

La décompression : Durée de l'épreuve 1h30 - coefficient 4

1 Problème de table (8 points)

Un groupe de plongeurs effectue en mer à 9h00 une première plongée de 40 min à 30 m. Trois heures après leur sortie de cette plongée, ils effectuent une seconde plongée de 30 min à 25 m.

Pour ces deux plongées, trois options sont étudiées :

- a. Calculez le profil de décompression pour chacune d'entre elles.
 - ✓ Première option : plongées à l'air.
 - ✓ Deuxième option : Plongées à l'air et inhalation d'O₂ durant l'intervalle pendant une heure juste avant la seconde immersion.
 - ✓ Troisième option : Plongées Nitrox 40/60 (l'air est à 20/80 pour les commodités de calcul).
- b. Pour chacune de ces trois options, identifiez les avantages et inconvénients. D'autre part, précisez les contraintes réglementaires et matérielles de chaque cas de figure.

2 Modèles de décompression. (6 points)

Deux modèles de décompression sont largement utilisés par nos ordinateurs de plongée : Certains sont basés sur un modèle de type "Haldanien" alors que d'autres utilisent le principe dit "des microbulles".

- a. Quelles sont les hypothèses de base utilisées pour la conception de ces deux modèles.
- b. Exposez les conséquences de l'utilisation d'un ordinateur basé sur l'une ou l'autre de ces deux approches pour le plongeur.
- c. Expliquez pourquoi les différents modèles ne correspondent pas exactement à la physiologie du plongeur .

3 Remontée rapide et redescente à mi profondeur. (6 points)

- a. Pourquoi la procédure de la MN90 impose-t-elle de redescendre à mi-profondeur pendant 5 mn moins de trois minutes après une remontée rapide ?
- b. Quelles sont les limites de cette procédure.

La décompression : Durée de l'épreuve 1h30 - coefficient 4
Éléments de correction

1 Problème de table (8 points)

Un groupe de plongeurs effectue en mer à 9h00 une première plongée de 40 min à 30 m. Trois heures après leur sortie de cette plongée, ils effectuent une seconde plongée de 30 min à 25 m.

Pour ces deux plongées, trois options sont étudiées :

a. Calculez le profil de décompression pour chacune d'entre elles.

✓ Première option : plongées à l'air. (2 points)

HE1 = 9h00, HS1 = 9h00 + 40' de plongée + 3' remontée + 24' paliers = 10h07
GPS = K, AR = 1.29

Intervalle 3 h, AR = 0.97, majoration à 25m = 17'

HE2 = 13h07, HS2 = 13h07 + 30' de plongée + 2' remontée + 21' paliers = 14h00
GPS = K, AR = 1.29

✓ Deuxième option : Plongées à l'air et inhalation d'O₂ durant l'intervalle pendant une heure juste avant la seconde immersion. (2 points)

HE1 = 9h00, HS1 = 9h00 + 40' de plongée + 3' remontée + 24' paliers = 10h07
GPS = K, AR = 1.29

Intervalle surface de 2 heures à l'air : AR = 1.04
Inhalation d'O₂ pur pendant 1 heure : AR = 0.90
Majoration à 25m : 11'

HE2 = 13h07, HS2 = 13h07 + 30' de plongée + 2' remontée + 16' paliers = 13h55
GPS = J, AR = 1.24

✓ Troisième option : Plongées Nitrox 40/60 (l'air est à 20/80 pour les commodités de calcul). (2 points)

Calcul des profondeurs équivalentes air

A prof 30m , Pabs = 4 b, Péquiv = $4 \times 0.6 / 0.8 = 3$ b, prof équiv = 20 m
A prof 25 m , Pabs = 3.5 b, P équiv = $3.5 \times 0.6 / 0.8 = 2.625$ b, prof équiv = 16.25 m

HE1 = 9h00, HS1 = 9h00 + 40' plongée + 2' remontée = 9h42'
GPS = H, AR = 1.16

Intervalle 3h, AR = 0.93, majoration à 16.25m (on prend 18m et 0.95) = 19'
Calcul de table avec 16.25m donc 18 m, 30+19 = 49' donc 50'

HE2 = 12h42 , HS2 = 12h42 + 30' plongée + 2' remontée = 13h14
GPS = H, AR = 1.16

b. Pour chacune de ces trois options, identifiez les avantages et inconvénients. D'autre part, précisez les contraintes réglementaires et matérielles de chaque cas de figure. (2 points)

- La plongée air impose des paliers longs avec des taux d'azote résiduel en sortie élevés. Le matériel est standard.
- L'inhalation d'O₂ pur en surface pendant 1 heure (pour une consommation d'O₂ fabriqué à peu près équivalente aux deux plongées nitrox considérées) ne permet pas de réduire significativement les paliers ou l'azote résiduel, et est contraignante à l'usage et au niveau matériel spécifique oxygène, sécurité, coût et infrastructure.
- L'utilisation de nitrox avec les qualifications nitrox requises (selon les dispositions de l'ancien arrêté du 9/7/2004 reprises dans le nouveau code du sport) permet l'absence de paliers et des taux d'azote résiduel plus faibles. L'utilisation de nitrox 40/60 préfabriqué permet d'utiliser sur des blocs marqués mélange nitrox des détendeurs personnels existant à usage air (conformes à la réglementation actuelle) ou des matériels spécifiques nitrox (blocs, robinetteries, et détendeurs conformes à la norme européenne EN-144-3, obligatoires à la vente à partir de 11/2008, fin de la période transitoire de 5 ans pour l'application de la norme)
- Avantage global à la plongée nitrox ! Sécurité accrue, matériel (pour l'instant) courant, qualifications simples, organisation de plongée facile, coût peu élevé.

