

Apport des nouveaux modèles de décompression à microbulles

JP Imbert, Divetech, France

Notre tradition en matière de décompression est basée sur les principes établis par Haldane en 1908 (1). C'est la référence classique utilisée pour le calcul des tables actuelles de la plongée militaire, commerciale ou sportive. Elles utilisent toutes la même structure mathématique : la charge des tissus en gaz est représentée par une série de compartiments exponentiels parallèles, le critère de remontée prend la forme d'une relation linéaire entre la pression ambiante et la tension maximale de gaz dissous dans les compartiments. Travaillant avec des hypothèses similaires tous les modèles de décompression actuels produisent des profils de décompression semblables caractérisée par une remontée de grande amplitude entre le départ du fond et les premiers paliers.

Quelque soient les limites théoriques, le mobile principal des études de décompression reste la pression opérationnelle. Les gens ont besoin de tables. Actuellement, ce sont les plongeurs tech qui viennent de s'approprier les techniques de la plongée profonde au trimix qui sont devenu les plus demandeurs. Communicant sur le Net, les plongeurs spéléo et d'épave ont développé une culture internationale et utilisent des procédures très inventives pour leur explorations. D'autres communautés de plongeurs, comme les plongeurs d'éponges ou de corail, ont eux aussi développé leurs propres méthodes de travail. Ce qu'il y a d'étonnant, c'est que toutes ces tentatives isolées semblent converger vers des solutions similaires, utilisant soit des paliers profonds, soit des vitesses de remontée ralenties. Il semblerait que ces différentes approches empiriques aboutissent à des profils différents de ceux du modèle de Haldane (2). La question est actuellement de comprendre ce qui se cache derrière ces nouvelles tables de décompression.

Les risques de la décompression

En matière de sécurité, les performances d'une table de décompression se définissent en terme de risque d'accidents de décompression (ADD). Ce risque est exprimé à travers un taux : le nombre d'accidents par nombre d'expositions (plongées) (3). Ce risque était difficile à évaluer avant l'avènement des bases de données, qui ont été développées dans la plongée offshore dans les années 80. Ces bases de données ont apporté le volume de données et la fiabilité de l'information qui ont permis d'utiliser les outils statistiques et de préciser ce risque (4, 5, 6).

Les symptômes d'ADD couvrent une large gamme de problèmes qui comprend de simples démangeaisons cutanées, les douleurs articulaires et enfin les symptômes neurologiques. Le risque d'accidents de décompression doit donc être précisé en terme de gravité des symptômes. Pour simplifier le schéma de traitement sur les chantiers, les docteurs de l'US Navy ont introduit il y a longtemps une classification des symptômes en deux catégories qui sert aujourd'hui de référence : accident de type I et accident de type II.

Les ADD de type I comprennent les symptômes sans gravité, comme les douleurs articulaires, musculaires ou les phénomènes cutanés. Parce que les symptômes sont évidents, le problème est identifié rapidement et le traitement déclenché sans délais. Dans la plus part des cas, une recompression à 12 mètres et la prise d'oxygène au masque suffira pour soulager rapidement les symptômes. Les symptômes se résolvent d'ailleurs dans 95% des cas (7) et le plongeur est généralement autorisé à replonger dans les jours qui suivent. Vu les symptômes et les conséquences pour le plongeur, l'ADD de type I n'est pas un accident grave.

Les ADD de type II sont toujours sérieux parce qu'ils affectent soit le système respiratoire, soit le système nerveux. Les symptômes qui comprennent au début des symptômes vagues comme une fatigue anormale, des maux de tête, un sentiment de malaise rendent le diagnostic difficile et

retardent la décision de traitement. Le traitement est complexe et nécessite une recompression importante, de longues périodes de respiration de l'oxygène au masque, l'injection de liquides de remplissage en intraveineuse et parfois de corticoïdes (7). L'ADD de type II est un accident grave surtout si le diagnostic n'est pas fait rapidement et le traitement est retardé. Les conséquences pour le plongeur peuvent être dramatiques.

La Comex avait développé dans les années 70 des tables héliox unitaires appelées Cx70, qui furent largement utilisées sur les chantiers soit en plongée tourelle, soit en plongée narguilé. L'analyse des performances de ces tables qui fut réalisée quelques années plus tard à l'aide de la banque de données Comex (8), révéla une répartition inégales des types d'ADD en fonction du profil de plongée. Les durées au fond importantes, de l'ordre de 90 à 120 minutes, avaient tendance à donner surtout des accidents de type douleurs articulaires, ce qui est dans la logique des modèles à gaz dissous : temps au fond important, beaucoup de gaz dissous, remontée relativement lente, grosses bulles tissulaires en fin de décompression, douleurs articulaires. Par contre les courtes durées (10 à 30 minutes) donnaient surtout des ADD de type vestibulaire et les durées intermédiaires (30 à 60 minutes), des symptômes neurologiques médullaires. Typiques de leur époque, ces tables présentaient toutes une remontée rapide au premier palier et des paliers proches de la surface. Par exemple, une table héliox de 20 minutes à 66 mètres, caractérisée par une remontée à 18 m/minute du fond et un premier palier à 12 mètres donna plusieurs ADD vestibulaires. Il apparaît donc que le profil de remontée caractérise la taille des bulles et conditionne leur devenir, et répartit ainsi de façon inégale les symptômes.

Si le profil conditionne le type de symptôme, le risque pour un plongeur Tech, qui dépasse rarement 20 minutes de temps au fond, est essentiellement des symptômes de type vestibulaire. C'est déjà un accident grave quand il arrive en surface, avec des nausées et des vomissements. Cependant, comme les plongeurs Tech augment sans cesse leur profondeur d'intervention, il est à parier qu'un jour ces symptômes apparaîtront sous l'eau, avec les conséquences dramatiques qu'on imagine. Il faut donc donner aux plongeurs Tech des tables très sûres.

Stratégies pour améliorer les décompressions

En fait, les communautés de plongeurs ont identifié le rôle critique de la remontée initiale et su développer empiriquement leurs propres solutions. La modification la plus courante porte sur la vitesse de remontée. En plongée commerciale par exemple, les chefs de chantiers admettaient volontiers utiliser une vitesse bien inférieure aux 18 m/min indiquées dans les tables US Navy.

Une autre modification courante des tables consiste à introduire un palier à mi-profondeur. Une des histoires les plus anciennes que je connaisse est celle de deux corailleurs sardes qui travaillaient dans les années 50. Ils avaient pris l'habitude de s'arrêter à la mi-profondeur pour chanter un cantique. Suivant la sévérité de la plongée, ils chantaient plus ou moins de versets. Autre référence tout aussi ancienne mais plus respectable, la Royal Navy, dans des versions antérieures de son manuel de plongée, donnait des tables de décompression à l'air très profondes (jusqu'à 90 mètres). Pour une raison inconnue, ces tables présentaient un palier à mi-profondeur, qui devait avoir un rôle important dans ces décompressions critiques. Enfin, le palier à mi-profondeur devint célèbre à la suite d'un article du plongeur américain Richard Pyle, publié dans les revues Aquacorps et Deep Tech (2), qui fut repris ensuite par Bruce Wienke (9). Aujourd'hui, les paliers à mi-profondeur sont devenus incontournables et la plus part des logiciels de calcul de décompression les proposent en option.

La plongée au corail

Les bijoux en corail rouge sont une tradition méditerranéenne et le corail a été pêché pendant des millénaires à l'aide d'un assemblage de poutres et de filets, appelé la « croix », que les pêcheurs raclaient le long des tombants.

De nos jours, il y a encore une petite communauté de corailleurs établis sur la côte d'Azur et en Corse qui font la pêche au corail en bouteilles. C'est un métier difficile et en pleine saison, les corailleurs plongent à l'air entre 80 et 90m, pour des durées de 20 minutes

environ. Depuis quelques années, ils utilisent aussi le trimix jusqu'à 120-130 mètres. Les corailleurs utilisent une variété de tables de décompression qu'ils ont développées eux-mêmes à force d'essais et dont ils sont très jaloux. En fait, il s'agit plutôt d'une série de paliers, toujours les mêmes, qui sont appliqués à des durées variables en fonction de la profondeur. Par exemple, 25 minutes à 80 mètres, 20 minutes à 90 mètres, etc. Les corailleurs emportent généralement une bi bouteilles avec le mélange fond et une troisième bouteille au milieu avec un mélange intermédiaire en secours. De ce fait, ils dépendent d'un mélange de décompression, qui leur est fourni par un narguilé descendu par le marin à partir du bateau. Ils terminent toujours la décompression à l'oxygène, soit dans l'eau, soit dans un caisson en décompression de surface

