.0/6.0) - ((0.5 - 0.5)/0.5)**((11.0/6.0)))
= 2.431 OTU's
```

```
For Segment 2 PATA = (120.0 +33.0)/33.0 = 4.636 ATA
PO2 = 4.636*0.32 = 1.484 ATA
(using Equation 1)
OTU = 22.0*((0.5/(1.484 - 0.5))**(-5.0/6.0)) = 38.664 OTU's
```

```
For Segment 3 SGTIME = (0.0 - 120.0)/-4.0 = 30.0 min
IPATA = (120.0 + 33.0)/33.0 = 4.636 ATA
FPATA = (0.0 + 33.0)/33.0 = 1.0 ATA
MAXATA = MAX(4.636, 1.0) = 4.636 ATA
MINATA = MIN(4.636, 1.0) = 1.0 ATA
MAXPO2 = 4.636*0.32 = 1.484 ATA
MINPO2 = 1.0*0.32 = 0.32 ATA
IF (1.484 .LE. 0.5) GOTO 000 [false, therefore continue]
IF (0.32 .LT. 0.5) THEN [true]
    LOWPO2 = 0.5
O2TIME = 30.0*(1.484 - 0.5)/(1.484 - 0.32) = 25.359 min
(using Equation 2)
OTU = 3.0/11.0*25.359/((0.5 - 1.484)*((0.5 - 0.5)/0.5)
    **((11.0/6.0) - ((1.484 - 0.5)/0.5)**((11.0/6.0)))
= 24.309 OTU's
```

Total OTU's for this dive = 2.431 + 38.664 + 24.309 = **65.404 OTU's**

❖ Calculs de la toxicité sur le système nerveux central (CNS)

Profil à profondeur constante.

Dans un profil où la profondeur est constante (dans lequel la PO₂ reste constante), la fraction de CNS est calculée par l'équation 3 :

$$\text{fraction de CNS} = \frac{\text{temps resté à la PO}_2}{\text{temps limite pour cette PO}_2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Profil de descente ou de remontée à taux constant :

Pour un profil de descente ou de remontée à taux constant (où la PO₂ varie à un taux constant), la fraction de CNS pour une gamme de PO₂ donnée par la fonction linéaire de limite de temps, peut être calculée par l'équation 4 :

$$\text{fraction de CNS} = \frac{1}{mk} \cdot [\ln |T_{\text{lim}i} + mkt_x| \cdot |\ln T_{\text{lim}f}|] \quad (\text{Eq. 4})$$

où m est la pente de l'équation linéaire de limite de temps, k est la constante de taux de changement de la PO₂, dans le temps, T_{limi} est le temps limite initial pour l'intervalle et t_x est le temps d'exposition dans l'intervalle.

Discussion :

Comme mentionné précédemment, il est pratique, pour des raisons de calcul, de décrire les NOAA CNS (limites de toxicité de l'oxygène) comme une série d'équations de droite pour chaque intervalle de PO₂. Ces équations du temps limite T_{lim} comme une fonction de la PO₂ sur la pente de la droite (y = mx + b). Une ligne droite peut être tracée en passant par plus de deux points des limites de temps NOAA, pour l'intervalle de PO₂ allant de 0,9 à 1,1 et de 1,1 à 1,5. J'ai fait une extrapolation pour décrire une équation de limite de temps pour l'intervalle de PO₂ allant de 0,5 à 0,6 de manière à compléter la série. L'équation devient :

$$T_{\text{lim}} = mPO_2 + b \quad (\text{Eq. 5})$$

Où m est la pente de la droite et b est le décalage pour l'intervalle de PO₂ donné. Les coefficients pour la série d'équations linéaires sont :

Intervalle de PO ₂	Pente	décalage
0,5 – 0,6	-1800	1800
0,6 – 0,7	-1500	1620
0,7 – 0,8	-1200	1410
0,8 – 0,9	-900	1170
0,9 – 1,1	-600	900
1,1 – 1,5	-300	570
1,5 – 1,6	-750	1245

Les calculs de T_{lim} à l'intérieur d'un intervalle de PO₂, s'appliquent lorsque la PO₂ considérée est supérieure à la plus petite limite dans l'intervalle des PO₂ et est inférieure ou égale à la plus grande des limites de l'intervalle. L'équation 3 peut alors s'exprimer ainsi :

$$\text{fraction de CNS} = \frac{\text{temps passé à la PO}_2}{T_{\text{lim}}} = \frac{\text{temps passé à la PO}_2}{mPO_2 + b} \quad (\text{Eq. 6})$$

L'équation 4 peut être dérivée de l'équation 6 de la façon suivante :

Comme la PO₂ varie à un taux constant en correspondance avec le temps durant la descente ou la remontée à vitesse constante, alors l'équation 6 peut s'écrire sous forme d'une différentielle avec PO₂ fonction du temps. :

$$d\text{fraction CNS} = \frac{dt}{m(PO_{2o} + kt) + b} = \frac{dt}{mPO_{2o} + mkt + b}$$

Méthode de programmation informatique pour déterminer l'équation linéaire pour T_{lim} :

Une méthode pour défiler et stocker les intervalles de PO₂ ainsi que les coefficients pour les équations linéaire de limite de temps doit être définie dans le programme. Dans le langage de programmation Fortran, ceci peut être accompli dans un sous-programme BLOCK DATA qui utilisera un tableau unidimensionnel avec des variables indicées.