3 Modèles de décompression. (6 points)

Deux modèles de décompression sont largement utilisés par nos ordinateurs de plongée : Certains sont basés sur un modèle de type "Haldanien" alors que d'autres utilisent le principe dit "des microbulles".

a. Quelles sont les hypothèses de base utilisées pour la conception de ces deux modèles. (3 points)

Un modèle de décompression est une approche mathématique dont l'objectif est de quantifier et de décrire les diverses manifestations de l'azote dans la décompression. Les modèles actuels utilisent en fait deux hypothèses : l'une qui va porter sur les critères d'ascension donc la vitesse et l'autre sur l'échange gazeux, perfusion ou diffusion.

Le modèle dit de Haldane, est un modèle dit à perfusion. On y considère, en théorie tout au moins, que l'organisme est constitué par un certain nombre de tissus modélisés par des compartiments. Ceux-ci se chargent en azote (par échange avec la circulation sanguine et elle seule), d'une façon dite exponentielle, lorsque la pression partielle du gaz qui leur est imposée augmente. Ils se déchargent, de la même façon, lorsqu'elle diminue.

Les tissus sont des parties distinctes de l'organisme alors que les compartiments sont constitués par un ensemble de tissus ayant les mêmes caractéristiques du point de vue de la saturation et de la désaturation. (la période " T " et le coefficient de sursaturation critique " Sc "). Ces deux valeurs permettent de calculer la valeur minimum de la pression absolue tolérée.

Ces considérations constituent un modèle dont le principe a été énoncé par John Scott HALDANE. Il a servi par la suite de base de départ à la plupart des autres (Sur la base de ces principes, le Modèle de Bühlmann a été affiné et développé en particulier pour la plongée à toutes altitudes.)

Le modèle de Haldane prenait en compte la phase dissoute des gaz jusqu'au moment de leur passage en phase gazeuse et supposait que les accidents ne se produisaient que lors de l'apparition de bulles dans l'organisme (i.e. en simplifiant lorsque $TN_2/P_{abs} \geq Sc$ pour un compartiment). En l'absence théorique de bulles, la vitesse de remontée avant le premier palier n'avait donc pas d'incidence et pouvait donc être « rapide ».

Le modèle à micro bulles se fonde avant tout sur la naissance et l'évolution des bulles de gaz dans l'organisme.

Des études et observations plus récentes considèrent que des noyaux gazeux de CO_2 , servent de relais à la production des micro bulles. Ces noyaux gazeux de quelques microns, non prédictibles, se produisent en permanence dans l'organisme par cavitation dans le cœur ou, par frottement dans les vaisseaux sanguins. Les micro bulles se forment à partir de ces noyaux gazeux. Elles n'obéissent pas uniquement à la loi de Mariotte. Elles se nourrissent de l'azote environnant. Leur durée de vie est de quelques millisecondes lorsque la pression ambiante est stable. Elles circulent librement, dans la circulation veineuse, sans être pathogènes.

A la suite d'une remontée, lorsque la pression diminue, leur durée de vie augmente et, en se déplaçant des capillaires aux poumons, elles ont le temps de grossir, de se regrouper, de se transformer en bulles, et de devenir pathogène dans la phase finale de la plongée.

La prise en compte de ces micro bulles, l'étude de leur comportement vis à vis des gaz sous pression et leur modélisation a donné naissance aux modèles à micro bulles (VPM, RGPM).

En particulier, ces modèles basés sur le comportement des microbulles à abouti à la préconisation de paliers « profonds » et à des vitesses de remontée lentes, ce qui semble limiter la formation de bulles pathogènes.

b. Exposez les conséquences de l'utilisation d'un ordinateur basé sur l'une ou l'autre de ces deux approches pour le plongeur. (2 points)

Pour éviter ou en tout cas réduire le phénomène d'apparition de micro bulles, les ordinateurs à base de modèle à micro bulles (type RGBM) recommandent de réaliser des paliers plus profonds que ceux indiqués généralement par les ordinateurs à modèle Haldane/Bühlmann. Ainsi les micro bulles, dont la durée de vie est faible, disparaissent avant d'avoir pu grossir. De même, la vitesse de remontée préconisée est plus lente, même avant les premiers paliers des tables MN90.

La vitesse de remontée est déterminante dans l'évolution des micro bulles. La vitesse idéale est celle pour laquelle les micro bulles se résorbent spontanément sans se développer. C'est pourquoi dans de nombreux appareils on a choisi des vitesses très lentes surtout au voisinage de la surface.