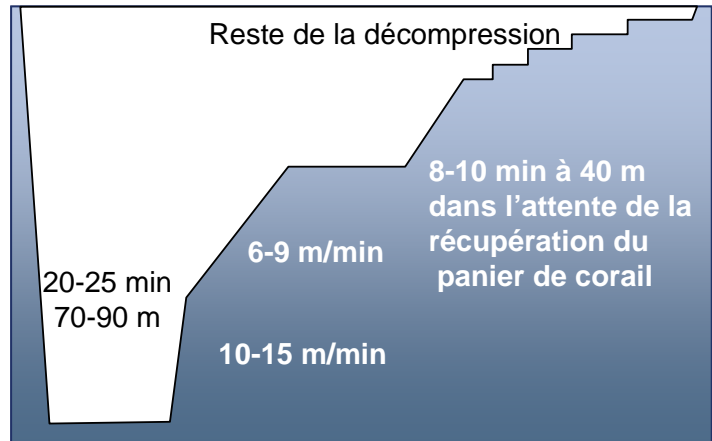


Figure 1 : Profil typique d'une plongée au corail

Les tables corailleurs apparaissent dramatiquement courtes quand elles sont comparées aux tables commerciales ou sportives. La raison pour laquelle les corailleurs survivent à de telles décompressions est sans doute liée à leur procédure de travail. Les corailleuses racontent qu'ils décollent rapidement du fond pour se dégager de la narcose. Ensuite, ils ralentissent jusqu'à 9-6 mètres par minutes pour attendre le bateau qui suit leurs bulles. Quand le bateau est positionné au dessus d'eux, ils larguent un parachute avec le panier de corail au bout. Une fois que le marin a récupéré la récolte, il utilise la ligne pour faire descendre le narguilé. C'est seulement après être passé sur narguilé que les plongeurs reprennent leur décompression. Ainsi, ils passent 8 à 10 minutes supplémentaires à la profondeur de 40 mètres, une procédure qui apparemment améliore la sécurité de leur remontée (voir figure no 1).

Plongées profondes expérimentales à la Comex

En 1977, la Comex, alors une des plus importantes compagnie de travaux sous-marins offshore, voulu préparer la plongée profonde à grande échelle et s'attacha à sélectionner une population de plongeurs sur la base de leur aptitude à résister au Syndrome Nerveux des Hautes Pressions. Un protocole expérimental fut mis au point selon lequel les sujets étaient rapidement pressurisés à 180 mètres pour effectuer ensuite une batterie de tests neuropsychologiques de deux heures. La personne en charge du calcul de la décompression eu alors des difficultés pour définir un modèle mathématique capable de calculer de telles décompressions. Elle utilisa donc une méthode graphique basée sur une représentation en papier semi-log, dans laquelle les remontées apparaissaient comme des segments de droite (figure 2). Après quelques ajustements, cette méthode permit la mise au point d'une table exceptionnelle, qui fut utilisée par 49 fois sans aucun accrochage (10). La caractéristique du tracé semi-log et de dilater la partie profonde de la remontée et d'introduire des paliers profonds que les méthodes de calcul traditionnelles ne sauraient définir. Il suffit pour s'en rendre compte de comparer avec des tests de tables réalisés entre 150 et 180 mètres par la Duke University (11) et la Marine Nationale Française qui n'ont jamais été satisfaisants.

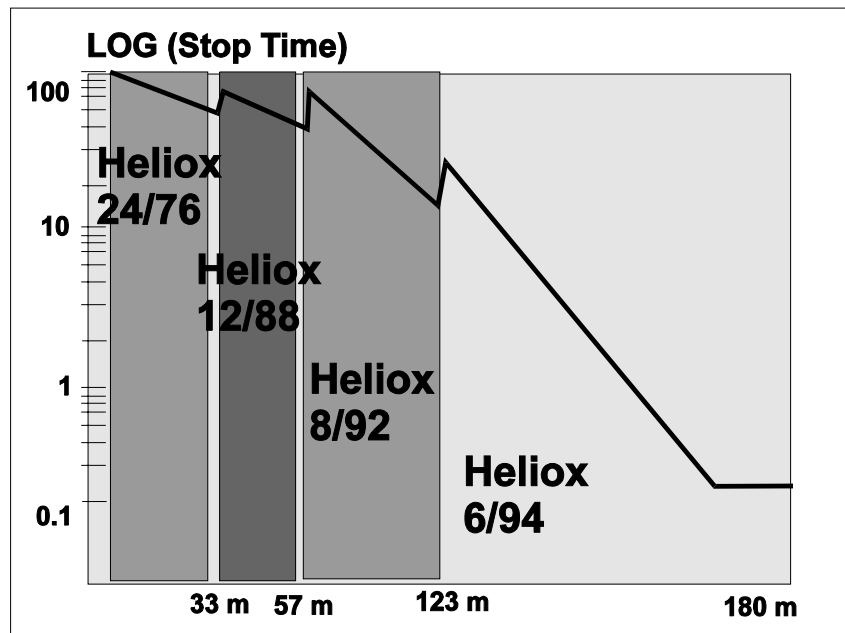


Figure 2 : Tracé en semi-log de la plongée expérimentale Comex 180m/120 min réalisée en 1977. La décompression utilise une série de mélanges qui sont indiqués sur le profil de remontée.

Stratégies possibles de remontée

La méthode classique de calcul de tables de décompression est basée sur le modèle de Haldane et s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- 1) la plongée nécessite la respiration d'air comprimé et entraîne la dissolution de l'azote dans les tissus.
- 2) la sévérité de la plongée (dose) est liée à la quantité d'azote dissous dans les tissus au moment où le plongeur débute sa remontée.
- 3) le phénomène critique est la formation d'une phase gazeuse pendant la remontée.
- 4) les symptômes articulaires et neurologiques ne sont pas différenciés et sont considérés comme des niveaux de sévérité différente d'un même problème.
- 5) les sites possibles de la formation de la phase gazeuse sont les tissus et ou encore la versant sanguin veineux du tissu. Ce site n'est pas identifié précisément et est représenté par une série de compartiments à réponse exponentielle.
- 6) la stratégie de la décompression consiste à contrôler la quantité de gaz dissous dans chaque compartiment pour éviter la formation d'une phase gazeuse, et par suite, l'apparition d'un ADD (figure 3).

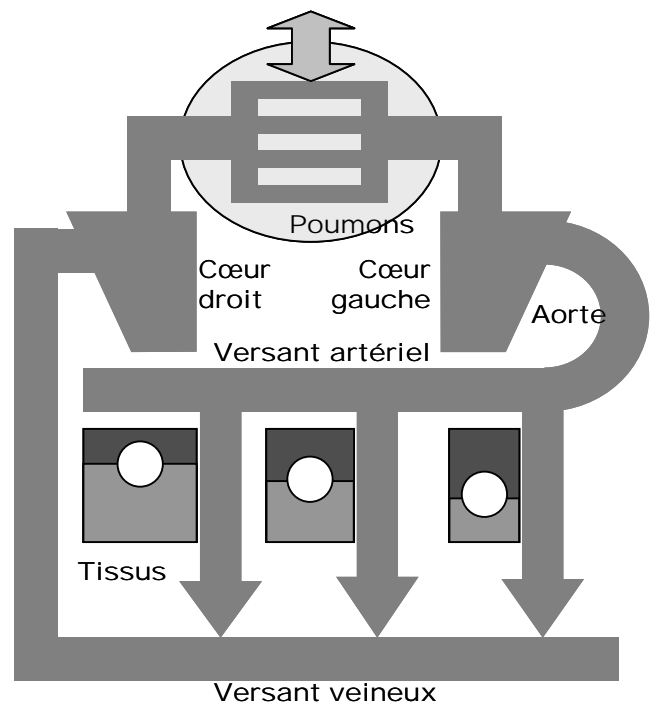


Figure 3: modèles classiques de décompression.

Ces hypothèses sont la base des calculs de la plus part des tables existantes, bien qu'il existe une grande variété dans les modèles d'échanges gazeux ou les critères de remonté utilisés pour contrôler

la phase gazeuse. On ne peut pas nier une certaine efficacité à ces modèles, puisque les statistiques disponibles sur les tables actuelles donnent un facteur de risque de l'ordre de 0.5 % (12). Cependant, on peut remettre en cause leur stratégie relative à la remontée au premier palier. Ces modèles travaillent sur les quantités de gaz dissous. Leur logique est qu'il faut remonter rapidement près de la surface pour « créer le gradient », c'est-à-dire augmenter la différence entre gaz dissous et gaz ambiant pour faciliter le dégazage. Plus la remontée est de grande amplitude, plus les échanges sont accélérés. Une logique qui viserait à contrôler non plus les gaz dissous mais les bulles formées pendant cette même remontée, donnerait un résultat inverse : ralentir le début de la remontée (13). Plusieurs études réalisées avec la détection Doppler ont confirmé l'influence de cette remontée initiale sur les taux de bulles détectés (14, 15, 16).

Finalement, il ressort de ce qui précède que les stratégies de décompression « qui marchent » tendent à ralentir la phase initiale en utilisant (figure no 4) :

- Simplement une vitesse de remontée lente, par exemple 9 m/min,
- Des paliers de décompressions plus profonds,
- Eventuellement un palier à mi-profondeur,
- Une combinaison de ces différentes façons de faire.