```

BLOCK DATA CNSLIM
REAL PO2LO, PO2HI, LIMSLP, LIMINT
DIMENSION PO2LO(7), PO2HI(7), LIMSLP(7), LIMINT(7)
COMMON /A/ PO2LO, PO2HI, LIMSLP, LIMINT
DATA PO2LO(1)/0.5/, PO2LO(2)/0.6/, PO2LO(3)/0.7/, PO2LO(4)/0.8/,
* PO2LO(5)/0.9/, PO2LO(6)/1.1/, PO2LO(7)/1.5/
DATA PO2HI(1)/0.6/, PO2HI(2)/0.7/, PO2HI(3)/0.8/, PO2HI(4)/0.9/,
* PO2HI(5)/1.1/, PO2HI(6)/1.5/, PO2HI(7)/1.6/
DATA LIMSLP(1)/-1800.0/, LIMSLP(2)/-1500.0/, LIMSLP(3)/-1200.0/,
* LIMSLP(4)/-900.0/, LIMSLP(5)/-600.0/, LIMSLP(6)/-300.0/,
* LIMSLP(7)/-750.0/
DATA LIMINT(1)/1800.0/, LIMINT(2)/1620.0/, LIMINT(3)/1410.0/,
* LIMINT(4)/1170.0/, LIMINT(5)/900.0/, LIMINT(6)/570.0/,
* LIMINT(7)/1245.0/
END
    
```

avec :

PO2LO = limite basse de l'intervalle des PO₂

PO2HI = limite haute de l'intervalle des PO₂

LIMSLP = coefficient de la pente dans l'intervalle des PO₂

LIMINT = décalage à l'origine pour l'intervalle des PO₂

Les étapes de calcul pour un profil constant :

1. Déterminer si la PO₂ est à l'intérieur de l'intervalle de toxicité de l'oxygène.
si la $PO_2 \leq 0,5$ alors il n'y a rien à calculer.
2. Trouver à quel intervalle correspond notre PO₂ actuelle afin de calculer T_{lim}. Cette étape s'accomplit en utilisant une boucle de programme avec la possibilité de sortir de la boucle une fois l'intervalle trouvé.
3. Calculer le temps limite T_{lim}, pour la PO₂ actuelle.
4. calculer la fraction de CNS en utilisant l'équation 3.

Dans le langage Fortran, les étapes précédentes peuvent s'écrire ainsi :

```

IF (PO2 .LE. 0.5) GOTO 000 [exit this calculation sequence]
DO 10 I = 1,7
IF ((PO2 .GT. PO2LO(I)) .AND. (PO2 .LE. PO2HI(I))) THEN
    TLIM = LIMSLP(I)*PO2 + LIMINT(I)
    GOTO 000 [exit loop]
END IF
10 CONTINUE
CNS = TIME/TLIM
    