Un profil calculé avec ordinateur utilisant un modèle micro bulles impose les premiers paliers à une profondeur plus importante (parfois proche de la mi profondeur max) qu'avec les modèles traditionnels type Haldane/Buhlmann. Par contre, les derniers paliers (plus proches de la surface) sont souvent plus courts qu'avec ces mêmes modèles.

Actuellement, plusieurs ordinateurs intègrent les modèles de base de Bühlmann et y rajoutent un soupçon de RGBM qui permet de durcir le modèle de base, surtout lors de la plongée « Yoyo ». C'est le cas des derniers Uwatec de la famille « Smart ».

- c. Montrez que la physiologie du plongeur est obligatoirement plus ou moins différente d'un modèle quel qu'il soit. (1 point)

Un modèle de décompression est une représentation mathématique de l'organisme et de son comportement vis-à-vis des gaz dissous. Quelle que soit la base physiologique sous jacente, il reste un modèle qui est le même pour tous les individus. (Bien que de plus en plus les ordinateurs permettent de paramétrer le modèle au plongeur, par le choix de différents critères adaptatifs et la prise en compte de paramètres tels que la consommation, la température, ..).

Le modèle trouve aussi ses limites dans sa validation. Le fait qu'il ait été validé sur un ensemble suffisamment grand de plongées et de plongeurs ne certifie pas que tous les plongeurs sont représentés dans cet échantillon. Un exemple en a été donnée avec l'évolution des tables GERS65 (validés sur des plongeurs militaires mais utilisées aussi par des plongeurs loisir) et leur évolution vers les MN90.

L'évolution actuelle de la procédure de validation des modèles déterministes « classiques » va vers l'utilisation de banques de données de plongées (profils de plongée) pour valider les modèles de manière statistique.

Dans le même esprit, ont aussi été développés des modèles « probabilistes » conçus à partir d'approche et d'analyse statistique des bases de données et avec une approche probabiliste de l'accident. Le modèle déterministe physiologique sous jacent n'existe plus ! ...et on est alors très loin de la physiologie du plongeur !

3 Remontée rapide et redescente à mi profondeur. (6 points)

- a. Pourquoi la procédure de la MN90 impose-t-elle de redescendre à mi-profondeur pendant 5 mn moins de trois minutes après une remontée rapide ? (4 points)

Dans le modèle Haldanien utilisé par la table MN90 avec 12 compartiments (le plus long de 120 mn ayant le Sc le plus faible de 1.54), la relation entre TN2 et Pabs : $TN2/Pabs < Sc$ définit pour les compartiments théoriques le seuil théorique d'apparition de bulles (« dégazage anarchique »).

Lors d'une remontée rapide il y a risque de dépassement du seuil critique de saturation de certains compartiments théoriques et donc risque de dégazage réel dans certains tissus.

Pour limiter ces risques il faut redescendre en un temps inférieur à 3 mn à une profondeur telle que la pression absolue soit suffisamment élevée pour que $Pabs > TN2/Sc$ avec le Sc le plus faible soit 1,54 pour les tables de la Mn90., en un temps inférieur à 3 mn.

Si l'on considère (pire cas) que le tissu long (120') est complètement saturé à la pression correspondant à la profondeur maximale atteinte : $TN2 = Pabs_{max} * 0.8$.

On a alors : $Pabs_{max} \text{ de la plongée} \times 0,8 / Pabs_{minimum} = 1,54$

Et : $P_{abs} \text{ de la plongée} \times 0,519 = P_{abs} \text{ minimum}$

Donc il faut redescendre à une profondeur où la pression absolue soit au moins égale à 0,52 fois la pression maximale subie au cours de la plongée, c'est à dire par commodité d'usage une $\frac{1}{2}$ fois la profondeur.

Le temps passé (5 mn) à mi profondeur est justifié pour permettre l'élimination par la circulation et la ventilation des bulles existantes issues de la remontée rapide (devenues plus petites du fait de la pression ambiante)

b. Quelles sont les limites de cette procédure. (2 points)

Cette procédure basée sur un calcul théorique prend plusieurs hypothèses au niveau physiologique :

- a. Que le temps en surface inférieur à 3 mn soit suffisamment court pour ne pas permettre le dégazage et l'apparition en nombre important et pathogènes de bulles dans la circulation.
- b. Que le temps passé (5 mn) à mi profondeur soit suffisant pour permettre l'élimination par la circulation et la ventilation des bulles existantes issues de la remontée rapide
- c. Que le modèle Haldanien s'applique

Or les études récentes montrent qu'il y a apparition de bulles (à partir de noyaux gazeux de CO₂) tout au long de la plongée, favorisée par certains paramètres : effort, hyperventilation, vitesse de remontée rapide, pression ambiante.

Cette procédure est issue d'hypothèses basée sur des modèles Haldaniens. Elle permet de répondre pratiquement à un problème de décompression en plongée. Mais il existe ailleurs d'autres modèles et procédures.