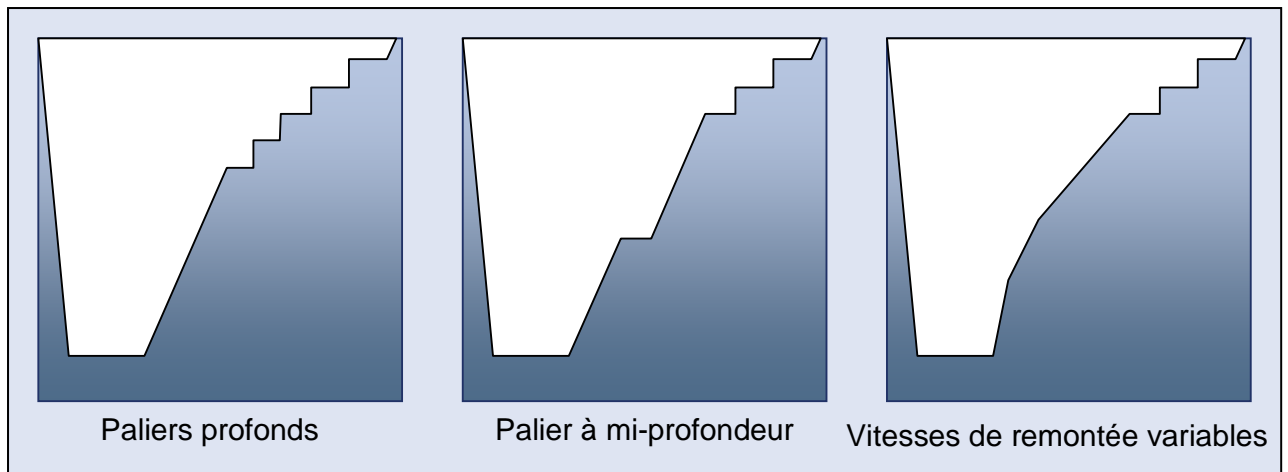


Figure 4 : stratégies identifiées pour des décompressions qui « marchent ».

Il est difficile de documenter de façon rationnelle ces différentes stratégies. Le plus part des cas rapportés sont réalisés en conditions non contrôlées et relèvent plus de l'anecdote que du fait scientifique. On peut cependant considérer que pour des plongées profondes, la criticité de l'exposition remplace la signification statistique. La profondeur est un facteur évidemment critique. Une stratégie de remontée élaborée ne changera rien à une plongée à l'air à 21 mètres. Par contre, pour des plongées trimix, la vitesse de remontée au premier palier joue un rôle essentiel. Cependant, la convergence des faits amène à essayer de comprendre où se terminent les modèles classiques et où commence les modèles à microbulles.

L'hypothèse des bulles artérielles

La toute première formulation de l'hypothèse des bulles artérielles peut être attribué à Haldane lui-même, qui écrit page 352 de sa célèbre publication de 1908 :

"If small bubbles are carried through the lung capillaries and pass, for instance, to a slowly de-saturating part of the spinal cord, they will there increase in size and may produce serious blockage of the circulation or direct mechanical damage".

Plus près de nous, dans un papier publié en 1971, Hills (17) pu monter, en utilisant un modèle animal, que les symptômes de l'ADD pouvaient changer du type I au type II, en passant de la décompression à remontée continue à la décompression de surface. Cette expérience élégante démontrait l'existence d'un mécanisme différent pour les symptômes des ADD de type II qui fut plus tard attribué aux bulles artérielles. Le modèle fut ensuite repris par James pour discuter des symptômes neurologiques centraux et médullaires (20, 21). Les bulles artérielles ont le rôle majeur dans les d'ADD neurologiques liés à Foramen Ovale Perméable (23, 24). Finalement, Hennessy publia en 1989 tous les aspects physiques du scénario des bulles artérielles dans un papier (25) qui sert aujourd'hui de référence au modèle.

Dans l'hypothèse des bulles artérielles, le pouvoir filtrant des poumons est la clef de la décompression (figure 5). Le rayon critique de filtration est supposé être de l'ordre 5 microns, c'est-à-dire de celui des globules rouges. Une publication sur les techniques ultrasonores utilisant un agent de contraste appelé « Levolist » confirment cette hypothèse. Cet agent contient des microbulles stabilisées dans de la galactose, avec des diamètres calibrés entre 3 et 8 microns. L'agent de contraste est injecté en intraveineuse et les mesures sont faites quelques minutes plus tard sur les artères cérébrales, rénales ou des membres inférieurs. Si les bulles de Levolist jusqu'à 8 microns de diamètre peuvent traverser librement les poumons cela veut dire qu'en décompression des bulles veineuses de la taille d'un globule rouge peuvent passer sur le versant artériel, en particulier en début de décompression lorsque les bulles sont encore petites. Plus tard dans la décompression, les bulles détectées au Doppler ont des diamètres bien supérieurs, de l'ordre de 30 à 50 microns. Ces bulles ne franchissent apparemment pas les poumons car les mesures Doppler n'ont jamais permis détecter de bulles artérielles.

Le premier mérite de l'hypothèse des bulles artérielles est d'introduire la variabilité dans le résultat de la décompression. La première variable est la susceptibilité individuelle. Il est raisonnable de penser que le pouvoir filtrant des poumons varie d'une personne à une autre, et pour une même personne, d'une plongée à l'autre. Cela permet de rendre compte de la variabilité interindividuelle (âge, charge pondérale, tabac, etc.) et intra individuelle (fatigue, gueule de bois, manque de sommeil, etc.) qui ont été observées depuis longtemps dans la répartition des ADD.

Le second avantage de l'hypothèse des bulles artérielles est qu'elle est fournit une explication pour certains cas d'accidents dit « immérités ».