```

5.

6.

Etapes de calcul pour un profil de descente ou de remontée à taux constant :

Les 6 premières étapes de la séquence sont identiques au calcul d'OTU pour un profil de descente ou de remontée. Les étapes supplémentaires nécessaires sont :

7. Déterminer combien de temps on passe dans chaque intervalle de PO₂ (chacun possédant des coefficients différents pour l'équation de limite de temps CNS) et déterminer quelles sont les pressions initiales et finales pour chaque intervalle respectif. Cette étape est accomplie en utilisant des blocks IF structurés à l'intérieur d'une boucle de programme qui initialisera dans les variables indicées du tableau, les temps d'exposition à l'oxygène ainsi que les PO₂ initiales et finales pour chaque intervalle. Le temps d'exposition à l'oxygène pour un intervalle de PO₂, est donné par : Temps d'O₂ pour l'intervalle = temps d'O₂ pour le segment x valeur absolue (PO₂ finale pour l'intervalle - PO₂ initiale pour l'intervalle) + (PO₂ max pour le segment - Low PO₂ pour le segment)
8. Calculer la limite de temps initiale et le produit des constantes mxk pour chaque intervalle de PO₂. Calculer la fraction de CNS pour chaque intervalle de PO₂ en utilisant l'équation 4. Cette étape est accomplie en utilisant une boucle de programme pour un intervalle donné et qui se débranche quand il n'y a pas de temps d'exposition à l'oxygène à calculer.
9. Additionner les fractions de CNS de chaque intervalle de PO₂, pour produire une fraction de CNS pour le segment de plongée. Cette étape est accomplie dans une boucle du programme.

Computer format:

In the FORTRAN programming language, the above steps can be written as:

```

SGTIME = (FDEPTH - SDEPTH)/RATE
IPATA = (SDEPTH + 33.0)/33.0
FPATA = (FDEPTH + 33.0)/33.0
MAXATA = MAX(IPATA, FPATA)
MINATA = MIN(IPATA, FPATA)
MAXPO2 = MAXATA * FO2(GASMIX)
MINPO2 = MINATA * FO2(GASMIX)
IF (MAXPO2 .LE. 0.5) GOTO 000 [exit this calculation sequence]
IF (MINPO2 .LT. 0.5) THEN
    LOWPO2 = 0.5
ELSE
    LOWPO2 = MINPO2
END IF
O2TIME = SGTIME*(MAXPO2 - LOWPO2)/(MAXPO2 - MINPO2)
DO 10 I = 1,7
IF ((MAXPO2 .GT. PO2LO(I)) .AND. (LOWPO2 .LE. PO2HI(I))) THEN
    IF ((MAXPO2 .GE. PO2HI(I)) .AND. (LOWPO2 .LT. PO2LO(I))) THEN
        IF (SDEPTH .GT. FDEPTH) THEN
            PO2O(I) = PO2HI(I)
            PO2F(I) = PO2LO(I)
        ELSE
            PO2O(I) = PO2LO(I)
            PO2F(I) = PO2HI(I)
        END IF
        SEGPO2(I) = PO2F(I) - PO2O(I)
    ELSE IF ((MAXPO2 .LT. PO2HI(I)) .AND. (LOWPO2 .LE. PO2LO(I))) THEN
        IF (SDEPTH .GT. FDEPTH) THEN
            PO2O(I) = MAXPO2
            PO2F(I) = PO2LO(I)
        ELSE
            PO2O(I) = PO2LO(I)
            PO2F(I) = MAXPO2
        END IF
    