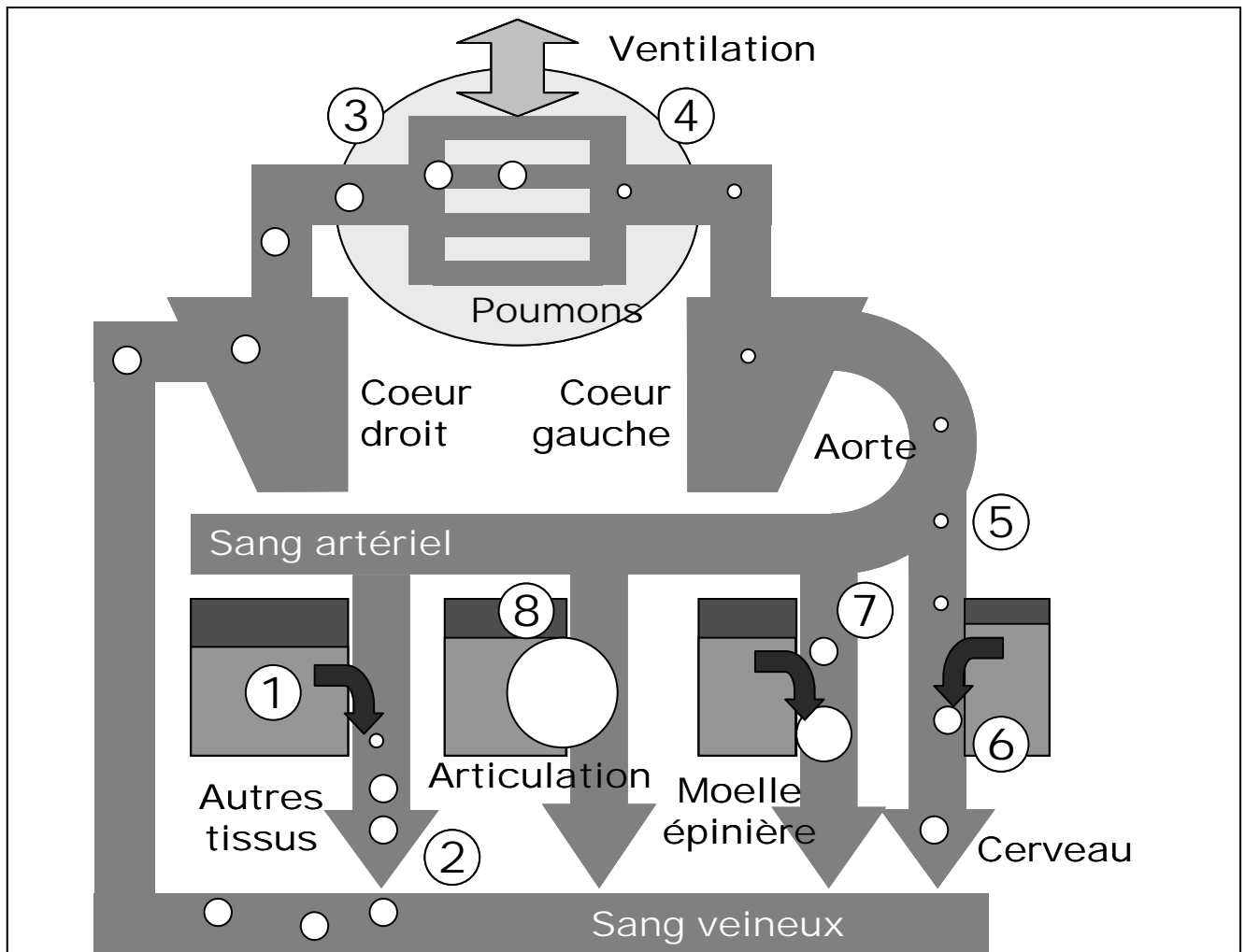


Figure 5 : l'hypothèse des bulles artérielles

1. La plongée nécessite la respiration d'air comprimé et entraîne la dissolution des gaz dans les tissus. Pendant la remontée, les compartiments éliminent le gaz inerte dès qu'un gradient est créé.
2. Pendant la remontée, des bulles sont produites au niveau vasculaire et sont transportées par le sang veineux jusqu'aux poumons.
3. Les poumons fonctionnent comme un filtre et arrêtent les bulles au niveau des capillaires en fonction de leurs diamètres. Le passage du gaz dans les alvéoles finit par éliminer les bulles.
4. Le phénomène critique est le pouvoir filtrant des poumons. De petites peuvent traverser les poumons et arriver sur le versant sanguin artériel.
5. Au niveau de la crosse aortique, la distribution du sang favorise le passage des bulles vers les centres nerveux tels que la moelle épinière et le cerveau.
6. Le cerveau est un tissu rapide, qui peut se trouver en sursaturation dans la phase initiale de la décompression. Il agit comme un réservoir de gaz et contribue à alimenter la croissance des bulles. Les bulles peuvent simplement continuer leur chemin, passer sur le versant veineux et refaire un cycle. Elles peuvent aussi grossir sur place et causer des désordres dans la circulation sanguine locale, responsables plus tard d'ischémie. La conséquence sera l'apparition de symptômes neurologiques centraux de l'ADD.
7. De même, une bulle artérielle peut atteindre la moelle épinière, grossir à partir du gaz disponible localement, et produire les symptômes neurologiques médullaires de l'ADD.
8. Plus tard dans le processus de décompression, les bulles peuvent atteindre une taille critique et exercer une pression locale, particulièrement dans les tissus denses comme les tendons et les ligaments, capable d'exciter les terminaisons nerveuses et de créer des douleurs au

Un des scénarios possible est le passage accidentel d'une bulle entre coté veineux et coté artériel par un shunt situé au niveau du coeur ou des poumons. Il existe une vaste littérature sur ces shunts mais les dernières publications amènent à penser qu'un foramen ovale perméable ne s'ouvre que dans certaines conditions (27, 28). Toutes fois, un shunt cardiaque ou pulmonaire explique facilement un accident neurologique dans une plongée sans qu'il n'y ait violation de procédure.

Un deuxième scénario est un profil en dent de scie où les variations de pression agissent sur le diamètre des bulles. Des bulles formées au cours de ces multiples remontées, piégées au niveau des poumons, peuvent soudain passer du coté artériel à la suite d'une recompression. La conséquence probable est un accident de type neurologique. Ce scénario a été invoqué pour expliquer la différence entre les taux d'accident des décompressions dans l'eau et des décompressions de surface.

Des statistiques enregistrées après des plongées commerciales en Mer du Nord ont montré que les taux d'accidents des deux méthodes de décompression étaient similaires. Cependant, la technique de décompression de surface tendait à produire dix fois plus d'ADD de type II que la technique de décompression dans l'eau. L'explication serait que lorsque le plongeur entame sa remontée vers la surface, des bulles se forment et arrivent aux poumons. Au moment de la recompression dans le caisson de surface, les bulles réduisent leur diamètre sous l'effet de la loi de Mariotte et peuvent passer du coté artériel, causant plus tard l'apparition de symptômes neurologiques. Un scénario similaire a été proposé pour expliquer l'apparition d'ADD de type II à la suite de plongées « yoyo » ou de plongées successives multiples (29).

L'avantage majeur de la théorie des bulles artérielles est de souligner l'aspect critique de la remontée initiale. Les bulles associées aux symptômes ne sont forcément générées sur place. Il y a un processus d'amplification des petites bulles au début de la remontée qui peut nécessiter plusieurs cycles. Une fois que les bulles ont atteint une taille critique, elles sont soit filtrées au niveau du poumon soit stoppées au niveau d'un tissu. Il est vraisemblable que cette « douche » de petites bulles artérielles pendant les premières minutes de la remontée est responsable en grande partie des problèmes enregistrés plusieurs heures après en fin de décompression. Nous allons proposer une méthode pour traduire ce scénario en un outil mathématique capable de générer une table de décompression.

Définition du cas critique

Pour définir le modèle de décompression, il faut d'abord présenter les restrictions de sa construction :

- Les tables de décompression sont destinées à des plongeurs « standard ». On suppose que de telles personnes ont un filtre pulmonaire normal et qu'elles n'ont pas d'anomalie physiologique, telles qu'un shunt cardiaque ou pulmonaire, qui pourrait accidentellement laisser passer des bulles.
- La plongée se déroule dans des conditions « standard », par ce que notre niveau de connaissance ne nous permet pas d'apprécier ni de quantifier l'effet de la fatigue, de l'hyperventilation, du froid, de l'anxiété, etc. Pour prendre en compte de telles conditions, il faut ajouter une marge de sécurité arbitraire.
- Le profil de plongée est celui d'une plongée unitaire « carrée ». Des variations du profil de plongée telles que la plongée yoyo, la plongée successive, les plongées successives multiples, la plongée à plusieurs niveaux, introduisent des perturbations qui nécessitent des hypothèses supplémentaires.

Dans ce cas, le phénomène critique est défini comme l'arrivée d'une bulle artérielle dans un compartiment tissulaire. A nouveau, il faut introduire une série de simplifications (figure 6):

- La bulle a été formée ailleurs. Sa croissance n'a pas perturbé la quantité de gaz dissous localement dans le tissu.

- La bulle est considérée petite vis-à-vis du tissu en terme de capacité de gaz. au moins au début de sa croissance locale.
- Sur ce site, la bulle échange du gaz avec le tissu environnant et le sang.
- La sûreté de la décompression est basée sur le fait que la bulle reste stable et garde un volume inférieur à un certain volume critique. Elle ne perturbe pas la perfusion locale.

Des hypothèses complémentaires permettent de générer des familles de solutions. Cependant, comme la validation de ces modèles doit être faite par lissage sur des bases de données, les expressions mathématiques doivent rester simples et le nombre de paramètres réduit au minimum.

Construction du modèle mathématique

Les modèles de décompression sont tous basés sur la même structure illustrée en figure 7. Plusieurs modèles s'emboîtent les uns à la suite des autres. Les hypothèses à l'intérieur des différentes boîtes peuvent varier d'un auteur à l'autre mais la logique générale reste la même. Les paramètres en entrée correspondent aux données opérationnelles : profondeur de plongée, temps au fond et mélanges respirés. Ces paramètres fixent les conditions initiales et aux limites des différentes équations.

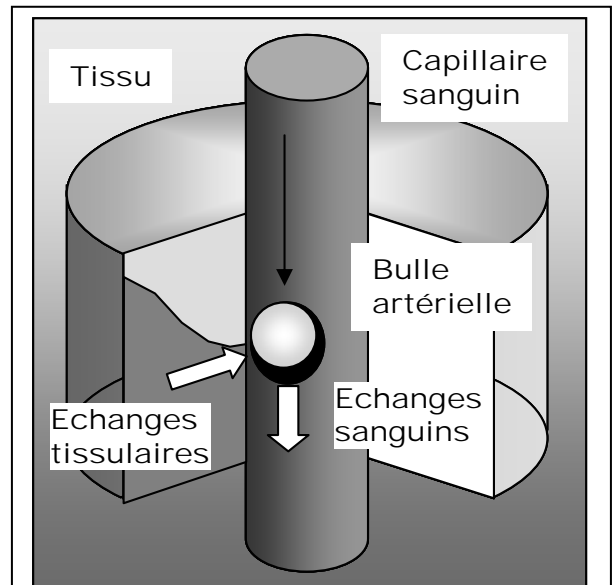


Figure 6 : définition du phénomène critique.

Un premier modèle d'échange gazeux sert à calculer la quantité de gaz dissous dans les divers compartiments au moment où commence la remontée. Un deuxième modèle décrit les échanges gazeux entre la bulle et son milieu environnant. Les deux modèles peuvent interagir suivant la complexité des hypothèses retenues. Le troisième modèle concerne la sécurité de la décompression et définit le phénomène critique qui contrôle la remontée. Cela peut être la sursaturation critique du compartiment, le volume de la phase gazeuse formée dans le cas de l'hypothèse du volume critique (30), ou encore son diamètre ou sa vitesse de croissance.

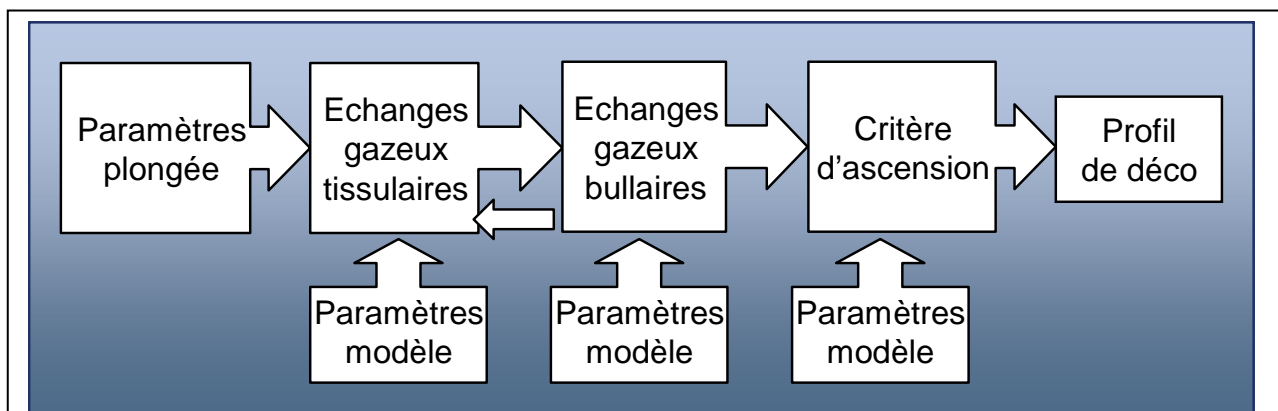


Figure 7 : structure d'un modèle de calcul de décompression.

Modèle d'échange gazeux tissulaire

Les modèles utilisent de nombreux paramètres dans leurs définitions. Le nombre de paramètres, ou encore, de degrés de liberté, augmente avec la complexité du modèle. Il est admis qu'un modèle associé à un grand nombre de paramètres est essentiellement descriptif (il reproduit les événements sans les comprendre) alors qu'un modèle avec un faible nombre de paramètres est plus explicatif (l'économie de moyens suppose une explication pertinente des phénomènes). Les modèles descriptifs sont limités à une zone de validation étroite, tandis que les modèles explicatifs ont une chance d'être prédictifs, c'est-à-dire de fonctionner en dehors du domaine où ils ont été testés. Quand le nombre de degrés de liberté augmente, le domaine de validité diminue. Ainsi les modèles classiques de décompression sont de toutes évidence surdimensionnés en terme de paramètres. Par exemple le modèle de Buhlman (31) utilise 16 compartiments pour calculer un jeu de tables à l'air. Considérant qu'un seul compartiment nécessite une période et deux coefficients « a » et « b » pour être fixé, il faut un total de $3 \times 16 = 48$ paramètres pour le faire tourner. Bien que ces tables soient reconnues et appréciées, il a fallu une vie entière au Dr. Buhlman pour ajuster ces paramètres. De plus, le modèle convient tant que les expositions restent dans le cadre limité de la plongée loisir. Il ne pourrait pas être utilisé pour des temps au fond beaucoup plus longs tels que ceux utilisés en plongée commerciale.

Les modèles d'échanges gazeux sont généralement la principale source de prolifération des paramètres à cause des compartiments. Les compartiments tissulaires ne sont qu'un concept historique et leur identification physiologique n'est pas importante. Une série de compartiments permet en fait d'éviter de définir précisément les modes d'échanges gazeux, qu'ils soient basés sur la perfusion, la diffusion ou sur leur action combinée. Dans tous les cas, les solutions mathématiques s'expriment sous formes de séries d'exponentielles : les compartiments sont simplement une façon d'exprimer un certain nombre d'harmoniques dans une fonction complexe, intervenant tour à tour dans la remontée. C'est dans cet esprit que nous avons retenu un modèle multi compartiment avec la définition classique :

$$E1 \quad \boxed{\frac{dPtis_{gas}}{dt} = \frac{0.693}{T} (Pa_{gas} - Ptis_{gas})}$$

Où T est la période du compartiment telle définie dans l'équation de perfusion, Pa et Ptis les tensions artérielles et tissulaires de gaz inertes dissous.

Pour résoudre le problème du choix des périodes de compartiment, nous avons décidé de traiter la période comme une variable continue. La difficulté est alors d'exprimer le critère de remontée en fonction de la période du compartiment ; un exercice mathématique difficile qui n'a été résolu que dans des cas simples (32). Cependant, parce que les ordinateurs actuels sont rapides, nous avons contourné la difficulté en traitant les compartiments de façon discrète mais en se débarrassant de toute subjectivité en les exprimant à partir d'une série géométrique. Nous avons utilisée la série de Renard, à la suite d'un amiral français qui avait à résoudre des problèmes de standardisation de planches, de cordages et de voiles dans les arsenaux. Il résolu le problème élégamment en utilisant une série aux propriétés étonnantes basée sur la racine carré de 10. Par exemple, avec 10 termes par décade ($\sqrt[10]{10}$), la série donne les valeurs suivantes :

$$10 - 12.5 - 16 - 20 - 25 - 32 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100$$

En pratique, nous avons trouvé que les calculs deviennent stables quand le nombre de compartiments par décade est compris entre 15 et 20. De fait, la définition des compartiments du modèle d'échange gazeux ne nécessite que deux paramètres, les bornes inférieures et supérieures. Le compartiment le plus rapide correspond bien sûr à une équilibration instantanée et n'a pas besoin d'être fixée. Le compartiment le plus lent correspond à la valeur utilisée en décompression de saturation. Ainsi, on

fixe le modèle d'échange gazeux avec un seul paramètre par gaz. Sur la base de l'expérience des chantiers de saturation de Comex, les périodes limites ont été fixées à 270 min pour l'hélium et 360 minutes pour l'azote.

Modèle d'échange gazeux bullaire

Tous les gaz présents autour de la bulle participent aux échanges gazeux. Les gaz métaboliques y jouent un rôle important, en particulier le CO₂ (34) dont la présence dans les bulles est connue depuis Pau Bert. Cependant, Van Liew a montré dans ses expériences que la diffusion de l'oxygène et du CO₂ est rapide (35). Si les valeurs locales tissulaires de la vapeur d'eau et du CO₂ sont bien documentées dans la littérature scientifique, la détermination de la concentration d'oxygène dissous devient un problème en plongée, surtout si la remontée utilise de nombreux mélanges de décompression.

En première approximation, nous avons pris la pression partielle d'oxygène dans la bulle égale à la tension tissulaire, qui reste pratiquement constante. Cependant, avec des protocoles de décompression agressifs en terme d'oxygène, ou si l'oxygène est respiré pur au masque dans les derniers paliers, cette approche se révèle insuffisante car les paliers sont de toute évidence trop courts. Dans une version améliorée du modèle, la pression d'oxygène dans la bulle est calculée en fonction du mélange inspiré et de l'extraction métabolique (36, 37) avec une formulation mathématique pour le calcul de la fenêtre oxygène proposée par Egi (38).

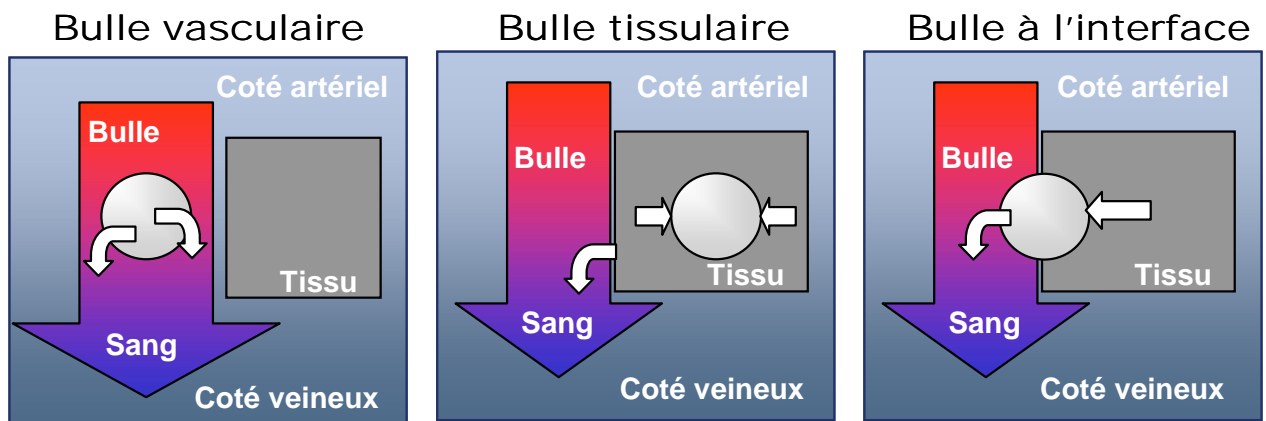


Figure 8 : Trois cas possibles d'échanges gazeux bullaires.

Pour faire face à la complexité des échanges gazeux au niveau de la bulle, nous avons considéré d'abord deux situations extrêmes bien répertoriées (figure 8).