```

```

      SEGPO2(I) = PO2F(I) - PO2O(I)
    ELSE IF ((LOWPO2 .GT. PO2LO(I)) .AND. (MAXPO2 .GE. PO2HI(I))) THEN
      IF (SDEPTH .GT. FDEPTH) THEN
        PO2O(I) = PO2HI(I)
        PO2F(I) = LOWPO2
      ELSE
        PO2O(I) = LOWPO2
        PO2F(I) = PO2HI(I)
      END IF
      SEGPO2(I) = PO2F(I) - PO2O(I)
    ELSE
      IF (SDEPTH .GT. FDEPTH) THEN
        PO2O(I) = MAXPO2
        PO2F(I) = LOWPO2
      ELSE
        PO2O(I) = LOWPO2
        PO2F(I) = MAXPO2
      END IF
      SEGPO2(I) = PO2F(I) - PO2O(I)
    END IF
    OTIME(I) = O2TIME*ABS(SEGPO2(I))/(MAXPO2 - LOWPO2)
  ELSE
    OTIME(I) = 0.0
  END IF
10  CONTINUE
    DO 20 I = 1,7
      IF (OTIME(I) .EQ. 0.0) THEN
        CNS(I) = 0.0
        GOTO 20
      ELSE
        TLIMI(I) = LIMSLP(I)*PO2O(I) + LIMINT(I)
        MK(I) = LIMSLP(I)*(SEGPO2(I)/OTIME(I))
        CNS(I) = 1.0/MK(I)*(LOG(ABS(TLIMI(I) + MK(I)*OTIME(I))) -
*      LOG(ABS(TLIMI(I))))
      END IF
20  CONTINUE
    SUMCNS = 0.0
    DO 30 I = 1,7
      TMPCNS = SUMCNS
      SUMCNS = TMPCNS + CNS(I)
30  CONTINUE

```

Exemple de calcul :

Considérons le profil suivant : utilisation d'un nitrox 32% (en dehors de toute considération de décompression).

Période 1 descente de 0 à 120fsw à 40fsw / min
Période 2 profondeur constant à 120fsw pendant 22 minutes.
Période 3 longue et lente remontée de 120fsw à 0 fsw à -4fsw / min

Quelle est la fraction de CNS accumulée pendant cette plongée ? solution du programme :

Pour le segment 1, le programme a calculé une fraction de CNS = 0,0090

Pour le segment 2, le programme a calculé une fraction de CNS = 0,1761

Pour le segment 3, le programme a calculé une fraction de CNS = 0,0895

La fraction totale de CNS pour cette plongée = 0,0090 + 0,1761 + 0,0895 = 0,2746 = **27,5%**

Conclusion

Les informations présentées dans cet article sont une suggestion de méthode pour calculer précisément les paramètres de toxicité de l'oxygène dans le cadre de leurs utilisations actuelle dans la plongée technique. Je ne prétend pas suggérer ou présenter des nouveautés physiologiques issues de manipulations mathématiques. L'idée est simplement d'établir des calculs précis de la toxicité de l'oxygène en fonction de la pression partielle actuelle de l'oxygène et du temps d'exposition.

Références / informations supplémentaires.

Clark, J.M. Oxygen Toxicity. In *The Physiology and Medicine of Diving*, pp. 121-169. Eds. P.B. Bennett & D.H. Elliott. 4th ed. London; Philadelphia: W.B. Saunders, 1993.

Hamilton, R.W., Kenyon, D.J., Peterson, R.E., Butler, G.J., & Beers, D.M. *REPEX: Development of Repetitive Excursions, Surfacing Techniques, and Oxygen Procedures for Habitat Diving*. NURP Technical Report 88-1A, 1988.

Hamilton, R.W., Kenyon, D.J. & Peterson, R.E. *REPEX Habitat Diving Procedures: Repetitive Vertical Excursions, Oxygen Limits, and Surfacing Techniques*. NURP Technical Report 88-1B, 1988.

Lambertsen, C.J. Extension of Oxygen Tolerance in Man: Philosophy and Significance. *Experimental Lung Research*. **14** (Suppl.), pp. 1035-1058, 1988.

NOAA Diving Manual, US Department of Commerce, October 1991.

Annexe : Coefficients Buhlmann

Buhlmann ZH-L16 M-values hélium (1990)				Buhlmann ZH-L16 M-values azote (1990)					
Cpt N°	Per. min	Coeff a	Coeff b	Cpt N°	Per. min	A Coeff a bar	B Coeff a bar	C Coeff a bar	Coeff b
1	1,51	1,6189	0,4245	1	4,0	1,2599	1,2599	1,2599	0,5050
1b	1,88		0,4770	1b	5,0	1,1696	1,1696	1,1696	0,5578
2	3,02	1,3830	0,5747	2	8,0	1,0000	1,0000	1,0000	0,6514
3	4,72	1,1919	0,6527	3	12,5	0,8618	0,8618	0,8618	0,7222
4	6,99	1,0458	0,7223	4	18,5	0,7562	0,7562	0,7562	0,7825
5	10,21	0,9220	0,7582	5	27,0	0,6667	0,6667	0,6667	0,8126
6	14,48	0,8205	0,7957	6	38,3	0,5933	0,5933	0,5600	0,8434
7	20,53	0,7305	0,8279	7	54,3	0,5282	0,5282	0,4947	0,8693
8	29,11	0,6502	0,8553	8	77,0	0,4710	0,4710	0,4500	0,8910
9	41,20	0,5950	0,8757	9	109	0,4187	0,4187	0,4187	0,9092
10	55,19	0,5545	0,8903	10	146	0,3798	0,3798	0,3798	0,9222
11	70,69	0,5333	0,8997	11	187	0,3497	0,3497	0,3497	0,9319
12	90,34	0,5189	0,9073	12	239	0,3223	0,3223	0,3223	0,9403
13	115,29	0,5181	0,9122	13	305	0,2971	0,2971	0,2850	0,9477
14	147,42	0,5176	0,9171	14	390	0,2737	0,2737	0,2737	0,9544
15	188,24	0,5172	0,9217	15	498	0,2523	0,2523	0,2523	0,9602
16	240,03	0,5119	0,9267	16	635	0,2327	0,2327	0,2327	0,9653