Dans un premier cas, la bulle est purement vasculaire et reste en place. Le sang s'écoule sur sa surface et échange des gaz par convection de façon tellement efficace qu'il n'y a pas de couche laminaire ni de délai de diffusion à l'interface. Dans ces conditions, nous pouvons utiliser une formulation pour les échanges gazeux bullaires similaire à celle de la perfusion tissulaire. Il faut supposer de plus que le sang drainant la bulle représente une petite fraction de la perfusion et n'affecte pas les échanges tissulaires. Avec ces hypothèses, nous pouvons exprimer la quantité de gaz passant à travers la surface de la bulle dans le sang :

$$E2 \quad \frac{dn, blood_{gas}}{dt} = C \frac{0.693}{T} (Pa_{gas} - Pb_{gas})$$

Où $dn_{blood_{gas}}$ est le nombre de molécules de gaz inerte passant de la bulle dans le sang, Pa_{gas} la tension de gaz inerte artérielle, Pb_{gas} la pression de gaz inerte dans la bulle, T la période du compartiment et C un coefficient empirique qui tient compte de la fraction du débit sanguin participant aux échanges, de la capacité relative de la bulle par rapport au tissu, etc.

Dans un deuxième cas, la bulle est purement tissulaire. Elle échange des gaz avec le tissu environnant par diffusion. Nous utilisons une approximation classique basée sur un gradient linéaire à proximité de la surface de la bulle. Nous obtenons ainsi une deuxième expression mathématique pour la quantité de molécules de gaz inerte diffusant à travers la surface de la bulle.

$$E3 \quad \boxed{\frac{dn_{tis_{gas}}}{dt} = \frac{1}{K} (Ptis_{gas} - Pb_{gas})}$$

Où $dn_{tis_{gas}}$ est le nombre de molécule diffusant du tissu dans la bulle à travers sa surface, $Ptis_{gas}$ la tension de gaz inerte dissous dans le tissu, Pb_{gas} la pression de gaz inerte dans la bulle, et K un coefficient empirique qui tient compte de la diffusivité du gaz, de l'épaisseur du gradient, de la surface d'échange de la bulle, etc.

A partir de ces deux situations extrêmes, nous imaginons une situation intermédiaire où la bulle est à cheval sur l'interface sang-tissu et où les échanges gazeux de la bulle participent aux deux modes définis ci-dessus. L'importance relative des types d'échanges dépend de la surface exposée dans chaque milieu. Le rapport des deux surfaces d'échanges est appelé α et varie entre 0 et 1. Nous écrivons alors l'équilibre des masses de la bulle (ce qui entre moins ce qui sort égale ce qui reste) et il vient :

$$E4 \quad \boxed{\frac{d(PbVb)}{dt} = \frac{1}{R\tau} \left(\alpha \frac{dn_{tis_{gas}}}{dt} + (1-\alpha) \frac{dn_{blood_{gas}}}{dt} \right)}$$

Où R est la constante des gaz parfait, τ la température absolue, et Vb le volume de la bulle.

Critère de sécurité pour la remontée

Le scénario est basé sur l'arrivée d'une bulle artérielle dans un capillaire tissulaire. Cette bulle est déjà formée et de capacité faible vis-à-vis du tissu environnant. Nous retenons comme critère de sécurité pour la remontée la stabilité de la bulle, ayant atteint un rayon critique, fixée à l'interface sang-tissu et échangeant des gaz avec les deux milieux.

Nous traduisons cette condition en spécifiant que le bilan de masse de la bulle reste inchangé dans cette situation :

$$E5 \quad \boxed{\frac{d(PbVb)}{dt} = Pb \frac{dVb}{dt} + Vb \frac{dPb}{dt} = 0}$$

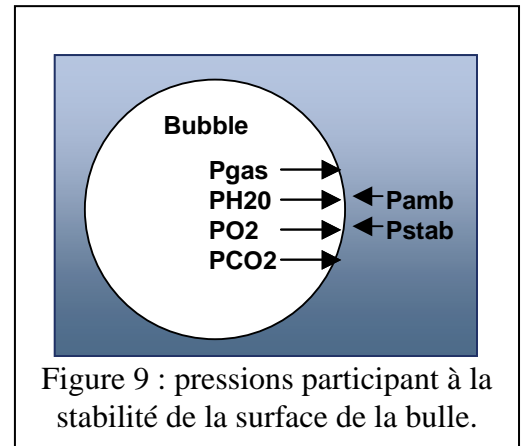
On voit qu'à pression ambiante constante, ce qui correspond à un palier de décompression, la stabilité de la bulle nécessite que le volume et la pression de la bulle restent constants.

Cette condition signifie que la somme des pressions internes des gaz dans la bulle est contrebalancée par la pression ambiante et les pressions externes stabilisatrices (tension superficielle, élasticité du milieu, surfactants). Cela se traduit par:

$$E6 \quad P_{b_{gas}} + P_{b_{O_2}} + P_{b_{H_2O}} + P_{b_{CO_2}} \leq P_{amb} + P_{b_{stab}}$$

Où $P_{b_{gas}}$, $P_{b_{O_2}}$, $P_{b_{H_2O}}$, $P_{b_{CO_2}}$ sont respectivement les pressions du gaz inerte, de l'oxygène, de la vapeur d'eau, et du CO_2 à l'intérieur de la bulle., P_{amb} la pression ambiante et $P_{b_{stab}}$ la somme des pressions stabilisatrices e la surface de la bulle. En supposant que la $P_{b_{O_2}}$ est constante et égale à la tension tissulaire, on introduit pour simplifier une constante arbitraire B dont la définition est évidente, et qui donne une formulation plus simple :

$$E7 \quad \boxed{P_{b_{gas}} \leq P_{amb} + B}$$



Dans ces conditions, les différents échanges gazeux à travers la surface de la bulle sont équilibrés. Pour chaque gaz, la même quantité de molécule entre et sort par unité de temps ; il n'y a pas d'accumulation à l'intérieur de la bulle. Les équations E4 et E5 combinées donnent:

$$E8 \quad \alpha \frac{dn_{gas}^{blood}}{dt} = -(1-\alpha) \frac{dn_{gas}^{tis}}{dt}, \text{ soit encore:}$$

$$E9 \quad \frac{\alpha}{K} (Ptis_{gas} - Pb_{gas}) = -(1-\alpha) \cdot C \frac{0.693}{T} (Pa_{gas} - Pb_{gas})$$

Finalement, nous éliminons Pb_{gas} en combinant les équations E10 et E8 et définissons un dernier coefficient empirique A tel que:

$$E10 \quad A = 0.693 \cdot \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \cdot C \cdot K$$

Nous obtenons ainsi l'expression finale du critère de sécurité pour la remontée:

$$E11 \quad \boxed{Ptis_{gas} \leq \left(1 + \frac{A}{T}\right)(P_{amb} + B) - \frac{A}{T} Pa_{gas}}$$

L'équation E11 définit les conditions de sécurité pour une remontée au palier de décompression inférieur. Le critère de départ est une bulle artérielle, échangeant du gaz avec le sang et le tissu, qui garde une taille constante pendant la remontée au palier inférieur. C'est une condition similaire à celle d'une M-Value. En fonction de l'évolution de la tension de gaz inerte dissous dans le compartiment, elle permet le calcul classique du temps de palier.

Après l'avoir ainsi défini, nous appelons ce modèle de calcul de décompressions « Arterial Bubble Model version 2 » ou « ABM-2 ».

L'intérêt majeur du critère d'ascension défini en E11 est qu'il est exprimé en fonction de la période du compartiment T. Il est donc défini de façon continue pour n'importe quel compartiment. Son expression est économe en terme de paramètres puisque seules les deux valeurs de A et de B nécessitent d'être fixées. Le nombre total de paramètres du modèle ABM-2 se réduit donc à la période de saturation et les deux coefficients A et B, soit trois au total.

Validation du modèle

La société scientifique UHMS, lors d'un congrès sur la Validation of Decompression Tables (39), a édité des recommandations pour la validation d'un modèle de calcul de table de décompression, qui servent de référence internationale. Ces recommandations prudentes envisagent aussi bien des expériences en laboratoire que des tests en situation opérationnelle. Pour cela, les scientifiques se réfèrent aux conventions d'Helsinki et de nos jours les comités éthiques refuseront tous protocoles de test chez l'homme pour une étude de tables de décompression. La seule possibilité est de se tourner vers des plongées déjà réalisées, stockées dans une base de données.

ABM-1: validation of the 1992 French air tables

Dans les années 70, la Comex utilisait sur ces chantiers une première version des tables officielles françaises, éditées en 1974 par le "Ministère du Travail" (41) et appelées MT74. En 1982, le gouvernement français a financé un projet de recherche visant à évaluer les performances de ces tables en conditions réelles de chantier par un traitement informatique des rapports de plongée. Cette base de données, qui comprenait plus de 65000 plongées à l'air, fut l'une des plus importantes de l'histoire de la plongée commerciale. L'analyse de la base de données, conduite par la Comex, a montré que les tables MT74 présentaient des limitations pour les expositions sévères (12). Le gouvernement français finança alors une deuxième étude pour calculer et valider de nouvelles tables. Un jeu complet de tables de plongée commerciale, comprenant des tables standard et avec sortie à l'oxygène, de décompression de surface, etc. fut édité en 1983.

Le modèle de calcul de ces nouvelles tables de décompression utilisait le concept des périodes de compartiment continues. A l'époque, le critère de sécurité fut établi par lissage sur les données. L'expression mathématique réalisant le « best fit » est présentée en E12 ci-dessous. Cette formulation empirique est étonnamment proche de celle de l'équation E11, quand le dernier terme est négligé. Pour cette raison, nous appelons ce modèle « ABM-1 » et le présentons comme une forme primitive du modèle ABM-2.

$$E12 \quad P_{tis_{gas}} \leq \left(1 + \frac{A}{T}\right)(P_{amb} + B)$$

Le « ABM-1 » fut utilisé pour calculer un jeu de tables qui partirent en évaluation offshore sur des chantiers sélectionnés; En 1986, après des ajustements mineurs, les tables furent finalement publiées dans les manuels de la compagnie. Plus tard, en 1992, ces procédures furent incluses dans la révision de la législation de la plongée sous le nom de « Tables du Ministère du Travail 1992 », ou tables MT92 (43). Les performances sécurité de ces nouvelles tables après leur validation offshore sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1.

Comparaison des performances de sécurité des tables à l'air françaises MT74 et MT92. Les plongées sont classifiées trois catégories d'expositions : modéré, standard, sévère en fonction de l'index Prt (5). Les expositions correspondent à des décompressions dans l'eau et excluent toutes décompression de surface. Les progrès accomplis entre les deux jeux de tables apparaissent en fonction des expositions et du type d'accident. Les données rassemblées permettent de se prononcer de façon décisive en terme d'accident de type douleur articulaire. Les données concernant les accidents de type neurologique sont trop peu nombreuses pour avoir une signification statistique.

Expositions	Modéré (Prt≤25)		Standard (25<Prt≤35)		Sévère (Prt>35)	
	MT74	MT92	MT74	MY92	MT74	MT92
Tables plongées	17,683	7,129	9,590	8,384	2,426	2,055
Nombre ADD Type I	18	1	55	12	49	17
Pourcentage	0.10%	0.001%	0.57%	0.14%	2.2%	0.82%
Nombre ADD Type II	1	0	1	1	1	2
Pourcentage	0.006%	0.00%	0.01%	0.01%	0.04%	0.09%

ABM-2: étalonnage avec les plongées profondes expérimentales Comex

Le ABM-2 a été étalonné sur des plongées profondes expérimentales du centre hyperbare de la Comex, utilisant l'air ou l'héliox comme mélange fond. Un exemple est donné en figure 10 pour la plongée exceptionnelle de 120 minutes à 180 mètres, dont nous avons parlé au début. Le ABM-2 réussit à introduire le premier palier à la profondeur de 153 mètres, ce qui est très proche du profil réel utilisé.

ABM-2: validation en conditions réelles

Il y a une communauté de plongeurs spéléo active en Europe qui a accumulé une forte expérience en plongée profonde depuis les quinze dernières années. Les leaders sont toujours à la recherche de tables pour réaliser leur pointe et certains ont ainsi eu l'occasion d'utiliser le ABM-2 très profond.

Pascal Bernabé, plongeur spéléo audacieux, est un des plus célèbre Beta-testeur du ABM-2. Son répertoire extraordinaire inclue les plongées suivantes réalisées avec le modèle :

- Juin 1996, 163 m à la Foux du Mas de Banal, 30 minutes de temps de descente
- Septembre 1996, 176 m à Fontaine de Vaucluse, 20 minutes de temps de descente
- Septembre 1997, 250 m à Fontaine de Vaucluse, 25 minutes de temps de descente

Pascal Bernabé a aussi participé comme plongeur de secours au records d'apnée établis par Pipin à Cosumel en janvier 2000. Pendant 15 jours, il a effectué 10 plongées entre 130 et 163 mètres, avec des temps au fond de 5 à 7 minutes.

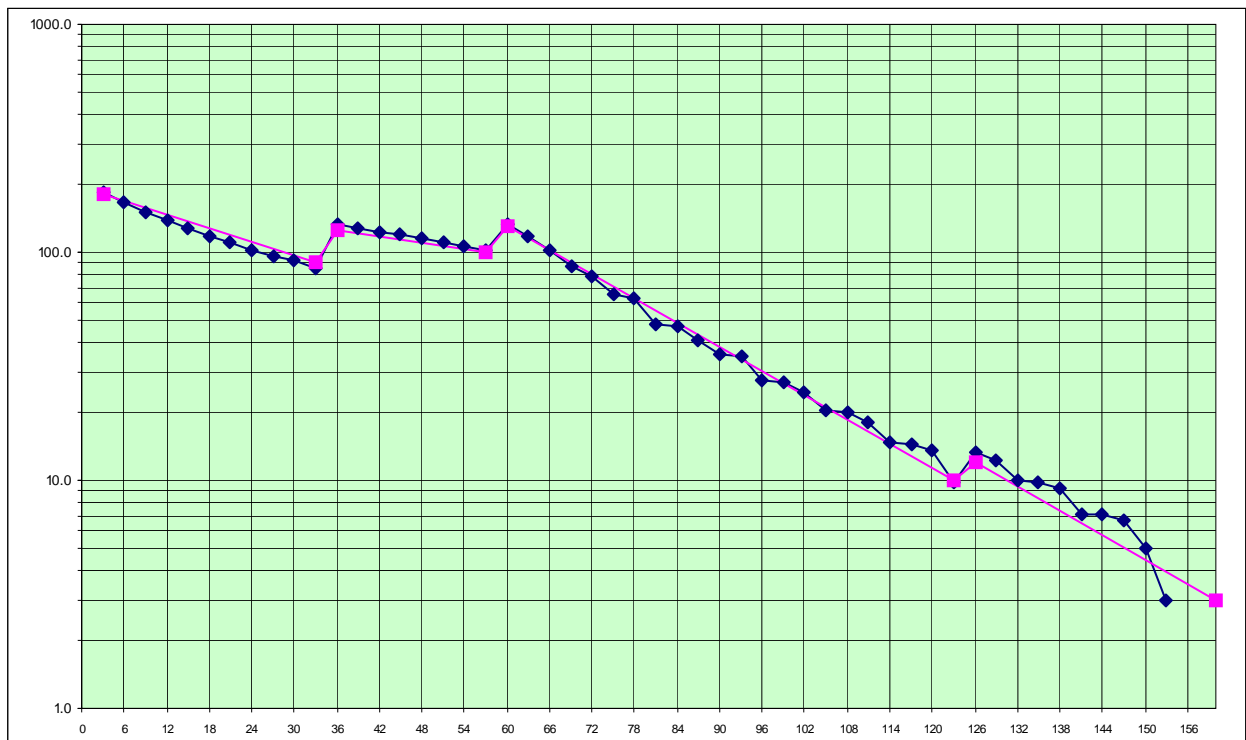


Figure 10: Comparaison des prédictions du AB model 2 et du profil des plongées à 180m/120min conduites au Centre Hyperbare de la Comex en 1977. Le profil de décompression est tracé dans un diagramme semi-log qui utilise la profondeur en abscisse et le log du temps de palier en ordonnée. La ligne droite représente la plongée réelle.

Olivier Isler, un autre plongeur spéléo célèbre, mais avec une touche Helvétique, a aussi utilisé le ABM-2 pour des plongées jusqu'à 165 m à la résurgence de Bourg Saint Andéol, dans le sud de la France.

Plus récemment encore, le ABM-2 a été utilisé par des corailleurs avec des protocoles de gaz simplifiés (héliair, air et oxygène pur). Un équipage en Corse et un autre en Tunisie travaillent avec un jeu de ces tables depuis deux ans. Une plongée typique au corail avec les mélanges correspond à 20 minutes à 100 mètres. En Tunisie, les tables ont été poussées jusqu'à 140 mètres. Le nombre total de plongées corail excède maintenant le millier, sans aucun accident de décompression enregistré.

Bien que ces plongées de spéléo ou de corailleurs ne constituent pas des données scientifiques, la difficulté et l'extrême profondeur des plongées confèrent à ces plongées un caractère probatoire

Conclusion

La théorie des bulles artérielles, développées à travers deux versions de modèles mathématiques, ABM-1 et ABM-2, a permis de calculer des tables avec un profil caractéristique. Plusieurs points peuvent être retenus en faveur de ces modèles :

- Le concept des bulles artérielles conduit à une formulation mathématique qui permet de calculer des tables avec des paliers profonds, ce qui est conforme à une certaine expérience en plongée profonde.
- Le modèle, dans sa première forme (ABM-1) a pu être validé en conditions réelles de chantier et ses performances ont été mesurées de façon précise grâce à la banque de données de la Comex. Sa validation est donc conforme dans sa version initiale aux recommandations de l'UHMS.
- Sa formulation mathématique, basée sur une période de compartiment variant de façon continue, permet de réduire le nombre de paramètres à un minimum de trois, ce qui garantit a priori une certaine vraisemblance, en tout cas un pouvoir prédictif large.

- Enfin, le modèle dans sa version ABM-2 a été comparé avec succès à des plongées expérimentales profondes jusqu'à 180 mètres.

Références

1. Boycott, A.E., Damant, GC, Haldane, JS. The prevention of compressed-air illness. *J. Hygiene*, 8, 342-443.1908.
2. Pyle R. The importance of Deep Safety Stops. *Deep Tech Issue* 5.
3. Imbert JP. Decompression safety. *Proceedings of the Subtec '93 Conference*. Volume 31, 239-249. Aberdeen, Scotland, November 1993.
4. Imbert JP, Montbarbon S. Use of the Comex Diving Data Base. *Proceedings of the EUBS Workshop on Operational dives and decompression data : collection and analysis*. Amsterdam, 17 August, 1990.
5. Shields TG, Lee WB. The incidence of decompression sickness arising from commercial offshore air-diving operations in the UK sector of the North Sea during 1982/83. Report to the UK Department of Energy, 1986.
6. Giles R. Decompression sickness from commercial offshore air-diving operations on the UK continental shelf during 1982 to 1988. Report from the UK Department of Energy. 1989.
7. Imbert JP. Evolution and offshore performances of the Comex Treatment Tables. *Proceedings of the UHMS Workshop on Decompression Illness Treatment*. Palm Beach, Florida, 18-19 June 1995.
8. Imbert JP, Montbarbon S. Presentation of the Comex Diving Data Base. *Proceedings of the EUBS Workshop on Operational dives and decompression data: collection and analysis*. Amsterdam, 17August, 1990.
9. Wienke BR. Deep stops. *Advanced Diver Magazine*. Issue 12. p30-34. 2002.
10. Gardette B, C Lemaire, D Lamy, J Le Chuiton. Heliox bounce dive decompression (180m). *Proceedings of the 5th Annual Meeting of the EUBS*. Bergen, Norway, 5-6 July, 1979.
11. Bennett PB. *Proceedings of the 9th Undersea medical Society Workshop on development of decompression procedures for depths in excess of 400 feet*. Duke University, USA. 21-23 February 1975.
12. Imbert JP, Bontoux M. Safety analysis of French 1974 air decompression tables. *Proceedings of the Undersea Medical Society Workshop on Decompression in surface-based diving*. Tokyo, Japan, September 12 th, 1986.
13. Marroni A, Benent PB, Balestra C, Cali-Corleo R, Germonpre P, Pieri M, Bonucelli C. What ascent profile for the prevention of decompression sickness? I Recent research on the Hill/Haldane ascent controversy. *Proceedings of the 28th Annual Scientific Meeting of the European Underwater and Baromedical Society*, Bruges, Belgium, 4-9 September, 2002.
14. Carturan D, Boussugues A, Habib G, Gardette B, Sainty J.M. Influence of ascent rate on venous bubbles detected after recreational dives. *Proceedings of the International Joint meeting on Hyperbaric and Underwater medicine*, Milan, Italy, 4-8 September, 1996.
15. Carturan D, Boussugues A, Burnet H and Gardette B. Effect of ascent rate on circulating venous bubble production during decompression in air sport diving. *Bull. Mesubhyp* 1998; 8:1-6.
16. Marroni A, Benent PB, Balestra C, Cali-Corleo R, Germonpre P, Pieri M, Bonucelli C. What ascent profile for the prevention of decompression sickness? II- a field model comparing Hill and Haldane ascent modalities with an eye to the development of a bubble safe decompression algorithm. *Proceedings of the 28th Annual Scientific Meeting of the European Underwater and Baromedical Society*, Brugges, Belgium, 4-9 September 2002.
17. Hills BA. Decompression sickness : a fundamental study of surface excursion diving and the selection of limb bends versus CNS symptoms. *Aerospace Medicine*, Vol 42, No 8, August 1971.

18. Brubakk AO, Grip A, Holand B, Ornaheim J, Tonjum S. Pulsed Doppler ultrasound for studying haemodynamic changes and bubbles during simulated diving. Proceedings of the VIth Annual Congress of the EUBS. Cambridge, UK, 1981.
19. Mazurel G, Hee J, Giacomini L, Guillermin R. Ultrasonic detection of circulating bubbles in ewes exposed to simulated dives deeper than 800m under isobaric conditions and with unchanged gas mixtures. Proceedings of the XI th Annual meeting of the EUBS. Goteborg, Sweden, August 1985.
20. James PB. The size distribution of gas emboli arising during decompression. A review of the concept of critical diameter of gas emboli. Proceedings of the XIII th Annual Congress of the EUBS, Lubeck, Germany, 5-8 October 1982.
21. James PB. Decompression sickness. In Clinical Neurology. Edited by Michael Swash and John Oxbury. Churchill Livingstone. Vol. 1;565, 1991.
22. Adkinson GH, Macleod MA, Hodgson M et al. Cerebral perfusion deficit in disbaric illness. Lancet 2;119, 1989.
23. Moon RE, Camporesi EM, Kisso JA. Patent foramen ovale and decompression sickness in divers. Lancet 1; 513, 1989.
24. Wilmshurt PT, Byrne JC. Relation between interatrial shunts and decompression sickness in divers. Lancet, 1302-1306, 1989.
25. Hennessy TR. On the site of origin, evolution and effects of decompression microbubbles. Proceeding of the International Symposium on supersaturation and bubble formation in fluids and organisms. Trondheim, Norway, 6-10 June 1989.
26. Besnard S, M Philippot, Ph Hervé, M Porcher, Ph Arbeille: Intravascular ultrasound contrast agent particles in the cerebral, renal and lower limb arteries – consequence on diving physiology. Proceeding of the 28th Annual Scientific meeting of the European Underwater and Baromedical Society, Bruges, Belgium, 4-8 September 2002.
27. Balestra C, P Germonpre, and A Marroni. Intrathoracic pressure changes after Valsalva strain and other maneuvers: implication for divers with patent foramen ovale. Undersea hyperb. Med, 1998. 25(3): page 171-4.
28. Germonpre P et al; Patent foramen ovale and decompression sickness in sport divers. J. Appl. Physiol, 1988, 84(5): p1622-6.
29. Imbert JP. Decompression tables versus decompression procedures: an analysis of decompression sickness using diving data-bases. Proceedings of the XVII th annual meeting of Diving and Hyperbaric Medicine, Heraklion, Crete, Greece, 20 September-3 October 1991.
30. Hennessy TR, Hempleman HV. An examination of the critical release gas volume concept in decompression sickness. Proc. R. Soc. B179, 299-313, 1977.
31. Buhlmann, AA. 1984. Decompression-Decompression Sickness. Berlin: Springer-Verlag.
32. Egi SM and Gurmen NM. Computation of decompression tables using continuous compartment half-times. Undersea Hyper Med 2000; 27(3):143-153.
33. Imbert JP, Bontoux M. Diving data bank: A unique tool for diving procedures development. 20th Annual OTC Conference. Houston, Texas, 2-5 May 1988.
34. Ishiyama A. Analysis of gas composition of intravascular bubbles produced by decompression. Bull. Tokyo Med. Univ. 30 :25-35, 1983.
35. Van Liew HD, Bishop B, Walder-D P, Rahn H. Effects of compression on composition and absorption of tissue gas pockets. J. of Appl. Physiol. 1986; 20:927-33.
36. Yount D and Lally D. On the use of oxygen to facilitate decompression. Aviation, Space and Environmental medicine, June 1980.
37. Van Liew HD, Conkin J and Burkard M. The oxygen window and decompression bubbles: estimates and significance. Aviation, Space and Environmental Medicine, September, p859-865, 1993.
38. Egi M. Estimation of oxygen window during and after altitude exposures. Proceedings of the 20th Annual Meeting of the European Underwater Baromedical Society, Istanbul, Turkey, 4-8 September 1994.

39. Conclusions of the 37th Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop on Validation of Decompression Tables. Bethesda, MD. 13-14 February 1987.
40. Shields TG, Duff P, Wilcox SE. Decompression sickness from commercial offshore air-diving operations on the UK continental shelf during 1990. Report from the UK HSE. 1992.
41. Mesures particulières de protection applicables aux scaphandriers. Fascicule Spécial no 74-48 bis. Bulletin Officiel du Ministère du travail. Imprimerie du Journal Officiel, 26 rue Desaix, 75732 Paris cedex 15.
42. Imbert JP, Bontoux M. A method for introducing new decompression procedures. Proceedings of the Undersea Medical Society Workshop on validation of decompression schedules. Bethesda, Maryland, 13-14 February 1987.
43. Travaux en Milieu Hyperbare. Mesures particulières de prévention. Fascicule no 1636. . Imprimerie du Journal Officiel, 26 rue Desaix, 75732 Paris cedex 15. ISBN 2-11-073322-5.